



# OPTIMASI CELAH KATUP TERHADAP KONSUMSI BAHAN BAKAR DAN EMISI GAS BUANG DENGAN PENDEKATAN TAGUCHI

Ikhsan Wahyudi<sup>a</sup> b\*, Hadi Pranoto<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Program Studi Teknik Mesin, Universitas Mercu Buana, Jl. Meruya Selatan No.1, RT.4/RW.1, Joglo, Kec. Kembangan, Kota Jakarta Barat, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 11650, Indonesia

<sup>b</sup>Program Studi Teknik Otomotif, Politeknik Hasnur, Ray V, Jl. Brigjen H. Hasan Basri, Kabupaten Barito Kuala, Kalimantan Selatan 70582, Indonesia

\*Corresponding authors at: E-mail : [ikhsanwahyudi1215k@gmail.com](mailto:ikhsanwahyudi1215k@gmail.com) Tel. +6287814688743

## INFO ARTIKEL

### Riwayat artikel:

Diajukan pada 20 Januari 2025

Direvisi pada 18 Juni 2025

Disetujui pada 30 Juli 2025

Tersedia daring pada 18 Agustus 2025

### Kata kunci:

Metode Taguchi, ANOVA, emisi gas buang,

### Keywords:

Taguchi method, ANOVA, exhaust emissions.

## ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi ukuran celah katup dan kecepatan putaran mesin (RPM) terhadap emisi gas buang pada kendaraan Toyota bermesin 5K keluaran tahun 1993. Mesin ini masih banyak digunakan di kalangan masyarakat Indonesia, khususnya pada kendaraan niaga serta komunitas pecinta mobil klasik dan tua, meskipun tren teknologi mesin saat ini didominasi oleh sistem injeksi. Studi ini menggunakan pendekatan eksperimental yang memadukan metode Taguchi dan analisis varian (ANOVA). Fokus penelitian diarahkan pada faktor-faktor yang memengaruhi kadar emisi gas buang. Eksperimen dilakukan dengan menguji berbagai konfigurasi celah katup *intake* (0,15; 0,20; 0,25 mm) dan *exhaust* (0,25; 0,30; 0,35 mm), serta tiga tingkat putaran mesin (1000, 2000, dan 3000 RPM). Pengukuran dilakukan terhadap kadar CO, HC, dan CO<sub>2</sub> sebagai indikator utama polusi kendaraan. Perancangan percobaan dilakukan secara efisien menggunakan matriks ortogonal dari metode Taguchi, yang memungkinkan pengujian kombinasi faktor secara optimal dengan jumlah percobaan yang minimal. Sementara itu, ANOVA digunakan untuk mengevaluasi tingkat signifikansi dari setiap faktor terhadap perubahan emisi yang dihasilkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi pengaturan celah katup dan RPM yang tepat dapat secara signifikan menurunkan emisi gas buang. Diantara kedua faktor, celah katup *intake* memberikan kontribusi paling besar dalam menekan emisi dibandingkan RPM. Temuan ini memberikan wawasan berharga dalam mengoptimalkan setelan mesin guna mengurangi dampak lingkungan, serta mendukung pengembangan kendaraan yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Penelitian ini juga memberikan kontribusi nyata dalam merumuskan strategi pengaturan mesin yang lebih bersih dan menawarkan solusi praktis bagi industri otomotif dalam upaya menurunkan tingkat emisi kendaraan.

## ABSTRACT

This study aims to explore the effects of valve clearance size and engine speed (RPM) on the exhaust emissions of Toyota vehicles with 5K engines in 1993. This engine is very popular in Indonesia, especially in commercial vehicles and vintage and classic cars despite the fact that vehicle engines are dominated by injection engine. An experimental approach that combined analysis of variance (ANOVA) and the Taguchi method was implemented in this study. This study focuses on the factors that affect exhaust emission levels. This experiment involved testing various intake valve clearance sizes (0.15, 0.20, and 0.25 mm), exhaust valve clearance sizes (0.25, 0.30, and 0.35 mm), and engine speeds (1000, 2000, and 3000). Emission measurements were carried out to identify the CO, HC, and CO<sub>2</sub> levels, which are the main indicators of vehicle pollution. The Taguchi method was used to design experiments effectively using an orthogonal matrix, which enabled testing various combinations of factors with a fewer number of experiments. Meanwhile, ANOVA was used to analyze the significance of each factor on the exhaust emissions. The results showed that the optimal setting between the valve clearance size and engine speed could significantly reduce exhaust emissions, with the intake valve clearance size being the most influential factor in reducing emissions compared with the engine speed. These findings provide insights into the optimization of engine settings to reduce vehicle pollution, as well as paving the way for the development of more environmentally friendly and efficient vehicles. This study contributes to designing cleaner engine settings strategies and provides practical solutions for the automotive industry in an effort to achieve lower emissions.

## 1. PENGANTAR

Penghematan konsumsi bahan bakar pada kendaraan niaga menjadi langkah penting dalam menghadapi keterbatasan sumber daya energi, terutama bahan bakar fosil yang ketersediaannya semakin menipis. Seiring dengan hal itu, berbagai penelitian telah diarahkan untuk meningkatkan efisiensi energi, bahkan hingga mencari alternatif energi pengganti yang bersifat non-fosil. Hal ini disebabkan oleh tingginya ketergantungan sistem mesin saat ini terhadap bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama (Pribadi, 2018).

Kinerja mesin berbahan bakar bensin dipengaruhi oleh kualitas bahan bakar dan sistem penyemprotan bahan bakar. Seringkali pengguna kendaraan kurang memperhatikan spesifikasi teknis mesin yang berpengaruh besar terhadap performa kendaraan. Pemilihan bahan bakar yang tidak sesuai dapat menyebabkan penurunan performa mesin. Oleh karena itu, pemilihan bahan bakar harus disesuaikan dengan kebutuhan mesin, khususnya terkait rasio campuran udara dan bahan bakar. Semakin tinggi rasio tersebut, maka bahan bakar yang digunakan harus memiliki kualitas tinggi, ditandai dengan nilai oktan yang tinggi.

Di samping kualitas bahan bakar, penyetelan celah katup juga memiliki pengaruh terhadap efisiensi konsumsi bahan bakar. Penyetelan celah katup *intake* yang lebih kecil pada putaran tinggi akan memperpanjang waktu pembukaan katup, sehingga meningkatkan efisiensi volumetrik proses pemasukan udara ke dalam silinder. Akibatnya, tekanan kompresi meningkat, suplai udara pembakaran menjadi optimal, dan mesin bekerja lebih efisien (Telaumbanua & Magdalena, 2018).

Sebaliknya, jika celah katup terlalu renggang, maka waktu pembukaan menjadi lebih pendek, sehingga proses pemasukan udara tidak maksimal. Hal ini menyebabkan jumlah udara yang masuk ke ruang bakar berkurang dan proses pembakaran menjadi kurang efisien (Nurhadi dkk., 2019).

Selain pemilihan bahan bakar dan penyetelan celah katup, efisiensi konsumsi bahan bakar juga sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional mesin dan perawatan yang dilakukan secara berkala. Ketidakseimbangan antara suplai udara dan bahan bakar akibat filter udara yang kotor, injektor yang tersumbat, atau kompresi mesin yang menurun dapat menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar dan penurunan performa. Menurut Santoso dkk. (2020), performa pembakaran optimal sangat bergantung pada kesesuaian parameter mekanis mesin dengan kondisi nyata operasional. Parameter seperti waktu pengapian, tekanan kompresi, dan rasio udara-bahan bakar harus tetap dalam kondisi ideal agar proses pembakaran berlangsung sempurna. Dengan menjaga penyetelan komponen-komponen tersebut, efisiensi termal mesin dapat meningkat dan konsumsi bahan bakar dapat ditekan secara signifikan. Oleh karena itu, strategi peningkatan efisiensi energi pada mesin bensin tidak hanya mengandalkan kualitas bahan bakar, tetapi juga mengharuskan perhatian serius terhadap aspek mekanis mesin seperti celah katup dan kondisi sistem pembakaran secara keseluruhan (Hadi Prasetyo, 2019).

Perkembangan teknologi otomotif saat ini juga mendorong adanya kebutuhan terhadap pemahaman yang lebih mendalam mengenai karakteristik operasional mesin dalam berbagai kondisi beban dan putaran. Mesin berbahan bakar bensin memiliki sensitivitas tinggi terhadap perubahan kecil pada parameter mekanis seperti celah katup, rasio kompresi, serta durasi dan waktu buka katup. Penelitian oleh Wibowo dan Handoko (2020) menunjukkan bahwa variasi kecil pada celah katup dapat menyebabkan perubahan signifikan pada torsi dan konsumsi bahan bakar, terutama pada putaran mesin menengah hingga tinggi. Hal ini disebabkan karena proses pengisian udara ke dalam ruang bakar sangat bergantung pada waktu buka-tutup katup *intake* dan *exhaust*. Oleh karena itu, penyetelan celah katup tidak hanya berfungsi untuk menjaga keawetan sistem katup, tetapi juga berperan langsung dalam menentukan efisiensi volumetrik mesin. Dalam konteks kendaraan niaga yang cenderung beroperasi dalam jangka waktu lama dan pada beban berat, penyetelan celah katup yang tepat menjadi kunci dalam mempertahankan efisiensi pembakaran serta menekan konsumsi bahan bakar secara keseluruhan.

### 1.1. Mesin Bensin berdasarkan jumlah silinder

Dalam dunia otomotif, pemilihan jumlah silinder tidak hanya terkait dengan performa dan efisiensi bahan bakar, tetapi juga kenyamanan berkendara, biaya perawatan, serta karakteristik suara mesin yang dihasilkan. Mesin dengan lebih sedikit silinder umumnya lebih sederhana, lebih ringan, dan lebih hemat bahan bakar, sedangkan mesin dengan lebih banyak silinder cenderung memberikan performa dan kehalusan yang lebih baik (Mahmood, F., Zahid, A., & Ali, M. 2017).

Mesin yang banyak digunakan serta familiar di masyarakat Indonesia diantaranya: (1) Mesin 1 Silinder. Mesin satu silinder merupakan jenis mesin dengan hanya satu ruang bakar atau silinder. Mesin ini didesain secara sederhana, ringan, dan kompak. Dengan hanya satu silinder, mesin ini mampu menghasilkan torsi yang besar pada putaran rendah, namun cenderung menimbulkan getaran yang signifikan saat beroperasi pada putaran tinggi. Mesin jenis ini umum digunakan pada sepeda motor kecil, peralatan pertanian, serta mesin pemotong rumput. (2) Mesin 2 Silinder. Mesin 2 silinder hadir dalam berbagai konfigurasi, seperti paralel (*inline-twin*), *V-twin*, dan *boxer*. Mesin 2 silinder sering digunakan pada sepeda motor menengah dan beberapa jenis mobil kecil. Dengan dua silinder, mesin ini dapat bekerja lebih seimbang dibandingkan mesin 1 silinder, dan memiliki tenaga yang lebih besar. (3) Mesin 3 Silinder. Mesin 3 silinder adalah mesin yang cukup populer pada mobil kecil karena dapat menghasilkan tenaga yang baik dengan efisiensi bahan bakar yang tinggi. Mesin ini lebih kompak dan ringan daripada mesin 4 silinder, tetapi memiliki karakteristik yang cukup mirip. Mesin 3 silinder biasanya menggunakan konfigurasi *inline*, di mana ketiga silinder tersusun dalam satu baris. (4) Mesin 4 Silinder. Mesin 4 silinder adalah tipe yang paling umum pada mobil penumpang dan sepeda motor berperforma tinggi. Mesin ini umumnya menggunakan konfigurasi *inline*, namun juga ada versi *V4* untuk beberapa jenis sepeda motor. Mesin 4 silinder memiliki keseimbangan yang baik dan tenaga yang halus pada seluruh rentang RPM. Kelebihannya; suara halus, minim getaran, performa baik pada RPM tinggi tetapi kekurangannya; konstruksi mesin lebih berat dan kompleks dibandingkan mesin dengan silinder lebih sedikit, konsumsi bahan bakar lebih tinggi (Jafari, M., Asadi, R., & Parvizi, R. 2019).

Dari beberapa jenis mesin di atas, penulis menggunakan mesin 4 silinder dalam penelitian ini dikarenakan kelebihan dari mesin ini, sedangkan kekurangan dari mesin ini yang akan dilakukan oleh penulis yaitu bagaimana agar mesin ini lebih hemat dari segi bahan bakar tanpa mengurangi performanya.

Efisiensi bahan bakar merupakan ukuran seberapa efektif energi kimia dalam bahan bakar dikonversi menjadi energi mekanik oleh mesin. Dalam mesin pembakaran dalam, efisiensi ini sangat dipengaruhi oleh desain dan konfigurasi mesin, termasuk jumlah silinder, rasio kompresi, durasi pembukaan katup, serta rasio udara-bahan bakar (Wahyudi, 2024). Mesin 4 silinder umumnya memiliki karakteristik

performa dan kestabilan yang baik, namun konsumsi bahan bakarnya relatif lebih tinggi dibanding mesin 1 atau 2 silinder karena bobot komponen yang lebih besar serta jumlah siklus pembakaran yang lebih banyak dalam satu siklus kerja.

Salah satu faktor teknis yang berpengaruh besar terhadap efisiensi pembakaran adalah penyetelan celah katup. Celah katup yang terlalu sempit dapat menyebabkan kebocoran kompresi, sedangkan celah yang terlalu lebar dapat mengurangi waktu buka katup sehingga suplai udara terganggu. Penyetelan celah katup yang tepat akan meningkatkan efisiensi volumetrik, yaitu rasio antara jumlah udara yang masuk ke silinder dibandingkan dengan volume silinder pada kondisi teoritis maksimum. Menurut Telaumbanua & Magdalena (2018), celah katup *intake* yang disetel lebih kecil pada putaran tinggi akan memperpanjang durasi buka katup, sehingga memperbaiki pengisian udara dan meningkatkan efisiensi pembakaran. Dengan demikian, pendekatan mekanis melalui penyetelan komponen dasar seperti celah katup masih sangat relevan sebagai metode peningkatan efisiensi bahan bakar, terutama pada mesin bensin konvensional yang banyak digunakan di Indonesia.

### 1.2. Variasi Celah Katup

Celah katup pada mesin empat langkah bensin adalah salah satu aspek penting dalam desain dan kinerja mesin. Celah katup mengacu pada jarak atau ruang antara katup masuk (*inlet valve*) dan katup buang (*exhaust valve*) dengan kepala piston dalam mesin. Ini adalah parameter yang dapat diatur dan memiliki dampak signifikan pada pembakaran, aliran udara, dan kinerja mesin secara keseluruhan (Wahyudi dkk., 2024).

Salah satu fungsi utama celah katup adalah mengontrol aliran udara dan bahan bakar ke dalam dan keluar ruang bakar mesin. Ketika katup masuk (*intake valve*) terbuka, campuran udara dan bahan bakar dihirup ke dalam ruang bakar melalui proses isap. Sebaliknya, ketika katup buang (*exhaust valve*) terbuka, gas hasil pembakaran dikeluarkan dari ruang bakar menuju sistem pembuangan. Celah katup berfungsi sebagai jarak toleransi antara komponen katup dan mekanisme penggerakannya (biasanya *rocker arm* atau *camshaft*), yang akan memuai seiring meningkatnya suhu mesin saat beroperasi. Jika celah katup terlalu kecil, maka katup dapat tidak menutup dengan sempurna ketika mesin panas, yang dapat menyebabkan kebocoran kompresi, penurunan performa, bahkan kerusakan katup dalam jangka panjang. Sebaliknya, jika celah terlalu besar, maka katup akan membuka terlambat dan menutup terlalu cepat, sehingga mengurangi durasi aliran udara dan bahan bakar ke dalam silinder (Nurhadi, M, 2019). Hal ini berdampak langsung terhadap penurunan efisiensi volumetrik dan pembakaran yang tidak optimal.

Oleh karena itu, penyetelan celah katup yang presisi sangat penting untuk menjaga kinerja mesin secara keseluruhan, terutama dalam menjaga keseimbangan antara efisiensi bahan bakar dan tenaga yang dihasilkan (Yusgiantoro dkk., 2021). Celah katup juga memengaruhi waktu pembukaan dan penutupan katup. Pengaturan yang tepat dari waktu pembukaan dan penutupan katup sangat penting untuk memastikan pembakaran yang efisien dan optimal (Van Harling & Urbata, 2020).

### 1.3. Emisi Gas Buang

Emisi gas buang adalah hasil dari proses pembakaran bahan bakar dalam mesin kendaraan dan mesin pembakaran internal lainnya. Emisi ini terdiri dari berbagai gas dan partikel yang dilepaskan ke atmosfer sebagai produk sampingan dari pembakaran. Emisi gas buang memiliki dampak signifikan terhadap lingkungan, kesehatan manusia, dan perubahan iklim (Absor dkk., 2021).

Komposisi gas buang terdiri dari: (1) Karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ):  $\text{CO}_2$  adalah gas rumah kaca utama yang terkandung dalam emisi gas buang. Peningkatan kadar  $\text{CO}_2$  di atmosfer merupakan kontributor utama terhadap perubahan iklim global dan pemanasan global. (2) Karbon Monoksida ( $\text{CO}$ ):  $\text{CO}$  adalah gas beracun yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar fosil yang tidak sempurna. Paparan tinggi terhadap  $\text{CO}$  dapat berbahaya dan mengakibatkan keracunan. (3) Hidrokarbon ( $\text{HC}$ ):  $\text{HC}$  adalah senyawa organik yang merupakan komponen utama dari bahan bakar. Ketika bahan bakar tidak terbakar sepenuhnya,  $\text{HC}$  dilepaskan ke atmosfer. Ini juga merupakan prekursor bagi pembentukan ozon di permukaan bumi. (4) Nitrogen Oksida ( $\text{NO}_x$ ):  $\text{NO}_x$  adalah kelompok senyawa yang mengandung nitrogen dan oksigen. Ini termasuk nitrogen oksida ( $\text{NO}$ ) dan dioksida nitrogen ( $\text{NO}_2$ ).  $\text{NO}_x$  berkontribusi pada pembentukan hujan asam dan polusi udara lainnya. (5) Partikel Halus ( $\text{PM}$ ): Partikel halus adalah partikel kecil yang dapat terhirup oleh manusia. Ini termasuk partikel padat dan cair yang dapat berasal dari emisi gas buang. Partikel halus memiliki dampak negatif pada kesehatan pernapasan dan dapat mencemari udara (Ferdian, 2016).

### 1.4. Metode Taguchi

Metode Taguchi merupakan suatu pendekatan dalam desain eksperimen yang dirancang untuk meningkatkan kualitas produk dan proses secara efektif. Dikembangkan oleh Dr. Genichi Taguchi, metode ini menitikberatkan pada optimalisasi kinerja dengan cara membuat produk atau proses menjadi lebih tahan terhadap variasi eksternal (*noise*) yang sulit dikendalikan, seperti perubahan kondisi lingkungan atau variasi dalam bahan baku. Salah satu konsep utama dalam metode ini adalah *loss function*, yang mengukur kerugian ekonomi akibat hasil yang menyimpang dari target (Mohsin, 2020). Selain itu, metode ini menggunakan *orthogonal array* (OA) untuk merancang eksperimen secara efisien, sehingga jumlah pengujian dapat dikurangi tanpa mengorbankan validitas analisis. Untuk mengevaluasi hasil eksperimen, Taguchi memperkenalkan rasio signal-to-noise (S/N), yang digunakan untuk mengukur stabilitas dan performa output berdasarkan kategori tujuan, seperti *smaller-the-better*, *larger-the-better*, atau *nominal-the-best*. Langkah-langkah utama dalam metode Taguchi meliputi identifikasi tujuan, pemilihan faktor dan level, desain eksperimen dengan OA, pelaksanaan eksperimen, analisis data menggunakan S/N ratio, optimasi kombinasi faktor, dan validasi hasil. Dengan pendekatan ini, metode Taguchi membantu mengurangi biaya eksperimen, meningkatkan efisiensi, dan memastikan kualitas yang lebih baik sejak tahap desain (Rojas, 2024). Metode ini sering diterapkan dalam berbagai industri, seperti otomotif, elektronik, dan manufaktur, termasuk untuk analisis emisi kendaraan.

## 2. METODE

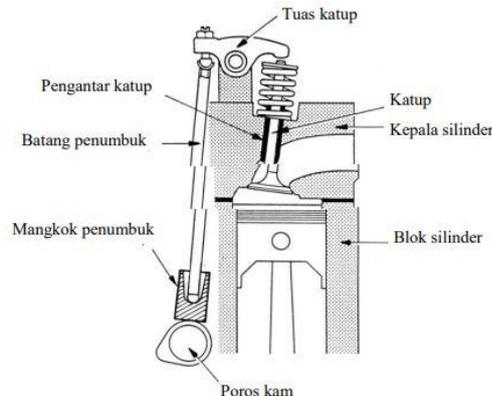
### 2.1. Penyetelan Celah Katup

Penyetelan celah katup pada mesin 4 silinder konvensional dilakukan untuk memastikan kinerja katup optimal sesuai dengan kebutuhan pengujian pada berbagai kombinasi celah katup dan tingkat putaran mesin (RPM). Langkah pertama adalah memastikan mesin dalam kondisi dingin untuk mendapatkan pengukuran yang akurat, karena celah katup cenderung berubah ketika mesin panas. Setelah itu,

setiap silinder disetel satu per satu dengan memastikan piston berada pada posisi *top dead center* (TDC) saat langkah kompresi. Posisi TDC dapat ditentukan dengan memutar *crankshaft* searah jarum jam hingga tanda pada *pulley* sejajar dengan indikator, atau dengan memastikan bahwa kedua *rocker arm* pada silinder tersebut dalam kondisi bebas (tidak tertekan).

Setelah piston berada di TDC, celah katup *intake* dan *exhaust* diukur menggunakan *feeler gauge* sesuai dengan kombinasi pengujian, yaitu in 0,20 mm dan ex 0,30 mm; in 0,25 mm dan ex 0,35 mm; serta in 0,15 mm dan ex 0,25 mm. Jika celah katup tidak sesuai dengan ukuran yang ditentukan, dilakukan penyesuaian dengan mengendurkan mur pengunci pada *rocker arm* dan memutar baut penyetel hingga celah sesuai dengan spesifikasi. Setelah penyetelan selesai, mur pengunci dikencangkan kembali, dan celah diukur ulang untuk memastikan akurasi. Proses ini diulang untuk semua katup *intake* dan *exhaust* pada keempat silinder mesin.

Setelah penyetelan celah katup selesai, pengujian dilakukan pada tiga tingkat putaran mesin, yaitu 1000 RPM, 2000 RPM, dan 3000 RPM. Pada setiap tingkat RPM, data emisi gas buang, seperti kadar karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC), dan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), diukur menggunakan alat analisis emisi.



Gambar 1: Mekanisme Katup OHV (*overhead valve*)

## 2.2. Pengujian Mesin

Mesin Toyota 5K disiapkan sebagai objek penelitian untuk pengambilan data terkait kinerja dan emisi gas buang. Sebelum pengujian dimulai, kondisi mesin diperiksa secara menyeluruh untuk memastikan bahwa semua komponen berfungsi dengan baik dan sesuai dengan spesifikasi pabrik. Langkah pertama adalah mengukur performa awal mesin pada kondisi celah katup standar, yaitu *intake* (IN) 0,20 mm dan *exhaust* (EX) 0,30 mm. Pengukuran mencakup parameter emisi gas buang dan konsumsi bahan bakar untuk memberikan gambaran baseline atau acuan awal kondisi mesin. Data yang diperoleh dari pengukuran awal ini penting untuk dibandingkan dengan hasil pengujian pada variasi celah katup selanjutnya. Pengujian emisi gas buang menggunakan *Gas Analyzer Qrotech* dengan selang sensor di pasang pada pipa knalpot mesin.

Selanjutnya, penyetelan celah katup dilakukan dengan variasi ukuran yang naik dan turun sebesar 0,05 mm berdasarkan *manual book* dari Toyota 5K dari nilai standar. Penyetelan ini dilakukan secara sistematis, dengan pengaturan *intake* (IN) menjadi 0,15 mm, 0,20 mm, dan 0,25 mm, serta *exhaust* (EX) menjadi 0,25 mm, 0,30 mm, dan 0,35 mm serta dengan variasi rpm 1000, 2000 dan 3000. RPM ini ditentukan dari data para pengguna mesin ini yang rata-rata hanya memacu kendaraannya sampai dengan 3000 RPM. Tujuan dari variasi ini adalah untuk mengevaluasi pengaruh perubahan celah katup terhadap performa mesin dan emisi gas buang, sehingga dapat ditentukan pengaturan optimal yang mendukung efisiensi dan ramah lingkungan.

## 2.3. Persamaan matematika

Perhitungan rasio S/N dilakukan dengan menggunakan persamaan 1 dan 2 sebagai berikut.

Konsumsi BBM (*larger is better*)

$$S/N \text{ Ratio} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (1)$$

Emisi gas buang CO, HC, CO<sub>2</sub> (*smaller is better*)

$$S/N \text{ Ratio} = -10 \cdot \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (2)$$

Sumber: Buku Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi

Dimana:

$Y_i$  = Nilai respon pada pengamatan ke- $i$  (semakin kecil nilainya, semakin baik)

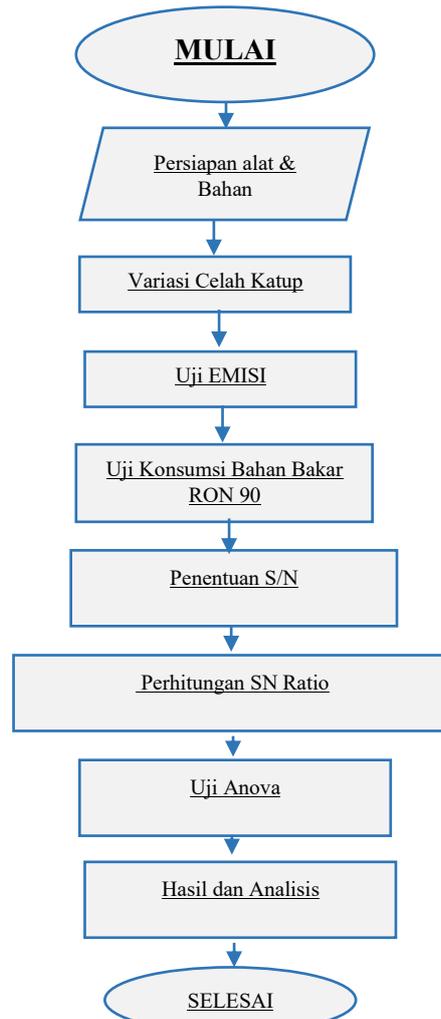
$n$  = Jumlah ulangan (pengulangan eksperimen pada tiap kombinasi)

$Y_i^2$  = Menekankan penalti terhadap nilai besar (karena dianggap buruk)

$(\sum_{i=1}^n Y_i^2)$  = Rata-rata kuadrat dari nilai respon

Dalam metode Taguchi, tujuan utama adalah meningkatkan kualitas proses atau produk dengan mengurangi variasi dan mendekati nilai target yang diinginkan. Untuk mengevaluasi performa suatu sistem, digunakan fungsi kerugian (*loss function*) yang diubah menjadi sinyal terhadap rasio suara (*signal-to-noise ratio* atau SNR). Dua jenis fungsi kerugian utama adalah *Smaller is Better* dan *Larger is Better*, yang disesuaikan dengan karakteristik kualitas yang diinginkan. Nilai  $n$  menunjukkan jumlah pengujian yang dilakukan sedangkan nilai  $Y_i$  menunjukkan nilai pengujian untuk percobaan ke- $i$ .

Tahapan pengujian dilaksanakan sesuai dengan diagram alir yang dapat dilihat pada Gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2: Diagram Alir Pengujian Mesin

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Tahapan Pengujian

Pengujian dimulai dengan persiapan alat dan bahan, seperti mesin yang digunakan untuk pengujian yaitu mesin toyota 5K, alat ukur emisi, konsumsi bahan bakar, dan *feeler gauge* untuk mengatur celah katup. Selanjutnya, dilakukan pengaturan variasi celah katup *intake* (0,15 mm, 0,20 mm, 0,25 mm) dan *exhaust* (0,25 mm, 0,30 mm, 0,35 mm), diikuti pengujian emisi (CO, HC, CO<sub>2</sub>) dan konsumsi bahan bakar pada berbagai tingkat RPM (1000, 2000, 3000). Data hasil pengujian diubah menjadi *Signal-to-Noise* (S/N) Ratio dengan formula *Smaller is Better* atau *Larger is Better*, sesuai parameter yang diukur. Setelah perhitungan S/N Ratio, dilakukan analisis ANOVA untuk menentukan faktor signifikan dan kontribusi masing-masing terhadap hasil pengujian. Akhirnya, kombinasi parameter terbaik diidentifikasi, menghasilkan kesimpulan dan rekomendasi pengaturan optimal untuk meningkatkan kinerja mesin.

#### 3.2. Parameter Pengujian

Pengujian ini dirancang untuk mengkaji pengaruh variasi celah katup dan putaran mesin (RPM) terhadap efisiensi konsumsi bahan bakar serta performa jarak tempuh kendaraan. Celah katup masuk divariasikan pada 0,15 mm, 0,20 mm, dan 0,25 mm, sementara celah katup buang diuji pada rentang 0,25 mm, 0,30 mm, dan 0,35 mm. Penyetelan celah katup dilakukan untuk mengoptimalkan durasi dan timing pembukaan katup, guna memaksimalkan efisiensi volumetrik dan proses pembakaran dalam ruang bakar. Variasi RPM yang digunakan meliputi 1000, 2000, dan 3000 rpm, merepresentasikan kondisi operasi mesin pada putaran *idle*, *cruising*, dan beban tinggi secara berurutan. Pengujian dilakukan dengan cara mengisi bahan bakar pada tangki yang telah disiapkan sebanyak 1 liter, kemudian celah katup diatur sesuai dengan rencana ukuran celah katup, selanjutnya kendaraan dijalankan dengan variasi RPM. 1 Liter bahan bakar digunakan untuk melakukan pengujian per ukuran celah katup dan per variasi RPM. *Trip meter* pada *speedometer* direset untuk mengetahui jarak tempuh yang dihasilkan oleh kendaraan per liter bahan bakar. Konsumsi bahan bakar diukur dengan menghitung jumlah bahan bakar yang digunakan dalam jarak tempuh yang dihasilkan pada setiap kombinasi parameter, sedangkan jarak tempuh diukur berdasarkan jarak yang dapat ditempuh per satuan bahan bakar. Analisis hasil pengujian ini bertujuan menentukan kombinasi celah katup dan RPM yang menghasilkan konsumsi bahan bakar paling efisien sekaligus jarak tempuh terbaik, sehingga dapat digunakan sebagai panduan pengaturan optimal untuk meningkatkan kinerja mesin. Rincian parameter pengujian dapat dilihat pada Tabel 1 di bawah ini:

Tabel 1: Parameter Pengujian Mesin

Parameter	Variasi yang diuji	Tujuan Pengujian
Celah Katup <i>intake</i> (in)	0,15 mm, 0,20 mm, 0,25 mm	Menentukan pengaruh celah katup <i>intake</i> terhadap efisiensi pembakaran dan konsumsi bahan bakar
Celah Katup <i>exhaust</i> (ex)	0,25 mm, 0,30 mm, 0,35 mm	Mengetahui dampak celah katup <i>exhaust</i> terhadap pelepasan gas buang dan efisiensi pembakaran
RPM Mesin	1000, 2000, 3000	Mengevaluasi kinerja mesin pada berbagai tingkat beban, seperti idle, jelajah dan beban tinggi
Konsumsi Bahan Bakar	Jumlah bahan bakar yang digunakan selama durasi waktu	Mengukur efisiensi mesin dalam menghasilkan tenaga pada setiap kombinasi parameter
Jarak Tempuh	Jarak yang dapat ditempuh per satuan bahan bakar	Menentukan performa kendaraan dalam menghasilkan jarak tempuh terbaik pada setiap kombinasi parameter

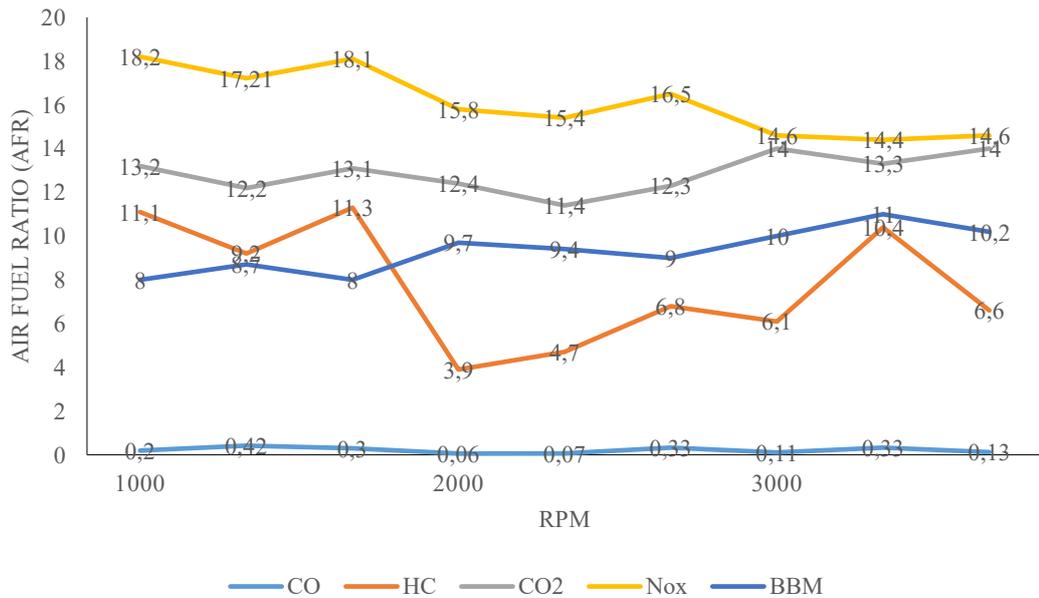
Hasil pengujian menunjukkan bahwa untuk pengujian pada rentang RPM yang sama dari 1000-3000, pada ukuran celah katup masuk 0,15 katup keluar 0,25 mesin mengkonsumsi bahan bakar dengan rata-rata 8,23 km/L. Pada ukuran celah katup masuk 0,20 katup keluar 0,30 rata-rata konsumsi bahan bakar pada mesin 9,37 km/L, sedangkan pada ukuran celah katup masuk 0,25 celah katup keluar 0,35, rata-rata konsumsi bahan bakar pada mesin 10,4 km/L. Jarak tempuh meningkat dengan bertambahnya ukuran celah katup.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa untuk pengujian pada rentang RPM yang sama dari 1000-3000, pada ukuran celah katup masuk 0,15 katup keluar 0,25 mesin mengkonsumsi bahan bakar dengan rata-rata 8,23 km/L. Pada ukuran celah katup masuk 0,20 katup keluar 0,30 rata-rata konsumsi bahan bakar pada mesin 9,37 km/L, sedangkan pada ukuran celah katup masuk 0,25 celah katup keluar 0,35, rata-rata konsumsi bahan bakar pada mesin 10,4 km/L. Jarak tempuh meningkat dengan bertambahnya ukuran celah katup.

Pengujian emisi gas buang dilakukan pada kondisi kendaraan statis atau diam ditempat, setelah *setting* mesin dilakukan, alat uji emisi dengan merk Qrotech dipasangkan pada pipa saluran gas buang untuk mengukur emisi yang dihasilkan pada tiap parameter pengujian. Hasilnya pada emisi gas buang juga terjadi penurunan kandungan CO, HC dan CO<sub>2</sub> seiring dengan bertambahnya ukuran celah katup. Angka *air fuel ratio* (AFR) atau nilai rasio udara-bahan bakar juga terjadi penurunan dengan meningkatkan ukuran celah katup, menunjukkan campuran bahan bakar lebih kaya. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 3.

Tabel 2: Hasil Pengujian Mesin

Pengujian Ke	Ukuran Celah Katup	RPM	Konsumsi BBM (km/L)	CO (ppm)	HC (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)	AFR NO <sub>x</sub>
1	in 0,15 ex 0,25	1000	8	0,2	111	13,2	18,2
2	in 0,15 ex 0,25	2000	8,7	0,42	92	12,2	17,1
3	in 0,15 ex 0,25	3000	8	0,3	113	13,1	18,1
4	in 0,20 ex 0,30	1000	9,7	0,06	43	12,4	15,8
5	in 0,20 ex 0,30	2000	9,4	0,07	47	1,4	15,4
6	in 0,20 ex 0,30	3000	9	0,33	68	12,3	16,5
7	in 0,25 ex 0,35	1000	10	0,11	61	14	14,6
8	in 0,25 ex 0,35	2000	11	0,33	104	13,3	14,4
9	in 0,25 ex 0,35	3000	10,2	0,13	66	14	14,6



Gambar 3: Grafik Hasil Pengujian Mesin

3.3. Analisis Metode Taguchi

Analisis dengan metode taguchi diawali dengan menentukan matrix ortogonal dalam pengujian, dalam pengujian ini Dalam pengujian ini terdapat 2 faktor yaitu ukuran celah katup serta RPM 1000,2000, 3000 dan memiliki 3 level yaitu:

- Level 1: in 0,15 ex 0,25
- Level 2: in 0,20 ex 0,30
- Level 3: in 0,25 ex 0,35

Karena ada 2 faktor dengan 3 level, maka Tabel ortogonalnya menggunakan matriks L9 (3^2) kemudian dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai dari *Signal Noise Ratio (S/N Ratio)* dapat dilihat pada Tabel 3, hasil dari S/N Ratio dari BBM, CO, HC dan CO<sub>2</sub>.

Tabel 3: Hasil S/N Ratio

Pengujian Ke	Ukuran Celah Katup	RPM	S/N Ratio BBM	S/N Ratio CO	S/N Ratio HC	S/N Ratio CO <sub>2</sub>
1	in 0,15 ex 0,25	1000	18,06	13,98	-40,91	-22,41
2	in 0,15 ex 0,25	2000	18,79	7,54	-39,28	-21,73
3	in 0,15 ex 0,25	3000	18,06	10,46	-41,06	-22,35
4	in 0,20 ex 0,30	1000	19,74	24,44	-32,67	-21,87
5	in 0,20 ex 0,30	2000	19,46	23,10	-33,44	-2,92
6	in 0,20 ex 0,30	3000	19,08	9,63	-36,65	-21,80
7	in 0,25 ex 0,35	1000	20,00	19,17	-35,71	-22,92
8	in 0,25 ex 0,35	2000	20,83	9,63	-40,34	-22,48
9	in 0,25 ex 0,35	3000	20,17	17,72	-36,39	-22,92

Dari hasil perhitungan rasio S/N di atas dapat dilihat bahwa untuk konsumsi BBM dengan nilai rasio S/N tertinggi berada di pengujian ke 8 ukuran celah katup masuk 0,25 dan katup keluar 0,35 pada RPM 2000, sedangkan untuk emisi CO dan nilai rasio S/N terendah berada pada pengujian ke 6, ukuran celah katup masuk 0,20 dan katup keluar 0,30 pada RPM 3000. Nilai HC terendah berada pada pengujian ke 4 dengan ukuran celah katup masuk 0,20 dan katup keluar 0,30 pada RPM 1000, sedangkan untuk emisi CO<sub>2</sub> nilai rasio S/N terendah berada pada pengujian ke 5 dengan ukuran celah katup masuk 0,20 dan keluar 0,30 pada 2000 RPM.

3.4. Hasil ANOVA

*Analysis of variance (ANOVA)* adalah metode statistik yang digunakan untuk menguji perbedaan rata-rata antara dua atau lebih kelompok data. Fungsi utama ANOVA adalah untuk menentukan apakah terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik antara rata-rata kelompok tersebut. ANOVA juga digunakan untuk menganalisis pengaruh variabel bebas, mengevaluasi interaksi antar variabel, dan mengurangi kesalahan eksperimen. Dengan menggunakan nilai *F-statistic* dan *p-value*, hasil dari perhitungan ANOVA dapat dilihat pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 4: Hasil ANOVA Konsumsi Bahan Bakar

ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-Value	F crit
Rows	2435503	7	347929	0,99836	0,000836	3,787044
Columns	17901361	1	17901361	51,36682	0,000183	5,591448
Error	2439503	7	348500,4			
Total	22776367	15				

Tabel 5: Hasil ANOVA Emisi Gas Buang

ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-Value	F crit
Rows	1255392	7	179341,8	1,039108	0,0043	2,487578
Columns	26392640	3	8797547	50,97306	0	3,072467
Error	3624433	21	172592,1			
Total	31272465	31				

Hasil pengujian ANOVA, P-Value yang ditunjukkan pada konsumsi bahan bakar sebesar 0,00083 dan pada emisi gas buang sebesar 0,0043, nilai yang dihasilkan lebih rendah dari nilai alpha 0,05. hal ini menunjukkan bahwa variasi ukuran celah katup berpengaruh signifikan terhadap konsumsi bahan bakar dan emisi gas buang.

#### 4. KESIMPULAN

Variasi ukuran celah katup berpengaruh signifikan terhadap konsumsi bahan bakar dan emisi gas buang pada mesin bensin konvensional. Hal ini tercermin dari perbedaan performa mesin yang ditunjukkan melalui variasi konsumsi bahan bakar serta kadar emisi CO, HC, dan CO<sub>2</sub> pada berbagai kombinasi ukuran celah katup dan putaran mesin (RPM). Kombinasi celah katup masuk 0,25 mm dan celah keluar 0,35 mm pada 2000 RPM menunjukkan kinerja terbaik dari segi efisiensi konsumsi bahan bakar, ditandai dengan nilai rasio *Signal to Noise* (S/N) tertinggi. Konfigurasi ini memungkinkan aliran campuran udara-bahan bakar yang lebih optimal, menghasilkan proses pembakaran yang lebih sempurna dan efisiensi volumetrik yang lebih tinggi. Sebaliknya, konfigurasi celah masuk 0,20 mm dan keluar 0,30 mm pada 3000 RPM menghasilkan emisi CO tertinggi, sedangkan konfigurasi yang sama pada 1000 RPM menghasilkan emisi HC tertinggi. Hal ini menunjukkan adanya ketidaksempurnaan pembakaran pada kondisi tersebut, terutama pada putaran rendah. Emisi CO<sub>2</sub> terendah tercatat pada 2000 RPM, yang mengindikasikan potensi tidak optimalnya oksidasi bahan bakar menjadi CO<sub>2</sub>, kemungkinan akibat terbatasnya suplai udara atau pembentukan gas buang lain seperti CO dan HC. Analisis statistik dengan metode ANOVA menunjukkan bahwa variasi celah katup memberikan pengaruh yang signifikan terhadap konsumsi bahan bakar (*P-value* = 0,00083) dan emisi gas buang (*P-value* = 0,0043), yang keduanya berada jauh di bawah batas signifikansi  $\alpha = 0,05$ . Temuan ini menunjukkan bahwa perubahan kecil dalam pengaturan celah katup dapat berdampak besar terhadap efisiensi pembakaran dan emisi mesin. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan pentingnya penyetelan celah katup yang tepat untuk meningkatkan efisiensi mesin, menghemat bahan bakar, dan mengurangi emisi yang merugikan lingkungan. Hasil ini dapat dijadikan dasar dalam praktik penyetelan mesin (*engine tuning*), terutama pada kendaraan yang masih menggunakan sistem katup mekanis atau semi-elektronik, serta mendukung upaya transisi menuju teknologi otomotif yang lebih ramah lingkungan melalui pendekatan yang sederhana namun efektif.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Absor, U., Setiawan, T., & Ariwibowo, B. (2021). Gas Buang Mesin Isuzu Panther Tipe Hi-Grade. *Journal of Vocational Education and Automotive Technology*, 3(1), 109-115.
- Basaran, H. U., & Ozsoysal, O. A. (2017). Effects of application of variable valve timing on the exhaust gas temperature improvement in a low-loaded diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 122, 758–767. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.098>
- Jafarian, K., Mobin, M., Jafari-Marandi, R., & Rabiei, E. (2018). Misfire and valve clearance faults detection in the combustion engines based on a multi-sensor vibration signal monitoring. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 128, 527–536.
- Jafari, M., Asadi, R., & Parvizi, R. (2019). Comparative Study of Cylinder Number on Fuel Consumption and Engine Vibration in Passenger Cars. *International Journal of Automotive Engineering*, 9(2), 89–96. <https://doi.org/10.22068/ijae.9.2.89>
- Jurusan, A., Mesin, T., Semarang, N., & Widjanarko, D. (n.d.). Pengaruh Variasi Penyetelan Celah Katup Masuk Terhadap Efisiensi Volumetrik Rata-Rata Pada Motor Diesel Isuzu Panther C 223 T Sarif Sampurno.

- Kurniawan, B., Raharjo, T. J., & Widodo, A. (2020). Analisis Optimasi Parameter Mesin Empat Silinder terhadap Konsumsi Bahan Bakar dan Emisi Gas Buang. *Jurnal Teknik Mesin*, 12(1), 35–42.
- Mahmood, F., Zahid, A., & Ali, M. (2017). A Comparative Study of Single and Multi-Cylinder Engines in Terms of Efficiency and Performance. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 6(3), 354–358.
- Mohsin, I., He, K., Li, Z., Zhang, F., & Du, R. (2020). Optimization of the polishing efficiency and torque by using Taguchi Method and ANOVA in robotic polishing. *Applied Sciences*, 10(3), 824.
- Nurhadi, M., Syaiful, S., & Haryanto, D. (2019). Pengaruh Penyetelan Celah Katup terhadap Unjuk Kerja Mesin Bensin. *Jurnal Mesin Nusantara*, 7(2), 45–52.
- Rubijanto, J. P. (2018). Diversifikasi Energi dan Efisiensi Konsumsi Bahan Bakar di Indonesia. *Jurnal Energi dan Lingkungan*, 14(1), 25–31.
- Roy, R. K. (2010). *A Primer on the Taguchi Method* (2nd ed.). Society of Manufacturing Engineers (SME).
- Rojas, H., Vargas, Z., Valdez, S., Serrano, M., del Pozo, A., & Alcántara, M. (2024). Taguchi, Grey Relational Analysis, and ANOVA optimization of TIG welding parameters to maximize mechanical performance of Al-6061 T6 alloy. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(6), 246. <https://doi.org/10.3390/jmmp8060246>
- Santoso, H., Wijaya, T., & Rachmat, M. (2020). Evaluasi Efisiensi Termal Mesin Terhadap Kinerja dan Konsumsi Bahan Bakar. *Jurnal Teknik Energi*, 9(2), 66–74.
- Van Harling, V. N., & Urbata, A. (2020). Pengaruh Variasi Penyetelan Katup Terhadap Putaran Pada Engine Stand Motor Bensin. *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin Undiksha*, 8(2), 79–85.
- Wahyudi, I., Humaidi, K., Mercu Buana, U., RayaMeruya Selatan Kecamatan Kembangan, J., Hasnur JIBrigjen HHasan Basri, P., & Kuala Kalimantan Selatan, B. (n.d.). Pengaruh Modifikasi Kompresi Ruang Bakar Pada Mobil Hemat Energi The Effect Of Compression Modification On Energy Saving Car.
- Wibowo, A., & Handoko, D. (2020). Pengaruh Variasi Celah Katup terhadap Daya dan Konsumsi BBM Mesin Bensin 4 Langkah. *Jurnal Teknik Mesin Universitas Muria Kudus*, 8(1), 12–20.
- Yusgiantoro, M., Prasetyo, A. R., & Lazuardi, R. (2021). Studi Evaluasi Celah Katup Terhadap Efisiensi Volumetrik dan Emisi Gas Buang. *Jurnal Teknologi Mesin*, 15(3), 101–109.