

**LAPORAN AKHIR  
PENELITIAN KOLABORASI INTERNASIONAL**



**JUDUL PENELITIAN:**  
***ROBUST PARAMETER DESIGN MUFFLER BERTEKNOLOGI METALLIC  
CATALYTIC CONVERTER DAN IMPLEMENTASINYA UNTUK MEREDUKSI  
EMISI GAS BUANG DAN MENINGKATKAN PERFORMA MESIN  
MENGUNAKAN DUAL RESPONSE SURFACE METHOD***

**TIM PENGUSUL:**

**Dr. Warju, S.Pd, S.T., M.T.**

**NIDN 0028038101**

**Andita Nataria Fitri Ganda, S.T., M.Sc.**

**NIDN 0009049201**

**Suprayitno, S.T., M.T., Ph.D.**

**NIDN 0029057305**

**Prof. Jyh-Cheng Yu, Ph.D.**

**NKUST-Taiwan**

**UNIVERSITAS NEGERI SURABAYA  
NOVEMBER 2021**

## HALAMAN PENGESAHAN PENELITIAN KOLABORASI INTERNASIONAL

|                              |                                                                                                                                                                                                                                           |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Judul Penelitian             | : <i>Robust Parameter Design Muffler</i> Berteknologi<br><i>Metallic Catalytic Converter</i> dan<br>Implementasinya untuk Mereduksi Emisi Gas<br>Buang dan Meningkatkan Performa Mesin<br>Menggunakan <i>Dual Response Surface Method</i> |
| Kode/Nama Rumpun Ilmu        | : 431/Teknik Mesin (dan Ilmu Permesinan Lain)                                                                                                                                                                                             |
| Bidang Fokus Penelitian      | : Transportasi                                                                                                                                                                                                                            |
| Ketua Peneliti               |                                                                                                                                                                                                                                           |
| a. Nama Lengkap              | : Dr. Warju, S.Pd., S.T., M.T.                                                                                                                                                                                                            |
| b. NIDN                      | : 0028038101                                                                                                                                                                                                                              |
| c. Jabatan Fungsional        | : Lektor                                                                                                                                                                                                                                  |
| d. Program Studi             | : S1 Teknik Mesin                                                                                                                                                                                                                         |
| e. Nomor HP                  | : 081330670825                                                                                                                                                                                                                            |
| f. Alamat surel (e-mail)     | : warju@unesa.ac.id                                                                                                                                                                                                                       |
| Anggota Peneliti (1)         |                                                                                                                                                                                                                                           |
| a. Nama Lengkap              | : Andita Nataria Fitri Ganda, S.T., M.Sc.                                                                                                                                                                                                 |
| b. NIDN                      | : 0009049201                                                                                                                                                                                                                              |
| c. Perguruan Tinggi          | : Universitas Negeri Surabaya                                                                                                                                                                                                             |
| Anggota Peneliti (2)         |                                                                                                                                                                                                                                           |
| a. Nama Lengkap              | : Suprayitno, S.T., M.T., Ph.D.                                                                                                                                                                                                           |
| b. NIDN                      | : 0029057305                                                                                                                                                                                                                              |
| c. Perguruan Tinggi          | : Universitas Negeri Malang                                                                                                                                                                                                               |
| Anggota Peneliti (3)         |                                                                                                                                                                                                                                           |
| d. Nama Lengkap              | : Prof. Jyh-Cheng Yu, Ph.D.                                                                                                                                                                                                               |
| e. NIDN                      | : -                                                                                                                                                                                                                                       |
| Perguruan Tinggi             | : National Kaohsiung University of Science and<br>Technology                                                                                                                                                                              |
| Lama Penelitian Keseluruhan  | : 1 tahun                                                                                                                                                                                                                                 |
| Usulan Penelitian Tahun ke-  | : 1                                                                                                                                                                                                                                       |
| Biaya Penelitian Keseluruhan | : Rp. 100.000.000,-                                                                                                                                                                                                                       |
| Biaya Penelitian             | :                                                                                                                                                                                                                                         |
| - diusulkan ke LPPM UNESA    | : Rp. 100.000.000,-                                                                                                                                                                                                                       |
| - dana institusi mitra       | : Rp. - / in kind tuliskan: - (jika ada)                                                                                                                                                                                                  |

Surabaya, 30 November 2021

Ketua Peneliti,



**Dr. Warju, S.Pd., S.T., M.T.**  
NIP. 198103282006041001



**Prof. Dr. Darmi, M.Hum**  
NIP. 196509261990022001

## RINGKASAN

Pengembangan teknologi energi dan penggunaan material maju sejalan dengan rencana induk riset nasional (RIRN) dan rencana strategis penelitian universitas. Penelitian ini merupakan kolaborasi riset tentang desain *muffler* berteknologi *metallic catalytic converter* yang telah dikembangkan oleh tim peneliti. Pada tahapan ini, desain *muffler* dengan *metallic catalytic converter* dioptimasi menggunakan pendekatan *robust parameter design* untuk mengakomodasi ketidakpastian kondisi operasi seperti perbedaan pabrikan kendaraan dan kondisi putaran mesin. *Dual polynomial response surface method* dipilih sebagai strategi optimasi *robust parameter design*. Dua indikator prestasi desain *muffler* diamati dalam penelitian ini, yakni tingkat emisi gas buang dan performa mesin. Penelitian dibagi dalam dua tahap, yaitu tahap proses optimasi desain dan tahap implementasi hasil optimasi pada kondisi riil. Tujuan penelitian ini adalah menemukan desain *muffler* (knalpot) berteknologi *metallic catalytic converter* yang optimal dalam mereduksi emisi gas buang dan menurunkan tingkat kebisingan mesin. Penelitian kolaborasi internasional ini bekerja sama dengan *National Kaohsiung University of Science and Technology* (NKUST) Taiwan dan Universitas Negeri Malang (UM).

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen. Variabel penelitian ini meliputi jenis material dari *metallic catalytic converter* (MCC) dan dimensi geometri desain MCC. Standar pengujian emisi gas buang berdasarkan SNI 09-7118.3-2005. Peralatan dan instrumen penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah *inertia chassis dynamometer*, *thermocouple*, *digital thermometer*, *sound level meter*, *manometer*, *exhaust gas analyzer*, dan *blower*. Dua model *polynomial response surface method* dibangun, masing masing untuk emisi gas buang dan performa mesin. *Robust parameter design* kemudian dilakukan berdasarkan *dual response surface method* ini.

Hal penelitian ini menunjukkan bahwa desain MCC terbaik yang mampu menurunkan emisi CO adalah STD LM. Namun, E19 bisa dijadikan sebagai alternatif karena selisih S/N rasionya hanya terpaut -0.372. Sementara itu, E19 memiliki keunggulan lain dari STD LM yakni nilai S/N rasio daya yang cenderung lebih tinggi dengan selisih sebesar 5.037 dibandingkan dengan STD LM. Sementara itu, desain MCC terbaik yang mampu meningkatkan daya adalah E18. E18 memiliki keunggulan S/N rasio dengan selisih sebesar 5.404. Dari sisi emisi, E18 cenderung lebih rendah dengan selisih sebesar -1.875 dibandingkan dengan STD LM.

**Kata kunci:** *Robust parameter design*, optimasi, desain *metallic catalytic converter*, *dual response surface method*.

## PRAKATA

Segala puji syukur dipanjatkan kehadirat Allah SWT karena atas limpahan rahmat, hidayah dan inayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan akhir Penelitian Kolaborasi Internasional Tahun 2021 ini dengan baik dan lancar. Laporan akhir ini disusun sebagai bentuk pertanggungjawaban atas pelaksanaan penelitian dana PNBP Unesa tahun 2021 yang berjudul “*Robust Parameter Design Muffler Berteknologi Metallic Catalytic Converter dan Implementasinya untuk Mereduksi Emisi Gas Buang dan Meningkatkan Performa Mesin Menggunakan Dual Response Surface Method*”.

Keberhasilan penyusunan laporan akhir ini tentunya berkat bantuan dan dukungan semua pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Nurhasan, M.Kes. selaku Rektor Universitas Negeri Surabaya yang selalu mendorong munculnya produk inovasi dan produk unggulan di Unesa.
2. Bapak Prof. Dr. Bambang Yulianto, M.Pd. selaku Wakil Rektor Bidang Akademik Unesa yang telah menyelenggarakan program penelitian dana PNBP Unesa.
3. Ibu Prof. Dr. Darni, M.Hum. selaku Ketua LPPM Unesa yang selalu memfasilitasi kegiatan penelitian di Unesa.
4. Bapak Dr. Drs. H. Muhaji, S.T., M.T. selaku *reviewer* yang selalu memberikan masukan dan saran demi keberhasilan penelitian ini.
5. Ibu Prof. Dr. Hj. Rudiana Agustini, M.Pd. selaku *reviewer* yang selalu memberikan masukan dan saran demi keberhasilan penelitian ini.
6. Ibu Dr. Martadi, M.Sn. selaku Direktur Program Vokasi Universitas Negeri Surabaya yang selalu mendukung program penelitian.
7. Bapak Abdul Hafidz, S.Pd., M.Pd. selaku Wakil Direktur Program Vokasi Universitas Negeri Surabaya yang selalu mendukung program penelitian.
8. Bapak Arya Mahendra Sakti, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi D4 Teknik Mesin Program Vokasi Universitas Negeri Surabaya yang selalu mendukung program penelitian.
9. Mas Sudirman Rizki Ariyanto, A.Md., S.Pd., M.Pd. selaku dosen luar biasa di Jurusan Teknik Mesin FT Unesa yang selalu membantu dalam kegiatan penelitian.
10. Mas Muhammad Yandi Pratama selaku mahasiswa Prodi S1 Pendidikan Teknik Mesin-Otomotif di Jurusan Teknik Mesin FT Unesa yang selalu membantu dalam kegiatan penelitian.

11. Mas Ibnu Affan Asibli selaku mahasiswa Prodi S1 Pendidikan Teknik Mesin-Otomotif di Jurusan Teknik Mesin FT Unesa yang selalu membantu dalam kegiatan penelitian.
12. Semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian ini.

Penulis menyadari bahwa laporan akhir penelitian ini masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, kritikan dan saran dari para pembaca sangat diharapkan demi kesempurnaan laporan akhir ini di kemudian hari. Semoga Allah SWT membalas semua kebaikan kita dan semoga laporan akhir penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi siapa saja yang membacanya. Aamiin YRA.

Surabaya, November 2021

Penulis

## DAFTAR ISI

|                                                         |           |
|---------------------------------------------------------|-----------|
| COVER .....                                             | i         |
| HALAMAN PENGESAHAN.....                                 | ii        |
| RINGKASAN .....                                         | iii       |
| PRAKATA.....                                            | iv        |
| DAFTAR ISI.....                                         | vi        |
| DAFTAR GAMBAR.....                                      | vii       |
| DAFTAR TABEL .....                                      | viii      |
| <b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>                           | <b>1</b>  |
| A. Latar Belakang.....                                  | 1         |
| <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>                     | <b>3</b>  |
| A. Peneliti <i>Catalytic Converter</i> Sebelumnya ..... | 3         |
| B. <i>Catalytic Converter</i> .....                     | 5         |
| C. <i>Roadmap</i> Penelitian .....                      | 6         |
| <b>BAB III TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN.....</b>       | <b>9</b>  |
| A. Tujuan Penelitian .....                              | 9         |
| B. Manfaat Penelitian .....                             | 9         |
| <b>BAB IV METODE PENELITIAN .....</b>                   | <b>10</b> |
| A. Variabel penelitian dan rumusan optimasi .....       | 10        |
| B. Strategi optimasi (Robust parameter design).....     | 11        |
| C. Peralatan dan Instrumen Penelitian .....             | 12        |
| D. Peralatan dan Instrumen Penelitian .....             | 13        |
| E. Metode Pengujian .....                               | 13        |
| <b>BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>                  | <b>14</b> |
| <b>BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>                 | <b>48</b> |
| A. Simpulan.....                                        | 48        |
| B. Saran .....                                          | 48        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>                              | <b>49</b> |

## DAFTAR GAMBAR

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 1. Desain <i>catalytic converter</i> (Heisler, 1998) .....                              | 5  |
| Gambar 2. Desain sudut pipa inlet dan outlet untuk memaksimalkan aliran.....                   | 6  |
| Gambar 3. <i>Road map</i> pengembangan dan aplikasi metode optimasi mulai tahun 2014-2026..... | 6  |
| Gambar 4. <i>Road map</i> pengembangan desain knalpot ( <i>muffler</i> ) tahun 2003-2025.....  | 7  |
| Gambar 5. Diagram alur proses <i>robust parameter design muffler</i> .....                     | 12 |
| Gambar 6. Diagram alur pelaksanaan penelitian .....                                            | 12 |
| Gambar 7. Skema instrumen penelitian .....                                                     | 13 |
| Gambar 8. Tren pengujian emisi CO .....                                                        | 14 |
| Gambar 9. Tren pengujian daya .....                                                            | 15 |
| Gambar 10. <i>Effect plot S/N ratio CO emission</i> .....                                      | 17 |
| Gambar 11. <i>Effect plot S/N ratio Power</i> .....                                            | 17 |
| Gambar 12. <i>Trendline</i> hasil pengujian emisi CO .....                                     | 22 |
| Gambar 13. Skema diagram energi reaksi CO menjadi CO <sub>2</sub> .....                        | 24 |
| Gambar 14. Skema tahapan reaksi katalis heterogen.....                                         | 25 |
| Gambar 15. Proses reaksi CO menjadi CO <sub>2</sub> .....                                      | 25 |
| Gambar 16. <i>Trendline</i> hasil pengujian emisi HC .....                                     | 26 |
| Gambar 17. Proses reaksi komposisi gas buang .....                                             | 27 |
| Gambar 18. Sampling H <sub>2</sub> O hasil pengujian emisi gas buang .....                     | 28 |
| Gambar 19. <i>Trendline</i> hasil pengujian emisi CO <sub>2</sub> .....                        | 29 |
| Gambar 20. <i>Trendline</i> hasil pengujian emisi O <sub>2</sub> .....                         | 29 |
| Gambar 21. Grafik pengujian konsumsi bahan bakar .....                                         | 31 |
| Gambar 22. Grafik Torsi .....                                                                  | 32 |
| Gambar 23. Grafik Daya .....                                                                   | 33 |
| Gambar 24. Grafik Temperatur .....                                                             | 34 |
| Gambar 25. Grafik Kebisingan .....                                                             | 35 |
| Gambar 26. <i>Trendline</i> hasil pengujian torsi .....                                        | 36 |
| Gambar 27. <i>Trendline</i> hasil pengujian daya .....                                         | 37 |
| Gambar 28. <i>Trendline</i> hasil pengujian emisi CO .....                                     | 38 |
| Gambar 29. Skema diagram energi reaksi CO menjadi CO <sub>2</sub> .....                        | 40 |
| Gambar 30. Skema tahapan reaksi katalis heterogen.....                                         | 41 |
| Gambar 31. Proses reaksi CO menjadi CO <sub>2</sub> .....                                      | 41 |
| Gambar 32. <i>Trendline</i> hasil pengujian emisi HC .....                                     | 42 |
| Gambar 33. Proses reaksi komposisi gas buang .....                                             | 43 |
| Gambar 34. Sampling H <sub>2</sub> O hasil pengujian emisi gas buang .....                     | 44 |
| Gambar 35. <i>Trendline</i> hasil pengujian emisi CO <sub>2</sub> .....                        | 45 |
| Gambar 36. <i>Trendline</i> hasil pengujian emisi O <sub>2</sub> .....                         | 45 |
| Gambar 37. <i>Trendline</i> hasil pengujian kebisingan.....                                    | 47 |

## DAFTAR TABEL

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 2.1 Penelitian Tentang Teknologi <i>Catalytic Converter</i> .....                         | 3  |
| Tabel 5.1 Hasil Pengolahan Data Emisi CO dan Daya .....                                         | 16 |
| Tabel 5.2 Prediksi Desain Optimum Emisi CO .....                                                | 18 |
| Tabel 5.3 Prediksi Desain Optimum Daya .....                                                    | 19 |
| Tabel 5.4 Hasil Verifikasi Prediksi Desain Optimum CO .....                                     | 20 |
| Tabel 5.5 Perbandingan Antara Hasil Prediksi dan Uji Eksperimental Desain<br>Optimum CO .....   | 20 |
| Tabel 5.6 Hasil Verifikasi Prediksi Desain Optimum Daya .....                                   | 21 |
| Tabel 5.7 Perbandingan Antara Hasil Prediksi dan Uji Eksperimental Desain<br>Optimum Daya ..... | 21 |
| Tabel 5.8 Perbandingan <i>Intial</i> dan E19 Optimum Emisi CO .....                             | 21 |
| Tabel 5.9 Perbandingan Emisi CO dengan Permen LH .....                                          | 23 |
| Tabel 5.10 Perbandingan Emisi HC dengan Permen LH .....                                         | 27 |
| Tabel 5.11 Data Konsumsi Bahan Bakar MCC STD LM dan E19 .....                                   | 30 |
| Tabel 5.12 Data Torsi MCC STD LM dan E19 .....                                                  | 31 |
| Tabel 5.13 Data Daya MCC STD LM dan E19 .....                                                   | 32 |
| Tabel 5.14 Tabel Temperatur MCC STD LM dan E19 .....                                            | 33 |
| Tabel 5.15 Kebisingan MCC STD LM dan E19 .....                                                  | 34 |
| Tabel 5.16 Perbandingan <i>Intial</i> dan E18 Optimum Daya .....                                | 35 |
| Tabel 5.17 Perbandingan Emisi CO dengan Permen LH .....                                         | 38 |
| Tabel 5.18 Perbandingan Emisi HC dengan Permen LH .....                                         | 43 |
| Tabel 5.19 Konsumsi bahan bakar MCC STD LM dan E18 .....                                        | 46 |
| Tabel 5.20 Data Kebisingan MCC STD LM dan E18 .....                                             | 46 |

# BAB I

## PENDAHULUAN

### A. Latar Belakang

Melakukan aksi nyata untuk mengatasi dampak perubahan iklim merupakan tujuan ke-13 dari tujuh belas tujuan pembangunan berkelanjutan atau lebih dikenal sebagai *the seventeen sustainable development goals (SDGs)* dan berlaku mulai tahun 2015 hingga 2030 (United Nations, 2017), (UNDP, n.d.). Program yang dicanangkan harus mengarah pada upaya strategis dalam meminimalisir efek polusi udara, khususnya emisi yang dihasilkan oleh gas buang kendaraan otomotif. Solusi cerdas tentunya sangat dibutuhkan untuk menekan jumlah emisi gas buang kendaraan bermotor. Dimana, salah satu solusi yang ditawarkan adalah dengan menerapkan teknologi *catalytic converter* yang dipasang pada knalpot kendaraan bermotor. Penerapan teknologi itu dirasa sangat tepat, mengingat 65% hingga 85% dari total emisi gas yang keluar menuju lingkungan dan tentunya emisi tersebut akan sangat berbahaya apabila dihirup oleh manusia (Masoudi et al., 2020).

Dewasa ini pabrikan otomotif lebih banyak menggunakan kelompok *platinum-group metals (PGM)* atau logam mulia seperti *Platinum (Pt)*, *Palladium (Pd)*, dan *Rhodium (Rh)* sebagai bahan dasar pembuatan *catalytic converter*, dimana logam tersebut memiliki potensi untuk mereduksi emisi gas buang antara 98 hingga 99% (Dong et al., 2015). Namun, yang menjadi kelemahan dalam penggunaan logam mulia adalah biaya pembuatan yang cukup mahal serta umumnya didesain *build up* sehingga tidak bisa dibongkar-pasang (Warju, 2013). Oleh karena itu, akhir-akhir ini banyak peneliti baik dari perguruan tinggi maupun lembaga penelitian dan pengembangan mulai beralih menggunakan *catalytic converter* berbahan dasar logam transisi (Lang et al., 2020).

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Choudhury & Deo (2014) disimpulkan bahwa penggunaan *catalytic converter* plat tembaga mampu mereduksi emisi HC sebesar 55,44%, emisi CO sebesar 62,96%, dan emisi NO<sub>x</sub> sebesar 40,41% pada kondisi beban penuh (Choudhury & Deo, 2014). Rathore, Thakur, & Deepak (2018) melakukan penelitian katalitik konverter berbahan tembaga yang dilapisi nano-partikel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan menggunakan katalitik konverter berbahan tembaga yang dilapisi nano partikel emisi CO berkurang dari 1,25 %vol menjadi 0,8 %vol dan emisi HC berkurang dari 962 ppm menjadi 862 ppm, juga emisi NO<sub>x</sub> dan CO<sub>2</sub> berkurang secara konsisten (Rathore et al., 2018). Hasil penelitian tersebut sejalan dengan penelitian Shoffan, Sumarli, & Nauri (2019) yang mengungkapkan bahwa

*catalytic converter* berbahan tembaga dengan desain tabung bundar terbukti mampu mengurangi emisi gas buang. Penurunan emisi gas buang CO terjadi sebesar 16,67%, sedangkan pengurangan emisi gas buang HC terjadi sebesar 32,54% (Shoffan et al., 2019). Selain itu, jika dipadukan dengan material lain kemampuan *catalytic converter* berbahan tembaga dalam mereduksi emisi gas buang juga menjadi lebih meningkat.

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana desain optimal dari *muffler* dengan *metallic catalytic converter* untuk menurunkan emisi gas buang, tingkat kebisingan, konsumsi bahan bakar, dan mampu meningkatkan performa mesin sepeda motor yang *robust* terhadap ketidakpastian kondisi pemakaian. Tujuan khusus penelitian ini adalah menemukan desain knalpot sepeda motor berteknologi *catalytic converter* yang optimal dalam menurunkan emisi gas buang, tingkat kebisingan, konsumsi bahan bakar, dan mampu meningkatkan performa mesin sepeda motor.

Urgensi penelitian didasarkan kenyataan bahwa meningkatnya jumlah kendaraan bermotor secara signifikan selaras dengan meningkatnya dampak negatif yang harus diterima oleh manusia (Mujaki et al., 2020). Efek dari banyaknya bahan bakar yang digunakan oleh kendaraan bermotor memiliki potensi besar menyebabkan pemanasan global. Selain itu, dihasilkan gas-gas berbahaya seperti CO, HC, NO<sub>x</sub>, Pb, SO<sub>x</sub>, dan PM yang akan menimbulkan dampak negatif terhadap kesehatan manusia dan lingkungan (Yang et al., 2015).

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### A. Peneliti *Catalytic Converter* Sebelumnya

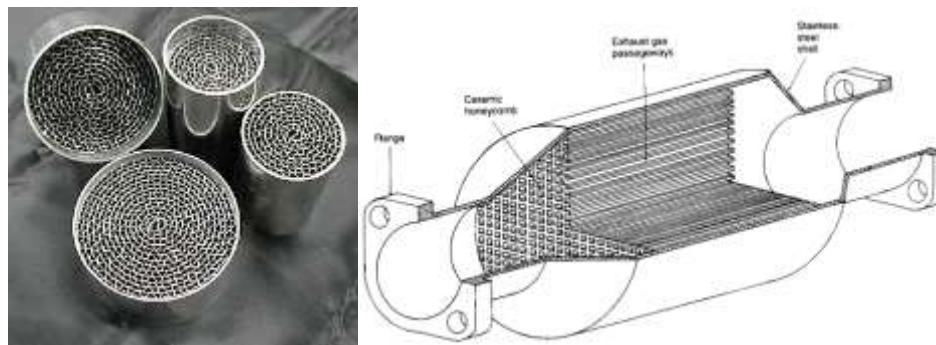
**Tabel 2.1 Penelitian Tentang Teknologi *Catalytic Converter***

| No. | Nama Peneliti                                             | Judul Penelitian                                                                                                                                         | Bahan <i>Catalytic Converter</i>                                                    | Hasil Penelitian                                                                                                                                                                                                  |
|-----|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.  | Amin, Chavda & Gadhia (2013)<br>(Amin et al., 2013)       | <i>Exhaust analysis of four stroke single cylinder diesel engine using copper based catalytic converter</i>                                              | Wiremesh berlapis tembaga (Cu)                                                      | Reduksi emisi CO dan HC masing-masing sebesar 30% dan 66%.                                                                                                                                                        |
| 2.  | Choudhury & Deo (2014)<br>(Choudhury & Deo, 2014)         | <i>An Innovative Approach for Emission Control Using Copper Plate Catalytic Converter</i>                                                                | Tembaga                                                                             | Penggunaan <i>catalytic converter</i> plat tembaga mampu mereduksi emisi HC sebesar 55,44%, emisi CO sebesar 62,96%, dan emisi nox sebesar 40,41% pada kondisi beban penuh                                        |
| 3.  | Cholilulloh & Warju (2014)<br>(Cholilulloh & Warju, 2014) | <i>Pengaruh Metallic Catalytic converter Tembaga Berlapis Krom Dan Air Induction System (Ais) Terhadap Reduksi Emisi Gas Buang Yamaha New Jupiter Mx</i> | Tembaga                                                                             | Emisi CO mampu direduksi hingga mencapai 58,19%, sedangkan emisi HC mampu direduksi hingga 36,49%                                                                                                                 |
| 4.  | Wicaksono & Warju (2014)<br>(Wicaksono & Warju, 2014)     | <i>Pengaruh catalytic converter titanium dioksida terhadap emisi gas buang sepeda motor Yamaha Vixion Lightning</i>                                      | <i>Stainless-steel wiremesh</i> yang dilapisi titanium dioksida (TiO <sub>2</sub> ) | Reduksi emisi CO dan HC rata-rata sebesar 20,96% dan 23,26%. Kemudian, terjadi peningkatan torsi dan daya mesin rata-rata sebesar 7,15% dan 6,13%. Reduksi konsumsi bahan bakar rata-rata sebesar 3,70% - 11,09%. |
| 5.  | Irawan, Purwanto, & Hadiyanto (2015)                      | <i>Optimum Design of Manganese-coated Copper Catalytic converter to Reduce</i>                                                                           | Tembaga berlapis mangan                                                             | Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan 5 sel katalis mampu                                                                                                                                                 |

| No. | Nama Peneliti                                                              | Judul Penelitian                                                                                                                                    | Bahan Catalytic Converter        | Hasil Penelitian                                                                                                                                                                                    |
|-----|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | (Bagus Irawan et al., 2015)                                                | <i>Carbon Monoxide Emissions on Gasoline Motor</i>                                                                                                  |                                  | mereduksi emisi CO sebesar 45,8%, penggunaan 10 sel katalis mampu mereduksi emisi CO sebesar 82,9%, sedangkan pada 15 sel katalis terjadi reduksi emisi CO sebesar 76,9%                            |
| 6.  | Warju, Harto, & Soenarto (2017) (Warju et al., 2017)                       | <i>The performance of chrome-coated copper as metallic catalytic converter to reduce exhaust gas emissions from spark-ignition engine</i>           | Tembaga (Cu) berlapis krom (Cr)  | Reduksi emisi CO rata-rata sebesar 95,35% dan deduksi emisi HC rata-rata sebesar 79,28%.                                                                                                            |
| 7.  | Nisa, Ratnaningrum, Megawati, and Widyastuti (2018) (Chafidz et al., 2018) | <i>Design innvovation of motorcycle muffler by applying catalytic converter based on non-noble material to reduce exhaust emission</i>              | Tembaga (Cu) dan kuningan (CuZn) | Reduksi emisi CO & HC dengan katalis Cu sebesar 46,61% dan 47,13% dan reduksi emisi CO & HC dengan katalis CuZn sebesar 47,71% dan 55,34%.                                                          |
| 8.  | Rathore, Thakur, & Deepak (2018) (Rathore et al., 2018)                    | <i>Modeling and Simulation of Four Stroke Spark Ignition Engine with Nano-Particle Coated Catalytic converter for Analysis of Exhaust Emissions</i> | Tembaga berlapis nano-partikel   | Emisi CO berkurang dari 1,25 %vol menjadi 0,8 %vol dan emisi HC berkurang dari 962 ppm menjadi 862 ppm juga, emisi nox dan CO <sub>2</sub> berkurang secara konsisten                               |
| 9.  | Shoffan, Sumarli, & Nauri (2019) (Shoffan et al., 2019)                    | <i>The effect of copper-based catalytic converter with circular tube shape on exhaust emission of Yamaha Vixion 1PA</i>                             | Tembaga                          | <i>Catalytic converter</i> berbahan tembaga dengan desain tabung bundar mampu menurunkan emisi gas buang CO terjadi sebesar 16,67%, sedangkan pengurangan emisi gas buang HC terjadi sebesar 32,54% |

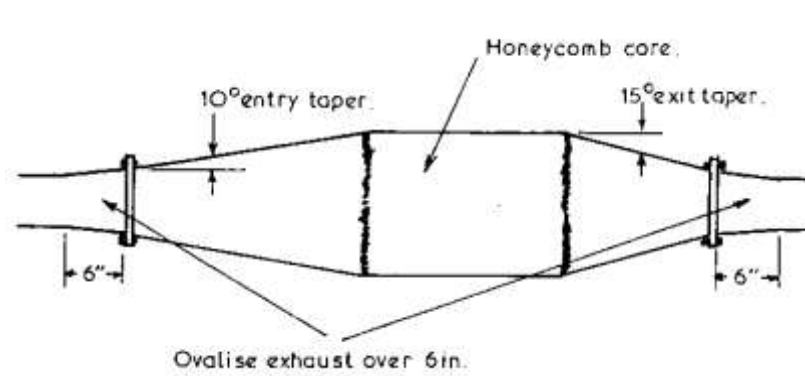
| No. | Nama Peneliti                                             | Judul Penelitian                                                                                                                                                                                                                   | Bahan <i>Catalytic Converter</i>  | Hasil Penelitian                                                                                          |
|-----|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10. | Warju & Drastiawati (2019)<br>(Warju & Drastiawati, 2019) | <i>Pengembangan Knalpot Sepeda Motor Ramah Lingkungan Berteknologi Metallic Catalytic Converter Titanium Dioksida (TiO<sub>2</sub>) Sebagai Prototipe Industri untuk Mendukung Program Langit Biru (Blue Sky Program) dan SDGs</i> | Tembaga berlapis TiO <sub>2</sub> | Emisi CO rata-rata direduksi hingga sebesar 57.27%, sedangkan emisi HC rata-rata direduksi sebesar 70.74% |

### B. *Catalytic Converter*



Gambar 1. Desain *catalytic converter* (Heisler, 1998)

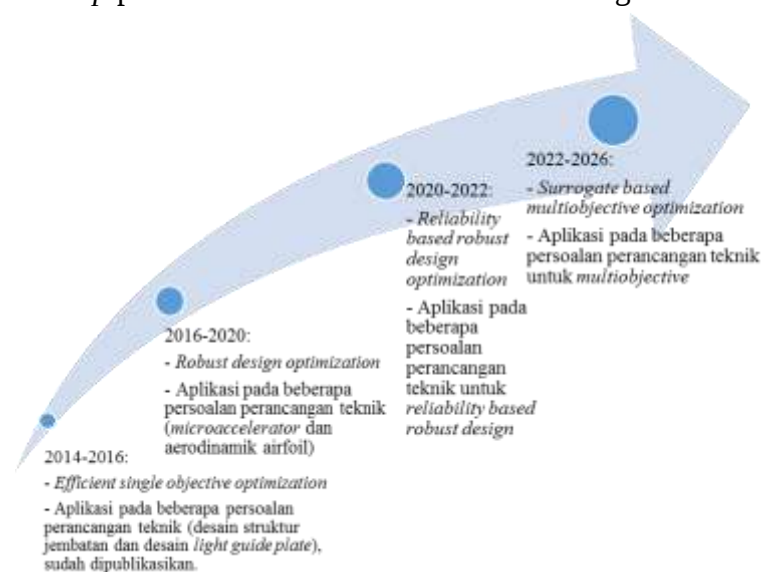
*Catalytic converter* yang terpasang pada kendaraan bermotor merupakan salah satu teknologi yang tersedia untuk memenuhi standar emisi gas buang yang semakin ketat (Taylor, 1987). Emisi gas buang kendaraan bermotor menjadi kontributor terbesar sebagai penghasil polusi udara. Pada kendaraan bermotor pipa knalpot mengeluarkan beberapa gas berbahaya seperti CO, HC, dan NO (Masoudi et al., 2020). Jika dikalkulasi, pipa knalpot mengeluarkan 65% hingga 85% dari total emisi gas yang keluar menuju lingkungan dan tentunya emisi tersebut akan sangat berbahaya apabila dihirup oleh manusia. Penggunaan *catalytic converter* pada kendaraan bermotor bertujuan untuk mereduksi emisi gas buang, dimana sebelumnya adalah gas berbahaya menjadi gas yang tidak berbahaya. Secara jelas desain dari *catalytic converter* dapat dilihat pada Gambar 2. Selain itu, desain knalpot berteknologi *catalytic converter* yang dikembangkan mengacu pada desain yang telah dibuat oleh A. Graham Bell (Bell, 1981), dimana idealnya sudut pipa *inlet* dibuat sebesar 10° dan sudut pipa *outlet* dibuat sebesar 15° sebagaimana yang ditunjukkan Gambar 2.



Gambar 2. Desain sudut pipa inlet dan outlet untuk memaksimalkan aliran

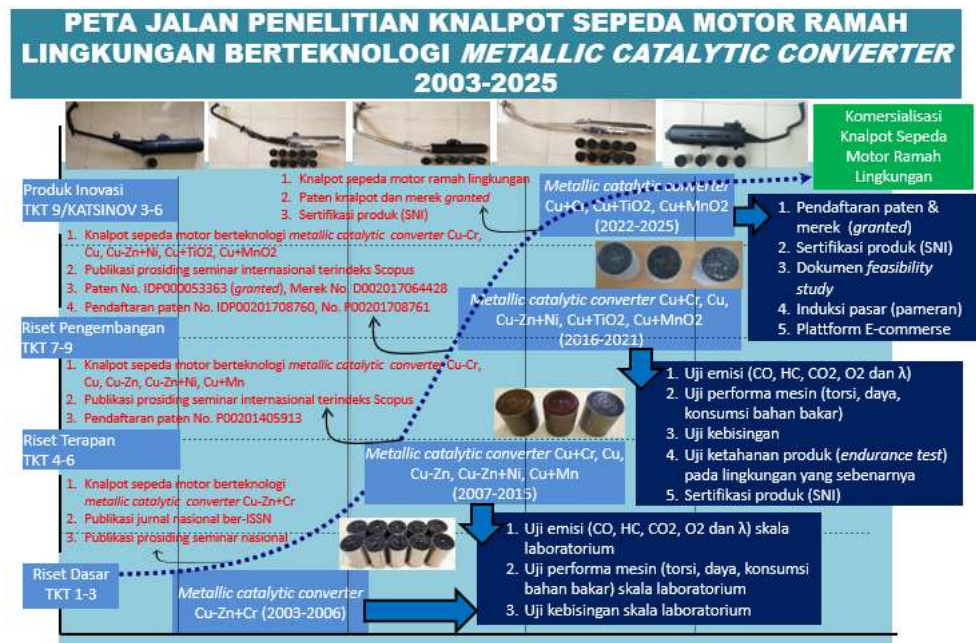
### C. Roadmap Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian aplikatif dari pengembangan metode optimasi yang telah dikembangkan sebelumnya. Sedangkan desain *muffler* telah dikembangkan pula oleh tim peneliti. *Roadmap* dalam penelitian ini terbagi 2, yakni *roadmap* pengembangan dan aplikasi metode optimasi dan *roadmap* pengembangan desain *muffler*. *Roadmap* metode optimasi telah dikembangkan sejak tahun 2014 bersama Prof. Jyh-Cheng Yu, Ph.D dari National Kaohsiung University of Science and Technology (NKUST), Taiwan dan Suprayitno, S.T., M.T., Ph.D dari Universitas Negeri Malang (UM). Topik besar penelitian ini adalah *efficient engineering optimization* mencakup metode optimasi *single* dan/atau *multiobjective*, *robust* dan/atau *reliability-based design optimization* dengan *road map* penelitian mulai tahun 2014-2026 sebagai berikut.



Gambar 3. Road map pengembangan dan aplikasi metode optimasi mulai tahun 2014-2026

Sedangkan *roadmap* pengembangan desain knalpot (*muffler*) berteknologi *metallic catalytic converter* yang dikembangkan oleh tim peneliti mulai tahun 2003-2025 sebagai berikut:



Gambar 4. Road map pengembangan desain knalpot (*muffler*) tahun 2003-2025

Keterbaruan hasil penelitian:

- Penelitian ini adalah kerjasama antara Laboratorium Pengujian Performa Mesin Jurusan Teknik Mesin FT Unesa, yang sebelumnya telah mempunyai pengalaman panjang dalam mengembangkan desain *muffler* berteknologi *metallic catalytic converter* dengan Laboratorium Optimasi Industri Jurusan Teknik Mesin FT Universitas Negeri Malang (UM), dan *Concurrent Engineering Laboratory, National Kaohsiung University of Science and Technology* (NKUST), Taiwan.
- Eksperimen akan dilakukan di Laboratorium Pengujian Performa Mesin Jurusan Teknik Mesin FT Unesa, sedangkan optimasi desain *muffler* akan dilakukan di Laboratorium Optimasi Industri Jurusan Teknik Mesin FT UM dan di *Concurrent Engineering Laboratory, National Kaohsiung University of Science and Technology* (NKUST), Taiwan.
- Desain *muffler* yang telah dilakukan sebelumnya tidak dikembangkan dengan metode optimasi yang sistematis.
- Desain *muffler* berteknologi *metallic catalytic converter* tidak didesain *robust* terhadap fluktuasi kondisi operasi (*uncertain operating conditions*).

Pada penelitian ini, knalpot (*muffler*) berteknologi *metallic catalytic converter* didesain menggunakan metode optimasi sistematis (kombinasi *Metode Taguchi* dan *Response Surface Method*) dengan mempertimbangkan ketidakpastian kondisi operasi (jenis sepeda motor dan putaran mesin sepeda motor).

### **BAB III**

## **TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN**

#### **A. Tujuan Penelitian**

Berdasarkan latarbelakang masalah di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah khusus penelitian ini adalah menemukan desain knalpot sepeda motor berteknologi *catalytic converter* yang optimal dalam menurunkan emisi gas buang, tingkat kebisingan, konsumsi bahan bakar, dan mampu meningkatkan performa mesin sepeda motor.

#### **B. Manfaat Penelitian**

Penelitian ini memiliki beberapa manfaat diantaranya sebagai berikut.

1. Sebagai salah satu solusi dalam mereduksi konsentrasi emisi gas buang yang dihasilkan oleh kendaraan bermotor, khususnya emisi kendaraan sepeda motor empat langkah.
2. Sebagai alternatif bahan katalis yang lebih murah selain yang sudah ada di pasaran.
3. Dihasilkan desain baru *catalytic converter* titanium dioksida.

## BAB IV METODE PENELITIAN

### A. Variabel penelitian dan rumusan optimasi

Penelitian ini fokus pada desain *catalytic converter* pada *muffler* (yang seperti tampak pada gambar 1) dengan variabel awal yang teridentifikasi adalah:

- Jenis material yang digunakan
- Tinggi lekukan struktur *honeycomb*, mm.
- Diameter silinder *muffler*, cm
- Panjang silinder *muffler*, cm.

Parameter-parameter lain dari desain *muffler* akan dibuat seperti pada Tabel 4.1. Output yang diukur pada setiap desain *muffler* adalah tingkat kandungan CO gas buang dan tingkat kebisingan suara yang keluar dari *muffler*. Variabel desain *muffler* dan rentang variabel seperti pada Tabel 4.1.

**Tabel 4.1 Variabel desain *muffler***

| Control Factors |                       | L1 | L2    | L3    |
|-----------------|-----------------------|----|-------|-------|
| <b>Mtl</b>      | Materials             | Cu | Cu-Zn | Cu-Cr |
| <b>Tl</b>       | Tinggi lekukan, mm    | 2  | 3     | 4     |
| <b>Ds</b>       | Diameter silinder, mm | 35 | 41    | 54    |
| <b>Ps</b>       | Panjang silinder, mm  | 60 | 80    | 100   |

*Signal-to-noise ratio* dari Metode Taguchi digunakan sebagai *quality measure* dari desain *muffler*. Adapun rumusan optimasi dari desain *muffler* adalah sebagai berikut.

$$\text{Min. (CO)} = f(\mathbf{Mtl, Tl, Ds, Ps; M, rpm}) \quad (1)$$

$$\text{Max. (Daya)} = f(\mathbf{Mtl, Tl, Ds, Ps; M, rpm}) \quad (1)$$

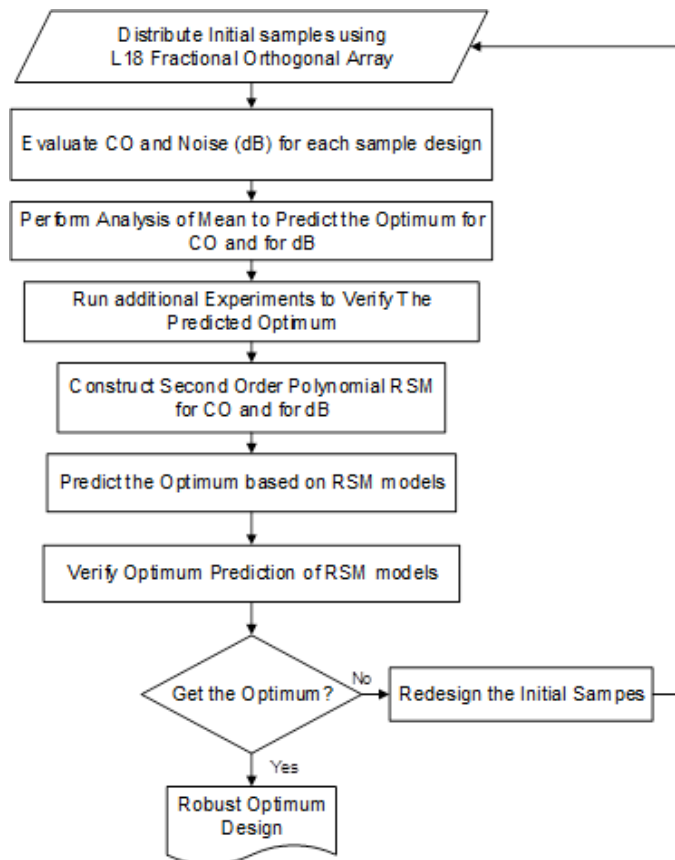
**Mtl, Tl, Ds,** dan **Ps** adalah variabel desain *muffler* seperti pada tabel 2, sedangkan *M*, dan *rpm* adalah jenis sepeda motor dan putaran mesin. Jenis sepeda motor dan putaran mesin ini dipertimbangkan sebagai kondisi ketidakpastian dalam kondisi operasionalnya (*uncertain quantities*, atau sering dikenal juga sebagai *noise factors*). Ada tiga jenis sepeda motor yang digunakan dalam penelitian ini (*moped, scuter, dan sport*). *Design of experiment* dalam penelitian ini menggunakan *L18 fractional orthogonal array* seperti tampak pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 *Orthogonal Array L<sub>18</sub> MCC*

| Parameter |       |          |        | Parameter |       |          |        | EXP | Type Moped, Matic, & Sport |    |
|-----------|-------|----------|--------|-----------|-------|----------|--------|-----|----------------------------|----|
| Material  | Curve | Diameter | Length | Material  | Curve | Diameter | Length |     | CO                         | HC |
|           |       |          |        |           | mm    | mm       | mm     |     |                            |    |
| (%Vol)    | (ppm) |          |        |           |       |          |        |     |                            |    |
| 1         | 1     | 1        | 1      | Cu        | 2     | 35       | 60     | 1   |                            |    |
| 1         | 2     | 2        | 2      | Cu        | 3     | 41       | 80     | 2   |                            |    |
| 1         | 3     | 3        | 3      | Cu        | 4     | 54       | 100    | 3   |                            |    |
| 2         | 1     | 1        | 2      | CuZn      | 2     | 35       | 80     | 4   |                            |    |
| 2         | 2     | 2        | 3      | CuZn      | 3     | 41       | 100    | 5   |                            |    |
| 2         | 3     | 3        | 1      | CuZn      | 4     | 54       | 60     | 6   |                            |    |
| 3         | 1     | 2        | 1      | CuCr      | 2     | 41       | 60     | 7   |                            |    |
| 3         | 2     | 3        | 2      | CuCr      | 3     | 54       | 80     | 8   |                            |    |
| 3         | 3     | 1        | 3      | CuCr      | 4     | 35       | 100    | 9   |                            |    |
| 1         | 1     | 3        | 3      | Cu        | 2     | 54       | 100    | 10  |                            |    |
| 1         | 2     | 1        | 1      | Cu        | 3     | 35       | 60     | 11  |                            |    |
| 1         | 3     | 2        | 2      | Cu        | 4     | 41       | 80     | 12  |                            |    |
| 2         | 1     | 2        | 3      | CuZn      | 2     | 41       | 100    | 13  |                            |    |
| 2         | 2     | 3        | 1      | CuZn      | 3     | 54       | 60     | 14  |                            |    |
| 2         | 3     | 1        | 2      | CuZn      | 4     | 35       | 80     | 15  |                            |    |
| 3         | 1     | 3        | 2      | CuCr      | 2     | 54       | 80     | 16  |                            |    |
| 3         | 2     | 1        | 3      | CuCr      | 3     | 35       | 100    | 17  |                            |    |
| 3         | 3     | 2        | 1      | CuCr      | 4     | 41       | 60     | 18  |                            |    |

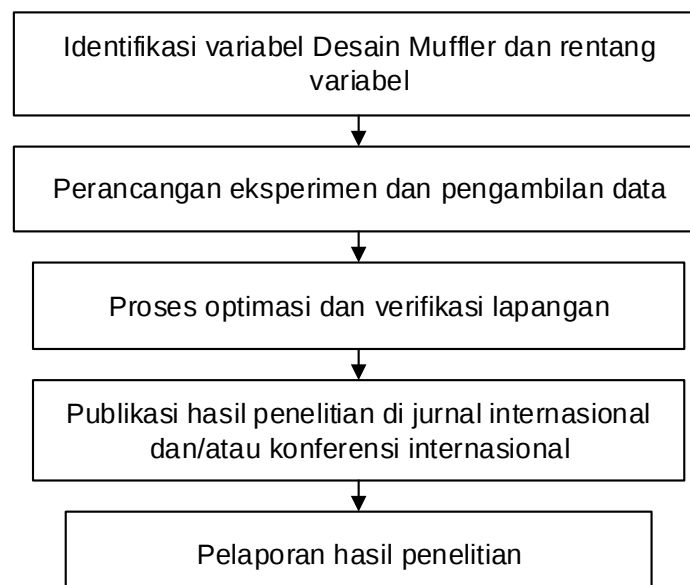
### B. Strategi optimasi (Robust parameter design)

Strategi optimasi pada desain *muffler* ini menggunakan *robust parameter design* [22]. Metode *Taguchi* yang diintegrasikan dengan *dual response surface method* diadopsi untuk mencari desain optimum [23-24]. Alur strategi optimasi seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram alur proses *robust parameter design muffler*

### C. Peralatan dan Instrumen Penelitian



Gambar 6. Diagram alur pelaksanaan penelitian

#### D. Peralatan dan Instrumen Penelitian

Instrumen penelitian adalah alat ukur dan alat uji yang digunakan untuk mendapatkan data penelitian. Peralatan dan instrumen penelitian yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah *inertia chassis dynamometer*, *fuel flow meter*, *stopwatch*, *termocouple*, *digital thermometer*, *sound level meter*, *U-tube manometer*, *exhaust gas analyzer*, dan *blower* yang terdapat di Lab. Pengujian Performa Mesin Jurusan Teknik Mesin FT UNESA.

Secara lengkap, peralatan dan instrumen penelitian yang akan digunakan seperti tampak pada gambar 11 berikut ini.



Gambar 7. Skema instrumen penelitian

#### E. Metode Pengujian

Untuk mendapatkan data penelitian yang valid dan reliabel, metode pengujian dilakukan berdasarkan standar nasional dan internasional, antara lain:

1. Pengukuran emisi gas buang sepeda motor berdasarkan SNI 09-7118.3-2005 [26].
2. Pengukuran performa mesin berdasarkan SAE J1349, yaitu *Engine Power Test Code-Spark Ignition and Compression Ignition-Net Power Rating* [27].
3. Pengukuran konsumsi bahan bakar berdasarkan SNI 7554:2010 [28].
4. Pengukuran tingkat kebisingan berdasarkan SAE J1287 yaitu *Surface Vehicle Standard "Measurement of Exhaust Sound Levels of Stationary Motorcycles"* [29]

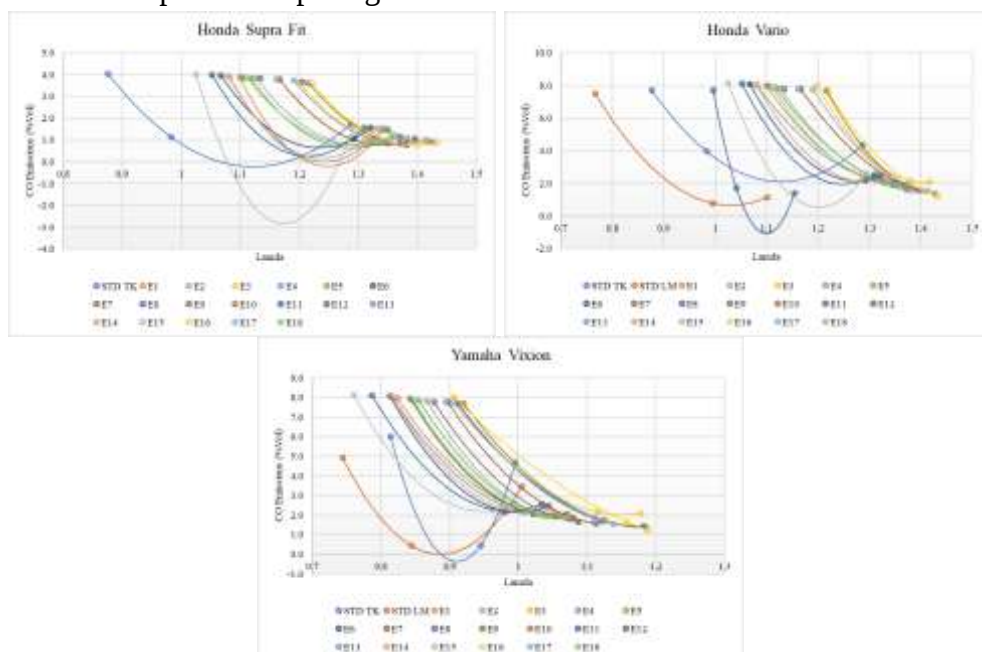
## BAB V

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Pengujian Eksperimental

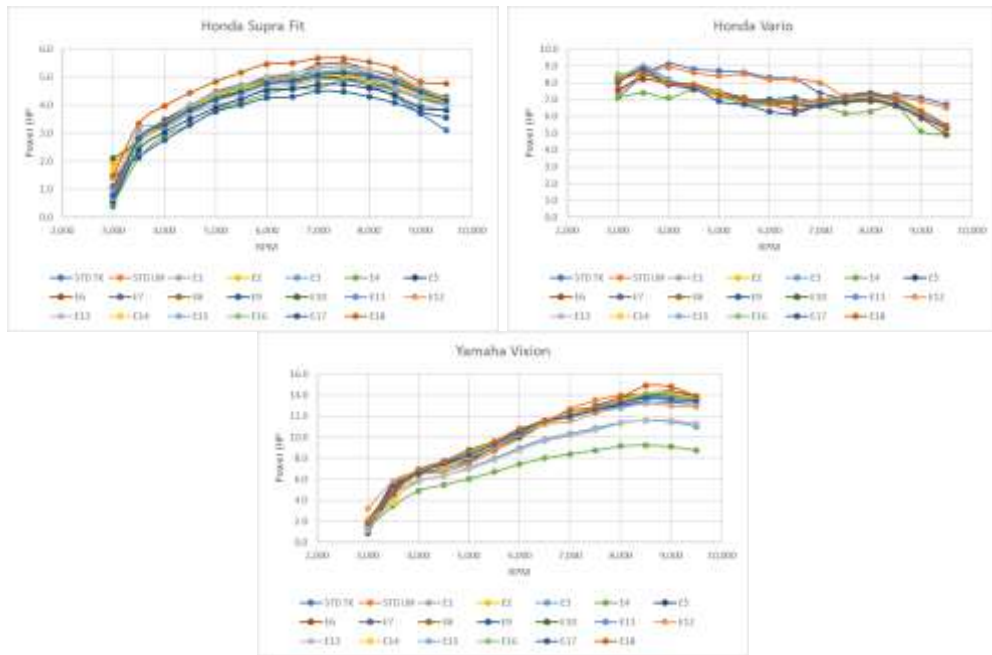
Pengujian dilakukan pada tiga jenis kendaraan yakni *sport*, *matic*, dan *supra*. Kendaraan *sport* menggunakan Yamaha Vixion Lightning, kendaraan *matic* menggunakan Honda Vario LED, sedangkan kendaraan bebek menggunakan Honda Supra Fit. Terdapat 18 desain *metallic catalytic converter* (MCC) yang diujikan baik untuk emisi gas buang maupun performa mesin. Pengujian dilaksanakan di Laboratorium Performa Mesin, Universitas Negeri Surabaya. Hasil pengujian emisi ditunjukkan pada Lampiran 1, sedangkan hasil pengujian performa mesin ditunjukkan pada Lampiran 2.

Berdasarkan hasil pengujian dapat dinyatakan bahwa seluruh desain MCC mampu menurunkan emisi CO jika dibandingkan dengan knalpot standar. Namun dari 18 desain, penurunan terbaik ada pada desain eksperimen 16 yakni untuk supra sebesar 30%, vario 44%, dan Vixion sebesar 21%. Selain itu, pada supra desain eksperimen 10 juga menunjukkan penurunan terbaik yaitu sebesar 10%. Desain eksperimen 16 terbuat dari material CuCr, tinggi lekukan 2 mm, diameter sebesar 54 mm, dan panjang 80 mm. Secara detail, trend hasil uji emisi CO dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 8. Tren pengujian emisi CO

Teknologi MCC juga terbukti dapat meningkatkan daya yang dihasilkan oleh sepeda motor Supra, Vario, dan Vixion. Peningkatan daya terbaik yakni ada pada knalpot eksperimen 18 dengan persentase penurunan sebesar 21%. Knalpot eksperimen 18 terdiri dari bahan CuCr, tinggi lekukan 4 mm, dengan diameter sebesar 41 mm, dan panjang 60 mm. Secara detail, trend hasil pengujian daya dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 9. Tren pengujian daya

## B. Optimasi

Hasil pengujian emisi CO dan daya dari desain L18 yang telah diperoleh kemudian digunakan untuk menentukan nilai rata-rata, standar deviasi dari setiap hasil eksperimen. Setelah nilai rata-rata dan standar deviasi diperoleh, maka dilanjutkan pada tahap perhitungan nilai S/N rasio, dimana perhitungan S/N rasio untuk emisi CO adalah *smaller the better* dan untuk daya adalah *larger the better*. Artinya, semakin kecil nilai CO yang didapatkan semakin baik sedangkan semakin besar nilai daya maka semakin baik (Ginting & Tambunan, 2018). Perhitungan *smaller the better* ditunjukkan melalui persamaan 3 sedangkan perhitungan *larger the better* ditunjukkan melalui persamaan 4.

$$S/N_{STB} = -10 \cdot \log_{10}(\bar{y}^2 + s^2) \quad (3)$$

$$S/N_{LTB} = -10 \cdot \log_{10} \left( \frac{1}{\bar{y}^2} \left( 1 + \frac{3s^2}{\bar{y}^2} \right) \right) \quad (4)$$

Nilai S/N rasio yang didapatkan, kemudian dapat dijadikan tolak ukur dalam menentukan tingkat kebagusan dari suatu desain eksperimen sesuai dengan *setting* parameter yang telah digunakan. Dalam hal ini adalah 18 desain eksperimen yang telah di-*setting* menggunakan desain full faktorial *Orthogonal Array*. Lebih rinci, hasil perhitungan nilai *mean*, standar deviasi, dan S/N rasio ditunjukkan dalam Tabel 5.2.

**Tabel 5.1 Hasil Pengolahan Data Emisi CO dan Daya**

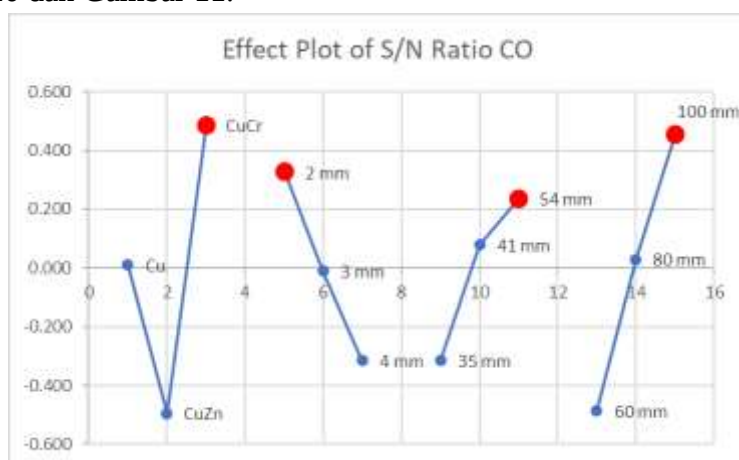
| EXP    | CO     |       |       | Daya   |       |       | Mean |      | STDEV |      | SNR     |        |
|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|------|------|-------|------|---------|--------|
|        | Vixion | Vario | Supra | Vixion | Vario | Supra | CO   | Daya | CO    | Daya | CO      | Daya   |
| STD LM | 2,94   | 3,16  | 0,00  | 9,94   | 7,87  | 0,00  | 2,03 | 5,94 | 1,76  | 5,25 | -8,601  | 10,232 |
| STD TK | 3,72   | 5,35  | 2,30  | 9,90   | 7,85  | 3,86  | 3,79 | 7,20 | 1,52  | 3,07 | -12,222 | 15,265 |
| 1      | 2,13   | 4,05  | 3,59  | 9,84   | 7,23  | 3,92  | 3,25 | 7,00 | 1,00  | 2,97 | -10,642 | 15,025 |
| 2      | 1,97   | 3,85  | 3,39  | 9,96   | 7,16  | 4,14  | 3,07 | 7,09 | 0,98  | 2,91 | -10,162 | 15,231 |
| 3      | 1,82   | 3,68  | 3,07  | 8,44   | 7,21  | 4,19  | 2,86 | 6,61 | 0,95  | 2,18 | -9,577  | 15,181 |
| 4      | 2,16   | 4,09  | 3,63  | 6,91   | 6,57  | 3,78  | 3,29 | 5,75 | 1,01  | 1,72 | -10,737 | 14,169 |
| 5      | 1,97   | 3,89  | 3,41  | 9,84   | 7,19  | 3,78  | 3,09 | 6,94 | 1,00  | 3,04 | -10,236 | 14,849 |
| 6      | 2,20   | 4,26  | 4,33  | 10,04  | 6,86  | 4,33  | 3,59 | 7,08 | 1,21  | 2,86 | -11,581 | 15,267 |
| 7      | 1,90   | 3,75  | 3,12  | 9,93   | 7,17  | 4,16  | 2,92 | 7,09 | 0,94  | 2,89 | -9,746  | 15,253 |
| 8      | 1,79   | 3,62  | 3,06  | 10,00  | 7,19  | 4,15  | 2,82 | 7,12 | 0,94  | 2,92 | -9,465  | 15,265 |
| 9      | 1,95   | 3,79  | 3,33  | 9,94   | 7,21  | 3,61  | 3,02 | 6,92 | 0,96  | 3,17 | -10,025 | 14,682 |
| 10     | 1,76   | 3,58  | 3,01  | 9,92   | 7,17  | 4,13  | 2,78 | 7,07 | 0,93  | 2,90 | -9,354  | 15,223 |
| 11     | 2,21   | 4,30  | 3,72  | 9,94   | 7,16  | 4,20  | 3,41 | 7,10 | 1,08  | 2,87 | -11,077 | 15,291 |
| 12     | 2,11   | 4,01  | 3,55  | 9,81   | 7,16  | 4,16  | 3,22 | 7,04 | 0,99  | 2,82 | -10,560 | 15,244 |
| 13     | 1,92   | 3,75  | 3,19  | 8,38   | 7,16  | 4,29  | 2,95 | 6,61 | 0,94  | 2,10 | -9,822  | 15,249 |
| 14     | 2,18   | 4,18  | 3,65  | 9,90   | 7,16  | 4,15  | 3,34 | 7,07 | 1,04  | 2,88 | -10,871 | 15,234 |
| 15     | 2,26   | 4,32  | 3,77  | 9,84   | 7,14  | 4,06  | 3,45 | 7,01 | 1,07  | 2,89 | -11,158 | 15,126 |
| 16     | 1,76   | 3,46  | 2,99  | 10,09  | 7,11  | 4,17  | 2,74 | 7,13 | 0,88  | 2,96 | -9,172  | 15,247 |
| 17     | 1,87   | 3,73  | 3,10  | 9,97   | 6,94  | 4,12  | 2,90 | 7,01 | 0,95  | 2,93 | -9,685  | 15,083 |
| 18     | 2,03   | 3,95  | 3,52  | 10,34  | 7,19  | 4,71  | 3,17 | 7,42 | 1,01  | 2,82 | -10,430 | 15,836 |

Dari data pada Tabel 5.2, diketahui bahwa desain terbaik MCC berdasarkan perhitungan S/N rasio ditemukan pada eksperimen 16 untuk terbaik emisi CO dan eksperimen 18 untuk terbaik daya. Eksperimen 16 menghasilkan nilai rata-rata emisi CO dari tiga kendaraan sebesar 2,74, standar deviasi sebesar 0,88, dengan nilai S/N rasio sebesar -9.172. Sementara itu, eksperimen 18 menghasilkan nilai rata-rata daya dari tiga kendaraan sebesar 7,42, standar deviasi sebesar 2,82, dengan nilai S/N rasio sebesar 15,836.

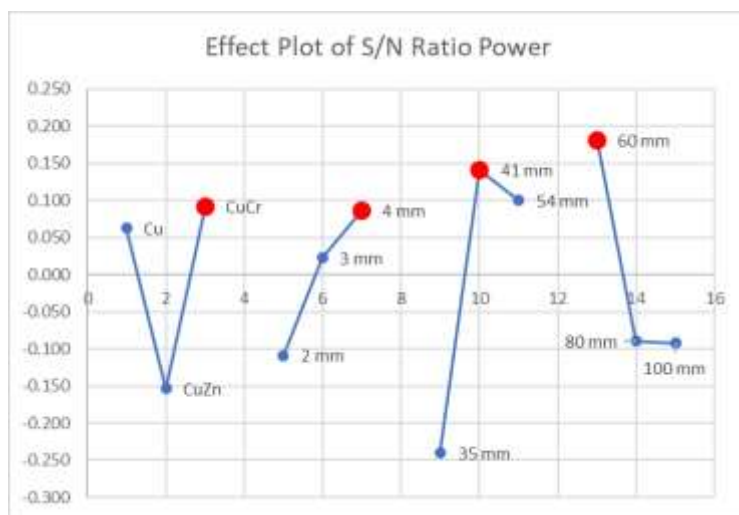
Dua desain tersebut, merupakan desain terbaik berdasarkan hasil pengolahan data, dimana untuk memastikan apakah kedua desain tersebut benar-benar yang terbaik untuk emisi CO dan daya maka dilakukan analisis lebih lanjut. Analisis yang digunakan adalah analisis efek plot S/N rasio. Analisis efek plot S/N rasio digunakan untuk menggambarkan suatu faktor terhadap suatu output, dalam penelitian ini efek plot digunakan untuk mewakili

setiap variasi parameter MCC dari tiga level dengan empat parameter terkontrol (Tabel 4.1).

Pada umumnya, efek plot digambarkan dalam bentuk garis dimana jika garis yang ditunjukkan memiliki kecenderungan mendatar maka dapat dinyatakan bahwa output pada setiap parameter tidak mengalami perubahan. Sebaliknya, jika garis memiliki kecenderungan miring disalah satu output maka terdapat perubahan yang signifikan pada parameter tertentu (Mitra et al., 2016). Lebih rinci, hasil analisis efek plot dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 10 dan Gambar 11.



Gambar 10. *Effect plot S/N ratio CO emission*



Gambar 11. *Effect plot S/N ratio Power*

Berdasarkan Gambar 10, dapat diketahui bahwa emisi CO yang dihasilkan oleh tiga jenis kendaraan mampu diturunkan (reduksi) secara optimum jika menggunakan kombinasi MCC Mtl 3, Tl 1, Ds 3, dan Ps 3. Artinya metode robust parameter design memprediksi bahwa emisi CO dapat

diturunkan secara optimum apabila menggunakan kombinasi MCC yang terdiri dari material CuCr, tinggi lekukan 2 mm, diameter silinder 54 mm, dengan panjang silinder 100 mm. Kemudian Gambar 11 menunjukkan bahwa daya yang dihasilkan oleh tiga jenis kendaraan mampu ditingkatkan secara optimum jika menggunakan kombinasi MCC Mtl 3, Tl 3, Ds 2, dan Ps 1. Artinya metode robust parameter design memprediksi bahwa daya dapat ditingkatkan secara optimum apabila menggunakan kombinasi MCC yang terdiri dari material CuCr, tinggi lekukan 4 mm, diameter silinder 41 mm, dengan panjang silinder 60 mm.

### C. Prediksi Parameter Optimum MCC

Merujuk paa hasil efek plot yang telah dihasilkan, maka dapat kita ketahui bahwa kombinasi dari masing-masing parameter MCC yang digunakan memberikan pengaruh positif terhadap penurunan emisi CO berdasarkan hasil prediksi. Prediksi kombinasi (desain) optimal MCC yang mampu menurunkan emisi CO secara optimum dapat dilihat pada Tabel 5.3.

**Tabel 5.2 Prediksi Desain Optimum Emisi CO**

| Desain Optimum Emisi CO | Materials | Tinggi lekukan | Diameter silinder | Panjang silinder |
|-------------------------|-----------|----------------|-------------------|------------------|
|                         | Level 3   | Level 1        | Level 3           | Level 3          |
|                         | CuCr      | 2 mm           | 54 mm             | 100 mm           |

Tabel 5.3 menunjukkan hasil prediksi desain optimum emisi CO yang dihasilkan, sehingga untuk mengetahui keakuratan prediksi diperlukan verifikasi melalui pengujian eksperimental di Laboratorium. Selain itu, perlu juga dilakukan prediksi nilai S/N rasio menggunakan *addictive predictive model* sebelum dilakukan uji eksperimental. Hal tersebut bertujuan untuk mengukur seberapa akurat nilai S/N rasio dari emisi CO yang dihasilkan. Besarnya nilai S/N rasio dari emisi CO melalui metode pendekatan dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan 3. Selain itu, nilai S/N rasio daya yang dihasilkan dari kombinasi yang ditunjukkan melalui Tabel 5.3, juga dapat diukur menggunakan persamaan tersebut.

$$S/N_{pre} = \mu + Mtl_{mn} + Tl_{mn} + Ds_{mn} + Ps_{mn} \quad (3)$$

Dimana,

$S/N_{pre}$  = prediksi S/N rasio optimum

$\mu$  = rata-rata sistem

$Mtl_{mn}$  = *main effect* material (Mtl) pada *level* n

$Tl_{mn}$  = *main effect* tinggi lekukan (tl) pada *level* n

$Ds_{mn}$  = *main effect* diameter silinder (Ds) pada level n

$Mtl_{mn}$  = *main effect* Panjang silinder (Ps) pada level n

Berdasarkan hasil data dari Tabel 5.3 dapat dihitung nilai prediksi dari S/N rasio emisi CO dengan menggunakan Persamaan 3 sebagai berikut.

$$S/N_{pre\_3133\_CO} = \mu + Mtl_{m3} + Tl_{m1} + Ds_{m3} + Ps_{m3}$$

$$S/N_{pre\_3133\_CO} = -10.239 + 0.485 + 0.327 + 0.235 + 0.456$$

$$S/N_{pre\_3133\_CO} = -8.736$$

$$S/N_{pre\_3133\_daya} = \mu + Mtl_{m3} + Tl_{m1} + Ds_{m3} + Ps_{m3}$$

$$S/N_{pre\_3133\_daya} = 15.137 + 0.091 + (-0.109) + 0.100 + (-0.092)$$

$$S/N_{pre\_3133\_daya} = 15.127$$

**Tabel 5.3 Prediksi Desain Optimum Daya**

| Desain Optimum Daya | Materials | Tinggi lekukan | Diameter silinder | Panjang silinder |
|---------------------|-----------|----------------|-------------------|------------------|
|                     | Level 3   | Level 3        | Level 2           | Level 1          |
|                     | CuCr      | 4 mm           | 41 mm             | 60 mm            |

Tabel 5.3 menunjukkan hasil prediksi desain optimum daya yang dihasilkan dari sisi prediksi, sehingga untuk mengetahui keakuratan prediksi diperlukan verifikasi melalui pengujian eksperimental di Laboratorium. Selain itu, prediksi nilai S/N rasio juga perlu digunakan sebelum dilakukan uji eksperimental. Hal tersebut bertujuan untuk mengukur seberapa akurat nilai S/N rasio dari daya yang dihasilkan. Besarnya nilai S/N rasio dari daya melalui metode pendekatan dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan 3. Selain itu, nilai S/N rasio dari emisi CO yang dihasilkan juga dapat menggunakan persamaan tersebut. Lebih lanjut, proses perhitungan prediksi nilai S/N rasio dapat

$$S/N_{pre\_3321\_daya} = \mu + Mtl_{m3} + Tl_{m1} + Ds_{m3} + Ps_{m3}$$

$$S/N_{pre\_3321\_daya} = 15.137 + 0.091 + 0.086 + 0.141 + 0.181$$

$$S/N_{pre\_3321\_daya} = 15.636$$

$$S/N_{pre\_3321\_CO} = \mu + Mtl_{m3} + Tl_{m1} + Ds_{m3} + Ps_{m3}$$

$$S/N_{pre\_3321\_CO} = -10.239 + 0.485 + (-0.316) + 0.080 + (-0.486)$$

$$S/N_{pre\_3321\_CO} = -10.476$$

#### D. Verifikasi Hasil

Setelah proses perhitungan prediksi desain optimum untuk CO dan daya telah dilakukan, maka tahapan selanjutnya adalah melakukan verifikasi melalui uji eksperimental di Laboratorium. Uji eksperimental dilakukan pada tiga jenis kendaraan yakni *sport* (Yamaha Vixion), *matic* (Honda Vario Esp), dan bebek (Honda Supra Fit). Lebih lanjut, hasil uji eksperimental desain optimum CO disajikan pada Tabel berikut.

**Tabel 5.4 Hasil Verifikasi Prediksi Desain Optimum CO**

| Mtl   | Tl    | Ds    | Ps     | Mean |      | STDEV |      | S/N Ratio |        |
|-------|-------|-------|--------|------|------|-------|------|-----------|--------|
|       |       |       |        | CO   | Daya | CO    | Daya | CO        | Daya   |
| lvl 3 | lvl 1 | lvl 3 | lvl 3  | 2.66 | 7.11 | 0.89  | 2.92 | -8.973    | 15.269 |
| CuCr  | 2 mm  | 54 mm | 100 mm |      |      |       |      |           |        |

Berdasarkan hasil uji eksperimental, diketahui bahwa desain optimum emisi CO yang dihasilkan melalui proses optimasi memiliki nilai S/N rasio emisi CO yang lebih baik bila dibandingkan dengan 18 desain dari L18. Oleh karena itu, dapat dinyatakan bahwa desain optimal emisi CO yang didapatkan berdasarkan metode *robust parameter design* terbukti akurat sesuai dengan prediksi. Apabila dilakukan analisis lebih lanjut, dengan cara membandingkan antara hasil prediksi dengan hasil uji eksperimental maka hasilnya dapat dilihat pada Tabel berikut.

**Tabel 5.5 Perbandingan Antara Hasil Prediksi dan Uji Eksperimental Desain Optimum CO**

| Output    |    | Prediksi | Eksperimental | Error |
|-----------|----|----------|---------------|-------|
| S/N Rasio | CO | -8,736   | -8,973        | 2,6%  |
|           | HP | 15,127   | 15,269        | 0,9%  |

Merujuk pada Tabel 5.6 dapat kita lihat bahwa nilai S/N rasio emisi CO yang dihasilkan melalui uji eksperimental sebesar -8,973 memiliki kecenderungan lebih baik dibandingkan dengan nilai S/N rasio prediksi yakni sebesar -8,736. Namun, hasil prediksi masih tergolong baik karena tingkat error yang dihasilkan hanya sebesar 2,6%. Lebih lanjut, dari desain optimum CO ini juga menghasilkan nilai daya yang cukup presisi. Ini dikarenakan tingkat *error* yang dihasilkan antara hasil prediksi dan eksperimental hanya sebesar 0,9%, dimana S/N rasio daya hasil prediksi sebesar 15,127 sedangkan S/N rasio daya hasil uji eksperimental sebesar 15,269.

Selanjutnya, verifikasi desain juga dilakukan pada desain optimum daya, dimana hasil uji eksperimental disajikan pada Tabel berikut.

**Tabel 5.6 Hasil Verifikasi Prediksi Desain Optimum Daya**

| Mtl   | Tl    | Ds    | Ps    | Mean |      | STDEV |      | S/N Ratio |        |
|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|-----------|--------|
|       |       |       |       | CO   | Daya | CO    | Daya | CO        | Daya   |
| Lvl 3 | Lvl 3 | Lvl 2 | Lvl 1 | 3,17 | 7,42 | 1,01  | 2,82 | -10,430   | 15,836 |
| CuCr  | 4 mm  | 41 mm | 60 mm |      |      |       |      |           |        |

Berdasarkan hasil uji eksperimental, diketahui bahwa desain optimum daya yang dihasilkan terakomodir dalam 18 desain dari L18, desain optimum daya ditunjukkan melalui hasil eksperimen 18. Oleh karena itu, dapat dinyatakan bahwa desain optimal daya yang didapatkan berdasarkan metode *robust parameter design* terbukti akurat sesuai dengan prediksi. Apabila dilakukan analisis lebih lanjut, dengan cara membandingkan antara hasil prediksi dengan hasil uji eksperimental maka hasilnya dapat dilihat pada Tabel berikut.

**Tabel 5.7 Perbandingan Antara Hasil Prediksi dan Uji Eksperimental Desain Optimum Daya**

| Output    |    | Prediksi | Eksperimental | Error |
|-----------|----|----------|---------------|-------|
| S/N Rasio | CO | -10.430  | -10.476       | 0.4%  |
|           | HP | 15.836   | 15.636        | -1.3% |

Merujuk pada Tabel 5.8 dapat kita lihat bahwa nilai S/N rasio daya yang dihasilkan melalui uji eksperimental sebesar 15.836 memiliki kecenderungan lebih baik dibandingkan dengan nilai S/N rasio prediksi yakni sebesar 15.636. Hasil prediksi masuk kategori akurat karena tingkat error yang dihasilkan hanya sebesar 0.4%. Lebih lanjut, dari desain optimum daya ini juga menghasilkan nilai emisi CO yang cukup akurat. Ini dikarenakan tingkat *error* yang dihasilkan antara hasil prediksi dan eksperimental hanya sebesar -1.3%, dimana S/N rasio daya hasil prediksi sebesar -10.430 sedangkan S/N rasio daya hasil uji eksperimental sebesar -10.476.

#### E. Peningkatan Hasil Optimasi Terhadap Emisi CO

Setelah diperoleh hasil dari desain optimum emisi CO atau eksperimen 19 (E19), maka tahap selanjutnya dilakukan perbandingan hasil antara MCC standar logam mulia (STD LM) dan E19. Hasil dari perbandingan E19 dan STD LM dapat dilihat pada Tabel 5.9.

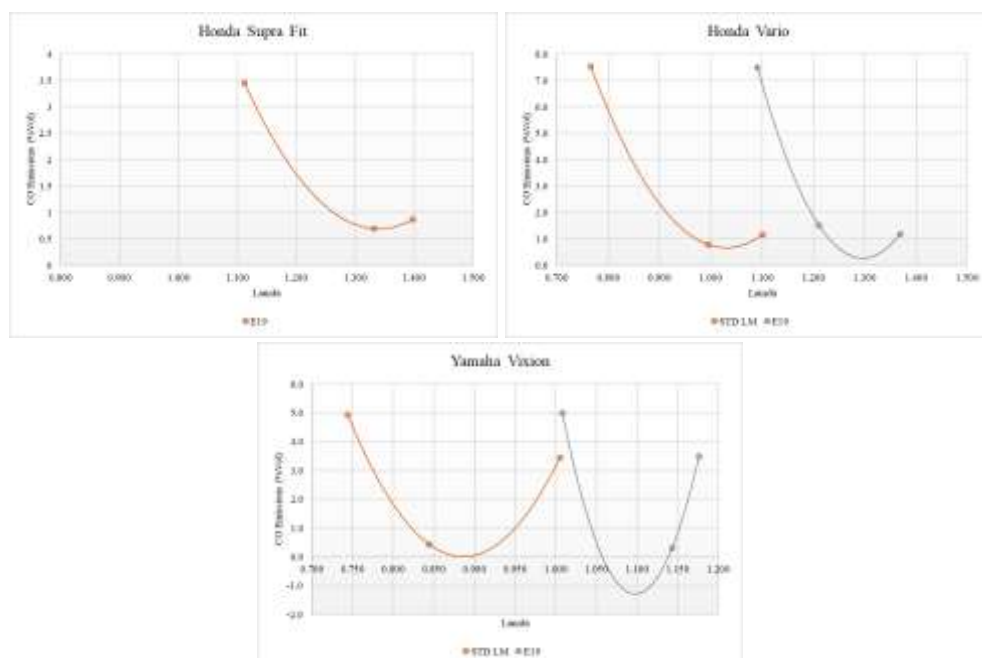
**Tabel 5.8 Perbandingan *Intial* dan E19 Optimum Emisi CO**

|                | STD LM | E19    | Gain   |
|----------------|--------|--------|--------|
| S/N Rasio CO   | -8.601 | -8.973 | -0.372 |
| S/N Rasio Daya | 10.232 | 15.269 | 5.037  |

Berdasarkan Tabel 5.9 dapat dilihat bahwa *gain* merupakan selisih dari E19 dengan STD LM. Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa E19 tidak dapat mengalahkan STD LM dalam hal kemampuan untuk menurunkan emisi gas buang. Hal tersebut merupakan hal yang wajar karena STD LM menggunakan bahan yang berasal dari logam mulia. Khivantsev et al. (2020) menjelaskan bahwa katalis yang berasal dari bahan logam mulia memiliki kemampuan untuk mereduksi emisi CO hingga 99%, sedangkan untuk emisi HC mampu direduksi hingga 95%.

Namun, jika dilihat dari selisihnya yang hanya terpaut -0.372 tentunya E19 dapat menjadi pilihan alternatif, keunggulan lain dari desain ini adalah harga jual yang relatif murah dengan ketersediaan bahan yang melimpah. Dari sisi emisi CO, STD LM cenderung lebih baik dari E19. Namun, jika dilihat dari nilai daya yang dihasilkan, E19 lebih unggul dengan selisih 5.037 dibandingkan dengan STD LM. Lebih detail, perbandingan *intial* dan E19 optimum emisi CO dapat dilakukan melalui hasil uji eksperimentalnya.

Sesuai dengan hasil prediksi, STD LM cenderung lebih unggul dalam menurunkan emisi CO dibandingkan dengan E19. Hasil ini diperkuat dengan hasil eksperimen dimana STD LM cenderung mendominasi E19 dalam hal penurunan emisi CO. Lebih detail, tren penurunan emisi CO dari hasil eksperimen masing-masing jenis kendaraan ditunjukkan melalui Gambar 12.



Gambar 12. *Trendline* hasil pengujian emisi CO

Dari data pada Lampiran 1 menunjukkan bahwa pada putaran *idle* emisi CO yang dihasilkan oleh STD LM sebesar 1.16 %Vol untuk Vario dan 3.45

%Vol untuk Vixion. Pada E19 emisi CO yang dihasilkan pada putaran *idle* masing-masing sebesar 0,87 %Vol untuk kendaraan Supra Fit, 1,18 %Vol untuk kendaraan Vario, dan 3,49 % Vol untuk kendaraan Vixion. Hasil tersebut, jika dikaitkan dengan Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup nomor 4 tahun 2009 tentang ambang batas emisi gas buang kendaraan bermotor untuk kendaraan bermotor tipe L (sepeda motor) dapat dilihat pada Tabel 5.9 berikut ini.

**Tabel 5.9 Perbandingan Emisi CO dengan Permen LH**

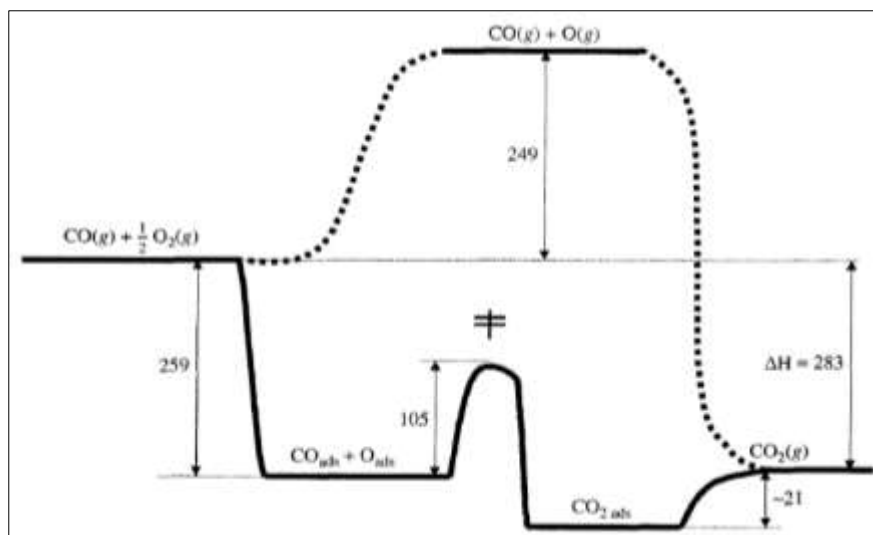
| MCC    | Kendaraan | Hasil      | Ambang Batas | Keterangan      |
|--------|-----------|------------|--------------|-----------------|
| STD LM | Vixion    | 3,45 %Vol  | 4,5 %Vol     | Lulus Uji Emisi |
|        | Vario     | 1,16 %Vol  |              | Lulus Uji Emisi |
| E19    | Vixion    | 3,49 % Vol |              | Lulus Uji Emisi |
|        | Vario     | 1,18 %Vol  |              | Lulus Uji Emisi |
|        | Supra Fit | 0,87 %Vol  |              | Lulus Uji Emisi |

Jadi, dapat disimpulkan bahwa emisi CO yang terukur pada keseluruhan jenis MCC dari tiga jenis kendaraan masuk pada kategori lulus uji emisi berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup. Ini dikarenakan keseluruhan jenis MCC dari tiga jenis kendaraan cenderung menghasilkan emisi CO di bawah ambang batas yakni dibawah 4,5 %Vol.

Berdasarkan data hasil pengujian dan analisa emisi CO dari keseluruhan jenis MCC dari tiga jenis kendaraan, diketahui bahwa tinggi dan rendahnya lekukan sangat berpengaruh terhadap hasil reduksi emisi CO. Faktor penting lain yang mempengaruhi hasil reduksi emisi CO adalah bahan dari MCC. Hasil tersebut dibuktikan dari hasil reduksi emisi CO optimum yang didapatkan pada E10. Sejalan dengan hal tersebut, Warju (2013) mengemukakan bahwa reaksi katalitik pada katalis padat terjadi pada permukaan katalis, dan semakin luas permukaan katalis semakin cepat laju reaksinya. Sehingga konsentrasi produk yang dihasilkan semakin rendah. Reduksi emisi CO yang dilakukan oleh MCC selain disebabkan oleh luas permukaan juga dipengaruhi oleh faktor temperatur.

Emisi CO dapat berubah menjadi CO<sub>2</sub> dengan cara bereaksi dengan O<sub>2</sub> atau NO<sub>x</sub>, namun hal tersebut akan membutuhkan temperatur yang lebih tinggi, yaitu 700°C. Temperatur maksimal yang paling efektif mereduksi CO didapat pada knalpot eksperimen 19 berbahan CuCr lekukan 2 mm diameter 54 dan panjang 100 mm dengan suhu 521,4°C, sehingga tidak memerlukan suhu terlalu tinggi untuk mengoksidasi CO menjadi CO<sub>2</sub>. Pernyataan tersebut, sejalan dengan teori Somorjai (1994) yang menyatakan bahwa sejumlah energi minimum yang dibutuhkan untuk mendukung terjadinya reaksi kimia, disebut energi aktivasi. Sehingga proses oksidasi dari CO + ½O<sub>2</sub> menjadi CO<sub>2</sub> pada

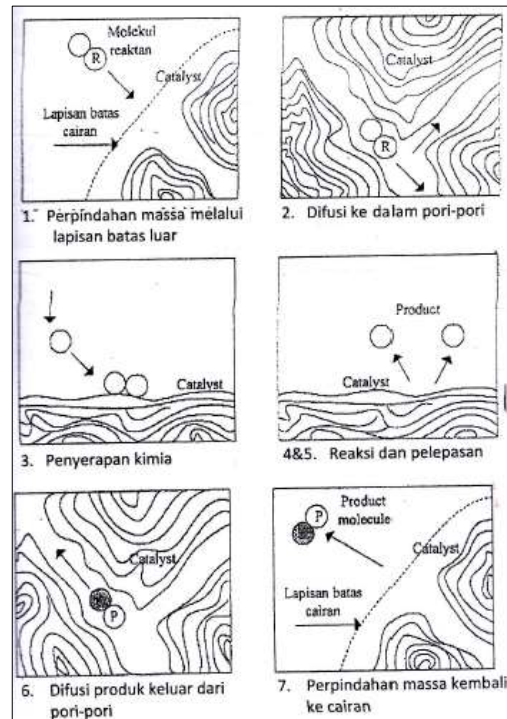
Gambar 13 di bawah menjadi lebih cepat tercapai. Akibatnya, terjadi reduksi emisi CO yang cukup signifikan pada MCC STD LM jika dibandingkan dengan E19. Gambar 13 di bawah ini adalah skema diagram energi oksidasi CO menjadi CO<sub>2</sub>.



Gambar 13. Skema diagram energi reaksi CO menjadi CO<sub>2</sub>  
Sumber: G. Ertl (1983:245)

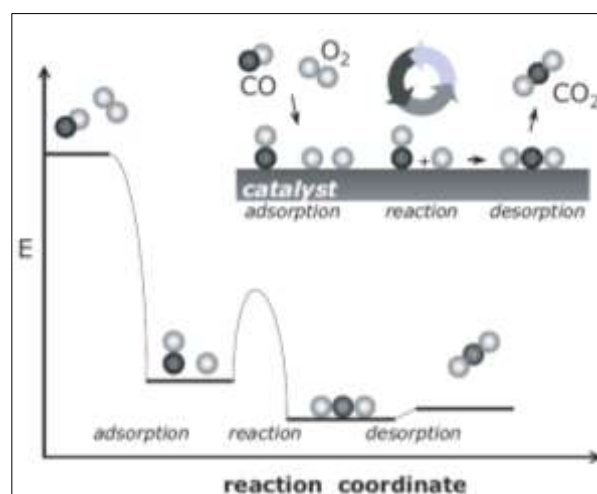
Pada Gambar 13 di atas dapat dilihat bahwa, katalis memfasilitasi reaksi dengan memberikan energi aktivasi yang lebih rendah (alur garis utuh) untuk memisahkan molekul oksigen menjadi atom oksigen. Sedangkan untuk mereaksikan molekul CO dan atom O dibutuhkan energi 105 kJ mol<sup>-1</sup> dan desorpsi molekul CO<sub>2</sub> pada akhir reaksi hanya 21 kJ mol<sup>-1</sup>. Alur reaksi tanpa katalis (garis putus-putus) secara ekstrim menunjukkan bahwa untuk mereaksikan CO menjadi CO<sub>2</sub> dibutuhkan energi yang lebih tinggi, yaitu 249 kJ mol<sup>-1</sup>. Jika kita bandingkan antara reaksi tanpa katalis dan dengan katalis, dapat dilihat bahwa reaksi akan sulit dilakukan jika tanpa katalis karena membutuhkan energi aktivasi yang lebih tinggi. Katalis mampu memisahkan molekul O<sub>2</sub> menjadi atom O. Hal inilah yang menyebabkan molekul CO mudah direaksikan dengan atom O untuk membentuk CO<sub>2</sub>.

MCC merupakan salah satu jenis katalis heterogen. Katalis heterogen adalah katalis yang terdiri lebih dari satu fase. Pada umumnya fase katalis adalah padat sedangkan reaktan dan produknya adalah cair atau gas. Dalam hal ini titanium dioksida sebagai katalis padat, CO dan HC dan O<sub>2</sub> sebagai reaktan dan CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O sebagai produknya. Untuk proses reaksi tahapan reaksi katalis heterogen dapat dilihat pada Gambar 14 di bawah ini.



Gambar 14. Skema tahapan reaksi katalis heterogen  
Sumber: Somorjai (1994)

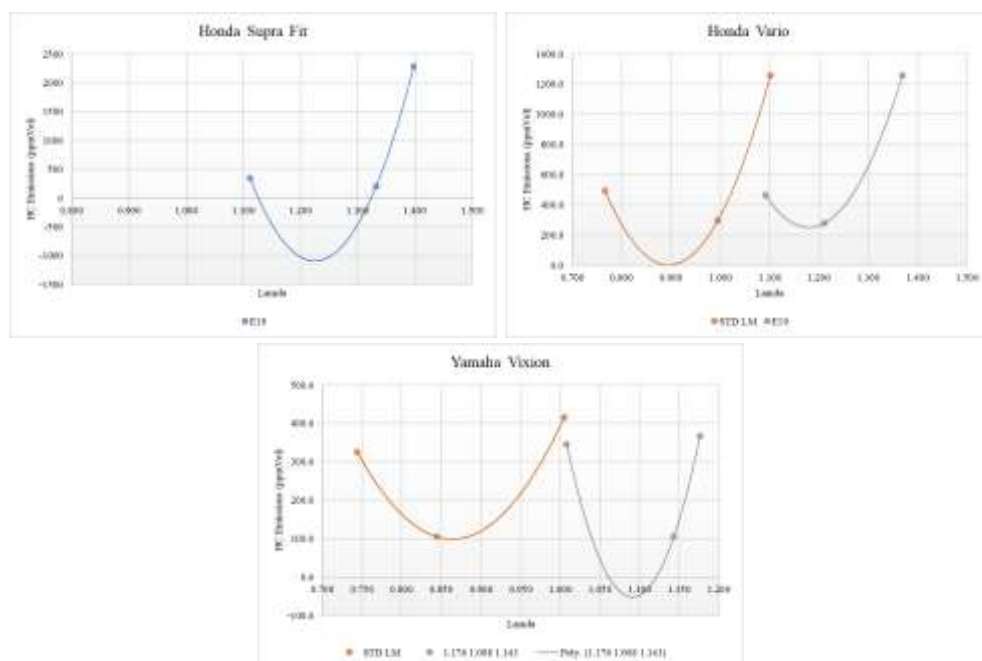
Tahapan reaksi katalis heterogen diawali dengan perpindahan massa melalui lapisan batas luar dan molekul reaktan masuk ke pori-pori katalis. Kemudian reaktan berdifusi ke dalam pori-pori dan diserap oleh katalis. Katalis mereaksikan reaktan menjadi produk. Produk kemudian keluar dari pori-pori dan reaksi berakhir dengan perpindahan massa kembali ke batas luar katalis. Kemudian, Gambar 15 di bawah ini adalah skema tahapan reaksi CO menjadi  $\text{CO}_2$  menurut Chorkendorff (2007:3).



Gambar 15. Proses reaksi CO menjadi  $\text{CO}_2$

Gambar 15 di atas adalah proses reaksi CO menjadi  $\text{CO}_2$  yang difasilitasi oleh katalis. Reaksi diawali dengan adsorpsi (pengikatan) molekul CO dan  $\text{O}_2$  oleh katalis. Kemudian CO direaksikan dengan  $\text{O}_2$  menjadi  $\text{CO}_2$ . Setelah reaksi selesai maka katalis akan melakukan desorpsi molekul  $\text{CO}_2$  keluar lapisan katalis.

Sesuai dengan data hasil pengujian Lampiran 1, diketahui bahwa penggunaan MCC STD LM dan E10 juga berpengaruh terhadap penurunan emisi HC. Lebih lanjut, saat tren hasil pengujian emisi HC disajikan dalam bentuk grafik hubungan maka terlihat seperti Gambar 16.



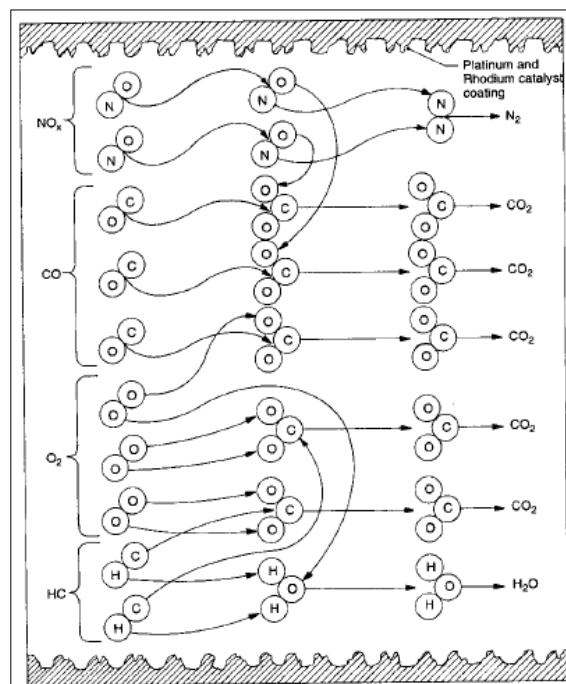
Gambar 16. *Trendline* hasil pengujian emisi HC

Dari data pada Lampiran 1 menunjukkan bahwa pada putaran *idle* emisi HC yang dihasilkan oleh STD LM sebesar 1.16 %Vol untuk Vario dan 3.45 %Vol untuk Vixion. Pada E10 emisi HC yang dihasilkan pada putaran *idle* masing-masing sebesar 0,87 %Vol untuk kendaraan Supra Fit, 1,18 %Vol untuk kendaraan Vario, dan 3,49 % Vol untuk kendaraan Vixion. Hasil tersebut, jika dikaitkan dengan Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup nomor 5 tahun 2006 tentang ambang batas emisi gas buang kendaraan bermotor untuk kendaraan bermotor tipe L (sepeda motor) tahun pembuatan lebih dari tahun 2010 dapat dilihat pada Tabel 5.10 berikut ini.

**Tabel 5.10 Perbandingan Emisi HC dengan Permen LH**

| MCC    | Kendaraan | Hasil | Ambang Batas | Keterangan      |
|--------|-----------|-------|--------------|-----------------|
| STD LM | Vixion    | 416   | 2000 ppmVol  | Lulus Uji Emisi |
|        | Vario     | 1259  |              | Lulus Uji Emisi |
| E10    | Vixion    | 367   | 2000 ppmVol  | Lulus Uji Emisi |
|        | Vario     | 1260  |              | Lulus Uji Emisi |
|        | Supra Fit | 2287  | 2400 ppmVol  | Lulus Uji Emisi |

Berdasarkan hasil perbandingan yang ditunjukkan pada Tabel 5.10, maka disimpulkan bahwa emisi HC yang dihasilkan oleh knalpot STD LM dan knalpot E10 untuk semua jenis kendaraan masuk kategori lulus uji emisi sesuai dengan Permen LH No 5 Tahun 2006. Hasil ini juga menunjukkan bahwa penggunaan MCC baik untuk knalpot STD LM maupun E10 cukup efektif dalam menurunkan emisi HC sebelum keluar menuju lingkungan. Dalam proses oksidasinya emisi HC membutuhkan O<sub>2</sub> untuk menjadi H<sub>2</sub>O atau uap air, dimana proses reaksinya secara rinci dapat dilihat pada Gambar 17.



Gambar 17. Proses reaksi komposisi gas buang  
Sumber: Heisler (1998:698)

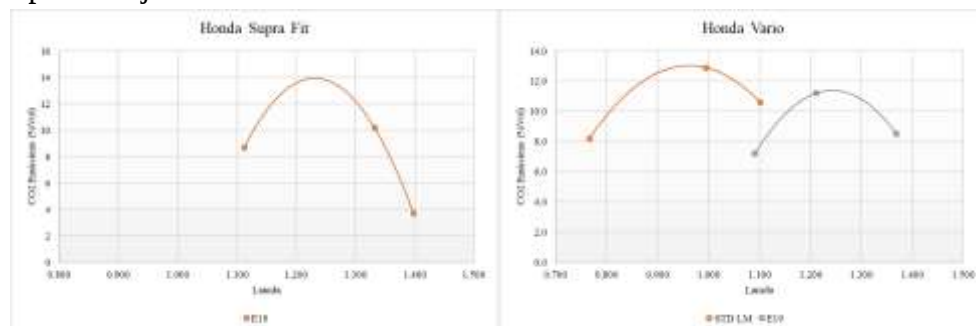
Hal ini bisa dibuktikan dengan keluarnya air pada knalpot setelah dilakukan pengujian emisi baik pada STD LM maupun E19 sebagaimana yang ditunjukkan Gambar 18 berikut ini.

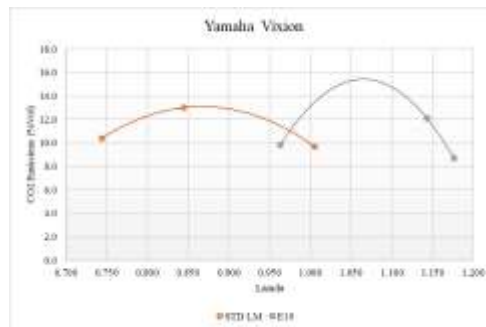


Gambar 18. Sampling H<sub>2</sub>O hasil pengujian emisi gas buang

Reduksi emisi HC yang dilakukan oleh MCC selain disebabkan oleh luas permukaan juga dipengaruhi oleh faktor temperatur. Emisi HC dapat berubah menjadi H<sub>2</sub>O dengan cara bereaksi dengan O<sub>2</sub> dan NO, namun hal tersebut akan membutuhkan temperatur yang lebih tinggi, yaitu 600°C. Temperatur maksimal yang paling efektif mereduksi HC didapat pada knalpot eksperimen 19 berbahan CuCr lekukan 2 mm diameter 54 mm dan panjang 100 mm, dengan suhu 288,1°C, sehingga dapat menurunkan energi aktivasi sehingga proses oksidasi dari  $2\text{HC} + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2$  menjadi lebih cepat tercapai. Akibatnya, terjadi reduksi emisi HC yang lebih signifikan pada MCC STD LM jika dibandingkan dengan menggunakan MCC E19.

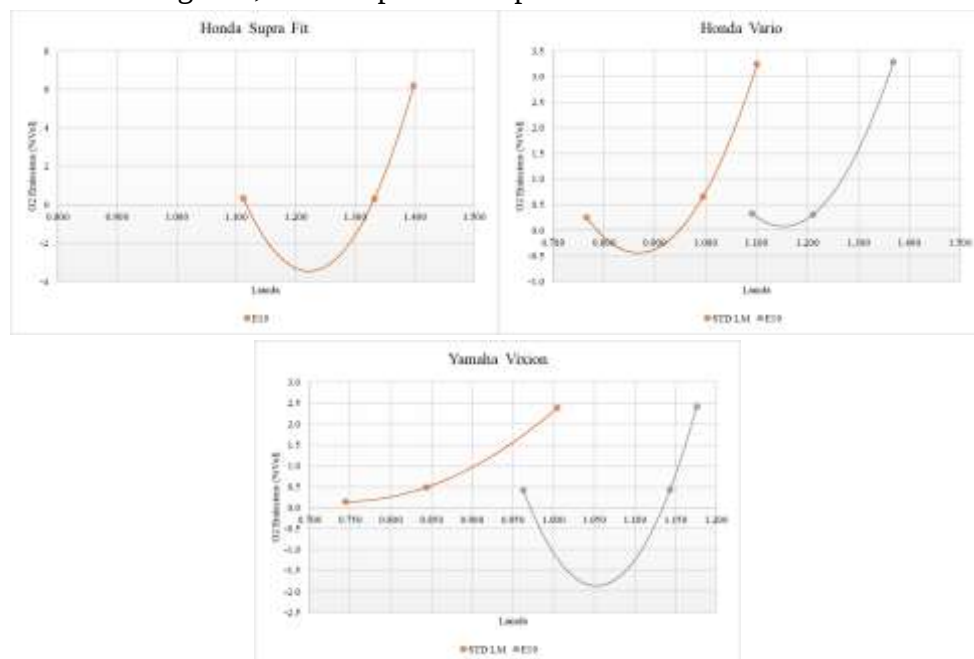
Sebagaimana yang telah dijelaskan sebelumnya, bahwa MCC STD LM dan E19 mampu menurunkan emisi CO hingga bereaksi menjadi CO<sub>2</sub>. Dengan demikian terdapat perubahan emisi CO yang berasal dari hasil proses oksidasi. Dari hasil pengujian emisi CO<sub>2</sub> pada Lampiran 1, diketahui bahwa tren emisi CO memiliki kecenderungan meningkat sesuai dengan nilai lambda yang dihasilkan. Tren tersebut, apabila disajikan dalam bentuk grafik maka hasilnya dapat ditunjukkan melalui Gambar 19.





Gambar 19. Trendline hasil pengujian emisi CO<sub>2</sub>

Data pada Lampiran 1 dan gambar 19 menunjukkan bahwa dengan menggunakan STD LM dan E19 rata-rata mengalami penurunan emisi CO<sub>2</sub>. Hal ini disebabkan karena pengaruh dari lambda yang cenderung semakin miskin ( $\lambda > 1$ ). Semakin miskin lambda maka konsentrasi emisi CO<sub>2</sub> semakin turun. Tren grafik emisi CO<sub>2</sub> paling tinggi diperoleh saat lambda dekat dengan nilai 1 (stoikiometris). Saat lambda melebihi 1 maka tren grafik emisi CO<sub>2</sub> semakin turun. Lambda lebih dari 1 menandakan campuran miskin. Pernyataan ini juga didukung dengan data kadar O<sub>2</sub> baik untuk STD LM maupun E19 yang ditunjukkan melalui Lampiran 1. Kemudian, apabila data tersebut disajikan dalam bentuk grafik, maka dapat dilihat pada Gambar 20.



Gambar 20. Trendline hasil pengujian emisi O<sub>2</sub>

Lampiran 1 dan Gambar 20 di atas menandakan bahwa dengan menggunakan MCC STD LM dan E19, udara yang masuk semakin banyak dan namun bahan bakar semakin sedikit. Bukti bahwa bahan bakar yang dibakar

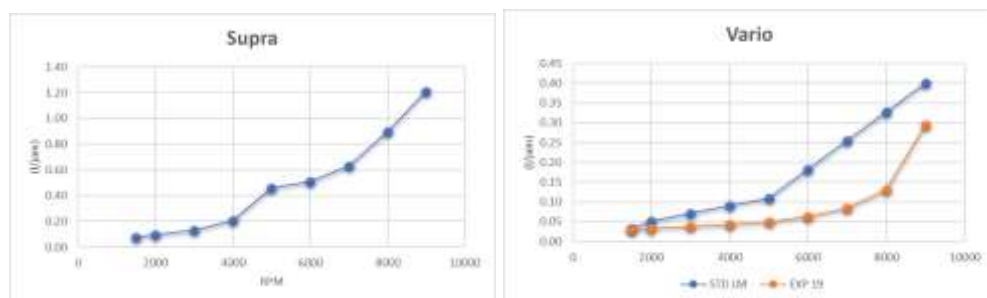
lebih sedikit dapat dilihat pada analisa dan pembahasan perubahan konsumsi bahan bakar. Hal inilah yang menyebabkan CO<sub>2</sub> semakin menurun konsentrasinya jika lambda semakin miskin.

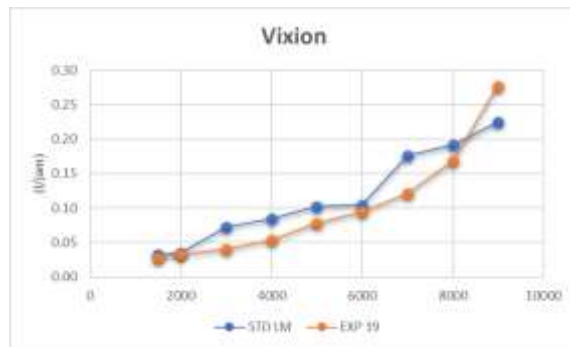
Analisa di atas jika ditarik kesimpulannya sebagai berikut. Emisi CO<sub>2</sub> dipengaruhi oleh faktor lambda dan kadar O<sub>2</sub>. Nilai lambda yang semakin melebihi 1 ( $\lambda > 1$ ), akan mempengaruhi jumlah O<sub>2</sub> yang semakin meningkat. Semakin tinggi kadar O<sub>2</sub> maka tren emisi CO<sub>2</sub> akan menurun. Hal ini disebabkan karena jumlah atom C yang dibakar semakin sedikit, karena campuran lebih miskin. Pernyataan tersebut didukung dengan data konsumsi bahan bakar pada Tabel 5.11.

**Tabel 5.11 Data Konsumsi Bahan Bakar MCC STD LM dan E19**

| RPM  | STD LM (l/jam) |        | Eksperimen 19 (l/jam) |       |        |
|------|----------------|--------|-----------------------|-------|--------|
|      | Vario          | Vixion | Supra                 | Vario | Vixion |
| 1500 | 0.03           | 0.03   | 0.08                  | 0.03  | 0.03   |
| 2000 | 0.05           | 0.04   | 0.10                  | 0.03  | 0.03   |
| 3000 | 0.07           | 0.07   | 0.13                  | 0.04  | 0.04   |
| 4000 | 0.09           | 0.08   | 0.21                  | 0.04  | 0.05   |
| 5000 | 0.11           | 0.10   | 0.46                  | 0.05  | 0.08   |
| 6000 | 0.18           | 0.10   | 0.51                  | 0.06  | 0.09   |
| 7000 | 0.25           | 0.18   | 0.63                  | 0.08  | 0.12   |
| 8000 | 0.33           | 0.19   | 0.90                  | 0.13  | 0.17   |
| 9000 | 0.40           | 0.23   | 1.21                  | 0.30  | 0.28   |

Data konsumsi bahan bakar knalpot standar dengan MCC eksperimen 19 disajikan pada Tabel 5.20 di atas, jika data tersebut disajikan dalam bentuk grafik seperti Gambar 21 berikut.



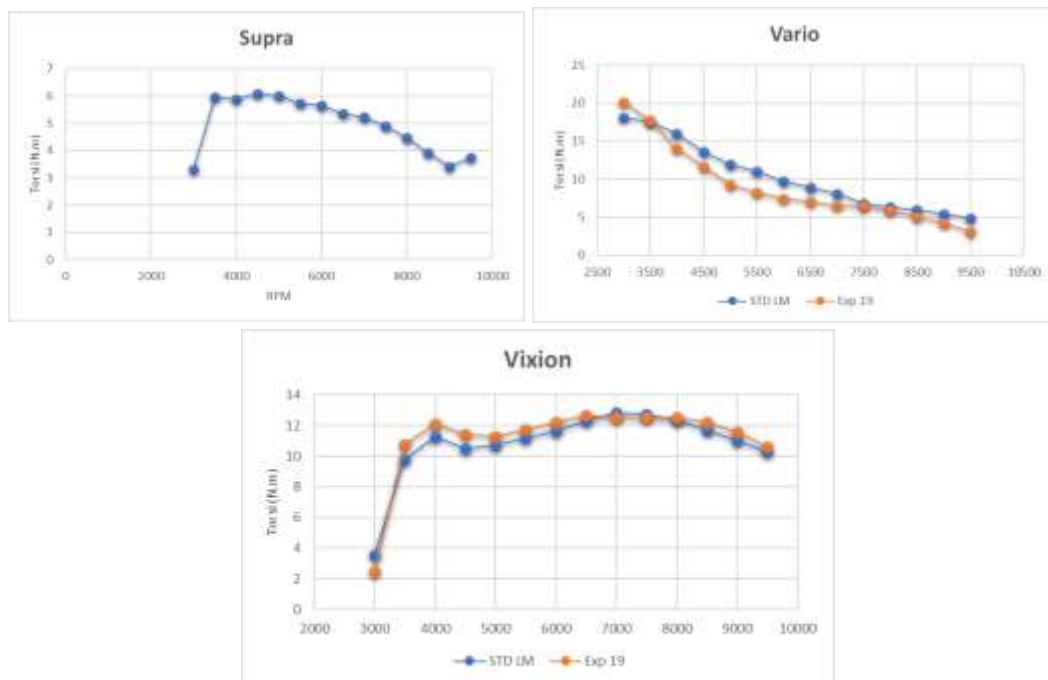


Gambar 21. Grafik pengujian konsumsi bahan bakar

Pengaruh penggunaan MCC eksperimen 19 terhadap torsi sepeda motor Honda Supra Fit, Honda Vario, dan Yamaha Vixion disajikan pada Lampiran 2 dan Gambar 22 berikut. Jika dilihat pada tabel 5.21, torsi yang dihasilkan oleh sepeda motor Honda Vario menggunakan MCC eksperimen 19 menurun. Namun, pada sepeda motor Yamaha Vixion torsi meningkat setelah menggunakan knalpot MCC eksperimen 19.

**Tabel 5.12 Data Torsi MCC STD LM dan E19**

| RPM   | STD LM (N.m) |        | Eksperimen 19 (N.m) |       |        |
|-------|--------------|--------|---------------------|-------|--------|
|       | Vario        | Vixion | Supra               | Vario | Vixion |
| 3,000 | 18.1         | 3.57   | 3.3                 | 20.15 | 2.5    |
| 3,500 | 17.54        | 9.77   | 6.0                 | 17.73 | 10.8   |
| 4,000 | 15.97        | 11.31  | 5.9                 | 14.06 | 12.1   |
| 4,500 | 13.65        | 10.51  | 6.1                 | 11.72 | 11.4   |
| 5,000 | 11.97        | 10.72  | 6.0                 | 9.32  | 11.3   |
| 5,500 | 11.04        | 11.19  | 5.7                 | 8.26  | 11.8   |
| 6,000 | 9.71         | 11.63  | 5.7                 | 7.47  | 12.2   |
| 6,500 | 8.95         | 12.3   | 5.4                 | 7.05  | 12.7   |
| 7,000 | 8.1          | 12.84  | 5.2                 | 6.55  | 12.5   |
| 7,500 | 6.79         | 12.72  | 4.9                 | 6.4   | 12.5   |
| 8,000 | 6.36         | 12.35  | 4.5                 | 5.91  | 12.5   |
| 8,500 | 5.98         | 11.72  | 3.9                 | 5.09  | 12.23  |
| 9,000 | 5.45         | 11.05  | 3.4                 | 4.22  | 11.58  |
| 9,500 | 4.86         | 10.3   | 3.7                 | 3.15  | 10.61  |

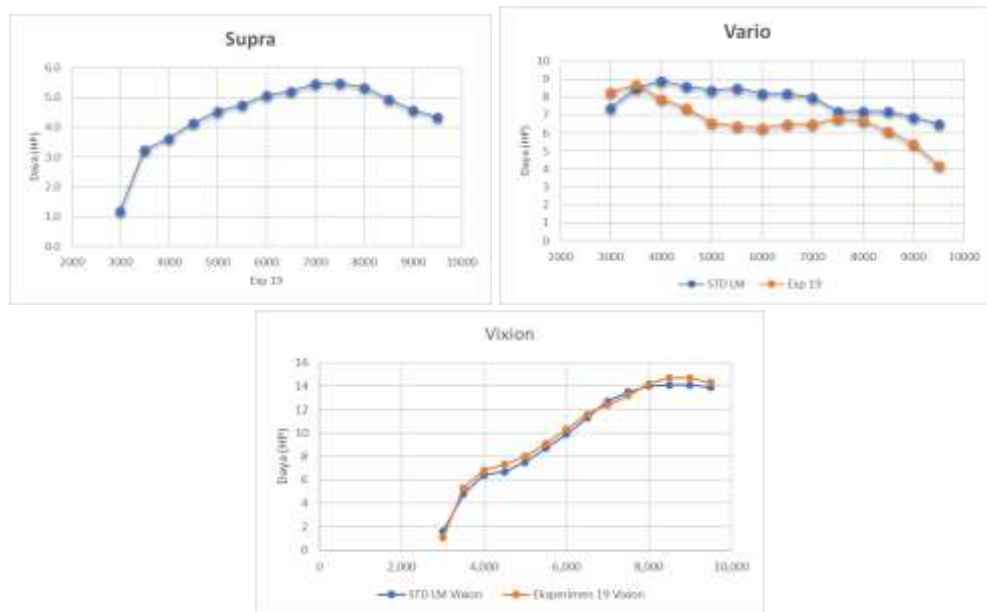


Gambar 22. Grafik Torsi

Selaras dengan torsi, daya pada sepeda motor Honda Vario eksperimen 19 juga menurun. Sedangkan daya pada sepeda motor Yamaha Vixion meningkat pada penggunaan knalpot MCC eksperimen 19 selaras dengan peningkatan torsi Yamaha Vixion. Data hasil pengujian daya tersebut disajikan pada Tabel 5.13 dan dalam bentuk grafik disajikan pada Gambar 23 di bawah.

**Tabel 5.13 Data Daya MCC STD LM dan E19**

| RPM   | STD LM (HP) |        | Eksperimen 19 (HP) |       |        |
|-------|-------------|--------|--------------------|-------|--------|
|       | Vario       | Vixion | Supra              | Vario | Vixion |
| 3,000 | 7.4         | 1.6    | 1.2                | 8.3   | 1.1    |
| 3,500 | 8.5         | 4.8    | 3.2                | 8.7   | 5.3    |
| 4,000 | 8.9         | 6.4    | 3.6                | 7.9   | 6.8    |
| 4,500 | 8.6         | 6.7    | 4.2                | 7.4   | 7.3    |
| 5,000 | 8.4         | 7.5    | 4.5                | 6.6   | 8.0    |
| 5,500 | 8.5         | 8.7    | 4.8                | 6.4   | 9.1    |
| 6,000 | 8.2         | 9.9    | 5.1                | 6.3   | 10.3   |
| 6,500 | 8.2         | 11.3   | 5.2                | 6.5   | 11.6   |
| 7,000 | 8           | 12.7   | 5.5                | 6.5   | 12.4   |
| 7,500 | 7.2         | 13.5   | 5.5                | 6.8   | 13.2   |
| 8,000 | 7.2         | 14     | 5.3                | 6.7   | 14.2   |
| 8,500 | 7.2         | 14.1   | 5.0                | 6.1   | 14.7   |
| 9,000 | 6.9         | 14.1   | 4.6                | 5.4   | 14.7   |
| 9,500 | 6.5         | 13.9   | 4.4                | 4.2   | 14.3   |

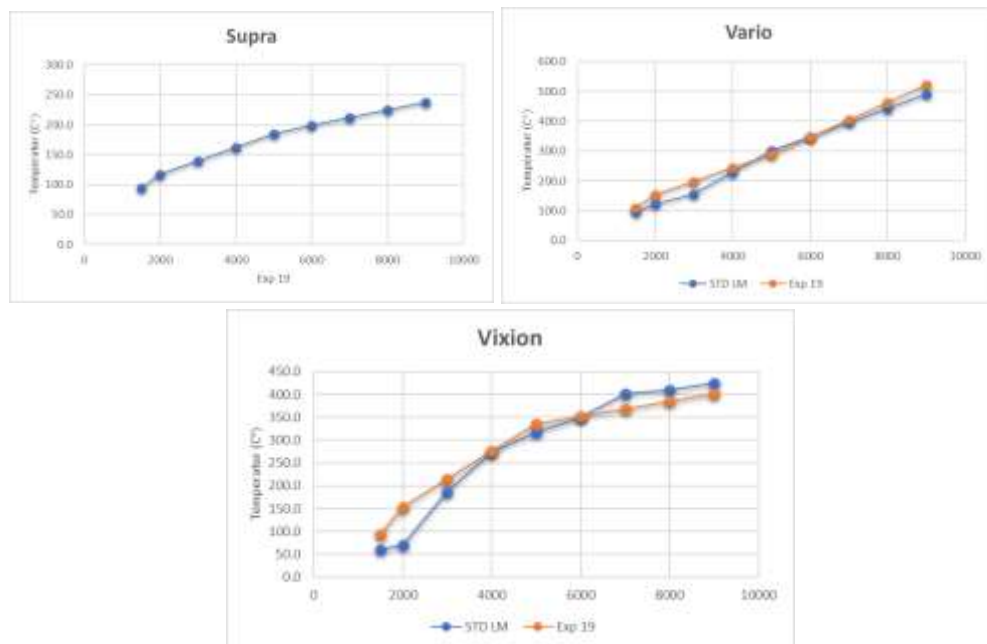


Gambar 23. Grafik Daya

Pengaruh penggunaan MCC eksperimen 19 terhadap temperatur gas buang sepeda motor Honda Supra Fit, Honda Vario, dan Yamaha Vixion disajikan pada tabel 5.14 sedangkan dalam bentuk grafik pada gambar 24 di bawah berikut.

Tabel 5.14 Tabel Temperatur MCC STD LM dan E19

| RPM   | STD LM (C°) |        | Eksperimen 19 (C°) |       |        |
|-------|-------------|--------|--------------------|-------|--------|
|       | Vario       | Vixion | Supra              | Vario | Vixion |
| 1000  | 96.5        | 61.2   | 94.5               | 109.2 | 93.1   |
| 2000  | 123.4       | 70.3   | 117.2              | 153.9 | 153.9  |
| 3,000 | 154.7       | 186.2  | 139.9              | 198.7 | 214.6  |
| 4,000 | 228.0       | 273.8  | 162.5              | 243.4 | 275.4  |
| 5,000 | 301.2       | 317.1  | 185.2              | 288.1 | 336.1  |
| 6,000 | 348.6       | 349.7  | 198.4              | 346.4 | 352.4  |
| 7,000 | 396.0       | 401.7  | 211.7              | 404.8 | 368.6  |
| 8,000 | 443.3       | 409.3  | 224.9              | 463.1 | 384.9  |
| 9,000 | 490.7       | 425.4  | 238.1              | 521.4 | 401.1  |

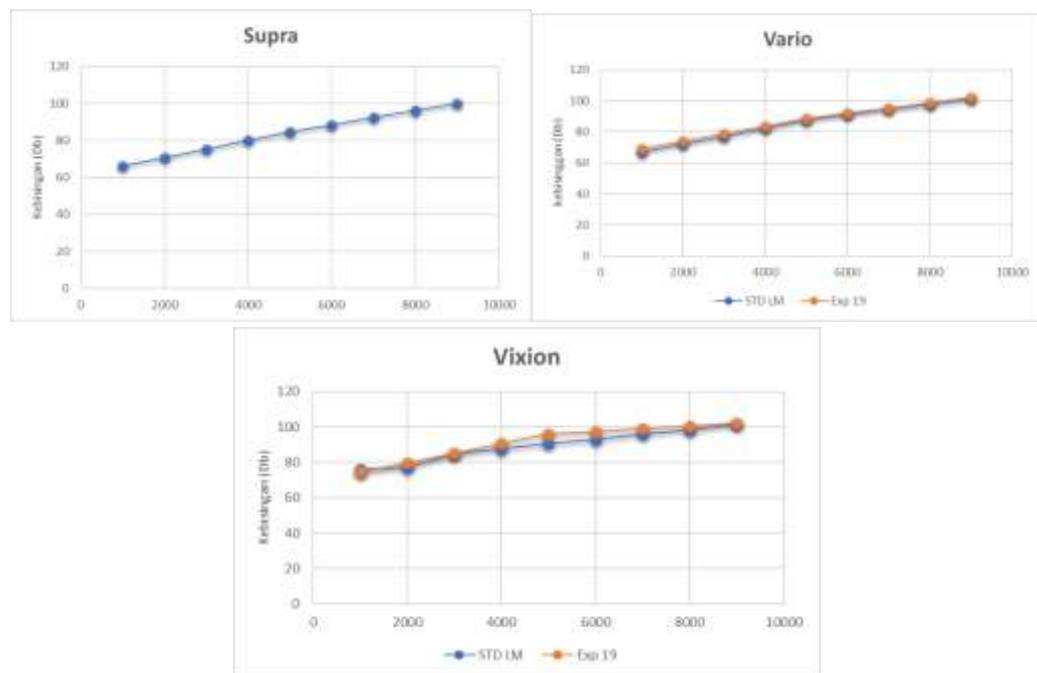


Gambar 24. Grafik Temperatur

Pengaruh penggunaan MCC eksperimen 19 terhadap kebisingan yang dihasilkan oleh sepeda motor Honda Supra Fit, Honda Vario, dan Yamaha Vixion disajikan pada Tabel 5.15 dan Gambar 25. Sedangkan pada sepeda motor Yamaha Vixion penggunaan MCC eksperimen 19 juga meningkatkan kebisingan dibandingkan dengan penggunaan knalpot standar.

Tabel 5.15 Kebisingan MCC STD LM dan E19

| RPM   | STD LM (Db) |        | Eksperimen 19 (Db) |       |        |
|-------|-------------|--------|--------------------|-------|--------|
|       | Vario       | Vixion | Supra              | Vario | Vixion |
| 1000  | 66.8        | 76.4   | 66.1               | 69.1  | 74.3   |
| 2000  | 72.0        | 77.2   | 70.7               | 74.0  | 79.8   |
| 3,000 | 77.3        | 84.9   | 75.4               | 78.9  | 85.2   |
| 4,000 | 82.5        | 87.9   | 80.0               | 83.8  | 90.7   |
| 5,000 | 87.7        | 90.8   | 84.6               | 88.7  | 96.1   |
| 6,000 | 91.1        | 93.2   | 88.5               | 92.1  | 97.6   |
| 7,000 | 94.6        | 96.1   | 92.4               | 95.4  | 99.1   |
| 8,000 | 98.0        | 98.1   | 96.3               | 98.8  | 100.6  |
| 9,000 | 101.4       | 101.7  | 100.2              | 102.1 | 102.1  |



Gambar 25. Grafik Kebisingan

#### F. Peningkatan Hasil Optimasi Terhadap daya

Setelah diperoleh hasil dari desain optimum daya atau eksperimen 18 (E18), maka tahap selanjutnya dilakukan perbandingan hasil antara MCC standar logam mulia (STD LM) dan E18. MCC STD LM selanjutnya disebut dengan STD LM sedangkan untuk MCC E18 selanjutnya disebut sebagai E18. Hasil dari perbandingan E18 dan STD LM dapat dilihat pada Tabel 5.16.

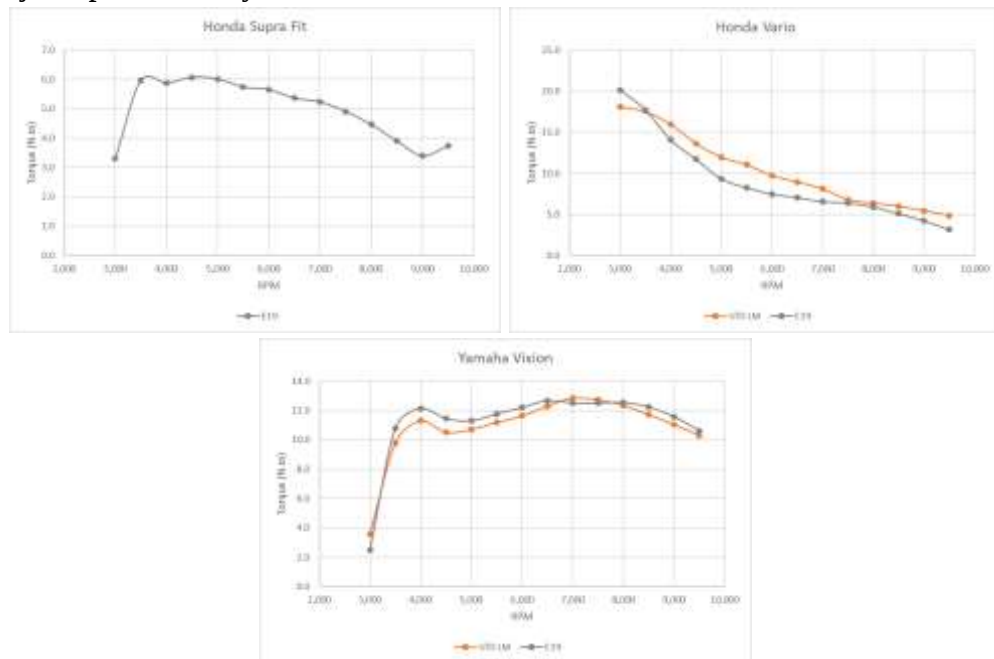
**Tabel 5.16 Perbandingan *Intial* dan E18 Optimum Daya**

|                | <b>STD LM</b> | <b>E18</b> | <b>Gain</b> |
|----------------|---------------|------------|-------------|
| S/N Rasio Daya | 10.232        | 15.636     | 5.404       |
| S/N Rasio CO   | -8.601        | -10.476    | -1.875      |

Berdasarkan Tabel 5.25 dapat diketahui bahwa E18 mampu mengalahkan STD LM dalam hal kemampuan meningkatkan daya kendaraan. Hal tersebut merupakan hal yang wajar karena desain sudut *in* dan *out* pada E18 diatur sedemikian rupa hingga membentuk sudut  $10^\circ$  untuk *in* dan  $15^\circ$  untuk sudut *out*. Bell (1981) melalui bukunya mengemukakan bahwa aliran gas buang pada MCC *housing* dapat berjalan secara optimal apabila dilakukan modifikasi *tapper inlet* dengan sudut sebesar  $10^\circ$  dan *tapper outlet* dengan sudut sebesar  $15^\circ$ .

Namun tidak hanya itu, kemampuan dari E18 dalam menurunkan emisi CO juga perlu dipertimbangkan. Ini dikarenakan STD LM hanya unggul

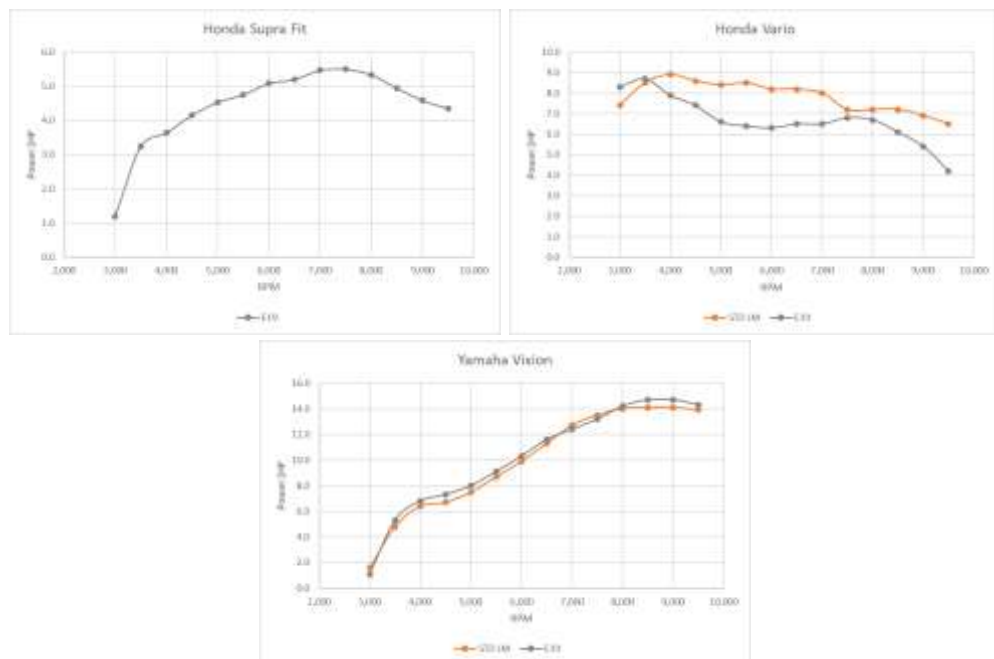
dengan selisih sebesar -1.875, yang artinya desain ini juga layak untuk dipertimbangkan sebagai MCC alternatif menggantikan STD LM. Lebih detail, perbandingan STD LM dan E18 optimum daya dapat dilakukan melalui hasil uji eksperimentalnya.



Gambar 26. Trendline hasil pengujian torsi

Penggunaan MCC STD LM dan E18 terbukti mampu meningkatkan torsi kendaraan (Gambar 26). Namun, dari kedua desain tersebut MCC E18 cenderung lebih unggul dibandingkan dengan STD LM. Ini dikarenakan tekanan balik E18 cenderung menurun sebesar -16,37%. Rendahnya tekanan balik pada E18 disebabkan oleh tinggi lekukan yang cenderung lebih lebar (4 mm), diameter cenderung lebih kecil (41 mm), dengan panjang yang lebih pendek (60 mm). Dengan demikian, gas buang lebih leluasa lewat karena kerapatan MCC yang cenderung lebih besar.

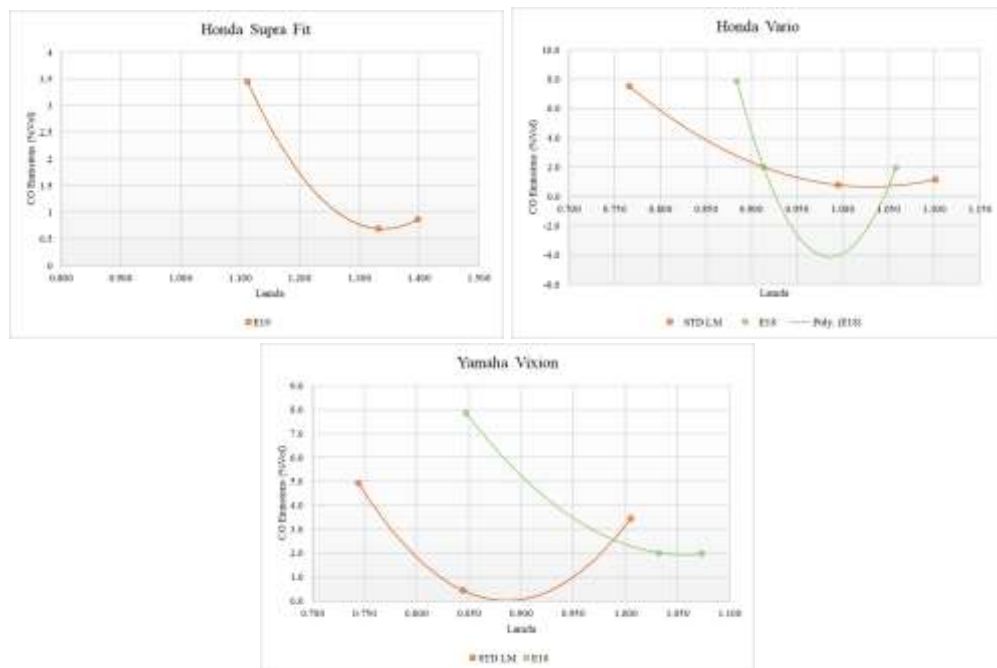
Selain itu, tekanan balik yang rendah akan membantu piston untuk melakukan pembilasan di dalam ruang bakar, menurunkan kerja pemompaan (*pumping work*), meningkatkan *boost pressure* pada *intake manifold*. Hasil tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Jämskeläinen (2007) yang menyatakan bahwa peningkatan tekanan balik akan memberikan efek pada peningkatan kinerja pemompaan (*pumping work*), mengurangi *boost pressure intake manifold*, pembilasan ruang silinder dan efek pembakaran.



Gambar 27. *Trendline* hasil pengujian daya

Selanjutnya, pada Lampiran dan Gambar 27 juga ditunjukkan bahwa penggunaan MCC STD LM dan E18 dapat meningkatkan daya. Hal ini disebabkan karena pada data torsi juga mengalami peningkatan. Jika torsi meningkat maka daya pun juga meningkat, karena rumus untuk mendapatkan daya (PS) harus diketahui dulu nilai torsi. Lebih lanjut, peningkatan torsi dan daya ini dipengaruhi oleh tekanan balik pada knalpot. Semakin tinggi tekanan balik maka torsi dan daya yang dihasilkan juga semakin turun. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Pesansky (2009) yang menyatakan bahwa semakin tinggi tekanan balik maka semakin menurunkan daya mesin.

Pengaruh penggunaan MCC STD LM dan E18 terhadap kemampuan mereduksi emisi CO yang dihasilkan dapat dilihat pada grafik di bawah berikut.



Gambar 28. Trendline hasil pengujian emisi CO

Dari sisi emisi CO, STD LM cenderung lebih baik dari E18. Namun, jika dilihat dari nilai daya yang dihasilkan, E18 lebih unggul dengan selisih 5.404 dibandingkan dengan STD LM. Lebih detail, perbandingan *intial* dan E18 optimum emisi CO dapat dilakukan melalui hasil uji eksperimentalnya.

Sesuai dengan hasil prediksi, STD LM cenderung lebih unggul dalam menurunkan emisi CO dibandingkan dengan E18. Hasil ini diperkuat dengan hasil eksperimen dimana STD LM cenderung mendominasi E18 dalam hal penurunan emisi CO. Lebih detail, tren penurunan emisi CO dari hasil eksperimen masing-masing jenis kendaraan ditunjukkan melalui Gambar 28.

Dari data pada Lampiran 1 menunjukkan bahwa pada putaran *idle* emisi CO yang dihasilkan oleh STD LM sebesar 1.16 %Vol untuk Vario dan 3.45 %Vol untuk Vixion. Pada E18 emisi CO yang dihasilkan pada putaran *idle* masing-masing sebesar 1,25 %Vol untuk kendaraan Supra Fit, 1,97 %Vol untuk kendaraan Vario, dan 3,99 % Vol untuk kendaraan Vixion. Hasil tersebut, jika dikaitkan dengan Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup nomor 4 tahun 2009 tentang ambang batas emisi gas buang kendaraan bermotor untuk kendaraan bermotor tipe L (sepeda motor) dapat dilihat pada Tabel 5.17 berikut ini.

Tabel 5.17 Perbandingan Emisi CO dengan Permen LH

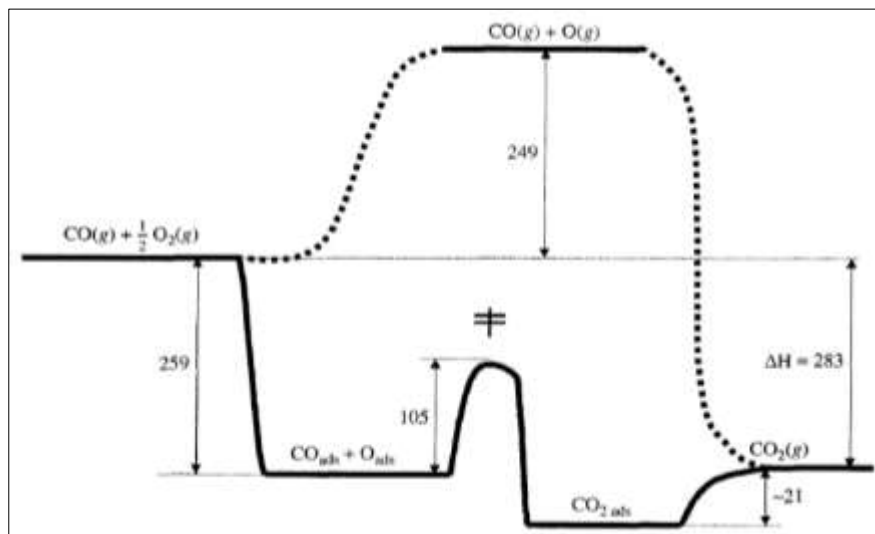
| MCC    | Kendaraan | Hasil     | Ambang Batas | Keterangan      |
|--------|-----------|-----------|--------------|-----------------|
| STD LM | Vixion    | 3,45 %Vol | 4,5 %Vol     | Lulus Uji Emisi |

| MCC | Kendaraan | Hasil      | Ambang Batas | Keterangan      |
|-----|-----------|------------|--------------|-----------------|
| E18 | Vario     | 1,16 %Vol  |              | Lulus Uji Emisi |
|     | Vixion    | 3,99 % Vol |              | Lulus Uji Emisi |
|     | Vario     | 1,97 %Vol  |              | Lulus Uji Emisi |
|     | Supra Fit | 1,25 %Vol  |              | Lulus Uji Emisi |

Jadi, dapat disimpulkan bahwa emisi CO yang terukur pada keseluruhan jenis MCC dari tiga jenis kendaraan masuk pada kategori lulus uji emisi berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup. Ini dikarenakan keseluruhan jenis MCC dari tiga jenis kendaraan cenderung menghasilkan emisi CO di bawah ambang batas yakni dibawah 4,5 %Vol.

Berdasarkan data hasil pengujian dan analisa emisi CO dari keseluruhan jenis MCC dari tiga jenis kendaraan, diketahui bahwa tinggi dan rendahnya lekukan sangat berpengaruh terhadap hasil reduksi emisi CO. Faktor penting lain yang mempengaruhi hasil reduksi emisi CO adalah bahan dari MCC. Hasil tersebut dibuktikan dari hasil reduksi emisi CO optimum yang didapatkan pada E18. Sejalan dengan hal tersebut, Warju (2013) mengemukakan bahwa reaksi katalitik pada katalis padat terjadi pada permukaan katalis, dan semakin luas permukaan katalis semakin cepat laju reaksinya. Sehingga konsentrasi produk yang dihasilkan semakin rendah. Reduksi emisi CO yang dilakukan oleh MCC selain disebabkan oleh luas permukaan juga dipengaruhi oleh faktor temperatur.

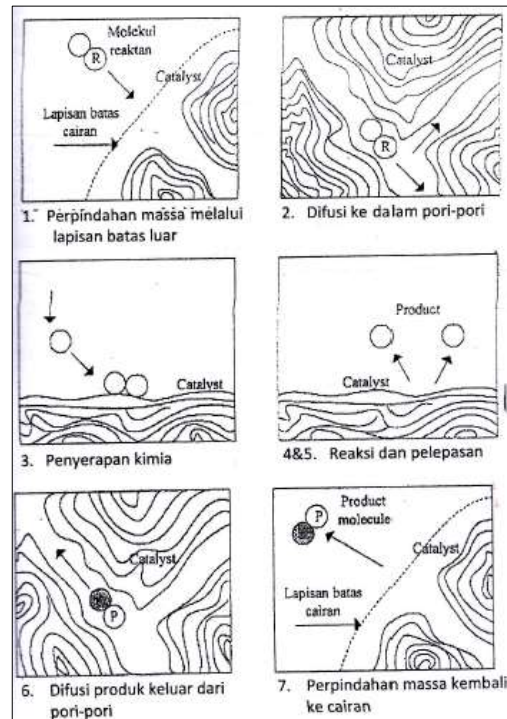
Emisi CO dapat berubah menjadi CO<sub>2</sub> dengan cara bereaksi dengan O<sub>2</sub> atau NO<sub>x</sub>, namun hal tersebut akan membutuhkan temperatur yang lebih tinggi, yaitu 700°C. Temperatur maksimal yang paling efektif mereduksi CO didapat pada knalpot eksperimen 18 berbahan CuCr lekukan 4 mm diameter 41 dan panjang 60 mm dengan suhu 332,1°C, sehingga tidak memerlukan suhu terlalu tinggi untuk mengoksidasi CO menjadi CO<sub>2</sub>. Pernyataan tersebut, sejalan dengan teori Somorjai (1994) yang menyatakan bahwa sejumlah energi minimum yang dibutuhkan untuk mendukung terjadinya reaksi kimia, disebut energi aktivasi. Sehingga proses oksidasi dari CO + ½O<sub>2</sub> menjadi CO<sub>2</sub> pada Gambar 24 di bawah menjadi lebih cepat tercapai. Akibatnya, terjadi reduksi emisi CO yang cukup signifikan pada MCC STD LM jika dibandingkan dengan E18. Gambar 29 di bawah ini adalah skema diagram energi oksidasi CO menjadi CO<sub>2</sub>.



Gambar 29. Skema diagram energi reaksi CO menjadi  $\text{CO}_2$   
Sumber: G. Ertl (1983:245)

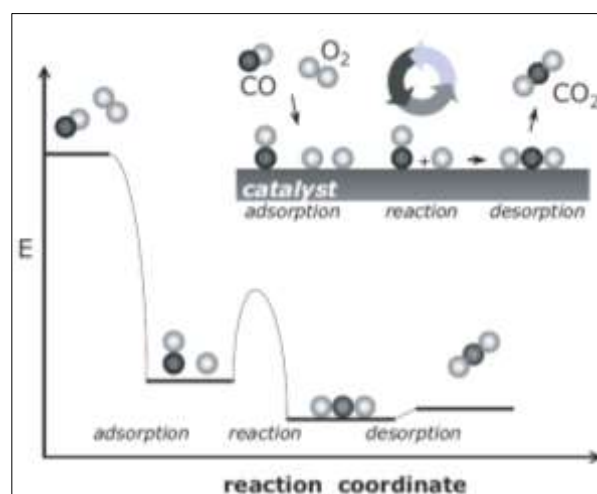
Pada Gambar 29 di atas dapat dilihat bahwa, katalis memfasilitasi reaksi dengan memberikan energi aktivasi yang lebih rendah (alur garis utuh) untuk memisahkan molekul oksigen menjadi atom oksigen. Sedangkan untuk mereaksikan molekul CO dan atom O dibutuhkan energi 105 kJ mol<sup>-1</sup> dan desorpsi molekul  $\text{CO}_2$  pada akhir reaksi hanya 21 kJ mol<sup>-1</sup>. Alur reaksi tanpa katalis (garis putus-putus) secara ekstrim menunjukkan bahwa untuk mereaksikan CO menjadi  $\text{CO}_2$  dibutuhkan energi yang lebih tinggi, yaitu 249 kJ mol<sup>-1</sup>. Jika kita bandingkan antara reaksi tanpa katalis dan dengan katalis, dapat dilihat bahwa reaksi akan sulit dilakukan jika tanpa katalis karena membutuhkan energi aktivasi yang lebih tinggi. Katalis mampu memisahkan molekul  $\text{O}_2$  menjadi atom O. Hal inilah yang menyebabkan molekul CO mudah direaksikan dengan atom O untuk membentuk  $\text{CO}_2$ .

MCC merupakan salah satu jenis katalis heterogen. Katalis heterogen adalah katalis yang terdiri lebih dari satu fase. Pada umumnya fase katalis adalah padat sedangkan reaktan dan produknya adalah cair atau gas. Dalam hal ini titanium dioksida sebagai katalis padat, CO dan HC dan  $\text{O}_2$  sebagai reaktan dan  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  sebagai produknya. Untuk proses reaksi tahapan reaksi katalis heterogen dapat dilihat pada Gambar 30 di bawah ini.



Gambar 30. Skema tahapan reaksi katalis heterogen  
Sumber: Somorjai (1994)

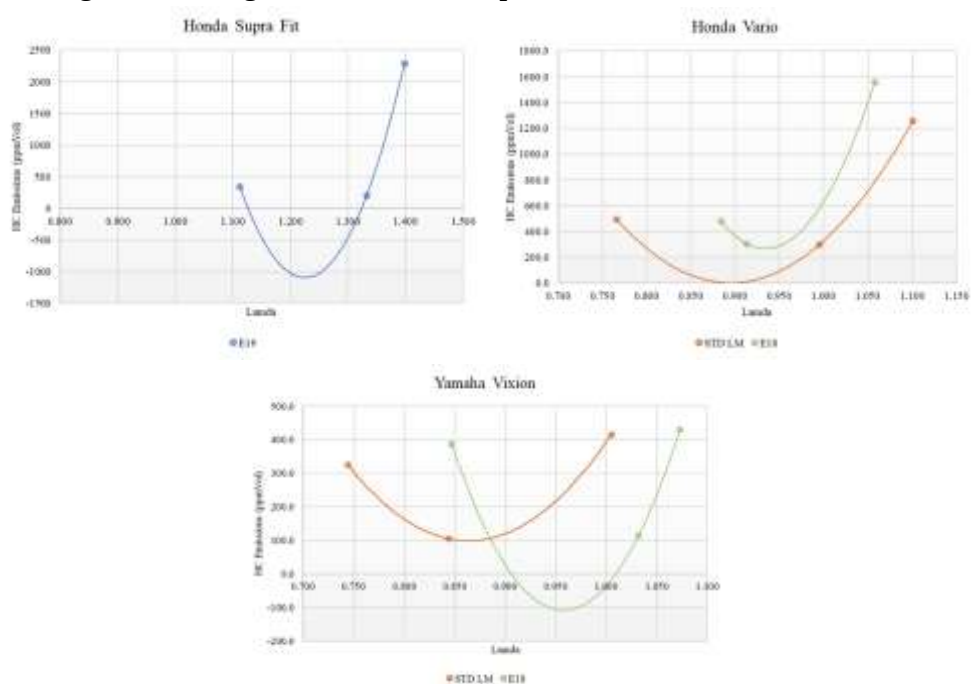
Tahapan reaksi katalis heterogen diawali dengan perpindahan massa melalui lapisan batas luar dan molekul reaktan masuk ke pori-pori katalis. Kemudian reaktan berdifusi ke dalam pori-pori dan diserap oleh katalis. Katalis mereaksikan reaktan menjadi produk. Produk kemudian keluar dari pori-pori dan reaksi berakhir dengan perpindahan massa kembali ke batas luar katalis. Kemudian, Gambar 31 di bawah ini adalah skema tahapan reaksi CO menjadi  $\text{CO}_2$  menurut Chorkendorff (2007:3).



Gambar 31. Proses reaksi CO menjadi  $\text{CO}_2$

Gambar 31 di atas adalah proses reaksi CO menjadi  $\text{CO}_2$  yang difasilitasi oleh katalis. Reaksi diawali dengan adsorpsi (pengikatan) molekul CO dan  $\text{O}_2$  oleh katalis. Kemudian CO direaksikan dengan  $\text{O}_2$  menjadi  $\text{CO}_2$ . Setelah reaksi selesai maka katalis akan melakukan desorpsi molekul  $\text{CO}_2$  keluar lapisan katalis.

Sesuai dengan data hasil pengujian Lampiran 1, diketahui bahwa penggunaan MCC STD LM dan E18 juga berpengaruh terhadap penurunan emisi HC. Lebih lanjut, saat tren hasil pengujian emisi HC disajikan dalam bentuk grafik hubungan maka terlihat seperti Gambar 32.



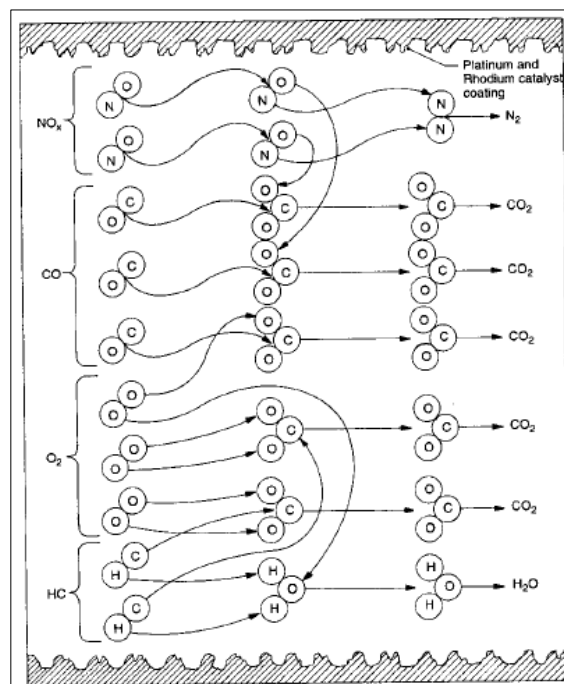
Gambar 32. Trendline hasil pengujian emisi HC

Dari data pada Lampiran 1 menunjukkan bahwa pada putaran *idle* emisi HC yang dihasilkan oleh STD LM sebesar 1259 ppm Vol untuk Vario dan 326 ppm Vol untuk Vixion. Pada E18 emisi HC yang dihasilkan pada putaran *idle* masing-masing sebesar 2389 ppm Vol untuk kendaraan Supra Fit, 1557 Vol untuk kendaraan Vario, dan 430 ppm Vol untuk kendaraan Vixion. Hasil tersebut, jika dikaitkan dengan Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup nomor 5 tahun 2006 tentang ambang batas emisi gas buang kendaraan bermotor untuk kendaraan bermotor tipe L (sepeda motor) tahun pembuatan lebih dari tahun 2010 dapat dilihat pada Tabel 5.18 berikut ini.

**Tabel 5.18 Perbandingan Emisi HC dengan Permen LH**

| MCC    | Kendaraan | Hasil | Ambang Batas | Keterangan      |
|--------|-----------|-------|--------------|-----------------|
| STD LM | Vixion    | 326   | 2000 ppmVol  | Lulus Uji Emisi |
|        | Vario     | 1259  |              | Lulus Uji Emisi |
| E18    | Vixion    | 430   | 2000 ppmVol  | Lulus Uji Emisi |
|        | Vario     | 1557  |              | Lulus Uji Emisi |
|        | Supra Fit | 2389  | 2400 ppmVol  | Lulus Uji Emisi |

Berdasarkan hasil perbandingan yang ditunjukkan pada Tabel 5.18, maka disimpulkan bahwa emisi HC yang dihasilkan oleh knalpot STD LM dan knalpot E18 untuk semua jenis kendaraan masuk kategori lulus uji emisi sesuai dengan Permen LH No 5 Tahun 2006. Hasil ini juga menunjukkan bahwa penggunaan MCC baik untuk knalpot STD LM maupun E18 cukup efektif dalam menurunkan emisi HC sebelum keluar menuju lingkungan. Dalam proses oksidasinya emisi HC membutuhkan O<sub>2</sub> untuk menjadi H<sub>2</sub>O atau uap air, dimana proses reaksinya secara rinci dapat dilihat pada Gambar 33.



Gambar 33. Proses reaksi komposisi gas buang  
Sumber: Heisler (1998:698)

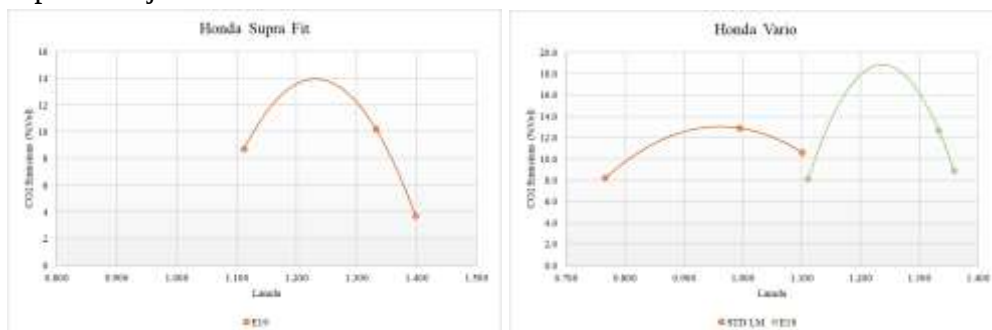
Hal ini bisa dibuktikan dengan keluarnya air pada knalpot setelah dilakukan pengujian emisi baik pada STD LM maupun E18 sebagaimana yang ditunjukkan Gambar 34 berikut ini.

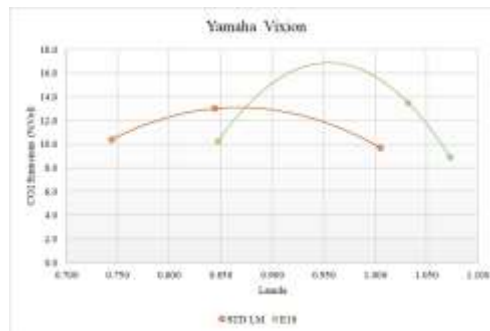


Gambar 34. Sampling H<sub>2</sub>O hasil pengujian emisi gas buang

Reduksi emisi HC yang dilakukan oleh MCC selain disebabkan oleh luas permukaan juga dipengaruhi oleh faktor temperatur. Emisi HC dapat berubah menjadi H<sub>2</sub>O dengan cara bereaksi dengan O<sub>2</sub> dan NO, namun hal tersebut akan membutuhkan temperatur yang lebih tinggi, yaitu 600°C. Temperatur maksimal yang paling efektif mereduksi HC didapat pada knalpot eksperimen 18 berbahan CuCr lekukan 4 mm diameter 41 mm dan panjang 60 mm, dengan suhu 410,1°C, sehingga dapat menurunkan energi aktivasi sehingga proses oksidasi dari  $2\text{HC} + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2$  menjadi lebih cepat tercapai. Akibatnya, terjadi reduksi emisi HC yang lebih signifikan pada MCC STD LM jika dibandingkan dengan menggunakan MCC E18.

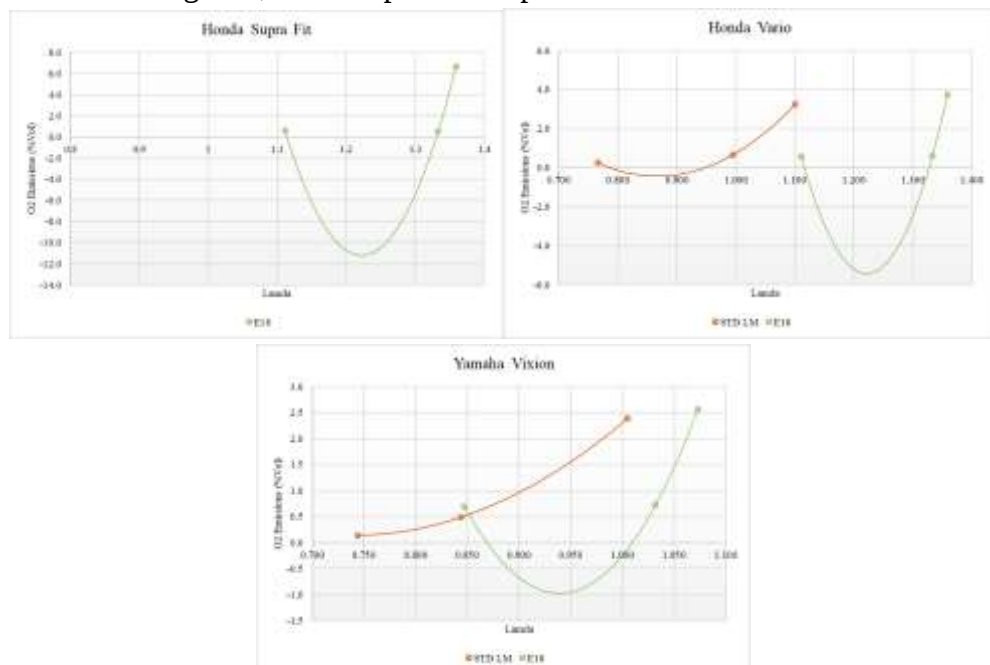
Sebagaimana yang telah dijelaskan sebelumnya, bahwa MCC STD LM dan E18 mampu menurunkan emisi CO hingga bereaksi menjadi CO<sub>2</sub>. Dengan demikian terdapat perubahan emisi CO yang berasal dari hasil proses oksidasi. Dari hasil pengujian emisi CO<sub>2</sub> pada Lampiran 1, diketahui bahwa tren emisi CO<sub>2</sub> memiliki kecenderungan meningkat sesuai dengan nilai lambda yang dihasilkan. Tren tersebut, apabila disajikan dalam bentuk grafik maka hasilnya dapat ditunjukkan melalui Gambar 35.





Gambar 35. Trendline hasil pengujian emisi CO<sub>2</sub>

Data pada Lampiran 1 dan gambar 35 menunjukkan bahwa dengan menggunakan STD LM dan E18 rata-rata mengalami penurunan emisi CO<sub>2</sub>. Hal ini disebabkan karena pengaruh dari lambda yang cenderung semakin miskin ( $\lambda > 1$ ). Semakin miskin lambda maka konsentrasi emisi CO<sub>2</sub> semakin turun. Tren grafik emisi CO<sub>2</sub> paling tinggi diperoleh saat lambda dekat dengan nilai 1 (stoikiometris). Saat lambda melebihi 1 maka tren grafik emisi CO<sub>2</sub> semakin turun. Lambda lebih dari 1 menandakan campuran miskin. Pernyataan ini juga didukung dengan data kadar O<sub>2</sub> baik untuk STD LM maupun E18 yang ditunjukkan melalui Lampiran 1. Kemudian, apabila data tersebut disajikan dalam bentuk grafik, maka dapat dilihat pada Gambar 31.



Gambar 36. Trendline hasil pengujian emisi O<sub>2</sub>

Lampiran 1 dan Gambar 36 di atas menandakan bahwa dengan menggunakan MCC STD LM dan E18, udara yang masuk semakin banyak dan

namun bahan bakar semakin sedikit. Bukti bahwa bahan bakar yang dibakar lebih sedikit dapat dilihat pada analisa dan pembahasan perubahan konsumsi bahan bakar. Hal inilah yang menyebabkan CO<sub>2</sub> semakin menurun konsentrasinya jika lambda semakin miskin.

Analisa di atas jika ditarik kesimpulannya sebagai berikut. Emisi CO<sub>2</sub> dipengaruhi oleh faktor lambda dan kadar O<sub>2</sub>. Nilai lambda yang semakin melebihi 1 ( $\lambda > 1$ ), akan mempengaruhi jumlah O<sub>2</sub> yang semakin meningkat. Semakin tinggi kadar O<sub>2</sub> maka tren emisi CO<sub>2</sub> akan menurun. Hal ini disebabkan karena jumlah atom C yang dibakar semakin sedikit, karena campuran lebih miskin. Pernyataan tersebut didukung dengan data konsumsi bahan bakar pada tabel 5.19.

**Tabel 5.19 Konsumsi bahan bakar MCC STD LM dan E18**

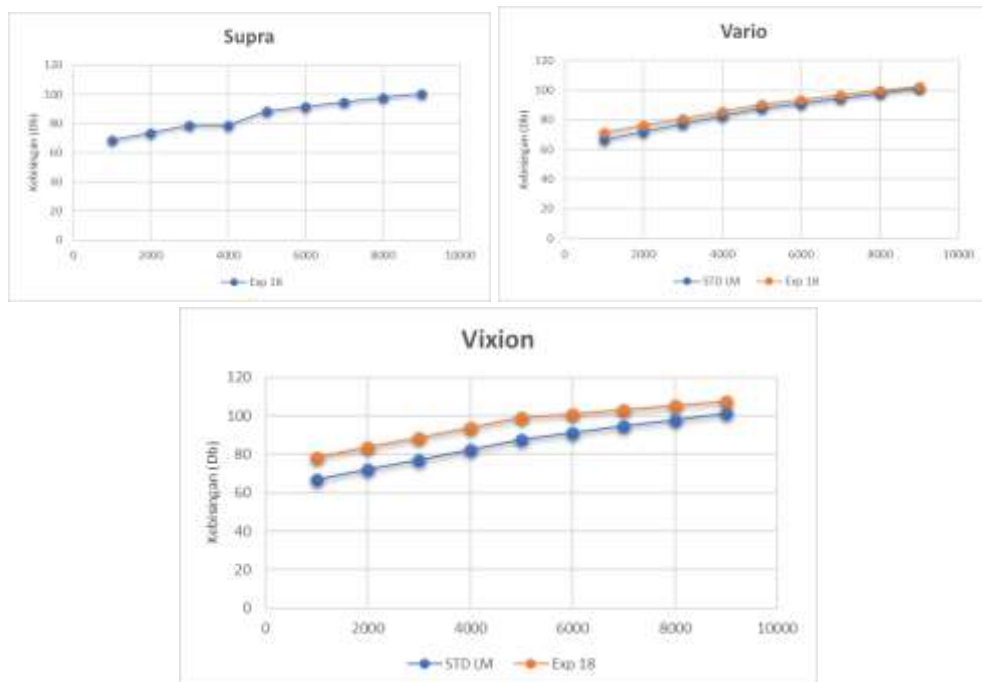
| RPM  | STD LM (l/jam) |        | Eksperimen 18 (l/jam) |       |        |
|------|----------------|--------|-----------------------|-------|--------|
|      | Vario          | Vixion | Supra                 | Vario | Vixion |
| 1500 | 0.03           | 0.03   | 0.10                  | 0.04  | 0.04   |
| 2000 | 0.05           | 0.04   | 0.12                  | 0.04  | 0.05   |
| 3000 | 0.07           | 0.07   | 0.16                  | 0.06  | 0.06   |
| 4000 | 0.09           | 0.08   | 0.26                  | 0.09  | 0.08   |
| 5000 | 0.11           | 0.10   | 0.58                  | 0.18  | 0.12   |
| 6000 | 0.18           | 0.10   | 0.68                  | 0.21  | 0.14   |
| 7000 | 0.25           | 0.18   | 0.82                  | 0.26  | 0.17   |
| 8000 | 0.33           | 0.19   | 1.03                  | 0.33  | 0.22   |
| 9000 | 0.40           | 0.23   | 1.38                  | 0.46  | 0.30   |

Pengaruh penggunaan MCC eksperimen 18 terhadap kebisingan yang dihasilkan oleh sepeda motor Honda Supra Fit, Honda Vario, dan Yamaha Vixion disajikan pada Tabel 5.20 dan Gambar 37. Jika dilihat pada tabel 5.20, penggunaan MCC eksperimen 18 pada sepeda motor Honda Vario meningkatkan kebisingan yang dihasilkan dibandingkan dengan penggunaan knalpot standar. Sedangkan pada sepeda motor Yamaha Vixion penggunaan MCC eksperimen 19 juga meningkatkan kebisingan dibandingkan dengan penggunaan knalpot standar.

**Tabel 5.20 Data Kebisingan MCC STD LM dan E18**

| RPM   | STD LM (Db) |        | Eksperimen 18 (Db) |       |        |
|-------|-------------|--------|--------------------|-------|--------|
|       | Vario       | Vixion | Supra              | Vario | Vixion |
| 1000  | 66.8        | 76.4   | 68.75              | 71.5  | 78.4   |
| 2000  | 72.0        | 77.2   | 73.73              | 76.2  | 83.5   |
| 3,000 | 77.3        | 84.9   | 78.71              | 81.0  | 88.7   |

| RPM   | STD LM (Db) |        | Eksperimen 18 (Db) |       |        |
|-------|-------------|--------|--------------------|-------|--------|
|       | Vario       | Vixion | Supra              | Vario | Vixion |
| 4,000 | 82.5        | 87.9   | 78.7               | 85.7  | 93.9   |
| 5,000 | 87.7        | 90.8   | 88.68              | 90.4  | 99.1   |
| 6,000 | 91.1        | 93.2   | 91.68              | 93.5  | 101.1  |
| 7,000 | 94.6        | 96.1   | 94.7               | 96.6  | 103.2  |
| 8,000 | 98.0        | 98.1   | 97.7               | 99.6  | 105.3  |
| 9,000 | 101.4       | 101.7  | 100.68             | 102.7 | 107.4  |



Gambar 37. *Trendline* hasil pengujian kebisingan

## **BAB VI**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **A. Simpulan**

Berdasarkan hasil pengujian dan diskusi penelitian yang telah dilakukan, maka dapat ditarik simpulan sebagai berikut.

1. Desain MCC terbaik yang mampu menurunkan emisi CO adalah STD LM. Namun, E19 bisa dijadikan sebagai alternatif karena selisih S/N rasionya hanya terpaut -0.372. Sementara itu, E19 memiliki keunggulan lain dari STD LM yakni nilai S/N rasio daya yang cenderung lebih tinggi dengan selisih sebesar 5.037 dibandingkan dengan STD LM.
2. Desain MCC terbaik yang mampu meningkatkan daya adalah E18. E18 memiliki keunggulan S/N rasio dengan selisih sebesar 5.404. Dari sisi emisi, E18 cenderung lebih rendah dengan selisih sebesar -1.875 dibandingkan dengan STD LM.

#### **B. Saran**

1. Pada tahap selanjutnya disarankan untuk melakukan penelitian MCC dengan menggunakan metode optimasi yang berbeda. Hal ini bertujuan untuk memastikan apakah hasil metode optimasi yang saat ini digunakan benar-benar akurat.
2. Diperlukan penelitian lanjutan untuk melakukan optimasi dengan bahan MCC yang berbeda, ukuran yang berbeda, dan jenis sepeda motor yang berbeda.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] UN. (2015). Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development. Retrieved from [https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030Agenda for Sustainable Development web.pdf](https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf)
- [2] UNDP. (2015). Sustainable development goals. New York: The United Nations Development Programme (UNDP).
- [3] UNRIC. (2015). 17 sustainable development goals are set and welcomed. Retrieved from <http://www.unric.org/en/latest-un-buzz/29844-17-sustainable-development-goals-are-set-and-welcomed>.
- [4] Obert, E. F. (1973). Internal combustion engine and air pollution (3<sup>rd</sup> ed.). New York: Harper & Row, Publisher, Inc.
- [5] Heisler, H. (1995). Advanced engine technology. London: Edward Arnold.
- [6] Kalam, M.A., Masjuki, H. H., Redzuan, M., Mahlia, T. M. I., Fuad, M. A., Mohibah, M., Halim, K. H., Ishak, A., Khair, M., Shahrir, A., & Yusoff, A. (2009). Development and test of a new catalytic converter for natural gas fuelled engine. *Jurnal Sadhana*, 34(3): 467-481. Retrieved from <http://www.ias.ac.in/article/fulltext/sadh/034/03/0467-0481>.
- [7] Abdullah, H. (2012). Pembuatan dan karakterisasi serta aplikasi katalitik konverter untuk filter gas buang kendaraan bermotor berbahan bakar premium. (Online), (<http://repository.usu.ac.id>, diakses pada 20 September 2013).
- [8] Wicaksono, Y. A., & Warju. (2015). Pengaruh catalytic converter titanium dioksida terhadap emisi gas buang sepeda motor Honda Supra X 125. *Jurnal Teknik Mesin (JTM)*, 03(02): 197-206.
- [9] Swisscontact. (2001). Pengetahuan dasar perawatan kendaraan niaga (bus). Jakarta: Swisscontact Clean Air Project.
- [10] Warju, & Muhaji. (2005). Eksperimen tentang pengaruh penggunaan catalytic converter kuningan (Cu+Zn) berlapis krom (Cr) terhadap emisi gas buang mesin Toyota Kijang tipe 4K. *Jurnal Otopro*, 1(1): 51-62.
- [11] Warju, & Sungkono, D. (2006). Pengaruh penggunaan catalytic converter tembaga berlapis mangan terhadap kadar polutan gas buang motor bensin empat langkah. *Jurnal Teknika*, 7(2): 128-136.
- [12] Warju. (2008). Unjuk kemampuan catalytic converter dengan katalis tembaga dalam mereduksi konsentrasi emisi gas buang Toyota Kijang Innova. *Jurnal Teknika*, 9(1): 42-49.
- [13] Warju, & Muliatna, I. M. (2013). Pengaruh penggunaan metallic catalytic converter tembaga terhadap kadar emisi CO dan HC sepeda motor 4 langkah. *Jurnal Otopro*, 8(2): 108-118.
- [14] Amin, C. M., Chavda, K., & Gadhia, U. (2017). Exhaust analysis of four stroke single cylinder diesel engine using copper based catalytic converter. *International Journal for Scientific Research & Development*

- (IJSRD), 3(1), 493-497. Retrieved from <http://www.ijsrd.com/articles/IJSRDV1I3022.pdf>
- [15] Warju, & Muliatna, I. M. (2015). The performance of copper metallic catalytic converter as catalyst to reduce exhaust emission from Yamaha Vega motorcycle. *Proceedings of Joint International Seminar (JIS) Green Religion, Science & Technology: Prospect and Challenge for Sustainable Life*, 01(01): 17-27.
- [16] Karthikeyan, D., Saravanan, C. G., & Gunasekaran, E. J. (2016). Performance analysis of catalytic converters in spark ignition engine emission reduction. *International Journal of Advances in Engineering & Technology (IJAET)*, 9(1), 135-143. Retrieved from [www.e-ijaet.org/media/15I31-IJAET0931952-v9-iss1-pp135-143.pdf](http://www.e-ijaet.org/media/15I31-IJAET0931952-v9-iss1-pp135-143.pdf)
- [17] Nisa, K., Ratnaningrum, Megawati, & Widyastuti, C. R. (2016). Design innnovation of motorcycle muffler by applying catalytic converter based on non-noble material to reduce exhaust emission. *International Journal of Advances in Science Engineering and Technology*, 4(4), 67-70. Retrieved from [http://www.ijar.in/journal/journal\\_file/journal\\_pdf/6-329-148575624867-70.pdf](http://www.ijar.in/journal/journal_file/journal_pdf/6-329-148575624867-70.pdf)
- [18] Warju, Sakti, A. M., Muliatna, I. M., & Wijanarko, D. V. (2017). Produk knalpot sepeda motor ramah lingkungan berteknologi metallic catalytic converter. Laporan Akhir Program Calon Perusahaan Pemula Berbasis Teknologi dari Perguruan Tinggi (CPPBT-PT). Jakarta: Direktorat Jenderal Penguatan Inovasi, Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi.
- [19] Mahadeven, G., & Sendilvelan, S. (2017). Temperature analysis of dynamic catalytic convertor system with pre-catalyst in a multi cylinder spark ignition engine to reduce light-off time. *International Journal of Heat and Technology*, 35(1), 97-102. <http://doi.org/10.18280/ijht.350113>
- [20] Warju, Harto, S. P., & Soenarto. (2017). The performance of chrome-coated copper as metallic catalytic converter to reduce exhaust gas emissions from spark-ignition engine. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 288 012151, doi:10.1088/1757-899X/288/1/012151.
- [21] Kumar, R., Singh, S., & Kaur, M. (2017). Emission testing of catalytic converter using zirconium oxide (ZrO) and cobalt oxide (CoO) as catalyst. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, 7(3), 333-342. Retrieved from [www.tjprc.org/publishpapers/2-67-1497518989-ABS-33.IJMPERDJUN201733.pdf](http://www.tjprc.org/publishpapers/2-67-1497518989-ABS-33.IJMPERDJUN201733.pdf)
- [22] Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 05 Tahun 2006 tentang Ambang Batas Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor Lama.
- [23] Paten IDP000053363 tanggal 12 September 2018. Knalpot Sepeda Motor Ramah Lingkungan. Jakarta: Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual (DJKI), Kementerian Hukum dan Hak Asasi Manusia Republik Indonesia, (Online), <https://pdki-indonesia.dgip.go.id/index.php/paten?q=P00201405914+&type=1>, diakses 24 Maret 2019.

- [24] Merek “MCC = *Metallic Catalytic Converter*” No. Permohonan: D002017064428 Tanggal 6 Desember 2017. Jakarta: Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual (DJKI), Kementerian Hukum dan Hak Asasi Manusia Republik Indonesia, (Online), <https://pdki-indonesia.dgip.go.id/index.php/paten?q=P00201405914+&type=1>, diakses 24 Maret 2019.
- [25] Bell, A. G. (2006). Four-stroke performance tuning (3<sup>rd</sup> ed.). California: Haynes Publishing.
- [26] SNI 09-7118.3-2005. Emisi gas buang-Sumber bergerak-Bagian 3: Cara uji kendaraan bermotor kategori L pada kondisi idle. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional (BSN).
- [27] SAE J1349. (2004). Engine power test code-spark ignition and compression ignition-net power rating. Warrendale: SAE International.
- [28] SNI 7554:2010. Pengukuran konsumsi bahan bakar kendaraan bermotor kategori M1 dan N1. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional (BSN).
- [29] SAE J1287. (1998). Measurement of exhaust sounds level of stationary motorcycle. Warrendale: SAE International.

**Lampiran 1. Data Hasil Uji Emisi Gas Buang**

|        | MTR    | RPM  | Lamb  | CO   | HC      | CO2   | O2   |        | MTR    | RPM  | Lamb  | CO   | HC      | CO2   | O2   |
|--------|--------|------|-------|------|---------|-------|------|--------|--------|------|-------|------|---------|-------|------|
| STD TK | Supra  | 1500 | 1.287 | 1.73 | 2529    | 6.2   | 7.33 | STD LM | Supra  | 1500 | 0     | 0    | 0       | 0     | 0    |
|        |        | 5000 | 0.876 | 4.04 | 420     | 10.9  | 0.31 |        |        | 5000 | 0     | 0    | 0       | 0     | 0    |
|        |        | 9000 | 0.983 | 1.13 | 255     | 12.7  | 0.62 |        |        | 9000 | 0     | 0    | 0       | 0     | 0    |
|        | Vario  | 1500 | 1.037 | 4.36 | 2519    | 8.6   | 4.29 |        | Vario  | 1500 | 1.101 | 1.16 | 1259    | 10.6  | 3.25 |
|        |        | 5000 | 0.773 | 7.72 | 472     | 8.3   | 0.43 |        |        | 5000 | 0.766 | 7.53 | 495     | 8.2   | 0.25 |
|        |        | 9000 | 0.885 | 3.96 | 296     | 11.1  | 0.33 |        |        | 9000 | 0.995 | 0.78 | 298     | 12.9  | 0.66 |
|        | Vixion | 1500 | 0.996 | 4.69 | 714     | 8.6   | 2.71 |        | Vixion | 1500 | 1.005 | 3.45 | 416     | 9.7   | 2.39 |
|        |        | 5000 | 0.814 | 6.01 | 371     | 9.6   | 0.14 |        |        | 5000 | 0.744 | 4.94 | 326     | 10.4  | 0.14 |
|        |        | 9000 | 0.945 | 0.46 | 115     | 13    | 0.32 |        |        | 9000 | 0.844 | 0.44 | 105     | 13    | 0.49 |
| E1     | Supra  | 1500 | 1.344 | 1.5  | 2436.88 | 4.7   | 6.76 | E2     | Supra  | 1500 | 1.369 | 1.15 | 2404.09 | 4.34  | 6.53 |
|        |        | 5000 | 1.099 | 3.88 | 386.51  | 9.21  | 0.69 |        |        | 5000 | 1.126 | 3.85 | 371.57  | 8.9   | 0.46 |
|        |        | 9000 | 1.329 | 1.01 | 231.83  | 11.52 | 0.55 |        |        | 9000 | 1.345 | 0.9  | 219     | 11.29 | 0.46 |
|        | Vario  | 1500 | 1.051 | 2.05 | 1575.45 | 8.93  | 3.77 |        | Vario  | 1500 | 1.086 | 1.79 | 1521.95 | 8.83  | 3.67 |
|        |        | 5000 | 0.811 | 7.98 | 480.98  | 8.25  | 0.57 |        |        | 5000 | 0.887 | 7.82 | 477.46  | 8.01  | 0.52 |
|        |        | 9000 | 0.887 | 2.11 | 308.7   | 12.77 | 0.63 |        |        | 9000 | 0.967 | 1.93 | 303.78  | 12.44 | 0.57 |
|        | Vixion | 1500 | 1.07  | 4.07 | 444.16  | 8.93  | 2.59 |        | Vixion | 1500 | 1.081 | 3.88 | 426.57  | 8.83  | 2.56 |
|        |        | 5000 | 0.824 | 5.84 | 391.6   | 10.25 | 0.73 |        |        | 5000 | 0.867 | 5.7  | 385.92  | 10.17 | 0.6  |
|        |        | 9000 | 1.022 | 0.85 | 116.28  | 13.52 | 0.8  |        |        | 9000 | 1.043 | 0.6  | 113.77  | 13.37 | 0.7  |
| E3     | Supra  | 1500 | 1.416 | 0.98 | 2321.49 | 3.47  | 6.37 | E4     | Supra  | 1500 | 1.341 | 1.53 | 2450.5  | 4.7   | 6.77 |
|        |        | 5000 | 1.198 | 3.67 | 367.84  | 8.64  | 0.32 |        |        | 5000 | 1.081 | 3.91 | 387.84  | 9.27  | 0.75 |
|        |        | 9000 | 1.379 | 0.82 | 214.46  | 10.97 | 0.38 |        |        | 9000 | 1.323 | 1.03 | 232.22  | 11.67 | 0.56 |
|        | Vario  | 1500 | 1.15  | 1.53 | 1339.96 | 8.74  | 3.5  |        | Vario  | 1500 | 1.049 | 2.08 | 1595.71 | 9.04  | 3.78 |
|        |        | 5000 | 0.968 | 7.75 | 475.33  | 7.75  | 0.37 |        |        | 5000 | 0.8   | 8.03 | 481.17  | 8.28  | 0.59 |
|        |        | 9000 | 1.037 | 1.77 | 300.65  | 12.11 | 0.47 |        |        | 9000 | 0.885 | 2.15 | 309.16  | 12.8  | 0.72 |

|    | MTR    | RPM  | Lamb  | CO   | HC      | CO2   | O2   |     | MTR    | RPM  | Lamb  | CO   | HC      | CO2   | O2   |
|----|--------|------|-------|------|---------|-------|------|-----|--------|------|-------|------|---------|-------|------|
|    | Vixion | 1500 | 1.178 | 3.62 | 396.28  | 8.74  | 2.51 |     | Vixion | 1500 | 1.054 | 4.14 | 447.06  | 9.04  | 2.59 |
|    |        | 5000 | 0.906 | 5.19 | 381.37  | 9.86  | 0.43 |     |        | 5000 | 0.817 | 5.84 | 392.26  | 10.34 | 0.79 |
|    |        | 9000 | 1.116 | 0.4  | 111     | 13.12 | 0.48 |     |        | 9000 | 1.009 | 0.91 | 117.69  | 13.53 | 0.81 |
| E5 | Supra  | 1500 | 1.359 | 1.16 | 2415.41 | 4.43  | 6.55 | E6  | Supra  | 1500 | 1.321 | 1.57 | 2475    | 4.74  | 6.92 |
|    |        | 5000 | 1.117 | 3.85 | 377.28  | 9.01  | 0.52 |     |        | 5000 | 1.067 | 3.96 | 393.52  | 9.34  | 0.78 |
|    |        | 9000 | 1.34  | 0.91 | 225.33  | 11.35 | 0.47 |     |        | 9000 | 1.292 | 1.06 | 237.51  | 11.86 | 0.65 |
|    | Vario  | 1500 | 1.072 | 1.82 | 1542.21 | 8.88  | 3.68 |     | Vario  | 1500 | 1.036 | 2.47 | 1618.91 | 9.34  | 3.87 |
|    |        | 5000 | 0.885 | 7.87 | 479.14  | 8.08  | 0.52 |     |        | 5000 | 0.755 | 8.1  | 482.2   | 8.34  | 0.63 |
|    |        | 9000 | 0.945 | 1.98 | 305.16  | 12.48 | 0.57 |     |        | 9000 | 0.838 | 2.2  | 311.17  | 12.82 | 0.81 |
|    | Vixion | 1500 | 1.073 | 3.88 | 426.75  | 8.88  | 2.57 |     | Vixion | 1500 | 1.044 | 4.19 | 452.07  | 9.34  | 2.6  |
|    |        | 5000 | 0.855 | 5.74 | 387.22  | 10.2  | 0.6  |     |        | 5000 | 0.813 | 5.85 | 398.22  | 10.37 | 0.81 |
|    |        | 9000 | 1.037 | 0.62 | 114.95  | 13.41 | 0.72 |     |        | 9000 | 0.981 | 1.03 | 117.95  | 13.63 | 0.82 |
| E7 | Supra  | 1500 | 1.396 | 1.07 | 2370.48 | 3.74  | 6.4  | E8  | Supra  | 1500 | 1.418 | 0.93 | 2317.19 | 3.38  | 6.36 |
|    |        | 5000 | 1.166 | 3.79 | 368.95  | 8.79  | 0.36 |     |        | 5000 | 1.204 | 3.65 | 365.39  | 8.53  | 0.32 |
|    |        | 9000 | 1.369 | 0.85 | 216.41  | 11.04 | 0.42 |     |        | 9000 | 1.38  | 0.78 | 213.38  | 10.87 | 0.37 |
|    | Vario  | 1500 | 1.103 | 1.58 | 1467.3  | 8.76  | 3.59 |     | Vario  | 1500 | 1.154 | 1.42 | 1320.03 | 8.71  | 3.44 |
|    |        | 5000 | 0.945 | 7.78 | 476.36  | 7.88  | 0.44 |     |        | 5000 | 0.996 | 7.72 | 475.02  | 7.66  | 0.37 |
|    |        | 9000 | 1.008 | 1.88 | 301.93  | 12.14 | 0.52 |     |        | 9000 | 1.041 | 1.72 | 299.46  | 12.09 | 0.44 |
|    | Vixion | 1500 | 1.113 | 3.69 | 414.08  | 8.76  | 2.53 |     | Vixion | 1500 | 1.183 | 3.59 | 394.88  | 8.71  | 2.48 |
|    |        | 5000 | 0.897 | 5.23 | 383.34  | 10    | 0.48 |     |        | 5000 | 0.911 | 5.18 | 379.42  | 9.8   | 0.36 |
|    |        | 9000 | 1.078 | 0.45 | 113.14  | 13.27 | 0.6  |     |        | 9000 | 1.122 | 0.4  | 109.91  | 13.08 | 0.44 |
| E9 | Supra  | 1500 | 1.371 | 1.14 | 2403.59 | 4.24  | 6.45 | E10 | Supra  | 1500 | 1.428 | 0.91 | 2317.06 | 3.3   | 6.33 |
|    |        | 5000 | 1.134 | 3.83 | 370.7   | 8.89  | 0.46 |     |        | 5000 | 1.216 | 3.6  | 363.5   | 8.5   | 0.27 |
|    |        | 9000 | 1.348 | 0.88 | 218.84  | 11.22 | 0.44 |     |        | 9000 | 1.382 | 0.78 | 209.52  | 10.82 | 0.32 |
|    | Vario  | 1500 | 1.09  | 1.65 | 1513.2  | 8.83  | 3.62 |     | Vario  | 1500 | 1.168 | 1.35 | 1313.47 | 8.65  | 3.42 |
|    |        | 5000 | 0.905 | 7.79 | 477.29  | 8     | 0.48 |     |        | 5000 | 1.008 | 7.69 | 474.4   | 7.55  | 0.32 |
|    |        |      |       |      |         |       |      |     |        |      |       |      |         |       |      |

|     | MTR    | RPM  | Lamb  | CO   | HC      | CO2   | O2   |     | MTR    | RPM  | Lamb  | CO   | HC      | CO2   | O2   |
|-----|--------|------|-------|------|---------|-------|------|-----|--------|------|-------|------|---------|-------|------|
|     | Vixion | 9000 | 0.968 | 1.93 | 303     | 12.4  | 0.56 |     | Vixion | 9000 | 1.072 | 1.71 | 299.4   | 11.92 | 0.41 |
|     |        | 1500 | 1.088 | 3.86 | 418.79  | 8.83  | 2.55 |     |        | 1500 | 1.186 | 3.57 | 386.11  | 8.65  | 2.44 |
|     |        | 5000 | 0.877 | 5.53 | 385.86  | 10.16 | 0.6  |     |        | 5000 | 0.92  | 5.06 | 378.74  | 9.65  | 0.3  |
|     |        | 9000 | 1.053 | 0.6  | 113.63  | 13.32 | 0.6  |     |        | 9000 | 1.126 | 0.39 | 109.64  | 12.86 | 0.43 |
| E11 | Supra  | 1500 | 1.31  | 1.57 | 2487.26 | 4.98  | 7.02 | E12 | Supra  | 1500 | 1.35  | 1.47 | 2425.28 | 4.67  | 6.73 |
|     |        | 5000 | 1.052 | 3.99 | 395.46  | 9.41  | 0.88 |     |        | 5000 | 1.104 | 3.87 | 384.89  | 9.17  | 0.67 |
|     |        | 9000 | 1.29  | 1.08 | 237.53  | 11.97 | 0.66 |     |        | 9000 | 1.33  | 1    | 230.04  | 11.51 | 0.52 |
|     | Vario  | 1500 | 1.008 | 2.56 | 1632.23 | 9.36  | 3.91 |     | Vario  | 1500 | 1.052 | 2.02 | 1567.8  | 8.91  | 3.77 |
|     |        | 5000 | 0.754 | 8.12 | 483.09  | 8.37  | 0.72 |     |        | 5000 | 0.838 | 7.95 | 480.64  | 8.21  | 0.57 |
|     |        | 9000 | 0.811 | 2.23 | 312.92  | 12.89 | 0.82 |     |        | 9000 | 0.905 | 2.06 | 308.46  | 12.7  | 0.62 |
|     | Vixion | 1500 | 1.034 | 4.24 | 457.5   | 9.36  | 2.61 |     | Vixion | 1500 | 1.072 | 4    | 442.11  | 8.91  | 2.58 |
|     |        | 5000 | 0.787 | 5.86 | 399.07  | 10.46 | 0.82 |     |        | 5000 | 0.843 | 5.81 | 391.04  | 10.25 | 0.72 |
|     |        | 9000 | 0.975 | 1.07 | 118.25  | 13.7  | 0.82 |     |        | 9000 | 1.022 | 0.84 | 115.59  | 13.52 | 0.79 |
| E13 | Supra  | 1500 | 1.382 | 1.09 | 2396.57 | 3.78  | 6.44 | E14 | Supra  | 1500 | 1.332 | 1.55 | 2469.18 | 4.71  | 6.9  |
|     |        | 5000 | 1.162 | 3.8  | 370.33  | 8.79  | 0.42 |     |        | 5000 | 1.079 | 3.95 | 392.85  | 9.29  | 0.76 |
|     |        | 9000 | 1.351 | 0.86 | 218.24  | 11.22 | 0.43 |     |        | 9000 | 1.312 | 1.03 | 233.08  | 11.85 | 0.64 |
|     | Vario  | 1500 | 1.098 | 1.59 | 1512.42 | 8.8   | 3.62 |     | Vario  | 1500 | 1.041 | 2.31 | 1610.98 | 9.31  | 3.79 |
|     |        | 5000 | 0.913 | 7.78 | 477.1   | 7.95  | 0.47 |     |        | 5000 | 0.791 | 8.09 | 481.98  | 8.29  | 0.62 |
|     |        | 9000 | 0.996 | 1.88 | 302.43  | 12.23 | 0.52 |     |        | 9000 | 0.884 | 2.15 | 310.71  | 12.81 | 0.73 |
|     | Vixion | 1500 | 1.111 | 3.77 | 418.34  | 8.8   | 2.54 |     | Vixion | 1500 | 1.047 | 4.18 | 450.67  | 9.31  | 2.59 |
|     |        | 5000 | 0.895 | 5.32 | 385.13  | 10.06 | 0.58 |     |        | 5000 | 0.816 | 5.84 | 396.29  | 10.34 | 0.8  |
|     |        | 9000 | 1.074 | 0.48 | 113.4   | 13.28 | 0.6  |     |        | 9000 | 1.005 | 0.94 | 117.78  | 13.54 | 0.82 |
| E15 | Supra  | 1500 | 1.293 | 1.67 | 2499.86 | 5.07  | 7.07 | E16 | Supra  | 1500 | 1.433 | 0.91 | 2307.89 | 3.22  | 6.23 |
|     |        | 5000 | 1.025 | 4.01 | 413.52  | 9.42  | 0.98 |     |        | 5000 | 1.221 | 3.6  | 359.99  | 8.49  | 0.25 |
|     |        | 9000 | 1.285 | 1.09 | 243.69  | 12.01 | 0.67 |     |        | 9000 | 1.398 | 0.78 | 207.92  | 10.78 | 0.31 |
|     | Vario  | 1500 | 1.001 | 2.58 | 1643.59 | 9.41  | 3.98 |     | Vario  | 1500 | 1.175 | 1.21 | 1279.42 | 8.64  | 3.34 |

|     | MTR    | RPM  | Lamb  | CO   | HC      | CO2   | O2   |     | MTR    | RPM  | Lamb  | CO   | HC      | CO2   | O2   |
|-----|--------|------|-------|------|---------|-------|------|-----|--------|------|-------|------|---------|-------|------|
|     |        | 5000 | 0.75  | 8.15 | 483.12  | 8.51  | 0.73 |     |        | 5000 | 1.01  | 7.52 | 472.19  | 7.39  | 0.27 |
|     |        | 9000 | 0.8   | 2.24 | 212.92  | 12.93 | 0.83 |     |        | 9000 | 1.111 | 1.66 | 299.29  | 11.92 | 0.37 |
|     | Vixion | 1500 | 0.995 | 4.38 | 486.33  | 9.41  | 2.62 |     | Vixion | 1500 | 1.189 | 3.56 | 384.4   | 8.64  | 2.41 |
|     |        | 5000 | 0.76  | 5.86 | 400.01  | 10.51 | 0.82 |     |        | 5000 | 0.92  | 5.05 | 374.46  | 9.62  | 0.3  |
|     |        | 9000 | 0.963 | 1.08 | 119.34  | 13.74 | 0.85 |     |        | 9000 | 1.158 | 0.35 | 108.82  | 12.73 | 0.36 |
| E17 | Supra  | 1500 | 1.413 | 1.01 | 2354.57 | 3.55  | 6.39 | E18 | Supra  | 1500 | 1.359 | 1.25 | 2419.08 | 4.54  | 6.67 |
|     |        | 5000 | 1.19  | 3.75 | 368.43  | 8.77  | 0.33 |     |        | 5000 | 1.111 | 3.86 | 377.47  | 9.02  | 0.64 |
|     |        | 9000 | 1.378 | 0.84 | 216.15  | 10.99 | 0.41 |     |        | 9000 | 1.333 | 0.97 | 226.63  | 11.51 | 0.52 |
|     | Vario  | 1500 | 1.11  | 1.55 | 1423.44 | 8.75  | 3.54 |     | Vario  | 1500 | 1.058 | 1.97 | 1557.2  | 8.89  | 3.74 |
|     |        | 5000 | 0.967 | 7.76 | 475.52  | 7.76  | 0.41 |     |        | 5000 | 0.884 | 7.87 | 479.6   | 8.1   | 0.56 |
|     |        | 9000 | 1.01  | 1.87 | 301.55  | 12.11 | 0.48 |     |        | 9000 | 0.913 | 2.01 | 305.48  | 12.69 | 0.59 |
|     | Vixion | 1500 | 1.138 | 3.66 | 413.23  | 8.75  | 2.52 |     | Vixion | 1500 | 1.073 | 3.99 | 430.42  | 8.89  | 2.57 |
|     |        | 5000 | 0.905 | 5.23 | 382.98  | 9.96  | 0.44 |     |        | 5000 | 0.847 | 5.76 | 387.71  | 10.22 | 0.7  |
|     |        | 9000 | 1.111 | 0.42 | 111.51  | 13.26 | 0.58 |     |        | 9000 | 1.032 | 0.81 | 115.44  | 13.47 | 0.73 |
| E19 |        | RPM  | Lamb  | CO   | HC      | CO2   | O2   |     |        |      |       |      |         |       |      |
|     | Supra  | 1500 | 1.398 | 0.87 | 2287    | 3.7   | 6.21 |     |        |      |       |      |         |       |      |
|     |        | 5000 | 1.112 | 3.45 | 345     | 8.7   | 0.33 |     |        |      |       |      |         |       |      |
|     |        | 9000 | 1.332 | 0.69 | 201     | 10.2  | 0.31 |     |        |      |       |      |         |       |      |
|     | Vario  | 1500 | 1.369 | 1.18 | 1260    | 8.5   | 3.29 |     |        |      |       |      |         |       |      |
|     |        | 5000 | 1.091 | 7.49 | 465     | 7.2   | 0.33 |     |        |      |       |      |         |       |      |
|     |        | 9000 | 1.211 | 1.51 | 279     | 11.2  | 0.31 |     |        |      |       |      |         |       |      |
|     | Vixion | 1500 | 1.176 | 3.49 | 367     | 8.7   | 2.42 |     |        |      |       |      |         |       |      |
|     |        | 5000 | 1.008 | 4.99 | 346     | 9.8   | 0.42 |     |        |      |       |      |         |       |      |
|     |        | 9000 | 1.143 | 0.31 | 105     | 12.1  | 0.43 |     |        |      |       |      |         |       |      |

## Lampiran 2. Data Hasil Uji Performa Mesin

| VIXION |        |        |      |      |      |      |      |       |      |       |      |      |      |      |      |      |      |       |      |       |       |
|--------|--------|--------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|-------|
| RPM    | Power  |        |      |      |      |      |      |       |      |       |      |      |      |      |      |      |      |       |      |       |       |
|        | STD TK | STD LM | E1   | E2   | E3   | E4   | E5   | E6    | E7   | E8    | E9   | E10  | E11  | E12  | E13  | E14  | E15  | E16   | E17  | E18   | E19   |
| 3,000  | 0.9    | 1.6    | 1.2  | 0.9  | 1.1  | 1.4  | 0.9  | 1.5   | 1.5  | 2.1   | 1.6  | 1.4  | 1.5  | 3.2  | 1.1  | 2.0  | 1.5  | 1.7   | 1.9  | 1.8   | 1.1   |
| 3,500  | 5.7    | 4.8    | 5.0  | 5.5  | 4.5  | 3.5  | 4.7  | 4.6   | 4.9  | 5.1   | 5.4  | 4.9  | 4.9  | 5.8  | 4.1  | 3.8  | 5.2  | 5.1   | 5.3  | 4.9   | 5.3   |
| 4,000  | 6.5    | 6.4    | 6.7  | 6.8  | 5.9  | 4.9  | 6.6  | 6.7   | 6.6  | 6.6   | 6.6  | 6.5  | 6.7  | 6.7  | 5.8  | 6.6  | 6.7  | 6.8   | 6.6  | 6.9   | 6.8   |
| 4,500  | 7.0    | 6.7    | 7.5  | 7.2  | 6.3  | 5.5  | 7.3  | 7.2   | 7.4  | 7.4   | 7.6  | 7.3  | 7.5  | 7.2  | 6.4  | 7.2  | 7.7  | 7.7   | 7.5  | 7.7   | 7.3   |
| 5,000  | 7.7    | 7.5    | 8.2  | 8.1  | 7.1  | 6.1  | 7.9  | 8.1   | 8.2  | 8.1   | 8.5  | 8.0  | 8.3  | 8.1  | 7.0  | 8.1  | 8.5  | 8.7   | 8.3  | 8.8   | 8.0   |
| 5,500  | 9.1    | 8.7    | 9.2  | 9.2  | 8.0  | 6.7  | 9.0  | 9.3   | 9.2  | 9.2   | 9.5  | 9.0  | 9.3  | 9.1  | 7.9  | 9.2  | 9.3  | 9.5   | 9.4  | 9.6   | 9.1   |
| 6,000  | 10.4   | 9.9    | 10.2 | 10.5 | 9.0  | 7.5  | 10.1 | 10.4  | 10.2 | 10.3  | 10.7 | 10.1 | 10.4 | 10.3 | 8.8  | 10.3 | 10.3 | 10.6  | 10.5 | 10.8  | 10.3  |
| 6,500  | 11.4   | 11.3   | 11.4 | 11.6 | 9.8  | 8.0  | 11.3 | 11.5  | 11.4 | 11.4  | 11.6 | 11.4 | 11.5 | 11.2 | 9.7  | 11.3 | 11.4 | 11.5  | 11.5 | 11.5  | 11.6  |
| 7,000  | 11.9   | 12.7   | 11.9 | 12.2 | 10.3 | 8.4  | 11.9 | 12.1  | 12.1 | 11.9  | 12.1 | 12.1 | 12.0 | 11.5 | 10.2 | 11.9 | 11.9 | 12.2  | 12.0 | 12.5  | 12.4  |
| 7,500  | 13.0   | 13.5   | 12.6 | 12.9 | 10.8 | 8.8  | 12.6 | 12.9  | 12.7 | 12.6  | 12.6 | 12.7 | 12.7 | 12.3 | 10.7 | 12.6 | 12.5 | 12.7  | 12.6 | 12.9  | 13.2  |
| 8,000  | 13.6   | 14.0   | 13.2 | 13.6 | 11.4 | 9.2  | 13.5 | 13.8  | 13.4 | 13.5  | 13.0 | 13.5 | 13.3 | 12.8 | 11.3 | 13.5 | 12.8 | 13.3  | 13.3 | 13.8  | 14.2  |
| 8,500  | 13.9   | 14.1   | 13.7 | 13.9 | 11.6 | 9.3  | 14.0 | 14.2  | 13.9 | 14.1  | 13.4 | 14.0 | 13.8 | 13.2 | 11.6 | 14.2 | 13.3 | 14.1  | 13.8 | 14.9  | 14.7  |
| 9,000  | 13.8   | 14.1   | 13.8 | 13.8 | 11.5 | 9.1  | 14.1 | 14.4  | 14.0 | 13.9  | 13.3 | 14.1 | 13.9 | 13.0 | 11.6 | 14.2 | 13.4 | 14.1  | 13.6 | 14.8  | 14.7  |
| 9,500  | 13.7   | 13.9   | 13.6 | 13.3 | 11.0 | 8.8  | 13.9 | 13.9  | 13.7 | 13.8  | 13.2 | 13.9 | 13.6 | 12.9 | 11.3 | 13.7 | 13.2 | 13.6  | 13.5 | 13.9  | 14.3  |
| AVG    | 9.90   | 9.94   | 9.84 | 9.96 | 8.44 | 6.91 | 9.84 | 10.04 | 9.93 | 10.00 | 9.94 | 9.92 | 9.94 | 9.81 | 8.38 | 9.90 | 9.84 | 10.09 | 9.97 | 10.34 | 10.21 |
| STDEV  | 3.92   | 4.07   | 3.78 | 3.87 | 3.14 | 2.41 | 3.99 | 3.98  | 3.84 | 3.72  | 3.59 | 3.91 | 3.78 | 3.18 | 3.20 | 3.92 | 3.58 | 3.76  | 3.65 | 3.95  | 4.13  |

| RPM   | Torque |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | STD TK | STD LM | E1    | E2    | E3    | E4    | E5    | E6    | E7    | E8    | E9    | E10   | E11   | E12   | E13   | E14   | E15   | E16   | E17   | E18   | E19   |
| 3,000 | 2.2    | 3.6    | 2.8   | 2.1   | 3.7   | 2.1   | 2.1   | 3.3   | 2.8   | 4.7   | 3.7   | 3.2   | 2.5   | 7.6   | 2.1   | 4.5   | 3.6   | 4.0   | 4.2   | 7.9   | 2.5   |
| 3,500 | 11.6   | 9.8    | 10.1  | 11.2  | 9.5   | 7.4   | 9.6   | 9.3   | 10.9  | 10.3  | 10.9  | 10.7  | 11.0  | 11.7  | 8.5   | 7.8   | 10.5  | 9.8   | 10.6  | 11.9  | 10.8  |
| 4,000 | 11.5   | 11.3   | 11.8  | 11.9  | 11.9  | 11.2  | 11.7  | 11.9  | 11.9  | 11.7  | 11.7  | 11.9  | 11.9  | 12.0  | 11.2  | 11.7  | 11.9  | 11.8  | 11.7  | 12.0  | 12.1  |
| 4,500 | 11.0   | 10.5   | 11.8  | 11.4  | 11.4  | 11.6  | 11.6  | 11.3  | 11.8  | 11.7  | 12.0  | 11.9  | 11.6  | 11.3  | 11.6  | 11.4  | 12.1  | 11.5  | 11.9  | 11.8  | 11.4  |
| 5,000 | 10.9   | 10.7   | 11.6  | 11.5  | 11.5  | 11.2  | 11.2  | 11.5  | 11.8  | 11.5  | 12.1  | 11.9  | 11.7  | 11.5  | 11.2  | 11.5  | 12.1  | 11.5  | 11.8  | 11.9  | 11.3  |
| 5,500 | 11.7   | 11.2   | 11.8  | 11.9  | 12.0  | 11.5  | 11.6  | 12.0  | 12.0  | 11.8  | 12.3  | 12.0  | 11.9  | 11.8  | 11.6  | 11.8  | 12.0  | 11.9  | 12.0  | 11.9  | 11.8  |
| 6,000 | 12.2   | 11.6   | 12.1  | 12.4  | 12.3  | 11.9  | 11.9  | 12.3  | 12.3  | 12.2  | 12.6  | 12.2  | 12.4  | 12.1  | 11.9  | 12.1  | 12.2  | 12.3  | 12.4  | 12.1  | 12.2  |
| 6,500 | 12.4   | 12.3   | 12.3  | 12.6  | 12.5  | 12.1  | 12.3  | 12.6  | 12.5  | 12.4  | 12.7  | 12.4  | 12.6  | 12.3  | 12.3  | 12.4  | 12.4  | 12.5  | 12.5  | 12.9  | 12.7  |
| 7,000 | 12.1   | 12.8   | 12.1  | 12.4  | 12.2  | 12.1  | 12.1  | 12.2  | 12.2  | 12.0  | 12.2  | 12.1  | 12.3  | 11.7  | 12.1  | 12.0  | 12.0  | 12.1  | 12.1  | 11.7  | 12.5  |
| 7,500 | 12.3   | 12.7   | 11.8  | 12.2  | 12.1  | 11.9  | 11.9  | 12.1  | 12.0  | 11.9  | 11.9  | 11.8  | 12.1  | 11.6  | 11.9  | 11.9  | 11.7  | 12.0  | 11.9  | 11.6  | 12.5  |
| 8,000 | 12.1   | 12.4   | 11.6  | 12.0  | 12.2  | 11.9  | 11.9  | 12.2  | 11.7  | 12.0  | 11.5  | 11.5  | 11.9  | 11.3  | 11.9  | 12.0  | 11.3  | 12.1  | 11.7  | 11.3  | 12.5  |
| 8,500 | 11.6   | 11.7   | 11.4  | 11.6  | 11.8  | 11.4  | 11.6  | 11.8  | 11.3  | 11.8  | 11.2  | 11.2  | 11.5  | 11.0  | 11.4  | 11.8  | 11.1  | 11.8  | 11.5  | 11.1  | 12.2  |
| 9,000 | 10.9   | 11.1   | 10.6  | 10.9  | 11.2  | 9.9   | 10.7  | 11.3  | 10.7  | 10.9  | 10.5  | 10.6  | 10.8  | 10.2  | 10.7  | 11.1  | 10.5  | 11.1  | 10.7  | 10.2  | 11.6  |
| 9,500 | 10.7   | 10.3   | 10.2  | 9.9   | 10.4  | 9.7   | 10.6  | 10.3  | 9.9   | 10.5  | 10.3  | 9.8   | 9.9   | 10.2  | 9.7   | 10.2  | 9.8   | 10.4  | 10.4  | 10.2  | 10.6  |
| AVG   | 10.93  | 11.42  | 10.86 | 11.00 | 11.03 | 10.41 | 10.77 | 11.02 | 10.97 | 11.09 | 11.11 | 10.96 | 10.99 | 11.16 | 10.57 | 10.87 | 10.95 | 11.05 | 11.10 | 11.32 | 11.20 |
| STDEV | 2.58   | 2.29   | 2.42  | 2.66  | 2.27  | 2.73  | 2.61  | 2.38  | 2.45  | 1.93  | 2.26  | 2.35  | 2.55  | 1.21  | 2.65  | 2.17  | 2.25  | 2.15  | 2.09  | 1.22  | 2.59  |

| VARIO |        |        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------|--------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| RPM   | Power  |        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|       | STD TK | STD LM | E1   | E2   | E3   | E4   | E5   | E6   | E7   | E8   | E9   | E10  | E11  | E12  | E13  | E14  | E15  | E16  | E17  | E18  | E19  |
| 3,000 | 7.1    | 7.4    | 8.4  | 8.3  | 8.1  | 7.1  | 8.4  | 7.6  | 8.2  | 8.2  | 8.1  | 8.2  | 8.3  | 8.3  | 8.3  | 8.3  | 8.4  | 8.5  | 8.0  | 8.2  | 8.3  |
| 3,500 | 8.4    | 8.5    | 8.6  | 8.9  | 9.0  | 7.4  | 8.8  | 8.2  | 8.9  | 8.8  | 8.7  | 8.9  | 8.9  | 8.8  | 8.9  | 8.8  | 8.7  | 8.6  | 8.8  | 8.5  | 8.7  |
| 4,000 | 9.1    | 8.9    | 8.0  | 8.0  | 8.2  | 7.1  | 8.1  | 7.9  | 8.1  | 8.1  | 8.0  | 8.1  | 8.1  | 7.9  | 8.1  | 8.0  | 7.9  | 7.9  | 7.9  | 8.0  | 7.9  |
| 4,500 | 8.8    | 8.6    | 7.9  | 7.9  | 7.8  | 7.6  | 7.8  | 7.6  | 7.9  | 7.8  | 7.7  | 7.9  | 7.8  | 7.8  | 7.7  | 7.8  | 7.8  | 7.7  | 7.7  | 7.9  | 7.4  |
| 5,000 | 8.7    | 8.4    | 7.4  | 7.5  | 7.4  | 7.2  | 7.4  | 7.2  | 7.5  | 7.5  | 7.4  | 7.5  | 7.4  | 7.4  | 7.4  | 7.4  | 7.3  | 7.2  | 6.9  | 7.3  | 6.6  |
| 5,500 | 8.6    | 8.5    | 7.1  | 6.9  | 6.8  | 6.8  | 7.0  | 6.8  | 7.1  | 7.1  | 7.0  | 7.0  | 6.9  | 6.7  | 6.8  | 6.8  | 6.8  | 6.8  | 6.7  | 7.0  | 6.4  |
| 6,000 | 8.3    | 8.2    | 6.8  | 6.8  | 6.9  | 6.7  | 6.8  | 6.7  | 6.8  | 6.9  | 7.0  | 6.8  | 6.7  | 6.7  | 6.7  | 6.7  | 6.7  | 6.7  | 6.3  | 6.8  | 6.3  |
| 6,500 | 8.2    | 8.2    | 6.8  | 6.8  | 6.8  | 6.4  | 6.8  | 6.4  | 6.7  | 6.9  | 7.1  | 6.7  | 6.8  | 6.8  | 6.8  | 6.8  | 6.8  | 6.8  | 6.2  | 6.8  | 6.5  |
| 7,000 | 7.4    | 8.0    | 6.9  | 6.8  | 7.0  | 6.6  | 6.9  | 6.6  | 6.6  | 6.7  | 6.8  | 6.7  | 6.8  | 7.0  | 6.8  | 6.9  | 7.0  | 7.0  | 6.7  | 7.0  | 6.5  |
| 7,500 | 7.1    | 7.2    | 7.0  | 7.0  | 7.1  | 6.2  | 7.0  | 6.8  | 6.9  | 7.1  | 7.2  | 7.0  | 6.9  | 7.1  | 6.9  | 7.1  | 7.0  | 7.0  | 6.9  | 7.2  | 6.8  |
| 8,000 | 7.1    | 7.2    | 7.3  | 7.1  | 7.2  | 6.3  | 7.3  | 6.9  | 7.1  | 7.3  | 7.4  | 7.1  | 7.2  | 7.1  | 7.3  | 7.1  | 7.2  | 7.2  | 7.0  | 7.3  | 6.7  |
| 8,500 | 7.3    | 7.2    | 7.1  | 7.0  | 7.0  | 6.6  | 7.0  | 6.6  | 7.0  | 7.0  | 7.0  | 7.0  | 6.9  | 6.9  | 6.9  | 6.9  | 6.9  | 6.9  | 6.7  | 7.0  | 6.1  |
| 9,000 | 7.1    | 6.9    | 6.4  | 6.4  | 6.3  | 5.1  | 6.4  | 5.9  | 6.3  | 6.3  | 6.3  | 6.3  | 6.3  | 6.4  | 6.3  | 6.4  | 6.2  | 6.1  | 6.0  | 6.3  | 5.4  |
| 9,500 | 6.7    | 6.5    | 5.5  | 5.3  | 5.4  | 4.9  | 5.4  | 4.9  | 5.3  | 5.3  | 5.3  | 5.3  | 5.3  | 5.3  | 5.3  | 5.3  | 5.3  | 5.2  | 5.3  | 5.4  | 4.2  |
| AVG   | 7.85   | 7.87   | 7.23 | 7.16 | 7.21 | 6.57 | 7.19 | 6.86 | 7.17 | 7.19 | 7.21 | 7.17 | 7.16 | 7.16 | 7.16 | 7.16 | 7.14 | 7.11 | 6.94 | 7.19 | 6.70 |
| STDEV | 0.81   | 0.75   | 0.81 | 0.88 | 0.88 | 0.78 | 0.85 | 0.84 | 0.90 | 0.86 | 0.82 | 0.89 | 0.89 | 0.86 | 0.90 | 0.87 | 0.88 | 0.89 | 0.91 | 0.80 | 1.15 |

| RPM   | Torque |        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------|--------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|       | STD TK | STD LM | E1   | E2   | E3   | E4   | E5   | E6   | E7   | E8   | E9   | E10  | E11  | E12  | E13  | E14  | E15  | E16  | E17  | E18  | E19  |
| 3,000 | 17.4   | 18.1   | 20.7 | 19.9 | 19.4 | 18.1 | 20.2 | 18.3 | 19.8 | 20.1 | 19.7 | 19.8 | 19.8 | 20.0 | 19.8 | 20.0 | 20.2 | 20.6 | 19.2 | 19.9 | 20.2 |
| 3,500 | 17.2   | 17.5   | 17.7 | 18.1 | 18.4 | 16.2 | 18.0 | 16.7 | 18.2 | 17.1 | 17.8 | 18.1 | 17.7 | 17.9 | 18.3 | 18.0 | 17.7 | 17.5 | 18.1 | 17.5 | 17.7 |
| 4,000 | 16.1   | 16.0   | 14.4 | 14.2 | 14.6 | 14.0 | 14.4 | 14.0 | 14.4 | 13.9 | 14.2 | 14.3 | 14.5 | 14.1 | 14.5 | 14.2 | 14.4 | 14.1 | 13.9 | 14.2 | 14.1 |
| 4,500 | 13.9   | 13.7   | 12.6 | 12.4 | 12.3 | 12.1 | 12.4 | 12.1 | 12.4 | 11.4 | 12.2 | 12.4 | 7.8  | 12.5 | 12.2 | 12.4 | 10.2 | 12.1 | 12.1 | 12.5 | 11.7 |
| 5,000 | 12.4   | 12.0   | 10.6 | 10.6 | 10.5 | 10.2 | 10.5 | 10.2 | 10.7 | 9.9  | 10.5 | 10.7 | 10.7 | 10.5 | 10.5 | 10.6 | 10.7 | 10.2 | 9.8  | 10.3 | 9.3  |
| 5,500 | 11.2   | 11.0   | 9.2  | 8.9  | 8.8  | 8.3  | 9.0  | 8.8  | 9.1  | 8.6  | 9.0  | 9.0  | 8.9  | 8.7  | 8.8  | 8.8  | 9.0  | 8.8  | 8.6  | 9.0  | 8.3  |
| 6,000 | 9.9    | 9.7    | 8.1  | 8.0  | 8.2  | 7.9  | 8.0  | 7.9  | 8.1  | 7.5  | 8.3  | 8.0  | 7.9  | 7.9  | 8.0  | 7.9  | 8.0  | 7.9  | 7.5  | 8.1  | 7.5  |
| 6,500 | 8.9    | 9.0    | 7.4  | 7.3  | 7.5  | 6.9  | 7.4  | 6.9  | 7.3  | 7.3  | 7.7  | 7.3  | 7.1  | 7.4  | 7.4  | 7.4  | 7.3  | 7.3  | 6.8  | 7.4  | 7.1  |
| 7,000 | 7.5    | 8.1    | 7.0  | 6.9  | 7.0  | 6.2  | 6.9  | 6.6  | 6.7  | 6.7  | 6.9  | 6.8  | 6.8  | 7.1  | 6.9  | 7.0  | 6.9  | 7.1  | 6.8  | 7.0  | 6.6  |
| 7,500 | 6.7    | 6.8    | 6.6  | 6.6  | 6.7  | 6.1  | 6.6  | 6.4  | 6.5  | 6.4  | 6.8  | 6.5  | 6.5  | 6.7  | 6.5  | 6.6  | 6.5  | 6.6  | 6.5  | 6.8  | 6.4  |
| 8,000 | 6.3    | 6.4    | 6.5  | 6.2  | 6.4  | 6.1  | 6.4  | 6.1  | 6.2  | 6.1  | 6.5  | 6.2  | 6.2  | 6.3  | 6.4  | 6.3  | 6.3  | 6.4  | 6.1  | 6.4  | 5.9  |
| 8,500 | 6.0    | 6.0    | 5.9  | 5.8  | 5.9  | 5.2  | 5.8  | 5.5  | 5.8  | 5.4  | 5.8  | 5.8  | 5.6  | 5.8  | 5.7  | 5.8  | 5.8  | 5.7  | 5.6  | 5.8  | 5.1  |
| 9,000 | 5.6    | 5.5    | 5.0  | 5.0  | 4.9  | 4.6  | 5.0  | 4.6  | 4.9  | 4.5  | 4.9  | 4.9  | 4.8  | 5.0  | 4.9  | 5.0  | 4.9  | 4.8  | 4.7  | 5.0  | 4.2  |
| 9,500 | 5.0    | 4.9    | 4.1  | 4.0  | 4.0  | 3.2  | 4.0  | 3.7  | 4.0  | 3.6  | 4.0  | 4.0  | 3.8  | 4.0  | 4.0  | 4.0  | 4.0  | 3.9  | 4.0  | 4.0  | 3.2  |
| AVG   | 10.29  | 9.72   | 9.69 | 9.56 | 9.61 | 8.94 | 9.61 | 9.13 | 9.58 | 9.16 | 9.59 | 9.57 | 9.15 | 9.54 | 9.54 | 9.55 | 9.42 | 9.49 | 9.26 | 9.56 | 9.08 |
| STDEV | 4.45   | 4.53   | 4.95 | 4.90 | 4.86 | 4.55 | 4.93 | 4.54 | 4.92 | 4.86 | 4.77 | 4.91 | 4.86 | 4.89 | 4.92 | 4.89 | 4.86 | 4.93 | 4.83 | 4.79 | 5.08 |

| SUPRA |        |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------|--------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| RPM   | Power  |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|       | STD TK |  | E1   | E2   | E3   | E4   | E5   | E6   | E7   | E8   | E9   | E10  | E11  | E12  | E13  | E14  | E15  | E16  | E17  | E18  | E19  |
| 3,000 | 0.4    |  | 0.7  | 1.9  | 0.7  | 0.5  | 0.6  | 1.1  | 0.7  | 0.7  | 1.4  | 2.1  | 1.0  | 1.4  | 0.7  | 1.8  | 0.8  | 0.7  | 0.8  | 1.5  | 1.2  |
| 3,500 | 2.7    |  | 3.1  | 2.7  | 2.6  | 2.1  | 2.4  | 2.8  | 2.8  | 2.7  | 2.2  | 2.7  | 2.6  | 2.7  | 2.7  | 2.7  | 2.9  | 2.7  | 2.8  | 3.3  | 3.2  |
| 4,000 | 3.2    |  | 3.2  | 3.3  | 3.3  | 2.9  | 3.0  | 3.5  | 3.4  | 3.3  | 2.8  | 3.3  | 3.3  | 3.3  | 3.3  | 3.3  | 3.3  | 3.3  | 3.3  | 4.0  | 3.6  |
| 4,500 | 3.7    |  | 3.7  | 3.8  | 3.9  | 3.3  | 3.5  | 4.0  | 4.0  | 3.9  | 3.3  | 3.8  | 3.9  | 3.9  | 4.0  | 3.8  | 3.8  | 3.9  | 3.8  | 4.4  | 4.2  |
| 5,000 | 4.2    |  | 4.0  | 4.3  | 4.5  | 3.8  | 3.9  | 4.5  | 4.4  | 4.3  | 3.8  | 4.3  | 4.3  | 4.4  | 4.4  | 4.3  | 4.2  | 4.4  | 4.2  | 4.8  | 4.5  |
| 5,500 | 4.5    |  | 4.2  | 4.5  | 4.7  | 4.1  | 4.2  | 4.7  | 4.5  | 4.6  | 4.0  | 4.5  | 4.6  | 4.6  | 4.7  | 4.6  | 4.4  | 4.7  | 4.5  | 5.2  | 4.8  |
| 6,000 | 4.8    |  | 4.6  | 4.8  | 4.9  | 4.4  | 4.5  | 5.0  | 4.9  | 4.8  | 4.3  | 4.8  | 4.8  | 4.8  | 5.0  | 4.8  | 4.7  | 4.8  | 4.8  | 5.5  | 5.1  |
| 6,500 | 4.9    |  | 4.7  | 4.8  | 5.0  | 4.6  | 4.6  | 5.1  | 4.8  | 4.9  | 4.3  | 4.8  | 5.0  | 4.9  | 5.1  | 4.9  | 4.8  | 5.0  | 4.9  | 5.5  | 5.2  |
| 7,000 | 5.0    |  | 4.9  | 5.0  | 5.2  | 4.6  | 4.7  | 5.4  | 5.1  | 5.1  | 4.5  | 5.0  | 5.3  | 5.1  | 5.3  | 5.0  | 5.1  | 5.1  | 5.1  | 5.7  | 5.5  |
| 7,500 | 4.9    |  | 4.9  | 5.0  | 5.2  | 4.9  | 4.7  | 5.5  | 5.2  | 5.2  | 4.5  | 5.0  | 5.4  | 5.1  | 5.4  | 5.0  | 5.1  | 5.2  | 5.1  | 5.7  | 5.5  |
| 8,000 | 4.7    |  | 4.8  | 4.8  | 5.0  | 4.8  | 4.6  | 5.3  | 5.1  | 5.0  | 4.3  | 4.8  | 5.1  | 4.9  | 5.3  | 4.8  | 5.0  | 5.0  | 5.0  | 5.5  | 5.3  |
| 8,500 | 4.3    |  | 4.3  | 4.6  | 4.9  | 4.5  | 4.4  | 5.0  | 4.8  | 4.9  | 4.1  | 4.6  | 4.9  | 4.7  | 5.1  | 4.7  | 4.6  | 4.9  | 4.8  | 5.3  | 5.0  |
| 9,000 | 3.7    |  | 4.0  | 4.3  | 4.6  | 4.3  | 3.9  | 4.6  | 4.4  | 4.5  | 3.8  | 4.2  | 4.4  | 4.4  | 4.7  | 4.3  | 4.2  | 4.5  | 4.5  | 4.8  | 4.6  |
| 9,500 | 3.1    |  | 3.8  | 4.1  | 4.2  | 4.1  | 3.8  | 4.3  | 4.1  | 4.2  | 3.6  | 4.1  | 4.2  | 4.2  | 4.2  | 4.1  | 4.0  | 4.2  | 4.2  | 4.8  | 4.4  |
| AVG   | 3.86   |  | 3.92 | 4.14 | 4.19 | 3.78 | 3.78 | 4.33 | 4.16 | 4.15 | 3.61 | 4.13 | 4.20 | 4.16 | 4.29 | 4.15 | 4.06 | 4.17 | 4.12 | 4.71 | 4.43 |
| STDEV | 1.25   |  | 1.10 | 0.93 | 1.25 | 1.23 | 1.15 | 1.20 | 1.20 | 1.21 | 0.93 | 0.88 | 1.20 | 1.06 | 1.30 | 0.97 | 1.15 | 1.23 | 1.18 | 1.15 | 1.15 |

| RPM   | Torque |  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------|--------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|       | STD TK |  | E1   | E2   | E3   | E4   | E5   | E6   | E7   | E8   | E9   | E10  | E11  | E12  | E13  | E14  | E15  | E16  | E17  | E18  | E19  |
| 3,000 | 1.0    |  | 1.6  | 1.1  | 1.1  | 1.1  | 1.3  | 3.3  | 1.5  | 1.9  | 2.1  | 5.0  | 2.2  | 2.6  | 1.6  | 4.0  | 1.9  | 1.1  | 1.7  | 3.2  | 3.3  |
| 3,500 | 2.8    |  | 6.4  | 3.6  | 5.4  | 4.3  | 4.9  | 5.4  | 5.6  | 5.4  | 5.8  | 5.5  | 5.4  | 5.4  | 5.5  | 5.4  | 5.9  | 5.4  | 5.7  | 5.9  | 6.0  |
| 4,000 | 5.6    |  | 5.7  | 5.4  | 5.8  | 5.1  | 5.4  | 5.7  | 6.0  | 5.8  | 5.9  | 5.7  | 5.9  | 5.8  | 5.9  | 5.7  | 5.8  | 5.8  | 5.9  | 5.9  | 5.9  |
| 4,500 | 5.8    |  | 5.8  | 5.6  | 6.2  | 5.3  | 5.7  | 6.1  | 6.2  | 6.1  | 6.3  | 6.0  | 6.1  | 6.1  | 6.3  | 6.0  | 6.0  | 6.1  | 6.1  | 6.8  | 6.1  |
| 5,000 | 5.9    |  | 5.7  | 5.6  | 6.3  | 5.4  | 5.7  | 6.1  | 6.1  | 6.1  | 6.3  | 6.0  | 6.1  | 6.2  | 6.3  | 6.1  | 5.9  | 6.0  | 6.0  | 6.7  | 6.0  |
| 5,500 | 5.8    |  | 5.4  | 5.5  | 6.1  | 5.2  | 5.5  | 5.9  | 5.8  | 5.9  | 6.2  | 5.8  | 5.9  | 6.0  | 6.0  | 5.9  | 5.6  | 5.7  | 5.7  | 6.2  | 5.7  |
| 6,000 | 5.7    |  | 5.4  | 5.4  | 5.7  | 5.2  | 5.4  | 5.6  | 5.7  | 5.6  | 6.0  | 5.6  | 5.7  | 5.7  | 6.0  | 5.6  | 5.6  | 5.6  | 5.6  | 6.0  | 5.7  |
| 6,500 | 5.4    |  | 5.1  | 5.2  | 5.5  | 5.0  | 5.1  | 5.3  | 5.3  | 5.3  | 5.6  | 5.2  | 5.4  | 5.4  | 5.6  | 5.3  | 5.3  | 5.3  | 5.3  | 5.6  | 5.4  |
| 7,000 | 5.0    |  | 4.9  | 4.9  | 5.2  | 4.7  | 4.8  | 5.1  | 5.1  | 5.1  | 5.4  | 5.0  | 5.4  | 5.1  | 5.4  | 5.1  | 5.1  | 5.1  | 5.1  | 5.4  | 5.2  |
| 7,500 | 4.6    |  | 4.6  | 4.6  | 5.0  | 4.6  | 4.5  | 4.8  | 4.8  | 4.8  | 5.1  | 4.7  | 5.0  | 4.9  | 5.1  | 4.8  | 4.8  | 4.8  | 4.8  | 5.3  | 4.9  |
| 8,000 | 4.1    |  | 4.2  | 4.2  | 4.5  | 4.2  | 4.0  | 4.3  | 4.4  | 4.4  | 4.6  | 4.2  | 4.5  | 4.4  | 4.6  | 4.3  | 4.4  | 4.4  | 4.4  | 4.6  | 4.5  |
| 8,500 | 3.6    |  | 3.6  | 3.7  | 4.0  | 3.8  | 3.6  | 3.9  | 3.9  | 4.0  | 4.2  | 3.8  | 4.0  | 3.9  | 4.2  | 3.9  | 3.8  | 4.0  | 4.0  | 4.2  | 3.9  |
| 9,000 | 2.9    |  | 3.1  | 3.2  | 3.6  | 3.4  | 3.2  | 3.4  | 3.5  | 3.5  | 3.9  | 3.3  | 3.5  | 3.5  | 3.7  | 3.4  | 3.3  | 3.5  | 3.5  | 3.9  | 3.4  |
| 9,500 | 2.3    |  | 4.1  | 2.7  | 3.6  | 3.1  | 3.1  | 3.4  | 3.3  | 3.4  | 3.7  | 3.2  | 3.2  | 3.4  | 3.3  | 3.3  | 3.6  | 3.3  | 3.3  | 3.9  | 3.7  |
| AVG   | 3.86   |  | 4.69 | 4.31 | 4.84 | 4.31 | 4.44 | 4.89 | 4.80 | 4.80 | 5.09 | 4.94 | 4.87 | 4.88 | 4.98 | 4.91 | 4.78 | 4.72 | 4.78 | 5.26 | 4.97 |
| STDEV | 1.58   |  | 1.27 | 1.35 | 1.41 | 1.16 | 1.28 | 1.04 | 1.35 | 1.24 | 1.24 | 0.95 | 1.22 | 1.14 | 1.36 | 0.97 | 1.22 | 1.37 | 1.28 | 1.12 | 1.02 |

## LEMBAR PEMBAHASAN 1

### **Usulan-Proposal/Laporan-Kemajuan/Laporan Akhir-(\*) Penelitian yang berjudul**

ROBUST PARAMETER DESIGN MUFFLER BERTEKNOLOGI METALLIC CATALYTIC CONVERTER DAN IMPLEMENTASINYA UNTUK MEREDUKSI EMISI GAS BUANG DAN MENINGKATKAN PERFORMA MESIN MENGGUNAKAN DUAL RESPONSE SURFACE METHOD

### **Dengan pelaksana berikut :**

1. 0028038101 - Dr. Warju, S.Pd., S.T., M.T. (Ketua)
2. 0009049201 - Andita Nataria Fitri Ganda, S.T., M.Sc.
3. Prof. Jyh-Cheng Yu, Ph.D (Partner Peneliti Dalam Negeri)
4. IQBAL ZARKASYI HERIANTO (Mahasiswa)
5. SALSABILA MEGA FITHRIYAH (Mahasiswa)
6. SISCA APRILLIANA (Mahasiswa)
7. ERNITA AULIA (Mahasiswa)
8. Sudirman Rizki Ariyanto, A.Md., S.Pd., M.Pd. (Alumni)
9. Suprayitno, S.T., M.T., Ph.D. (Partner Peneliti Dalam Negeri)

Telah dipaparkan pada tanggal 26 November 2021 di LPPM Universitas Negeri Surabaya

### **Catatan :**

- Laporan akhir ini diperbaiki: 1. Segera submit artikel ilmiah ke jurnal internasional bereputasi,  
2. Lampirkan artikel ilmiah yang telah accepted di AEVEC 2021.

Surabaya, 26 November 2021  
Reviewer,



Dr. Muhaji, S.T., M.T.  
NIP. 196109131992031001

## LEMBAR PEMBAHASAN 2

**Usulan Proposal/Laporan Kemajuan/Laporan Akhir (\*) Penelitian yang berjudul:**

ROBUST PARAMETER DESIGN MUFFLER BERTEKNOLOGI METALLIC CATALYTIC CONVERTER DAN IMPLEMENTASINYA UNTUK MEREDUKSI EMISI GAS BUANG DAN MENINGKATKAN PERFORMA MESIN MENGGUNAKAN DUAL RESPONSE SURFACE METHOD

**Dengan peneliti berikut:**

1. 0028038101 - Dr. Warju, S.Pd., S.T., M.T. (Ketua)
2. 0009049201 - Andita Nataria Fitri Ganda, S.T., M.Sc.
3. Prof. Jyh-Cheng Yu, Ph.D (Partner Peneliti Luar Negeri)
4. IQBAL ZARKASYI HERIANTO (Mahasiswa)
5. SALSABILA MEGA FITHRIYAH (Mahasiswa)
6. SISCA APRILLIANA (Mahasiswa)
7. ERNITA AULIA (Mahasiswa)
8. Sudirman Rizki Ariyanto, A.Md., S.Pd., M.Pd. (Alumni)
9. Suprayitno, S.T., M.T., Ph.D. (Partner Peneliti Dalam Negeri)

Telah dipaparkan pada tanggal 26 November 2021 di LPPM Universitas Negeri Surabaya

**Catatan:**

Secara keseluruhan laporan akhir cukup bagus. Segera submit artikel ilmiah ke IEEE Access. Lampirkan bukti artikel ilmiah yang accepted di AEEVC 2021.

Surabaya, 26 November 2021  
Reviewer,



Prof. Dr. Hj. Rudiana Agustini, M.Pd.  
NIP 196008101990022001

### LEMBAR PENGESAHAN 1

**Usulan-Proposal/Laporan-Kemajuan/Laporan Akhir (\*) Penelitian yang berjudul**

ROBUST PARAMETER DESIGN MUFFLER BERTEKNOLOGI METALLIC CATALYTIC CONVERTER DAN IMPLEMENTASINYA UNTUK MEREDUKSI EMISI GAS BUANG DAN MENINGKATKAN PERFORMA MESIN MENGGUNAKAN DUAL RESPONSE SURFACE METHOD

**Dengan pelaksana berikut :**

1. 0028038101 - Dr. Waiju, S.Pd., S.T., M.T. (Ketua)
2. 0009049201 - Andita Natara Fitri Ganda, S.T., M.Sc.
3. Prof. Jyh-Cheng Yu, Ph.D (Partner Peneliti Dalam Negeri)
4. IQBAL ZARKASYI HERIANTO (Mahasiswa)
5. SALSABILA MEGA FITHRIYAH (Mahasiswa)
6. SISCA APRILLIANA (Mahasiswa)
7. ERNITA AULIA (Mahasiswa)
8. Sudirman Rizki Ariyanto, A.Md., S.Pd., M.Pd. (Alumni)
9. Suprayitno, S.T., M.T., Ph.D. (Partner Peneliti Dalam Negeri)

Telah direvisi pada tanggal 30 November 2021 di LPPM Universitas Negeri Surabaya

Surabaya, 30 November 2021  
Reviewer.



Dr. Muhaji, S.T., M.T.  
NIP 196109131992031001

## LEMBAR PENGESAHAN 2

~~Usulan Proposal/Laporan Kemajuan/Laporan Akhir (\*) Penelitian yang berjudul:~~

ROBUST PARAMETER DESIGN MUFFLER BERTEKNOLOGI METALLIC CATALYTIC CONVERTER DAN IMPLEMENTASINYA UNTUK MEREDUKSI EMISI GAS BUANG DAN MENINGKATKAN PERFORMA MESIN MENGGUNAKAN DUAL RESPONSE SURFACE METHOD

Dengan peneliti berikut:

1. 0028038101 - Dr. Warju, S.Pd., S.T., M.T. (Ketua)
2. 0009049201 - Andita Nataria Fitri Ganda, S.T., M.Sc.
3. Prof. Jyh-Cheng Yu, Ph.D (Partner Peneliti Luar Negeri)
4. IQBAL ZARKASYI HERIANTO (Mahasiswa)
5. SALSABILA MEGA FITHRIYAH (Mahasiswa)
6. SISCA APRILLIANA (Mahasiswa)
7. ERNITA AULIA (Mahasiswa)
8. Sudirman Rizki Ariyanto, A.Md., S.Pd., M.Pd. (Alumni)
9. Suprayitno, S.T., M.T., Ph.D. (Partner Peneliti Dalam Negeri)

Telah direvisi pada tanggal 30 November 2021 di LPPM Universitas Negeri Surabaya

Surabaya, 30 November 2021  
Reviewer,



Prof. Dr. Hj. Rudiana Agustini, M.Pd.  
NIP 196008101990022001



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN  
RISET, DAN TEKNOLOGI  
**UNIVERSITAS NEGERI SURABAYA**  
Kampus Lidah, Jalan Lidah Wetan Unesa, Surabaya 60213  
Telepon 031-99421834, 99421835, Faksimil : 031-99424002  
Laman : [www.unesa.ac.id](http://www.unesa.ac.id)

KEPUTUSAN REKTOR UNIVERSITAS NEGERI SURABAYA  
NOMOR 842/UN38/HK/PM/2021

TENTANG

PENETAPAN PENERIMA PENELITIAN KEBIJAKAN  
PROGRAM VOKASI UNIVERSITAS NEGERI SURABAYA  
DANA PNBP TAHUN 2021

REKTOR UNIVERSITAS NEGERI SURABAYA,

- Menimbang : a. bahwa berdasarkan hasil seleksi desk evaluasi dan pemaparan proposal penelitian yang dilakukan oleh panitia seleksi, telah ditetapkan Penerima Penelitian Kebijakan Program Vokasi Universitas Negeri Surabaya Dana PNBP Tahun 2021;
- b. bahwa berdasarkan pertimbangan sebagaimana dimaksud dalam huruf a, perlu menetapkan Keputusan Rektor Universitas Negeri Surabaya tentang Penetapan Penerima Penelitian Kebijakan Program Vokasi Universitas Negeri Surabaya Dana PNBP Tahun 2021;
- Mengingat : 1. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 37 Tahun 2009 tentang Dosen (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2009 Nomor 76, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 5007);
2. Peraturan Pemerintah RI Nomor 4 Tahun 2014 tentang Penyelenggaraan Pendidikan Tinggi dan Pengelolaan Perguruan Tinggi (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2014 Nomor 16, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 5500);
3. Peraturan Menteri Keuangan RI Nomor 92/PMK.05/2011 tentang Rencana Bisnis dan Anggaran Serta Pelaksanaan Anggaran Badan Layanan Umum (Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2011 Nomor 363);
4. Peraturan Menteri Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi RI Nomor 15 Tahun 2016 tentang Organisasi dan Tata Kerja Universitas Negeri Surabaya (Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2015 Nomor 889);
5. Peraturan Menteri Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi RI Nomor 79 Tahun 2017 tentang Statuta Universitas Negeri Surabaya (Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2017 Nomor 1858);

- 2 -

6. Keputusan Menteri Keuangan RI Nomor 50/KMK.05/2009 tentang Penetapan Universitas Negeri Surabaya Pada Departemen Pendidikan Nasional sebagai Instansi Pemerintah yang menerapkan Pengelolaan Keuangan Badan Layanan Umum;
7. Keputusan Menteri Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi RI Nomor 461/M/KPT.KP/2018 tentang Pemberhentian dan Pengangkatan Rektor Universitas Negeri Surabaya Periode Tahun 2018-2022;

## MEMUTUSKAN :

- Menetapkan : KEPUTUSAN REKTOR UNIVERSITAS NEGERI SURABAYA TENTANG PENETAPAN PENERIMA PENELITIAN KEBIJAKAN PROGRAM VOKASI UNIVERSITAS NEGERI SURABAYA DANA PNBP TAHUN 2021.
- KESATU : Menetapkan Penerima Penelitian Kebijakan Program Vokasi Universitas Negeri Surabaya Dana PNBP Tahun 2021, sebagaimana tercantum dalam Lampiran yang merupakan bagian tidak terpisahkan dari Keputusan Rektor ini.
- KEDUA : Dalam melaksanakan tugasnya sebagai Penerima Penelitian Kebijakan Program Vokasi Universitas Negeri Surabaya Dana PNBP Tahun 2021, wajib berpedoman pada ketentuan yang berlaku.
- KETIGA : Keputusan Rektor ini mulai berlaku sejak tanggal ditetapkan sampai dengan 30 November 2021.

Ditetapkan di Surabaya  
Pada tanggal 22 Juni 2021  
REKTOR UNIVERSITAS NEGERI  
SURABAYA,

ttd

NURHASAN  
NIP 196304291990021001

Salinan sesuai dengan aslinya  
Kepala Biro Umum dan Keuangan,



SULARSONO  
NIP 196504091987011001

LEMBANG 2  
 DAFTAR PERENCANA PENELITIAN KOLABORASI INTERDISIPINER PROGRAM STUDI TEKNIK INFORMATIKA SIKIPSI  
 SURABAYA  
 2021/2022  
 2021/2022  
 2021/2022  
 2021/2022

DAFTAR PERENCANA PENELITIAN KOLABORASI INTERDISIPINER PROGRAM STUDI TEKNIK INFORMATIKA SIKIPSI  
 SURABAYA

| No.   | Fakultas | Program Studi                  | Judul                       | Tim Peneliti                                                                                                                                     | KEMAS/IDP                                                          | Revisi                                                             | Prodi                                                              | L/2                                                                | Waktu (Jam)                                                        | Biaya yg dibutuhkan (Rp)                                           | Tersedia (Rp)                                                      | Saluran (Rp)                                                       | Status |
|-------|----------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------|
| 1     | STSI     | Prodi Sistem Informasi (SIPSI) | REKAMISTRIK TUNGGAL (SIPSI) | Dr. Wicaksono, M. Sc<br>Denny Ardi, S. P., M. Sc<br>Dr. Mochamad Nurhikmah, S. P., M. Sc<br>Prof. Dr. Agus Pertiwi<br>Prof. Dr. Wicaksono, M. Sc | 1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000 | 1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000 | 1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000 | 1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000 | 1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000 | 1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000 | 1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000 | 1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000 |        |
| 2     | STSI     | Prodi Sistem Informasi (SIPSI) | REKAMISTRIK TUNGGAL (SIPSI) | Dr. Wicaksono, M. Sc<br>Denny Ardi, S. P., M. Sc<br>Dr. Mochamad Nurhikmah, S. P., M. Sc<br>Prof. Dr. Agus Pertiwi<br>Prof. Dr. Wicaksono, M. Sc | 1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000 | 1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000 | 1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000 | 1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000 | 1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000 | 1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000 | 1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000 | 1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000 |        |
| 3     | STSI     | Prodi Sistem Informasi (SIPSI) | REKAMISTRIK TUNGGAL (SIPSI) | Dr. Wicaksono, M. Sc<br>Denny Ardi, S. P., M. Sc<br>Dr. Mochamad Nurhikmah, S. P., M. Sc<br>Prof. Dr. Agus Pertiwi<br>Prof. Dr. Wicaksono, M. Sc | 1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000 | 1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000 | 1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000 | 1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000 | 1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000 | 1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000 | 1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000 | 1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000<br>1000000000 |        |
| TOTAL |          |                                |                             |                                                                                                                                                  |                                                                    |                                                                    |                                                                    |                                                                    |                                                                    | Rp 300.000.000                                                     | Rp 300.000.000                                                     | Rp 300.000.000                                                     |        |



Ditandatangani di Surakarta  
 Pada tanggal 22 Juni 2021  
 REKTOR UNIVERSITAS NEGERI  
 SURABAYA,  
 nd

REKTOR/ASIAV  
 NIP. 196304251990021001