TESIS – TM185400

PENGEMBANGAN PROTOTIP *BALL SCREW REGENERATIVE SHOCK ABSORBER* (BSRSA)-*BEVEL GEAR* UNTUK KENDARAAN *PICKUP*

DHION KHAIRUL NUGRAHA
NRP. 021118 500 80004

Dosen Pembimbing
Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng.

Program Magister
Bidang Keahlian Desain Sistem Mekanikal
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

TESIS – TM185400

PENGEMBANGAN PROTOTIP *BALL SCREW REGENERATIVE SHOCK ABSORBER* (BSRSA)-*BEVEL GEAR* UNTUK KENDARAAN *PICKUP*

DHION KHAIRUL NUGRAHA
NRP. 021118 500 80004

Dosen Pembimbing
Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng.

Program Magister
Bidang Keahlian Desain Sistem Mekanikal
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T.)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

DHION KHAIRUL NUGRAHA
NRP : 02111850080004

Tanggal Ujian : 20 Januari 2020
Periode Wisuda : Maret 2020

Disetujui oleh :

Pembimbing:

1. Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng. ....
   NIP. 19750511 199903 1001

Penguji:

1. Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA. ....
   NIP. 19650810 199102 1001

2. Dr.Eng. Unggul Wasiwitono, S.T., M.Eng.Sc. ....
   NIP. 19780510 200112 1001

3. Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T. ....
   NIP. 19700412 199703 2003

Kepala Departemen Teknik Mesin,
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

Dr. Ir. Atok Setiawan, M.Eng.Sc.
NIP. 19660402 198903 1002

(halaman ini sengaja dikosongkan)

PENGEMBANGAN PROTOTIP *BALL SCREW REGENERATIVE SHOCK ABSORBER* (BSRSA)-*BEVEL GEAR* UNTUK KENDARAAN *PICKUP*

Nama Mahasiswa	: Dhion Khairul Nugraha
NRP	: 02111850080004
Dosen Pembimbing	: Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng.

ABSTRAK

Shock absorber merupakan komponen penting pada sistem suspensi kendaraan yang berguna untuk meredam getaran yang diakibatkan kontur jalanan yang tidak rata. Pada konvensional *shock absorber*, terdapat mekanisme hidrolik yang meredam getaran dan energi redaman terbuang begitu saja menjadi panas. Melalui mekanisme *Regenerative Shock absorber* (RSA), energi terbuang akan dimanfaatkan menjadi energi listrik. Penelitian dan pengembangan mengenai RSA telah dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu dengan berbagai mekanisme yang berbeda. Terdapat linear RSA dan rotary RSA. Pada rotary RSA, dibagi lagi menjadi beberapa jenis sesuai dengan mekanisme pengubah gerak naik turun pada suspensi menjadi gerak rotasi untuk memutar generator, yaitu *rack* dan *pinion*, hidrolik, mekanisme lengan, dan *ball screw*.

Pada penelitian ini dirancang dan dianalisa *Ball Screw Regenerative Shock absorber* (BSRSA) dengan mekanisme *bevel gear* sebagai pengubah dua arah putar menjadi 1 arah putar generator. *Ball screw* merupakan mekanisme pengubah gerak rotasi menjadi gerak linier atau sebaliknya. Pada *ball screw*, terdapat dua komponen utama yaitu *nut* dan s*crew*. Di dalam *nut* terdapat bola-bola yang bergesekan dengan *screw* yang akan mengubah gerak. Karena yang bergesekan adalah bola, maka koefisien gesek yang terjadi kecil sehingga efisiensi mekanisme pengubah arahnya cukup tinggi. Terdapat *spur gear* untuk menghubungkan dengan generator.

Karakteristik dari BSRSA didapatkan dari hasil simulasi menggunakan MATLAB. Terdapat 3 variasi rasio *spur gear* yang dianalisa untuk mendapatkan karakteristik gaya redam yaitu 0,4 ; 0,6 ; dan 1,5. Hasilnya adalah karakteristik gaya redam yang dihasilkan berbeda dibandingkan dengan konvensional *shock absorber*. Untuk kendaraan *pickup*, rasio *spur gear* yang sesuai adalah 0,6. BSRSA diuji pada kendaraan *pickup* dengan 4 tipe jalan yang berbeda yaitu polisi tidur, *speed trap*, jalan aspal dan jalan paving. Pada masig-masing tipe jalan terdapat 3 variasi kecepatan. RMS Daya bangkitan yang dihasilkaan adalah sebesar 2,29 Watt, 3,82 Watt, 0,03 Watt dan 2,11 Watt masing-masing untuk polisi tidur, *speed trap*, jalan aspal dan jalan paving. Daya bangkitan yang dihasilkan hanya sebesar 25% dan 20% dari potensi daya bangkitan dari hasil simulasi untuk tipe jalan polisi tidur dan *speed trap*. Apabila membandingkan respon percepatan kendaraan antara BSRSA dengan konvesional *shock absorber*, nilai respon percepatan BSRSA masih lebih tinggi, sehingga dapat dikatakan kemampuan meredam getarannya masih belum maksimal.

Kata kunci : *ball screw, bevel gear, regenerative shock absorber*, suspensi kendaraan

(halaman ini sengaja dikosongkan)

PROTOTYPE DEVELOPMENT OF BALL SCREW REGENERATIVE SHOCK ABSORBER (BSRSA)-BEVEL GEAR FOR PICKUP TRUCK

By	: Dhion Khairul Nugraha
Student Identity Number	: 02111850080004
Supervisor	: Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng.

ABSTRACT

Shock absorber is one of the most important equipment in vehicle suspension. It is used to absorb the vibration from bumpy road. In conventional shock absorber, there is a hydraulic mechanism to absorb the vibration energies and produce waste heat. Regenerative Shock Absorber (RSA) is used to utilize waste heat in vehicle suspension. This mechanism is harvesting energy from vehicle suspension vibration to generate electricity. RSA is divided into two categories linear RSA and rotary RSA. A linear RSA consists of linear magnet and coils behind. This linear RSA is directly generating electricity. For Rotary RSA, the mechanism is first converting linear motion from suspension into rotary motion. This rotary motion coupled with generator and generate electricity. Based on the way of converting the linear reciprocating motion of vehicle suspension, the rotary RSA can be divided into the rack pinion, hydraulic, algebraic mechanism, and ball screw.

This thesis provides design and analysis of prototype development of Ball Screw Regenerative Shock Absorber (BSRSA) with bevel gear. The bevel gear is used for converting bidirectional rotation into unidirectional rotation. In ball screw mechanism, there are two main components, nut and screw. The nut consists of a ball that contacts with screw and converts linear motion into rotary motion. The friction between nut and screw is small due to the ball. Since the friction is small, the conversion efficiency is high. There is a couple of spur gear to connect with generator.

The simulation conducted to know the characteristic of BSRSA damping force using MATLAB. There are 3 spur gear ratio, 0,4 ; 0,6 ; and 1,5. The result is that the damping force characteristics are different from conventional shock absorber. For a pickup truck, the spur gear ratio is 0,6. The BSRSA is installed in pickup truck and pass through 4 different types of road. The road types are speed bump, speed trap, asphalts road, and paving road. Three different velocities conducted for each types of road. The RMS power harvesting from BSRSA were 2,29 Watt, 3,82 Watt, 0,03 Watt and 2,11 Watt respectively for speed bump, speed trap, asphalt road, and paving road. These power harvesting only 25% and 20% from potential power taken from the simulation of speed bump and speed trap respectively. The chassis acceleration of conventional shock absorber still better than BSRSA. It means that the BSRSA still not perform well to absorb vibration from roads.

.
Index term: *ball screw, bevel gear, regenerative shock absorber*, *vehicle suspension*

(halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena berkat limpahan rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan tesis dengan judul "Pengembangan Prototip Ball Screw Regenerative Shock Absorber (BSRSA)-*Bevel Gear* untuk Kendaraan *Pickup*". Penyusunan tesis ini dapat terlaksana dengan baik atas bantuan dan kerjasama dari beberapa pihak. Untuk itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada :

1. Widya Prapti Pratiwi, istri penulis dan rekan seperjuangan mengerjakan tesis yang sama-sama tak henti saling memberi support agar bisa lulus bersamaan.
2. Altair Tangguh Nugraha, anugerah terindah penulis yang hadir disaat penulis tengah berjuang menyelesaikan tesis ini.
3. Bapak Murwandono dan Ibu Erna Kadaryanti, selaku orang tua penulis dan saudara tercinta Dhanar Khairul Dwiandono yang tiada henti memberikan doa dan dukungan tiada henti.
4. Bapak Mugiyo dan Ibu Rr.Sri Rahayu selaku bapak dan ibu mertua penulis yang juga tak lelah untuk memberikan doa dan dukungan.
5. Keluarga besar R.Walidarmo dan keluarga besar Wignyo Sumarto yang senantiasa memberi do'a dari jauh.
6. Bapak Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, ST. M.Eng, selaku dosen pembimbing dan dosen wali yang selalu memberi bimbingan serta arahan bagi penulis dalam menyelesaikan tesis ini.
7. Bapak. Dr.Eng Unggul Wasiwitono, ST, M.Eng.Sc, Bapak Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA., dan Ibu Dr. Wiwiek Hendrowati ST. MT., selaku dosen penguji tesis yang telah memberi masukan kepada penulis
8. Segenap civitas akademik Departemen Teknik Mesin, rekan-rekan Pascasarjana Teknik Mesin ITS 2018, dan penghuni Lab Vibrasi, terima kasih atas pengetahuan dan pembelajaran yang telah diberikan kepada penulis.

Penulis menyadari tesis ini masih terdapat kelemahan dan membutuhkan penyempurnaan. Oleh sebab itu masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan demi kebaikan penelitian ini. Akhirnya penulis berharap semoga tulisan ini dapat memberikan manfaat bagi siapa saja yang membacanya.

Surabaya, Januari 2020

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TESIS iii
ABSTRAK iii
KATA PENGANTAR ix
DAFTAR ISI xi
DAFTAR GAMBAR xiii
DAFTAR TABEL xix
BAB 1 PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan 3
1.4 Manfaat 3
1.5 Batasan Masalah 4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1 *Regenerative Shock absorber* (RSA) 5
2.2 Sistem Peredam Getaran 12
2.2.1 Redaman Mekanik 12
2.2.2 Redaman Elektrik 13
2.3 Generator Listrik 14
2.4 Mekanisme *Ball Screw* 16
2.5 Transmisi Roda Gigi 18
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN 21
3.1 Diagram Alir Penelitian 21
3.2. Studi Literatur 24
3.3. Perancangan Desain BSRSA-*Bevel gear* 25
3.4. Penurunan Model Matematis 27
3.5 Model Matematis Kendaraan 31
3.6 Simulasi Karakteristik RSA dan Seperempat Kendaraan 32
3.6.1 Simulasi Karakteristik RSA 32
3.6.2 Simulasi Seperempat Kendaraan 33
3.7 Pengujian pada Kendaraan 33
3.8 Peralatan yang Digunakan 37
3.9 Pengolahan Data Hasil Pengujian 40
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN 41
4.1 Hasil Simulasi Karakteristik BSRSA 41
4.2 Hasil Simulasi Pemodelan Seperempat Kendaraan 54
4.2.1 Simulasi dengan Profil Jalan Polisi Tidur 54
4.2.2 Simulasi dengan Profil Jalan Speed Trap 60
4.3 Rancang Bangun BSRSA-*Bevel Gear* 65
4.3.1 Deskripsi Desain 65

4.3.2 Perbandingan *BSRSA-Bevel Gear* dengan Konvensional *Shock Absorber* 68
4.3.3 Perbandingan *BSRSA* dengan Mekanisme RSA Lain 70
4.3.4 Pengujian Mekanisme 72
4.4 Pengujian BSRSA pada Kendaraan *Pickup* 76
4.4.1 Persiapan dan Instalasi BSRSA 76
4.4.2 Pengujian Melewati Polisi Tidur 78
4.4.3 Pengujian Melewati *Speed Trap* 86
4.4.4 Pengujian Melewati Jalan Aspal 98
4.4.5 Pengujian Melewati Jalan Paving 104
4.4.6 Pengujian dengan Berkendara Normal 113
4.4.7 Perbandingan dengan Hidrolik RSA 116
4.4.8 Perbandingan dengan BSRSA-*Spur Gear* 121
4.4.9 Hubungan Antara Respon Percepatan dengan Daya Bangkitan 124
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN 127
5.1 Kesimpulan 127
5.2 Saran 128
DAFTAR PUSTAKA 129
LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 RSA Tipe Linear Magnet (Tang dkk, 2014) 5
Gambar 2.2 RSA Tipe Rack dan Pinion Guntur dkk (2013) 6
Gambar 2.3 RSA Tipe Rack dan Pinion Zhang dkk (2016) 7
Gambar 2.4 RSA Tipe Helical Gear Salman dkk (2018) 7
Gambar 2.5 RSA Tipe Hidrolik dengan Dua Generator Terpasang Seri 8
Gambar 2.6 RSA Tipe Mekanisme Lengan Maravandi (2015) 9
Gambar 2.7 RSA Ball Screw (a) Bowen dkk (2019a) dan (b) Xie dkk (2018)........10
Gambar 2.8 RSA Ball Screw dengan parameter SWT Xie (2017) 11
Gambar 2.9 RSA Menggunakan Kabel dan Pulley Bowen dkk (2019b).................12
Gambar 2.10 Karakteristik Gaya Redam Diakibatkan oleh Inersia 13
Gambar 2.11 Karakteristik Gaya Redam Diakibatkan oleh Damping Friction 13
Gambar 2.12 Karakteristik Gaya Redam Elektrik..14
Gambar 2.13 Generator Tamagawa TBL-i II Series TS4607N1033E200 15
Gambar 2.14 Skema Generator 3 Fasa (Maravandi dkk, 2017)................................15
Gambar 2.15 Konstruksi dan Desain Ball Screw 17
Gambar 2.16 Mekanisme Pemanen Energi pada Rel Kereta Api Menggunakan Ball Screw oleh Pan dkk (2019)...18
Gambar 2.17 Bevel Gear SMB1-20 19
Gambar 2.18 Spur gear SSA-1-60 dan SSA-1-36..19
Gambar 3.1 Diagram Alir Simulasi Karakteristik BSRSA 22
Gambar 3.2 Diagram Alir Simulasi Seperempat Kendaraan BSRSA.......................23
Gambar 3.3 Diagram Alir Rancang Bangun dan Pengujian BSRSA.......................24
Gambar 3.4 Gambar Isometrik BSRSA Mekanisme Bevel Gear 25
Gambar 3.5 Mekanisme BSRSA-Bevel gear (a) Assembly (b) Detail Pengubah Arah Putar Bevel gear 26
Gambar 3.6 Free Body Diagram Keseluruhan Sistem BSRSA................................27
Gambar 3.7 Free Body Diagram Gear 1...27
Gambar 3.8 Free Body Diagram Gear 2...27
Gambar 3.9 Free Body Diagram Gear 4...28
Gambar 3.10 Free Body Diagram Gear 5...28
Gambar 3.11 Free Body Diagram Generator 29
Gambar 3.12 Model Seperempat Kendaraan 2 DOF 31
Gambar 3.13 Lokasi Pemasangan BSRSA Bagian Kiri Belakang Pickup.................34
Gambar 3.14 Profil Polisi Tidur untuk Pengujian...35
Gambar 3.15 Profil Speed Trap untuk Pengujian..35
Gambar 3.16 Profil Jalan Aspal Rata 36
Gambar 3.17 Profil Jalan Paving Tidak Rata 36
Gambar 3.18 Oscilloscope 37

Gambar 3.19 Accelerometer 37
Gambar 3.20 Power Inverter 38
Gambar 3.21 Inverter 38
Gambar 3.22 Probe Tegangan 38
Gambar 3.23 Wirewound Resistor 39
Gambar 3.24 Dioda 3 Fasa 39
Gambar 4.1 Plot Grafik Koefisien Redaman BSRSA Rasio Spur Gear 42
Gambar 4.2 Grafik Gaya Redam – Perpindahan untuk Rasio Spur Gear 0,4 43
Gambar 4.3 Grafik Gaya Redam – Kecepatan untuk Rasio Spur Gear 0,4 43
Gambar 4.4 Komponen Gaya Redam pada Rasio Spur Gear 0,4 44
Gambar 4.5 Energi Bangkitan (a) Daya, (b) Voltase, (c) Arus BSRSA untuk Rasio Spur Gear 0,4 46
Gambar 4.6 Grafik Gaya Redam – Perpindahan untuk Rasio Spur Gear 0,6 47
Gambar 4.7 Grafik Gaya Redam – Kecepatan untuk Rasio Spur Gear 0,6 47
Gambar 4.8 Komponen Gaya Redam pada Rasio Spur Gear 0,6 48
Gambar 4.9 Energi Bangkitan (a) Daya, (b) Voltase, dan (c) Arus BSRSA untuk Rasio Spur Gear 0,4 49
Gambar 4.10 Grafik Gaya Redam – Perpindahan untuk Rasio Spur Gear 1,5 50
Gambar 4.11 Grafik Gaya Redam – Kecepatan untuk Rasio Spur Gear 1,5 50
Gambar 4.12 Komponen Gaya Redam pada Rasio Spur Gear 1,5 51
Gambar 4.13 Energi Bangkitan (a) Daya, (b) Voltase, dan (c) Arus BSRSA untuk Rasio Spur Gear 1,5 52
Gambar 4.14 Gaya Redam – Perpindahan untuk Masing-Masing Rasio 53
Gambar 4.15 Gaya Redam – Perpindahan untuk Masing-Masing Rasio 53
Gambar 4.16 Perbandingan Gaya Inersia pada Masing-Masing Rasio 54
Gambar 4.17 Profil Input Eksitasi Polisi Tidur 56
Gambar 4.18 Simulasi Respon Dinamis Perpindahan Body Kendaraan Polisi Tidur pada Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, dan (c) 20 km/jam. .. 57
Gambar 4.19 Simulasi Daya Bangkitan Melewati Polisi Tidur pada Kecepatan 58
Gambar 4.20 Simulasi Respon Dinamis Percepatan Body Kendaraan Polisi Tidur Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, dan (c) 20 km/jam. 59
Gambar 4.21 Profil Input Eksitasi Speed Trap 61
Gambar 4.22 Simulasi Respon Dinamis Perpindahan Body Kendaraan Speed Trap pada Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, dan (c) 20 km/jam. ... 62
Gambar 4.23 Simulasi Daya Bangkitan Melewati Speed Trap 63
Gambar 4.24 Simulasi Respon Dinamis Percepatan Body Kendaraan Speed Trap Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam dan (c) 20 km/jam. 64
Gambar 4.25 Desain Assembly BSRSA 65
Gambar 4.26 (a) One-Way Bearing NTN 0612 (b) Thrust Bearing ASB F8-19 67
Gambar 4.27 (a) Linear Bearing LMH-8UU (b) Ball Bearing ASB 625 dan ASB 688 67

Gambar 4.28 Perbandingan BSRSA dengan Konvensional Shock Absorber............68
Gambar 4.29 Perbandingan BSRSA dengan (a) RSA Rack Pinion dan (b) RSA Hidrolik..70
Gambar 4.30 (a) Pemasangan Plat Penghubung Nut (b) Pemasangan Akhir Mekanisme Ball Screw..73
Gambar 4.31 Detail Pemasangan Mekanisme MMR Bevel Gear..............................73
Gambar 4.32 Detail Pemasangan Mekanisme Spur Gear 74
Gambar 4.33 Energi Bangkitan BSRSA (a) Tanpa Pembebanan (b) Dengan Pembebanan Lampu 12 Volt 10 Watt 75
Gambar 4.34 Rangkaian Elektrik Pengambilan Data...76
Gambar 4.35 Instalasi BSRSA pada Suspensi Pickup 77
Gambar 4.36 Peralatan yang Digunakan Saat Pengujian...78
Gambar 4.37 Voltase dan Daya BSRSA Melewati Polisi Tidur 10 km/jam..............79
Gambar 4.38 Voltase dan Daya BSRSA Melewati Polisi Tidur 15 km/jam..............79
Gambar 4.39 Voltase dan Daya BSRSA Melewati Polisi Tidur 20 km/jam..............79
Gambar 4.40 Perbandingan (a) Voltase dan (b) Daya Melewati Polisi Tidur untuk Tiap Kecepatan...81
Gambar 4.41 Perbandingan Respon Percepatan Konvensional Shock Absorber dengan BSRSA pada Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, dan (c) 20 km/jam...82
Gambar 4.42 Perbandingan RMS Percepatan Konvensional Shock Absorber dengan BSRSA Profil Jalan Polisi Tidur...83
Gambar 4.43 Perbandingan Daya Bangkitan Polisi Tidur Antara Simulasi dengan Eksperimen untuk Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, dan (c) 20 km/jam...84
Gambar 4.44 Perbandingan Respon Percepatan Polisi Tidur Antara Simulasi dengan Eksperimen untuk Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, dan (c) 20 km/jam...85
Gambar 4.45 Voltase dan Daya BSRSA Melewati Speed Trap 10 km/jam 87
Gambar 4.46 Voltase dan Daya BSRSA Melewati Speed Trap 15 km/jam 88
Gambar 4.47 Voltase dan Daya BSRSA Melewati Speed Trap 20 km/jam 88
Gambar 4.48 Perbandingan (a) Voltase dan (b) Daya Bangkitan Speed Trap...........89
Gambar 4.49 Perbandingan Respon Percepatan Konvensional Shock Absorber dengan BSRSA Melewati Speed Trap 90
Gambar 4.50 Perbandingan RMS Percepatan Konvensional Shock Absorber dengan BSRSA Profil Jalan Speed Trap 91
Gambar 4.51 Perbandingan Daya Bangkitan Speed Trap Antara Simulasi dengan Eksperimen untuk Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, dan (c) 20 km/jam...93
Gambar 4.52 Perbandingan Respon Percepatan Speed Trap Antara Simulasi dengan Eksperimen untuk Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, dan (c) 20 km/jam...94

Gambar 4.53 Perbandingan Voltase dan Daya Bangkitan Melewati Polisi Tidur dengan Speed Trap pada Kecepatan 20 km/jam 95
Gambar 4.54 Perbandingan RMS Daya antara Polisi Tidur dan Speed Trap........... 96
Gambar 4.55 Perbandingan Respon Percepatan (a) BSRSA dan (b) Konvensional Shock Absorber pada Kecepatan 20 km/jam 97
Gambar 4.56 Voltase dan Daya Bangkitan BSRSA Melewati Jalan Aspal 10 km/jam 99
Gambar 4.57 Voltase dan Daya Bangkitan BSRSA Melewati Jalan Aspal 20 km/jam 99
Gambar 4.58 Voltase dan Daya Bangkitan BSRSA Melewati Jalan Aspal 30 km/jam 100
Gambar 4.59 Perbandingan (a) Voltase dan (b) Daya Bangkitan Melewati Jalan Aspal 101
Gambar 4.60 Perbandingan Respon Percepatan Konvensional Shock Absorber dengan BSRSA Melewati Jalan Aspal... 102
Gambar 4.61 Perbandingan RMS Percepatan Konvensional Shock Absorber dengan BSRSA Profil Jalan Aspal 103
Gambar 4.62 Voltase dan Daya BSRSA Melewati Jalan Paving 10 km/jam........... 104
Gambar 4.63 Voltase dan Daya BSRSA Melewati Jalan Paving 20 km/jam........... 105
Gambar 4.64 Voltase dan Daya BSRSA Melewati Jalan Paving 30 km/jam........... 105
Gambar 4.65 Perbandingan (a) Voltase dan (b) Daya Bangkitan Melewati Jalan Paving 107
Gambar 4.66 Perbandingan Respon Percepatan Konvensional Shock Absorber dengan BSRSA Melewati Jalan Paving... 108
Gambar 4.67 Perbandingan RMS Percepatan Konvensional Shock Absorber dengan BSRSA Profil Jalan Paving.. 109
Gambar 4.68 Perbandingan (a) Voltase dan (b) Daya Bangkitan Melewati Jalan Aspal dengan Jalan Paving pada Kecepatan 30 km/jam..................... 110
Gambar 4.69 Perbandingan RMS Daya antara Jalan Aspal dan Jalan Paving 111
Gambar 4.70 Perbandingan Respon Percepatan Melewati Jalan Aspal dengan Jalan Paving pada Kecepatan 30 km/jam (a) BSRSA dan (b) Konvensional.. 112
Gambar 4.71 (a) Voltase dan (b) Daya Bangkitan yang Dihasilkan dengan Berkendara Normal Percobaan Pertama 114
Gambar 4.72 (a) Voltase dan (b) Daya Bangkitan yang Dihasilkan dengan Berkendara Normal Percobaan Kedua.. 115
Gambar 4.73 Perbandingan Konvensional Shock Absorber dengan BSRSA dengan Berkendara Normal 116
Gambar 4.74 Mekanisme RSA Hidrolik 2 Input 1 Output (Satria, 2016)................ 117
Gambar 4.75 Voltase Bangkitan (a) BSRSA dan (b) RSA Hidrolik Generator Seri Melewati Polisi Tidur pada Kecepatan 20 km/jam 120

Gambar 4.76 Susunan Roda Gigi untuk Mekanisme BSRSA-Spur Gear 121
Gambar 4.77 Rekapitulasi Daya Bangkitan BSRSA Bevel Gear dengan Spur Gear (a) Polisi Tidur, (b) Speed Trap, (c) Jalan Aspal, (d) Jalan Paving......122
Gambar 4.78 Rekapitulasi Respon Percepatan BSRSA Bevel Gear dengan Spur Gear (a) Polisi Tidur, (b) Speed Trap, (c) Jalan Aspal, (d) Jalan Paving......123
Gambar 4.79 Hubungan Antara RMS Daya dan Respon Percepatan untuk Jalan Polisi Tidur 125
Gambar 4.80 Hubungan Antara RMS Daya dan Respon Percepatan untuk Jalan Speed Trap 125
Gambar 4.81 Hubungan Antara RMS Daya dan Respon Percepatan untuk Jalan Aspal 126
Gambar 4.82 Hubungan Antara RMS Daya dan Respon Percepatan untuk Jalan Paving 126

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Spesifikasi Roda Gigi 19
Tabel 3.1 Parameter Simulasi Karakteristik BSRSA 30
Tabel 3.2 Parameter Simulasi Seperempat Kendaraan 32
Tabel 4.1 Perbandingan Nilai Koefisien Redaman Terhadap Rasio Spur Gear ... 41
Tabel 4.2 Nilai Acuan Kenyamanan Pengendara Tehadap Percepatan 58
Tabel 4.3 Spesifikasi Teknis BSRSA-Bevel Gear 66
Tabel 4.4 Perbandingan BSRSA dengan Konvensional Shock Absorber 68
Tabel 4.5 Perbandingan BSRSA dengan RSA Lain 71
Tabel 4.6 Rekapitulasi Voltase dan Daya Bangkitan Melewati Polisi Tidur........ 80
Tabel 4.7 Perbandingan RMS Daya Simulasi dan Eksperimen 85
Tabel 4.8 Perbandingan RMS Respon Percepatan Simulasi dan Eksperimen...... 86
Tabel 4.9 Rekapitulasi Voltase dan Daya Bangkitan Melewati Speed Trap 88
Tabel 4.10 Perbandingan RMS Daya Speed Trap Simulasi dan Eksperimen....... 93
Tabel 4.11 RMS Percepatan Speed Trap Simulasi dan Eksperimen 95
Tabel 4.12 Voltase dan Daya Melewati Polisi Tidur dan Speed Trap 97
Tabel 4.13 RMS Percepatan Melewati Polisi Tidur dan Speed Trap 98
Tabel 4.14 Rekapitulasi Voltase dan Daya Bangkitan Melewati Jalan Aspal.... 100
Tabel 4.15 Rekapitulasi Voltase dan Daya Bangkitan Melewati Jalan Paving .. 106
Tabel 4.16 Voltase dan Daya Melewati Jalan Aspal dan Jalan Paving 111
Tabel 4.17 RMS Percepatan Melewati Jalan Aspal dan Jalan Paving 112
Tabel 4.18 Voltase-Daya Bangkitan dan RMS Percepatan dengan Berkendara Normal 116
Tabel 4.19 Perbandingan BSRSA dengan RSA Hidrolik 2 Input 1 Output 118
Tabel 4.20 Perbandingan BSRSA dengan RSA Hidrolik 2 Generator Seri........ 120
Tabel 4.21 Perbandingan Dimensi BSRSA-Bevel Gear dengan Spur Gear 121

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Menurut data dari Departemen Energi Amerika (2014) , hanya sekitar 12%-30% dari energi bahan bakar yang dikonversikan pada kendaraan perkotaan. Artinya terdapat sekitar 70% hingga 88% energi yang terbuang. Energi yang terbuang dapat berupa energi panas pada mesin, elektrik, transmisi, dan getaran. Untuk meminimalisasi energi yang terbuang, para peneliti melakukan penelitian dengan memanfaatkan energi ini. Salah satunya adalah memanfaatkan energi yang terbuang (terdisipasi) pada sistem suspensi kendaraan melalui *shock absorber*. Pada konvensional *shock absorber*, terdapat mekanisme hidrolik yang meredam getaran dan energi redaman terbuang begitu saja menjadi panas. Melalui mekanisme *Regenerative Shock absorber* (RSA), energi terbuang akan dimanfaatkan menjadi energi listrik.

Beberepa peneliti telah menganalisa mengenai potensi energi yang terdapat pada sistem suspensi kendaraan. Potensi energi pada suspensi kendaraan yang dapat dimanfaatkan melalui sistem RSA ini adalah 100-400 Watt pada kecepatan 96 km/jam. Pendekatan model yang dilakukan adalah dengan 2 DOF seperempat kendaraan (Zuo dan Zhang, 2013). Simulasi lain mengenai potensi energi pada sistem suspensi kendaraan adalah dengan model kendaraan penuh 7 DOF. Hasilnya adalah 97-109 Watt pada kecepatan 72 km/jam pada kondisi jalan rata-rata (Kelas C) (Abdelkareem dkk, 2018a). Dengan potensi energi bangkitan yang dihasilkan, sistem RSA ini dapat meningkatkan efisiensi konsumsi bahan bakar 2-3% untuk kendaraan perkotaan dan 7-10% untuk kendaraan hybrid dan listrik (Zhang dkk, 2016).

Desain dari RSA dapat dikelompokkan menjadi dua bagian yaitu *linear* dan *rotary*. *Linear* RSA mengubah gerakan naik turun suspensi secara langsung melalui linear magnet untuk menghasilkan energi listrik. Sedangkan *rotary* RSA mengubah gerak naik turun suspensi menjadi gerak rotasional untuk selanjutnya dihubungkan dengan generator dan menghasilkan listrik. Desain dari *linear* RSA dapat mencapai efisiensi sebesar 70%-80%, namun memiliki koefisien redaman yang rendah,

sehingga apabila diaplikasikan pada kendaraan, akan berakibat menurunnya performa suspensi (Tang dkk, 2014). Karena menghasilkan koefisien redaman yang rendah, maka penelitian mengenai *rotary* RSA lebih mendominasi dalam beberapa tahun ke belakang.

Secara desain, rotary RSA dibagi lagi menjadi beberapa bagian berdasarkan konversi gerak linear menjadi rotasi. Pertama adalah RSA dengan mekanisme rack dan pinion. Mekanisme ini menggunakan roda gigi rack dan pinion serta transmisi roda gigi untuk mempercepat putaran generator. Kedua adalah RSA dengan mekanisme hidrolik. Pinsipnya adalah menggunakan mekanisme hidrolik untuk memutar motor hidrolik dan generator untuk menghasilkan listrik. Ketiga adalah RSA dengan mekanisme lengan, yaitu dengan memanfaatkan lengan yang dikombinasikan dengan *ball* untuk memutar generator. Dan yang keempat adalah RSA dengan mekanisme *ball screw* sebagai pengubah gerak linear menjadi gerak rotasi.

Pada penelitian ini, akan dikembangkan prototip *Ball Screw Regenerative Shock absorber* (BSRSA) untuk kendaraan *pickup. Ball screw* adalah *actuator* linier yang bertindak untuk mengubah gerak linier menjadi gerak rotasi dengan gesekan kecil ataupun sebaliknya. Gesekan yang terjadi kecil dikarenakan antara screw dan nut yang mengalami gesekan adalah bola. Beberapa kelebihan lain menggunakan *ball screw* adalah desain yang simpel, efisiensi mekanis yang cukup tunggi sehingga meminimalkan loses, tingkat akurasi yang tinggi, dan memiliki ketahanan yang paling tinggi diantara mekanisme lain (Abdelkareem dkk, 2018b). Terdapat penambahan transmisi roda gigi, yaitu *bevel gear*, untuk mengubah gerak rotasi dua arah menjadi satu arah, dan *spur gear*, sebagai penghubung dengan generator. Akan dilakukan simulasi terhadap beberapa variasi rasio *spur gear* untuk mengetahui karakteristik BSRSA dan nilai koefisien redaman dari suspensi kendaraan. Dengan adanya variasi rasio spur gear, akan didapatkan hubungan antara rasio spur gear dengan nilai koefisien redaman kendaraan, ditinjau dari segi mekanis. Dalam beberapa penelitian terdahulu, nilai koefisien redaman selalu ditinjau dari segi elektrik, terutama pada hambatan eksternal generator. BSRSA juga diuji pada kendaraan *pickup* dengan beberapa tipe jalan dan variasi kecepatan.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana prototip desain BSRSA dengan mekanisme pengubah dua arah rotasi menjadi satu arah rotasi dengan *bevel gear.*
2. Bagaimana karakteristik prototip BSRSA dengan variasi frekuensi dan rasio *spur gear*.
3. Bagaimana karakteristik energi bangkitan BSRSA dengan beberapa tipe jalan dan variasi kecepatan kendaraan *pickup.*
4. Bagaimana respon dinamis kendaraan *pickup* setelah dipasang prototip BSRSA dibandingkan dengan konvensional *shock absorber.*

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah,

1. Mendesain prototip BSRSA dengan mekanisme pengubah dua arah rotasi menjadi satu arah rotasi dengan *bevel gear* yang akan dipasang pada kendaraan *pickup*.
2. Memodelkan dan menyimulasikan karakteristik BSRSA dengan variasi frekuensi eksitasi dan rasio *spur gear*. Karakteristik ini meliputi gaya redam terhadap perpindahan dan kecepatan maupun energi bangkitan yang dihasilkan.
3. Mendapatkan karakteristik energi bangkitan yang dihasilkan BSRSA dengan beberapa tipe jalan dan variasi kecepatan.
4. Mendapatkan respon dinamis dari kendaraan pickup dengan pemasangan prototip BSRSA. Hasilnya akan dibandingkan dengan respon dinamis kendaraan menggunakan konvensional *shock absorber*.

1.4 Manfaat

Berdasarkan tujuan di dalam penelitian ini, maka manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini adalah :

1. Pengembangan pembuatan prototip BSRSA sesuai dengan perancangan desain.

2. Sebagai data referensi tentang nilai koefisien redaman bila dibandingkan dengan konvensional *shock absorber*.
3. Hasil penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai acuan pengembangan RSA berikutnya.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

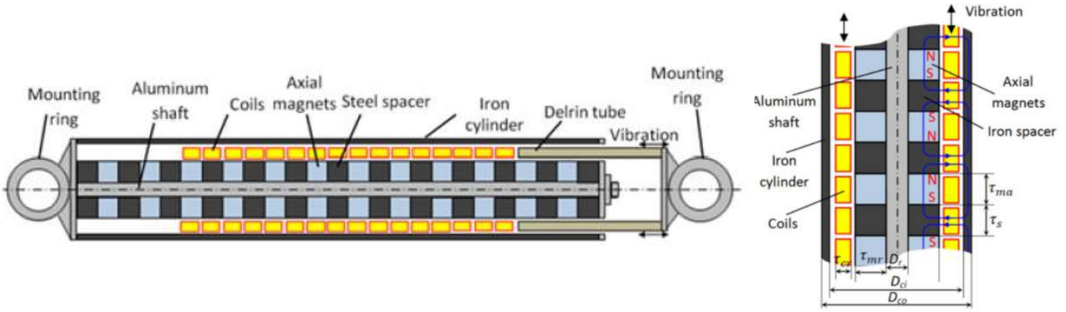
1. Penelitian ini fokus pada proses pengembangan dan pembuatan prototip RSA dengan mekanisme *ball screw.*
2. Material prototip *ball screw* dianggap kuat.
3. Parameter simulasi menggunakan data-data dari penelitian sebelumnya yang sejenis.
4. Parameter prototip *ball screw* standar pabrikan sesuai dengan yang telah tertulis pada spesifikasi.
5. Konvensional *shock absorber* pada *pickup* berfungsi dengan baik.
6. Respon dinamis yang dianalisa pada *pickup* adalah percepatan vertikal kendaraan.
7. Kecepatan melewati tipe jalan uji dianggap konstan sesuai dengan variasi kecepatan uji.

BAB 2
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Regenerative Shock absorber* (RSA)

Regenerative shock absorber (RSA) merupakan sebuah mekanisme *shock absorber* (peredam getaran) yang dapat menghasilkan energi listrik. Dari cara menghasilkan energi listrik, RSA dapat dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu *linear* dan *rotary*. *Rotary* RSA sendiri terbagi menjadi beberapa jenis, ditinjau dari mekanisme mengubah gerak linier pada suspensi menjadi gerak rotasi untuk menghasilkan listrik melalui generator, yaitu *rack pinion,* hidrolik*,* mekanisme lengan, *ball screw,* dan *cable-pulley*.

Gambar 2.1 menunjukkan desain *linear* RSA oleh Tang dkk (2014). Terdapat *linear* magnet dan kumparan pada sekelilingnya. Sistem ini langsung menghasilkan listrik tanpa ada mekanisme pengubah gerak *linear* menjadi gerak rotasi. Daya bangkitan RSA didapatkan nilai rata-rata sebesar 26 Watt pada kecepatan suspensi 0,11 m/s dan nilai koefisien redaman sebesar 980 Ns/m, dimana nilai koefisien redaman ini hanya mencapai 50% dari nilai koefisien redaman konvensional *shock absorber*. Duong dkk (2018) juga mendesain RSA tipe *linear*. Daya maksimum yang dihasilkan dapat mencapai 225 Watt dan daya rata-rata sebesar 83.1 Watt pada kecepatan suspensi 0,25 m/s.

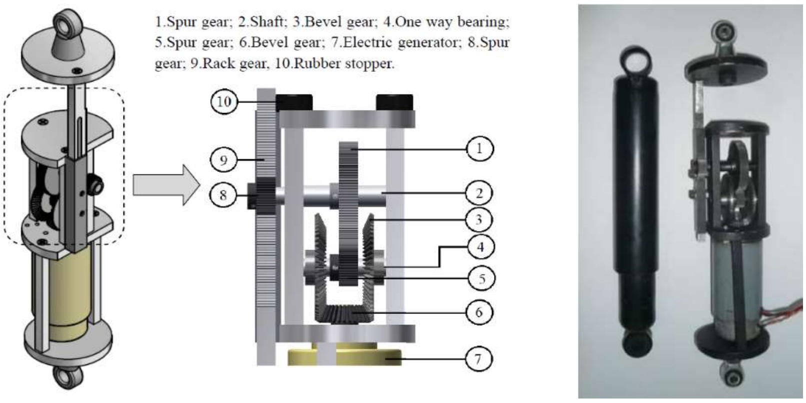


Gambar 2.1 RSA Tipe *Linear Magnet* (Tang dkk, 2014)

Dalam pengembangan linear RSA selanjutnya, Singh dkk (2015) mendesain linear RSA dikombinasikan dengan hidrolik. Penambahan hidrolik bertujuan untuk menambah gaya redam agar karakteristik suspensi mendekati konvensional shock

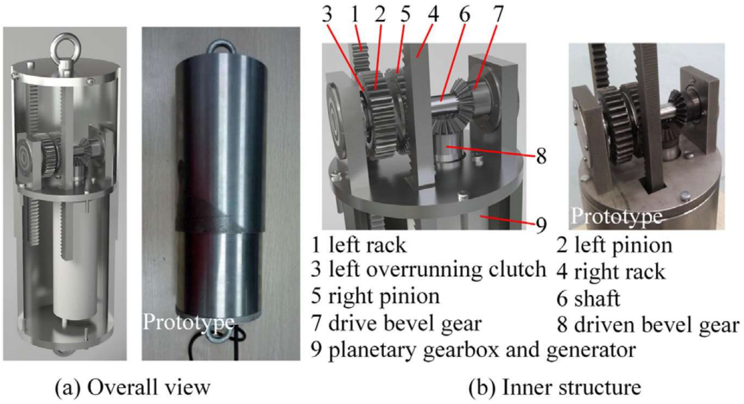
absorber. Hasilnya adalah didapatkan daya rata-rata sebesar 15 Watt pada kondisi jalan yang cukup rata.

Pada *rack pinion* RSA, Guntur dkk (2013) dari Teknik Mesin ITS mengembangkan model RSA ini. Gambar 2.2 menunjukkan prototip RSA *rack pinion*. Prinsipnya adalah dengan mengubah gerak naik turun pada suspensi menjadi gerak rotasi melalui mekanisme roda gigi *rack* yang kemudian digunakan untuk menghasilkan energi listrik. Terdapat susunan *gearbox* untuk meningkatkan putaran generator agar dihasilkan voltase yang lebih tinggi. Selain untuk meningkatkan putaran generator, gearbox digunakan untuk mengubah gerak rotasi dua arah menjadi gerak rotasi satu arah. Dengan demikian, daya yang dihasilkan akan kontinu pada saat gerak suspensi naik maupun turun. Daya rata-rata yang dihasilkan sekitar 18,6 Watt dengan skala 1:5.



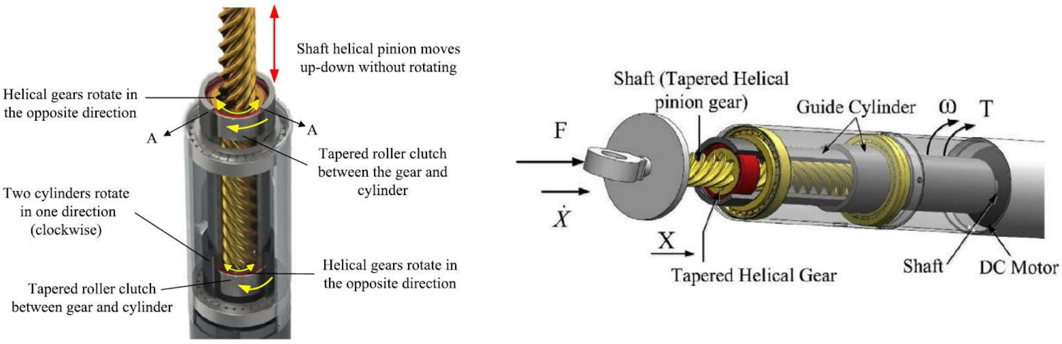
Gambar 2. 2 RSA Tipe *Rack* dan *Pinion* Guntur dkk (2013)

Zhang dkk (2016) melakukan penelitian RSA *rack* dan *pinion* pada kendaraan listrik. Pada penelitiannya, terdapat mekanisme *supercapacitor* sebagai modul untuk menyimpan energi listrik. RSA diuji dengan frekuensi eksitasi yang berbeda dan didapatkan daya rata-rata sebesar 4,3 Watt dan efisiensi maksimal sebesar 54,98%. Li dkk (2013) menguji RSA *rack* dan *pinion* pada kendaraan Chevrolet Surburban SUV di jalanan yang rata pada kecepatan 48 km/jam dan didapatkan daya rata-rata sebesar 19 Watt dengan daya maksimum mencapai 68 Watt. Salah satu kelemahan pada desain RSA tipe *rack* dan *pinion* ini adalah terdapat gaya gesek yang cukup besar pada mekanisme *gear* dan besarnya *inertia losses* pada transmisi roda gigi. Dengan besarnya gaya gesek dan *inertia losses* ini, efisiensi dari RSA secara keseluruhan dapat berkurang.



Gambar 2. 3 RSA Tipe *Rack* dan *Pinion* Zhang dkk (2016)

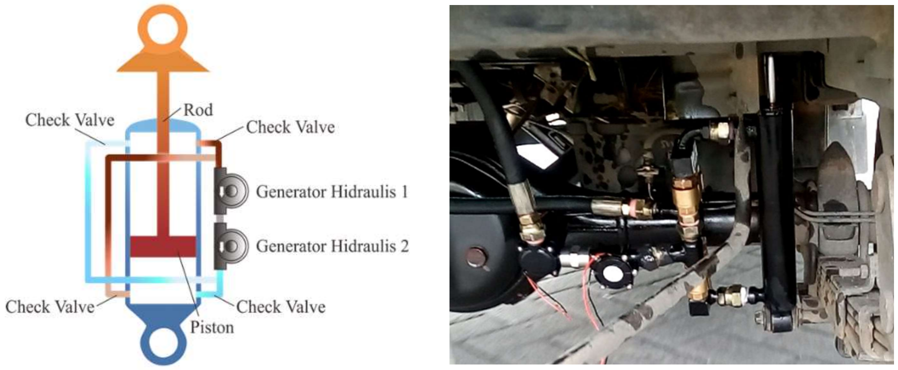
Selain menggunakan mekanisme *rack* dan *pinion*, model RSA yang menggunakan roda gigi adalah menggunakan *helical gear* sebagai pengubah grak linear menjadi gerak rotasi. Salman dkk (2018) mendesain RSA tipe ini dan ditunjukkan pada gambar 2.4. Pada *helical gear* terdapat dua arah sudut *helix* yang berbeda, sehingga didapatkan gerakan putar generator 1 arah. Terdapat *planetary gearbox* untuk meningkatkan kecepatan putar generator sebanyak 30 kali. Variasi sudut *helix* yang digunakan, yaitu 30^o dan 45^o. Hasilnya, ketika sudut *helix* 45^o, didapatkan daya bangkitan yang lebih besar bila dibandingkan dengan sudut 30^o. Daya bangkitan maksimal mencapai 270 Watt pada frekuensi eksitasi 2,5 Hz dan amplitudo 5 mm. Efisiensi yang dihasilkan diklaim dapat mencapai 50%.



Gambar 2. 4 RSA Tipe *Helical Gear* Salman dkk (2018)

Pada RSA hidrolik, Syuhri (2015), Satria (2016), dan Yandaka (2018) dari Teknik Mesin ITS mengembangkan model RSA tipe hidrolik. Prinsip kerja dari RSA ini adalah memanfaatkan energi kinetik pada gerakan suspensi kendaraan melalui mekanisme hidrolik. Energi tersebut ditransfer ke sebuah motor hidrolik.

Gaya yang ditransfer dari motor hidrolik kemudian ditransmisikan oleh susunan roda gigi yang berfungsi untuk meningkatkan putaran generator. Putaran generator tersebut akan menghasilkan energi listrik. Pada penelitiannya, Syuhri (2015) menggunakan 1 input eksitasi pada suspensi kendaraan. Daya bangkitan yang dihasilkan adalah sebesar 2,332 Watt pada 1,7 Hz. Sedangkan pada penelitian Satria (2016), digunakan 2 input eksitasi pada suspensi kendaraan yang kemudian akan digabung untuk memutar 1 motor hidrolik. Daya yang dihasilkan pada penelitiannya adalah sebesar 2,47 Watt yang diuji pada kendaraan *pickup* pada kecepatan 10 km/jam melewati polisi tidur ketinggian 4 cm. Sedangkan pada penelitian Yandaka (2018), digunakan generator yang terpasang seri tanpa penambahan roda gigi. Hasilnya voltase bangkitan yang dihasilkan sebesar 13,51 Volt pada generator 1 dan 10,65 Volt pada generator 2. RSA ini diuji pada kendaraan *pickup* dengan kecepatan 20 km/jam melewati polisi tidur. Pada RSA hidrolik dengan generator terpasang seri ditunjukkan pada gambar 2.5.

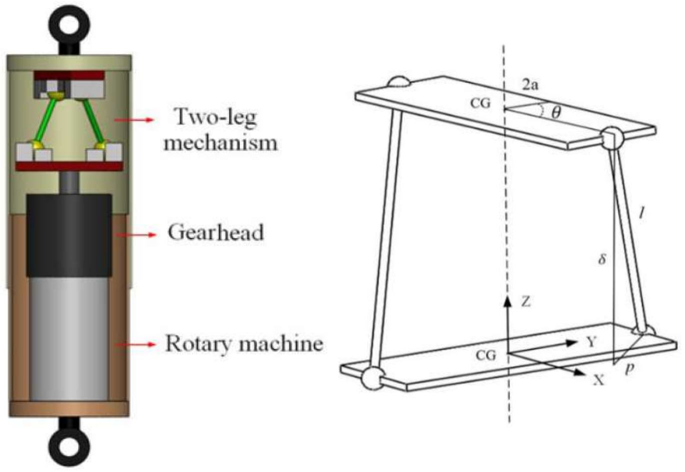


Gambar 2. 5 RSA Tipe Hidrolik dengan Dua Generator Terpasang Seri Yandaka (2018)

Kelebihan dari sistem RSA hidrolik ini adalah menghasilkan performa dan karakteristik gaya redam yang paling mendekati konvensional *shock absorber*. Namun demikian, terdapat juga kelemahan pada sistem ini. Desain pada RSA ini cukup kompleks dan banyak terdapat bagian-bagian penunjang pada RSA seperti motor hidrolik, valve, dan tube. Selain itu dengan adanya sistem *hidrolik*, kebocoran-kebocoran rawan terjadi.

Pada RSA mekanisme lengan, prinsipnya adalah dengan mengubah gerak linier menjadi gerak rotasi melalui mekanisme lengan (*algebraic mechanism two*

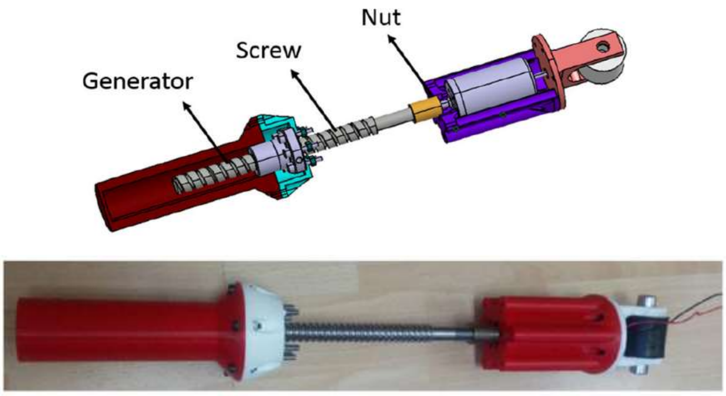
leg) seperti ditunjukkan pada gambar 2.6. Terdapat pula *planetary gear* untuk meningkat putaran generator agar menghasilkan voltase yang lebih besar. Pada penelitian Maravandi (2015), fokus pada penelitian adalah menghitung efisiensi dari mekanisme lengan dan nilai dari koefisien redaman. Didapatkan hasil efisiensi sebesar 0,71 hingga 0,84, dimana nilai ini diklaim merupakan nilai efisiensi tertinggi bila dibandingkan dengan RSA mekanisme yang lain. Koefisien redaman didapatkan sebesar 1720 Ns/m dengan mengontrol *external electrical load.* Nilai koefisien redaman ini mendekati nilai dari koefisien redaman konvensional *shock absorber*. Sedangkan Syuhri dkk (2017) melakukan penelitian dengan melihat hubungan antara redaman dengan energi listrik yang dihasilkan.



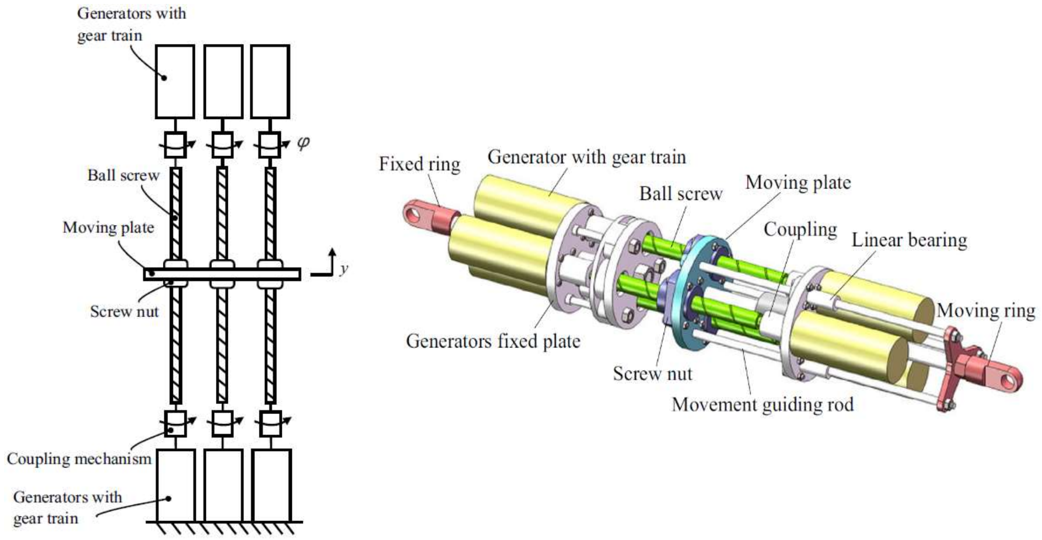
Gambar 2. 6 RSA Tipe Mekanisme Lengan Maravandi (2015)

Model mekanisme RSA selanjutnya dan yang akan penulis lakukan penelitiannya adalah RSA dengan mekanisme *ball screw*. *Ball screw* merupakan *actuator* linier yang bertindak untuk mengubah gerak linier menjadi gerak rotasi dengan gesekan kecil ataupun sebaliknya. Liu dkk (2017) menggunakan mekanisme *ball screw* dalam penelitiannya. Pada desainnya, terdapat MMR (*Mechanical Motion Rectifier*) *gearbox* agar putaran generator searah. Dari hasil pengujian pada kendaraan, pada kecepatan 64 km/jam, RSA dapat mengurangi percepatan chassis sebesar 11,2% dan menghasilkan daya sebesar 13,3 Watt dalam periode waktu 8 second. *Mechanical* efisiensi yang dihasilkan pada RSA maksimal sebesar 70,1% pada frekuensi 4 Hz. Desain RSA ini spesifik untuk kendaraan berat seperti truk dan bus.

Bowen dkk (2019a) mendesain RSA *ball screw* seperti ditunjukkan pada gambar 2.7 (a). Melalui penelitiannya, Bowen dkk menganalisa parameter-parameter yang ada pada RSA ball screw, yaitu *screw lead*, diameter *screw*, inersia, dan beban generator. Bowen juga mengoptimasi parameter dari ball screw. Hasilnya didapat nilai paling optimal dari screw lead adalah 7 mm/rev. Daya bangkitan yang dihasilkan maksimal mencapai 148,61-110,1 Watt dengan efisiensi maksimal antara 50%-68%. Xie dkk (2018) mendesain RSA ball screw dengan menggabungkan 3 ball screw dan nut. Masing-masing ball screw akan dihubungkan dengan generator. Daya rata-rata maksimal yang dihasilkan oleh sistem adalah sebesar 32 Watt pada frekuensi eksitasi 3 Hz amplitudo 20 mm. Desain mekanisme 3 ball screw ditunjukkan pada gambar 2.7 (b).



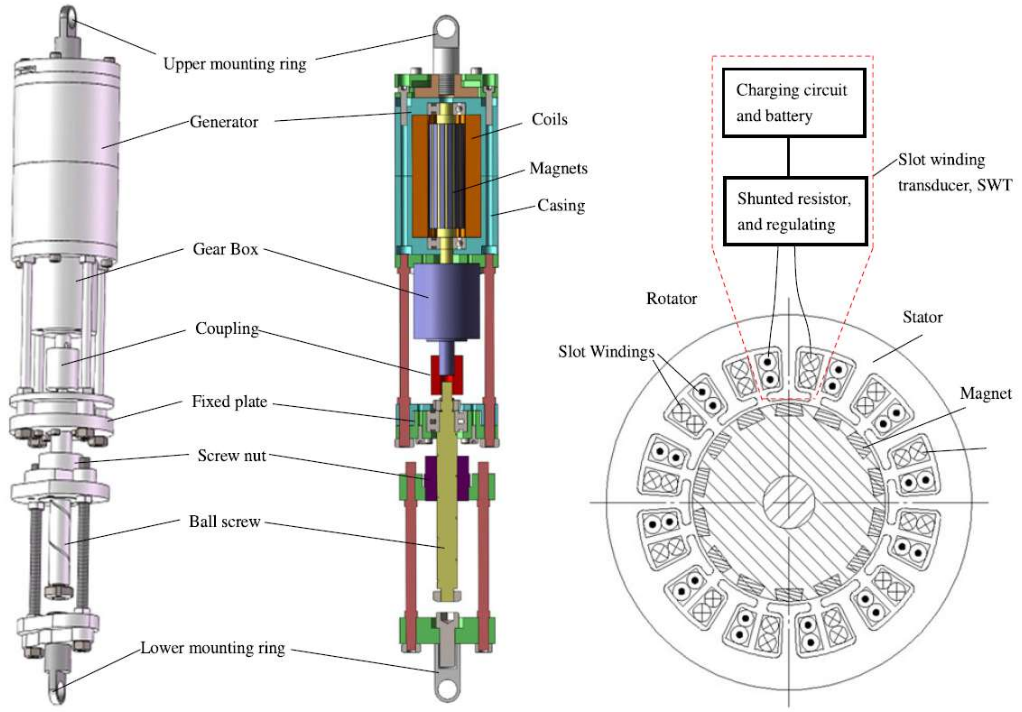
(a)



(b)

Gambar 2. 7 RSA *Ball Screw* (a) Bowen dkk (2019a) dan (b) Xie dkk (2018)

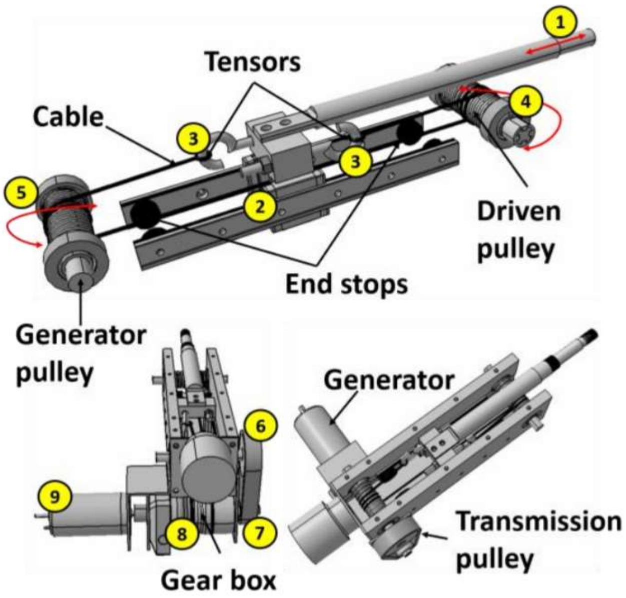
Xie dkk (2017) juga mendesain RSA *ball screw*. Pada penelitiannya, Xie fokus pada optimasi *Slot Winding Transducer* (SWT) pada generator dan beban elektrik. Dengan mengatur jumlah SWT yang aktif dan mengatur besaran hambatan eksternal, akan didapatkan nilai gaya redam yang berbeda. Nilai gaya redam ini akan disesuaikan dengan kebutuhan gaya redam sistem. Gaya redam yang dihasilkan bervariasi berkisar antara 3.000 N.s/m hingga 7.000 N.s/m. Daya yang dihasilkan dapat mencapai 135 Watt ketika seluruh SWT diaktifkan pada frekuensi 1,6 Hz dan amplitudo 20 mm.



Gambar 2. 8 RSA Ball Screw dengan parameter SWT oleh Xie dkk (2017)

Desain terbaru dari mekanisme RSA adalah menggunakan kabel dan *pulley*. Bowen dkk (2019b) mendesain RSA ini dengan memanfaatkan getaran suspensi kendaraan. Terdapat 2 *pulley* yang masing-masing terhubung satu sama lain dengan kabel. Satu *pulley* berfungsi sebagai penggerak, satu *pulley* berfungsi sebagai penghubung dengan generator. Terdapat *gearbox* untuk meningkatkan putaran generator. Gambar 2.9 menunjukkan mekanisme RSA kabel dan *pulley*. RSA dipasang pada kendaraan kecil perkotaan dan diujicoba melewati jalanan bergelombang dengan kecepatan 20-30 km/jam. Didapatkan nilai rata-rata daya yang dihasilkan adalah 105 Watt untuk empat buah RSA yang terpasang. Daya maksimal yang dihasilkan sebesar 400-500 Watt. Efisiensi total yang dihasilkan

mencapai 60%. Satu yang menjadi permasalahan pada mekanisme ini adalah terjadinya slip pada kabel dan pulley. Hal ini dapat mengurangi efisiensi keseluruhan RSA.



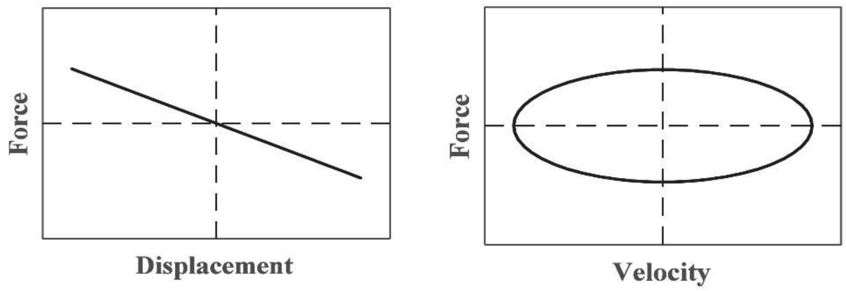
Gambar 2. 9 RSA Menggunakan Kabel dan *Pulley* oleh Bowen dkk (2019b)

2.2 Sistem Peredam Getaran

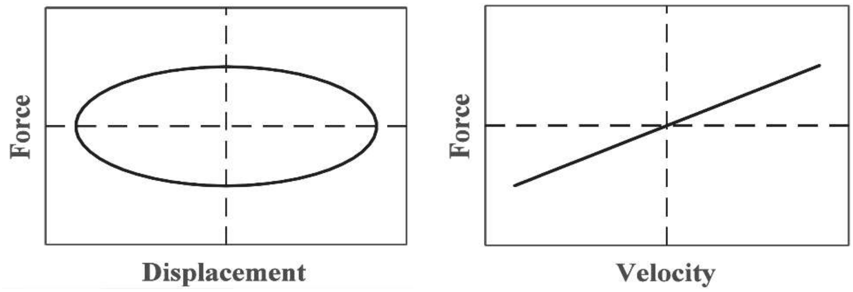
Redaman yang dihasilkan oleh sistem *BSRSA-bevel gear* dibagi menjadi dua, yaitu redaman akibat pengaruh mekanik dan redaman akibat pengaruh elektrik. Redaman akibat pengaruh mekanik diakibatkan oleh inersia *bevel gear,* inersia *spur gear*, inersia generator, dan *damping friction* pada *ball bearing*. Sedangkan redaman akibat pengaruh elektrik diakibatkan oleh torsi elektrik dari generator.

2.2.1 Redaman Mekanik

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, redaman mekanik diakibatkan oleh inersia pada gear (*bevel gear*, *spur gear*, dan generator) dan *damping friction* pada *ball bearing*. Inersia berbanding lurus dengan percepatan angular ($\ddot{\theta}$), sedangkan *damping friction* berbanding lurus dengan kecepatan angular ($\dot{\theta}$). Karakteristik gaya redam yang diakibatkan oleh inersia dapat ditunjukkan pada gambar 2.10. Sedangkan karakteristik gaya redam akibat *damping friction* ditunjukkan pada gambar 2.11.



Gambar 2. 10 Karakteristik Gaya Redam yang Diakibatkan oleh Inersia



Gambar 2. 11 Karakteristik Gaya Redam yang Diakibatkan oleh *Damping Friction*

2.2.2 Redaman Elektrik

Redaman elektrik sangat erat kaitannya dengan generator listrik yang digunakan. Pada penelitian ini, akan digunakan generator elektrik tipe Generator 3 fasa Tamagawa TBL-i II Series TS4607N1033E200. Redaman elektrik didapatkan dari torsi elektrik ketika sistem RSA memutar generator yang terdapat beban listrik. Torsi elektrik pada generator dirumuskan dengan menggunakan pendekatan generator 3 fasa (Maravandi dkk, 2017) sebagai berikut:

$$T_E = B_g \dot{\theta}_g \tag{2.1}$$

dimana B_g merupakan *damping coefficient* generator dan $\dot{\theta}_g$ merupakan kecepatan sudut putar generator. Pada sistem BSRSA, damping yang terjadi diakibatkan oleh gerak *linear* BSRSA, sehingga *damping* yang digunakan adalah *linear damping (B_L)*. Untuk mendapatkan *linear damping*, dapat dilihat dari *rotary damping coefficient* generator yang dirumuskan sebagai berikut:

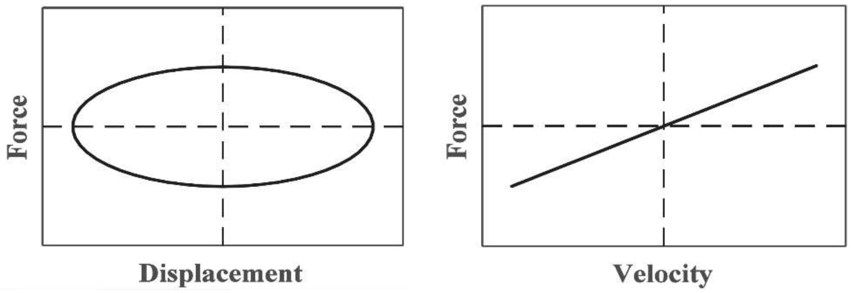
$$B_R = 1.5\,\frac{k_t k_e}{R_{in} + R_{ex}} \tag{2.2}$$

Pada persamaan (2.2), k_t merupakan konstanta torsi generator (N.m/A), sedangkan k_e merupakan konstanta voltase generator (V.s/rad), R_{in} merupakan hambatan internal generator, dan R_{ex} merupakan hambatan eksternal. Kedua nilai konstanta ini akan diambil berdasarkan spesifikasi generator Tamagawa TBL-i II Series TS4607N1033E200. Dalam mekanisme pengubah gerak linear menjadi rotasi, terdapat mekanisme *bevel gear* dan *spur gear*, dimana pada masing-masing pasangan roda gigi terdapat kerugian karena gesekan yang mengakibatkan efisiensi menjadi berkurang. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\eta_{bg}\eta_{sg}B_L = B_R \quad (2.3)$$

dimana η_{bg} adalah efisiensi *bevel gear* dan η_{sg} adalah efisiensi *spur gear*. Dengan memasukkan persamaan (2.2) dan (2.3) ke persamaan (2.1), didapat persamaan torsi elektrik.

$$T_E = \frac{1.5}{\eta_{bg}\eta_{sg}} \frac{k_t k_e}{R_{in} + R_{ex}} \dot{\theta}_g \quad (2.4)$$



Gambar 2.12 Karakteristik Gaya Redam Elektrik

Karakteristik gaya redam elektrik ditunjukkan pada gambar 2.12. Karakteristik ini sama dengan karakteristik gaya redam yang diakibatkan oleh *damping friction*. Hal ini karena gaya redam elektrik berbanding lurus dengan kecepatan angular ($\dot{\theta}$), dalam hal ini adalah kecepatan angular generator.

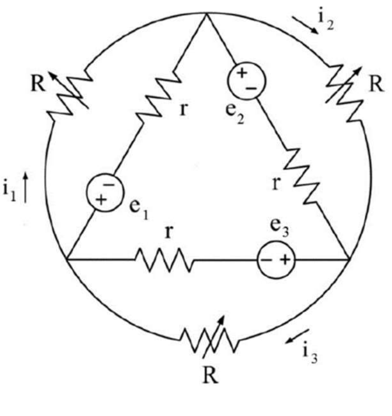
2.3 Generator Listrik

Generator adalah sebuah alat yang merubah energi mekanik menjadi energi listrik. Generator listrik menginduksi gaya gerak listrik (GGL) atau EMF dengan memutar kumparan dalam medan magnet. Energi mekanik yang bekerja pada

generator bisa berasal dari putaran mesin, turbin uap, turbin gas, turbin air atau turbin gas. Seperti yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya, generator yang digunakan adalah jenis motor AC 3 fasa Tamagawa TBL-i II Series TS4607N1033E200 yang difungsikan sebagai generator. Output dari generator masih berupa arus AC 3 fasa, sehingga perlu ditambahkan diode 3 fasa agar arus yang dihasilkan DC 1 fasa. Spesifikasi dari generator ini mampu menghasilkan daya mencapai 100 Watt dengan tegangan mencapai 200 Volt. Putaran maksimal yang diijinkan dari generator adalah 5000 rpm. Gambar 2.13 adalah generator yang akan digunakan pada prototip RSA ini.

Gambar 2.13 Generator Tamagawa TBL-i II Series TS4607N1033E200

Untuk menghitung daya bangkitan yang dihasilkan (*P*), digunakan pendekatan generator 3 fasa.



Gambar 2.14 Skema Generator 3 Fasa (Maravandi dkk, 2017)

$$e_1 = E_m cos(\omega_e t - 120)$$
$$e_2 = E_m cos(\omega_e t) \quad (2.5)$$
$$e_3 = E_m cos(\omega_e t + 120)$$

dimana E_m adalah voltase yang dihasilkan dan ω_e adalah frekuensi angular generator. Total daya yang dihasilkan adalah:

$$P = \frac{e_1^2}{R_{in} + R_{ex}} + \frac{e_2^2}{R_{in} + R_{ex}} + \frac{e_3^2}{R_{in} + R_{ex}} \quad (2.6)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.6) ke (2.5), maka daya yang dihasilkan adalah:

$$P = 1.5 \frac{E_m^2}{R_{in} + R_{ex}} \quad (2.7)$$

Voltase (E_m) yang dihasilkan juga dapat ditulis dalam persamaan (2.8):

$$E_m = k_e \dot{\theta}_g \quad (2.8)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.7) ke (2.6), maka daya yang dihasilkan pada generator adalah:

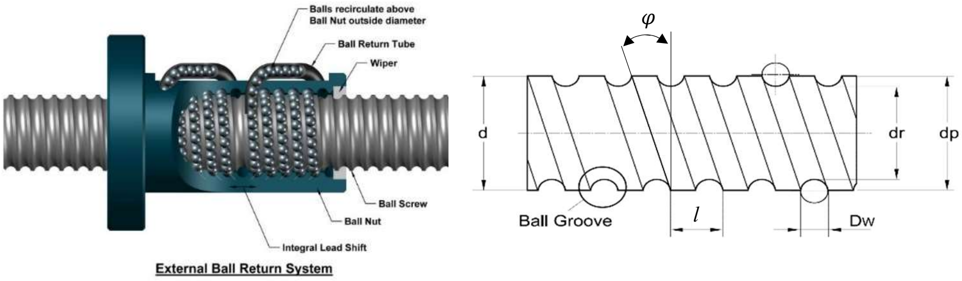
$$P = 1.5 \frac{k_e^2 \dot{\theta}_g^2}{R_{in} + R_{ex}} \quad (2.9)$$

Dari persamaan (2.9) di atas, daya yang dihasilkan sangat berpengaruh dari kecepatan putar generator dan hambatan eksternal. Sehingga untuk mendapatkan daya yang besar, dibutuhkan kecepatan putar generator yang besar.

2.4 Mekanisme *Ball Screw*

Ball screw adalah *actuator* linier yang bertindak untuk mengubah gerak putar menjadi gerak lurus dengan gesekan kecil ataupun sebaliknya. Gesekan yang terjadi kecil dikarenakan antara nut dengan boltnya terdapat bola yang berfungsi untuk mengurangi koefisien gesek. Sedangkan pengertian dari *actuator* sendiri merupakan suatu pengubah, yang mengubah gerak linear menjadi gerak rotasi. Actuator dirancang untuk beroperasi/menggerakkan suatu mekanisme dan merubah suatu variabel kontrol di dalam proses. Pada poros berulirnya (*screw*) terdapat jalur berbentuk heliks untuk *ball bearing* yang bertindak sebagai sekrup presisi yang mampu menahan gaya dorong yang cukup tinggi dengan gesekan internal yang

kecil. *Ball screw* cocok untuk digunakan dalam mekanismne di mana presisi tinggi diperlukan. Susunan bola bertindak sebagai nut. Sedangkan poros berulir bertindak sebagai *screw*. Gambar 2.15 menunjukkan konstruksi dari *ball screw.*



Gambar 2.15 Konstruksi dan Desain *Ball Screw*

Untuk menghitung torsi untuk menggerakkan ball screw (T_b), digunakan persamaan (2.10). Persamaan ini merupakan persamaan yang digunakan untuk *reverse operation*, yaitu untuk mengubah gerak linear menjadi gerak rotasi:

$$T_b = \frac{F_a \, l \, \eta_{BS}}{2\pi} \tag{2.10}$$

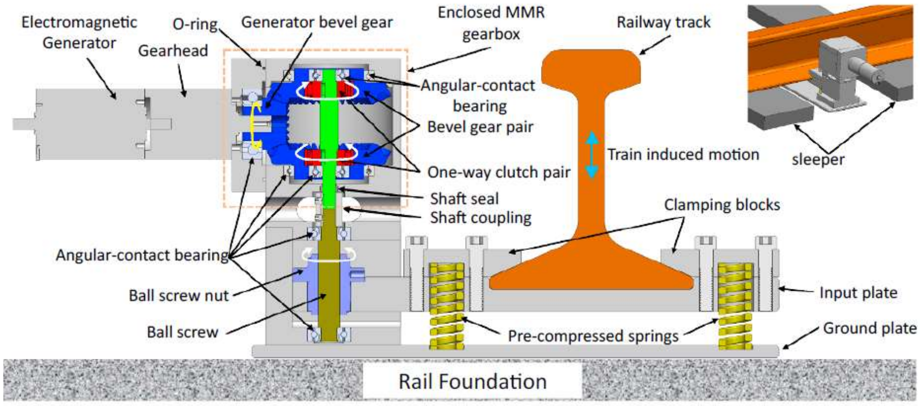
dimana l merupakan lead screw (mm/rev), F_a merupakan gaya aksial, dan η_{BS} merupakan efisiensi ball screw. Gaya aksial disini nanti akan menjadi gaya redam F_d pada sistem RSA. Efisiensi ball screw sangat berkaitan dengan sudut *lead screw* (φ), seperti tertulis pada persamaan (2.11) dan (2.12) (Bowen dkk, 2017)

$$\varphi = tan^{-1}\left(\frac{l}{\pi d}\right) \tag{2.11}$$

$$\eta_{BS} = \frac{1 - \mu \tan\varphi}{1 + \frac{\mu}{\tan\varphi}} \tag{2.12}$$

Terdapat parameter diameter screw (d) dan koefisien gesek (μ) antara bola pada *nut* dan *screw*. Nilai koefisien gesek ini pada umumnya adalah 0,01. Pada penelitian ini digunakan ball screw merek HIWIN R12-5T3-FSI-0.05 dengan diameter screw (d) 12 mm dan lead screw (l) 5 mm/rev. Sehingga dengan menggunakan persamaan (2.12) didapatkan nilai efisiensi *ball screw* sebesar 92,9 %. Berdasarkan katalog dari pabrikan ball screw, nilai ini mendekati dengan yang tertera pada spesifikasi untuk penggunaan *reverse operation*.

Penggunaan *ball screw* sebagai pemanen energi merupakan hal yang telah banyak dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Zhu dkk (2019) mendesain pemanen energi menggunakan mekanisme ball screw pada mekanisme *mass damper*. Alat ini dinamakan *Electromagnetic Inertial Mass Damper* (EIMD). Penggunaanya adalah untuk mereduksi getaran pada struktur bangunan. Sedangkan Yang dkk (2019) menggunakan ball screw sebagai pemanen energi pada suspensi sepeda angin. Mekanismenya tidak berbeda jauh dengan RSA pada kendaraan, namun dengan ukuran yang lebih kecil dan parameter-parameter yang disesuaikan dengan sepeda angin. Pan dkk (2019) mendesain pemanen energi menggunakan mekanisme *ball screw* pada rel kereta api. Gambar mekanisme pemanen energi ini ditunjukkan pada gambar 2.16. Daya yang dihasilkan rata-rata sebesar 2,24 Watt pada saat kereta ringan (LRT) melintas dengan kecepatan 30 km/jam.



Gambar 2. 16 Mekanisme Pemanen Energi pada Rel Kereta Api Menggunakan *Ball Screw* oleh Pan dkk (2019)

2.5 Transmisi Roda Gigi

Roda gigi merupakan salah satu perlatan untuk mentransmisi daya. Pada perancangan RSA mekanisme *ball screw* ini, terdapat dua jenis roda gigi yang digunakan, yaitu *bevel gear* (roda gigi payung) dan *spur gear* (roda gigi lurus). Roda gigi yang digunakan adalah merek KHK Japan, dengan spesifikasi tertulis pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Spesifikasi Roda Gigi

Tipe Roda Gigi	Spesifikasi	Jumlah	Diameter Pitch (mm)	Jumlah Gigi	Sudut Kontak	Modul	Material
Bevel gear	SMB-1-20	3	20	20	20º	1	S45C
Spur gear	SSA-1-36	1	36	36	20º	1	S45C
Spur gear	SSA-1-60	1	60	60	20º	1	S45C

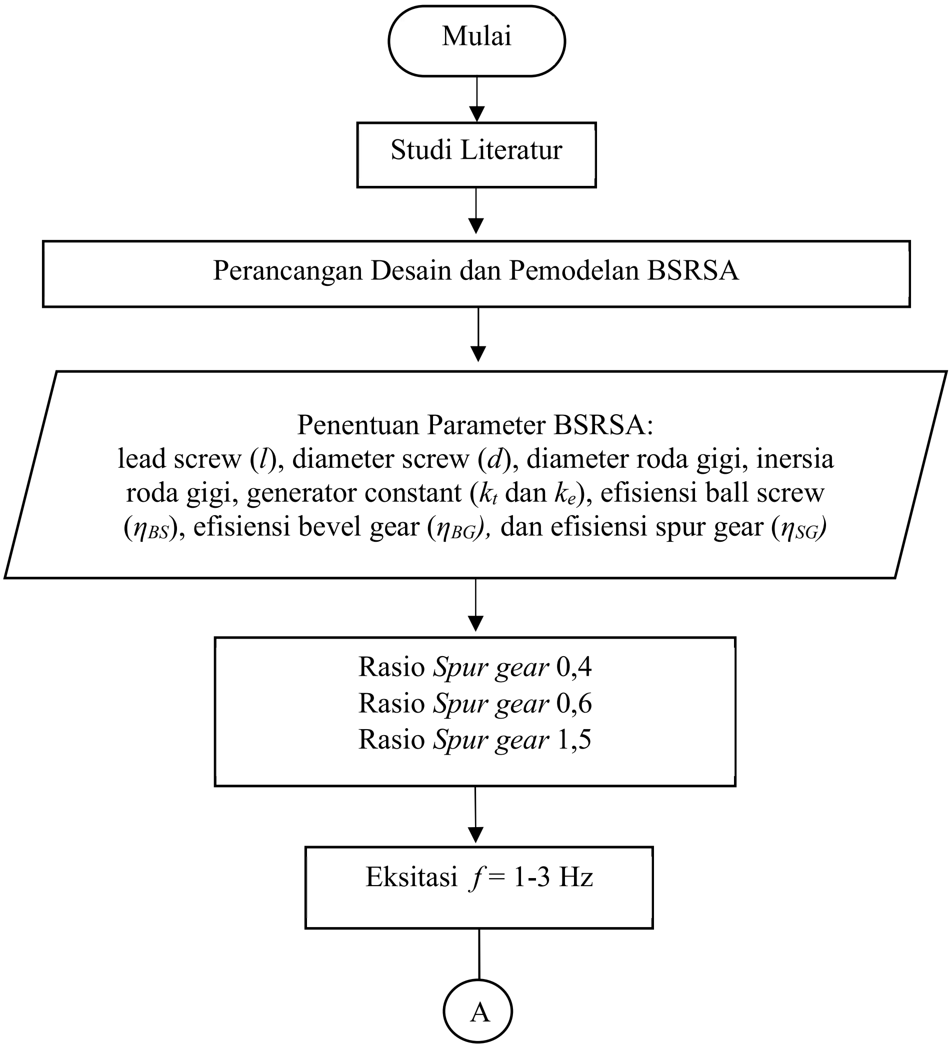
Masing-masing roda gigi memiliki fungsi yang berbeda. *Bevel gear*, digunakan untuk mengubah dua arah gerak rotasi menjadi satu arah dengan bantuan *one-way* bearing. Rasio dari *bevel gear* adalah 1, sehingga tidak terdapat peningkatan kecepatan. Mekanisme pengubah dua arah rotasi menjadi satu arah rotasi dinamakan *Mechanical Motion Rectifier* (MMR). Dalam penelitiannya, Moore (2016) menjelaskan mengenai beberapa mekanisme MMR. Secara umum terdapat 3 mekanisme MMR yang menggunakan roda gigi, yaitu *bevel gear, spur gear,* dan *planetary gear*. Penggunaan *bevel gear* pada penelitian ini dipilih karena mekanisme ini adalah metode paling simpel dalam mengubah dua arah rotasi menjadi satu arah rotasi, sehingga komponen-komponen yang diperlukan tidak terlalu banyak dan desain lebih kompak. Sedangkan pada *spur gear*, digunakan untuk penyambung dengan generator. Rasio yang digunakan pada prototip BSRSA ini adalah 0,6, sehingga terdapat penurunan kecepatan dan peningkatan torsi elektrik.

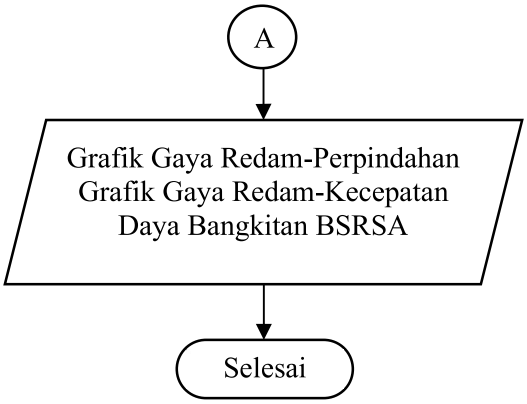
(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 3
METODOLOGI PENELITIAN

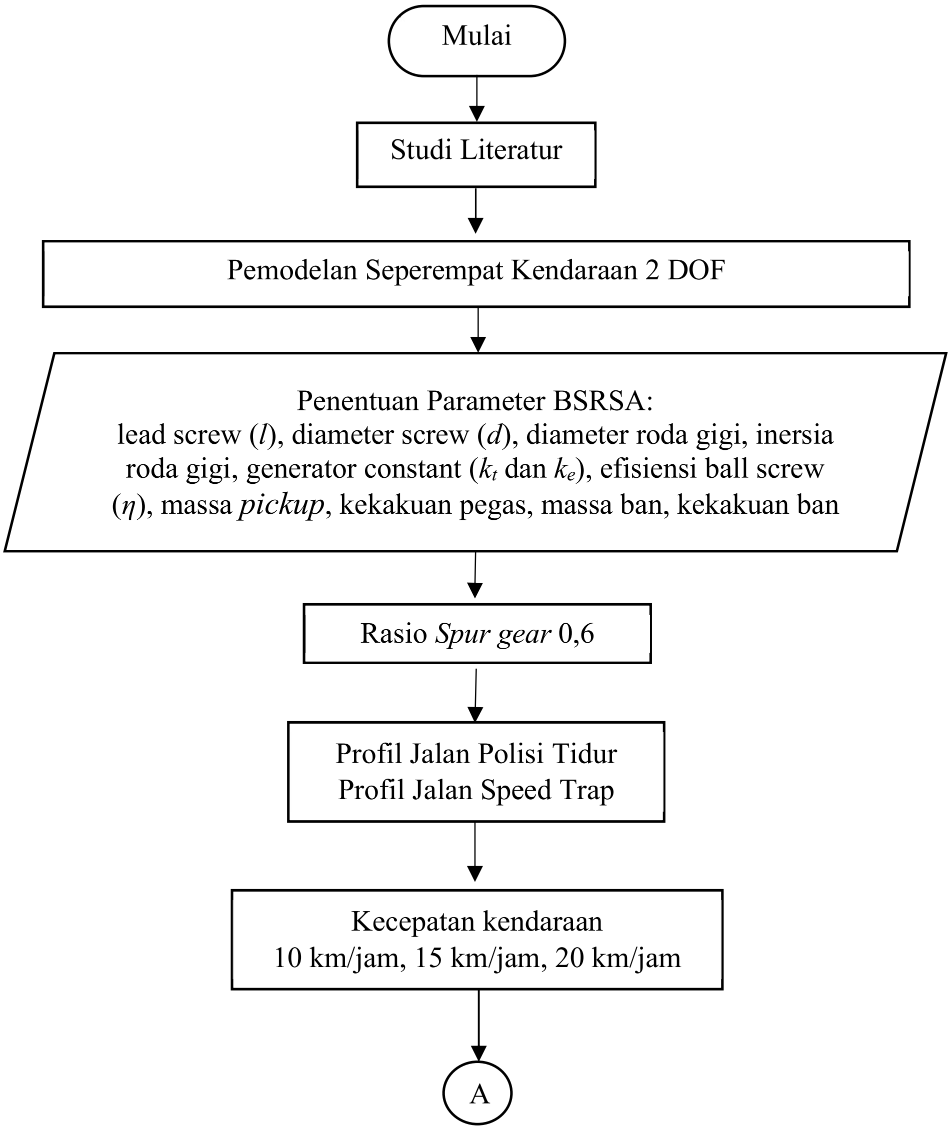
3.1 Diagram Alir Penelitian

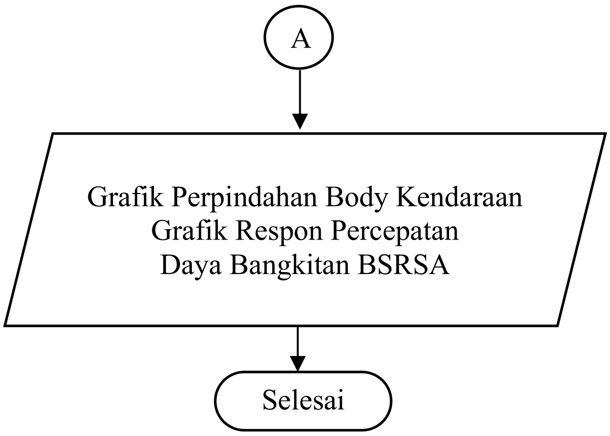
Penelitian dan pengembangan *Ball Screw Regenerative Shock absorber* (BSRSA) kali ini dibuat dengan menggunakan mekanisme *bevel gear* sebagai pengubah 2 arah rotasi menjadi 1 arah rotasi. Diagram alir penelitian dibuat untuk mengetahui langkah-langkah yang harus dilakukan pada proses penelitian mulai dari tahap awal sampai tahap akhir. Diagram alir penelitian dibagi menjadi dua, yaitu diagram alir simulasi dan diagram alir pengujian.



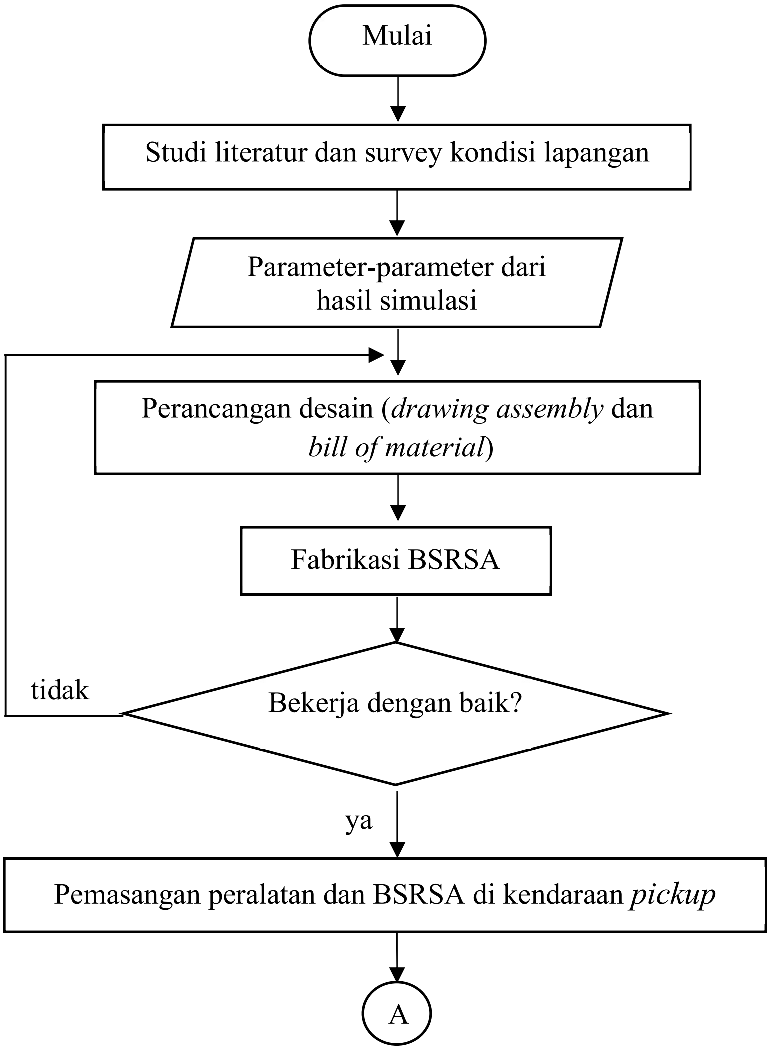


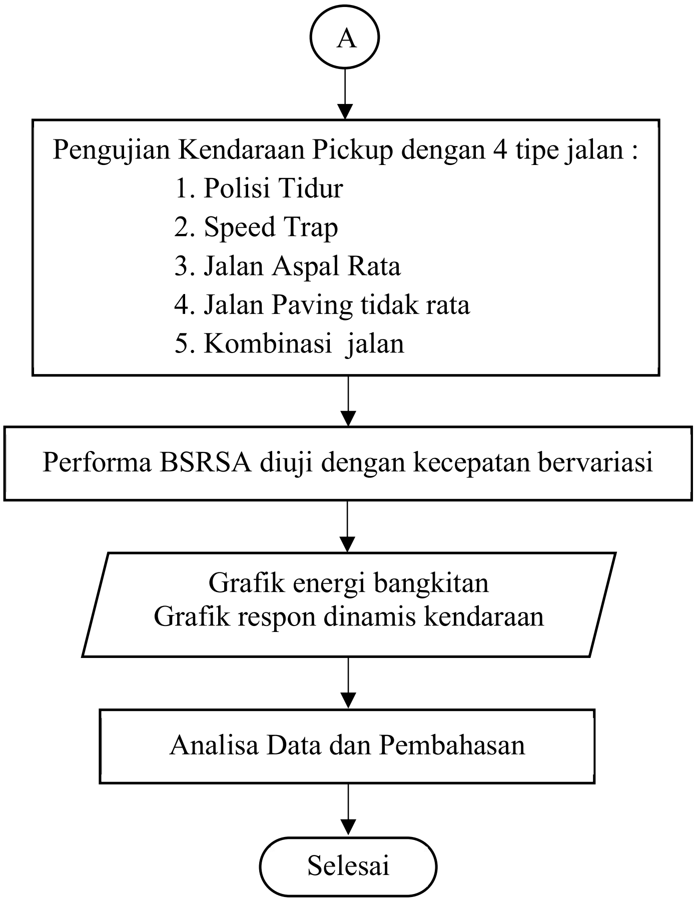
Gambar 3.1 Diagram Alir Simulasi Karakteristik BSRSA





Gambar 3.2 Diagram Alir Simulasi Seperempat Kendaraan BSRSA





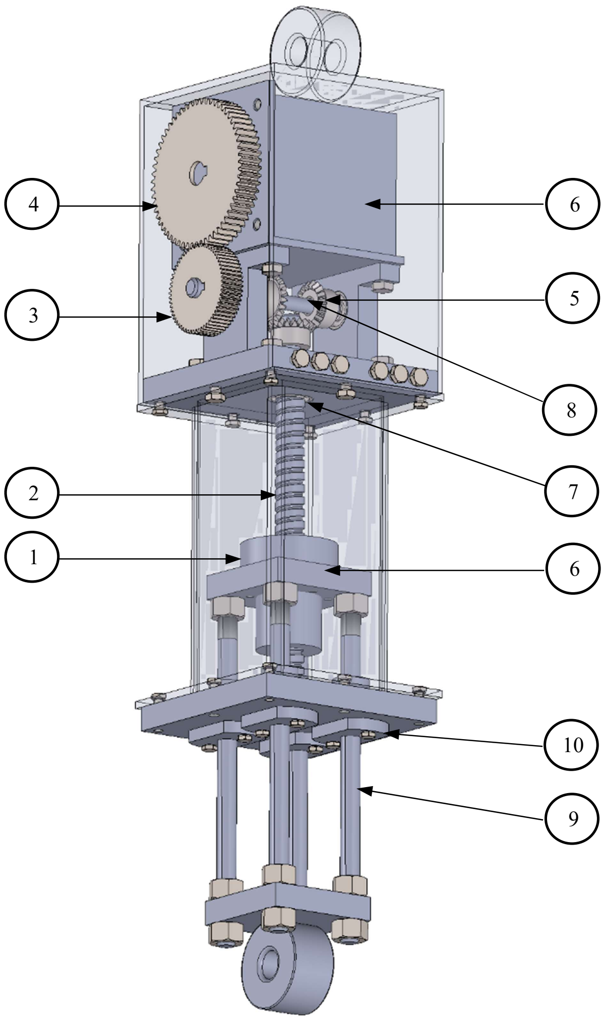
Gambar 3.3 Diagram Alir Rancang Bangun dan Pengujian BSRSA

3.2. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan untuk memperkaya wawasan, pengetahuan, dan landasan tentang materi yang akan dibahas dalam penelitian ini. Sumber yang diambil berasal dari beragam karya ilmiah seperti buku, jurnal ilmiah baik nasional maupun internasional, tugas akhir maupun tesis terdahulu. Tema yang digali adalah seputar pemanenan energi melalui mekanisme BSRSA dengan memanfaatkan getaran pada suspensi kendaraan. Dari studi literatur yang dilakukan ini, diharapkan dapat memperlancar analisa mengenai hasil pengujian yang akan dilakukan.

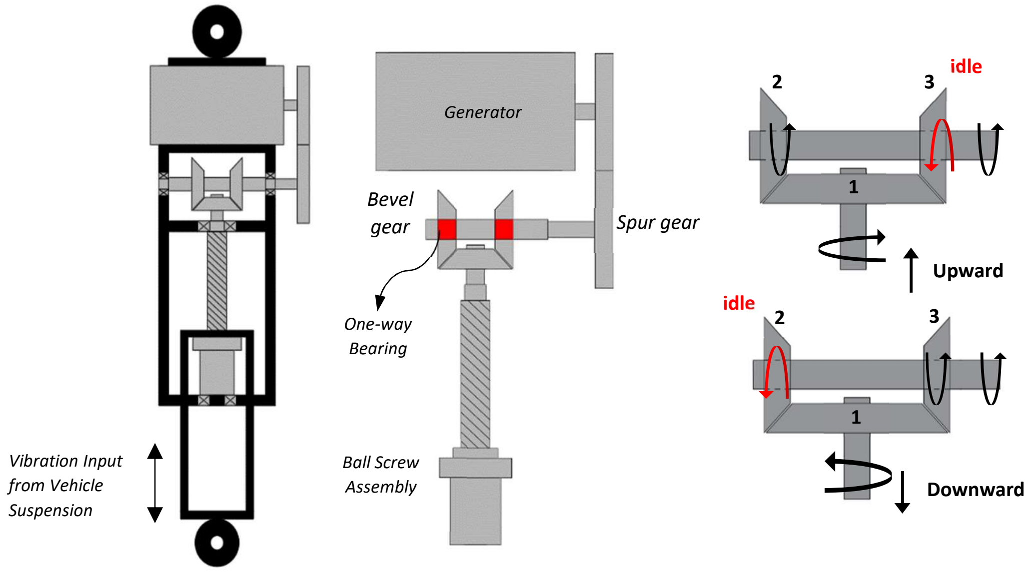
3.3. Perancangan Desain BSRSA-*Bevel gear*

Gambar 3.4 menunjukkan gambar isometrik dalam bentuk 3D untuk BSRSA mekanisme *bevel gear* beserta komponen-komponen penunjangnya. Input Gerakan suspensi berasal dari bawah. Terdapat poros dan plat yang menyambung dengan *nut* dan *ball screw*. Gerakan naik turun pada suspensi akan diubah menjadi gerak rotasi dua arah melalui mekanisme *ball screw* dan *nut*. Gerak rotasi 2 arah CW dan CCW akan diubah menjadi satu arah CCW melalui mekanisme *bevel gear* dan *one-way bearing*. Kemudian untuk menghubungkan dengan generator, terdapat pasangan *spur gear* dengan rasio 0,6. Spur gear 1 dengan jumlah gigi 36 sedangkan spur gear 2 dengan jumlah gigi 60.



1. Nut
2. Screw
3. Spur Gear 36
4. Spur Gear 60
5. Bevel Gear
6. Generator
7. Thrust Bearing
8. One way bearing
9. Connecting rod
10. Linear bearing

Gambar 3.4 Gambar Isometrik BSRSA Mekanisme Bevel Gear

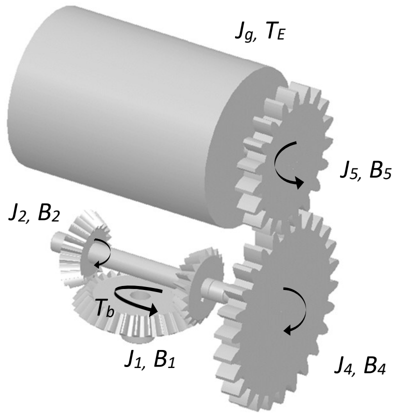


(a) (b)

Gambar 3.5 Mekanisme BSRSA-*Bevel gear* (a) Assembly (b) Detail Pengubah Arah Putar Bevel gear

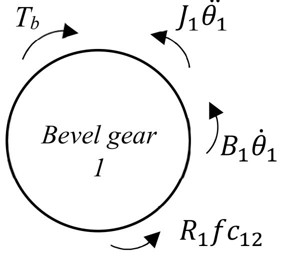
Gambar 3.5 (a) menunjukkan desain BSRSA dengan penggambaran yang lebih sederhana dan skema pengubah arah rotasi. Pada gambar 3.5 (b), *bevel gear* 1 berputar secara 2 arah (CW dan CCW) sesuai gerak naik dan turun pada suspensi kendaraan. Pada *bevel gear* 2 dan 3 terdapat *one-way bearing*, dimana fungsi dari *one-way bearing* adalah memutar poros hanya pada satu arah saja. Saat gerakan naik, *bevel gear* 1 berputar CW dan akan memutar *bevel gear* 2 dan 3. *Bevel gear* 2 akan berputar CW sedangkan *bevel gear* 2 akan berputar CCW. *Bevel gear* 3 akan idle dan tidak akan memutar poros, sedangkan sebaliknya, *bevel gear* 2 akan memutar poros. Saat gerakan turun, *bevel gear* berputar CCW. *Bevel gear* 2 akan berputar CCW sedangkan *bevel gear* 2 akan berputar CW. *Bevel gear* 2 akan idle dan tidak akan memutar poros, sedangkan sebaliknya, *bevel gear* 3 akan memutar poros. Sehingga output pada poros hanya satu arah saja yaitu CCW saat gerakan suspensi naik maupun turun.

3.4. Penurunan Model Matematis



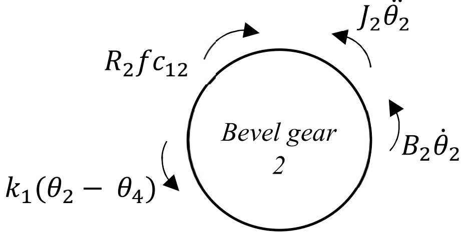
Gambar 3.6 Free Body Diagram Keseluruhan Sistem BSRSA

Gambar 3.6 menunjukkan free body diagram untuk keseluruhan sistem transmisi pada BSRSA. Dengan menurunkan persamaan gerak berdasarkan Hukum Newton II untuk masing-masing gear, akan didapatkan persamaan gaya redam RSA. Berikut merupakan penurunan persamaan gerak BSRSA.



Gambar 3.7 *Free Body Diagram* Gear 1

$$T_B = J_1\ddot{\theta}_1 + B_1\dot{\theta}_1 + R_1 f c_{12} \tag{3.1}$$



Gambar 3.8 *Free Body Diagram* Gear 2

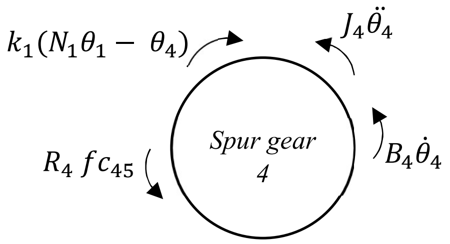
$$R_2 f c_{12} = J_2\ddot{\theta}_2 + B_2\dot{\theta}_2 + k_1(\theta_2 - \theta_4) \tag{3.2}$$

Hubungan antara θ_1 dengan θ_2 dapat dituliskan:

$$\theta_2 = \frac{R_1}{R_2}\theta_1 = N_1\theta_1 \tag{3.3}$$

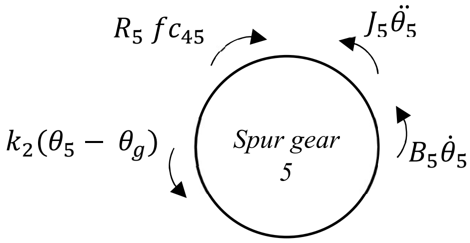
dimana N_1 merupakan rasio antara roda gigi 1 dan 2. Dengan mensubstitusikan persamaan (3.3) ke persamaan (3.2) didapat persamaan gerak untuk gear 2 adalah:

$$fc_{12} = \frac{1}{R_2}\left(J_2N_1\ddot{\theta}_1 + B_2N_1\dot{\theta}_1 + k_1(N_1\theta_1 - \theta_4)\right) \tag{3.4}$$



Gambar 3.9 *Free Body Diagram* Gear 4

$$k_1(N_1\theta_1 - \theta_4) = J_4\ddot{\theta}_4 + B_4\dot{\theta}_4 + R_4fc_{45} \tag{3.5}$$



Gambar 3.10 *Free Body Diagram* Gear 5

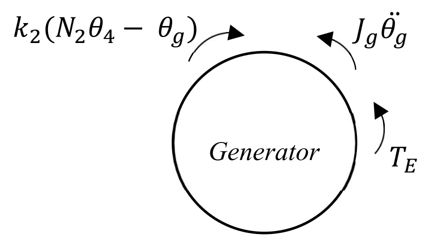
$$R_5fc_{45} = J_5\ddot{\theta}_5 + B_5\dot{\theta}_5 + k_2(\theta_5 - \theta_g) \tag{3.6}$$

Hubungan antara θ_4 dengan θ_5 dapat dituliskan:

$$\theta_5 = \frac{R_4}{R_5}\theta_4 = N_2\theta_4 \tag{3.7}$$

dimana N_2 merupakan rasio antara roda gigi 4 dan 5. Dengan mensubstitusikan persamaan (3.7) ke persamaan (3.6) didapat persamaan gerak untuk gear 5 adalah:

$$fc_{45} = \frac{1}{R_5}\left(J_5N_2\ddot{\theta}_4 + B_5N_2\dot{\theta}_5 + k_2(N_2\theta_4 - \theta_g)\right) \tag{3.8}$$



Gambar 3.11 *Free Body Diagram* Generator

Pada generator terdapat efek inersia generator dan torsi elektrik yang diakibatkan oleh beban generator. Persamaan gerak dari generator adalah:

$$k_2\left(N_2\theta_4 - \theta_g\right) = J_g\ddot{\theta}_g + T_E \tag{3.9}$$

Setelah didapatkan persamaan gerak untuk masing-masing komponen, selanjutnya adalah dengan menggabungkan keseluruhan persamaan menjadi satu kesatuan. Dengan menggabungkan persamaan (3.1), (3.2), (3.4), (3.5), (3.8) dan (3.9) maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} T_B = {} & J_1\ddot{\theta}_1 + B_1\dot{\theta}_1 + N_1^2J_2\ddot{\theta}_1 + N_1^2B_2\dot{\theta}_1 + N_1J_4\ddot{\theta}_4 + N_1B_4\dot{\theta}_4 \\ & + J_5N_1N_2^2\ddot{\theta}_4 + B_5N_1N_2\dot{\theta}_5 + N_1N_2J_g\ddot{\theta}_g + N_1N_2T_E \end{aligned} \tag{3.10}$$

Dengan mengasumsikan poros-poros yang ada sangat rigid, maka hubungan antara θ_2, θ_4, θ_5, dan θ_g dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \theta_4 &= \theta_2 = N_1\theta_1 \\ \theta_g &= \theta_5 = N_2\theta_4 = N_2N_1\theta_1 \end{aligned} \tag{3.11}$$

sehingga persamaan (3.10) menjadi:

$$\begin{aligned} T_B = {} & J_1\ddot{\theta}_1 + B_1\dot{\theta}_1 + N_1^2J_2\ddot{\theta}_1 + N_1^2B_2\dot{\theta}_1 + N_1^2J_4\ddot{\theta}_1 + N_1^2B_4\dot{\theta}_1 \\ & + J_5N_1^2N_2^2\ddot{\theta}_1 + N_1^2N_2^2B_5\dot{\theta}_1 + N_1^2N_2^2J_g\ddot{\theta}_1 + N_1^2N_2^2T_E \end{aligned} \tag{3.10}$$

Hubungan antara perpindahan angular (θ_1) satuan radian dengan perpindahan linear (x) satuan meter adalah:

$$\theta_1 = 2\pi\frac{x}{l} \tag{3.11}$$

dimana l adalah *lead ball screw* (m/rev). Sehingga persamaan 3.10 menjadi:

$$\begin{aligned} T_B = {} & \frac{2\pi}{l}\left(J_1 + N_1^2J_2 + N_1^2J_4 + N_1^2N_2^2J_5 + N_1^2N_2^2J_g\right)\ddot{x} + \\ & (B_1 + N_1^2B_2 + N_1^2B_4 + N_1^2N_2^2B_5 + N_1^2N_2^2T_E)\dot{x} \end{aligned} \tag{3.12}$$

Dengan memasukkan persamaan torsi pada ball screw (T_B) yang telah dijelaskan pada persamaan (2.10) dan torsi elektrik (T_E) pada persamaan (2.4), maka didapatkan gaya redam pada mekanisme *ball screw* adalah:

$$F_D = \frac{4\pi^2}{\eta_{BS} l^2}\left(\left(J_1 + N_1^2 J_2 + N_1^2 J_4 + N_1^2 N_2^2 J_5 + N_1^2 N_2^2 J_g\right)\ddot{x} + \left(B_1 + N_1^2 B_2 + N_1^2 B_4 + N_1^2 N_2^2 B_5 + \frac{1.5}{\eta_{bg}\eta_{sg}} N_1^2 N_2^2 \frac{k_t k_e}{R_{in} + R_{ex}}\right)\dot{x}\right) \quad (3.13)$$

Dalam melakukan simulasi, input yang digunakan adalah eksitasi gerak harmonik mengikuti gelombang sinus. Persamaan gerak eksitasi ditunjukkan pada persamaan (3.14) :

$$\begin{aligned} x(t) &= A \sin 2\pi f t \\ \dot{x}(t) &= 2\pi f A \cos 2\pi f t \\ \ddot{x}(t) &= -4\pi^2 f^2 A \sin 2\pi f t \end{aligned} \quad (3.14)$$

Dengan variasi eksitasi frekuensi sebagai input, maka akan didapatkan karakteristik gaya redam dari sistem RSA. Tabel 3.1 menunjukkan parameter BSRSA. Parameter-parameter berkaitan dengan generator diambil langsung dari spesifikasi BLDC motor dari pabrikan. Parameter berkaitan dengan bearing *friction* diambil dari penelitian Budiarto 2012. Parameter berkaitan dengan efisiensi *gear* diambil berdasarkan parameter teknis dari pabrikan dan telah mencakup ketidakpresisian pemasangan *gear*. Sedangkan inersia *gear* diambil dari pemodelan 3D pada software *solidwork* untuk mengetahui nilai dari masing-masing inersia *gear*.

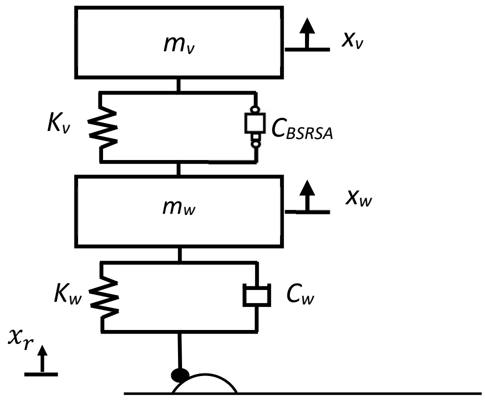
Tabel 3.1 Parameter Simulasi Karakteristik BSRSA

Parameter	**Keterangan**	**Nilai**	**Unit**
l	ball screw lead	5	mm/rev
η_{BS}	efisiensi ball screw	0,92	-
J_1, J_2	inersia *bevel gear*	7,221 *x* 10^{-7}	kg.m^2
J_4	inersia *spur gear*	1,599 *x* 10^{-5}	kg.m^2
J_5	inersia *spur gear*	9,734 *x* 10^{-5}	kg.m^2
J_g	inersia generator	1,8 *x* 10^{-5}	kg.m^2

Parameter	Keterangan	Nilai	Unit
B_1, B_2, B_4, B_5	bearing *friction*	2,1 *x* 10^{-4}	N.m.s/rad
η_{bg}	efisiensi *bevel gear*	0,9	-
η_{sg}	efisiensi *spur gear*	0,9	-
N_1	rasio *bevel gear*	1	-
N_2	rasio *spur gear*	0,4 ; 0,6 dan 1.5	-
k_t	konstanta torsi generator	0,1	N.m/A
k_e	konstanta voltase generator	0,1	V.s/rad
R_{in}	hambatan internal	0,5	ohm
R_{ex}	hambatan external	6	ohm

3.5 Model Matematis Kendaraan

Model matematis kendaraan dibagi menjadi 4 model, yaitu model seperempat kendaraan (*quarter car*) satu derajat kebebasan (1 DOF), model seperempat kendaraan dengan dua derajat kebebasan (2 DOF), model setengah kendaraan (*half car*) empat derajat kebebasan (4 DOF), dan (*full car*) tujuh derajat kebebasan (7 DOF). Masing-masing dari model kendaraan memiliki tujuan dan pendekatan masing-masing. Pada penelitian ini, model simulasi kendaraan yang digunakan adalah seperempat kendaraan 2 DOF dengan ban. Gambar 3.12 menunjukkan pemodelan seperempat kendaraan 2 DOF.



Gambar 3.12 Model Seperempat Kendaraan 2 DOF

Pada gambar 3.12, profil jalan digambarkan sebagai setengah gelombang sinus. Profil jalan ini merepresentasikan tipe jalan polisi tidur dan *speed trap.* Kedua tipe jalan ini yang akan digunakan sebagai input dalam simulasi dengan 3

variasi kecepatan yang berbeda. Pendekatan model matematis dari profil jalan ini akan dibahas pada sub bab 4.2.

Persamaan seperempat kendaraan berdasarkan gambar 3.12 adalah sebagai berikut:

$$\begin{gathered} m_v\ddot{x}_v + K_v(x_v - x_w) + F_D = 0 \\ m_w\ddot{x}_w + K_w(x_w - x_r) + C_w(\dot{x}_w - \dot{x}_r) \ - K_v(x_v - x_w) - F_D = 0 \end{gathered} \tag{3.16}$$

Dalam melakukan simulasi seperempat kendaraan, variasi kecepatan yang digunakan adalah 10 km/jam, 15 km/jam dan 20 km/jam. Variasi kecepatan ini akan sama dengan saat pengujian. Hasil dari simulasi akan digunakan sebagai referensi potensi daya bangkitan yang dihasilkan dari BSRSA. Gaya redam F_D yang digunakan dalam model adalah menggunakan persamaan gaya redam (3.13). Parameter kendaraan yang digunakan adalah kendaraan *pickup* Daihatsu Grandmax tipe standar sesuai dengan tipe kendaraan yang nantinya akan digunakan sebagai kendaraan uji.

Tabel 3.2 Parameter Simulasi Seperempat Kendaraan

Parameter	Keterangan	Nilai	Unit
m_v	¼ massa kendaraan	505	kg
K_v	koefisien pegas kendaraan	43646	N/m
m_w	massa ban	31	Kg
K_w	koefisien kekakuan ban	317000	N/m
C_w	koefisien redaman ban	3430	N.s/m

3.6 Simulasi Karakteristik RSA dan Seperempat Kendaraan

Pemodelan simulasi yang dilakukan ada penelitian ini mengunakan software Matlab dan Simulink. Simulink digunakan untuk membuat blok diagram simulasi dan matlab digunakan untuk memasukkan parameter-parameter dan membuat grafik.

3.6.1 Simulasi Karakteristik RSA

Pada simulasi karakteristik BSRSA, input berupa eksitasi frekuensi (*f*). Amplitudo (*A*) yang digunakan adalah konstan sebesar 15 mm. Variasi eksitasi yang digunakan adalah pada range 1-3 Hz. Persamaan eksitasi menggunakan persamaan (3.14) sesuai dengan gerak harmonik. Pada desain BSRSA juga divariasikan rasio *spur gear*, yaitu rasio 0,4 ; 0,6 ; dan 1,5. Masing-masing dari

rasio *spur gear* akan divariasikan terhadap eksitasi frekuensi. Tujuan dari variasi *spur gear* ini adalah untuk mengetahui seberapa besar gaya redam yang dihasilkan dan koefisien redaman yang dihasilkan. Hasil akhir simulasi karakteristik adalah grafik gaya redam terhadap perpindahan dan gaya redam terhadap kecepatan. Dua grafik ini merupakan grafik yang menunjukkan performa dan potensi energi yang dapat dihasilkan dari sistem BSRSA.

3.6.2 Simulasi Seperempat Kendaraan

Seperti telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya, variasi kecepatan kendaraan adalah 10 km/jam, 15 km/jam dan 20 km/jam. Profil jalan digambarkan sebagai setengah gelombang sinus yang merepresentasikan profil jalan polisi tidur dan *speed trap*. Dimensi dari *speed trap* dan polisi tidur sebagai input simulasi akan disesuaikan dengan kondisi saat pengujian. Hasil akhir simulasi seperempat kendaraan adalah daya bangkitan BSRSA, respon dinamis kendaraan berupa perpindahan (*displacement*) body kendaraan dan percepatan vertikal kendaraan untuk masing-masing tipe jalan dan variasi kecepatan. Hasil dari simulasi nantinya akan digunakan sebagai referensi seberapa besar potensi daya bangkitan yang bisa dihasilkan. Selain itu, respon dinamis berupa percepatan vertikal juga akan dibandingkan dengan hasil pengujian.

3.7 Pengujian pada Kendaraan

Pengujian pada kendaraan *pickup* menggunakan Daihatsu Granmax *pickup* tipe standar. BSRSA dipasang pada suspensi kiri belakang. Gambar 3.13 menunjukkan lokasi pemasangan BSRSA. Terdapat *silencer* dari knalpot yang mengakibatkan berkurangnya akses dalam pemasangan BSRSA. Kendaraan *pickup* akan melewati 4 tipe jalan yaitu polisi tidur, *speed trap,* jalan paving yang tidak rata, dan jalan aspal yang cukup rata. Lokasi pengambilan data adalah di sekitar kampus ITS Sukolilo. Masing-masing variasi kecepatan akan diambil datanya sebanyak 2 kali. Data hasil pengujian yang dituls nanti adalah yang memiliki nilai paling besar. Sebelum dilakukan pemasangan BSRSA pada kendaraan *pickup*, akan dilakukan perekaman respon dinamis kendaraan dengan menggunakan konvensional *shock absorber* pada masing-masing variasi kecepatan dan tipe jalan. Sehingga akan dibandingkan respon dinamis kendaraan antara konvensional *shock*

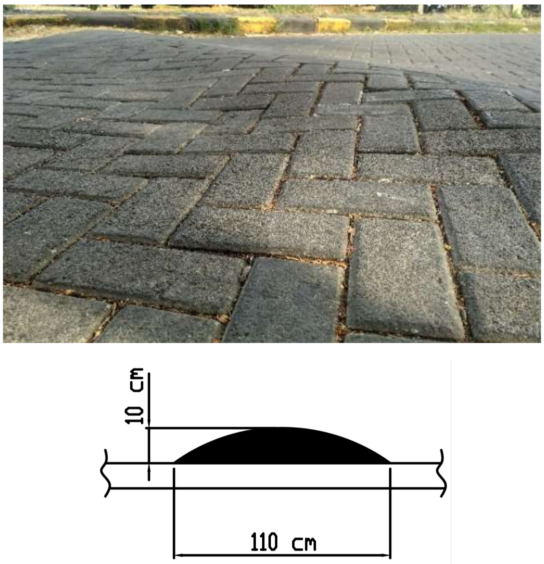
absorber dengan BSRSA. Berikut merupakan tipe jalan yang digunakan dan variasi kecepatan uji:

Gambar 3.13 Lokasi Pemasangan BSRSA Bagian Kiri Belakang *Pickup*

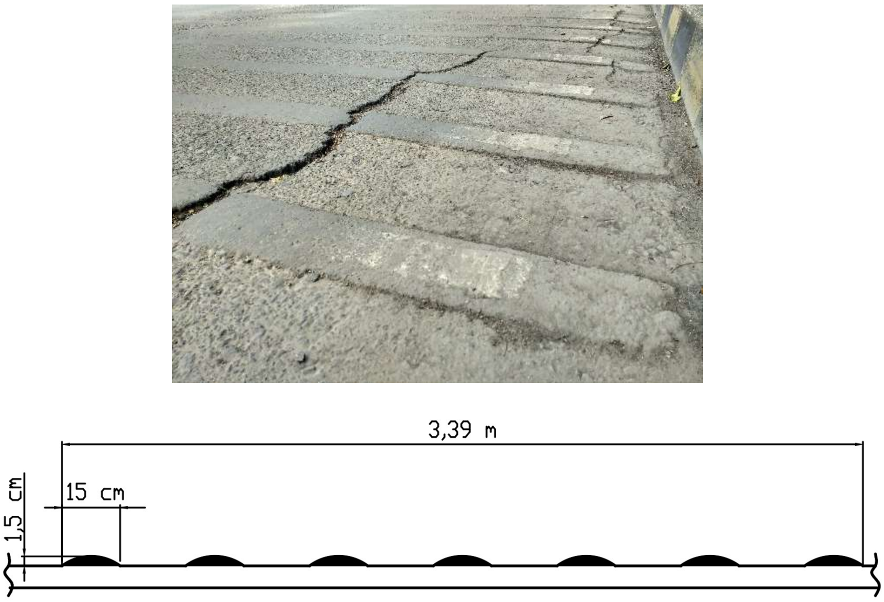
- Pengujian Melewati Polisi Tidur (*Speed Bump*)

  Kendaraan pickup akan diuji melewati polisi tidur dengan ketinggian 10 cm dan lebar 110 cm. Profil dari polisi tidur dipilih yang cukup landai dan tidak terlalu curam agar dapat dilewati dengan beberapa variasi kecepatan. Lokasi polisi tidur adalah di depan Departemen Teknik Mesin ITS dan dimensi profil polisi tidur ditunjukkan pada Gambar 3.14. Variasi kecepatan ujinya adalah 10 km/jam, 15 km/jam, dan 20 km/jam.
- Pengujian Melewati Speed Trap

  Speed trap yang digunakan dalam pengujian ini berada di Jalan Raya ITS sisi PPNS hingga Bundaran ITS. Dimensi dari speed trap adalah tinggi 1,5 cm dan lebar 15 cm dengan jumlah *speed trap* sebanyak 7 buah. Jarak total keseluruhan antara speed trap pertama hingga terakhir adalah 3,39 m. Gambar 3.15 menunjukkan profil dari *speed trap* yang dilalui *pickup* saat pengujian. Variasi kecepatan uji yang digunakan adalah 10 km/jam, 15 km/jam, dan 20 km/jam.



Gambar 3.14 Profil Polisi Tidur untuk Pengujian



Gambar 3.15 Profil Speed Trap untuk Pengujian

- Pengujian Melewati Jalan Aspal

  Pengujian melewati jalan ini adalah jalan aspal yang cukup halus konturnya dan tidak terdapat perbedaan ketinggian. Lokasi jalan tipe ini adalah di Jalan Raya ITS. Variasi kecepatan uji melewati jalan aspal rata adalah 10 km/jam, 20 km/jam, dan 30 km/jam. Gambar 3.16 menunjukkan profil jalan yang dimaksud.

Gambar 3.16 Profil Jalan Aspal Rata

- Pengujian Melewati Jalan Tidak Rata

  Pengujian melewati jalan tipe ini adalah jalan paving yang sudah mengelupas sisi luarnya, sehingga kontur jalannya tidak rata dan cenderung bergelombang. Lokasi dari tipe jalan ini adalah jalan menuju Jurusan Geomatika ITS. Panjang jalan yang digunakan dalam pengujian sekitar 500 meter. Variasi kecepatan uji melewati jalan tidak rata adalah 10 km/jam, 20 km/jam, dan 30 km/jam. Gambar 3.17 menunjukkan profil jalan yang dimaksud.

Gambar 3.17 Profil Jalan Paving Tidak Rata

- Pengujian dengan Berkendara Normal

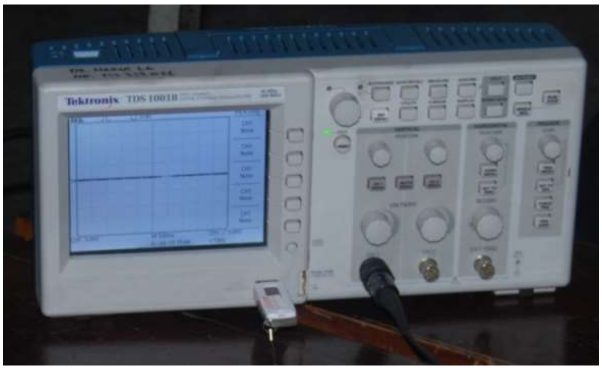
  Jalan yang digunakan pada pengujian ini adalah sepanjang jalan memasuki kampus ITS dari Bundaran ITS menuju Departemen Teknik Mesin dengan jarak 1,6 km. Pengujian tipe ini adalah dengan berkendara normal dengan range kecepatan memasuki kawasan ITS, yaitu 0 km/jam hingga maksimal 30 km/jam. Kecepatan ini menyesuaikan kondisi jalan yang dilalui.Terdapat beberapa tipe jalan yaitu jalan paving tidak rata (bergelombang), polisi tidur dengan beberapa ketinggian yang berbeda, dan jalan berlubang.

3.8 Peralatan yang Digunakan

Peralatan yang digunakan dalam pengujian pada kendaraan *pickup* adalah:

1. *Ball Screw Regenerative Shock absorber* (BSRSA).
2. *Oscilloscope.*

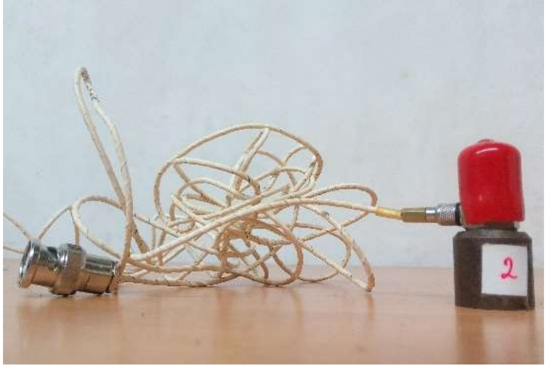
Oscilloscope merupakan suatu alat yang dapat menunjukkan grafik sinusoidal voltase bangkitan dan pembacaan *accelerometer* dari sebuah sistem yang telah dihubungkan sebelumnya. Pada penelitian ini oscilloscope yang digunakan adalah Tektronix P 2220 200 Mhz 1X/10X Passive Probe. Alat ini dihubungkan dengan BSRSA dan sensor *accelerometer* untuk mengetahui voltase bangkitan dan respon dinamis percepatan kendaraan.



Gambar 3.18 *Oscilloscope*

3. *Accelerometer.*

Accelerometer merupakan tranduser yang berfungsi untuk mengukur mengukur percepatan sistem. Pada penelitian ini *accelerometer* dipasang pada bagian kiri atas suspensi belakang pada bak *pickup*, tepat di atas BSRSA. *Accelerometer* yang digunakan adalah merk OMEGA tipe ACC 103.



Gambar 3.19 *Accelerometer*

4. *Power Inverter*.

Power inverter digunakan untuk mengubah tegangan DC dari *pickup* menjadi tegangan AC untuk menyuplai daya *oscilloscope*. Power inverter yang digunakan adalah merek STC dengan daya maksimal mencapai 300 Watt.

Gambar 3.20 *Power Inverter*

5. *Inverter*

Inverter digunakan untuk memperkuat sinyal dari *accelerometer* menuju ke *oscilloscope*.

Gambar 3.21 Inverter

6. Probe Tegangan

Probe tegangan digunakan untuk mengukur tegangan yang dihasilkan oleh generator BSRSA.

Gambar 3.22 Probe Tegangan

7. Resistor

Resistor digunakan sebagai pembebanan elektrik. Pada penelitian ini digunakan tipe resistor *wirewound* yang dapat diatur nilai hambatannya. Nilai hambatannya adalah pada range 0-50 ohm dengan daya maksimal mencapai 60 Watt.

Gambar 3.23 Wirewound Resistor

8. Dioda 3 Fasa

Dioda 3 fasa digunakan untuk mengubah output elektrik 3 fasa AC pada generator menjadi 1 fasa DC. Dengan output menjadi DC, maka arus listrik dapat langsung digunakan pada pembacaan *oscilloscope*.

Gambar 3.24 Dioda 3 Fasa

Pada saat pengambilan data, semua peralatan diletakkan pada bak belakang *pickup* untuk memudahkan proses. Urutan pemasangan peralatan adalah pertama konverter tegangan DC ke AC dihubungkan dengan sumber daya dari aki mobil melalui kabel. Setelah konverter terhubung, daya disambungkan ke *oscilloscope*. Kemudian *channel* 3 pada *oscilloscope* dihubungkan pada probe tegangan yang telah tersambung dengan kabel dari generator BSRSA. Pasangan kabel tidak boleh terbalik antara positif dengan negatif. *Channel* 2 dari *oscilloscope* disambungkan dengan *inverter* dan *accelerometer*. Sementara *accelerometer* dipasang pada bagian atas suspensi kiri belakang kendaraan.

3.9 Pengolahan Data Hasil Pengujian

Data yang diperoleh dari hasil pengujian akan dibandingkan dengan data yang didapat dari hasil simulasi seperempa kendaraan. Hal yang dibandingkan adalah daya bangkitan dan respon dinamis kendaraan. Pengujian sistem BSRSA yang dilakukan pada kendaraan *pickup* dengan bantuan *oscilloscope* akan menampilkan data berupa grafik. Untuk respon dinamis berupa percepatan, perlu dilakukan konversi data dari *oscilloscope* yang masih berupa voltase. Persamaan untuk mengubah voltase menjadi percepatan ditunjukkan pada persamaan (3.17). Setelah dilakukan konversi, data akan di filter dalam *software* MATLAB untuk mengurangi efek *noise*. Sedangkan tegangan bangkitan yang dihasilkan BSRSA, data dari *oscilloscope* bisa langsung dilakukan filter pada MATLAB.

$$Respon\ percepatan = G \frac{g}{V\ .\ Perbesaran} \tag{3.17}$$

dimana :

G	: Data yang akan diolah x skala pembacaan oscilloscope
V	: Sensitivitas accelerometer (10 mV)
g	: Percepatan gravitasi (9,81 m/s^2)
$Perbesaran$	: Skala perbesaran pada *oscilloscope*

BAB 4
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Simulasi Karakteristik BSRSA

4.1.1 Hubungan Rasio Spur Gear dengan Koefisien Redaman BSRSA

Simulasi karakteristik dari BSRSA dilakukan dengan software MATLAB Simulink. Sebelum dilakukan simulasi untuk masing-masing perlu diketahui hubungan antara rasio *spur gear* dengan koefisien redaman yang dihasilkan sistem BSRSA. Hal ini perlu dilakukan untuk mengetahui berapa nilai rasio *spur gear* yang diperlukan agar didapatkan koefisien redaman yang sesuai untuk tipe kendaraan tertentu. Dengan melihat pada persamaan (3.13), koefisien redaman kendaraan proporsional terhadap kecepatan eksitasi ($\dot{x}$), sehingga dengan mengacu pada persamaan (3.13) didapatkan nilai koefisien redaman sesuai dengan persamaan (4.1) berikut:

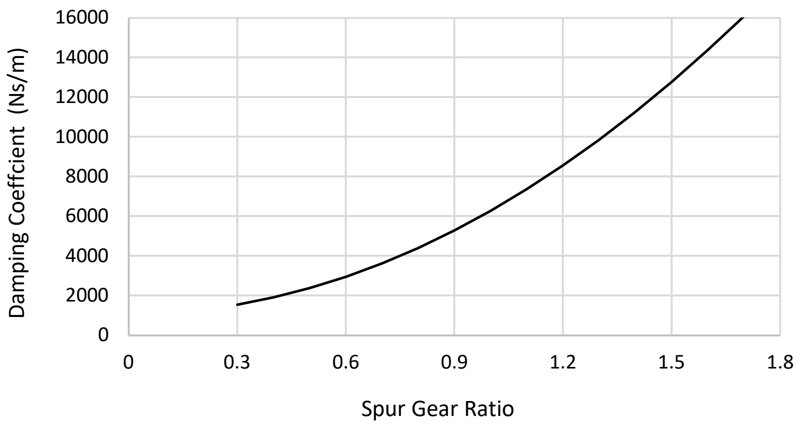
$$C_{BSRSA} = \frac{4\pi^2}{\eta_{BS} l^2}\left(B_1 + N_1^2 B_2 + N_1^2 B_4 + N_1^2 N_2^2 B_5 + \frac{1.5\, N_1^2 N_2^2}{\eta_{bg}\eta_{sg}} \frac{k_t k_e}{R_{in} + R_{ex}}\right) \tag{4.1}$$

Rasio *bevel gear* (N_1) adalah konstan 1. Parameter-parameter yang digunakan adalah berdasarkan Tabel 3.1. Dengan memasukkan masing-masing nilai pada persamaan (4.1), didapatkan hubungan antara nilai koefisien redaman BSRSA dengan rasio *spur gear* seperti ditunjukkan pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.1.

Tabel 4.1 Perbandingan Nilai Koefisien Redaman Terhadap Rasio Spur Gear

Rasio Spur Gear	Koefisien Redaman BSRSA (Ns/m)
1,7	16082
1,6	14368
1,5	12757
1,4	11251
1,3	9849
1,2	8550
1,1	7355
1	6264
0,9	5277

Rasio Spur Gear	Koefisien Redaman BSRSA (Ns/m)
0,8	4394
0,7	3615
0,6	2940
0,5	2368
0,4	1901
0,3	1537

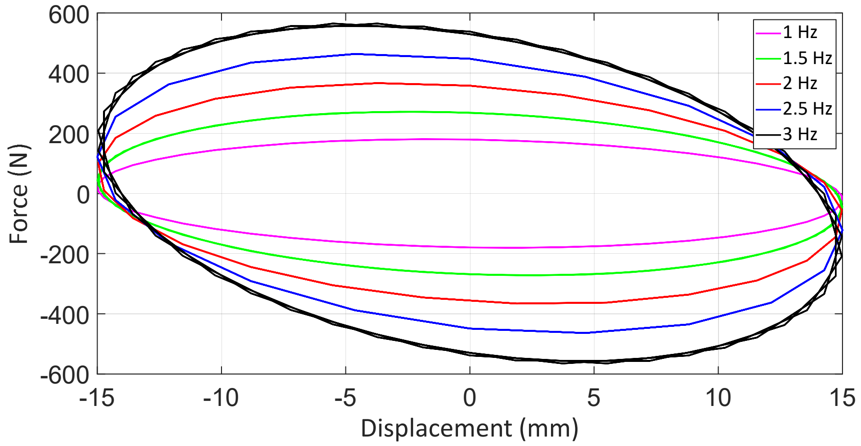


Gambar 4.1 Plot Grafik Koefisien Redaman BSRSA dengan Rasio *Spur Gear*

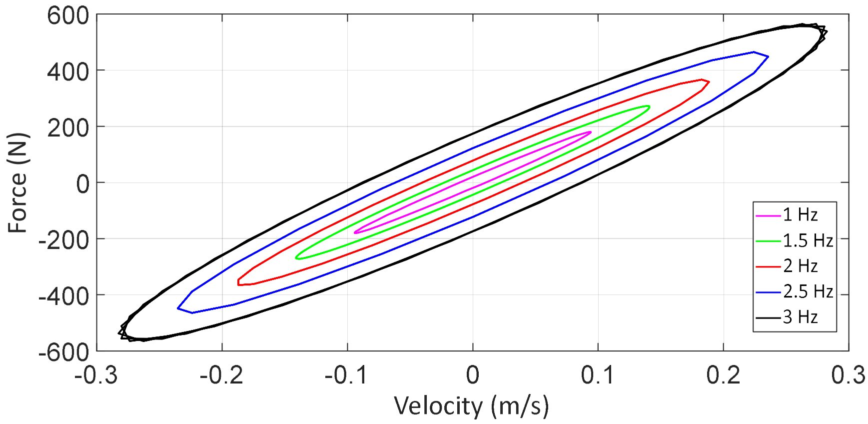
Data yang terdapat pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.1 dapat digunakan sebagai acuan dalam mendesain BSRSA. Dengan target kendaraan yang memiliki range nilai koefisien redaman, maka akan didapat nilai rasio *spur gear* yang akan digunakan. Untuk mobil perkotaan, nilai koefisien redaman yang diperlukan adalah pada kisaran range 1.800 Ns/m hingga 2.000 Ns/m. Sehingga apabila mendesain BSRSA dengan target mobil perkotaan, maka rasio spur gear yang digunakan adalah 0,4 dengan nilai koefisien redaman sebesar 1.901 Ns/m. Sedangkan untuk kendaraan *pickup*, range nilai koefisien redaman lebih bervariasi yaitu antara 2.800 Ns/m hingga 4.000 Ns/m. Dalam simulasi ini dipilih menggunakan rasio spur gear 0,6 dengan nilai koefisien redaman sebesar 2.940 Ns/m. Sedangkan untuk kendaraan besar seperti truk, dapat digunakan rasio spur gear 1,5 dengan nilai koefisien redaman sebesar 12.757 Ns/m. Pada sub bab selanjutnya, akan dilakukan simulasi terhadap 3 rasio spur gear yaitu 0,4 ; 0,6 ; dan 1,5. Masing-masing rasio *spur gear* merepresentasikan mobil perkotaan, *pickup*, dan truk.

4.1.2 Karakteristik BSRSA dengan Rasio Spur Gear 0,4.

Dengan menggunakan rasio *spur gear* 0,4, didapatkan nilai koefisien redaman sebesar 1.901 Ns/m. Referensi untuk mendapatkan rasio *spur gear* 0,4 adalah dengan jumlah gigi 32 dan 80. Nilai koefisien redaman ini mendekati nilai koefisien redaman pada mobil perkotaan Dalam melakukan simulasi karakteristik BSRSA, digunakan 5 eksitasi frekuensi yang berbeda yaitu 1 Hz; 1,5 Hz; 2 Hz; 2,5 Hz; dan 3 Hz dan amplitudo konstan sebesar 15 mm.



Gambar 4.2 Grafik Gaya Redam – Perpindahan untuk Rasio Spur Gear 0,4

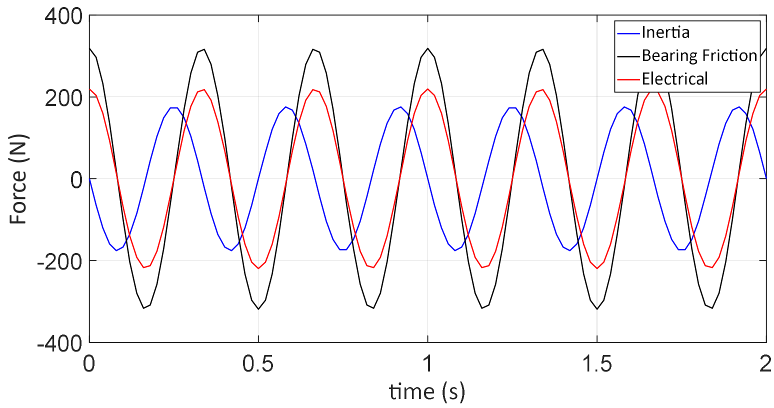


Gambar 4.3 Grafik Gaya Redam – Kecepatan untuk Rasio Spur Gear 0,4

Gambar 4.2 menunjukkan karakeristik BSRSA berupa Gaya Redam-Perpindahan. Grafik yang dihasilkan adalah bentuk elips dengan sistem loop tertutup. Grafik ini menunjukkan energi terdisipasi pada sistem suspensi. Semakin besar area pada grafik, semakin besar potensi energi yang dapat dihasilkan. Pada frekuensi 3 Hz, area pada grafik adalah yang paling besar, sehingga energi bangkitan BSRSA pada frekuensi 3 Hz adalah yang paling tinggi. Gaya redam

bernilai positif menunjukkan gaya redam ketika posisi kompresi (suspensi bergerak naik), sedangkan gaya redam bernilai negatif ketika posisi ekspansi (Suspensi bergerak turun). Maksimal gaya redam yang dihasilkan pada rasio *spur gear* 0,4 adalah 560 N pada frekuensi 3 Hz untuk kondisi kompresi dan ekspansi. Hal ini berbeda apabila dibandingkan dengan konvensional *shock absorber* menggunakan hidrolik. Pada *shock absorber* hidrolik, nilai gaya redam saat kompresi lebih rendah dibandingkan saat ekspansi. Hal ini akan mempengaruhi nilai koefisien redaman yang dihasilkan. Dari Gambar 4.2, semakin besar eksitasi frekuensi, semakin besar gradien pada sistem loop tertutup. Gradien ini diakibatkan oleh adanya gaya inersia pada sistem BSRSA. Gaya inersia ini terjadi akibat adanya transmisi roda gigi (*bevel* dan *spur gear*) dan generator. Penjelasan mengenai hal ini dijelaskan pada Gambar 4.4. Efek gaya inersia akan semakin besar dengan meningkatnya eksitasi frekuensi.

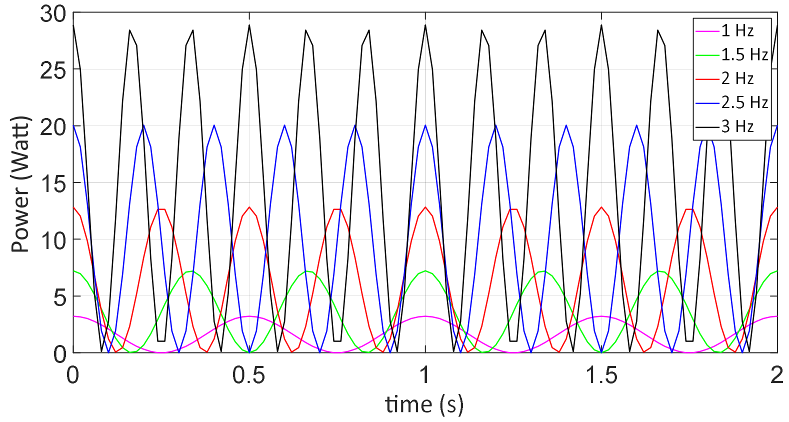
Gambar 4.3 menunjukkan karakteristik BSRSA berupa Gaya Redam-Kecepatan. Sama seperti grafik Gaya Redam-Perpindahan, grafik yang dihasilkan adalah berbentuk elips loop tertutup, dengan gradien garis yang konstan untuk semua frekuensi eksitasi. Dengan gradien garis yang konstan, maka nilai koefisien redaman antara kondisi ekspansi dan kompresi adalah sama. Hal ini juga bisa dilihat pada Gambar 4.2, dimana gaya redam maksimal saat kompresi dan ekspansi adalah sama. Terdapat histerisis pada Gambar 4.3. Semakin besar eksitasi frekuensi, semakin besar histerisis yang terjadi. Histerisis ini terjadi karena pengaruh gaya inersia pada sistem BSRSA. Dan dapat dikatakan bahwa dengan meningkatnya eksitasi frekuensi, maka pengaruh inersia semakin besar.



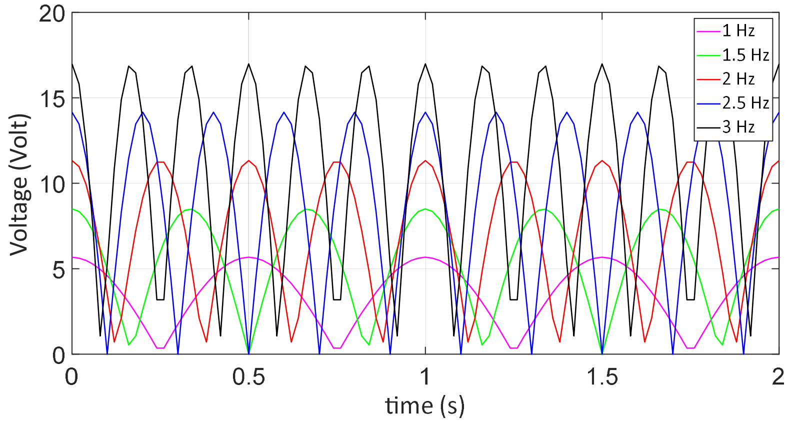
Gambar 4.4 Komponen Gaya Redam pada Rasio *Spur Gear* 0,4

Gambar 4.4 menunjukkan komponen gaya redam yang terbagi pada inersia, *bearing friction*, dan *electrical torque* sesuai dengan persamaan gaya redam yang telah dijabarkan, yaitu pada persamaan (3.13) pada eksitasi frekuensi 3 Hz. Komponen gaya inersia proporsional terhadap percepatan ($\ddot{x}$) sedangkan gaya akibat *friction* dan *electrical* proporsional terhadap kecepatan ($\dot{x}$). Pada gaya inersia memiliki fasa yang berbeda dengan *friction* dan *electrical*. Pada saat gaya inersia ada pada titik maksimal, *friction* dan *electrical* bernilai nol. Sebaliknya pada saat *friction* dan *electrical* ada di titik maksimal, gaya inersia bernilai nol. Hal ini inilah yang mengakibatkan adanya gradien sistem loop tertutup pada Gambar 4.2. Semakin besar gradien yang ada maka efek inersianya akan semakin besar. Sebagai contoh pada saat kecepatan bernilai nol saat posisi perpindahan ada pada 15 mm. Gaya redam akibat inersia sesuai Gambar 4.4 adalah 185 N. Dengan melihat pada Gambar 4.3, saat perpindahan bernilai 185 N, maka gaya redamnya bernilai 185 N. Pada rasio spur gear 0,4 ini, gaya yang paling dominan nilainya adalah berkaitan dengan *friction* pada bearing, kemudian akibat *electrical*, dan terakhir adalah inersia.

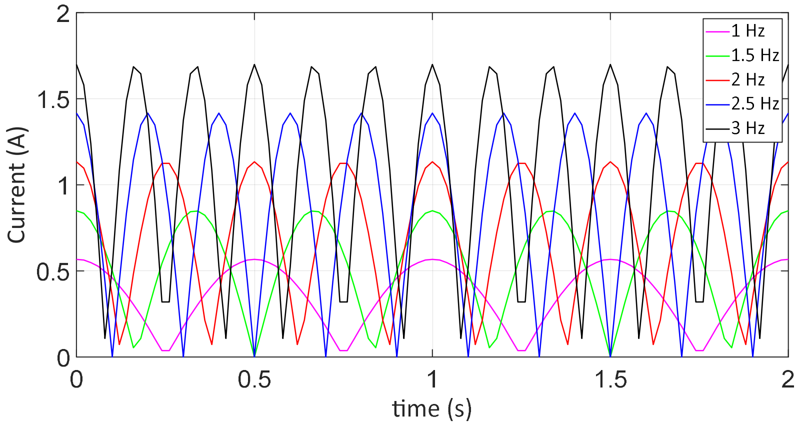
Gambar 4.5 menunjukkan energi bangkitan sistem BSRSA dengan rasio spur gear 0,4 masing-masing untuk (a) Daya, (b) Voltase, dan (c) Arus listrik yang dihasilkan. Semakin tinggi eksitasi frekuensi yang diberikan, maka energi bangkitan yang dihasilkan akan semakin besar. Hal ini sesuai dengan persamaan daya bangkitan (2.9), dimana daya bangkitan dipengaruhi oleh kecepatan putar generator. Semakin tinggi kecepatan putar generator, maka akan semakin besar daya yang dihasilkan. Daya yang dihasilkan maksimal mencapai 28,8 Watt dengan daya RMS sebesar 17,8 Watt pada eksitasi frekuensi 3 Hz. Voltase dan arus maksimal adalah 17 Volt dan 1,7 A. Hal ini juga sesuai dengan potensi energi bangkitan yang dapat dihasilkan sesuai grafik Gaya Redam-Perpindahan yang ada pada Gambar 4.2, dimana pada eksitasi frekuensi 3 Hz, luasan area elips loop tertutup adalah yang paling tinggi yang mengindikasikan potensi energi bangkitan yang dapat diperoleh dari BSRSA.



(a)



(b)



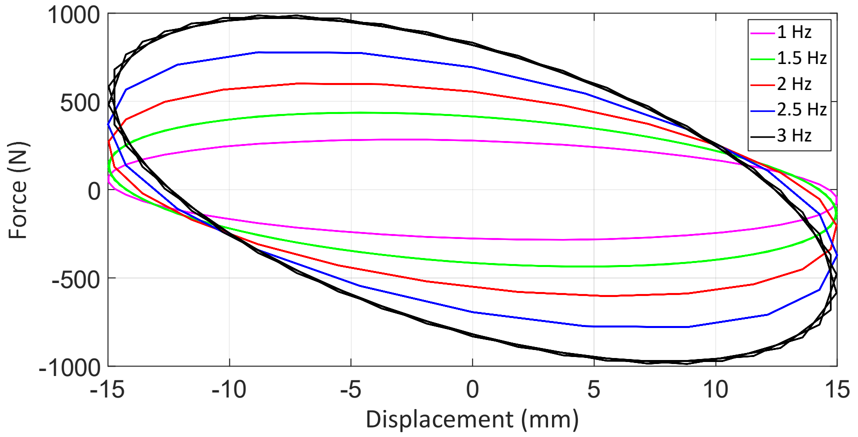
(c)

Gambar 4.5 Energi Bangkitan (a) Daya, (b) Voltase, (c) Arus BSRSA untuk Rasio *Spur Gear* 0,4

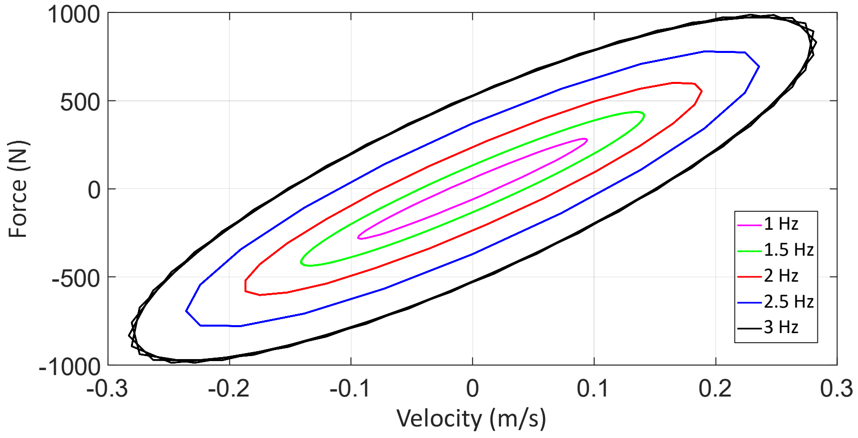
4.1.3 Karakteristik BSRSA dengan Rasio Spur Gear 0,6.

Pada rasio spur gear 0,6, didapatkan nilai koefisien redaman BSRSA sebesar 2.940 Ns/m. Nilai acuan koefisien redaman ini digunakan dalam mendesain redaman suspensi untuk kendaraan *pickup*. Referensi untuk mendapatkan rasio spur

gear 0,6 adalah jumlah gigi 36 dan 60. Pada penelitian ini, rancang bangun BSRSA akan menggunakan rasio spur gear 0,6 sesuai dengan target kendaraan *pickup*. Gambar 4.6 menunjukkan karakeristik BSRSA berupa Gaya Redam-Perpindahan untuk rasio *spur gear* 0,6. Secara umum, karakteristik dari grafik sama seperti pada rasio spur gear 0,4. Dengan meningkatnya eksitasi frekuensi, maka gradien loop sistem tertutup akan semakin besar. Peningkatan ini diakibatkan oleh gaya inersia dan dibuktikan juga pada Gambar 4.8. Potensi energi bangkitan paling besar terjadi pada frekuensi eksitasi 3 Hz. Gaya redam maksimal yang dihasilkan 970 N pada fekuensi 3 Hz untuk kondisi ekspansi dan kompresi.



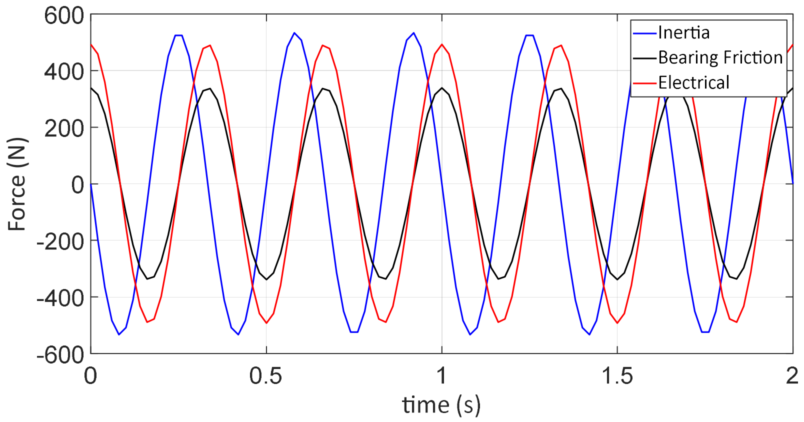
Gambar 4.6 Grafik Gaya Redam – Perpindahan untuk Rasio Spur Gear 0,6



Gambar 4.7 Grafik Gaya Redam – Kecepatan untuk Rasio Spur Gear 0,6

Gambar 4.7 menunjukkan karakteristik BSRSA berupa Gaya Redam-Kecepatan pada rasio spur gear 0,6. Gradien loop sistem tertutup sama untuk semua eksitasi frekuensi. Apabila dibandingkan dengan rasio 0,4, histerisis yang terjadi lebih besar. Besarnya histeris juga semakin meningkat dengan peningkatan eksitasi

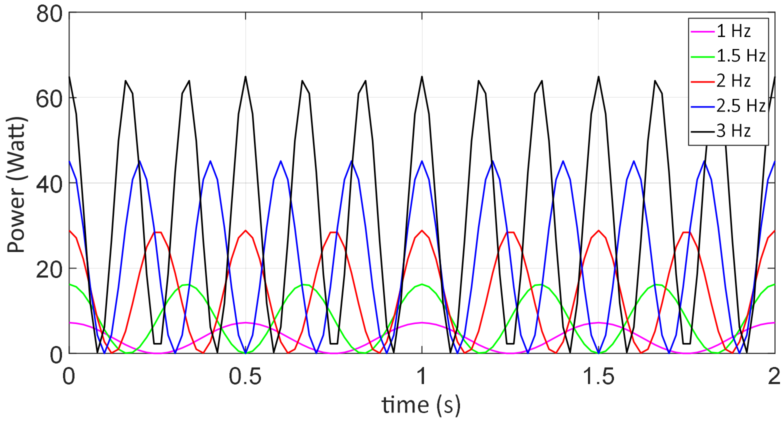
frekuensi. Hal ini menunjukkan bahwa efek dari inersia untuk rasio *spur gear* 0,6 lebih besar bila dibandingkan dengan rasio *spur gear* 0,4. Hal ini dapat dibuktikan juga pada Gambar 4.8, dimana nilai gaya inersia maksimal mencapai 520 N, dibanding 185 N pada rasio spur gear 0,4. Nilai gaya inersia akan semakin besar dengan peningkatan frekuensi. Fenomena ini sesuai dengan persamaan gaya redam (3,13), dimana rasio *spur gear* (N_2) berpengaruh terhadap besar terhadap inersia yang terjadi.



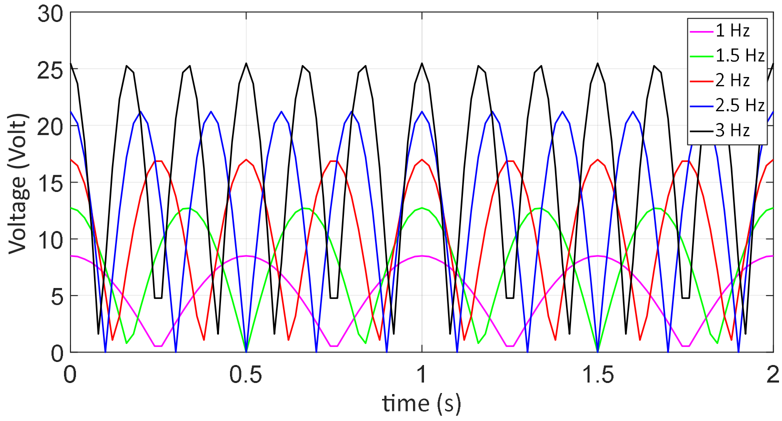
Gambar 4.8 Komponen Gaya Redam pada Rasio Spur Gear 0,6

Komponen-komponen gaya redam pada rasio spur gear 0,6 eksitasi frekuensi 3 Hz ditunjukkan pada Gambar 4.8. Gaya yang paling dominan adalah inersia dan electrical, dimana masing-masing memiliki nilai 520 N dan 500 N. Dan yang paling kecil adalah akibat *friction*. Nilai akibat gaya inersia ini meningkat hingga hampir 3 kali lipat dibandingkan dengan rasio *spur gear* 0,4. Dengan demikian, gradien loop pada grafik Gaya Redam-Perpindahan dan histerisis pada grafik Gaya Redam-Kecepatan akan lebih besar. Sedangkan gaya yang berkaitan dengan electrical adalah berkaitan dengan potensi energi bangkitan yang dihasilkan. Dengan gaya electrical yang meningkat hingga 2,8 kali, maka potensi energi bangkitan yang dihasilkan juga akan meningkat dengan nilai yang sama.

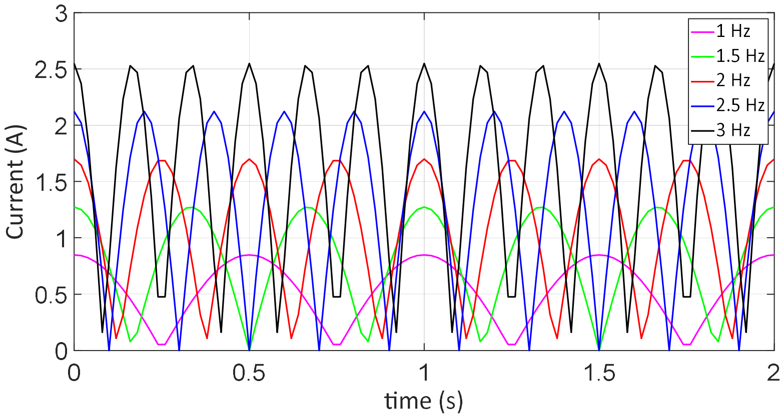
Gambar 4.9 menunjukkan daya bangkitan yang dihasilkan BSRSA pada rasio *spur gear* 0,6 berupa (a) Daya, (b) Voltase, dan (c) Arus. Daya maksimal terjadi pada frekuensi 3 Hz sebesar 65 Watt dengan daya RMS sebesar 40 Watt. Voltase maksimal yang dihasilkan mencapai 25 Volt dan arus yang dihasilkan 2,5 A. Daya yang dihasilkan lebih besar karena kecepatan putar generator lebih besar dibandingkan pada rasio spur gear 0,4.



(a)



(b)



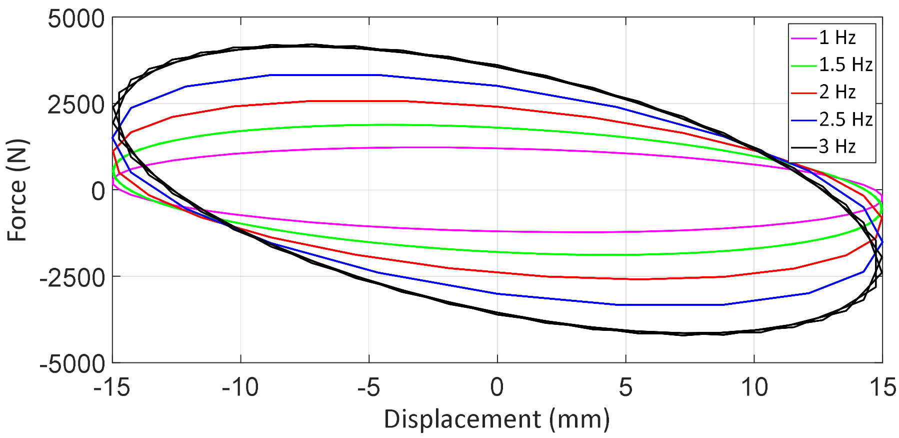
(c)

Gambar 4.9 Energi Bangkitan (a) Daya, (b) Voltase, dan (c) Arus BSRSA untuk Rasio *Spur Gear* 0,6

4.1.4 Karakteristik BSRSA dengan Rasio Spur Gear 1,5.

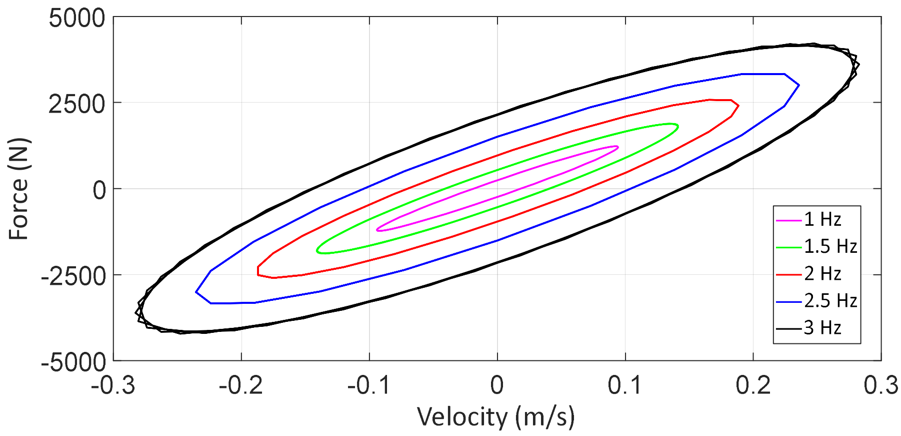
Pada rasio spur gear 1,5, didapatkan nilai koefisien redaman BSRSA sebesar 12.770 Ns/m. Nilai acuan koefisien redaman ini digunakan dalam mendesain redaman suspensi untuk kendaraan berat seperti truk. Referensi untuk mendapatkan

rasio spur gear 1,5 adalah jumlah gigi 60 dan 40. Terdapat peningkatan kecepatan generator sebanyak 1,5 kali. Gambar 4.10 menunjukkan grafik Gaya Redam-Perpindahan pada rasio spur gear 1,5. Gaya redam yang dihasilkan adalah yang paling besar bila dibandingkan pada rasio 0,4 dan 0,6 yaitu sebesar 4.100 N pada frekuensi 3 Hz. Nilai gaya redam maksimal antara ekspansi dan kompresi adalah sama Dengan gaya redam sebesar ini, maka potensi energi bangkitan yang dihasilkan juga semakin besar.

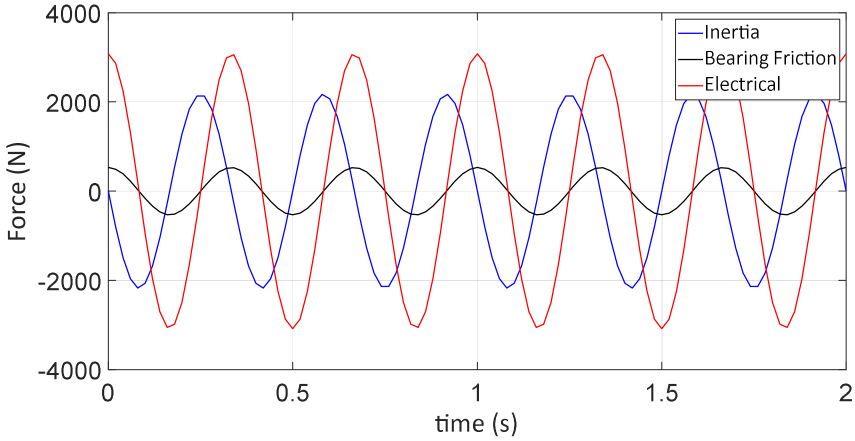


Gambar 4.10 Grafik Gaya Redam – Perpindahan untuk Rasio Spur Gear 1,5

Gambar 4.11 menunjukkan grafik Gaya Redam-Kecepatan pada rasio spur gear 1,5. Histeris karena adanya efek inersia yang terjadi semakin besar. Dapat dikatan bahwa pada rasio spur gear 1,5, efek inersia yang terjadi adalah yang paling besar. Hal ini dapat dibuktikan pada Gambar 4.12. Gaya inersia mencapai 2.100 N, lebih besar 4 kali lipat dibanding rasio *spur gear* 0,6 dan 12 kali lipat dibanding rasio *spur gear* 0,4.

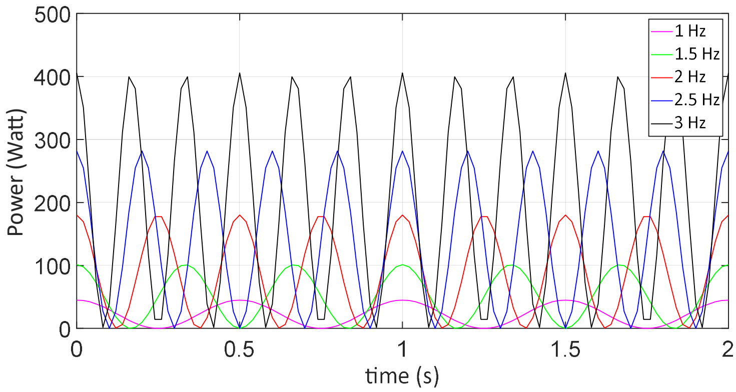


Gambar 4.11 Grafik Gaya Redam – Kecepatan untuk Rasio Spur Gear 1,5

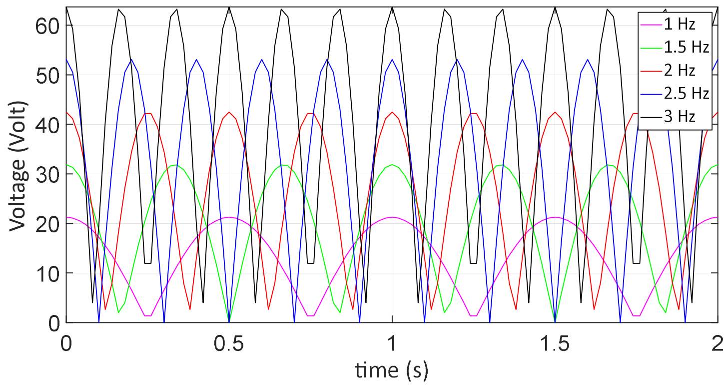


Gambar 4.12 Komponen Gaya Redam pada Rasio Spur Gear 1,5

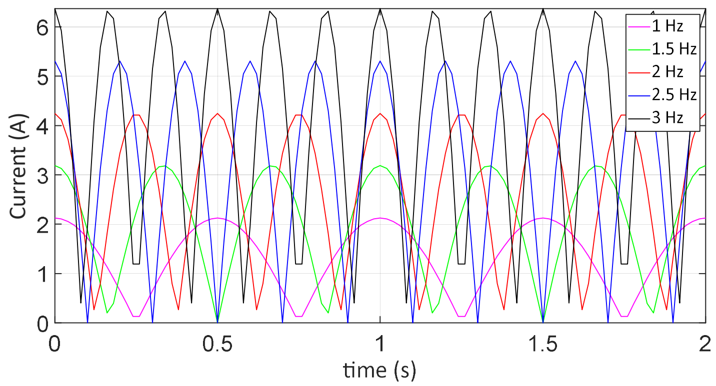
Gambar 4.12 menunjukkan komponen gaya redam pada rasio *spur gear* 1,5. Gaya paling besar adalah akibat *electrical*, yang mengindikasikan bahwa potensi energi bangkitan yang dihasilkan sangat besar. Kemudian adalah gaya inersia, dimana nilai ini adalah yang paling besar diantara rasio *spur gear* 0,4 dan 0,6. Dan yang paling kecil adalah bearing *friction*.



(a)



(b)



(c)

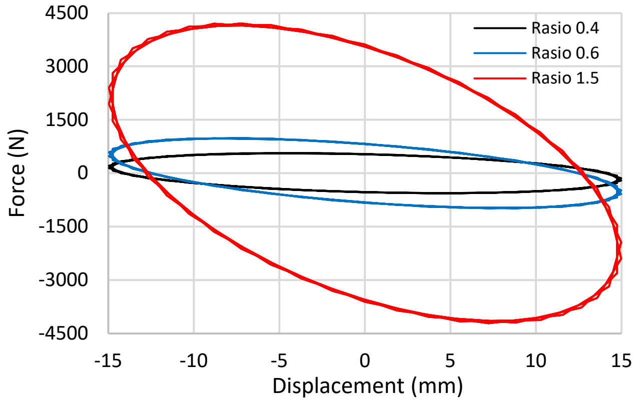
Gambar 4.13 Energi Bangkitan (a) Daya, (b) Voltase, dan (c) Arus BSRSA untuk Rasio *Spur Gear* 1,5

Energi bangkitan berupa (a) Daya, (b) Voltase, dan (c) Arus ditunjukkan pada Gambar 4.13. Daya maksimal terjadi pada frekuensi 3 Hz sebesar 400 Watt dengan daya RMS sebesar 250 Watt. Voltase maksimal yang dihasilkan mencapai 63 Volt dan arus yang dihasilkan 6,3 A. Besarnya daya yang dihasilkan diakibatkan kecepatan putar generator yang cukup tinggi, dimana pada rasio spur gear 1,5, terdapat peningkatan kecepatan putar generator bila dibandingkan dengan rasio 0,4 dan 0,6. Namun demikian perlu diperhatikan mengenai kemampuan generator dalam menerima kecepatan putar yang dihasilkan. Daya yang dihasilkan merupakan daya teoritis dengan parameter generator yang telah ditetapkan sebelumnya, sehingga berapa pun kecepatan putar generator, tentu akan tetap menghasilkan daya. Perlu dilakukan analisa lebih lanjut berkaitan dengan kemampuan generator dalam menerima kecepatan putar. Apabila telah melewati batas dari kecepatan generator, maka daya bangkitan yang dihasilkan justru akan semakin berkurang. Dengan demikian, perlu dilakukan upgrade generator yang lebih besar dimana generator mampu menerima putaran ataupun beban yang lebih besar.

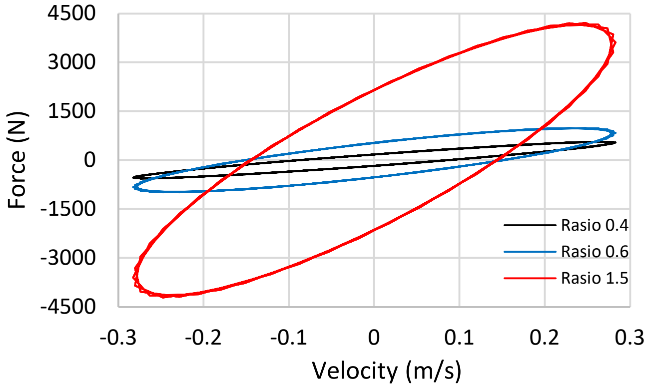
4.1.5 Perbandingan Karakteristik BSRSA

Secara umum untuk masing-masing rasio *spur gear*, memiliki karakteristik yang sama. Dengan meningkatnya frekuensi, maka akan semakin meningkatkan nilai gaya redam, efek gaya inersia dan energi bangkitan berupa daya, voltase, dan arus. Efek gaya inersia bisa dilihat dari gradien garis loop tertutup pada Gaya

Redam – Perpindahan dan histerisis pada Gaya Redam – Kecepatan. Gambar 4.14 menunjukkan perbandingan Gaya Redam – Perpindahan untuk masing-masing rasio *spur gear* pada frekuensi eksitasi 3 Hz. Peningkatan rasio spur gear mengakibatkan gradien loop sistem tertutup grafik semakin meningkat dan luasan area grafik juga semakin besar. Peningkatan gradien diakibatkan oleh efek inersia yang semakin besar dan peningkatan luasan diakibatkan oleh gaya *electrical*. Gaya redam yang dihasilkan juga akan semakin tinggi yang berarti luasan grafik lebih besar dan potensi energi bangkitan juga akan semakin besar. Perbandingan mengenai besaran gaya inersia pada masing-masing *spur gear* juga dapat dilihat pada Gambar 4.16.



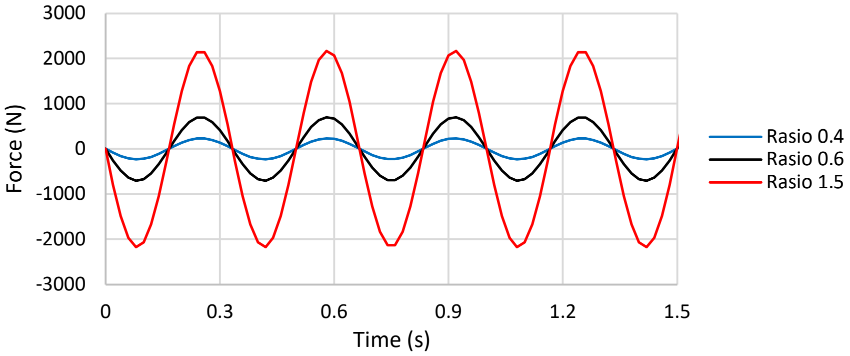
Gambar 4.14 Gaya Redam – Perpindahan untuk Masing-Masing Rasio *Spur Gear*



Gambar 4.15 Gaya Redam – Perpindahan untuk Masing-Masing Rasio *Spur Gear*

Gambar 4.15 menunjukkan perbandingan Gaya Redam – Kecepatan untuk masing-masing rasio *spur gear* pada frekuensi eksitasi 3 Hz. Gradien garis loop tertutup dan besar histerisis akan semakin meningkat seiring kenaikan rasio *spur gear*. Kenaikan gradien garis ini mngindikasikan kenaikan koefisien redaman BSRSA. Sedangkan histerisis yang terjadi akan semakin meningkat dengan

meningkatnya rasio *spur gear*. Besarnya histerisis diakibatkan oleh efek inersia BSRSA. Hal ini dapat dibuktikan pada Gambar 4.16 bekaitan dengan perbandingan besaran gaya inersia untuk masing-masing rasio spur gear. Dengan melihat pada Gambar 4.14, 4.15 dan 4.16, dengan meningkatnya rasio *spur gear* akan menyebabkan peningkatan efek inersia, peningkatan energi bangkitan, dan besaran gaya redam.



Gambar 4.16 Perbandingan Gaya Inersia pada Masing-Masing Rasio *Spur Gear*

4.2 Hasil Simulasi Pemodelan Seperempat Kendaraan

Pemodelan yang dilakukan adalah dengan menggunakan model seperempat kendaraan 2 DOF dengan ban. Simulasi ini dilakukan untuk mengetahui respon dinamis dari kendaraan apabila BSRSA dipasang pada sistem suspensi kendaraan. Pada simulasi, kendaraan yang digunakan sebagai referensi adalah Daihatsu Granmax *pickup*. Pemilihan kendaraan sama seperti pada uji kendaraan. Hasil simulasi juga akan digunakan sebagai referensi dan pembanding potensi daya bangkitan yang dihasilkan. Tipe jalan yang akan digunakan dalam simulasi adalah polisi tidur dan speed trap.

4.2.1 Simulasi dengan Profil Jalan Polisi Tidur

Simulasi melewati tipe jalan polisi tidur dilakukan untuk mengetahui potensi daya bangkitan yang dihasilkan melewati tipe jalan ini. Hal pertama yang perlu diketahui adalah pendekatan model matematis dari polisi tidur terhadap waktu sebagai input eksitasi. Dalam penelitiannya, Kanjanavapastit (2013) melakukan penelitian pendekatan model matematis profil dari polisi tidur. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$y(t) = -\frac{1}{2}H\left(cos\left(2\pi\frac{v\,t}{L}\right)-1\right) \quad ,untuk\ 0 \leq x \leq L \qquad (4.2)$$

dimana :

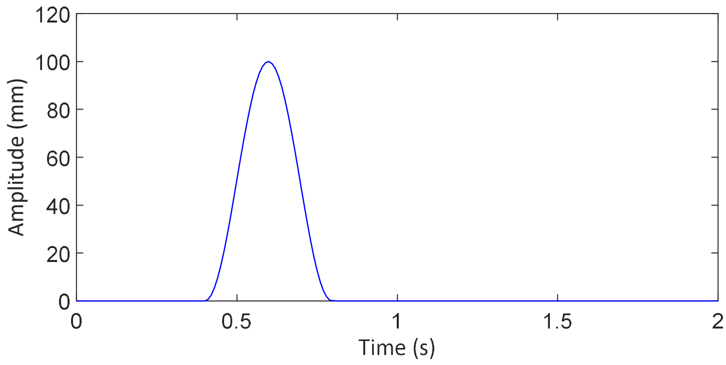
H : ketinggian polisi tidur (m)

L : panjang polisi tidur (m)

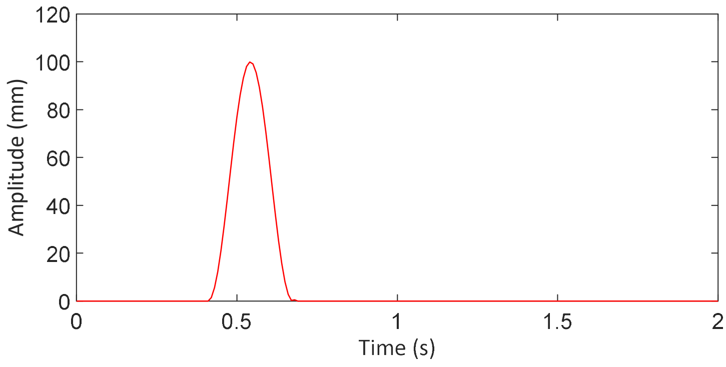
v : kecepatan kendaraan (m/s)

t : range waktu melewati polisi tidur (s)

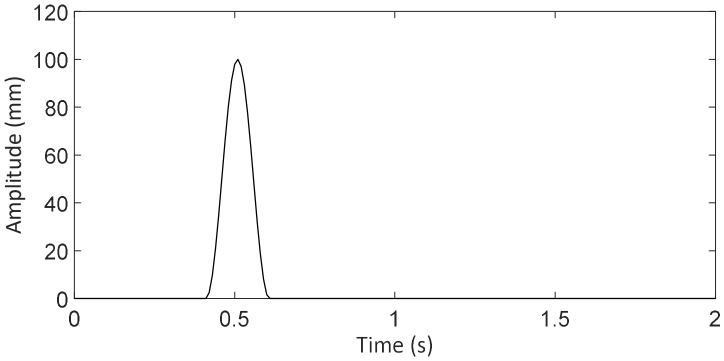
Perlu diketahui bahwa dimensi-dimensi di atas berkaitan dengan polisi tidur menyesuaikan dari profil jalan pada saat pengujian seperti telah dijelaskan pada sub bab 3.7. Dimensi dari polisi tidur adalah H = 100 mm dan L = 1100 mm sesuai pada Gambar 3.14. Kecepatan kendaraan adalah 10 km/jam, 15 km/jam, dan 20 km/jam. Gambar 4.17 menunjukkan profil jalan melewati polisi tidur sebagai fungsi waktu untuk masing-masing kecepatan sesuai dengan persamaan 4.2. Dapat dilihat bahwa dengan meningkatnya kecepatan, maka range waktu melewati polisi tidur akan semakin cepat. Profil jalan dalam satuan waktu juga mendekati dari profil polisi tidur.



(a)



(b)

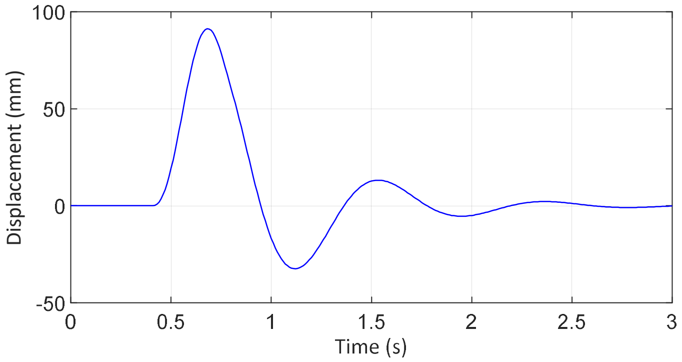


(c)

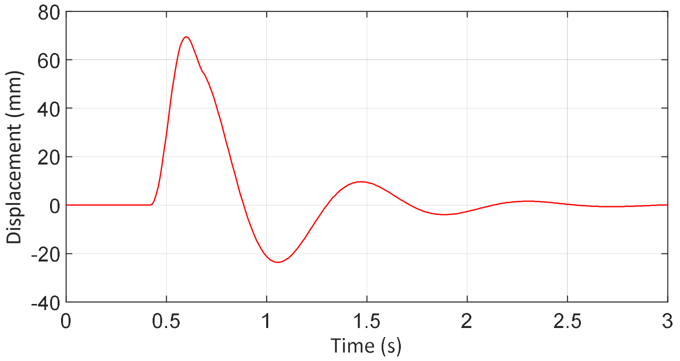
Gambar 4.17 Profil Input Eksitasi Polisi Tidur pada Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam dan, (c) 20 km/jam.

Dengan profil input jalan seperti yang telah ditunjukkan pada gambar 4.17, dilakukan simulasi untuk masing-masing kecepatan. Hasil akhir yang didapat dari simulasi ini adalah respon dinamis berupa perpindahan body kendaraan, percepatan vertikal kendaraan, dan daya bangkitan. Hasil dari simulasi ini nanti digunakan sebagai referensi dari potensi daya bangkitan yang dihasilkan untuk masing-masing kecepatan, dan akan dibandingkan dengan hasil pengujian kendaraan *pickup*.

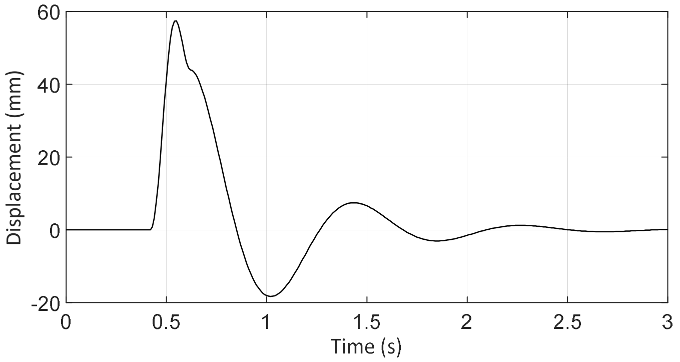
Gambar 4.18 menunjukkan respon dinamis berupa perpindahan dari body kendaraan untuk masing-masing kecepatan 10 km/jam, 15 km/jam, dan 20 km/jam. Nilai perpindahan body kendaraan tertinggi terjadi pada kecepatan 10 km/jam, yaitu sebesar 90 mm. Dengan tinggi polisi tidur 100 mm, maka nilai perpindahan yang ditransfer ke body kendaraan cukup tinggi. Dengan meningkatnya kecepatan, nilai perpindahan akan semakin turun, Pada kecepatan 15 km/jam nilai perpindahan maksimal sebesar 70 mm dan pada kecepatan 20 km/jam sebesar 58 mm.



(a)



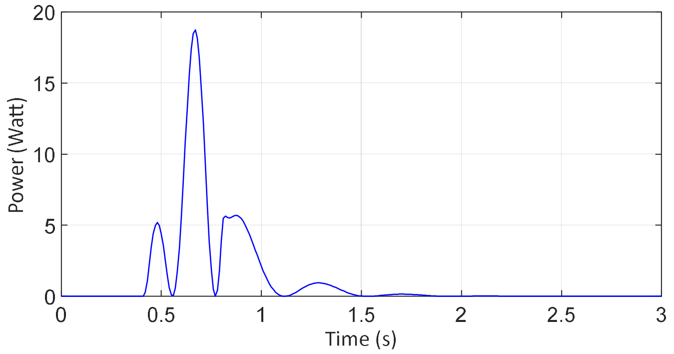
(b)



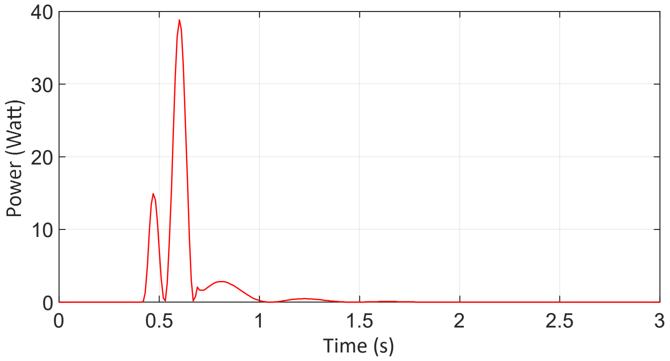
(c)

Gambar 4.18 Simulasi Respon Dinamis Perpindahan Body Kendaraan Polisi Tidur pada Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, dan (c) 20 km/jam.

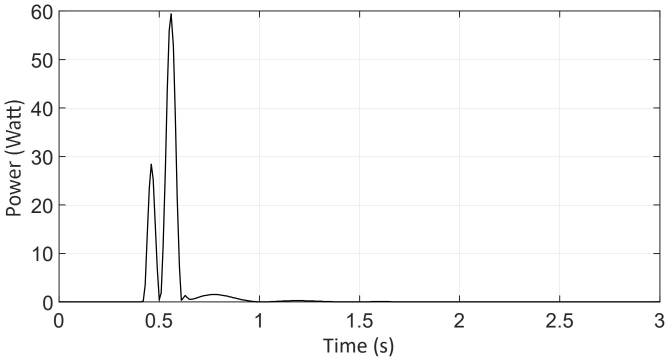
Gambar 4.19 menunjukkan daya bangkitan yang dihasilkan pada kecepatan 10 km/jam, 15 km/jam, dan 20 km/jam. Daya bangkitan maksimal terjadi pada kecepatan 20 km/jam yaitu mencapai 60 Watt. RMS Daya yang dihasilkan adalah 4,8 Watt ; 7,8 Watt ; dan 10,3 Watt masing-masing untuk kecepatan 10 km/jam, 15 km/jam, dan 20 km/jam. Dengan meningkatnya kecepatan maka daya bangkitan yang dihasilkan akan semakin besar. Namun range waktu dalam menghasilkan daya akan semakin berkurang.



(a)



(b)



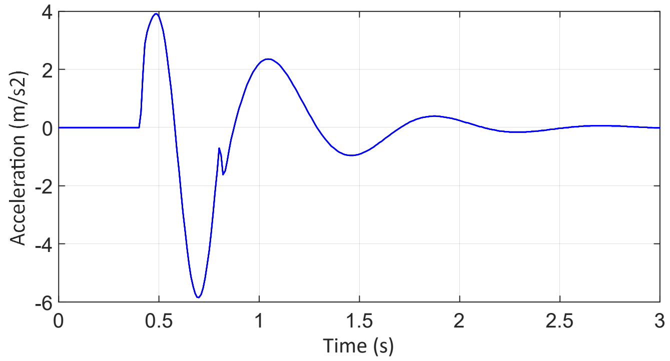
(c)

Gambar 4.19 Simulasi Daya Bangkitan Melewati Polisi Tidur pada Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam dan, (c) 20 km/jam.

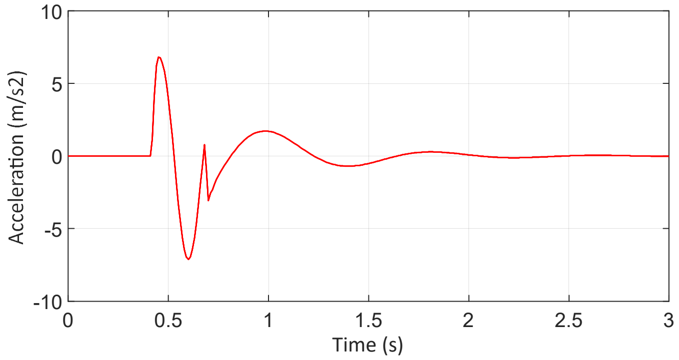
Hasil simulasi selanjutnya adalah percepatan vertikal body kendaraan. Nilai percepatan vertikal dapat digunakan sebagai acuan dalam menentukan derajat kenyamanan dalam berkendara. Berdasarkan ISO 2631, derajat kenyamanan berkendara mengacu pada percepatan vertikal kendaraan terdapat pada Tabel 4.2. Dengan menggunakan data yang ada pada Tabel 4.2, dapat diketahui derajat kenyamanan dari kendaraan.

Tabel 4.2 Nilai Acuan Kenyamanan Pengendara Tehadap Percepatan

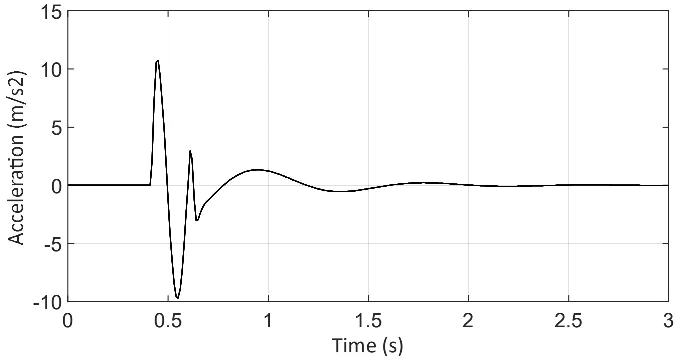
Nilai Acuan Percepatan	**Parameter Kenyamanan**
$a < 0{,}315\ m/s^2$	Tidak ada keluhan
$0{,}315\ m/s^2 – 0{,}63\ m/s^2$	Sedikit tidak nyaman
$0{,}5\ m/s^2 – 1\ m/s^2$	Agak tidak nyaman
$0{,}8\ m/s^2 – 1{,}6\ m/s^2$	Tidak nyaman
$1{,}25\ m/s^2 – 2{,}5\ m/s^2$	Sangat tidak nyaman
$a > 2\ m/s^2$	Amat angat tidak nyaman



(a)



(b)



(c)

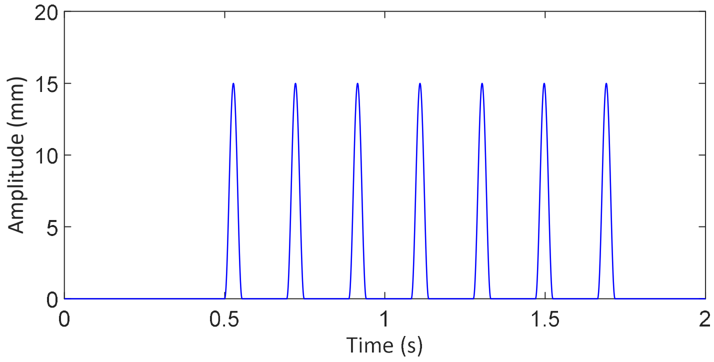
Gambar 4.20 Simulasi Respon Dinamis Percepatan Body Kendaraan Polisi Tidur pada Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, dan (c) 20 km/jam.

Gambar 4.20 merupakan respon dinamis berupa percepatan vertikal body kendaraan. Terlihat bahwa nilai respon percepatan akan meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan. Range waktu yang dibutuhkan untuk stabil juga akan semakin cepat. Dengan meningkatnya kecepatan, maka getaran yang terjadi pada body kendaraan semakin besar, sehingga berpengaruh terhadap daya bangkitan yang dihasilkan. Dengan meningkatnya potensi daya bangkitan yang dihasilkan

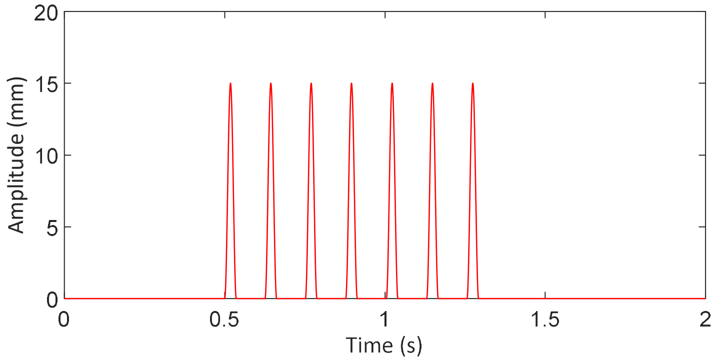
maka respon percepatan juga akan semakin besar. RMS percepatan dari body kendaraan adalah 2,06 m/s^2 ; 2,15 m/s^2 ; dan 2,54 m/s^2 masing-masing untuk kecepatan 10 km/jam, 15 km/jam dan 20 km/jam. Berdasarkan tingkat kenyamanan pengendara yang ada pada Tabel 4.2, pada kecepatan 10 km/jam dan 15 km/jam ada pada level sangat tidak nyaman, sedangkan pada kecepatan 20 km/jam ada pada level amat sangat tidak nyaman. Namun demikian hal ini hanya berlangsung singkat, yaitu hanya ketika kendaraan melewati polisi tidur.

4.2.2 Simulasi dengan Profil Jalan Speed Trap

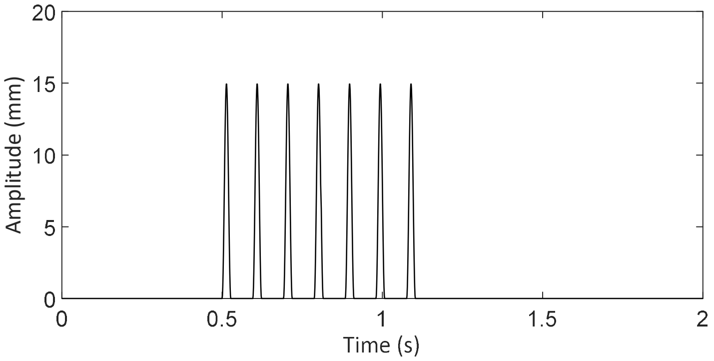
Profil jalan *speed trap* pada dasarnya sama dengan polisi tidur. Hal yang menjadi perbedaan adalah ukuran dari *speed trap* yang lebih kecil, namun jumlahnya yang banyak. Dalam hal ini dimensi dari *speed trap* untuk simulasi mengikuti dimensi *speed trap* pengujian. Dimensi dari *speed trap* adalah H = 15 mm dan L = 150 mm sesuai pada Gambar 3.14. Terdapat 7 buah *speed trap* dengan jarak masing-masing *speed trap* 390 mm. Dengan menggunakan persamaan (4.2), profil jalan *speed trap* untuk masing-masing kecepatan terdapat pada Gambar 4.21.



(a)



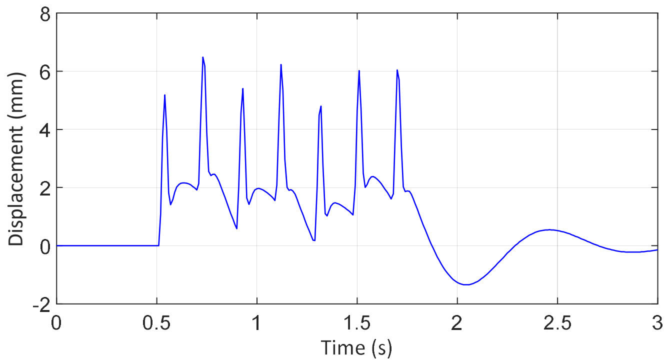
(b)



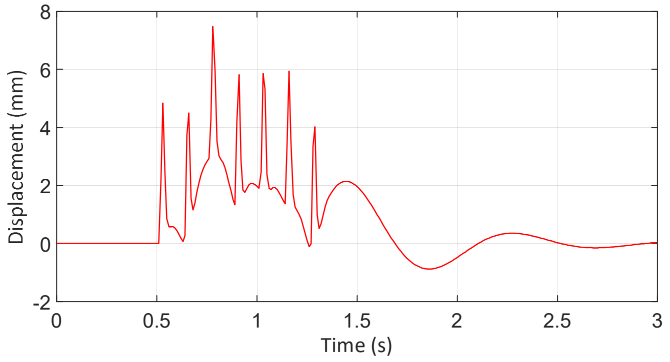
(c)

Gambar 4.21 Profil Input Eksitasi *Speed Trap* pada Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, dan (c) 20 km/jam.

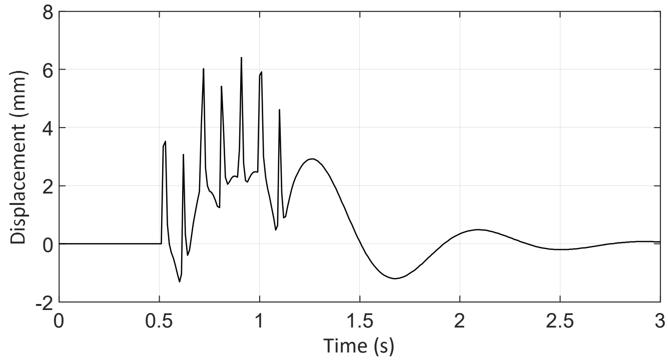
Gambar 4.22 menunjukkan respon dinamis berupa perpindahan dari body kendaraan untuk masing-masing kecepatan 10 km/jam, 15 km/jam, dan 20 km/jam. Tren dari perpindahan pada body kendaraan adalah perpindahan bernilai positif selama kendaraan melewati *speed trap*. Nilai perpindahan maksimal yang ditransfer pada body kendaraan maksimal 6,5 mm pada kecepatan 10 km/jam. Dengan meningkatnya kecepatan, maka nilai perpindahan body akan semakin berkurang.



(a)



(b)

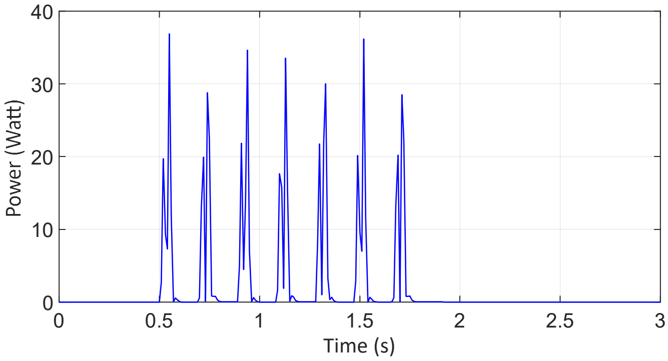


(c)

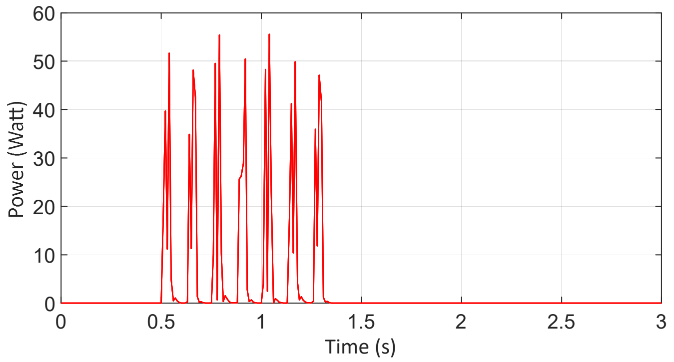
Gambar 4.22 Simulasi Respon Dinamis Perpindahan Body Kendaraan *Speed Trap* pada Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, dan (c) 20 km/jam.

Gambar 4.23 menunjukkan daya bangkitan yang dihasilkan melewati *speed trap* pada kecepatan 10 km/jam, 15 km/jam, dan 20 km/jam. Pola daya bangkitan yang dihasilkan relatif lebih stabil sesuai dengan profil eksitasi jalan. Daya bangkitan maksimal terjadi pada kecepatan 20 km/jam yaitu mencapai 95 Watt. RMS Daya yang dihasilkan adalah 10,3 Watt ; 21,4 Watt ; dan 32,4 Watt masing-masing untuk kecepatan 10 km/jam, 15 km/jam, dan 20 km/jam. Dengan meningkatnya kecepatan maka daya bangkitan yang dihasilkan akan semakin besar.

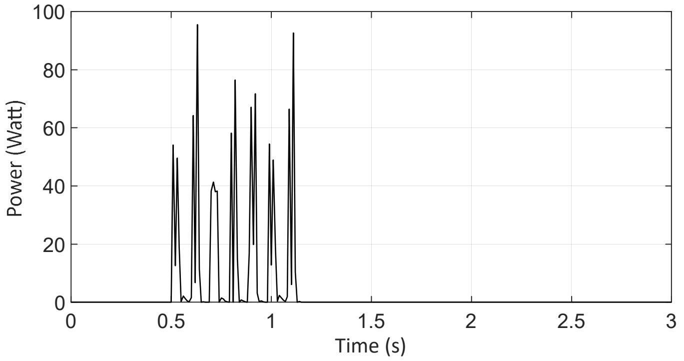
Nilai RMS daya yang dihasilkan melewati *speed trap* lebih besar dibandingkan dengan polisi tidur. Rata-rata besaran daya bangkitan yang dihasilkan 2 kali lipat lebih besar. Hal ini terjadi karena profil dari input eksitasi yang berulang-ulang dalam waktu yang singkat. Terdapat 7 buah *speed trap* dengan jarak yang cukup dekat, masing-masing 390 mm. Sehingga walaupun ketinggian dari *speed trap* jauh lebih kecil, potensi daya bangkitan yang dihasilkan lebih besar.



(a)



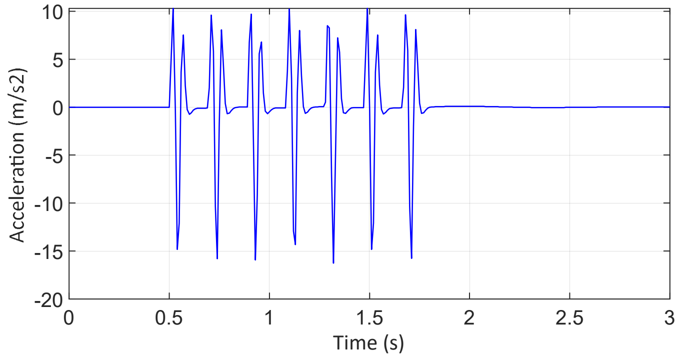
(b)



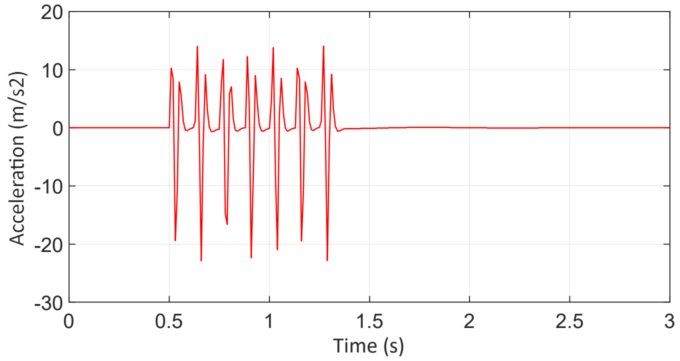
(c)

Gambar 4.23 Simulasi Daya Bangkitan Melewati *Speed Trap* pada Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, dan (c) 20 km/jam.

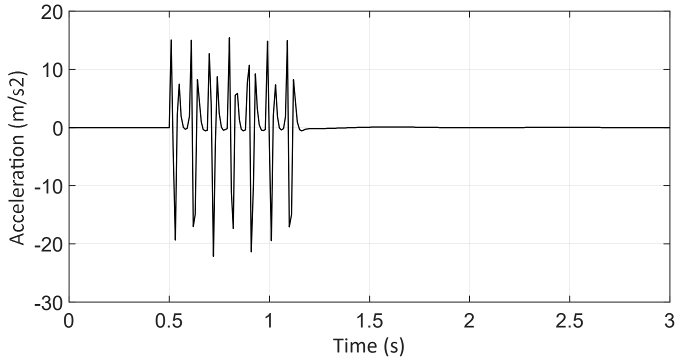
Gambar 4.24 merupakan respon dinamis berupa percepatan vertikal body kendaraan melewati *speed trap* pada masing-masing kecepatan. Nilai respon percepatan mengikuti kontur jalan *speed trap*, yaitu terjadi getaran berulang-ulang dalam waktu yang singkat. Nilai percepatan maksimal yang dihasilkan cukup besar dibandingkan dengan polisi tidur yaitu mencapai 15 m/s^2, namun hanya dalam waktu yang sangat singkat. Seiring dengan meningkatnya kecepatan, maka respon percepatan maksimal akan semakin besar, namun range waktu kendaraan untuk stabil lebih cepat. RMS percepatan dari body kendaraan adalah 5,2 m/s^2 ; 6,0 m/s^2 ; dan 6,1 m/s^2 masing-masing untuk kecepatan 10 km/jam, 15 km/jam dan 20 km/jam. Nilai RMS percepatan proporsional dengan daya bangkitan yang dihasilkan. Berdasarkan tingkat kenyamanan pengendara yang ada pada Tabel 4.2, pada semua variasi kecepatan ada pada level amat sangat tidak nyaman. Namun demikian, ketidaknyamanan pengendara hanya terjadi ketika melewati *speed trap* saja.



(a)



(b)



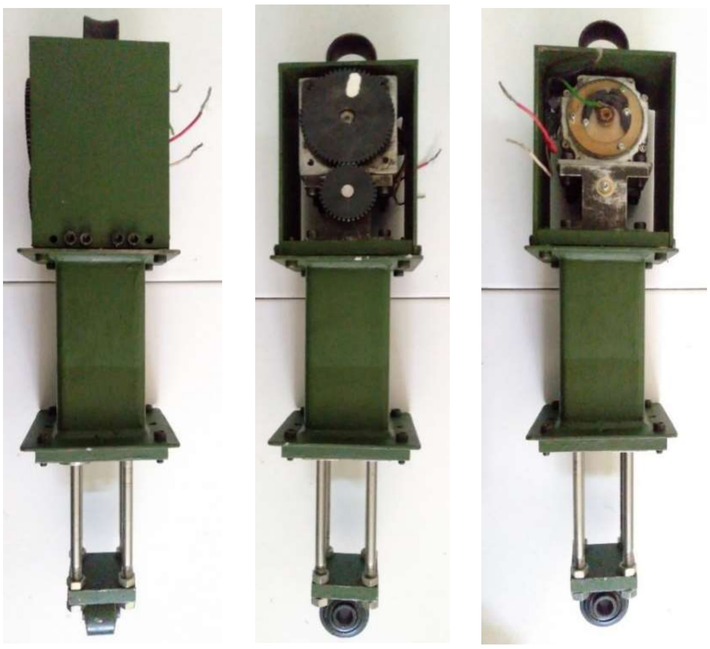
(c)

Gambar 4.24 Simulasi Respon Dinamis Percepatan Body Kendaraan *Speed Trap* pada Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam dan (c) 20 km/jam.

4.3 Rancang Bangun BSRSA-*Bevel Gear*

4.3.1 Deskripsi Desain

BSRSA didesain sesuai dengan gambar isometrik yang ada pada Gambar 3.4. Proses fabrikasi menggunakan mesin perkakas konvenional seperti mesin bubut, mesin frais, dan *drilling.* Panjang total dari BSRSA ini adalah 442 mm. Sebagai perbandingan, untuk *shock absorber* konvensional tipe hidrolik untuk kendaraan pickup adalah 435 mm. Gambar 4.25 menunjukkan desain assembly dari BSRSA dari berbagai sisi. Tabel 4.3 merupakan spesifikasi teknis dari BSRSA-*Bevel Gear*.



Gambar 4.25 Desain Assembly BSRSA

Desain BSRSA dibuat simpel, mudah difabrikasi, dan mudah untuk dibongkar pasang. Semua koneksi penyambung antar plat menggunakan baut M5. Casing dari BSRSA menggunakan besi *hollow square* berbentuk kotak dengan ukuran 60 mm x 60 mm dengan tebal 2,8 mm. Pemilihan ukuran casing didasarkan pada dua hal. Pertama adalah ukuran besi hollow square 60 cukup mudah ditemui di pasaran. Yang kedua adalah pertimbangan dimensi pemasangan. Maksimal ukuran agar BSRSA dapat dipasang pada kendaraan pickup adalah sekitar 70 mm, sehingga diipilih besi *hollow square* 60. Material yang digunakan adalah *carbon steel* S45 C. Sedangkan plat yang digunakan terdapat 2 ukuran, yaitu 3 mm dan 10 mm. Material plat yang digunakan adalah S45 C. Plat 3 mm digunakan sebagai cover generator atas dan juga tempat dudukan generator. Sedangkan plat 10 mm

digunakan sebagai plat dimana terdapat bearing di dalamnya. Plat ini sekaligus sebagai rumah bearing agar dapat terpasang. Sedangkan pada *shaft* terdapat 2 tipe *shaft* yang digunakan. *Shaft* pertama adalah *shaft gear* dengan model shaft bertingkat. Ukuran shaft yang menyambung pada bearing adalah 5 mm dan 8 mm. Sedangkan *shaft* yang menyambung pada *bevel gear* adalah 6 mm dan *shaft* yang menyambung pada *spur gear* adalah 8 mm. Untuk lebih jelasnya, gambar detail teknis dapat dilihat pada lampiran. Sedangkan *shaft* tipe kedua, merupakan penghubung antara *nut ball screw* dengan mounting bagian bawah. Terdapat 4 buah *shaft*. Pada bagian ujung menggunakan koneksi M8.

Tabel 4.3 Spesifikasi Teknis BSRSA-*Bevel Gear*

Parameter	**Nilai**		**Keterangan**
Dimensi			
Panjang Maksimal	442	mm	
Panjang Minimal	362	mm	
Lebar Total	92	mm	
Stroke	80	mm	
Massa	5,1	kg	
Casing			
Hollow square tube	60 x 60	mm	Material S45 C
Plat cover, plat generator	3	mm	Material S45 C
Plat bearing, plat konektor nut	10	mm	Material S45 C
Shaft			
Shaft gear	6 dan 8	mm	Material S45 C
Konektor to Lower Mounting	8	mm	Material S45 C
Bearing			
Ball bearing	5	mm	ASB 625
Ball bearing	8	mm	ASB 688
Linear bearing	8	mm	LMH-8UU
Thrust ball bearing	8	mm	ASB F8-19
Thrust ball bearing	10	mm	ASB AXK 1024
One-way bearing	6	mm	HF 0612 NTN

Komponen-komponen penunjang lain yang ada pada BSRSA adalah bearing. Terdapat 4 tipe bearing yang digunakan. Tipe bearing pertama adalah *one-way bearing*. *One-way bearing* merupakan sebuah mekanisme yg digunakan untuk

memutar poros dalam satu arah putaran saja. Sedangkan pada putaran sebaliknya, one way bearing tidak akan memutar poros (*idle*). Spesifikasi *one way bearing* yang digunakan adalah merek NTN 0612 dengan ukuran poros 6 mm, diameter luar 10 mm dan lebar 12 mm. Gambar 4.26 (a) menunjukkan *one-way bearing* yang digunakan. *One way bearing* berjumlah 2 buah dan dipasang pada *bevel gear*.

(a)

(b)

Gambar 4.26 (a) *One-Way Bearing* NTN 0612 *(b) Thrust Bearing* ASB F8-19

Tipe bearing yang kedua adalah *thrust bearing*. *Thrust bearing* merupakan sebuah bantalan untuk menerima beban aksial. Terdapat 2 tipe thrust bearing yang dipasang, yaitu pada *screw* dan *bevel gear*. Kedua komponen memiliki gaya aksial yang cukup besar. Pada *screw*, gaya yang paling dominan adalah gaya aksial, sehingga diperlukan bantalan yang mampu menerima gaya tersebut. Thrust bearing terletak pada ujung *screw* yang menempel pada plat casing bagian atas dan bawah. Merek dan spesifikasi thrust bearing adalah ASB F8-19 untuk diameter poros 8 mm dan ditunjukkan pada Gambar 4.26 (b). Terdapat 3 komponen thrust bearing, yaitu ring atas, roller, dan ring bawah. Ring bagian atas akan menempel pada *screw*, sedangkan ring bagian bawah akan menempel pada casing. Sedangkan *thrust bearing* pada *bevel gear* dipasang untuk menerima gaya aksial akibat terjadinya perpindahan sumbu rotasi sebesar 90^o. Spesifikasi *thrust bearing* ini adalah untuk diameter poros 10 mm. Posisi *thrust bearing* dipasang pada *one-way bearing*.

(a)

(b)

Gambar 4.27 (a) *Linear Bearing* LMH-8UU (b) *Ball Bearing* ASB 625 dan ASB 688

Tipe bearing yang ketiga adalah *linear bearing*. *Linear bearing* merupakan sebuah bantalan untuk mengurangi gesekan yang terjadi pada gerak linear. *Linear bearing* terletak pada bagian penyambung antara nut dengan mounting ring bagian bawah. Spesifikasi linear bearingnya adalah LMH-8UU dan ditunjukkan pada gambar 4.27 (a). Terdapat 4 buah *linear bearing* dengan spesifikasi diameter poros 8 mm. Sedangkan tipe bearing yang terakhir adalah *ball bearing*. *Ball bearing* merupakan bantalan pada *shaft gear* dan didesin hanya untuk menerima beban radial saja. Pada prototip BSRSA ini, terdapat 2 ukuran *ball bearing* yaitu untuk ukuran *shaft* 5 mm (ASB 625) dan 8 mm (ASB 688). Gambar *ball bearing* ini ditunjukkan pada Gambar 4.27 (b).

4.3.2 Perbandingan *BSRSA-Bevel Gear* dengan Konvensional *Shock Absorber*

Gambar 4.28 Perbandingan BSRSA dengan Konvensional *Shock Absorber*

Tabel 4.4 Perbandingan BSRSA dengan Konvensional *Shock Absorber*

Parameter	**BSRSA**		**Konvensional Shock Absorber**	
Panjang Maksimal	442	mm	435	mm
Panjang Minimal	362	mm	290	mm
Lebar Total	92	mm	45	mm
Stroke	80	mm	145	mm
Massa	5,1	kg	0,7	kg

Gambar 4.28 dan Tabel 4.4 menunjukkan perbandingan secara langsung BSRSA dengan konvensional *shock absorber*. Karena target desain dari BSRSA akan diuji pada kendaraan *pickup*, maka konvensional *shock absorber* pembanding juga diperuntukkan untuk *pickup* dengan merek Kayaba tipe KYKA-1501Z. Tipe *shock absorber* ini juga dapat digunakan pada *pickup* Daihatsu Granmax, sesuai dengan tipe kendaraan yang akan dilakukan pengujian. Hal yang paling terlihat jelas dari perbandingan ini adalah ukuran dan desain dari *shock absorber*. Konsep desain dari BSRSA adalah dengan menggunakan casing berbentuk kotak sedangkan konvensional *shock absorber* berbentuk silinder.

Panjang *shock absorber* secara keseluruhan tidak berbeda jauh. Namun apabila melihat lebar total, maka dimensi BSRSA 2 kali lebih lebar. Secara visual, BSRSA tampak sangat besar dibandingkan dengan konvensional *shock absorber.* Dengan besarnya dimensi BSRSA, tentu membutuhkan ruang yang lebih besar dalam pemasangannya. Hal inilah yang menjadi dasar penulis dalam pemasangan BSRSA pada suspensi kiri belakang *pickup*. Pada suspensi kiri belakang BSRSA tidak menabrak komponen lain, sehingga dapat dipasang dan berfungsi sebagaimana *shock absorber* konvensional. Apabila ditinjau dari segi massa, massa BSRSA lebih besar 7 kali lipat dibandingkan dengan konvensional *shock absorber*. Massa dari BSRSA karena komponen-komponen penunjang dari BSRSA menggunakan *carbon steel* dengan massa yang cukup besar. Komponen-komponen ini cukup banyak jumlahnya dan berkontribusi terhadap berat secara keseluruhan. Dalam perkembangan mengenai RSA ke depannya, perlu dilakukan kajian dan simulasi mengenai pemilihan material yang lebih ringan dan kuat, namun dapat mengakomodasi komponen-komponen penunjang RSA.

4.3.3 Perbandingan *BSRSA* dengan Mekanisme RSA Lain

(a)

(b)

Gambar 4.29 Perbandingan BSRSA dengan (a) RSA *Rack Pinion* dan (b) RSA Hidrolik

Gambar 4.29 menunjukkan perbandingan secara langsung mengenai ukuran BSRSA dengan beberapa mekanisme RSA yang telah dibuat sebelumnya oleh Departemen Teknik Mesin ITS. Terdapat 2 jenis RSA yang mewakili dari masing-masing tipe, yaitu mekanis dan hidrolik. Untuk RSA jenis mekanis *rack pinion* menggunakan desain dari Lubis tahun 2013 dan jenis hidrolik RSA menggunakan desain Yandaka tahun 2018 dengan model generator terpasang seri. Perbandingan dengan RSA *rack pinion*, dimensi secara keseluruhan BSRSA lebih pendek (442 mm berbanding 450 mm) dan lebih ramping (92 mm berbanding 120 mm). Pada RSA *rack pinion* menggunakan komponen roda gigi untuk meningkatkan kecepatan putar generator dan *bevel gear* sebagai mekanisme pengubah dua arah rotasi menjadi satu arah rotasi. Konsep desain yang digunakan adalah bentuk silinder, namun tanpa menggunakan casing (terbuka). Ditinjau dari massa keseluruhan, BSRSA lebih ringan 1 kg. RSA *rack pinion* tidak diuji pada kendaraan, hanya diuji menggunakan metode seperempat kendaraan menggunakan *suspension test rig* dan pengujian karakteristik gaya redam, sehingga koneksi-koneksi yang menyambung pada *chassis* kendaraan tidak sesuai dengan ukuran sesungguhnya. Berbeda dengan

BSRSA, semua koneksi telah mengikuti ukuran sebenarnya dari target kendaraan uji, dalam hal ini *pickup*. Dengan lebar mencapai 120 mm, ukuran ini terlalu besar dan tidak memungkinkan dipasang di kendaraan.

Tabel 4.5 Perbandingan BSRSA dengan RSA Lain

Parameter	**BSRSA**	**RSA *Rack Pinion***	**RSA Hidrolik Generator Seri**
Panjang Maksimal	442 mm	500 mm	500* mm
Panjang Minimal	362 mm	400 mm	290 mm
Lebar Total	92 mm	120 mm	750** mm
Stroke	80 mm	100 mm	145 mm
Massa	5,1 kg	6,3 kg	4,2 kg
Tipe Generator	Generator AC 3 fasa	Generator DC	Generator Hidrolis

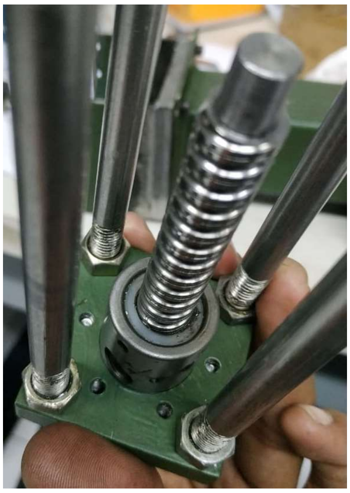
*panjang *shock absorber* hidrolik 430 mm
*lebar keseluruhan beserta dengan *reservoir* dan *tube*

Pada RSA Hidrolik model generator terpasang seri, secara umum model hidrolik adalah menggunakan konvensional *shock absorber* yang dimodifikasi dengan menambahkan selang, *check valve*, *reservoir*, dan generator hidrolis. Penambahan-penambahan komponen ini menyebabkan panjang dan lebar secara keseluruhan dari RSA hidrolik ini cukup besar. Karena pada RSA hidrolik ini diuji pada kendaraan *pickup*, tata letak dari komponen disesuaikan dengan ruangan yang tersedia. *Stroke* yang dimiliki RSA hidrolik lebih tinggi dibandingkan dengan BSRSA (145 mm berbanding 80 mm). Hal ini karena pada BSRSA, terdapat komponen-komponen berupa *bevel gear* dan generator yang dipasang di atas *ball screw*, sehingga akan mengurangi *stroke*. Sedangkan panjang keseluruhan harus mengikuti panjang yang ada pada *shock absorber* konvensional. Sedangkan dari segi massa, RSA hidrolik masih lebih rendah dibandingkan BSRSA. Satu hal yang menjadi perhatian dari RSA hidrolik ini adalah potensi kebocoran pada selang-selang penghubung *check valve* dan generator hidrolis. Pada saat pengujian, terdapat kebocoran pada beberapa bagian, yang mengakibatkan RSA hidrolik tidak bekerja secara maksimal. Sedangkan pada BSRSA, masalah seperti ini tidak akan terjadi.

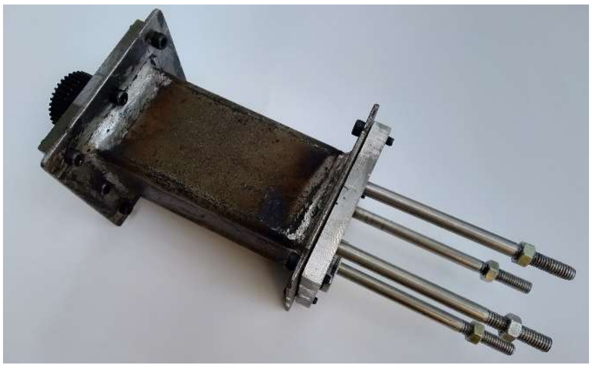
4.3.4 Pengujian Mekanisme

Pengujian mekanisme dilakukan untuk mengetahui apakah mekanisme BSRSA berjalan dengan baik atau tidak. Beberapa item yang dilakukan untuk melihat apakah mekanisme berjalan dengan baik atau tidak adalah mekanisme *ball screw* dan *nut*, mekanisme pengubah dua arah rotasi menjadi satu arah rotasi pada *bevel gear* (mekanisme MMR), mekanisme transmisi *spur gear*, dan generator.

Pengujian mekanisme yang pertama adalah mekanisme pengubah gerak linear menjadi gerak rotasi melalui *ball screw* dan *nut*. Hal yang perlu menjadi perhatian pada mekanisme *ball screw* dan *nut* adalah posisi *thrust bearing screw* harus terpasang pada *center line* yang sama. Apabila posisi *center line* tidak sama, dapat mengakibatkan mekanisme pengubah gerak menjadi tidak lancar dan cenderung berat. Hal yang perlu menjadi perhatian lain adalah berkaitan dengan *screw* dan *nut*. *Screw* sangat mudah berkarat apabila dibiarkan pada udara terbuka atau berada pada kondisi yang memungkinkan untuk berkarat. Apabila *screw* berkarat, maka mekanisme ball screw tidak dapat lagi digunakan karena permukaan kontak antara ball pada *nut* dan *screw* menjadi tidak lancar. Untuk mencegah hal tersebut, dilakukan pengecatan anti karat pada plat penghubung *nut*, plat *bearing* dan bagian dalam casing. Gambar 4.30 (a) menunjukkan pemasangan plat penghubung *nut* dan *nut ball screw*. Untuk mengurangi gesekan yang terjadi pada *nut* dan *screw* dilakukan pelumasan dengan *grease*. Gambar 4.30 (b) menunjukkan *ball screw* dan plat penghubung telah terpasang dengan komponen lain seperti plat *bearing*, *thrust bearing*, dan *shaft* konektor. Untuk mengetahui apakah mekanisme telah bekerja dengan baik, dilakukan pengujian sederhana dengan menggerakkan *shaft* konektor naik dan turun. Gerakan yang dihasilkan cukup lancar dan dapat mengubah gerak linear menjad rotasi, sehingga dapat dikatakan bahwa mekanisme pengubah gerak linear menjadi gerak totasi telah bekerja dengan baik.

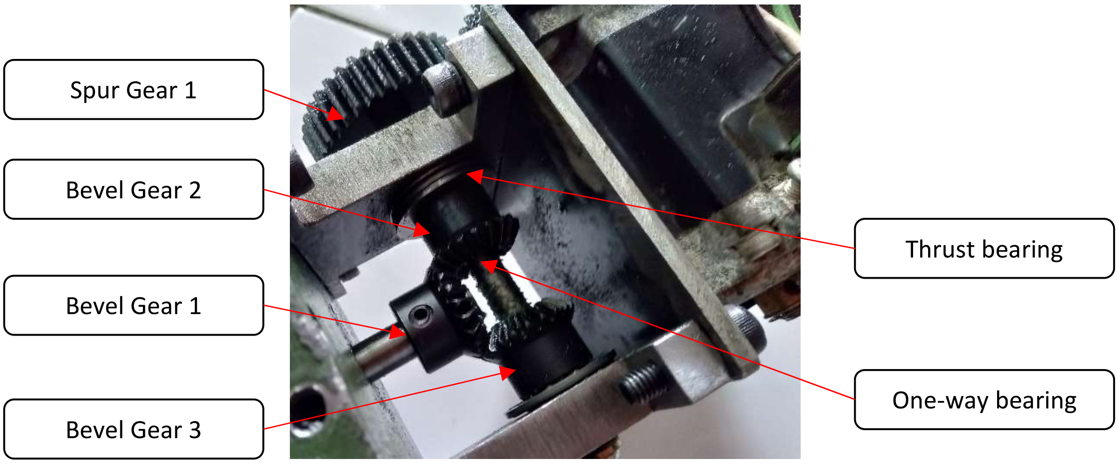


(a)



(b)

Gambar 4.30 (a) Pemasangan Plat Penghubung *Nut* (b) Pemasangan Akhir Mekanisme Ball Screw

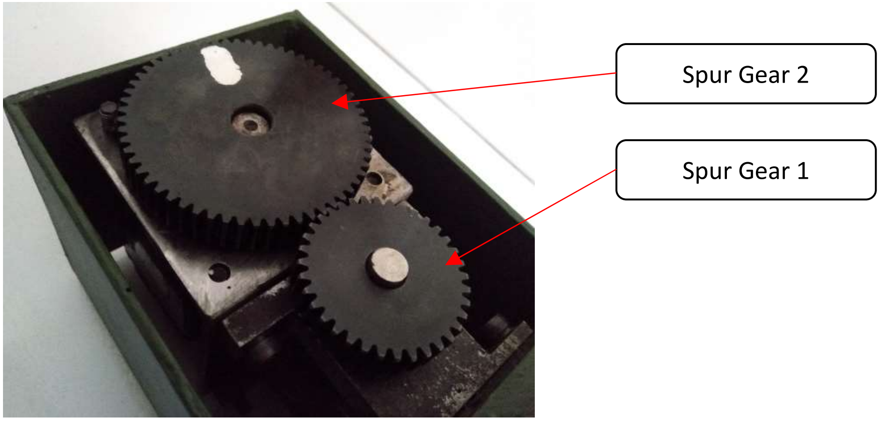


Gambar 4.31 Detail Pemasangan Mekanisme MMR *Bevel Gear*

Pengujian mekanisme selanjutnya adalah mekanisme MMR *bevel gear*. Pada mekanisme ini bertujuan untuk mengubah gerak dua arah rotasi menjadi satu arah rotasi. Terdapat 3 komponen penting dalam menunjang mekanisme ini yaitu *bevel gear, one way bearing,* dan *thrust bearing*. Terdapat 3 buah *bevel gear* dengan spesifikasi yang telah dijelaskan pada sub bab 2.5. *One-way bearing* dipasang pada bagian dalam *bevel gear* 2 dan 3. Kemudian *thrust bearing* dipasang pada bagian belakang *bevel gear*. Cara melihat apakah mekanisme ini bekerja dengan baik adalah dengan memutar bevel gear 1 pada dua arah rotasi CW dan CCW. Kemudian hasil output arah rotasi dilihat pada *spur gear* 1. Hasilnya adalah baik diputar pada arah CW maupun CCW, spur gear 1 telah berputar 1 arah. Dengan demikian dapat

dikatakan bahwa mekanisme MMR bekerja dengan baik. Susunan MMR *bevel gear* secara detail dapat dilihat pada Gambar 4.31.

Pengujian mekanisme selanjutnya adalah transmisi *spur gear*. Dengan telah terpasangnya *spur gear* 1 seperti pada gambar 4.30, maka akan dipasang *spur gear 2*, dimana pada *spur gear* 2 ini langsung terpasang pada poros generator. Spesifikasi dari *spur gear* yang digunakan telah dijelaskan sebelumnya pada sub bab 2.5. Pada *spur gear*, arah rotasi telah menjadi satu arah rotasi dan telah dibuktikan sebelumnya. Susunan dari spur gear dapat dilihat pada Gambar 4.32.

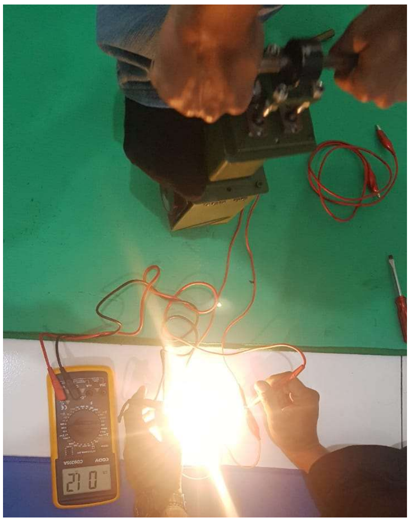


Gambar 4.32 Detail Pemasangan Mekanisme *Spur Gear*

Pengujian mekanisme terakhir adalah mengenai generator. Pengujian ini dilakukan untuk memastikan generator dapat menghasilkan listrik. Output dari generator adalah berupa AC 3 fasa, sehingga perlu ditambahkan dioda 3 fasa agar didapat arus listrik DC 1 fasa. Cara mengujinya adalah dengan menggerakkan naik dan turun BSRSA. Voltase bangkitan dari generator akan diukur dengan menggunakan multimeter. Gambar 4.33 (a) menunjukkan mekanisme pengujian voltase bangkitan dari BSRSA. Dengan menggunakan *open loop circuit* atau tanpa pembebanan, voltase bangkitan maksimal yang dihasilkan cukup besar, yaitu mencapai 56,1 Volt DC. Untuk mengetahui kecepatan putar generator, dilakukan pengukuran dengan menggunakan *tachometer*. Hasilnya didapatkan putaran generator mencapai 1380 rpm. Kemudian dilakukan pengujian dengan menambahkan beban berupa lampu 12V 10 Watt. Hasilnya voltase bangkitan akan drop pada kisaran maksimal 16 V dan lampu menyala sangat terang. Gambar 4.33 (b) menunjukkan pengujian dengan pembebanan lampu. Namun demikian gaya yang dibutuhkan untuk menaikkan dan menurunkan BSRSA menjadi lebih besar

dibandingkan dengan saat tanpa pembebanan. Pengujian terakhir adalah dengan menggunakan pembebanan wirewound resistor. Resistor ini yang nantinya akan digunakan sebagai pembebanan elektrik pada pengujian di kendaraan *pickup*. Dengan mengatur hambatan sebesar 6 ohm, voltase bangkitan maksimal yang dihasilkan mencapai 14,5 Volt. Dengan menggunakan Hukum Ohm berkaitan dengan hubungan antara daya dan hambatan ($P = {V^2}/{R}$), maka didapatkan daya bangkitan yang dihasilkan 35 Watt. Dengan demikian, pengujian mekanisme BSRSA secara keseluruhan telah berjalan dengan baik dan mampu untuk menghasilkan listrik. Selanjutnya dapat dilanjutkan untuk pengujian pada kendaraan *pickup*.

(a)



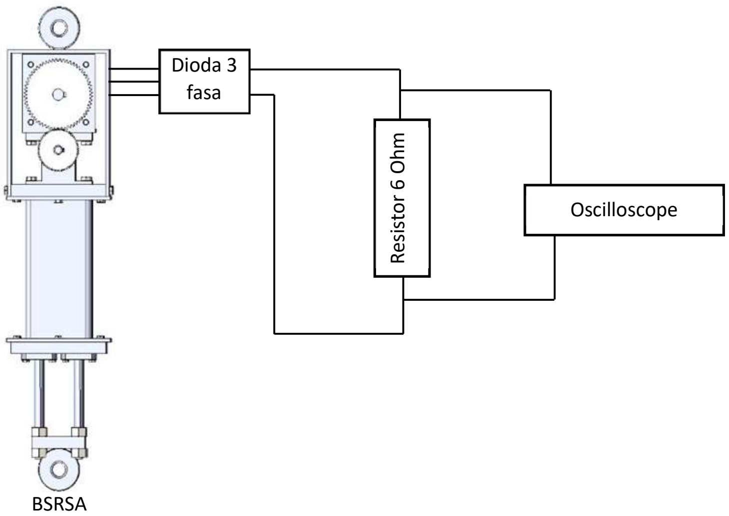
(b)

Gambar 4.33 Energi Bangkitan BSRSA (a) Tanpa Pembebanan (b) Dengan Pembebanan Lampu 12 Volt 10 Watt

4.4 Pengujian BSRSA pada Kendaraan *Pickup*

4.4.1 Persiapan dan Instalasi BSRSA

Pengujian pada kendaraan *pickup* dilakukan menggunakan Granmax tipe standar. BSRSA dipasang pada suspensi kiri belakang. Peralatan yang digunakan telah dijelaskan pada sub bab 3.8. Data voltase bangkitan akan direkam dengan menggunakan *oscilloscope* dengan pembebebanan elektrik resistor 6 Ohm. Penambahan beban ini dilakukan untuk mendapatkan daya bangkitan yang dihasilkan BSRSA. Gambar 4.34 menunjukkan rangkaian elektrik dari BSRSA menuju *oscilloscope*. Output keluaran dari generator masih berupa arus AC 3 fasa. Dengan menambahkan dioda 3 fasa, maka didapatkan arus DC 1 fasa. Setelah menjadi arus DC 1 fasa, kemudian diberi beban elektrik berupa resistor. Voltase yang dihasilkan diukur dengan probe tegangan dan direkam oleh *oscilloscope.*



Gambar 4.34 Rangkaian Elektrik Pengambilan Data

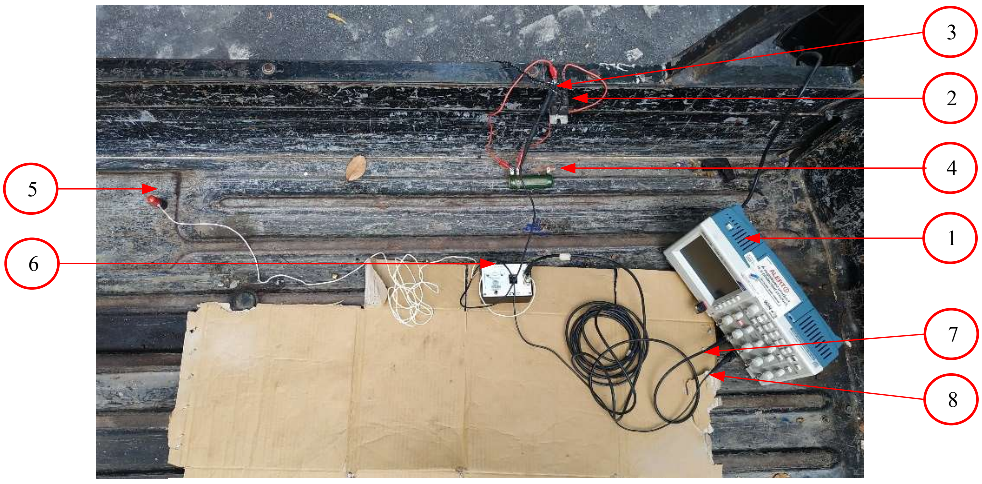
Gambar 4.35 menunjukkan instalasi BSRSA pada suspensi kiri belakang *pickup*. Tampak dari gambar, BSRSA tidak menabrak komponen lain pada kendaraan. Sebelumnya penulis sempat mencoba memasang BSRSA pada suspensi kanan belakang. Dalam pemasangannya, plat cover bagian bawah menabrak selang hidrolis untuk sistem pengereman, sehingga tidak memungkinkan untuk dipasang pada suspensi sebelah kanan. Hal yang menjadi kendala dalam pemasangan BSRSA adalah akses pemasangan. Pada bagian sebelah kiri terdapat komponen *silencer* dari knalpot dengan ukuran yang cukup besar. Dengan adanya komponen ini, akses menjadi cukup sempit. Dengan masa dan ukuran yang cukup besar, penulis cukup kesulitan dalam melakukan pemasangan. Dibutuhkan waktu yang cukup lama

sampai BSRSA benar-benar terpasang dan dapat digunakan. Dalam pemasangan BSRSA, untuk sisi dengan *spur gear*, dipasang pada sisi dalam *chassis*. Hal ini dilakukan agar *spur gear* tidak menabrak rangka *chassis*.

(a) (b)

Gambar 4.35 Instalasi BSRSA pada Suspensi *Pickup*

Semua peralatan yang digunakan dalam pengambilan data diletakkan pada bagian bak *pickup*. Daya yang digunakan untuk menyuplai daya *oscilloscope* adalah menggunakan *power inverter* yang disambungkan ke *adapter cigarette lighter* pada kendaraan pickup. Terdapat *accelerometer*, yang dipasang pada bagian bak *pickup* untuk respon dinamis kendaraan berupa percepatan vertikal *chassis*. Lokasi pemasangan *accelerometer* tepat di atas suspensi kiri belakang. Dengan menambahkan *inverter*, untuk memperkuat sinyal *accelerometer*, kabel *accelerometer* dipasang pada Channel 2 *oscilloscope*. Sedangkan probe tegangan akan dipasang pada Channel 3. Rangkaian listrik dari BSRSA dipasang sesuai dengan Gambar 4.34. Resistor sebagai beban elektrik diatur nilainya sebesar 6 ohm. Gambar 4.36 menunjukkan pemasangan peralatan uji pada bak terbuka *pickup*. Dalam melakukan pengujian terdapat dua orang sebagai operator pengambilan data yang ada di bak *pickup*, dengan estimasi massa sebesar 140 kg, sehingga pada saat pengujian, *pickup* mengangkut beban tambahan 140 kg.



1. Oscilloscope
2. Dioda 3 fasa
3. Probe tegangan
4. Resistor
5. Accelerometer
6. Inverter
7. Kabel accelerometer
8. Kabel probe tegangan

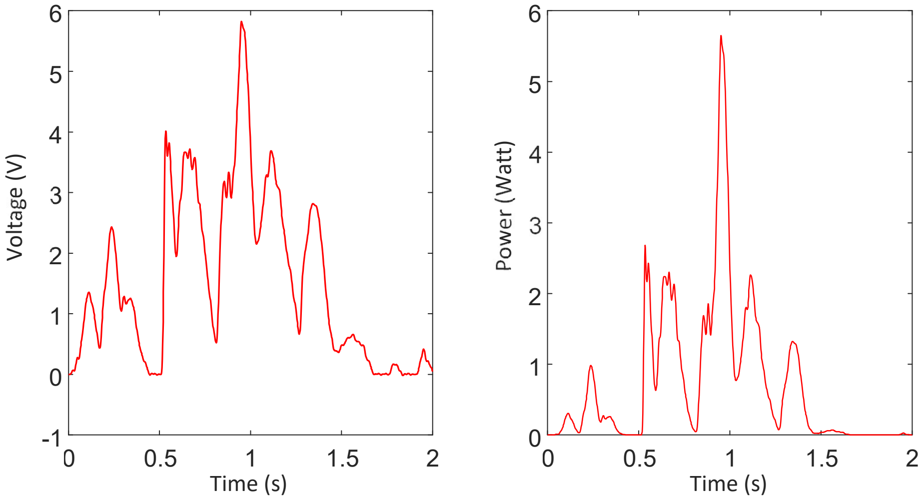
Gambar 4.36 Peralatan yang Digunakan Saat Pengujian

4.4.2 Pengujian Melewati Polisi Tidur

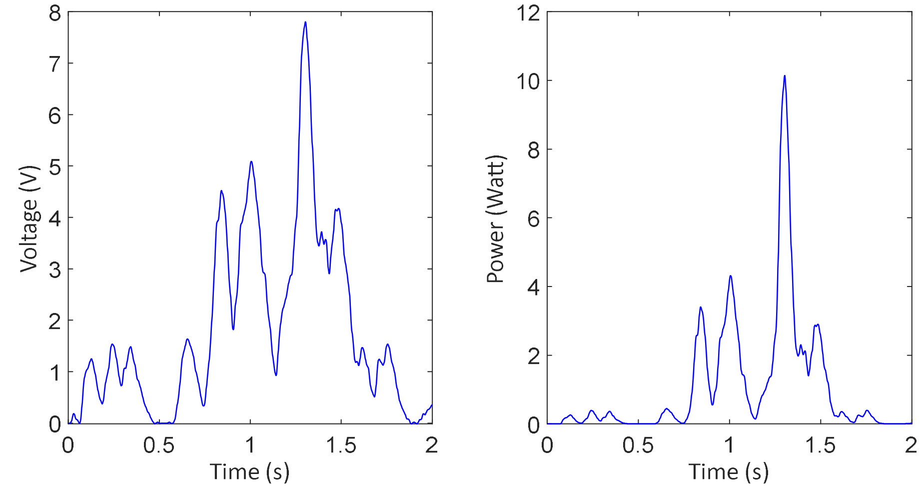
4.4.2.1 Voltase dan Daya Bangkitan yang Dihasilkan

Pada pengujian kendaraan melewati polisi tidur, tedapat 3 variasi kecepatan yaitu 10 km/jam, 15 km/jam, dan 20 km/jam. Masing-masing dari variasi kecepatan dilakukan pengambilan data sebanyak 2 kali. Profil polisi tidur dan lokasi yang digunakan dalam pengambilan data telah dijelaskan pada sub bab 3.7. Terdapat data berupa voltase bangkitan untuk masing-masing variasi kecepatan dan pengambilan data, serta respon dinamis berupa percepatan *chassis*. Hasil dari percepatan *chassis* kendaraan dengan pemasangan BSRSA akan dibandingkan dengan konvensional *shock absorber*.

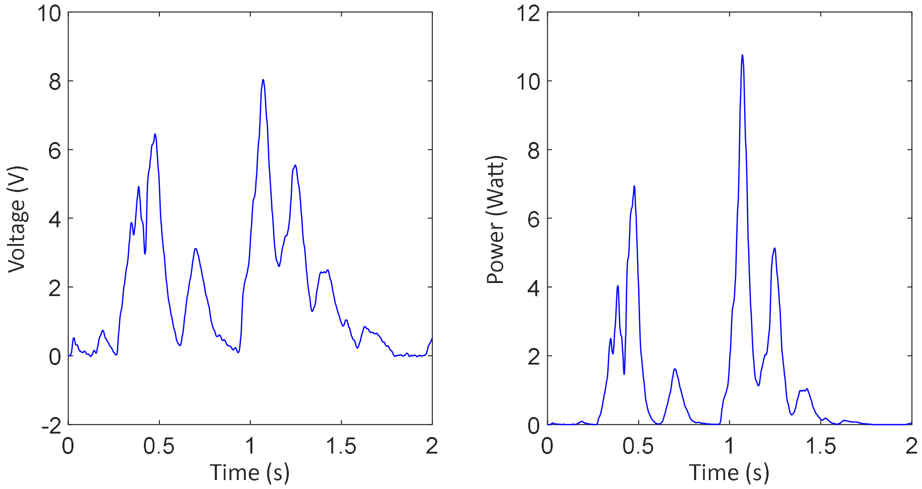
Gambar 4.37 menunjukkan voltase dan daya bangkitan yang dihasilkan BSRSA ketika melewati polisi tidur dengan kecepatan 10 km/jam. Voltase bangkitan maksimal yang dihasilkan adalah 5,9 Volt dengan daya bangkitan maksimal 5,8 Watt. BSRSA menghasilkan daya selama kurang lebih 1,5 detik saat melewati polisi tidur. Pada percobaan sebelumnya, voltase dan daya maksimal yang dihasilkan mencapai 4,2 Volt dan 2,9 Watt. Apabila dilihat dari nilai maksimal daya yang dihasilkan cukup besar dengan kecepatan yang cukup rendah. Pengaruh dari polisi tidur yang memiliki tinggi 10 cm tentu cukup besar yang mengakibatkan *stroke* BSRSA tinggi dan menghasilkan listrik.



Gambar 4.37 Voltase dan Daya BSRSA Melewati Polisi Tidur 10 km/jam



Gambar 4.38 Voltase dan Daya BSRSA Melewati Polisi Tidur 15 km/jam



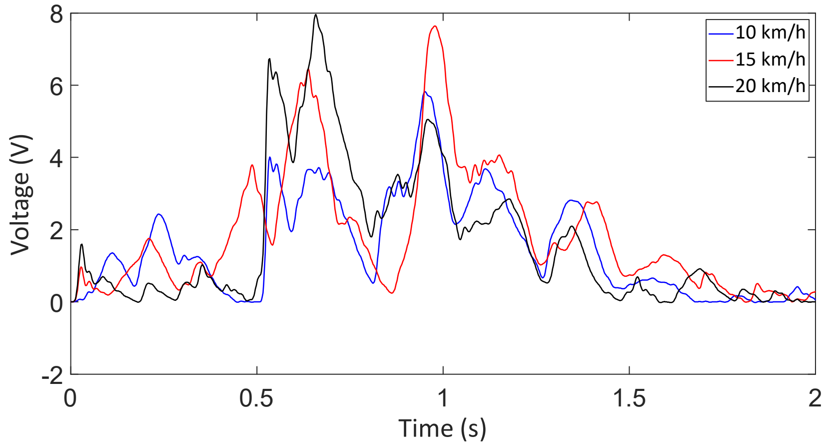
Gambar 4.39 Voltase dan Daya BSRSA Melewati Polisi Tidur 20 km/jam

Gambar 4.38 menunjukkan voltase dan daya bangkitan yang dihasilkan BSRSA ketika melewati polisi tidur dengan kecepatan 15 km/jam. Dengan meningkatnya kecepatan, voltase dan daya bangkitan maksimal yang dihasilkan akan meningkat yaitu sebesar 8,2 Volt dan 11,3 Watt. Rentang waktu dalam menghasilkan listrik juga lebih rendah dibanding pada kecepatan 10 km/jam. Pada percobaan kedua, voltase dan daya bangkitan maksimal yang dihasilkan akan meningkat yaitu sebesar 8 Volt dan 10,7 Watt. Gambar 4.39 menunjukkan voltase dan daya BSRSA melewati polisi tidur pada kecepatan 20 km/jam. Pada kecepatan yang paling tinggi dari pengujian melewati polisi tidur, voltase dan daya bengkitan juga yang paling tinggi dibandingkan 10 km/jam dan 15 km/jam, yaitu mencapai 8 Volt dan 11 Watt untuk percobaan pertama dan kedua.

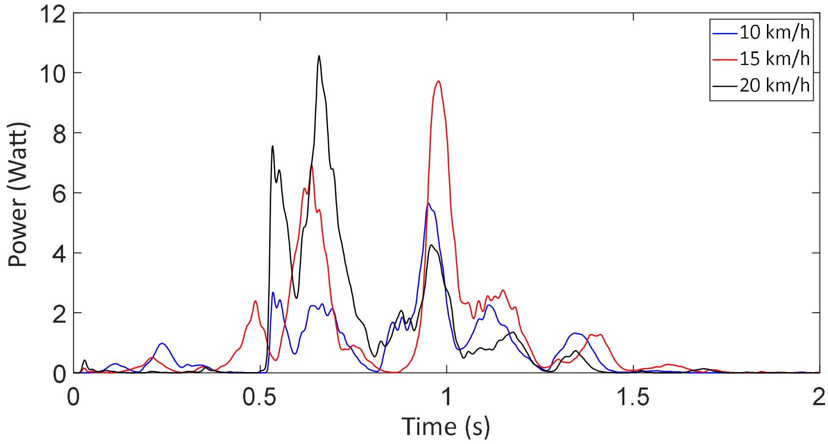
Tabel 4.6 Rekapitulasi Voltase dan Daya Bangkitan Melewati Polisi Tidur

Kecepatan (km/jam)	Voltase dan Daya							
	Nilai Maksimal				RMS			
	1st Run		2nd Run		1st Run		2nd Run	
	Voltase (V)	Power (Watt)	Voltase (V)	Power (Watt)	Voltase (V)	Power (Watt)	Voltase (V)	Power (Watt)
10	4,2	2,9	5,9	5,8	1,3	0,6	2,1	1,1
15	8,2	11,3	8,0	10,7	2,5	2,1	2,6	2,2
20	8,4	11,6	8,2	11,2	2,6	2,3	2,5	2,3

Tabel 4.6 menunjukkan rekapitulasi data berupa daya dan voltase maksimal dan RMS dari masing-masing kecepatan dan percobaan. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, semakin meningkat kecepatan kendaraan, maka energi bangkitan yang dihasilkan akan semakin besar. Daya yang dihasilkan dipengaruhi oleh kecepatan putar generator. Dengan meningkatnya kecepatan kendaraan, maka frekuensi eksitasi BSRSA melewati polisi tidur juga akan semakin besar, sehingga menyebabkan kecepatan putar generator meningkat. Dalam hal ini maksimal daya bangkitan yang dihasilkan terjadi pada kecepatan 20 km/jam dengan daya RMS sebesar 2,3 Watt. Gambar 4.40 menunjukkan perbedaan secara langsung daya bangkitan pada masing-masing kecepatan kendaraan. Daya bangkitan antara kecepatan 15 km/jam dan 20 km/jam tidak berbeda signifikan dan cenderung sama. Hal ini juga terlihat apabila melihat pada RMS daya yang dihasilkan, yaitu berkisar antara 2,2 Watt.



(a)

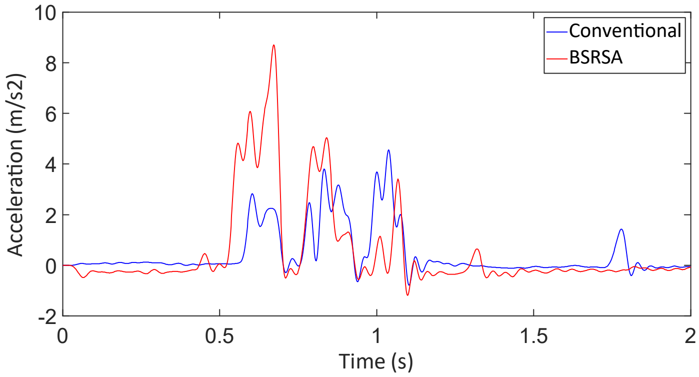


(b)

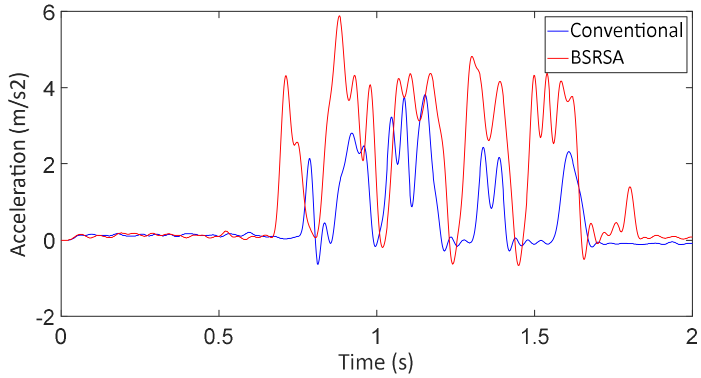
Gambar 4.40 Perbandingan (a) Voltase dan (b) Daya Melewati Polisi Tidur untuk Tiap Kecepatan

4.4.2.2 Respon Dinamis Kendaraan

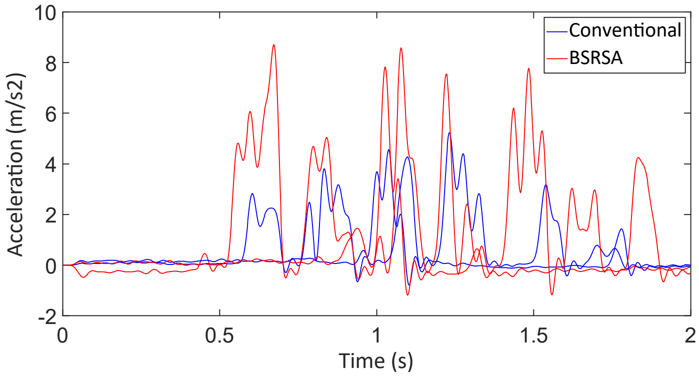
Respon dinamis yang diukur adalah berupa percepatan vertikal *chassis* kendaraan. Nilai percepatan antara percepatan kendaraan dengan menggunakan konvensional *shock absorber* dengan BSRSA dibandingkan hasilnya. Gambar 4.41 menunjukkan perbandingan percepatan konvensional *shock absorber* dengan BSRSA untuk kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, dan (c) 20 km/jam. Pada masing-masing kecepatan, nilai percepatan maksimal berkisar 6 m/s^2 hingga 8 m/s^2. Waktu yang dibutuhkan untuk stabil pada konvensional *shock absorber* lebih cepat dibandingkan dengan BSRSA. Grafik nilai respon percepatan konvensional (berwarna biru) berada dibawah BSRSA (berwarna merah) dan terjadi pada semua kecepatan kendaraan.



(a)



(b)

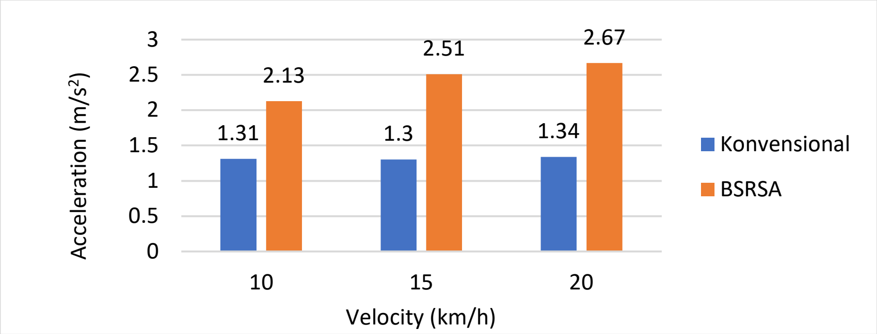


(c)

Gambar 4.41 Perbandingan Respon Percepatan Konvensional Shock Absorber dengan BSRSA pada Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, dan (c) 20 km/jam

Gambar 4.42 menunjukkan perbandingan RMS percepatan untuk konvensional *shock absorber* dan BSRSA. Pada konvensional *shock absorber*, nilai RMS percepatan tidak berbeda jauh dengan meningkatnya kecepatan, berada pada nilai 1,3 m/s^2. Berbeda halnya dengan BSRSA, nilai RMS percepatan akan meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan kendaraan. Secara keseluruhan, nilai RMS percepatan BSRSA lebih tinggi 2 kali lipat dibandingkan konvensional

shock absorber. Apabila mengacu pada parameter kenyamanan kendaraan seperti tertulis pada Tabel 4.2, parameter kenyamanan pada konvensional *shock absorber* berada pada level tidak nyaman. Sedangkan pada BSRSA, parameter kenyamanannya berada pada level terendah, yaitu amat sangat tidak nyaman. Dengan demikian, dengan mengacu pada percepatan vertikal *chassis* kendaraan, kemampuan meredam getaran dari BSRSA masih belum maksimal apabila dibandingkan dengan konvensional *shock absorber* pada saat melewati polisi tidur.



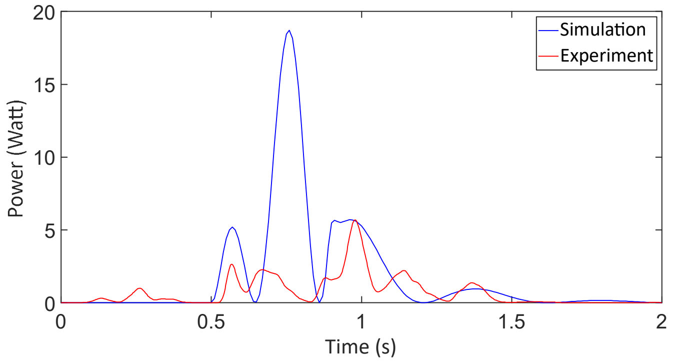
Gambar 4.42 Perbandingan RMS Percepatan Konvensional *Shock Absorber* dengan BSRSA Profil Jalan Polisi Tidur

4.4.2.3 Perbandingan dengan Hasil Simulasi

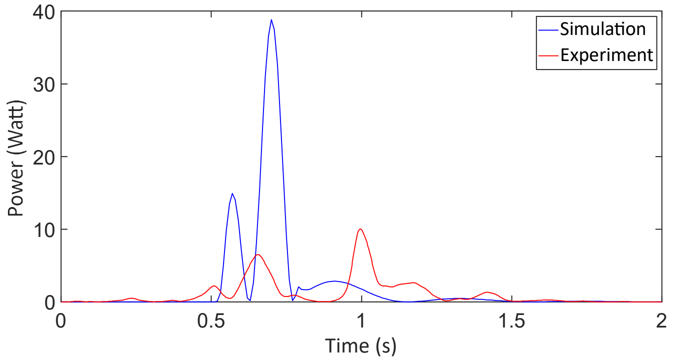
Gambar 4.43 menunjukkan perbandingan antara daya bangkitan antara simulasi dengan eksperimen untuk kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, dan (c) 20 km/jam. Secara keseluruhan untuk semua variasi kecepatan, pola daya bangkitan yang dihasilkan sama yaitu tedapat dua nilai puncak daya bangkitan, yaitu pertama saat awal melewati polisi tidur dan kedua saat akhir melewati polisi tidur. Saat melewati akhir polisi tidur melewati nilai daya bangkitan yang lebih besar dibandingkan saat awal polisi tidur. Hal ini terjadi pada simulasi maupun eksperimen.

Hal yang menjadi perbedaan sangat jelas antara simulasi dan eksperimen adalah besarnya daya bangkitan yang dihasilkan. Pada simulasi kecepatan 10 km/jam, daya maksimal yang dihasilkan mencapai 18,7 Watt, sedangkan pada eksperimen, daya maksimal hanya mencapai 5,8 Watt. Perbedaan nilai daya maksimal yang dihasilkan ini cukup jauh mencapai 3 kali lipat. Hal yang sama terjadi pada kecepatan 15 km/jam dan 20 km/jam. Hasil simulasi menunjukkan, daya bangkitan maksimal mencapai 38,8 Watt dan 59,4 Watt. Sedangkan hasil

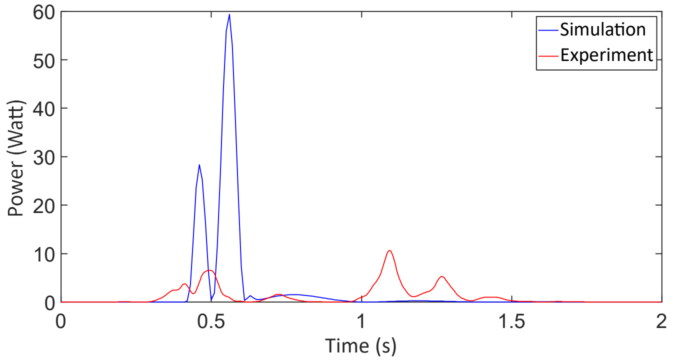
eksperimen hanya mencapai 11,3 Watt dan 11,6 Watt. Besarnya perbedaan ini menunjukkan bahwa potensi daya bangkitan yang dihasilkan BSRSA masih belum maksimal. Rata-rata daya bangkitan yang dihasilkan hanya sebesar 25% dari potensi daya bangkitan yang bisa dihasilkan. Potensi daya bangkitan ini didekati dengan besaran daya bangkitan hasil simulasi. Data rekapitulasi antara RMS daya hasil simulasi dan eksperimen ditunjukkan pada Tabel 4.7.



(a)



(b)

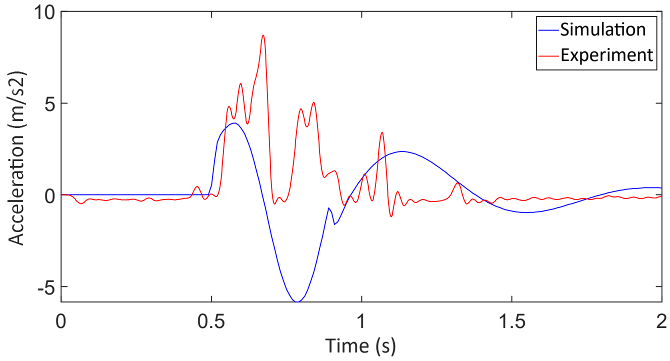


(c)

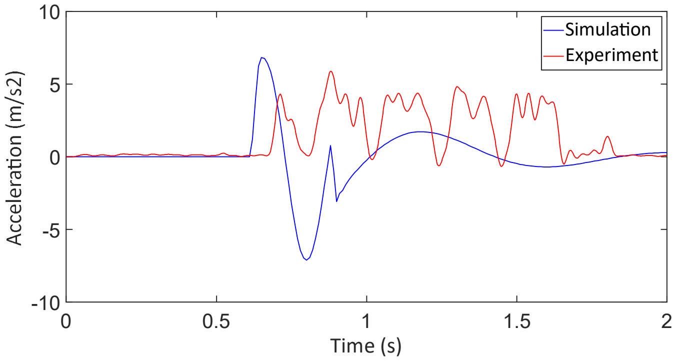
Gambar 4.43 Perbandingan Daya Bangkitan Polisi Tidur Antara Simulasi dengan Eksperimen untuk Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, dan (c) 20 km/jam

Tabel 4.7 Perbandingan RMS Daya Simulasi dan Eksperimen

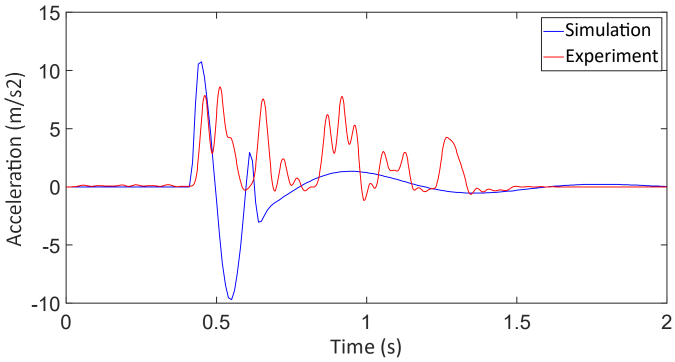
Kecepatan (km/jam)	RMS Daya (Watt)	
	Simulasi	Eksperimen
10	4,8	1,2
15	7,8	2,1
20	10,3	2,3



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.44 Perbandingan Respon Percepatan Polisi Tidur Antara Simulasi dengan Eksperimen untuk Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, dan (c) 20 km/jam

Gambar 4.44 menunjukkan perbandingan antara hasil simulasi dengan eksperimen respon dinamis berupa percepatan body kendaraan. Tren grafik yang dihasilkan sedikit berbeda antara simulasi dengan eksperimen. Pada hasil simulasi, nilai percepatan akan berfluktuasi bernilai positif dan negatif untuk selanjutnya akan stabil. Sedangkan pada hasil eksperimen, nilai percepatan akan berfluktuasi namun hanya bernilai positif saja. Waktu yang dibutuhkan untuk stabil relatif sama untuk hasil simulasi dan eksperimen. Sedangkan nilai percepatan maksimal yang dihasilkan, untuk hasil simulasi sedikit lebih tinggi. Perbandingan nilai RMS percepatan antara hasil simulasi dan eksperimen terdapat pada Tabel 4.8. Nilai RMS percepatan hasil eksperimen sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan hasil simulasi. Hal ini terjadi pada setiap variasi kecepatan. Perbedaan nilai percepatan ini rata-rata sebesar 8%.

Tabel 4.8 Perbandingan RMS Respon Percepatan Simulasi dan Eksperimen

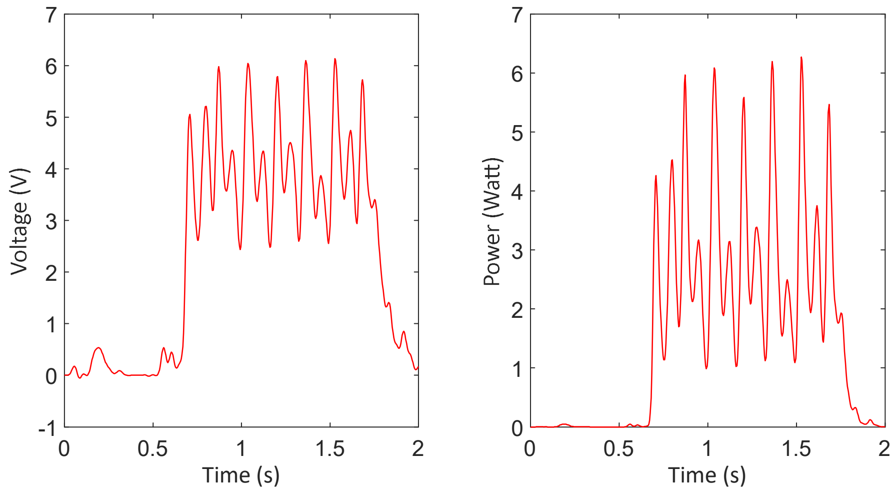
Kecepatan (km/jam)	Percepatan Body (m/s^2)	
	Simulasi	Eksperimen
10	2,06	2,13
15	2,15	2,51
20	2,54	2,67

4.4.3 Pengujian Melewati *Speed Trap*

4.4.3.1 Voltase dan Daya Bangkitan yang Dihasilkan

Pada pengujian kendaraan melewati *speed trap*, tedapat 3 variasi kecepatan yaitu 10 km/jam, 15 km/jam, dan 20 km/jam. Profil jalan pada *speed trap* hampir sama dengan polisi tidur, hanya berbeda ketinggian, lebar dan jumlahnya. Untuk lebih detail dari profil *speed trap* dapat dilihat pada sub bab 3.7. Setiap variasi kecepatan dilakukan pengambilan data sebanyak 2 kali. Karena BSRSA dipasang pada sisi kiri kendaraan, penulis melakukan pengujian dengan melewati *speed trap* sisi paling kiri jalan, dimana pada sisi ini ketinggian *speed trap* adalah yang paling tinggi bila dibandingkan sisi tengah jalan. Dengan semakin tingginya ketinggian *speed trap* maka daya dan voltase bangkitan yang dihasilkan juga akan semakin tinggi.

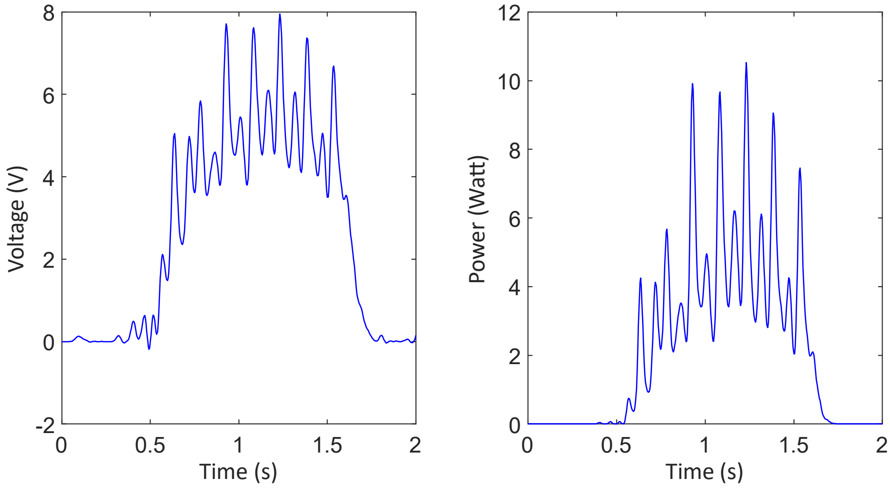
Gambar 4.45 menunjukkan kendaraan diuji melewati *speed trap* pada kecepatan 10 km/jam pada percobaan kedua. Daya dan voltase bangkitan yang dihasilkan adalah selama 1 detik. Pola daya bangkitannya adalah relatif konstan selama 1 detik. Pola ini mengikuti profil *speed trap* yang dilewati, dimana terdapat 7 buah *speed trap* dengan jarak total sejauh 3,4 m. Daya bangkitan maksimal yang dihasilkan adalah sebesar 4 Watt pada pecobaan pertama dan 6,2 Watt untuk percobaan kedua. Daya bangkitan yang dihasilkan lebih besar bila dibandingkan dengan melewati polisi tidur pada kecepatan yang sama. Walaupun amplitudo dari *speed trap* kecil, yaitu 1,5 cm berbanding 10 cm pada polisi tidur, namun pada *speed trap* terdapat gerakan berulang-ulang dalam waktu yang singkat. Hal ini terjadi karena kendaraan melewati 7 buah *speed trap,* dimana jarak antar speed trap tidak terlalu jauh yaitu 39 cm. Sehingga dengan adanya gerakan yang berulang ini, frekuensi eksitasi semakin tinggi dan mengakibatkan daya bangkitan yang dihasilkan juga lebih tinggi dibandingkan dengan polisi tidur.



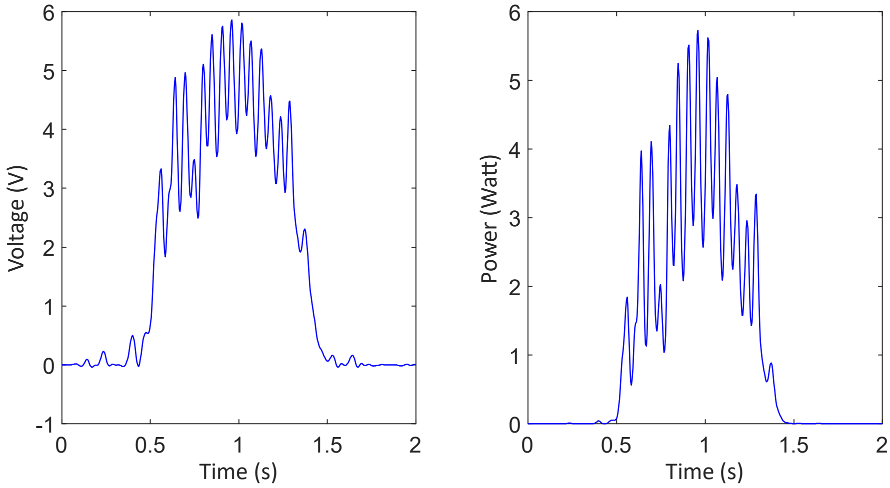
Gambar 4.45 Voltase dan Daya BSRSA Melewati *Speed Trap* 10 km/jam

Gambar 4.46 menunjukkan voltase dan daya BSRSA melewati *speed trap* dengan kecepatan 15 km/jam pada percobaan pertama. Pola daya bangkitan yang dihasilkan sama dengan pada kecepatan 10 km/jam. Daya maksimal yang dihasilkan mencapai 10,1 Watt pada percobaan pertama dan 9,8 Watt pada percobaan kedua. Sedangkan pada kecepatan 20 km/jam, daya maksimal yang dihasilkan 5,9 Watt pada percobaan pertama dan kedua seperti ditunjukkan pada

Gambar 4.47. Nilai ini lebih rendah bila dibandingkan pada kecepatan 15 km/jam. Perbandingan voltase dan daya pada tiap percobaan dapat dilihat pada Tabel 4.8.



Gambar 4.46 Voltase dan Daya BSRSA Melewati *Speed Trap* 15 km/jam

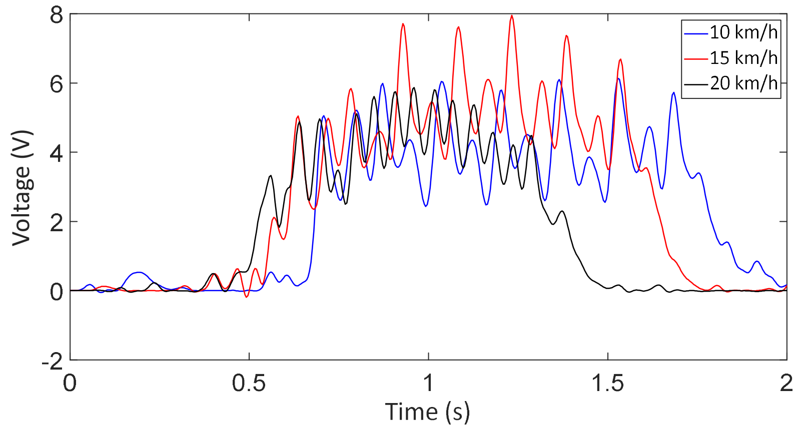


Gambar 4.47 Voltase dan Daya BSRSA Melewati *Speed Trap* 20 km/jam

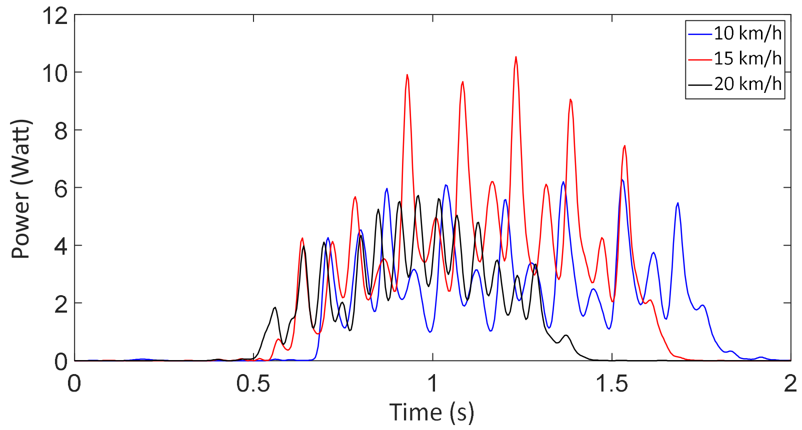
Tabel 4.9 Rekapitulasi Voltase dan Daya Bangkitan Melewati *Speed Trap*

Kecepatan (km/jam)	Voltase dan Daya Bangkitan							
	Nilai Maksimal				RMS			
	1st Run		2nd Run		1st Run		2nd Run	
	Voltase (V)	Power (Watt)	Voltase (V)	Power (Watt)	Voltase (V)	Power (Watt)	Voltase (V)	Power (Watt)
10	4,8	4	6	6,2	3,46	2,19	4,24	3,33
15	8	10,1	7,6	9,8	5,47	5,36	4,67	3,82
20	5,8	5,9	5,8	5,9	4,28	3,35	4,38	3,62

Tabel 4.9 menunjukkan rekapitulasi data berupa daya, voltase maksimal dan RMS dari masing-masing kecepatan dan percobaan. Daya bangkitan yang dihasilkan maksimal terjadi pada kecepatan 15 km/jam. Hal ini terjadi pada percobaan pertama dan kedua. Sedangkan pada kecepatan 20 km/jam, nilai RMS daya yang dihasilkan adalah sebesar 3,62 Watt.



(a)



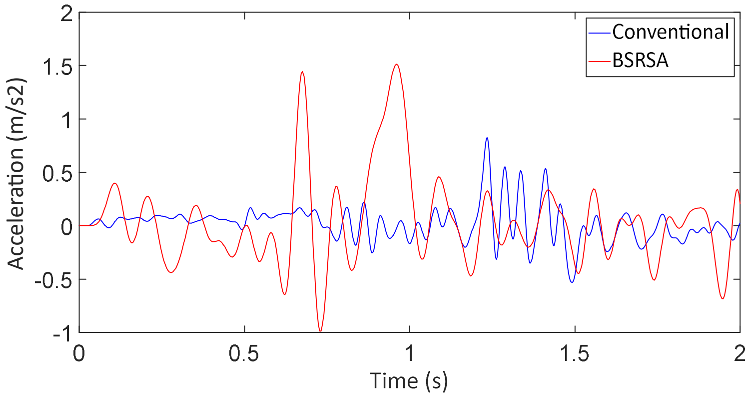
(b)

Gambar 4.48 Perbandingan (a) Voltase dan (b) Daya Bangkitan *Speed Trap*

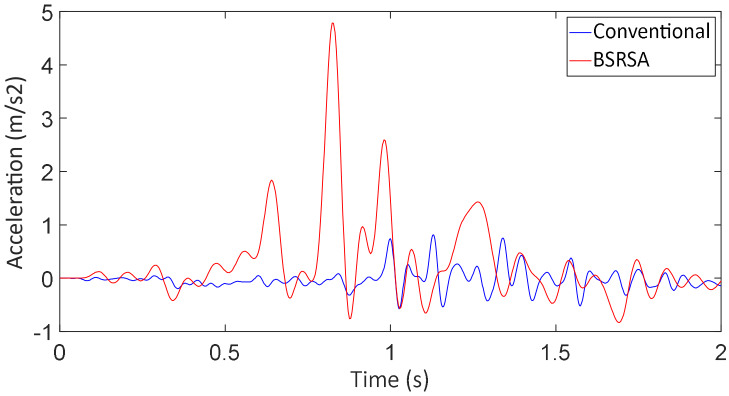
Gambar 4.48 menunjukkan perbandingan langsung daya bangkitan yang dihasilkan untuk masing-masing kecepatan. Pola yang dihasilkan untuk masing-masing kecepatan sama dan berulang-ulang seperti pada profil jalan *speed trap*. Terlihat pada grafik, pada kecepatan 15 km/jam daya bangkitan yang dihsilkan adalah yang paling tinggi. Sedangkan pada kecepatan 10 km/jam dan 20 km/jam, daya bangkitan yang dihasilkan relatif sama. Rentang waktu dalam menghasilkan energi listrik yang paling lama adalah pada kecepatan 10 km/jam, yaitu sekitar 1 detik. Dengan meningkatnya kecepatan, maka range waktunya akan berkurang,

namun daya maksimal yang dihasilkan akan semakin tinggi dan yang terbesar terjadi pada kecepatan 15 km/jam.

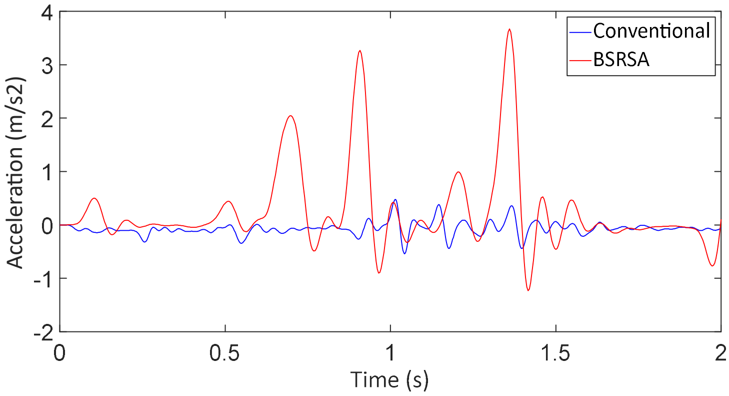
4.4.3.2 Respon Dinamis Kendaraan



(a)



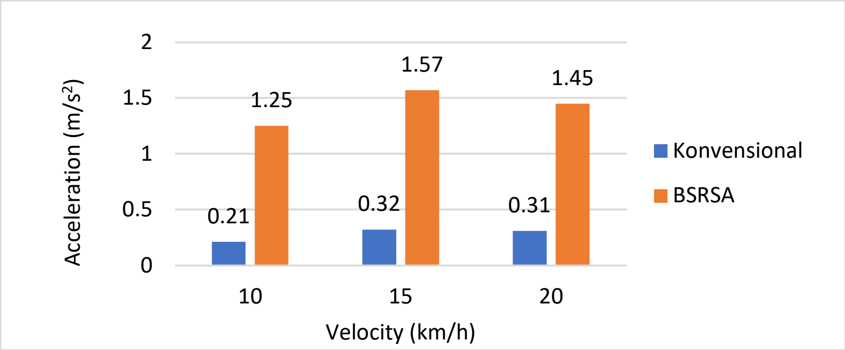
(b)



(c)

Gambar 4.49 Perbandingan Respon Percepatan Konvensional Shock Absorber dengan BSRSA Melewati *Speed Trap* pada Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, dan (c) 20 km/jam

Gambar 4.49 menunjukkan perbandingan percepatan konvensional *shock absorber* dengan BSRSA untuk kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, dan (c) 20 km/jam. Nilai maksimal percepatan yang terjadi ada pada kecepatan 15 km/jam yaitu sebesar 4,8 m/s^2. Sedangkan pada kecepatan 10 km/jam dan 20 km/jam, nilai maksimal tidak berbeda jauh yaitu 3 m/s^2. Secara keseluruhan, nilai percepatan pada konvensional *shock absorber* jauh lebih rendah bila dibandingkan dengan BSRSA. Pada konvensional *shock absorber*, nilai percepatan relatif stabil untuk semua variasi kecepatan. Hal ini berbeda bila dibandingkan dengan BSRSA, dimana nilai percepatan sangat bervariasi.



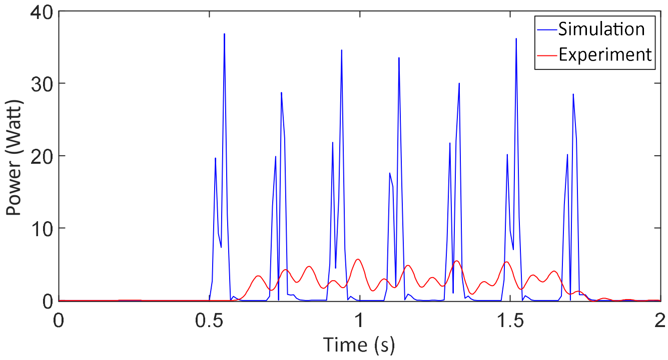
Gambar 4.50 Perbandingan RMS Percepatan Konvensional *Shock Absorber* dengan BSRSA Profil Jalan Speed Trap

Data rekapitulasi RMS percepatan antara konvensional *shock absorber* dengan BSRSA ditujukkan pada Gambar 4.50. Pada konvensional *shock absorber*, nilai RMS percepatan cenderung stabil dan tidak berbeda signifikan seiring dengan meningkatnya kecepatan. Sedangkan BSRSA, terdapat perbedaan, dan nilai RMS percepatan tertinggi terjadi pada kecepatan 15 km/jam. Hal ini berbanding lurus dengan energi bangkitan yang dihasilkan, dimana pada kecepatan 15 km/jam energi bangkitan yang dihasilkan adalah yang paling besar. Pada semua variasi kecepatan, RMS percepatan pada BSRSA masih lebih tinggi hingga hampir 5 kali lipat dibanding konvensional *shock absorber*. Apabila dibandingkan dengan saat melewati polisi tidur, nilai ini sangat besar perbedaannya. Karakter dari kendaraan melewati *speed trap* sendiri adalah adanya getaran berulang-ulang sesuai dengan banyaknya *speed trap* yang dilalui. Hal ini menunjukkan bahwa performa BSRSA dalam meredam getaran melewati *speed trap* tidak cukup baik.

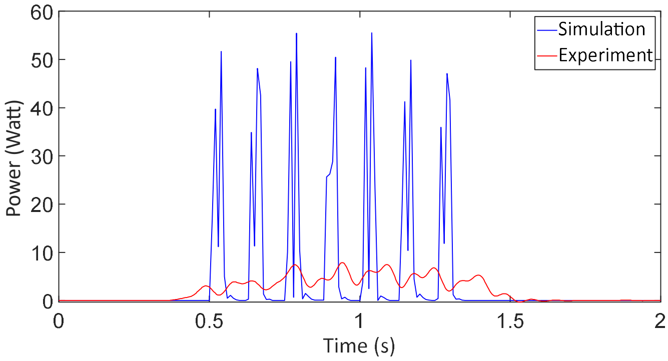
Apabila mengacu pada parameter kenyamanan pada Tabel 4.2, nilai pada konvensional *shock absorber* masuk pada level sedikit tidak nyaman. Namun pada BSRSA, level kenyamanannya berada pada level sangat tidak nyaman. Tentunya level perbedaan derajat kenyamanan antara konvensional *shock absorber* dan BSRSA berbeda sangat jauh. Hal inilah yang mungkin perlu menjadi perhatian kedepan mengenai kemampuan meredam getaran dari BSRSA agar lebih maksimal dan dapat mendekati level kenyamanan dari konvensional *shock absorber*.

4.4.3.3 Perbandingan dengan Hasil Simulasi

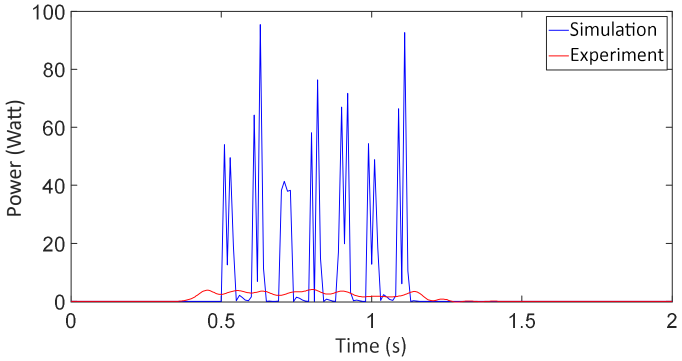
Gambar 4.51 menunjukkan perbandingan antara daya bangkitan antara simulasi dengan eksperimen untuk kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, dan (c) 20 km/jam pada saat melewati *speed trap*. Pola daya bangkitan yang dihasilkan sama yaitu terjadi daya bangkitan berulang-ulang dalam waktu yang singkat. Semakin meningkat kecepatan kendaraan, maka range waktu daya bangkitan yang dihasilkan akan semakin cepat.



(a)



(b)



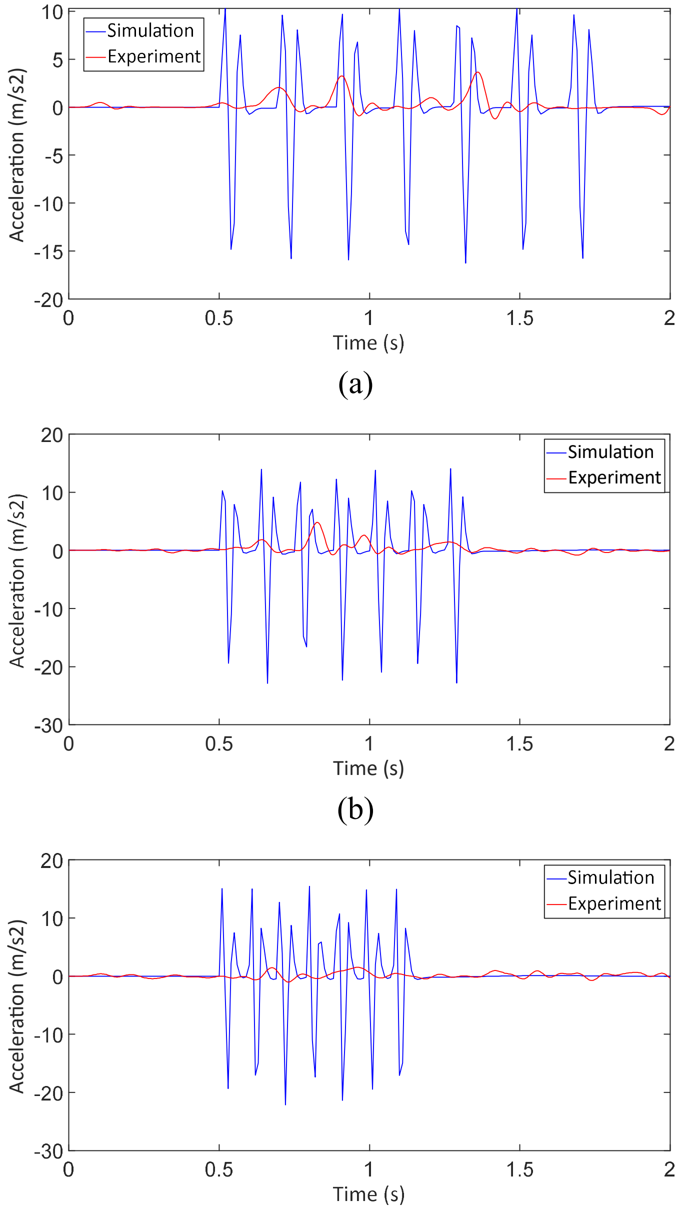
(c)

Gambar 4.51 Perbandingan Daya Bangkitan *Speed Trap* Antara Simulasi dengan Eksperimen untuk Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, dan (c) 20 km/jam

Hal yang menjadi perbedaan signifikan antara simulasi dan eksperimen adalah besarnya daya bangkitan yang dihasilkan. Pada simulasi kecepatan 10 km/jam, daya maksimal yang dihasilkan mencapai 38,2 Watt, sedangkan pada eksperimen, daya maksimal hanya mencapai 6,2 Watt. Hal yang sama terjadi pada kecepatan 15 km/jam dan 20 km/jam. Hasil simulasi menunjukkan, daya bangkitan maksimal mencapai 55 Watt dan 95 Watt. Sedangkan hasil eksperimen hanya mencapai 9,8 Watt dan 6,5 Watt. Besarnya perbedaan ini menunjukkan bahwa potensi daya bangkitan yang dihasilkan BSRSA masih belum maksimal. Rata-rata daya bangkitan yang dihasilkan hanya sebesar 20% dari potensi daya bangkitan yang bisa dihasilkan. Potensi daya bangkitan ini didekati dengan besaran daya bangkitan hasil simulasi. Nilai potensi daya bangkitan ini sedikit lebih rendah bila dibandingkan dengan saat melewati polisi tidur. Data rekapitulasi antara RMS daya hasil simulasi dan eksperimen ditunjukkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Perbandingan RMS Daya Speed Trap Simulasi dan Eksperimen

Kecepatan (km/jam)	RMS Daya (Watt)	
	Simulasi	Eksperimen
10	10,3	3,3
15	21,4	3,8
20	32,4	3,6



(a)

(b)

(c)

Gambar 4.52 Perbandingan Respon Percepatan *Speed Trap* Antara Simulasi dengan Eksperimen untuk Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 15 km/jam, dan (c) 20 km/jam

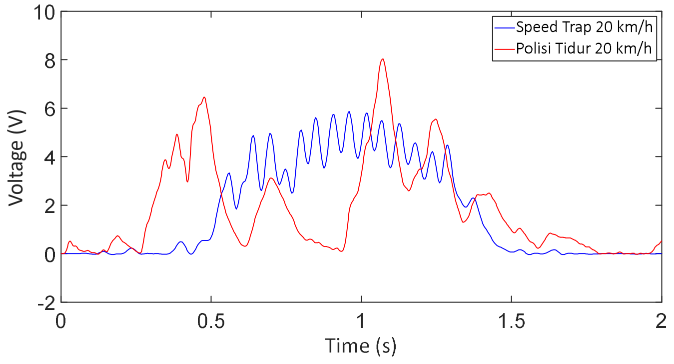
Gambar 4.52 menunjukkan perbandingan respon percepatan melewati *speed trap* antara simulasi dengan eksperimen. Pola respon percepatan antara simulasi dengan eksperimen tidak berbeda juah. Paling terlihat jelas perbedaannya adalah besaran nilai respon percepatan. Pada simulasi, nilai respon percepatannya sangat tinggi, jauh lebih tinggi bila dbandingkan dengan hasil eksperimen. Maksimal percepatan mencapai 12 m/s^2. Sedangkan pada eksperimen, maksimal hanya mencapai 5 m/s^2. Perbedaan RMS percepatan antara hasil eksperimen dan

simulasi mencapai 75%. Sedangkan membandingkan dengan RMS percepatan, pada saat simulasi nilai respon percepatan akan meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan. Hal ini sedikit berbeda dengan saat eksperimen. Pada saat eksperimen, nilai respon percepatan tertinggi terjadi pada kecepatan 15 km/jam. Data rekapitulasi perbandingan antara simulasi dan eksperimen terdapat pada Tabel 4.11.

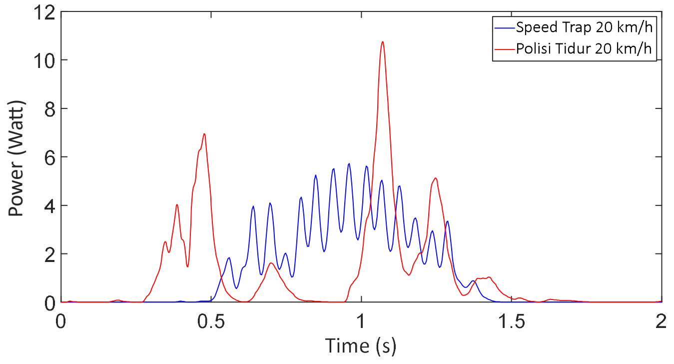
Tabel 4.11 Perbandingan RMS Percepatan *Speed Trap* Simulasi dan Eksperimen

Kecepatan (km/jam)	Percepatan Body (m/s^2)	
	Simulasi	Eksperimen
10	5,2	1,25
15	6,0	1,57
20	6,1	1,45

4.4.3.4 Perbandingan Polisi Tidur dengan *Speed Trap*



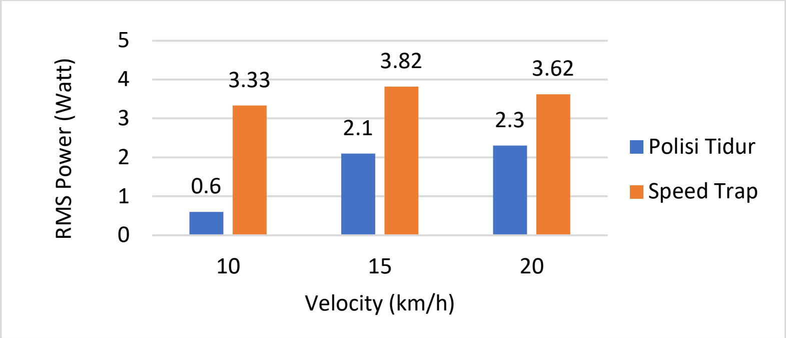
(a)



(b)

Gambar 4.53 Perbandingan Voltase dan Daya Bangkitan Melewati Polisi Tidur dengan *Speed Trap* pada Kecepatan 20 km/jam

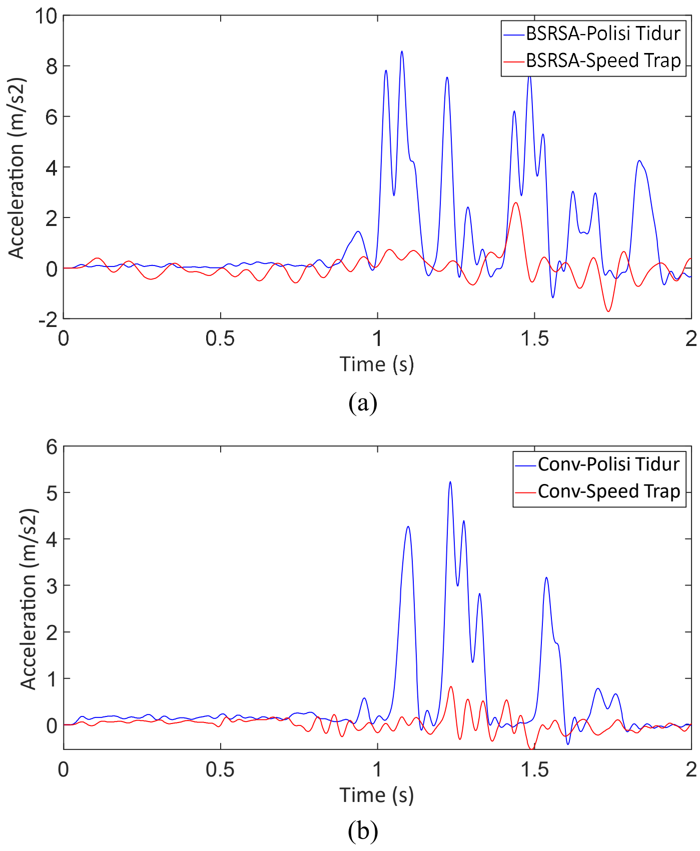
Gambar 4.53 menunjukkan perbandingan voltase dan daya bangkitan pada saat kendaraan melewati polisi tidur dan speed trap dengan kecepatan 20 km/jam. Range waktu dalam menghasilkan listrik untuk polisi tidur sedikit lebih besar dibandingkan *speed trap*. Nilai maksimal daya bangkitan yang dihasilkan juga lebih besar saat melewati polisi tidur. Hal ini terjadi karena ketinggian polisi tidur lebih besar dibanding *speed trap*, yaitu 10 cm berbanding 1,5 cm. Karakteristik daya bangkitan saat melewati polisi tidur adalah terdapat dua nilai puncak dari grafik. Hal ini mengindikasikan saat kendaraan melewati awal polisi tidur dan akhir polisi tidur. Berbeda dengan saat melewati speed trap. Karakteristik melewati *speed trap* adalah semakin meningkat kemudian turun secara perlahan. Semakin meningkatnya energi bangkitan ini karena karakteristik *speed trap* yang dilalui berjumlah 7 buah dengan jarak yang tidak terlalu jauh, sehingga terdapat getaran yang berulang dalam waktu singkat. Walapun pada polisi tidur nilai energi bangkitan maksimal yang dihasilkan lebih tinggi, namun RMS daya bangkitan yang dihasilkan lebih tinggi pada *speed trap*, yaitu 3,62 Watt berbanding 2,1 Watt pada kecepatan 20 km/jam. Perbandingan secara langsung mengenai energi bangkitan saat melewati polisi tidur dan *speed trap* dapat dilihat pada Tabel 4.12. Perbedaan daya bangkitan yang dihasilkan pada *speed trap* lebih besar 1,5 kali bila dibandingkan dengan polisi tidur. Gambar 4.54 menunjukkan perbedaan RMS daya bangkitan antara polisi tidur dengan *speed trap*.



Gambar 4.54 Perbandingan RMS Daya antara Polisi Tidur dan *Speed Trap*

Tabel 4.12 Perbandingan Voltase dan Daya Melewati Polisi Tidur dan *Speed Trap*

Kecepatan (km/jam)	Voltase dan Daya Bangkitan							
	Nilai Maksimal				RMS			
	Polisi Tidur		Speed Trap		Polisi Tidur		Speed Trap	
	Voltase (V)	Power (Watt)	Voltase (V)	Power (Watt)	Voltase (V)	Power (Watt)	Voltase (V)	Power (Watt)
10	4,2	2,9	6	6,2	1,3	0,6	4,24	3,33
15	8,2	11,3	7,6	9,8	2,5	2,1	4,67	3,82
20	8,4	11,6	5,8	5,9	2,6	2,3	4,38	3,62



Gambar 4.55 Perbandingan Respon Percepatan (a) BSRSA dan (b) Konvensional *Shock Absorber* pada Kecepatan 20 km/jam

Gambar 4.55 menunjukkan perbedaan respon percepatan pada (a) BSRSA dan (b) konvensional *shock absorber*. Pada saat melewati polisi tidur, nilai percepatan maksimal terjadi di dua titik pada grafik, yaitu terjadi pada saat awal dan akhir polisi tidur. Nilai respon percepatan yang dihasilkan sangat tinggi, kemudian akan turun seiring dengan telah lewatnya kendaraan pada polisi tidur. Hal

yang sedikit berbeda terjadi pada saat melewati speed trap. Kenaikan nilai percepatan pada saat melewati *speed trap* relatif stabil dan berlangsung cukup konstan selama kendaraan melewati awal hingga akhir *speed trap*. Pola respon percepatan ini berlaku untuk konvensional *shock absorber* maupun BSRSA.

Tabel 4.13 menunjukkan perbandingan respon percepatan kendaraan saat melewati polisi tidur dan *speed trap*. Nilai RMS percepatan saat melewati polisi tidur lebih tinggi bila dibandingkan dengan saat melewati *speed trap*. Hal ini terjadi baik pada konvensional *shock absorber* maupun BSRSA. Nilai RMS percepatan pada konvensional *shock absorber* relatif sama dan tidak berbeda jauh. Namun berbeda dengan BSRSA, dimana RMS percepatan akan naik seiring dengan meningkatnya kecepatan, kecuali pada *speed trap* kecepatan 15 km/jam. Rata-rata perbandingan RMS percepatan pada jalan melewati polisi tidur antara BSRSA dengan konvensional adalah 2 kali lipat, sedangkan pada jalan melewati speed trap, perbedaanya meningkat hingga 5 kali lipat.

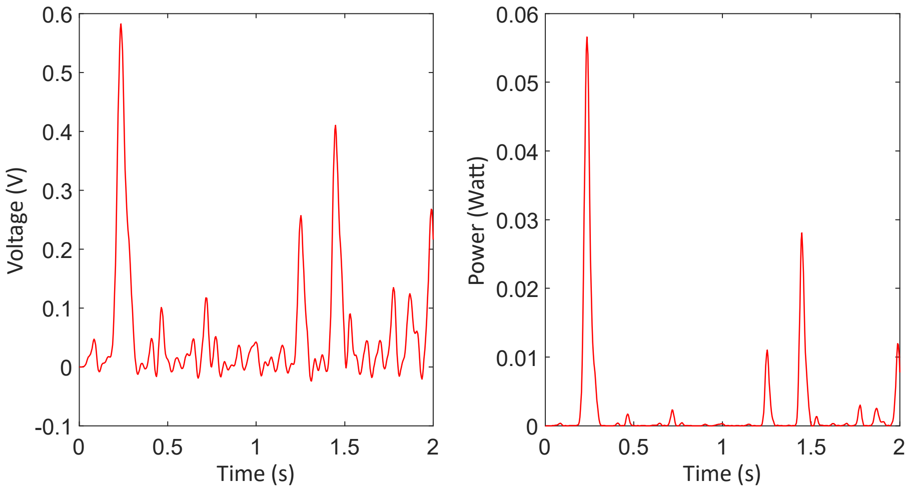
Tabel 4.13 Perbandingan RMS Percepatan Melewati Polisi Tidur dan *Speed Trap*

Kecepatan (km/jam)	Polisi Tidur		*Speed Trap*	
	Konvensional *shock absorber* (m/s^2)	BSRSA (m/s^2)	Konvensional *shock absorber* (m/s^2)	BSRSA (m/s^2)
10	1,31	2,13	0,21	1,25
15	1,30	2,51	0,32	1,57
20	1,34	2,67	0,31	1,45

4.4.4 Pengujian Melewati Jalan Aspal

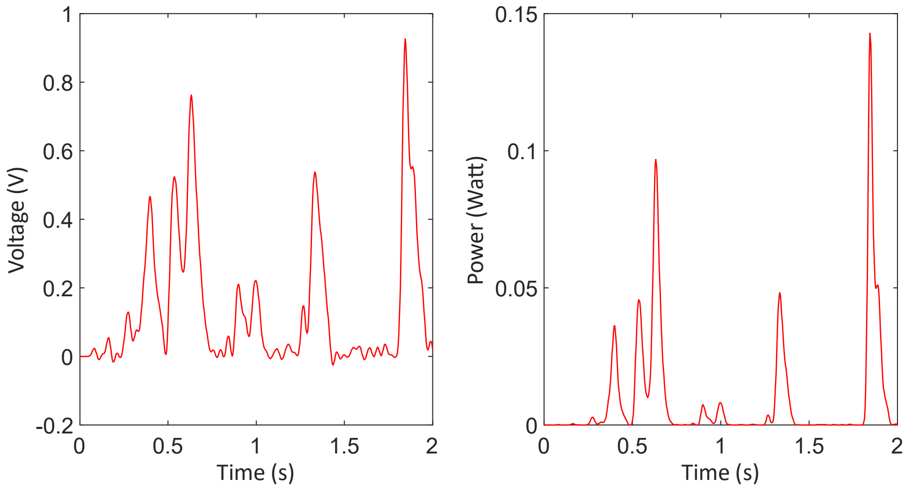
4.4.4.1 Voltase dan Daya Bangkitan yang Dihasilkan

Pada pengujian kendaraan melewati jalan aspal, tedapat 3 variasi kecepatan yang digunakan yaitu 10 km/jam, 20 km/jam, dan 30 km/jam. Deskripsi dari jalan aspal adalah sebagai berikut. Jalan ini berada di Jalan Raya ITS. Kontur dari jalan aspal ini relatif rata, tidak bergelombang, dan tidak terdapat perbedaan ketinggian signifikan akibat tambalan lubang. Dengan amplitudo jalan yang cukup kecil maka potensi energi bangkitan yang dihasilkan rendah. Pengambilan data dilakukan sebanyak 2 kali. Rentang waktu pengambilan data yang digunakan adalah 2 detik.

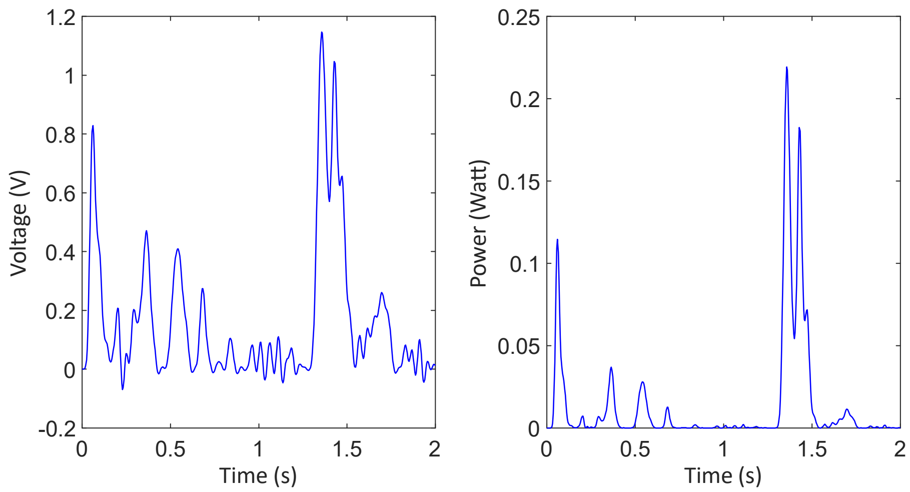


Gambar 4.56 Voltase dan Daya Bangkitan BSRSA Melewati Jalan Aspal 10 km/jam

Gambar 4.56 menunjukkan voltase dan daya bangkitan melewati jalan aspal pada kecepatan 10 km/jam pada percobaan kedua. Seperti yang telah diprediksi sebelumnya bahwa daya bangkitan yang dihasilkan sangatlah kecil. Pola dari daya bangkitan tidak beraturan tergantung pada kontur jalan yang dilewati. Semakin besar amplitudo jalan, maka akan semakin besar daya bangkitannya. Namun karena secara visual jalan cukup rata, maka daya bangkitan yang dihasilkan juga tidak besar. Maksimal hanya mencapai 0,42 Volt dan 0,03 Watt pada percobaan pertama dan 0,58 Volt dan 0,056 Watt pada percobaan kedua. Nilai ini tentunya sangat kecil apabila dibandingkan pada dua tipe jalan sebelumnya pada kecepatan yang sama.



Gambar 4.57 Voltase dan Daya Bangkitan BSRSA Melewati Jalan Aspal 20 km/jam



Gambar 4.58 Voltase dan Daya Bangkitan BSRSA Melewati Jalan Aspal 30 km/jam

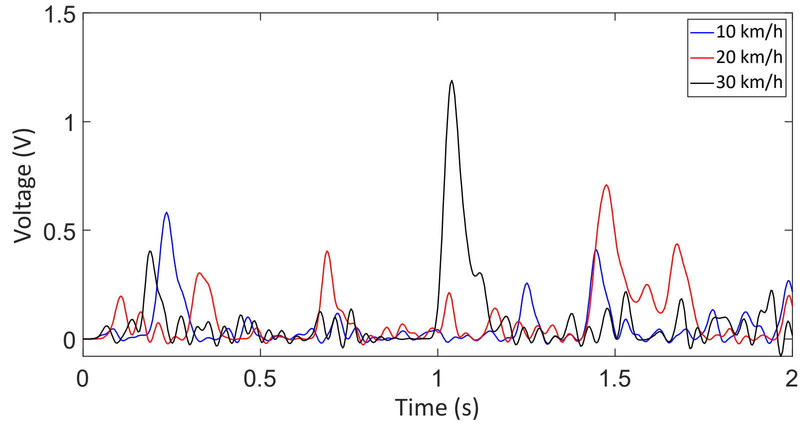
Gambar 4.57 menunjukkan voltase dan daya bangkitan pada kecepatan 20 km/jam pada percobaan kedua. Dengan meningkatnya kecepatan, daya bangkitan akan meningkat. Namun demikian nilainya tidak terlalu besar, hanya mencapai 0,9 Volt dan 0,14 Watt. Sedangkan Gambar 4.58 menunjukkan voltase dan daya bangkitan pada kecepatan 30 km/jam pada percobaan pertama. Pada kecepatan paling tinggi ini, daya bangkitan akan meningkat, yaitu maksimal 1,1 Volt dan 0,25 Watt. Nilai daya bangkitan meningkat 2 kali lipat dibandingkan pada kecepatan 20 km/jam. Namun hasilnya masih cukup kecil. Pola daya bangkitan yang dihasilkan pada kecepatan 20 km/jam dan 30 km/jam sama dengan pada kecepatan 10 km/jam, hanya berbeda nilai daya bangkitannya yang meningkat.

Tabel 4.14 Rekapitulasi Voltase dan Daya Bangkitan Melewati Jalan Aspal

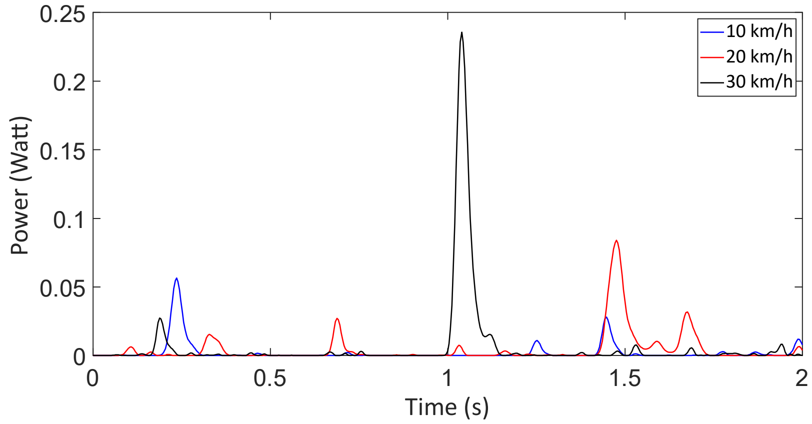
Kecepatan (km/jam)	Voltase dan Daya Bangkitan							
	Nilai Maksimal				RMS			
	1st Run		2nd Run		1st Run		2nd Run	
	Voltase (V)	Power (Watt)	Voltase (V)	Power (Watt)	Voltase (V)	Power (Watt)	Voltase (V)	Power (Watt)
10	0,42	0,03	0,58	0,056	0,09	0,004	0,12	0,008
20	0,7	0,09	0,9	0,14	0,17	0,012	0,21	0,023
30	1,1	0,25	1,2	0,27	0,29	0,03	0,22	0,03

Tabel 4.14 menunjukkan rekapitulasi data berupa daya, voltase maksimal dan RMS dari masing-masing kecepatan dan percobaan. Daya bangkitan yang dihasilkan maksimal terjadi pada kecepatan paling tinggi yaitu pada kecepatan 30

km/jam. Namun demikian RMS daya dan voltasenya masing-masing hanya 0,22 Volt dan 0,03 Watt. Nilai ini sangatlah kecil apabila dibandingkan dengan tipe jalan *speed trap* dan polisi tidur. Seperti yang telah diprediksi sebelumnya, dengan kontur jalan yang relatif rata, tidak bergelombang, dan tidak terdapat perbedaan ketinggian, maka tidak banyak energi yang bisa didapat dari tipe jalan ini. Gambar 4.59 merupakan perbandingan energi bangkitan pada masing-masing kecepatan. Pola yang dihasilkan sama untuk tiap kecepatan. Daya maksimal yang dihasilkan terjadi pada kecepatan 30 km/jam yaitu sebesar 0,27 Watt.



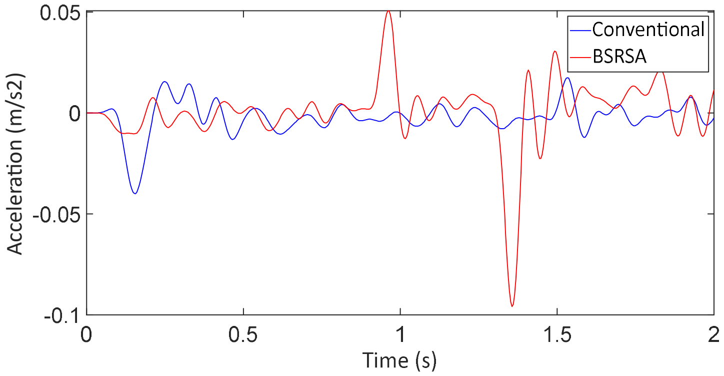
(a)



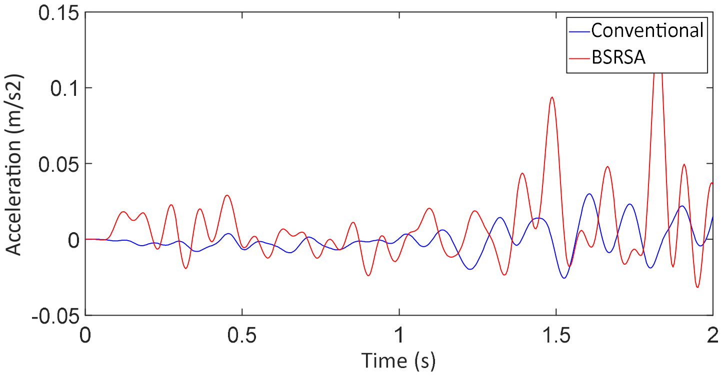
(b)

Gambar 4.59 Perbandingan (a) Voltase dan (b) Daya Bangkitan Melewati Jalan Aspal

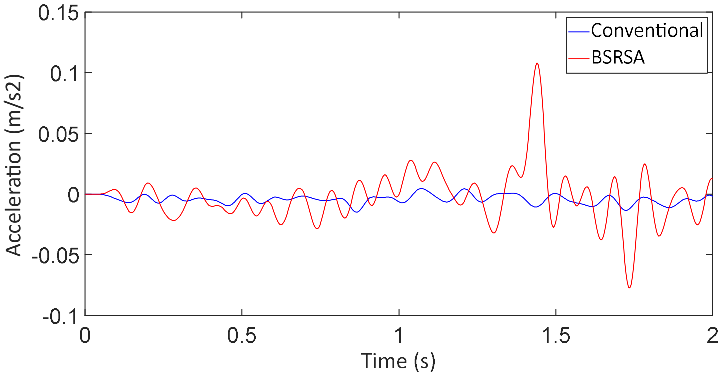
4.4.4.2 Respon Dinamis Kendaraan



(a)



(b)



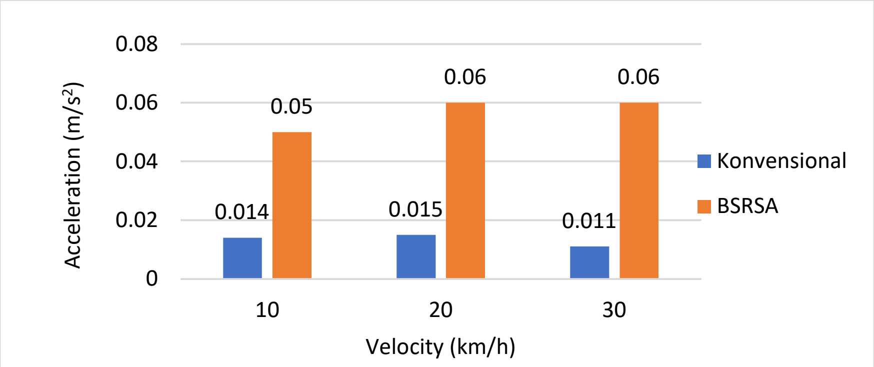
(c)

Gambar 4.60 Perbandingan Respon Percepatan Konvensional *Shock Absorber* dengan BSRSA Melewati Jalan Aspal pada Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 20 km/jam, dan (c) 30 km/jam

Gambar 4.60 menunjukkan perbandingan percepatan konvensional *shock absorber* dengan BSRSA untuk kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 20 km/jam, dan (c) 30 km/jam. Nilai maksimal percepatan yang terjadi pada kecepatan 20 km/jam dan 30 km/jam yaitu sebesar 0,12 m/s^2. Nilai ini relatif kecil, karena kontur jalan yang

dilewati relatif rata. Hal ini juga bebanding lurus dengan energi bangkitan yang dihasilkan, dimana nilainya sangat kecil. Sama pada tipe jalan sebelumnya, nilai percepatan pada konvensional *shock absorber* lebih kecil dibandingkan BSRSA. Pada konvensional *shock absorber*, nilai percepatan relatif stabil untuk semua variasi kecepatan. Sedangkan pada BSRSA, nilai percepatan sangat bervariasi.

Gambar 4.61 merupakan perbandingan RMS percepatan antara konvensional *shock absorber* dengan BSRSA pada masing-masing variasi kecepatan. Nilai RMS percepatn, baik pada konvensional *shock absorber* maupun BSRSA relatif sama dan tidak terpengaruh terhadap peningkatan kecepatan. Hal ini diakibatkan oleh kontur jalanan yang relatif rata sehingga tidak banyak getaran yang terjadi. Apabila membandingkan nilai RMS percepatan, pada BSRSA masih lebih tinggi hingga 5 kali lipat dibandingkan konvensional *shock absorber*. Hal ini sama dengan pada saat kendaraan melewati polisi tidur. Dengan demikian, ketika melewati jalan aspal yang cukup rata, performa BSRSA dalam meredam getaran masih belum maksimal.



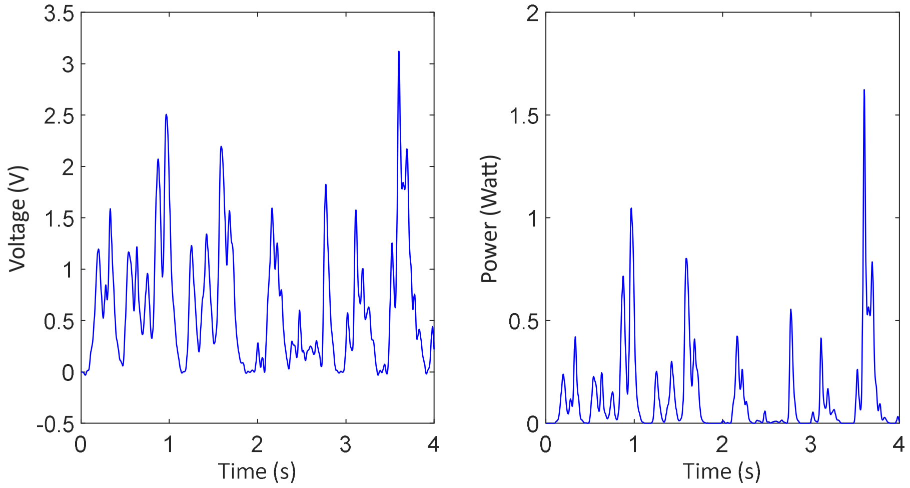
Gambar 4.61 Perbandingan RMS Percepatan Konvensional *Shock Absorber* dengan BSRSA Profil Jalan Aspal

Melihat dari segi faktor kenyamanan pada Tabel 4.2, nilai RMS percepatan baik pada konvensional *shock absorber* maupun BSRSA ada pada level tidak ada keluhan. Hal ini sebanding dengan kontur jalan yang relatif rata dan tidak bergelombang. Karena getaran yang dihasilkan cukup kecil, maka performa BSRSA pada suspensi relatif baik, walaupun apabila dibandingkan dengan konvensional *shock absorber* nilainya masih cukup jauh.

4.4.5 Pengujian Melewati Jalan Paving

4.4.5.1 Voltase dan Daya Bangkitan yang Dihasilkan

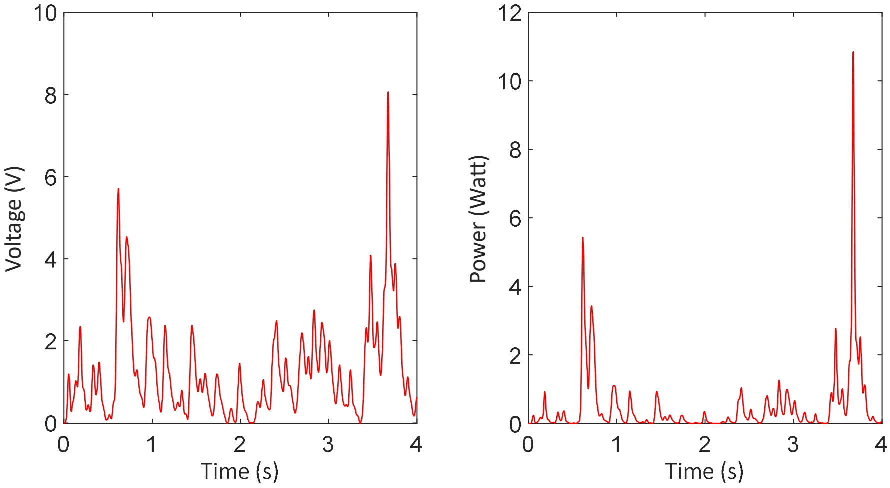
Pada pengujian kendaraan melewati jalan paving, terdapat 3 variasi kecepatan yang digunakan yaitu 10 km/jam, 20 km/jam, dan 30 km/jam. Deskripsi dari jalan paving ini adalah sebagai berikut. Lokasi jalan berada di jalan menuju Jurusan Geomatika ITS dari arah Bundaran PPNS. Kontur jalan ini sangat bervariasi dan cenderung tidak rata permukaannya. Hampir semua paving yang ada telah mengelupas sisi luarnya. Untuk detail foto gambar profil jalan tipe ini dapat dilihat pada Gambar 3.17. Di beberapa bagian terdapat lubang dengan kedalaman bervariasi dan paving yang hampir lepas. Sehingga dapat dikatakan amplitudo jalan bervariasi dan lebih besar bila dibandingkan dengan jalan aspal. Tentunya potensi energi bangkitan yang dihasilkan akan lebih tinggi bila dibandingkan dengan jalan aspal. Pengambilan data dilakukan sebanyak 2 kali. Rentang waktu pengambilan data yang digunakan adalah 4 detik.



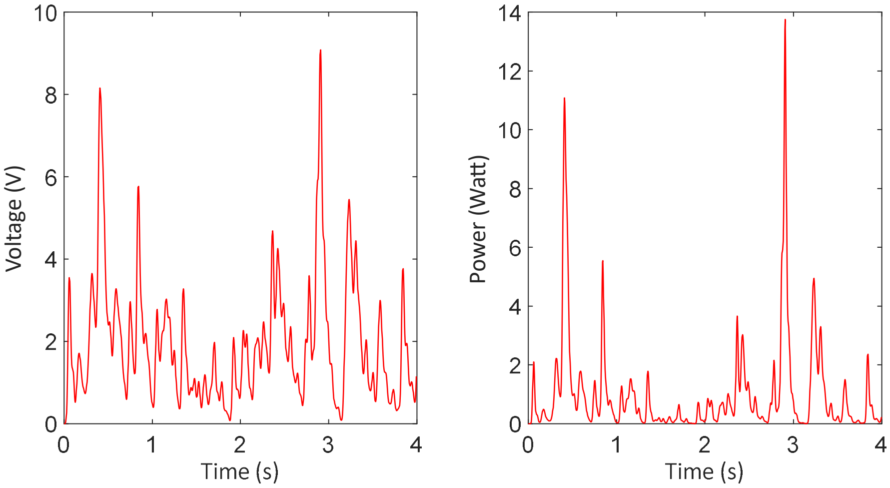
Gambar 4.62 Voltase dan Daya BSRSA Melewati Jalan Paving 10 km/jam

Voltase dan daya bangkitan yang dihasilkan melewati jalan paving pada kecepatan 10 km/jam ditunjukkan pada Gambar 4.62. Grafik ini merupakan percobaan pertama. Pola daya bangkitan yang dihasilkan hampir sama dengan jalan aspal, yaitu tidak membentuk pola khusus tergantung kontur jalan yang dilewati. Yang menjadi perbedaan adalah besaran energi yang dihasilkan. Dari Gambar 4.63 dapat dilihat bahwa daya bangkitan yang dihasilkan mencapai 3 Volt dan 1,6 Watt. Sedangkan pada percobaan kedua, voltase dan daya bangkitan yang dihasilkan 2,9 Volt dan 1,6 Watt. Nilai ini jauh lebih besar dibandingkan dengan pada saat

melewati jalan aspal pada kecepatan yang sama. Besarnya daya bangkitan ini diakibatkan amplitudo jalanan yang lebih bervariasi dan lebih besar dibanding jalan aspal, sesuai dengan deskripsi jalan yang telah dijelaskan sebelumnya.



Gambar 4.63 Voltase dan Daya BSRSA Melewati Jalan Paving 20 km/jam



Gambar 4.64 Voltase dan Daya BSRSA Melewati Jalan Paving 30 km/jam

Gambar 4.63 dan 4.64 menunjukkan voltase dan daya bangkitan BSRSA pada kecepatan 20 km/jam dan 30 km/jam. Kedua grafik ini didapat pada percobaan kedua. Secara pola daya bangkitan yang dihasilkan sama dengan pada kecepatan 10 km/jam. Yang membedakan adalah besaran daya bangkitan yang dihasilkan. Dengan meningkatnya kecepatan, maka daya bangkitan maksimal yang dihasilkan akan semakin besar. Pada kecepatan 20 km/jam nilai voltase dan daya bangkitan maksimal sebesar 8 Volt dan 11 Watt. Sedangkan pada kecepatan 30 km/jam nilai voltase dan daya bangkitan maksimal yang dihasilkan adalah 9,1 Volt dan 13,8

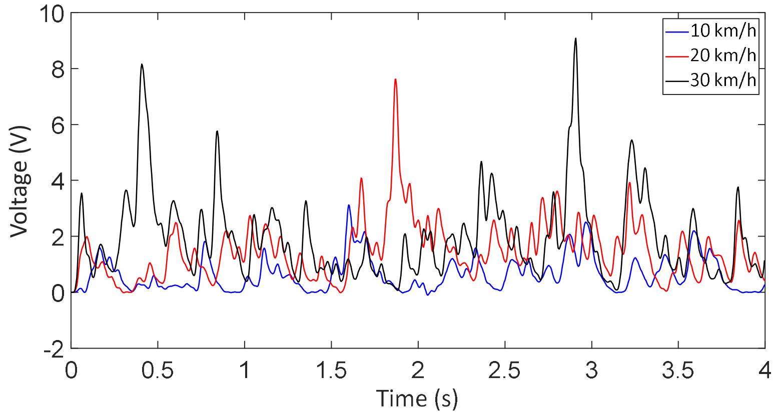
Watt. Nilai daya bangkitan ini adalah yang paling besar diantara semua tipe jalan. Besarnya daya bangkitan ini karena kecepatan kendaraan yang paling tinggi (30 km/jam) dan melewati jalan yang konturnya tidak rata. Karakteristik daya bangkitan yang dihasilkan adalah mencapai nilai yang cukup tinggi, namun hanya dalam waktu yang singkat.

Tabel 4.15 Rekapitulasi Voltase dan Daya Bangkitan Melewati Jalan Paving

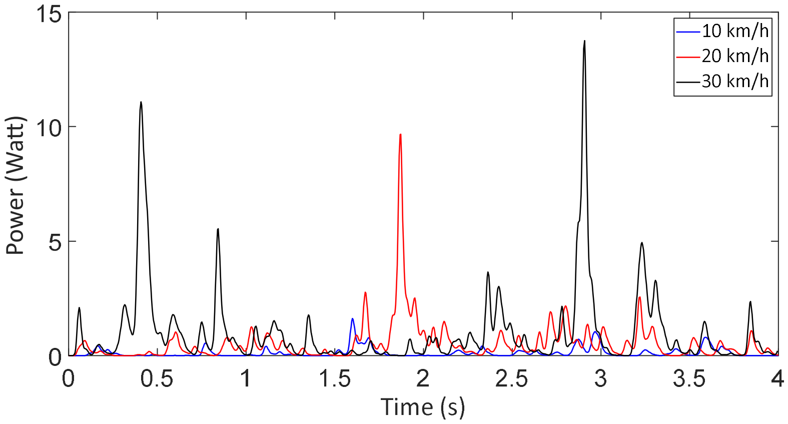
Kecepatan (km/jam)	Voltase dan Daya Bangkitan							
	Nilai Maksimal				RMS			
	1st Run		2nd Run		1st Run		2nd Run	
	Voltase (V)	Power (Watt)	Voltase (V)	Power (Watt)	Voltase (V)	Power (Watt)	Voltase (V)	Power (Watt)
10	3	1,6	2,9	1,6	1,24	0,25	1,24	0,24
20	7,5	9,5	8	11	1,80	1,27	1,72	0,9
30	8,9	12,2	9,1	13,8	2,27	2,11	2,45	1,85

Rekapitulasi voltase dan daya bangkitan pada masing-masing kecepatan ditunjukkan pada Tabel 4.15. Dapat dilihat bahwa semakin meningkatnya kecepatan kendaraan, maka daya bangkitan yang dihasilkan juga akan semakin besar. Maksimal daya yang dihasilkan terjadi pada kecepatan 30 km/jam, yaitu sebesar 13,8 Watt. Namun demikian, terjadinya daya bangkitan ini hanya sekilas dan tidak dalam waktu yang lama. RMS daya yang dihasilkan hanya sebesar 2,11 Watt pada kecepatan 30 km/jam.

Gambar 4.65 menunjukkan perbandingan voltase dan daya bangkitan melewati jalan aspal. Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa terjadinya energi bangkitan maksimal hanya dalam rentang waktu yang sangat singkat. Sebagai contoh pada kecepatan 30 km/jam, daya maksimal yang dihasilkan mencapai 13,8 Watt, namun dalam rentang waktu yang sangat singkat yaitu sekitar 0,1 detik. Pada rentang waktu ini terdapat amplitudo jalan yang cukup besar, sehingga dapat menghasilkan energi listrik yang cukup besar, namun hanya dalam waktu yang sangat singkat. Selebihnya, BSRSA tetap dapat menghasilkan listrik namun tergantung dari kontur jalan yang dilewati.



(a)

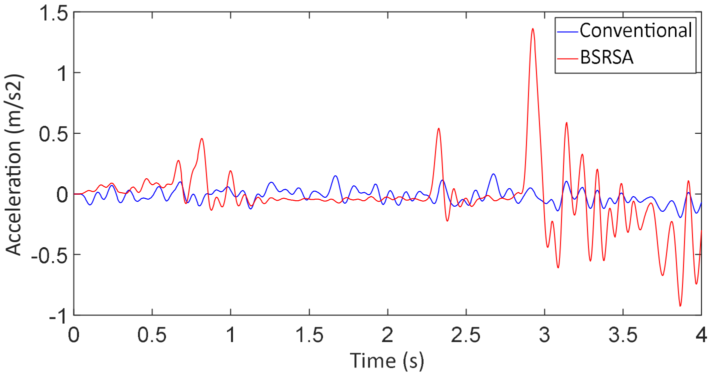


(b)

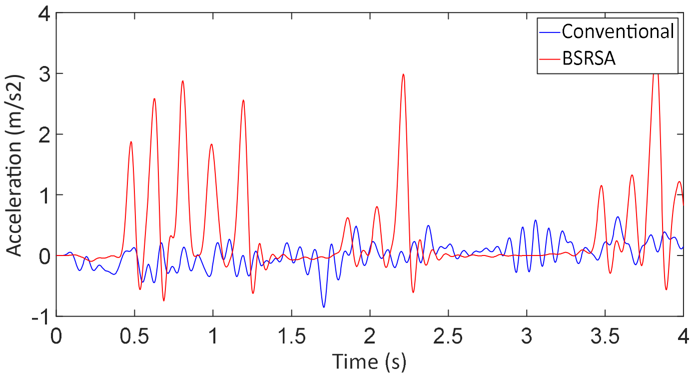
Gambar 4.65 Perbandingan (a) Voltase dan (b) Daya Bangkitan Melewati Jalan Paving

4.4.5.2 Respon Dinamis Kendaraan

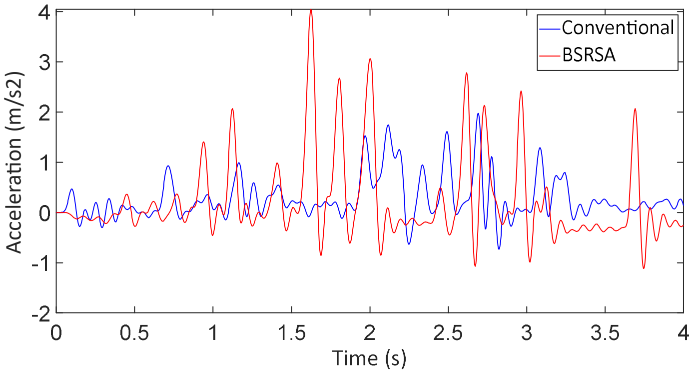
Perbandingan respon percepatan kendaraan antara konvensional *shock absorber* dengan BSRSA ditunjukkan pada Gambar 4.66. Terlihat bahwa pada setiap variasi kecepatan, nilai percepatan pada BSRSA masih lebih tinggi bila dibandingkan dengan konvensional *shock absorber*. Hal ini sama dengan pengujian melewati tipe jalan sebelumnya. Pada BSRSA, nilai repon percepatan relatif tidak stabil dan berubah-ubah. Hal ini sedikit berbeda dengan konvensional *shock absorber*, dimana nilai respon percepatan cenderung stabil. Nilai maksimal percepatan terjadi pada kecepatan 30 km/jam yaitu sebesar 4 m/s^2.



(a)



(b)

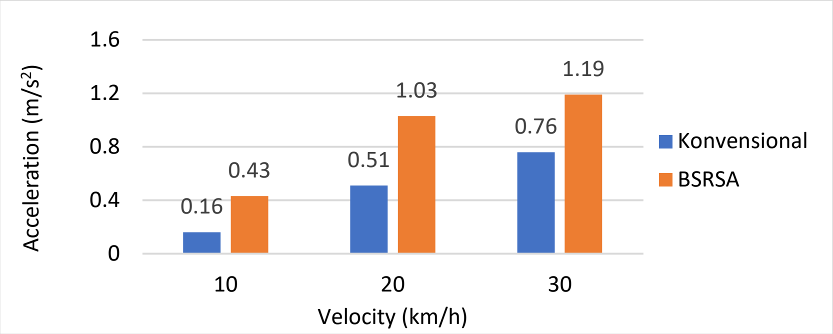


(c)

Gambar 4.66 Perbandingan Respon Percepatan Konvensional *Shock Absorber* dengan BSRSA Melewati Jalan Paving pada Kecepatan (a) 10 km/jam, (b) 20 km/jam, dan (c) 30 km/jam

Rekapitulasi data RMS percepatan melewati jalan paving untuk setiap kecepatan ditunjukkan pada Gambar 4.67. Pada konvensional *shock absorber*, nilai RMS percepatan meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan. Hal ini berbeda bila dibandingkan dengan tipe jalan sebelumnya. Pada tipe jalan

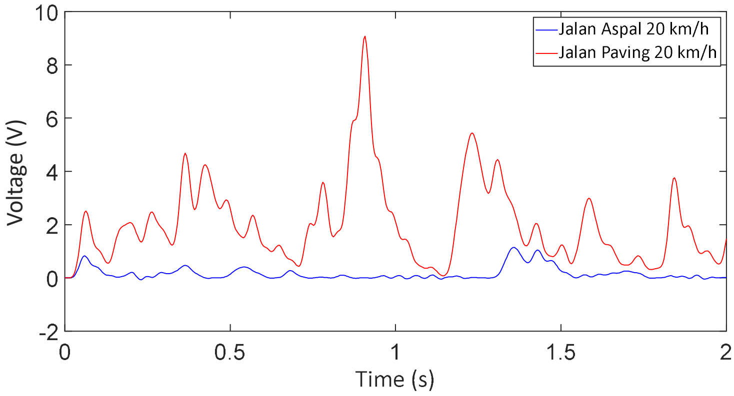
sebelumnya, nilai RMS percepatan relatif sama walaupun terdapat peningkatan kecepatan. Pada BSRSA, hal yang sama juga terjadi. RMS percepatan akan meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan. Namun hal ini juga terjadi pada tipe jalan sebelumnya, dimana RMS percepatan juga akan naik dengan meningkatnya kecepatan.



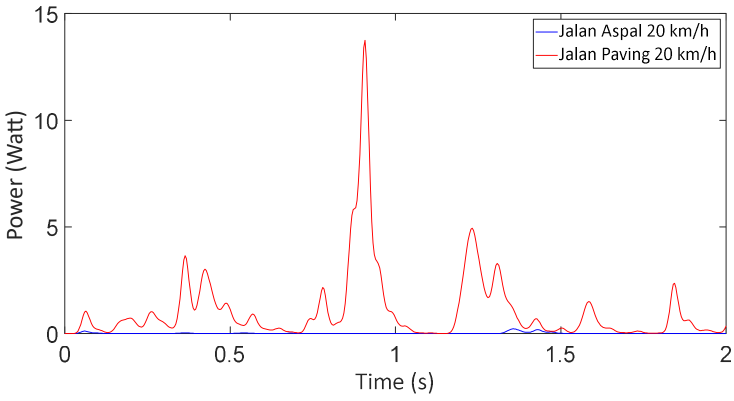
Gambar 4.67 Perbandingan RMS Percepatan Konvensional *Shock Absorber* dengan BSRSA Profil Jalan Paving

Performa BSRSA sendiri dalam meredam getaran melewati jalan paving juga belum maksimal. Hal ini dapat dilihat pada perbandingan nilai RMS percepatan. Pada kecepatan 10 km/jam, nilai RMS percepatan BSRSA lebih tinggi 3 kali lipat, kemudian turun menjadi 2 kali lipat pada kecepatan 20 km/jam dan turun lagi menjadi 1,5 kali lipat pada kecepatan 30 km/jam. Rata-rata perbedaan respon percepatannya adalah sebesar 2,2 kali bila dibandingkan dengan konvensional *shock absorber*. Nilai perbedaan ini masih lebih baik bila dibandingkan dengan jalan aspal dan *speed trap*.

4.4.5.3 Perbandingan Jalan Aspal dengan Jalan Paving



(a)



(b)

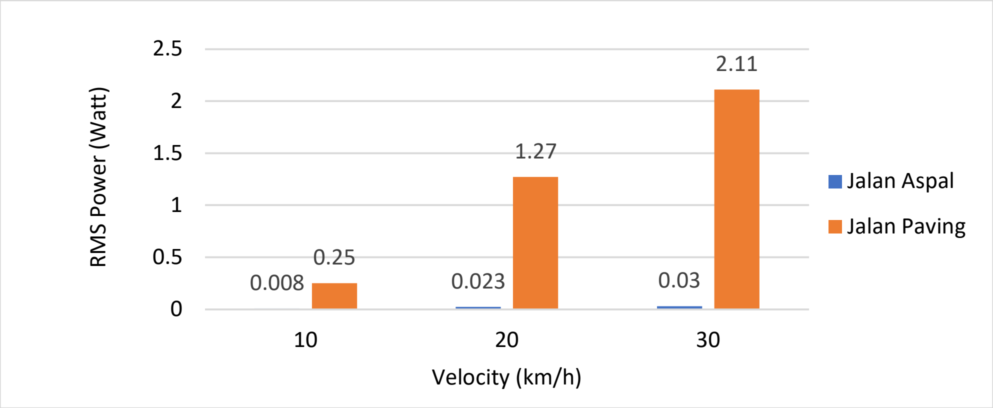
Gambar 4.68 Perbandingan (a) Voltase dan (b) Daya Bangkitan Melewati Jalan Aspal dengan Jalan Paving pada Kecepatan 30 km/jam

Gambar 4.68 menunjukkan perbandingan voltase dan daya bangkitan pada saat kendaraan melewati jalan aspal dengan jalan paving pada kecepatan 30 km/jam. Pola daya bangkitan yang dihasilkan pada 2 tipe jalan ini sama yaitu tidak memiliki pola khusus dan mencapai nilai maksimal pada rentang waktu yang singkat. Satu hal yang tampak jelas perbedaannya dalam 2 tipe jalan ini adalah besaran nilai voltase dan daya bangkitan yang dihasilkan. Pada jalan paving, maksimal voltase dan daya bangkitannya adalah sebesar 9,1 Volt dan 13,8 Watt, berbeda hingga 10 kali lipat dibandingkan melewati jalan aspal dimana nilai voltase dan daya bangkitan maksimalnya hanya mencapai 1,1 Volt dan 0,25 Watt. Besarnya perbedaan nilai daya bangkitan ini diakibatkan kontur jalanan yang berbeda. Pada jalan paving, kontur jalanannya jauh lebih tidak rata dan bervariasi sehingga memiliki amplitudo jalan yang lebih tinggi. Dengan amplitudo jalan yang lebih tinggi akan didapatkan daya bangkitan yang lebih besar, RMS voltase dan daya bangkitan pada jalan paving mampu menghasilkan 2,27 Volt dan 2,11 Watt, jauh lebih tinggi hingga 70 kali lipat dibandingkan RMS daya bangkitan pada jalan aspal. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa pengaruh kekasaran permukaan jalan sangat berpengaruh terhadap nilai energi bangkitan yang dihasilkan BSRSA. Semakin besar dan bervariasi tingkat kekasaran permukaan jalan maka akan semakin besar potensi daya bangkitan yang dihasilkan. Perbandingan secara langsung mengenai daya bangkitan saat melewati jalan aspal dengan jalan paving

dapat dilihat pada Tabel 4.16 dan Gambar 4.64 menunjukkan besarnya perbedaan nilai daya bangkitan yang terjadi antara kedua tipe jalan.

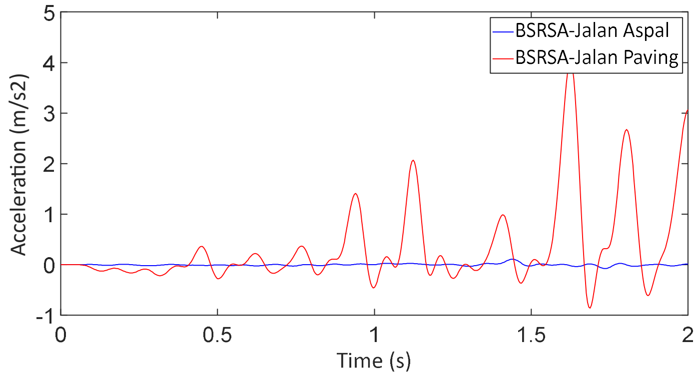
Tabel 4.16 Perbandingan Voltase dan Daya Melewati Jalan Aspal dan Jalan Paving

Kecepatan (km/jam)	Voltase dan Daya Bangkitan							
	Nilai Maksimal				RMS			
	Jalan Aspal		Jalan Paving		Jalan Aspal		Jalan Paving	
	Voltase (V)	Power (Watt)	Voltase (V)	Power (Watt)	Voltase (V)	Power (Watt)	Voltase (V)	Power (Watt)
10	0,58	0,056	2,9	1,6	0,12	0,008	1,24	0,25
20	0,9	0,14	8	11	0,21	0,023	1,80	1,27
30	1,1	0,25	9,1	13,8	0,29	0,03	2,27	2,11

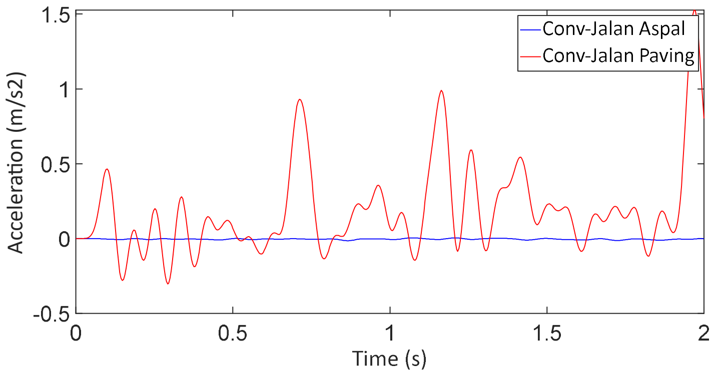


Gambar 4.69 Perbandingan RMS Daya antara Jalan Aspal dan Jalan Paving

Gambar 4.69 merupakan perbandingan respon percepatan antara (a) BSRSA dengan (b) Konvensional *Shock Absorber* melewati jalan aspal dengan jalan paving. Baik pada BSRSA maupun konvensional *shock absorber*, nilai respon percepatan yang dihasilkan jauh lebih bervariasi pada jalan paving. Hal ini menunjukkan banyaknya variasi kontur jalan pada jalan paving yang mempengaruhi amplitudo jalan. Sehingga dengan nilai amplitudo jalan yang lebih besar dan lebih bervariasi pada jalan paving, energi bangkitan yang dihasilkan jauh lebih besar.



(a)



(b)

Gambar 4.70 Perbandingan Respon Percepatan Melewati Jalan Aspal dengan Jalan Paving pada Kecepatan 30 km/jam (a) BSRSA dan (b) Konvensional

Tabel 4.17 Perbandingan RMS Percepatan Melewati Jalan Aspal dan Jalan Paving

Kecepatan (km/jam)	Jalan Aspal		Jalan Paving	
	Konvensional *shock absorber* (m/s^2)	BSRSA (m/s^2)	Konvensional *shock absorber* (m/s^2)	BSRSA (m/s^2)
10	0,014	0,05	0,16	0,43
20	0,015	0,06	0,51	1,03
30	0,011	0,06	0,76	1.19

Rekapitulasi data RMS percepatan antara jalan aspal dengan jalan paving ada pada Tabel 4.17. Pada jalan aspal, dimana kontur jalannya relatif rata, nilai RMS percepatan relatif sama seiring dengan meningkatnya kecepatan. Hal ini terjadi baik di BSRSA maupun konvensional *shock absorber*. Berbeda dengan jalan paving. Seiring meningkatnya kecepatan, nilai RMS percepatan akan meningkat untuk

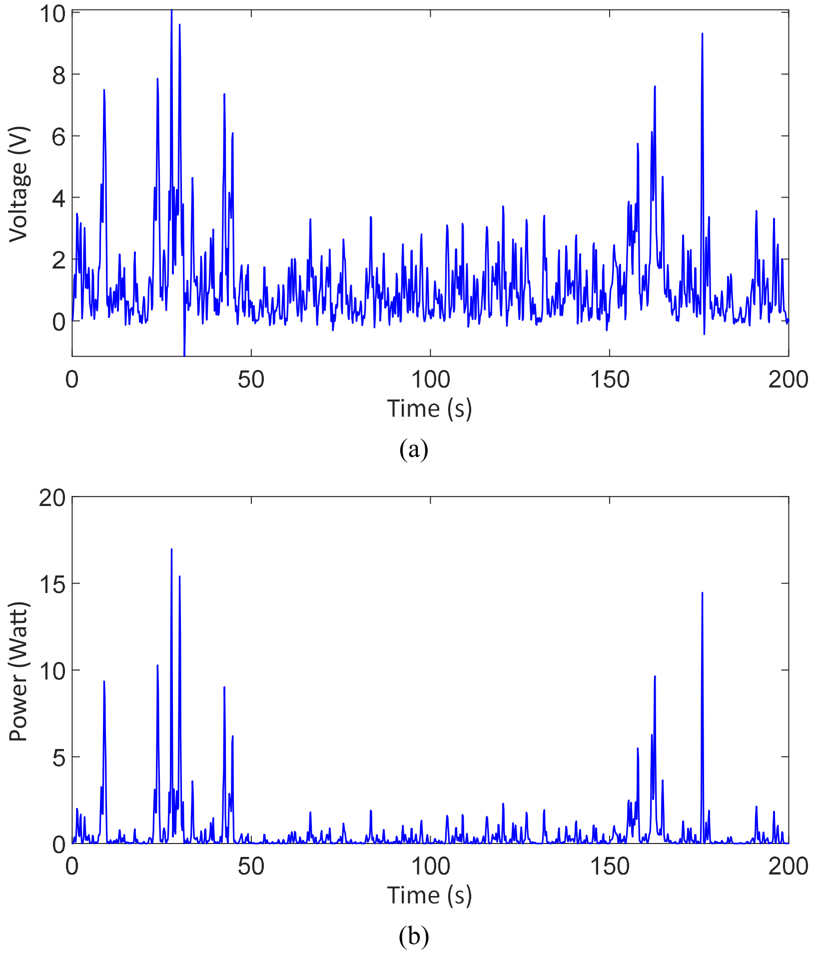
kedua tipe *absorber*. Perbandingan RMS percepatan pada paving jauh lebih tinggi dibandingkan dengan jalan aspal, sesuai dengan Gambar 4.70.

Secara keseluruhan untuk semua tipe jalan dan kecepatan, nilai RMS percepatan kendaraan menggunakan BSRSA masih jauh dibawah konvensional *shock absorber*. Hal ini menunjukkan bahwa BSRSA belum maksimal dalam meredam getaran yang dihasilkan. Ada beberapa hal yang menyebabkan BSRSA masih belum maksimal dalam meredam getaran. Pertama adalah berkaitan dengan gaya redam yang dihasilkan. Nilai koefisien redaman berdasarkan hasil simulasi adalah sebesar 2.940 Ns/m. Sedangkan pada kendaraan *pickup* sendiri memiliki koefisien gaya redam pada range 2.800 Ns/m hingga 4.000 Ns/m. Dengan meningkatkan nilai koefisien gaya redam menjadi lebih besar, gaya redam yang dihasilkan akan lebih tinggi, sehingga kemampuan meredam getaran dari BSRSA akan meningkat dan akan mengurangi getaran pada body kendaraan. Cara untuk meningkatkan koefisien redaman ini adalah dengan meningkatkan nilai rasio s*pur gear* BSRSA. Kedua adalah berkaitan dengan sistem peredam getaran yang digunakan. Karakteristik dari BSRSA sendiri merupakan gabungan antara redaman mekanik dan elektrik. Kedua jenis redaman ini memiliki karakteristik yang berbeda bila dibandingkan dengan konvensional *shock absorber*. Pada BSRSA, terdapat 3 komponen gaya redam yaitu inersia, *friction*, dan elektrik. Sedangkan pada konvensional *shock absorber*, komponen gaya redam hanya dipengaruhi akibat *viscous damping*. Karakter dari fluida yang mampu meredam getaran menjadi panas masih jauh lebih baik dibandingkan dengan kombinasi 3 gaya redam pada BSRSA.

4.4.6 Pengujian dengan Berkendara Normal

Jalan yang digunakan pada pengujian ini adalah sepanjang jalan memasuki kampus ITS dari Bundaran ITS menuju Departemen Teknik Mesin dengan jarak 1,6 km. Pengujian tipe ini adalah dengan berkendara normal dengan range kecepatan memasuki kawasan ITS, yaitu 0 km/jam hingga maksimal 30 km/jam. Kecepatan ini menyesuaikan kondisi jalan yang dilalui dan kondisi lalu lintas pada saat pengujian. Terdapat beberapa tipe jalan yaitu jalan paving rata, jalan paving tidak rata (bergelombang), polisi tidur dengan beberapa ketinggian dan tingkat kecuraman yang berbeda, dan jalan berlubang dengan ukuran lubang berbeda. Secara umum pengujian ini benar-benar merepresentasikan kondisi jalan

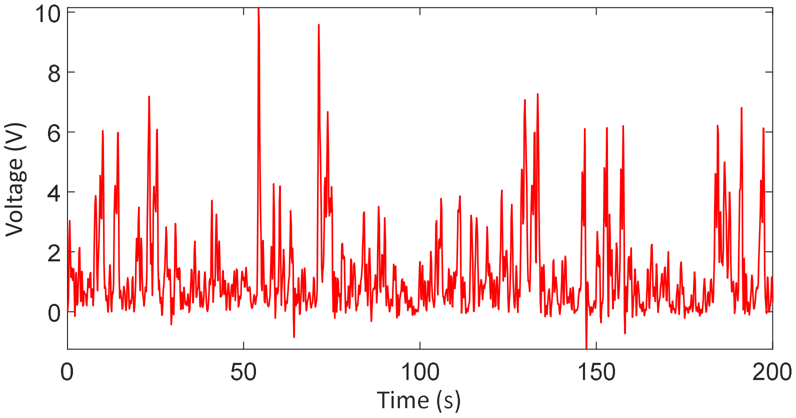
sebenarnya. Untuk masing-masing data yang disajikan adalah pada rentang waktu 200 detik.



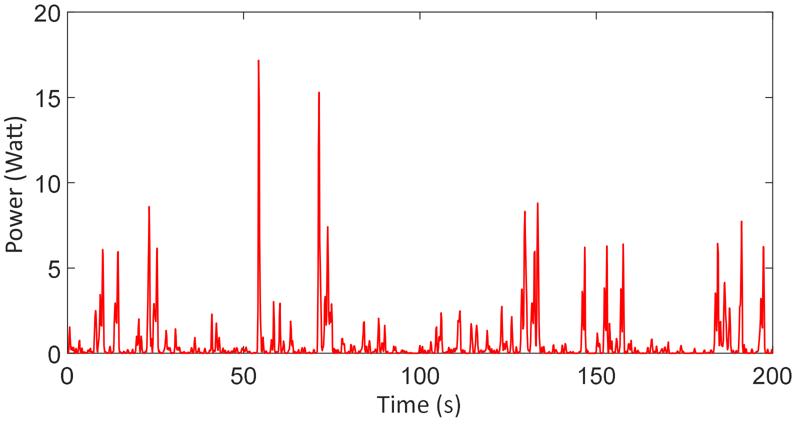
Gambar 4.71 (a) Voltase dan (b) Daya Bangkitan yang Dihasilkan dengan Berkendara Normal Percobaan Pertama

Gambar 4.71 menunjukkan nilai daya dan voltase yang dihasilkan dengan berkendara normal pada percobaan pertama. Terlihat bahwa daya bangkitan yang dihasilkan sangat bervariasi. Pada daya bangkitan yang cukup tinggi terjadi pada saat melewati polisi tidur atau saat melewati jalan berlubang. Sedangkan pada saat melewati jalan tidak rata, tetap dapat menghasilkan energi listrik namun dengan nilai yang lebih kecil bila dibandingkan dengan polisi tidur. Tampak terlihat jelas bahwa amplitudo jalan sangat berpengaruh dengan besaran daya bangkitan yang dihasilkan. Voltase bangkitan yang dihasilkan maksimal adalah sebesar 11 Volt dengan RMS sebesar 1,8 Volt. Sedangkan daya bangkitan yang dihasilkan maksimal sebesar 17 Watt dengan RMS sebesar 1,63 Watt. Karena jalan yang

dilewati seluruhnya merupakan jalan paving, maka energi listrik dapat hampir terus menerus dihasilkan meskipun tergantung besaran amplitudo jalan yang dilalui.



(a)



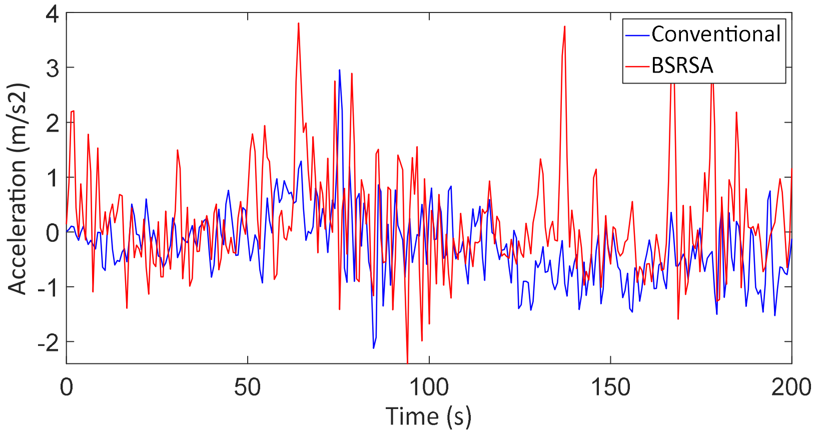
(b)

Gambar 4.72 (a) Voltase dan (b) Daya Bangkitan yang Dihasilkan dengan Berkendara Normal Percobaan Kedua

Gambar 4.72 menunjukkan nilai voltase dan daya bangkitan yang dihasilkan dengan berkendara normal pada percobaan kedua. Pada percobaan kedua ini merupakan arah sebaliknya. Secara umum daya bangkitan yang dihasilkan relatif tidak berbeda jauh dengan percobaan pertama. Terdapat nilai daya bangkitan yang sangat tinggi saat melewati polisi tidur dan jalan berlubang. Voltase bangkitan yang dihasilkan maksimal adalah sebesar 10 Volt dengan RMS sebesar 1,95 Volt. Sedangkan daya bangkitan yang dihasilkan maksimal sebesar 14 Watt dengan RMS sebesar 1,61 Watt.

Gambar 4.73 menunjukkan perbandingan respon percepatan BSRSA dengan konvensional *shock absorber* dengan berkendara normal. Terlihat bahwa

nilai percepatan pada RSA masih lebih tinggi bila dibandingkan dengan konvensional shock absorber. RMS percepatan RSA adalah sebesar 0,78 m/s^2, sedangkan RMS percepatan konvensional *shock absorber* adalah sebesar 1,15 m/s^2. Nilai ini lebih besar hampir 2 kali lipat. Karena jalan yang dilewati paling dominan adalah jalan paving, maka besaran respon percepatannya sama dengan profil jalan paving. Rekapitulasi energi bangkitan dan respon percepatan dengan berkendara normal ditunjukkan pada Tabel 4.18.



Gambar 4.73 Perbandingan Konvensional *Shock Absorber* dengan BSRSA dengan Berkendara Normal

Tabel 4.18 Voltase-Daya dan RMS Percepatan dengan Berkendara Normal

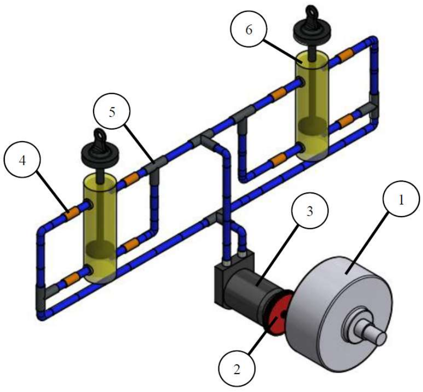
Pengambilan Data	Voltase dan Daya		RMS Percepatan	
	RMS Voltage (Volt)	RMS Power (Watt)	Konvensional *shock absorber* (m/s^2)	BSRSA (m/s^2)
1	1,8	1,63	0,78	1,15
2	1,95	1,61		

4.4.7 Perbandingan dengan Hidrolik RSA

Untuk mengetahui apakah energi bangkitan yang dihasilkan lebih baik dbandingkan mekanisme yang lain, dilakukan perbandingan hasil pengujian. Energi bangkitan yang dihasilkan BSRSA pada pengujian kendaraan *pickup* akan dibandingkan hasilnya dengan mekanisme RSA Hidrolik yang pernah dibuat oleh Departemen Teknik Mesin ITS. RSA Hidrolik dipilih sebagai pembanding karena variasi desain dari RSA Hidrolik cukup banyak dan pada RSA ini sama-sama diuji langsung di kendaraan *pickup*.

4.4.7.1 Perbandingan dengan RSA Hidrolik 2 Input 1 Output

Perbandingan pertama adalah dengan RSA Hidrolik dengan 2 input dan 1 output. Mekanisme RSA ini didesain oleh Satria di tahun 2016. Prinsip kerja dari RSA hidrolik ini adalah dengan menggunakan dua buah *shock absorber* yang dimodifikasi, kemudian aliran dari fluida digabung menjadi satu untuk selanjutnya digunakan untuk memutar motor hidrolik dan generator. Mekanisme ini diuji di kendaraan pickup Granmax, sama dengan tipe kendaraan yang penulis gunakan. Satu hal yang menjadi kelebihan pada RSA ini adalah generator yang digunakan. Generator yang digunakan merupakan generator asli yang memang didesain sebagai generator. Hal ini berbeda dengan BSRSA, dimana generator yang digunakan sebenarnya merupakan motor yang dialihfungsikan sebagai generator. Namun dimensi dari generator pada RSA Hidrolik ini berukuran sangat besar, sehingga sangat tidak mungkin diaplikasikan pada BSRSA. Gambar isometrik mekanisme RSA Hidrolik ini ditunjukkan pada Gambar 4.74.



1. Generator
2. Gear
3. Motor Hidrolik
4. Check Valve
5. Tee Junction
6. Hidrolik *absorber*

Gambar 4.74 Mekanisme RSA Hidrolik 2 Input 1 Output (Satria, 2016)

RSA Hidrolik ini diuji di kendaraan *pickup* dengan 2 variasi tipe jalan dan 1 variasi kecepatan uji. Tipe jalan pertama adalah jalan paving dengan kecepatan 30 km/jam. Tipe jalan kedua adalah polisi tidur dengan ketinggian 4 cm dengan kecepatan 10 km/jam. Sebagai pembanding, ketinggian polisi tidur pada pengujian BSRSA adalah 10 cm. Data perbandingan energi bangkitan pada BSRSA dan RSA Hidrolik 2 input 1 output ada pada Tabel 4.19. Data yang diambil pada penelitian Satria ini adalah energi bangkitan yang telah diberikan beban elektrik berupa pengecasan aki. Satria sendiri membuat 2 tipe data, yaitu ketika diberi beban elektrik dan ketika tidak diberi beban elektrik. Karena pada BSRSA menggunakan

beban elektrik berupa resistor 6 ohm, maka penulis mengambil data milik Satria yang menggunakan beban elektrik sebagai pembanding.

Pada jalan paving dengan kecepatan 30 km/jam, voltase bangkitan maksimal yang dihasilkan BSRSA lebih tinggi hingga hampir 2 kali lipat bila dibandingkan dengan RSA Hidrolik ini. RMS daya yang dihasilkan juga jauh lebih besar BSRSA, yaitu 2,11 Watt berbanding dengan 0,06 Watt. Sedangkan pada polisi tidur, besaran nilai voltase bangkitan pada kecepatan 10 km/jam tidak berbeda jauh, yaitu 5,9 Volt dan 5 Volt. Namun apabila melihat pada RMS Voltase yang dihasilkan, BSRSA lebih besar dibnding RSA Hidrolik. RMS daya bangkitan yang dihasilkan jauh lebih besar pada BSRSA dibandingkan RSA Hidrolik.

Tabel 4.19 Perbandingan BSRSA dengan RSA Hidrolik 2 Input 1 Output

Jenis RSA	Voltase Maksimal (Volt)	RMS Voltase (Volt)	Daya maksimal (Watt)	RMS Daya (Watt)
Jalan Paving (Kecepatan 30 km/jam)				
BSRSA	9,1	2,27	13,8	2,11
RSA Hidrolik 2 Input	5	1,77	-	0,06
Polisi Tidur (Kecepatan 10 km/jam)				
BSRSA	5,9	2,3	5,8	1,1
RSA Hidrolik 2 Input	5	1,77	-	0,15

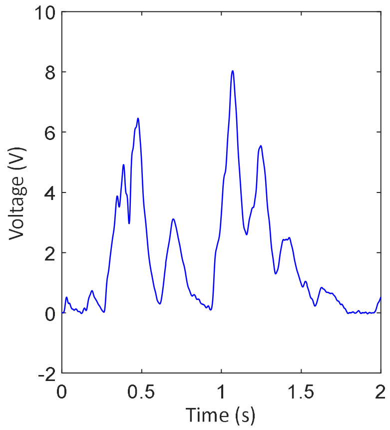
Besarnya perbedaan ini kemungkinan besar diakibatkan adanya kebocoran pada sistem hidrolik. Seperti diungkapkan oleh Satria bahwa terdapat kebocoran pada *seal* sambungan hidrolik, sehingga mengakibatkan udara masuk dan menurunkan kinerja motor hidrolik. Akibatnya motor hidrolik tidak maksimal dalam memutar generator, sehingga energi bangkitan yang dihasilkan cukup rendah. Selain terkait dengan kebocoran, pada RSA hidrolik terdapat banyak komponen penunjang seperti *orifice*, sambungan *tube*, *fitting, check valve*, motor hidrolik, *gear,* dan generator. Masing-masing komponen penunjang memiliki losses masing-masing, sehingga secara keseluruhan losses yang dihasilkan sangat banyak. Sedangkan pada BSRSA, potensi losses yang ada adalah akibat gesekan pada komponen mekanis (*ball screw*, *bearing*, dan *gear*) dan komponen elektrik

(generator). Sehingga losses yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan dengan RSA Hidrolik tipe ini.

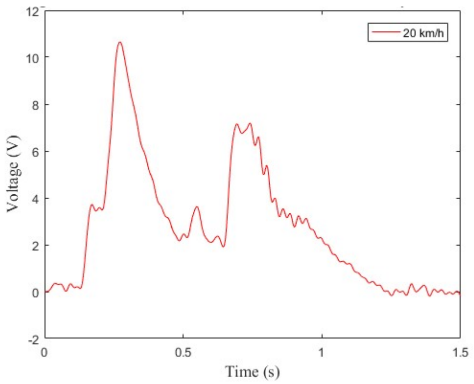
4.4.7.2 Perbandingan dengan RSA Hidrolik 2 Generator Terpasang Seri

Perbandingan selanjutnya adalah RSA Hidrolik dengan variasi desain 2 generator yang terpasang seri. Desain RSA ini dibuat oleh Yandaka tahun 2018. Gambar mekanisme dari RSA Hidrolik tipe ini ditunjukkan pada Gambar 2.5. Sedangkan gambar fisik RSA ini telah dibandingkan sebelumnya dengan BSRSA, dan ada pada Gambar 4.28 (a). Terdapat 2 generator yang terpasang secara seri dan masing-masing akan menghasilkan listrik. Tipe generator yang digunakan adalah generator hidrolis namun tidak disebutkan maksimal energi bangkitan yang dapat dihasilkan. Pada RSA hidrolik generator terpasang seri ini, diuji pada kendaraan pickup Suzuku Carry. Tipe kendaraannya berbeda dengan BSRSA. Pengujian dilakukan dengan melewati polisi tidur dengan variasi kecepatan 10 km/jam, 15 km/jam, dan 20 km/jam. Tipe jalan dan kecepatan yang digunakan sama dengan BSRSA.

Perbandingan energi bangkitan pada kecepatan 20 km/jam ditunjukkan pada Gambar 4.75. Sedangkan perbandingan nilai energi bangkitan ada pada Tabel 4.20. Pola voltase bangkitan yang dihasilkan sama. Secara keseluruhan, nilai voltase bangkitan yang dihasilkan RSA Hidrolik lebih besar dibandingkan BSRSA. Hal ini terjadi karena pada pengujian RSA Hidrolik tidak menggunakan beban elektrik. Karena tidak terdapat beban elektrik, maka penulis tidak menuliskan besaran daya yang dihasilkan sebagai pembanding.



(a)



(b)

Gambar 4.75 Voltase Bangkitan (a) BSRSA dan (b) RSA Hidrolik Generator Seri Melewati Polisi Tidur pada Kecepatan 20 km/jam

Tabel 4.20 Perbandingan BSRSA dengan RSA Hidrolik 2 Generator Seri

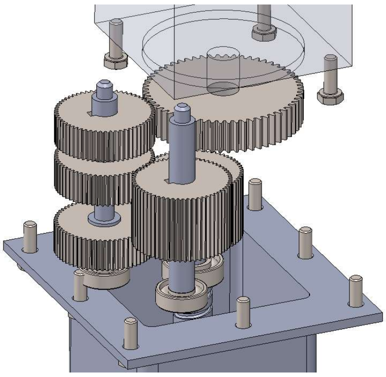
Jenis RSA	Voltase Maksimal (Volt)	RMS Voltase (Volt)
10 km/jam		
BSRSA	4,2	2,1
RSA Hidrolik 2 Generator	5,31	3,42
15 km/jam		
BSRSA	8,2	2,5
RSA Hidrolik 2 Generator	7,09	4,25
20 km/jam		
BSRSA	8,4	5,31
RSA Hidrolik 2 Generator	10,65	2,6

Selain voltase bangkitan yang dihasilkan, pada penelitiannya Yandaka juga membandingkan repon percepatan antara RSA Hidrolik dengan konventional *shock absorber*. Hasilnya adalah nilai repon percepatan tidak berbeda jauh dan cenderung sama. Hal ini tentu jauh berbeda dengan BSRSA. Pada BSRSA, nilai respon percepatan kendaraan lebih tinggi dibandingkan konventional *shock absorber.* Perbedaan ini terjadi karena karakter dari sistem peredam getaran yang digunakan. Pada RSA Hidrolik menggunakan fluida sebagai media peredam getaran, sama seperti konventional *shock absorber*. Apabila pada konventional *shock absorber* fluida berubah menjadi panas, pada RSA Hidrolik, fluida ini digunakan sebagai

media perantara dalam menghasilkan energi listrik. Sehingga secara karakteristik akan mendekati konventional *shock absorber*.

4.4.8 Perbandingan dengan BSRSA-*Spur Gear*

Pada penelitian ini, dibuat desain lain mengenai BSRSA dengan menggunakan *spur gear*. Perbedaan utama dari mekanisme BSRSA-*Bevel Gear* adalah ada pada mekanisme pengubah dua arah rotasi menjadi satu arah rotasi (MMR). Pada BSRSA-*Spur Gear* menggunakan susunan *spur gear* sebagai mekanisme MMR. Rasio *gear* yang digunakan sama dengan BSRSA-*Bevel Gear*. Gambar 4.76 menunjukkan mekanisme MMR BSRSA-*Spur Gear.* Jumlah susunan *spur gear* yang digunakan lebih banyak, yaitu 4 pasang. Dengan menggunakan *spur gear*, lebar dari BSRSA-*Spur Gear* sedikit lebih lebar bila dibandingkan dengan BSRSA-*Bevel Gear*. Karena generator yang dipasang posisinya berdiri, maka panjang keseluruhan dari BSRSA-*Spur Gear* juga lebih panjang. Perbandingan dimensi ada pada Tabel 4.21.

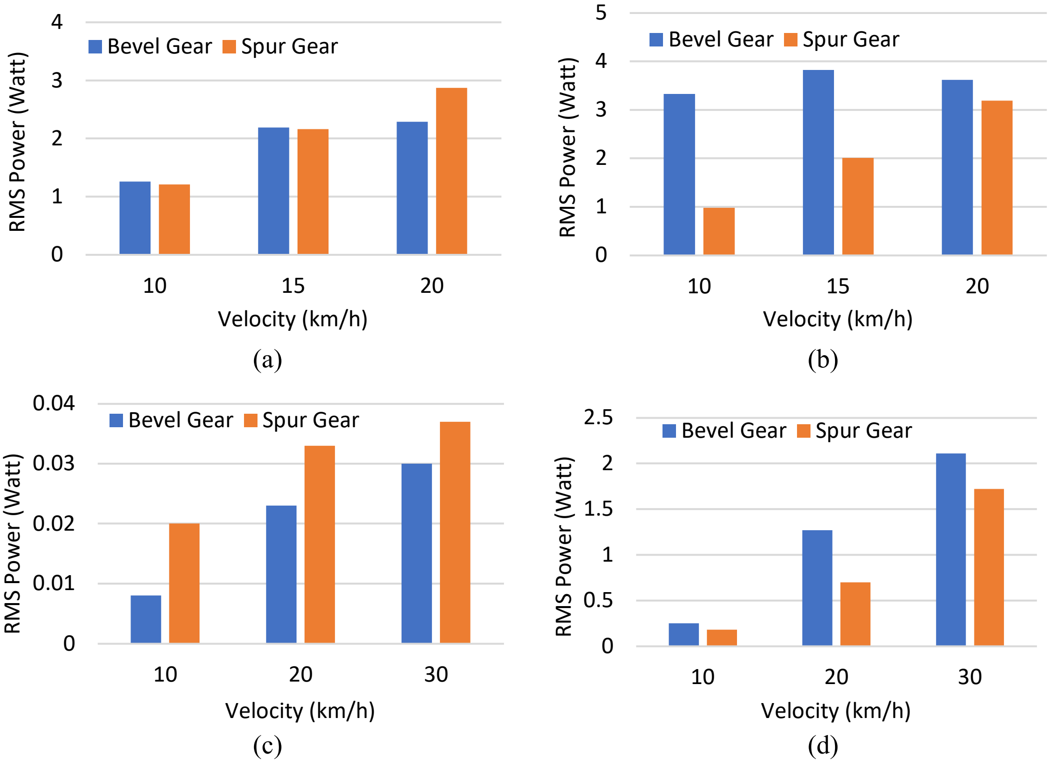


Gambar 4.76 Susunan Roda Gigi untuk Mekanisme BSRSA-*Spur Gear*

Tabel 4.21 Perbandingan Dimensi BSRSA-*Bevel Gear* dengan BSRSA-*Spur Gear*

Parameter	BSRSA-*Bevel Gear*	BSRSA-*Spur Gear*
Panjang Maksimal	442 mm	448 mm
Panjang Minimal	362 mm	368 mm
Lebar Total	92 mm	102 mm
Stroke	80 mm	80 mm
Massa	5,1 kg	6,1 kg
Jumlah Total *Gear*	3 *Bevel Gear* 2 *Spur Gear*	8 *Spur Gear*

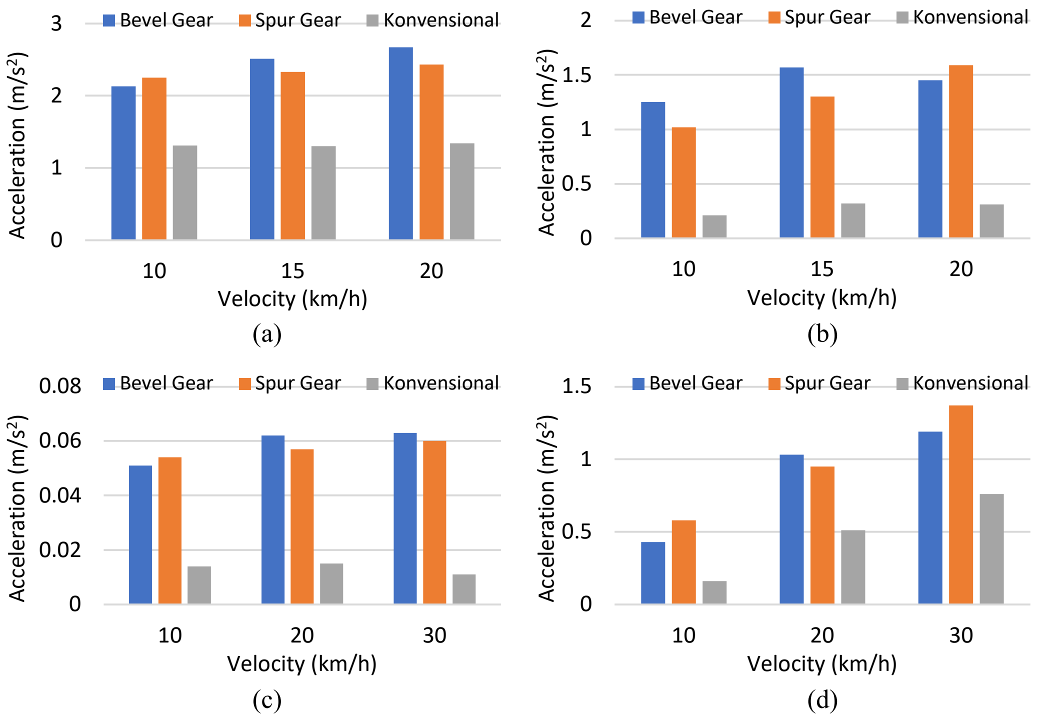
Pengujian pada kendaraan *pickup* pada BSRSA-*Spur Gear* dilakukan pada waktu, kendaraan, dan tipe jalan yang sama. Sehingga hasil voltase dan daya bangkitan maupun respon percepatan yang dihasilkan dapat dibandingkan secara langsung. Gambar 4.77 menunjukkan rekapitulasi voltase dan daya bangkitan dari BSRSA-*Bevel Gear* dengan BSRSA-*Spur Gear*. Pada jalan polisi tidur, tren daya bangkitan yang dihasilkan akan meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan. Hal ini terjadi pada kedua tipe BSRSA. Nilai daya bangkitan yang dihasilkan relatif sama dan tidak berbeda jauh. Pada jalan *speed trap*, nilai daya bangkitan yang dihasilkan pada BSRSA-*Bevel Gear* mencapai nilai maksimal pada kecepatan 15 km/jam. Sedangkan pada BSRSA-*Spur Gear* dengan meningkatnya kecepatan, maka daya bangkitan yang dihasilkan juga akan semakin besar. Sedangkan besaran nilai daya bangkitan melewati *speed trap*, pada BSRSA-*Bevel Gear* sedikit lebih besar dibandingkan dengan BSRSA-*Spur Gear*.



Gambar 4.77 Rekapitulasi Daya Bangkitan BSRSA *Bevel Gear* dengan *Spur Gear* (a) Polisi Tidur, (b) Speed Trap, (c) Jalan Aspal, (d) Jalan Paving

Pada tipe jalan selanjutnya yaitu jalan aspal, daya bangkitan yang dihasilkan relatif sama-sama bernilai sangat kecil. Pengaruh tipe jalan yang relatif sangat rata

menyebabkan daya bangkitan yang dihasilkan sangat kecil untuk kedua tipe BSRSA. Pada tipe jalan aspal, untuk semua variasi kecepatan BSRSA-*Spur Gear* memiliki daya bangkitan yang lebih besar. Sedangkan pada tipe jalan paving, nilai daya bangkitan yang dihasilkan pada BSRSA-*Bevel Gear* sedikit lebih besar dibandingkan BSRSA-*Spur Gear*. Secara keseluruhan, nilai daya yang dihasilkan pada BSRSA-*Bevel Gear* lebih besar dibandingkan BSRSA-*Spur Gear*, untuk semua tipe jalan, kecuali tipe jalan aspal. Rata-rata daya bangkitan yang dihasilkan lebih besar sekitar 22%. Perbedaan besaran nilai daya ini terjadi karena pada mekanisme *spur gear*, jumlah gear yang digunakan lebih banyak bila dibandingkan dengan *bevel gear*. Pada *spur gear* terdapat 4 pasang sedangkan pada *bevel gear* hanya 2 pasang. Dengan banyaknya jumlah gear, maka akan semakin banyak *losses* yang terjadi dan hal ini berpengaruh terhadap besaran daya yang dihasilkan.



Gambar 4.78 Rekapitulasi Respon Percepatan BSRSA *Bevel Gear* dengan *Spur Gear* (a) Polisi Tidur, (b) Speed Trap, (c) Jalan Aspal, (d) Jalan Paving

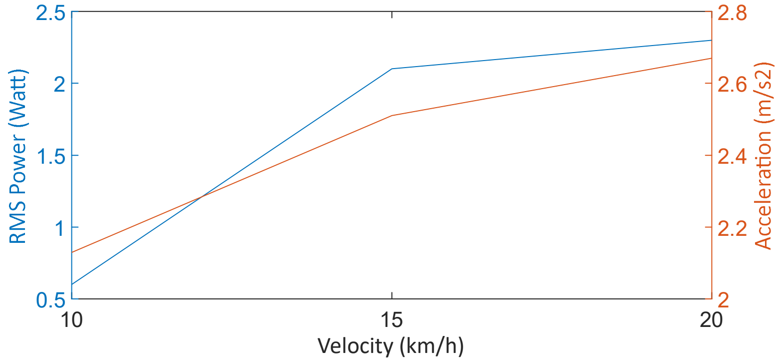
Gambar 4.78 menunjukkan rekapitulasi respon percepatan antara BSRSA-*Bevel Gear*, BSRSA-*Spur Gear*, dan konvensional *shock absorber*. Nilai respon percepatan konvensional *shock absorber* lebih rendah dibandingkan pada kedua tipe BSRSA. Ini terjadi pada semua tipe jalan dan masing-masing variasi kecepatan.

Hal ini menunjukkan bahwa baik pada BSRSA-*Bevel Gear* maupun BSRSA-*Spur Gear* masih belum maksimal dalam meredam getaran. Karakteristik dari sistem peredam getaran yang berbeda yang menyebabkan perbadaan nilai respon percepatan ini. Sedangkan apabila membandingkan antara BSRSA-*Bevel Gear* dengan BSRSA-*Spur Gear*, nilai respon percepatan yang dihasilkan relatif sama dan tidak terdapat perbedaan. Sehingga berdasarkan data hasil pengujian, dapat dikatakan bahwa banyaknya pasangan *spur gear* pada BSRSA-*Spur Gear* tidak berpengaruh terhadap respon percepatan kendaraan.

Kelebihan dari susunan *bevel gear* adalah desain yang lebih simpel dalam mengubah dua arah rotasi menjadi satu arah rotasi. Hanya dibutuhkan 3 buah *bevel gear* dengan susunan seperti pada Gambar 3.5, maka gerak dua arah rotasi menjadi satu arah rotasi sudah didapatkan. Sedangkan apabila menggunakan *spur gear*, dibutuhkan 6 buah *spur gear* untuk mengubah dua arah rotasi menjadi satu arah rotasi. Tentu jumlah ini cukup banyak dibandingkan dengan *bevel gear*. Dengan demikian pada saat pemasangan, ruang yang dibutuhkan akan lebih banyak dan mengakibatkan lebar secara keseluruhan akan lebih besar. Namun apabila membandingkan dari segi biaya, harga dari *bevel gear* lebih tinggi hingga 3 kali lipat dibandingkan *spur gear*. Pada *bevel gear* juga dibutuhkan *thrust bearing* yang diakibatkan adanya *thrust force bevel gear* akibat perubahan arah sumbu sebesar 90^o. Harga dari *thrust bearing* ini lebih tinggi hingga 5 kali lipat dibandingkan dengan *ball bearing* yang digunakan pada *spur gear*. Sehingga apabila dijumlah secara keseluruhan, biaya memproduksi BSRSA-*Bevel Gear* lebih tinggi dibandingkan dengan BSRSA-*Spur Gear*.

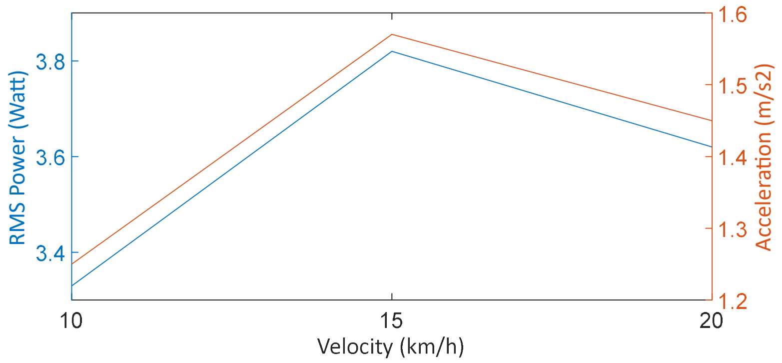
4.4.9 Hubungan Antara Respon Percepatan dengan Daya Bangkitan

Gambar 4.79 menunjukkan plot RMS daya bangkitan dan respon percepatan untuk masing-masing variasi kecepatan uji pada saat melewati polisi tidur. Baik RMS daya bangkitan maupun respon percepatan akan meningkat seiring dengan meningkanya kecepatan. Dapat dikatakan bahwa reason percepatan proporsional terhadap RMS daya bangkitan yang dihasilkan. Nilai peningkatan daya bangkitan yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan respon percepatan. Hal ini dapat dilihat dari gradien garis yang dihasilkan.



Gambar 4.79 Hubungan Antara RMS Daya dan Respon Percepatan untuk Jalan Polisi Tidur

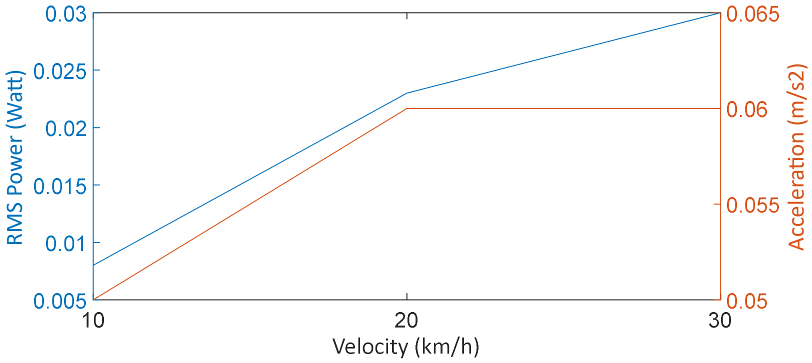
Gambar 4.80 menunjukkan plot RMS daya bangkitan dan respon percepatan untuk masing-masing variasi kecepatan uji pada saat melewati *speed trap*. Terlihat bahwa tren grafik antara daya bangkitan yang dihasilkan dengan respon percepatan sama, terlihat dari gradien garis yang dihasilkan. Nilai tertinggi terjadi pada kecepatan 15 km/jam. Hal ini sedikit berbeda bila dibandingkan dengan polisi tidur, dimana daya bangkitan dan respon percepatan akan meningkat seiring meningkatnya kecepatan. Apabila dibandingkan dengan polisi tidur, nilai daya bangkitan dan respon percepatan benar-benar memiliki tren yang sama dan berhimpit.



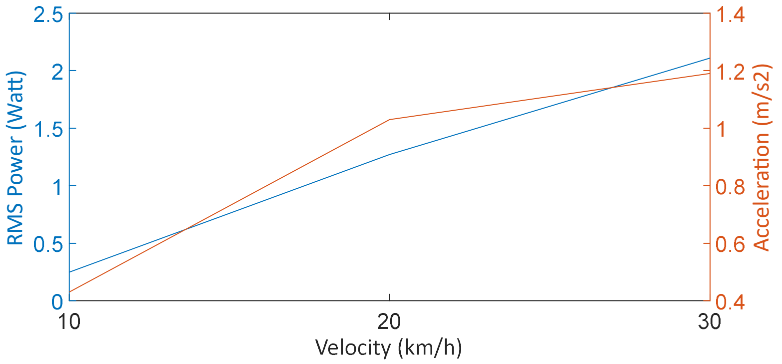
Gambar 4.80 Hubungan Antara RMS Daya dan Respon Percepatan untuk Jalan Speed Trap

Gambar 4.81 menunjukkan respon percepatan dan daya bangkitan untuk jalan aspal. Daya bangkitan yang dihasilkan akan meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan. Hal yang berbeda terjadi pada respon percepatan. Nilai respon percepatan cenderung konstan pada kecepatan 20 km/jam dan 30 km/jam.

Namun nilai dari respon percepatan dan daya bangkitan sangat kecil, karena kontur jalan yang dilewati relatif rata.



Gambar 4.81 Hubungan Antara RMS Daya dan Respon Percepatan untuk Jalan Aspal



Gambar 4.82 Hubungan Antara RMS Daya dan Respon Percepatan untuk Jalan Paving

Gambar 4.82 merupakan hubungan RMS daya dan respon percepatan untuk jalan paving. Sama seperti pada polisi tidur, nilai daya bangkitan dan respon percepatan akan meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan. Secara keseluruhan untuk polisi tidur, *speed trap*, jalan aspal, dan jalan paving, nilai daya bangkitan proporsional terhadap nilai respon percepatan. Semakin tinggi nilai respon percepatannya maka nilai daya bangkitan yang dihasilkan juga akan semakin besar. Respon percepatan merepresentasikan getaran yang dihasilkan dari body kendaraan. Semakin besar eksitasi getarannya, maka akan semakin besar input osilasi pada BSRSA, sehingga daya bangkitan yang dihasilkan akan semakin besar.

BAB 5
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Telah didesain BSRSA-*Bevel Gear* sebagai mekanisme pemanen energi pada sistem suspensi kendaraan *pickup*. Mekanisme berjalan dengan baik dan dapat menghasilkan energi listrik.
2. Dari hasil simulasi karakteristik BSRSA, nilai rasio *spur gear* yang digunakan untuk kendaraan pickup adalah sebesar 0,6. Potensi RMS daya bangkitan yang dihasilkan maksimal pada frekuensi 3 Hz adalah sebesar 40 Watt.
3. Pada pengujian melewati polisi tidur, nilai RMS daya bangkitan maksimal terjadi pada kecepatan 20 km/jam yaitu sebesar 2,29 Watt. Dengan meningkatnya kecepatan, maka energi bangkitan yang dihasilkan akan semakin besar. Daya bangkitan yang dihasilkan melewati polisi tidur hanya sebesar 25% dari keseluruhan potensi daya bangkitan yang mampu dihasilkan.
4. Pada pengujian melewati *speed trap*, nilai RMS daya bangkitan maksimal terjadi pada kecepatan 15 km/jam yaitu sebesar 3,82 Watt. Daya bangkitan yang dihasilkan melewati *speed trap* hanya sebesar 20% dari keseluruhan potensi daya bangkitan yang mampu dihasilkan.
5. Pada pengujian melewati jalan aspal, daya bangkitan yang dihasilkan sangat kecil karena kontur jalanan yang relatif rata. Daya bangkitan yang dihasilkan adalah sebesar 0,03 Watt pada kecepatan 30 km/jam.
6. Pada pengujian melewati jalan paving, daya bangkitan yang dihasilkan lebih besar dibandingkan jalan aspal. Daya bangkitan yang dihasilkan adalah sebesar 2,11 Watt pada kecepatan 30 km/jam. Dengan meningkatnya kecepatan, maka energi bangkitan yang dihasilkan akan semakin besar.
7. Pada pengujian dengan berkendara normal dengan kecepatan bervariasi sesuai dengan kondisi lalu lintas jalan, RMS daya bangkitan yang dihasilkan sebesar 1,63 Watt.

8. Besaran energi bangkitan yang dihasilkan sangat dipengaruhi kontur jalanan yang dilewati. Semakin kasar dan bervariasi amplitudo jalan yang dilewati, maka semakin besar energi bangkitan yang dihasilkan.
9. Respon percepatan yang dihasilkan BSRSA-*Bevel Gear* masih lebih tinggi dibandingkan dengan konvensional *shock absorber*. Ini terjadi pada semua tipe jalan dan variasi kecepatan. Hal ini menunjukkan bahwa kemampuan meredam getaran dari BSRSA masih belum maksimal.

5.2 Saran

Saran dari kelanjutan penelitian ini adalah:

1. Fabrikasi dari RSA menggunakan CNC agar dimensi yang diharapkan lebih presisi.
2. Perlu diperhatikan dalam pemasangan dan instalasi *ball screw* agar mekanisme ini berjalan dengan baik.
3. Perlu dilakukan verifikasi rumus pengolahan data *accelerometer* untuk mendapatkan data percepatan agar didapatkan hasil yang lebih baik.
4. Penggunaan generator yang lebih baik, dalam artian menggunakan generator yang memang didesain untuk generator, bukan motor yang dialihfungsikan menjadi generator. Hal ini penting dilakukan agar energi bangkitan yang dihasilkan lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

Abdelkareem, M., Xu, L., Ali, M., Elagouz, A., Mi, J., Guo, S., . . . Zuo, L. (2018b). Vibration Energy Harvesting in Automotive Suspension System: A Detailed Review. *Applied Energy*, Vol.229, Hal.672-699.

Abdelkareem, M., Xu, L., Guo, X., Ali, M., Elagouz, A., Hassan, M., . . . Zou, J. (2018a). Energy Harvesting Sensitivity Analysis and Assessment of the Potential Power and Full Car Dynamics for Different Road Modes. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.110, Hal.307-332.

Bao, W. (2015). Main Parameters Analysis of Ball Screw Shock Absorber on Suspension System Performance. *SAE Technical Paper*, Hal.1504-1512.

Bowen, L., Vinolas, J., & Olazagoitia, J. (2017). Methodology for Comparing the Functional Performance of Energy Harvesting Shock Absorbers. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*.

Bowen, L., Vinolas, J., & Olazagoitia, J. (2019). The Influence of Friction Parameters in a Ball-Screw Energy-Harvesting Shock Absorber. *Nonlinear Dynamic*, Vol.96, Hal.2241-2256.

Bowen, L., Vinolas, J., Olazagoitia, J., & Otero, J. (2019). An Innovative Energy Harvesting Shock Absorber System Using Cable Transmission. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* , Vol.24, No.2, Hal.689-699.

Budiarto, T. (2012). Pemodelan dan Analisa Regenerative Shock Absorber (RSA) pada Sistem Suspensi Kendaraan Militer Roda Ban . Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Close, C., Frederick, D., & Newell, J. (2002). *Modelling and Analysis of Dynamic Systems.* New York: John Willey & Sons.

Duong, M.-T., Chun, Y.-D., & Hong, D.-K. (2018). Design of a High-Performance 16-Slot 8-Pole Electromagnetic Shock Absorber Using a Novel Permanent Magnet Structure. *Energies*, Vol.11, Hal.3352.

EPA. (2014). *Office of Energy Efficiency and Renewable Energy*. Retrieved from US Department of Energy: https://www.fueleconomy.gov/FEG/atv.shtml

Guntur, H., Hendrowati, W., & Lubis, R. (2013). Development and Analysis of a Regenerative Shock Absorber for Vehicle Suspension. *Journal of System*

Design and Dynamics, Vol.7, No.3, Hal.304-315.

Huang, B., Hsieh, C., Golnaraghi, F., & Moallem, M. (2015). Development and Optimizationof an Energy-Regenerative Suspension System Under Stochastic Road Excitation. *Journal of Sound and Vibration*, Vol.357, Hal.16-34.

Iqbal, M., Wu, Z., Xu, G., & Bukhari, S. (2019). Study of External Characteristics of Hydraulic Electromagnetic Regenerative Shock Absorber. *World Journal of Engineering and Technology*, Vol.7, Hal.520-535.

Li, Z., Zuo, L., Luhrs, G., Lin, L., & Qin, Y.-x. (2013). Electromagnetic Energy-Harvesting Shock Absorbers: Design, Modeling, and Road Tests. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.62, No.3, Hal.1065-1074.

Maravandi, A., & Moallem, M. (2015). Regenerative Shock Absorber Using a Two-Leg Motion Conversion Mechanism. *IEEE/ASME Transactions on Mechantronics*, Vol.20, No.6, Hal.2853-2861.

Moore, G. (2016). Mechanical Motion Rectifier : Investigating the Potential of a Mechanical Device for Transforming Bi-Directional Rotational Motion Into Uni-Directional Rotational Motion. Master Tesis, Mechanical Engineering, Univeristy of Southampton.

Nise, N. (2015). *Control Systems Engineering 7th Edition.* Pomona: John Wiley & Sons.

Nugraha, D. (2012). Studi Eksperimental Karakteristik Model Regenerative Shock Absorber (RSA) pada Kendaraan Roda Empat. Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Pan, Y., Lin, T., Qian, F., Liu, C., Yu, J., Zuo, J., & Zuo, L. (2019). Modeling and Field-Test of a Compact Electromagnetic Energy Harvester for Railroad Transportation. *Applied Energy*, Vol.247, Hal.309-321.

Salman, W., Qi, L., Zhu, X., Pan, H., Zhang, X., Bano, S., . . . Yuan, Y. (2018). A High-Efficiency Energy Regenerative Shock Absorber Using Helical Gears for Powering Low-Wattage Electrical Device of Electric Vehicles. *Energy*, Vol.159, Hal.361-372.

Satria, N. (2016). Pengembangan dan Analisa Hydro-Magneto-Electric Regenerative Shock Absorber (HMERSA) dengan Dua Input Satu Output .

Master Tesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

SIngh, S., & Satpute, N. (2015). Design and Analysis of Energy-Harvesting Shock Absorber with Electromagnetic and Fluid damping. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.29 (4), Hal.1591-1605.

Syuhri, A., Hadi, W., & Syuhri, S. (2017). Damping Properties and Energy Evaluation of a Regenerative Shock Absorber. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*.

Syuhri, S. (2015). Studi Pengaruh Perubahan Redaman Mekanik dan Redaman Elektrik Terhadap Redaman Total dan Daya Listrik Bangkitan pada Hydraulic Regenerative Suspension. Master Tesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Tang, X., Lin, T., & Zuo, L. (2014). Design and Optimization of a Tubular Linear Electromagnetic Vibration Energy Harvester. *IEEE/ASME Transaction of Mechatronics*, Vol 19, No.2, Hal.615-622.

Xie, L., Li, J., Cai, S., & Li, X. (2017). Electromagnetic Energy-Harvesting Damper With Multiple Independently Controlled Transducers: On-Demand Damping and Optimal Energy Regeneration. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol.22, No.6, Hal.2705-2713.

Xie, L., Li, J., Li, X., Huang, L., & Cai, S. (2018). Damping-Tunable Energy-Harvesting Vehicle Damper with Multiple Controlled Generators: Design, Modeling and Experiments. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.99, Hal.859-872.

Yandaka, R. (2018). Pengembangan dan Analisis Karakteristik Hydro-Magneto-Electric Regenerative Shock Absorber (HMERSA) dengan Dua Generator Hidraulis Terpasang Seri. Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Yang, Y., Pian, Y., & Liu, Q. (2019). Design of Energy Harvester Using Rotating Motion Rectifier and Its Application on Bicycle. *Energy*, Vol.179, Hal.222-231.

Zessar, F. (2014). Desain dan Analisa Sistem Suspensi Kendaraan Multiguna Pedesaan. Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Zhang, Y., Konghui, G., Wang, D., Chen, C., & Li, X. (2016). Energy Conversion

Mechanism and Regenerative Potential of Vehicle Suspensions. *Energy*, 1-10.

Zhang, Z., Zhang, X., Chen, W., Rasim, Y., Salman, W., Pan, H., . . . Wang, C. (2016). A High-Efficiency Energy Regenerative Shock Absorber Using Supercapacitors for Renewable Energy Applications in Range Extended Electric Vehicle. *Applied Energy*, Vol.178, Hal.177-188.

Zhu, H., Li, Y., Shen, W., & Zhu, S. (2019). Mechanical and Energy-Harvesting Model for Electromagnetic Inertial Mass Dampers. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.120, Hal.203-220.

Zuo, L., & Zhang, P.-S. (2013). Energy Harvesting, Ride Comfort, and Road Handling of Regenerative Vehicle. *Journal of Vibration and Acoustics*, Hal. 011002-1-8.

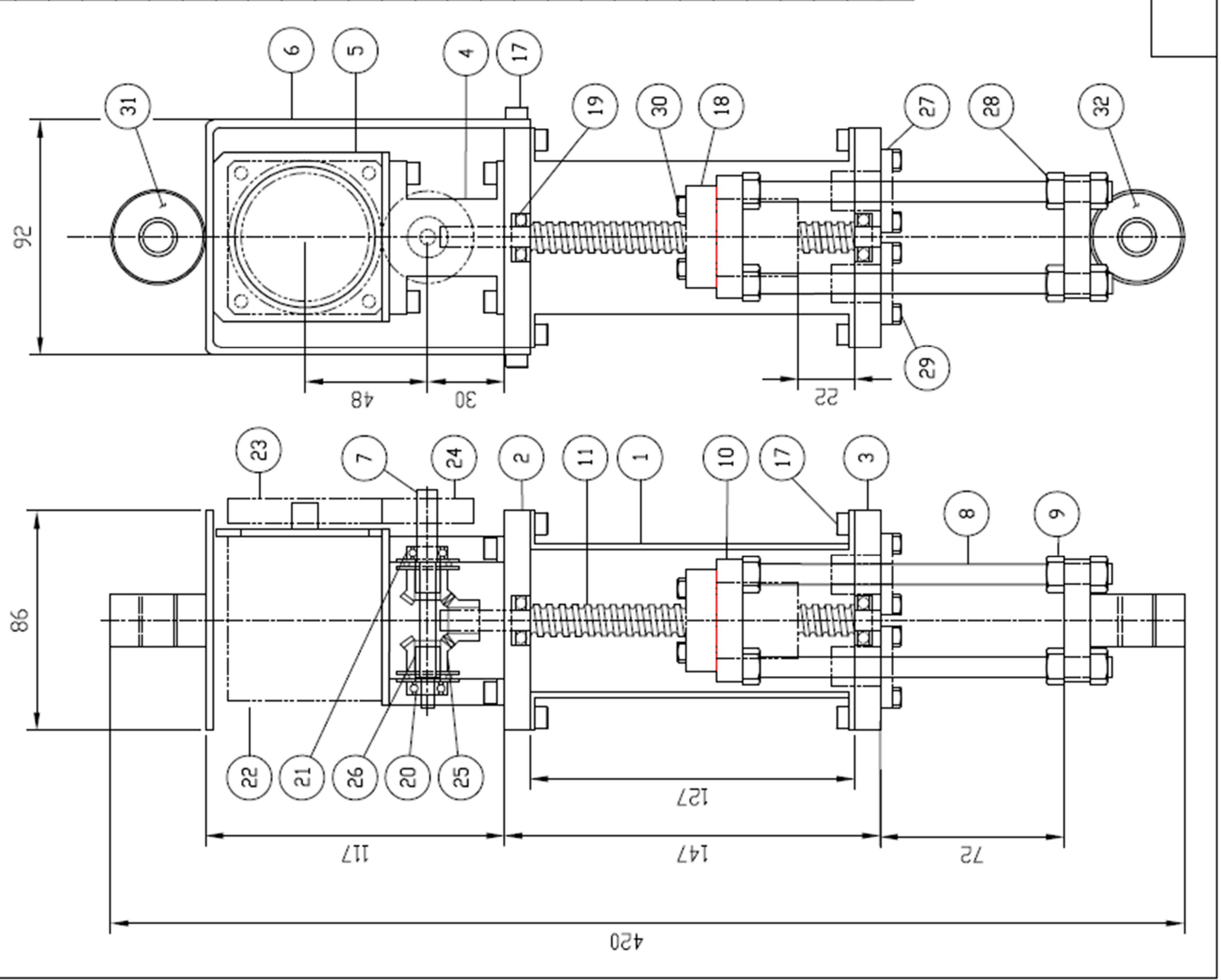
Lampiran 1 Assembly dan Detail Drawing

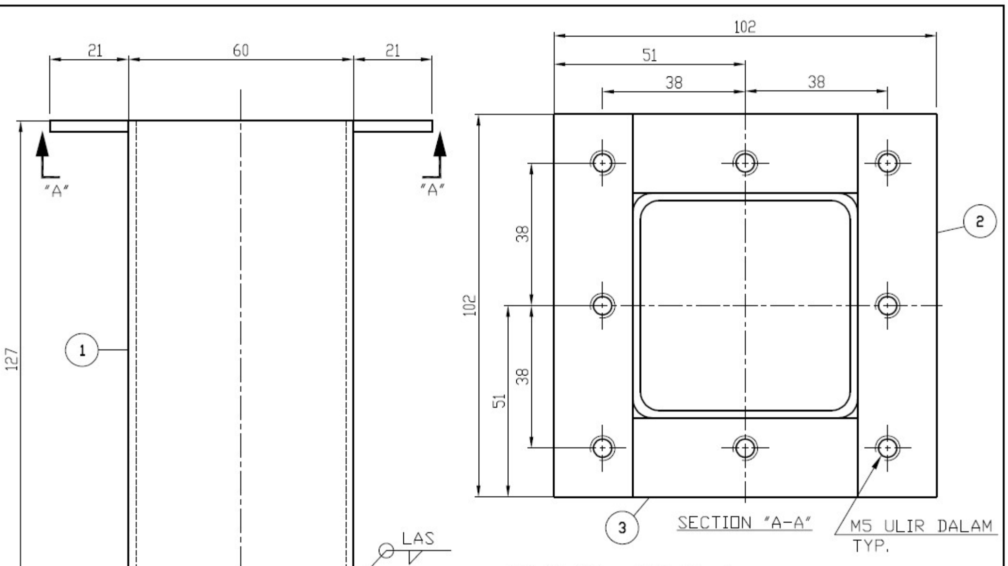
NO.	ITEM	JUMLAH	KETERANGAN
1.	SCREW CASING	1	
2.	COVER PLATE ATAS 1	1	
3.	COVER PLATE BAWAH	1	
4.	SHAFT PLATE	2	
5.	GENERATOR BRACKET	1	
6.	CASING PLATE ATAS	1	
7.	GEAR SHAFT	1	
8.	SHAFT KONEKTOR	4	
9.	KONEKTOR BAWAH	1	
10.	KONEKTOR BALL SCREW NUT	1	
11.	SCREW	1	DIA.12 LEAD 5
17.	BOLT M5 x 10	40	
18.	BALL SCREW NUT	1	HIWIN 1205 FSI
19.	THRUST BEARING F8-19 ASB	2	
20.	BALL BEARING 5mm	1	
21.	BALL BEARING 8mm	1	
22.	GENERATOR	1	
23.	SPUR GEAR KHK SSA-60	1	
24.	SPUR GEAR KHK SSA-36	1	
25.	BEVEL GEAR KHK SMB-20	3	
26.	ONE-WAY BEARING NTN 6-10-12	2	
27.	LINEAR BEARING LMK-8UU	4	
28.	NUT M8	12	
29.	BOLT M3 x 10	16	LINEAR BEARING
30.	BOLT M4 x 10	6	BALL SCREW NUT
31.	BUSHING KARET SHOCK ATAS	1	FOR GRAND MAX
32.	BUSHING KARET SHOCK BAWAH	1	FOR GRAND MAX

RSA DRAWING DESIGN 1

13-SEP-19

REV.A

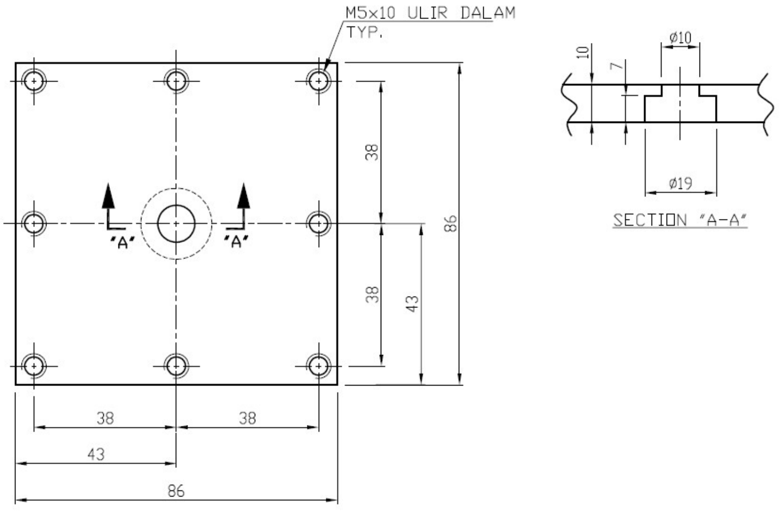




DETAIL ITEM 1
SCREW CASING

NO.	ITEM	JUMLAH
1.	BESI HOLLOW 60mm x 60mm x 2mm x 127 mm LG.	2
2.	PLAT STRIP 102mm x 21mm x 2,7mm THK.	8
3.	PLAT STRIP 60mm x 21mm x 2,7mm THK.	8

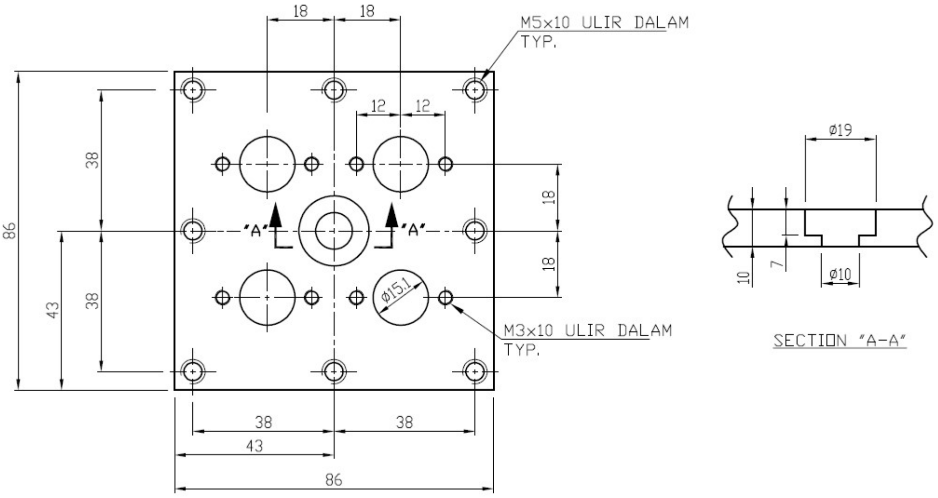
13-SEP-19 REV.A



DETAIL ITEM 2
COVER PLATE ATAS 1

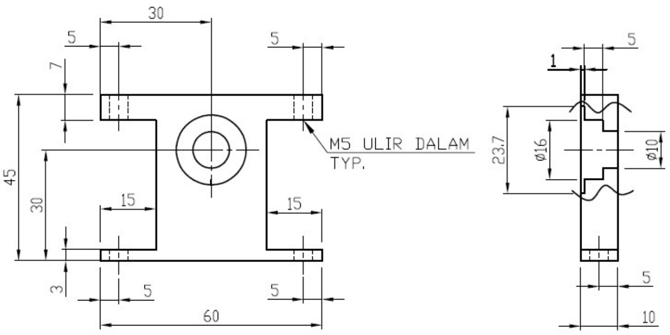
NO.	ITEM	JUMLAH
1.	PLAT CARBON STEEL 86mm x 86mm x 10mm THK.	1

13-SEP-19 REV.A



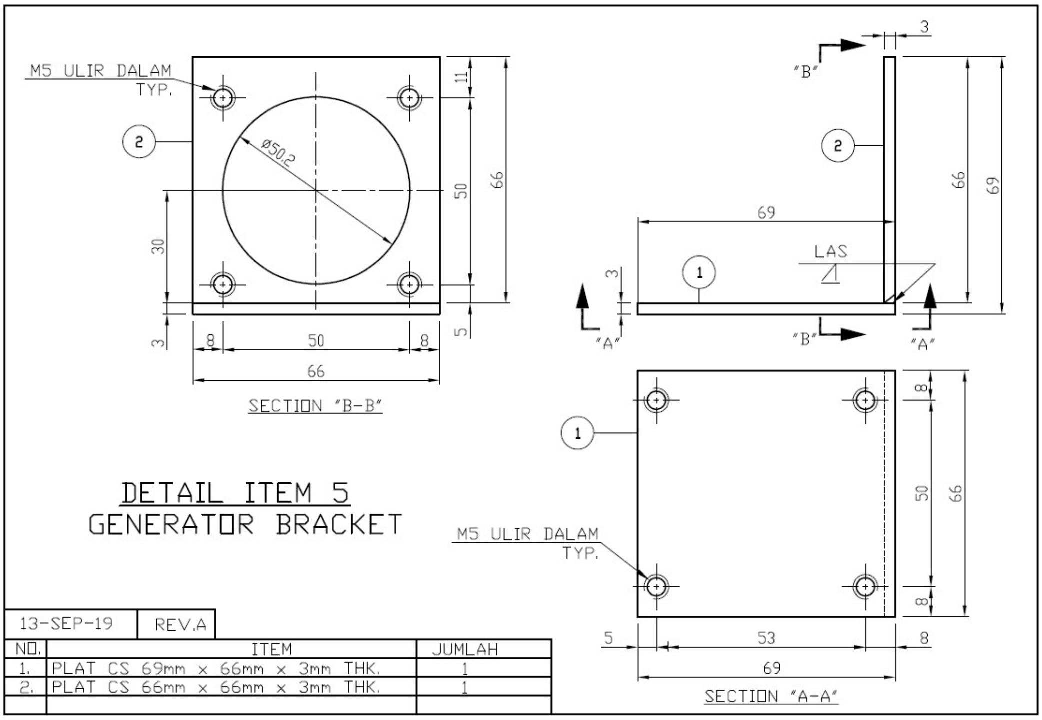
DETAIL ITEM 3
COVER PLATE BAWAH

NO.	ITEM	JUMLAH		
1.	PLAT CARBON STEEL 86mm x 86mm x 10mm THK.	2		
			13-SEP-19	REV.A



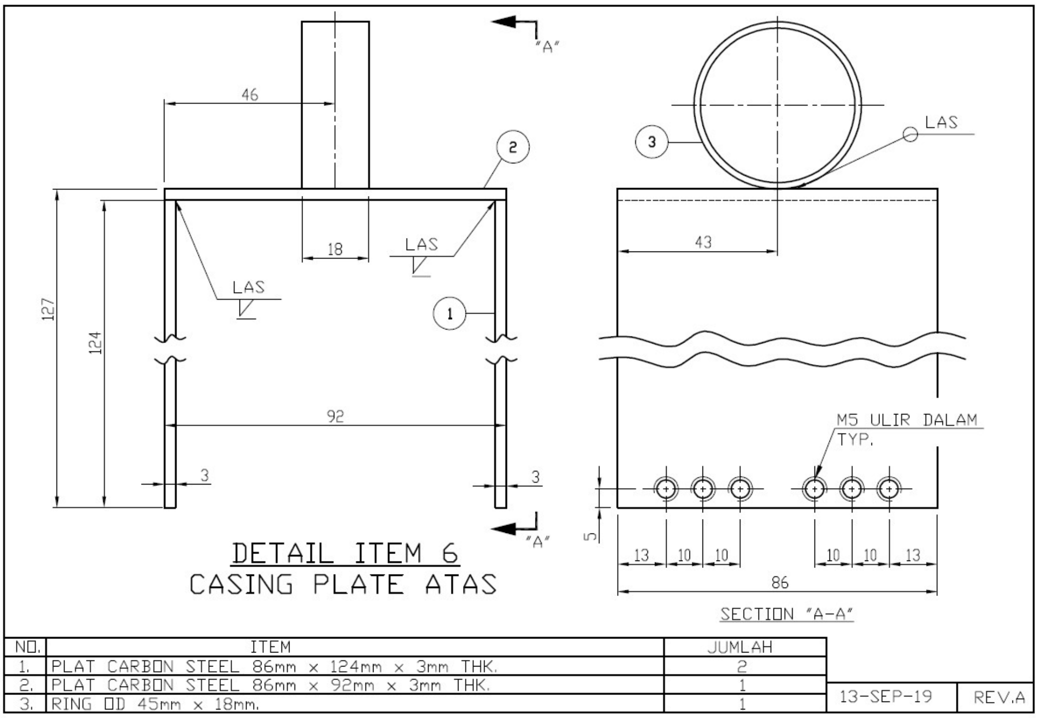
DETAIL ITEM 4
SHAFT PLATE

NO.	ITEM	JUMLAH		
1.	PLAT CARBON STEEL 60mm x 45mm x 10mm THK.	2		
			13-SEP-19	REV.A



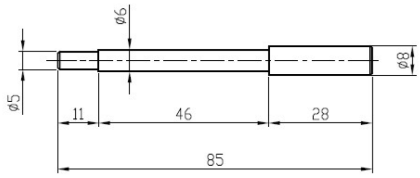
13-SEP-19	REV.A

NO.	ITEM	JUMLAH
1.	PLAT CS 69mm x 66mm x 3mm THK.	1
2.	PLAT CS 66mm x 66mm x 3mm THK.	1

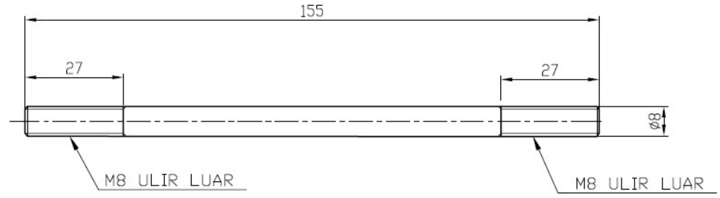


NO.	ITEM	JUMLAH
1.	PLAT CARBON STEEL 86mm x 124mm x 3mm THK.	2
2.	PLAT CARBON STEEL 86mm x 92mm x 3mm THK.	1
3.	RING OD 45mm x 18mm.	1

13-SEP-19	REV.A



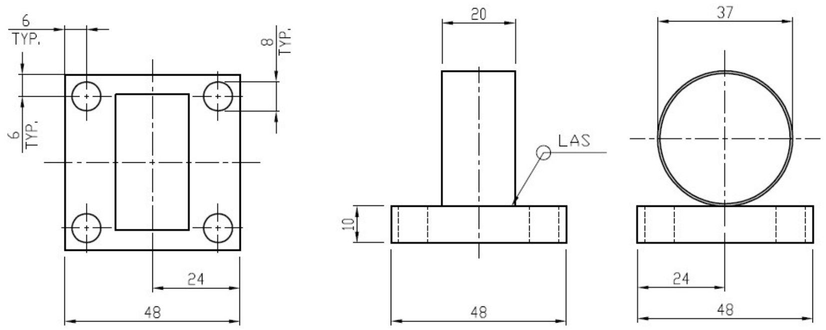
DETAIL ITEM 7
GEAR SHAFT



DETAIL ITEM 8
KONEKTOR SHAFT

NO.	ITEM	JUMLAH
1.	POROS CARBON STEEL ø8 mm x 85 mm.	1
2.	POROS CARBON STEEL ø8 mm x 155 mm.	8

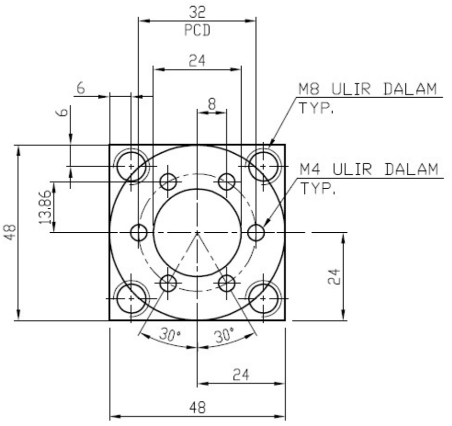
13-SEP-19 REV.A



DETAIL ITEM 9
KONEKTOR BAWAH

NO.	ITEM	JUMLAH
1.	PLAT CARBON STEEL 48mm x 48mm x 10mm THK.	2
2.	RING OD 36mm x 18mm.	2

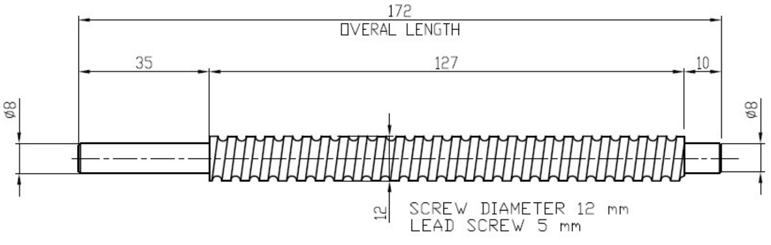
13-SEP-19 REV.A



DETAIL ITEM 10
KONEKTOR BALL SCREW NUT

NO.	ITEM	JUMLAH
1.	PLAT CARBON STEEL 48mm x 48mm x 10mm THK.	2

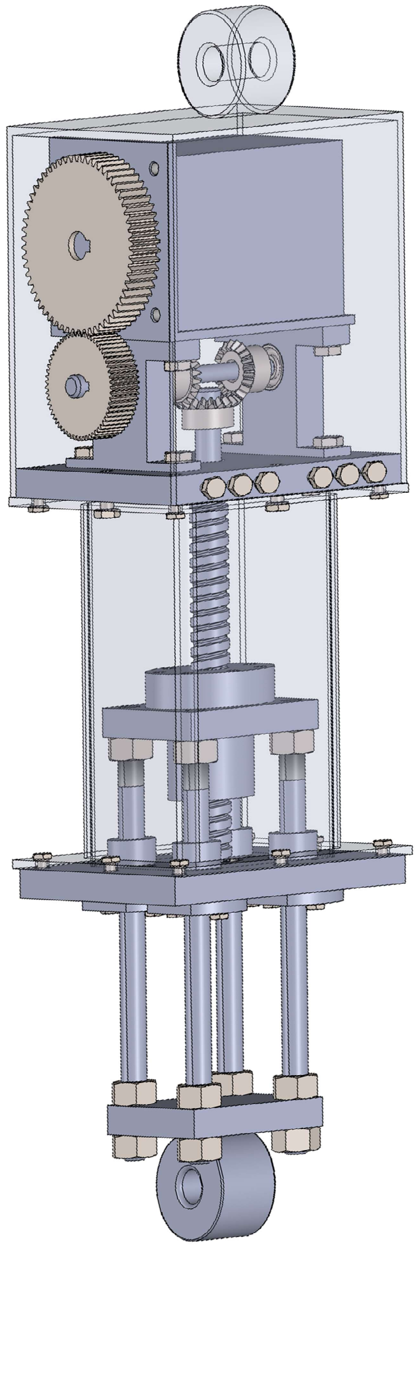
13-SEP-19 REV.A

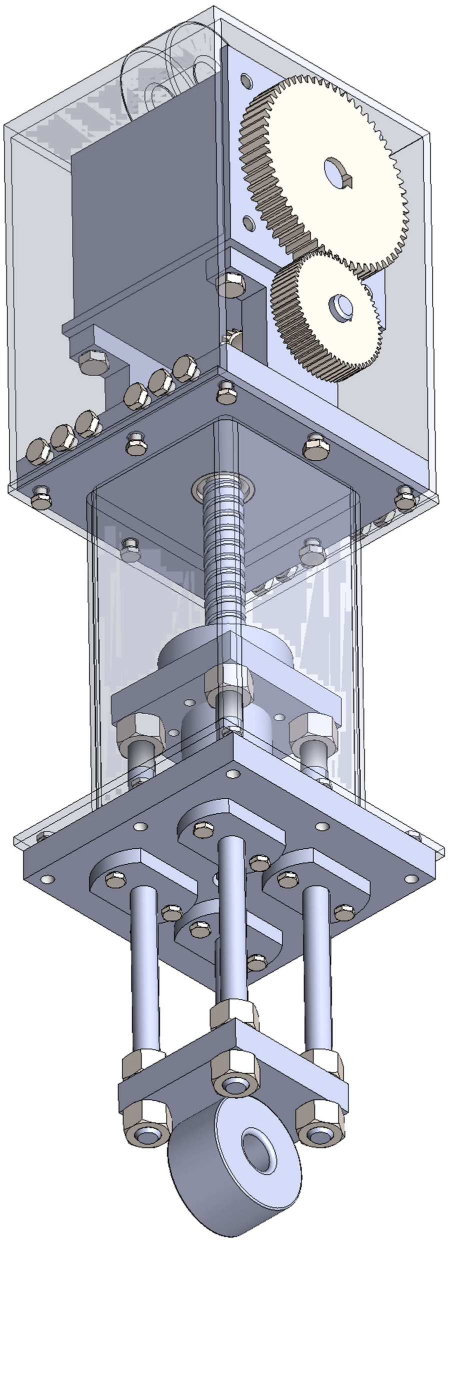


NO.	ITEM	JUMLAH
1.	HIWIN SCREW FSI 1205 172mm LG.	1

13-SEP-19 REV.A

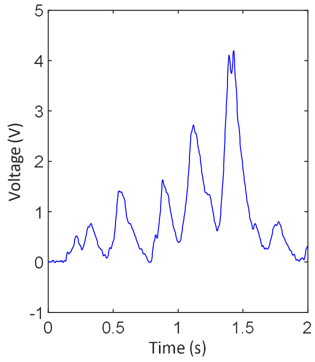
Lampiran 2 Gambar Isometrik BSRSA

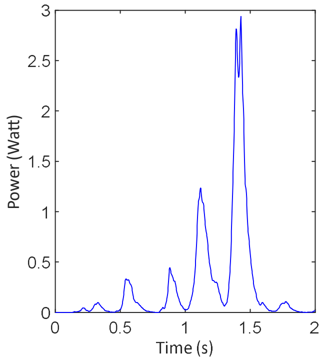


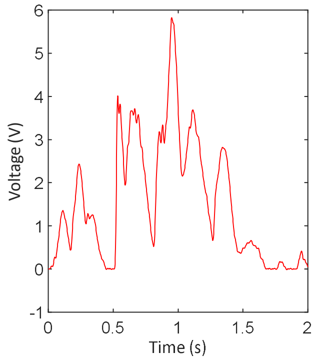


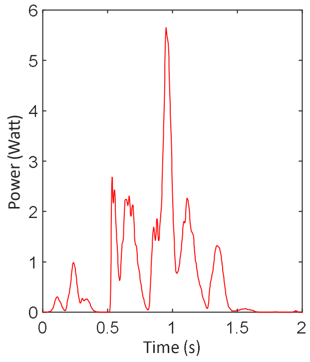
Lampiran 3 Grafik Hasil Pengujian

1. Polisi Tidur
   - Kecepatan 10 km/jam

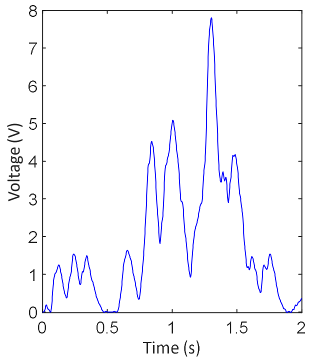


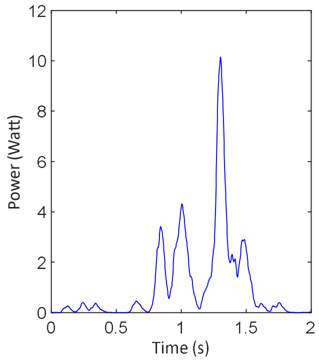


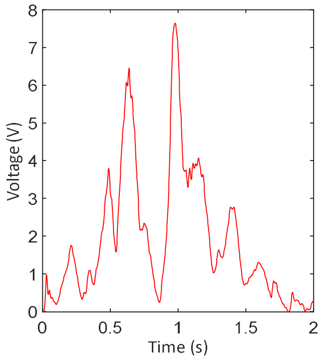


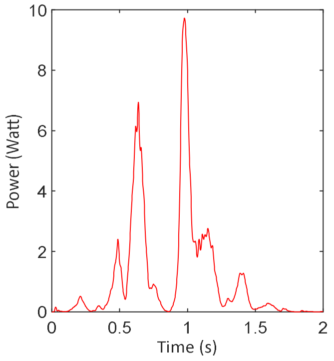


   - Kecepatan 15 km/jam

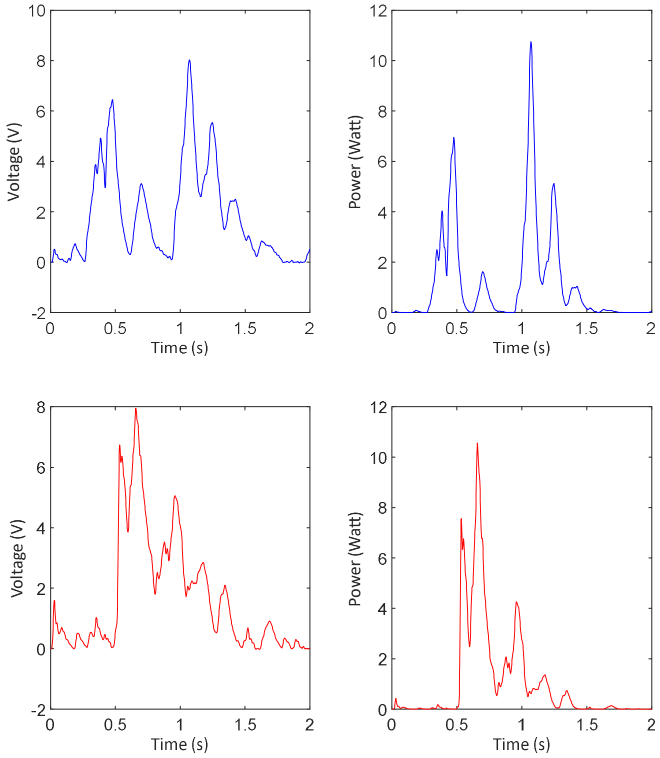




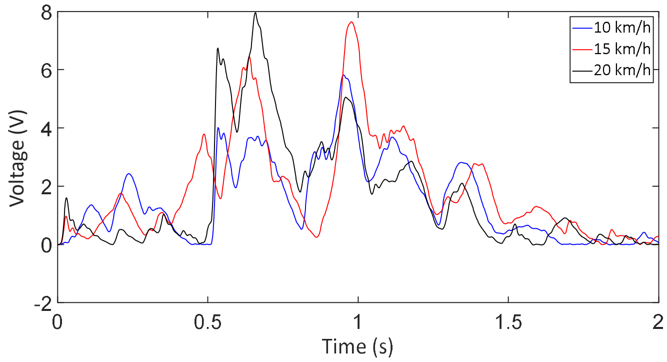


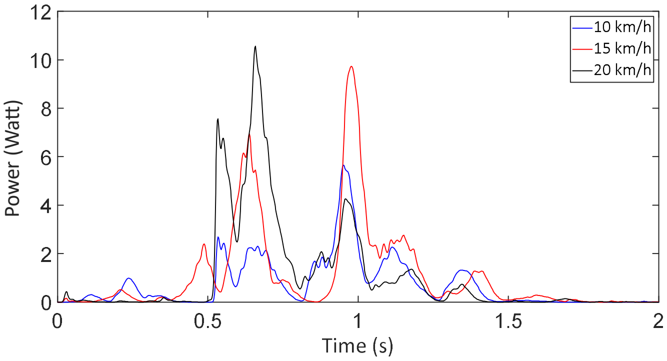


- Kecepatan 20 km/jam

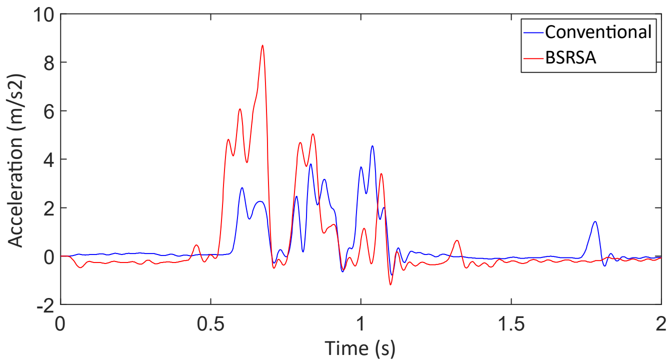


- Perbandingan Energi Bangkitan

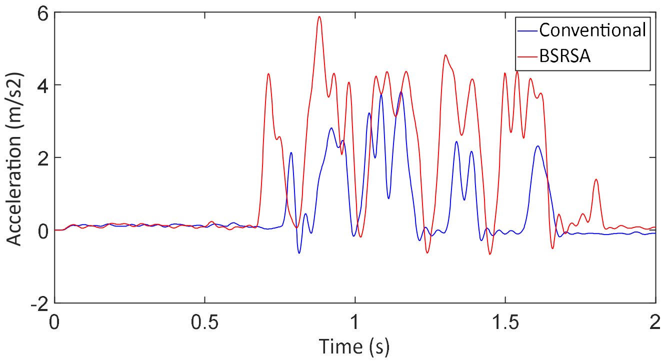




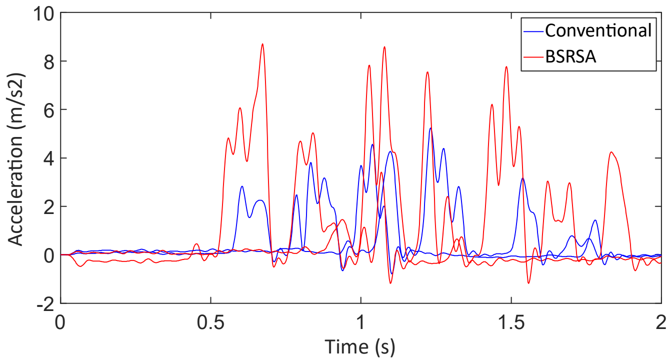
- Respon Dinamis Kecepatan 10 km/jam



- Respon Dinamis Kecepatan 15 km/jam

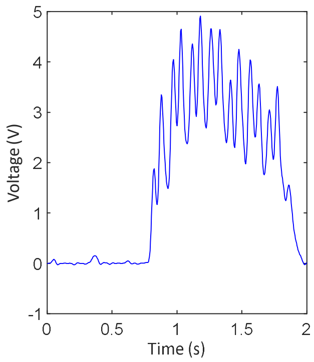


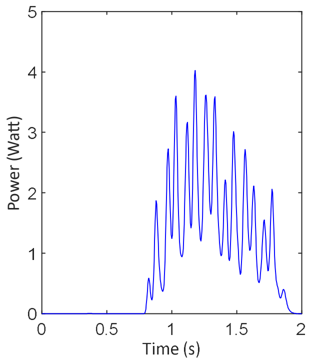
- Respon Dinamis Kecepatan 20 km/jam

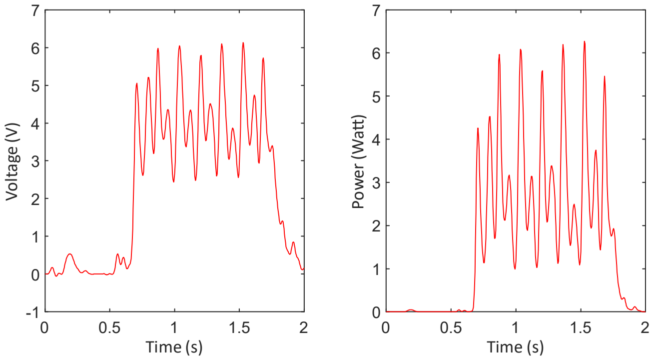


2. Speed Trap

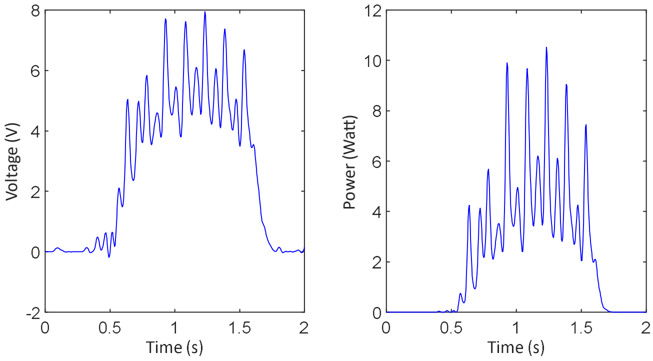
- Kecepatan 10 km/jam

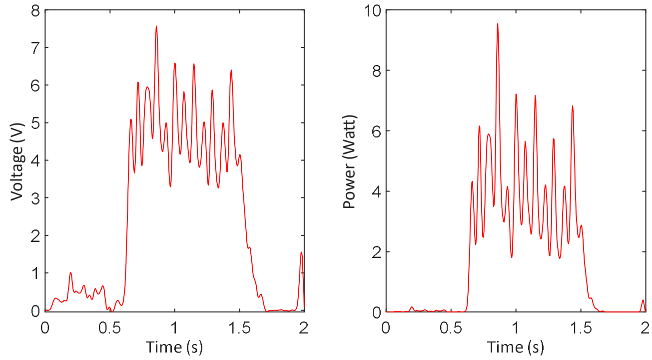




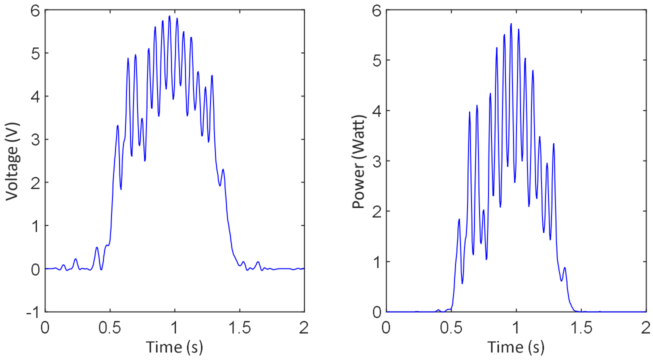


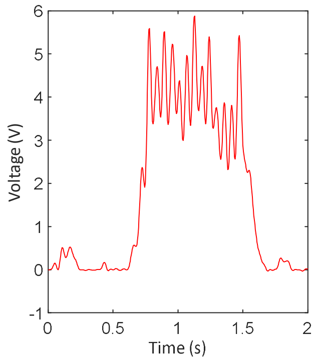
- Kecepatan 15 km/jam

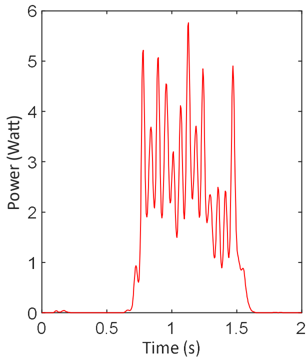




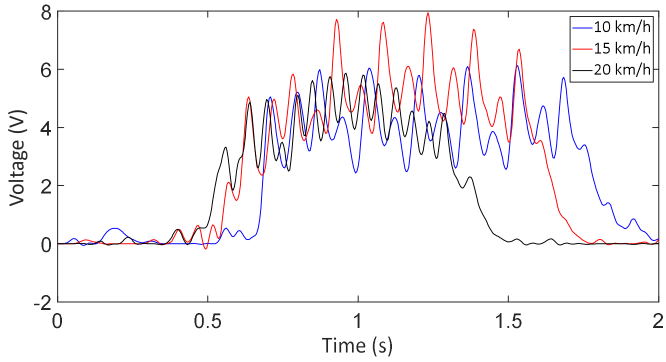
- Kecepatan 20 km/jam

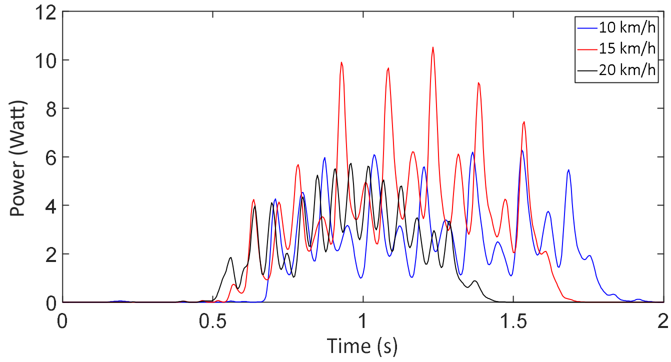




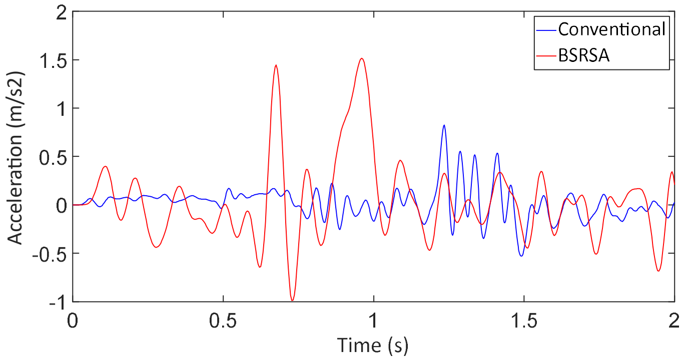


- Perbandingan Energi Bangkitan

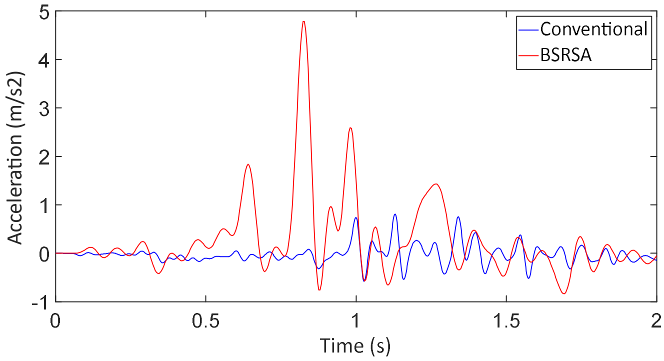




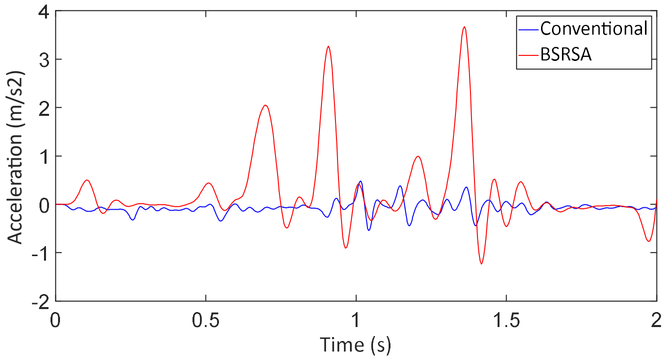
- Respon Dinamis Kecepatan 10 km/jam



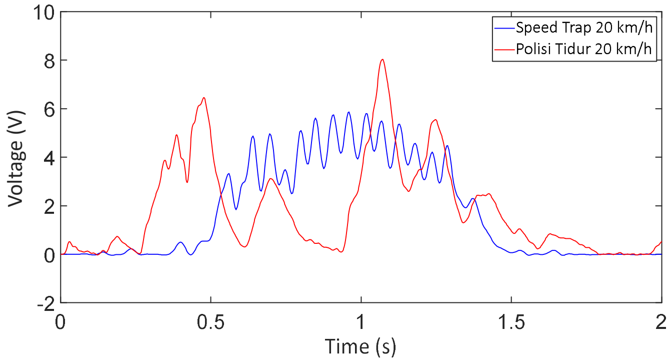
- Respon Dinamis Kecepatan 15 km/jam

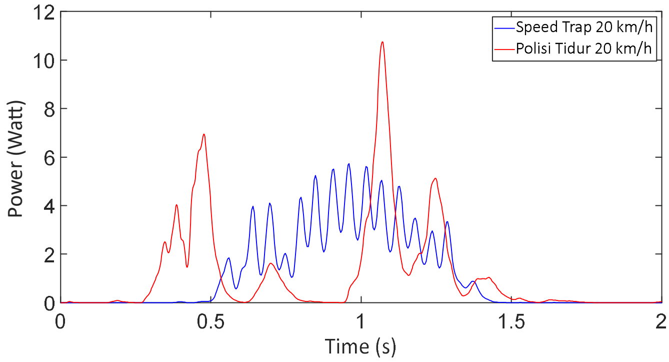


- Respon Dinamis Kecepatan 20 km/jam

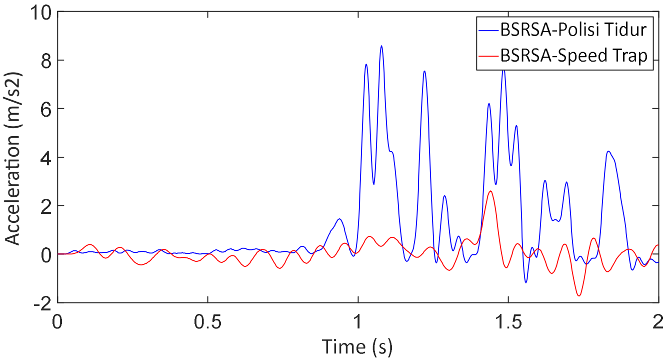


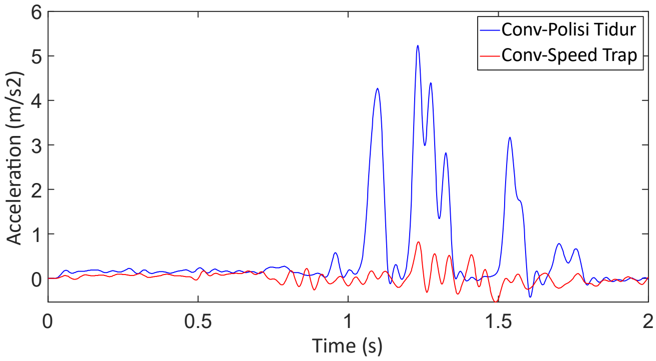
- Perbandingan Energi Bangkitan Polisi Tidur dengan Speed Trap



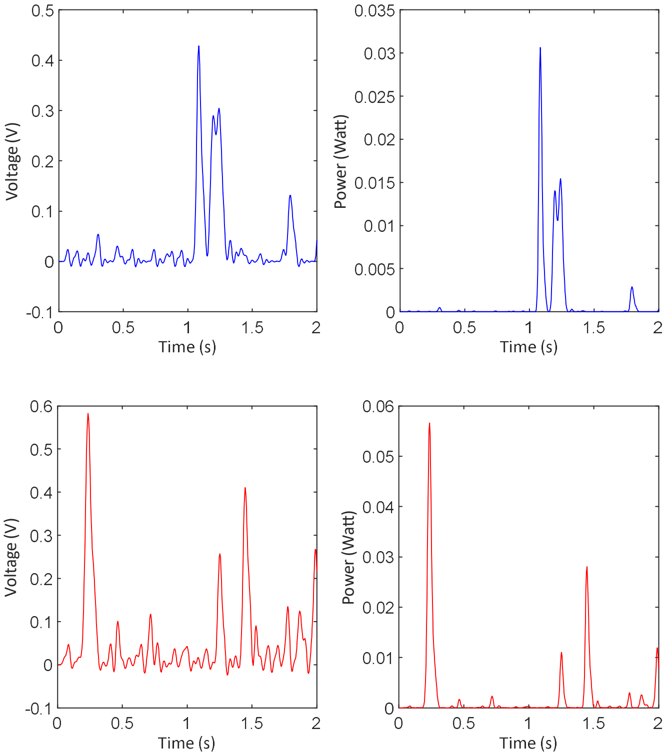


- Perbandingan Respon Dinamis Polisi Tidur dengan Speed Trap

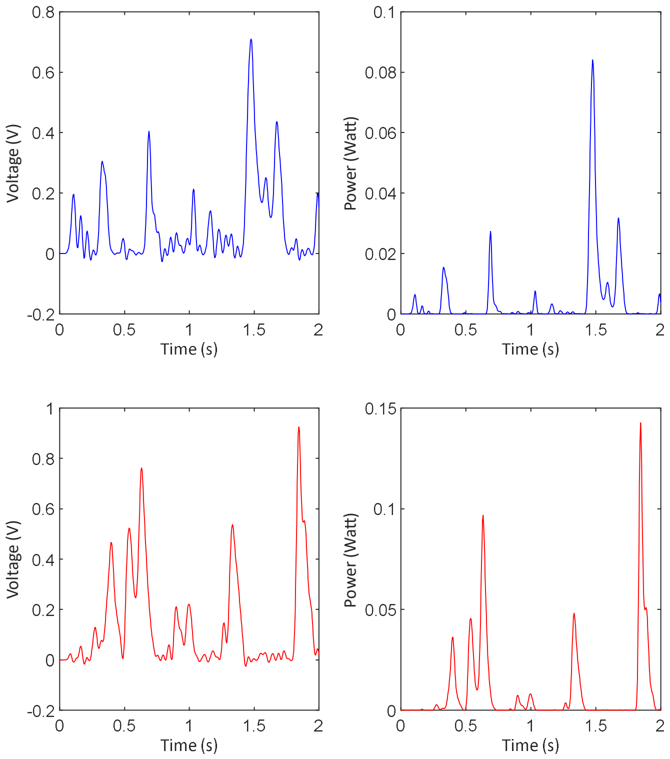




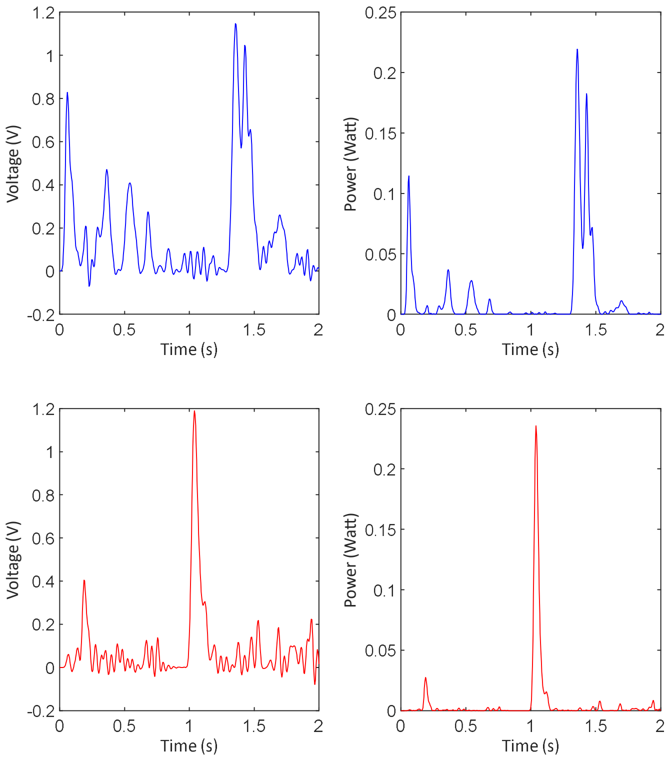
3. Jalan Aspal
   - Kecepatan 10 km/jam



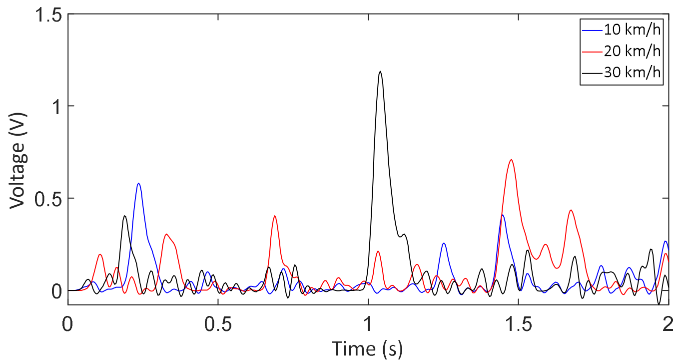
- Kecepatan 20 km/jam

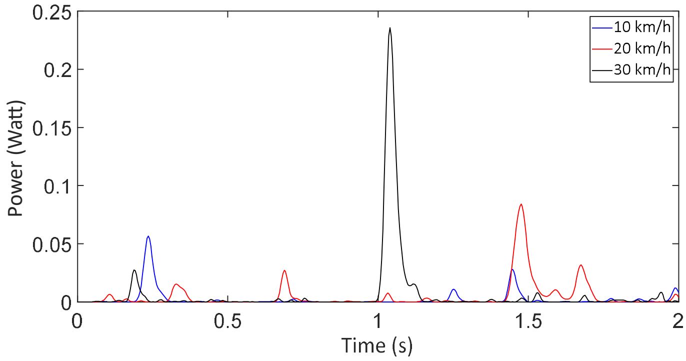


- Kecepatan 30 km/jam

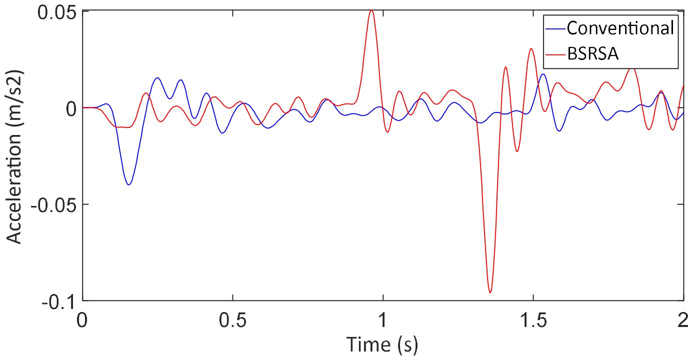


- Perbandingan Energi Bangkitan

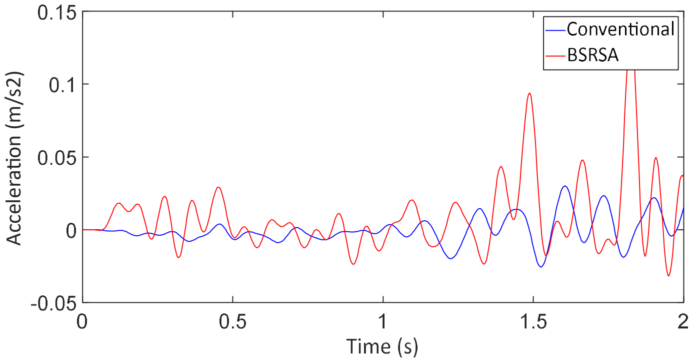




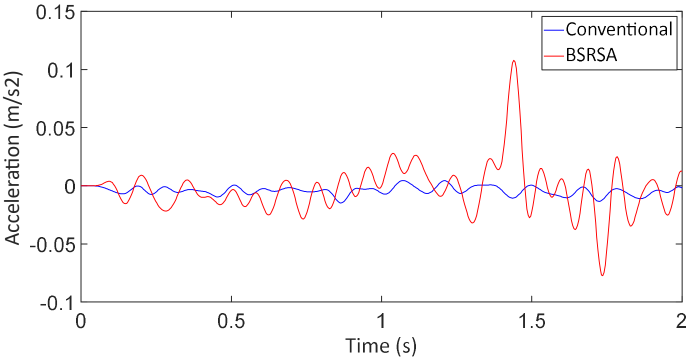
- Respon Dinamis Kecepatan 10 km/jam



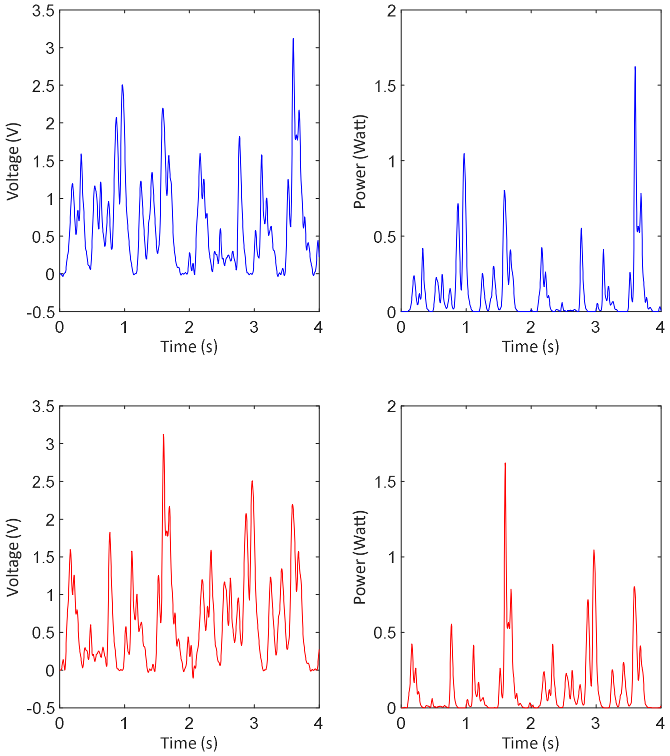
- Respon Dinamis Kecepatan 20 km/jam



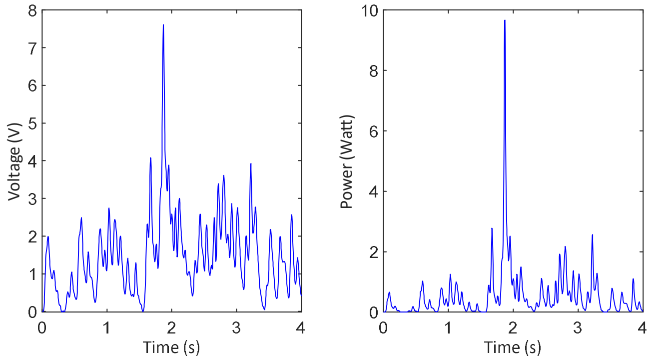
- Respon Dinamis Kecepatan 30 km/jam

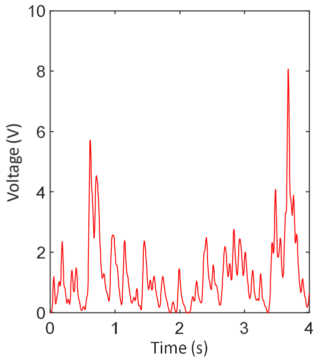


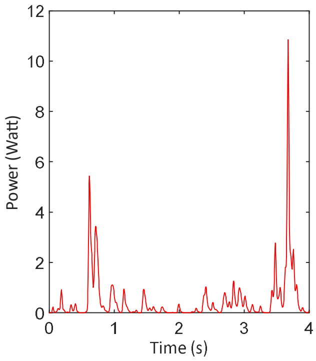
4. Jalan Paving
   - Kecepatan 10 km/jam



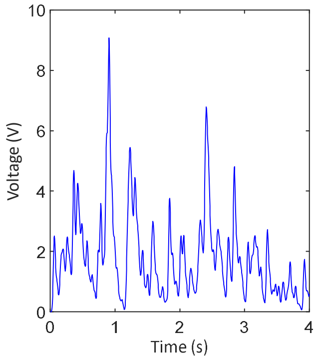
   - Kecepatan 20 km/jam

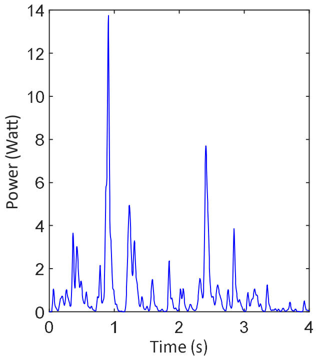


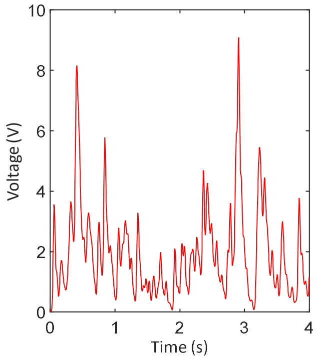


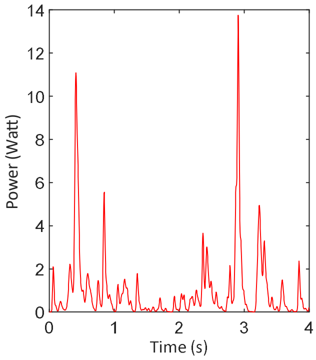


- Kecepatan 30 km/jam

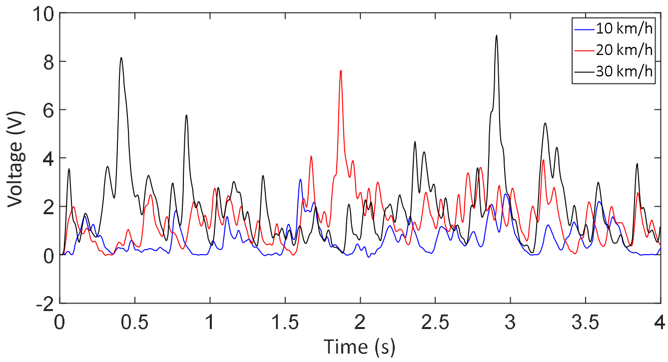


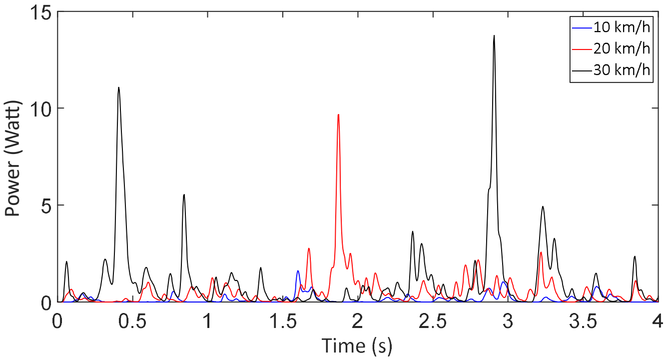




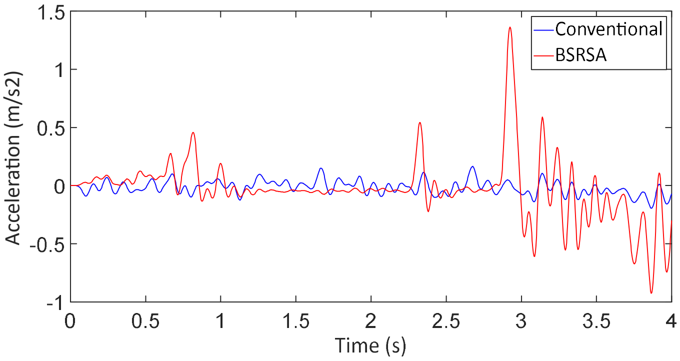


- Perbandingan Energi Bangkitan

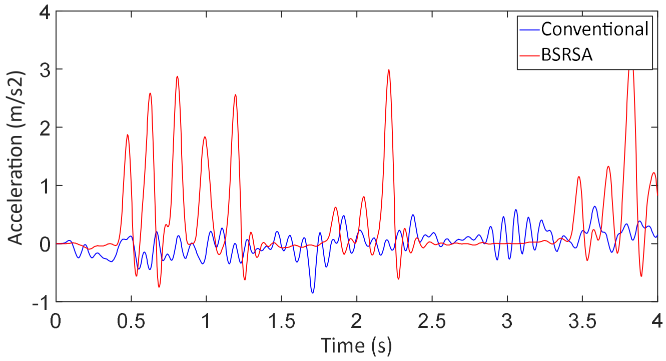




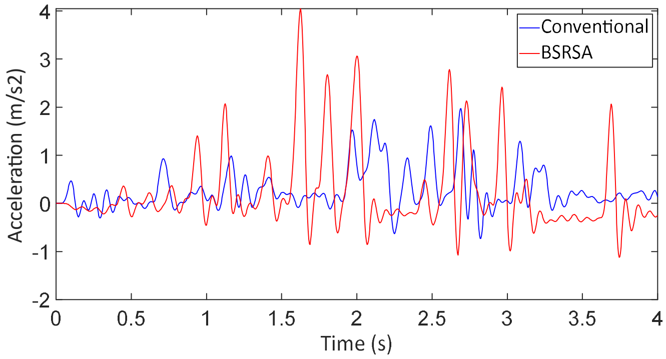
- Respon Dinamis Kecepatan 10 km/jam



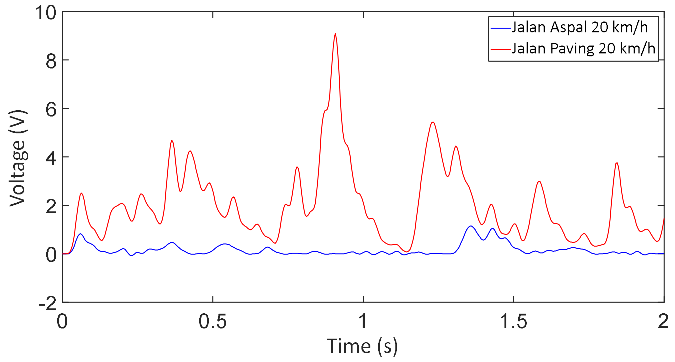
- Respon Dinamis Kecepatan 20 km/jam

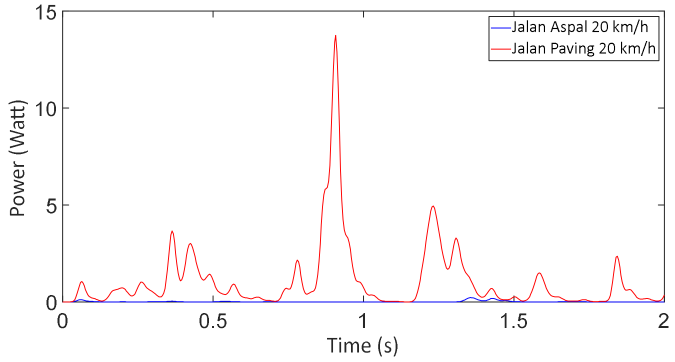


- Respon Dinamis Kecepatan 30 km/jam

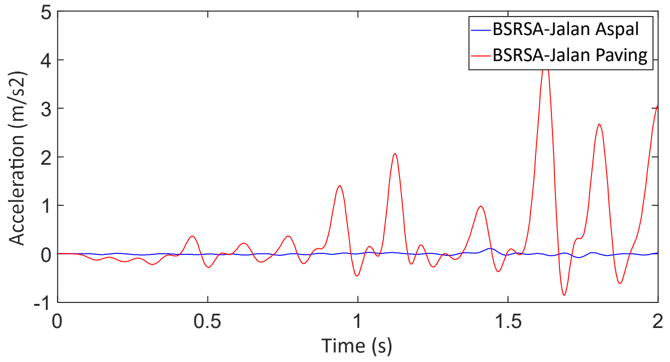


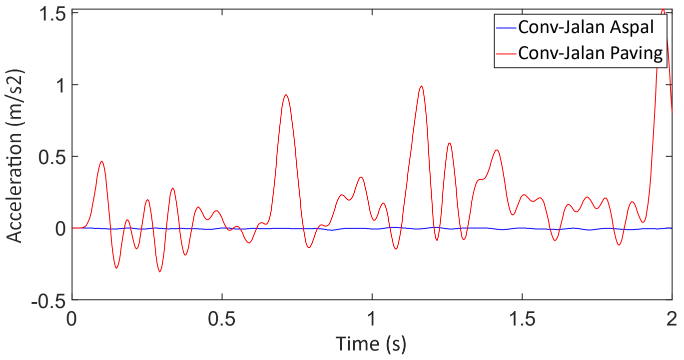
- Perbandingan Energi Bangkitan Jalan Aspal dengan Jalan Paving





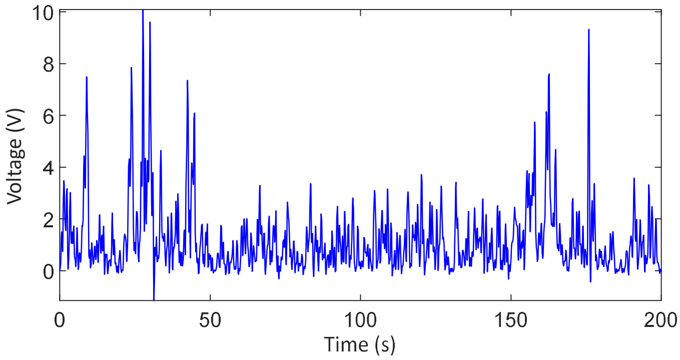
- Perbandingan Respon Dinamis Jalan Aspal dengan Jalan Paving

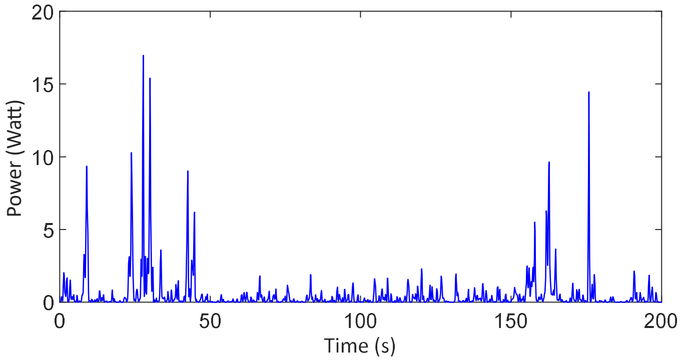




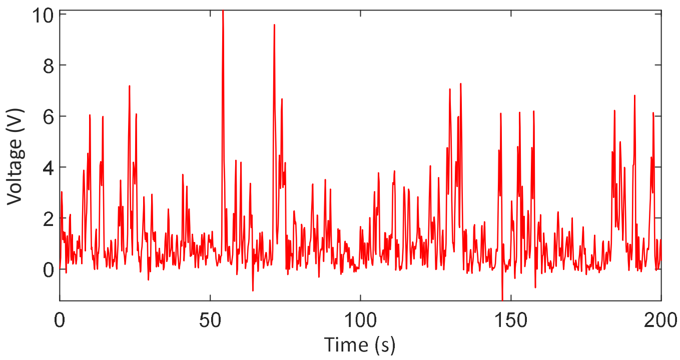
5. Berkendara Normal

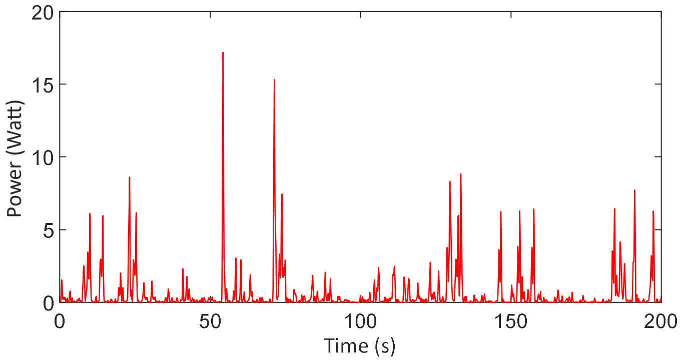
- Percobaan Pertama





- Percobaan Kedua





BIODATA PENULIS

Dhion Khairul Nugraha dilahirkan di Sleman 10 Maret 1990 dari pasangan Bapak Murwandono dan Ibu Erna Kadaryanti. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Sejak berusia 1 tahun, penulis pindah ke Kota Pasuruan.

Penulis memulai pendidikan dasar di SDN Kebonsari 2 Pasuruan selama 6 tahun dan lulus tahun 2002, penulis melanjutkan pendidikan tingkat pertama di SMP Negeri 2 Pasuruan selama 3 tahun. Setelah lulus tahun 2005, penulis melanjutkan pendidikan di SMA Negeri 1 Pasuruan. Lulus SMA di tahun 2008, penulis melanjutkan pendidikan di Jurusan Teknik Mesin ITS Surabaya dan lulus di tahun 2012. Kemudian penulis melanjutkan karir sebagai *mechanical design engineer* di Alstom Power ESI Surabaya dan *pressure part engineer* di GE Power Surabaya. Dalam rentang waktu berkarir di tahun 2013 hingga akhir 2017, penulis terlibat aktif dalam beberapa proyek pembangkit listrik terutama berkaitan dengan HRSG. Dalam perjalanannya, penulis juga sempat menjadi *lead project* untuk project *engineering service, tendering,* dan *full scope*. Di tahun 2018, penulis melanjutkan studi di program Pascasarjana Jurusan Teknik Mesin ITS bidang keahlian Desain Sistem Mekanikal. Penulis dapat dihubungi melalui email dhion.nugraha23@gmail.com.