

Optimasi Performa Kendaraan Jenis *Internal Combustion Engine*, *Hybrid Electric Vehicle* dan *Plug-In Hybrid Electric Vehicle* Menggunakan Metode Taguchi dengan Pendekatan PCR-TOPSIS

Rossy Budhi Pratiwi dan Agus Suharsono

Departemen Statistika, Fakultas Komputasi Matematika dan Sain Data,
Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: agus_s@statistika.its.ac.id

Abstrak—Kebutuhan energi nasional hingga tahun 2050 diprediksikan akan terus meningkat akibat kebutuhan energi pada sektor transportasi dan industri yang tinggi. Sumber energi yang digunakan saat ini mayoritas berasal dari energi fosil. Energi fosil merupakan sumber energi tak terbarukan sehingga lambat laun akan habis. Penurunan cadangan energi fosil tersebut menjadi salah satu faktor untuk mulai menggunakan Energi Baru dan Terbarukan (EBT). Inovasi yang diberikannya adalah penggunaan bahan bakar nabati (biofuel). Selain penggunaan biofuel, pengembangan teknologi pada bidang otomotif dirasa perlu untuk mengatasi permasalahan tersebut. Penerapan teknologi otomotif berbasis sumber energi listrik perlu ditingkatkan untuk menggantikan peran kendaraan konvensional. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menentukan performa kendaraan terbaik dengan kombinasi bahan bakar nabati dan pembebanan pada tiga jenis kendaraan yaitu *Internal Combustion Engine*, *Hybrid Electric Vehicle* dan *Plug-In Hybrid Electric Vehicle* menggunakan metode Taguchi dengan pendekatan PCR-TOPSIS. Hasil analisis menunjukkan bahwa hasil uji performansi faktor pembebanan memiliki kontribusi yang lebih besar dibandingkan dengan bahan bakar campuran. Kemudian pada kondisi optimum didapatkan kombinasi beban 8A dan bahan bakar campuran E15 pada kendaraan jenis ICE, beban 7A dan bahan bakar campuran E20 pada kendaraan jenis HEV serta beban 8A dan bahan bakar campuran E10 pada kendaraan jenis PHEV.

Kata Kunci—PCR-TOPSIS, Performa Kendaraan, Taguchi.

I. PENDAHULUAN

INDONESIA merupakan negara dengan konsumsi energi terbesar di kawasan Asia Tenggara. Energi yang digunakan didominasi oleh energi fosil. Dapat diketahui bahwa energi fosil merupakan energi tak terbarukan sehingga lambat laun akan habis. Guna menjaga keseimbangan pasokan energi dalam negeri, salah satu cara yang bisa dilakukan adalah mengembangkan peran energi baru dan terbarukan (EBT). Salah satu dari EBT adalah bioethanol. Bioethanol adalah bahan bakar nabati yang dapat mensubstitusi bahan bakar minyak dari energi fosil. Saat ini, penggunaan bioethanol masih sebatas dalam fungsi riset dan pengembangan. Penelitian mengenai bioethanol sebagai bahan bakar campuran untuk kendaraan telah dilakukan oleh Winarno [1] yang menguji pengaruh penambahan bioethanol pada bahan bakar pertamax untuk unjuk kerja motor bensin. Selain itu juga dilakukan penelitian serupa oleh Winanda dan

Sudarmanta [2] pada kendaraan Toyota Vios dengan mencampurkan premium dengan bioethanol. Kedua hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan adanya penambahan bioethanol dapat menghasilkan performa yang lebih baik daripada hanya menggunakan bahan bakar minyak masing-masing kendaraan uji. Pemanfaatan teknologi terbaru dan peningkatan penggunaan energi yang efisien merupakan solusi untuk mengurangi ketergantungan penggunaan energi fosil. Selain dari pengembangan bioethanol, transportasi berkelanjutan juga bisa digunakan sebagai alternatif pilihan. Kendaraan dengan basis teknologi listrik / hybrid direncanakan akan dipasarkan hingga mencapai 2200 unit kendaraan roda 4 dan 2,1 juta unit roda 2 pada tahun 2025 [3]. Namun karena kurangnya infrastruktur yang mendukung maka lebih tepat digunakan di Indonesia sementara ini adalah kendaraan dengan jenis *Hybrid Electric Vehicle* (HEV) dan *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* (PHEV).

Selain dari segi bahan bakar, pemerintah Indonesia juga tengah menyiapkan program kendaraan rendah emisi karbon atau biasa disebut *Low Carbon Emission Vehicle* (LCEV). Mobil LCEV bukan hanya mobil listrik saja, namun juga diantaranya terdapat mobil *hybrid*, *plug-in hybrid*, dan *hydrogen*. Namun karena kurangnya infrastruktur yang mendukung maka lebih tepat digunakan di Indonesia sementara ini adalah mobil dengan tipe *Hybrid Electric Vehicle* (HEV) dan *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* (PHEV). Bahan bakar nabati dan kendaraan berbasis listrik/hybrid merupakan paduan inovasi yang dapat membantu dalam mengurangi penggunaan BBM dan juga mobil ramah lingkungan. Sehingga apabila keduanya dipadukan maka akan menjadi salah satu solusi untuk melakukan perubahan pola konsumsi energi.

Dalam bidang industri, statistika digunakan dalam hal pengambilan keputusan dalam suatu masalah, salah satunya dalam bidang optimasi untuk memilih hasil yang paling baik. Salah satu metode statistika yang diterapkan dalam optimasi adalah Taguchi [4]. Taguchi menggunakan perancangan eksperimen sebagai alat untuk membuat produk lebih *robust*, yakni produk menjadi tidak terpengaruh oleh faktor *noise*. Sehingga pada penelitian ini akan dilakukan optimasi pada performa mobil masing-masing jenis mobil dengan kombinasi bahan bakar campuran dan pembebanan menggunakan PCR-TOPSIS.

II. DASAR TEORI

A. Metode Taguchi

Metode Taguchi merupakan suatu metodologi baru di bidang teknik yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas produk dan proses sekaligus menekan biaya dan sumber daya [5]. Metode Taguchi berupaya mencapai sasaran tersebut dengan menjadikan produk dan proses tidak sensitif terhadap faktor gangguan (*noise*), seperti: material, perlengkapan manufaktur, tenaga kerja manusia, dan kondisi-kondisi operasional. Metode Taguchi menjadikan produk dan proses memiliki sifat kokoh (*robust*) terhadap faktor-faktor gangguan tersebut. Oleh karena itu metode Taguchi juga disebut perancangan kokoh (*robust design*). Filosofi Taguchi terdiri dari tiga konsep utama, yaitu :

1. Kualitas harus didesign ke dalam produk, sehingga tidak hanya cukup dengan memeriksanya.
2. Kualitas terbaik dicapai dengan meminimumkan deviasi dari target. Produk harus didesain sedemikian rupa hingga *robust* terhadap faktor lingkungan.
3. Kualitas harus diukur sebagai fungsi dari deviasi standar tertentu dan kerugian harus diukur pada seluruh sistem.

Metode Taguchi memperkenalkan pendekatan desain eksperimen yang dapat merancang suatu produk dan proses yang kokoh terhadap kondisi lingkungan, mengembangkan kualitas produk yang kokoh terhadap variasi komponen, dan meminimalkan variasi di sekitar target. Metode Taguchi memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan metode desain eksperimen lainnya diantaranya :

1. Metode Taguchi lebih efisien karena dapat melaksanakan penelitian yang melibatkan banyak faktor dan level faktor.
2. Metode Taguchi dapat memperoleh proses yang menghasilkan produk secara konsisten dan kokoh terhadap faktor yang tidak dapat dikontrol.
3. Metode Taguchi dapat menghasilkan kesimpulan mengenai respon faktor-faktor dan level dari faktor kontrol yang menghasilkan respon optimum.

B. Orthogonal Array

Orthogonal Array digunakan untuk menganalisis data eksperimen dan merancang eksperimen yang efisien. Sehingga dapat ditentukan jumlah eksperimen minimal yang dapat memberi informasi sebanyak mungkin dari semua faktor yang berpengaruh. Bagian terpenting dari *orthogonal array* terletak pada pemilihan kombinasi taraf atau level dari variabel-variabel input untuk masing-masing eksperimen. Pemilihan jenis *orthogonal array* yang digunakan pada eksperimen tergantung pada derajat bebas total. Penentuan derajat bebas total berdasar atas 3 hal yaitu banyaknya variabel proses, faktor interaksi dan jumlah taraf atau level yang diamati [6]. Notasi untuk *orthogonal array* sebagai berikut.

$$L_n(l^f) \tag{1}$$

C. Signal to Noise Ratio

Signal to Noise Ratio atau biasa disebut *S/N Ratio* merupakan komponen penting dari desain parameter. *Noise* (gangguan) dapat menunjukkan kondisi lingkungan (*outer noise*), kerusakan internal (*inner noise*), atau variasi dari dari unit ke unit (*between product noise*). Relevansi persamaan *S/N Ratio* terkait dengan menafsirkan sinyal dari pembilang rasio sebagai kemampuan proses untuk membentuk produk

yang baik. Dengan menerapkan konsep eksperimen ini, maka dapat ditentukan pengaturan faktor kontrol yang dapat menghasilkan performa terbaik dalam proses atau produk dan meminimalisir pengaruh faktor yang tidak dapat dikendalikan.

1. Karakteristik respon *smaller-the-better*

$$\eta_j^i = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{l} \sum_{k=1}^l (y_{jk}^i)^2 \right) \tag{2}$$

2. Karakteristik respon *larger-the-better*

$$\eta_j^i = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{l} \sum_{k=1}^l \frac{1}{(y_{jk}^i)^2} \right), 0 \leq y_{jk}^i \leq \infty \tag{3}$$

3. Karakteristik respon *nominal-is-the-best*

$$\eta_j^i = -10 \log_{10} \left(\frac{(\bar{y}_j^i)^2}{(s_j^i)^2} \right), 0 \leq y_{jk}^i < \infty \tag{4}$$

D. PCR

Sebelum dilakukan tahap klasifikasi data terlebih Pada pendekatan PCR-TOPSIS nilai S/N Ratio dari respon ke-j pada percobaan ke-i dapat dimisalkan C_j^i (PCR-SNR dalam respon ke-j untuk percobaan ke-i) dengan perhitungan seperti pada Persamaan (6) [7].

$$C_j^i = \frac{\eta_j^i - \bar{x}_{\eta_j}}{3s_{\eta_j}} \tag{6}$$

$$\bar{x}_{\eta_j} = \frac{\sum_{i=1}^m \eta_j^i}{m-1} \tag{7}$$

$$s_{\eta_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\eta_j^i - \bar{x}_{\eta_j})^2}{m-1}} \tag{8}$$

E. TOPSIS

Pengambilan keputusan dari suatu masalah untuk proses multikriteria disebut juga MADM. Guna mengatasi masalah MADM Yoon dan Hwang mengembangkan metode TOPSIS. Dengan TOPSIS, alternative yang terpilih memiliki jarak terdekat dengan solusi ideal positif dan terjauh dari solusi ideal negatif. TOPSIS dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut [7].

$$s^i = \frac{d^{i-}}{d^{i+} + d^{i-}} \tag{9}$$

$$d^{i+} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (C_j^i - C_j^+)^2} \tag{10}$$

$$d^{i-} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (C_j^i - C_j^-)^2} \tag{11}$$

F. ANOVA

Analysis of variance (ANOVA) adalah teknik perhitungan yang memungkinkan secara kuantitatif mengestimasi kontribusi setiap faktor pada semua pengukuran respon. Tujuan dari ANOVA adalah untuk mengetahui hasil seberapa besar variasi dari setiap faktor atau interaksi yang memengaruhi variasi total dari hasil yang diamati. Tabel ANOVA dapat disusun seperti pada Tabel 1.

Tabel 1.
ANOVA

Source of Variance	Sum of Square	Degrees of freedom	Mean Square	F-Hitung
A	SS _A	df _A	MS _A	F-A hitung
B	SS _B	df _B	MS _B	F-B hitung
Error	SS _e	df _e	MS _e	
Total	SS _T	df _T		

dengan,

$$SS_A = \left[\sum_{l=1}^{k_A} \left(\frac{A_l^2}{n_{A_l}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \tag{12}$$

$$SS_B = \left[\sum_{l=1}^{k_B} \left(\frac{B_l^2}{n_{B_l}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \tag{13}$$

$$SS_T = \left[\sum_{j=1}^N y_j^2 \right] - \frac{T^2}{N} \tag{14}$$

$$SS_e = SS_T - SS_A - SS_B \tag{15}$$

$$F_{hitung A} = \frac{MS_A}{MS_e} \tag{17}$$

$$F_{hitung B} = \frac{MS_B}{MS_e} \tag{18}$$

Hasil estimasi pada kondisi optimum dapat diperkirakan dari faktor-faktor yang signifikan. Estimasi hasil pada kondisi optimum dengan faktor A dan B yang signifikan dapat dihitung menggunakan persamaan (19).

$$\bar{Y}_{optimum} = \bar{Y} + (\bar{A}_{opt} - \bar{Y}) + (\bar{B}_{opt} - \bar{Y}) \tag{19}$$

Komponen-komponen yang dihitung dalam persentase kontribusi adalah faktor, dan *error*. Persentase kontribusi suatu faktor A (ρ_A) dihitung dengan menggunakan Persamaan (20) [6].

$$\rho_A = \frac{SS'_A}{SS_T} \times 100\% \tag{2.20}$$

$$SS'_A = SS_A - df_A \cdot MS_e \tag{2.21}$$

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Data

Sumber data yang digunakan adalah data sekunder yang diperoleh dari penelitian oleh mahasiswa Departmen Teknik Mesin ITS di Laboratorium Pembakaran Sistem Energi. Data diuji tanpa adanya pengulangan karena mempertimbangkan waktu dan biaya penelitian. Terdapat 3 respon yang digunakan yaitu torsi, daya dan SFC. Sedangkan faktor kontrol yang digunakan ada 2, diantaranya bahan bakar campuran pertamax turbo dengan bioethanol dan pembebanan semua kombinasi diujikan pada 3 jenis kendaraan diantaranya ICE, HEV dan PHEV.

B. Variabel Penelitian

Variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian ini dibagi menjadi 2, yaitu variabel respon dan variabel kontrol. Tabel 2 menunjukkan variabel yang digunakan dalam penelitian.

Tabel 2.
Variabel Penelitian

Variabel	Nama Variabel	Satuan
Y ₁	Torsi	Nm
Y ₂	Daya	kW
Y ₃	<i>Specific Fuel Consumption</i>	(kg/Kwh)
X ₁	Bahan Bakar Campuran	liter
X ₂	Pembebanan	Ampere

C. Rancangan Percobaan

Rancangan percobaan yang digunakan dalam penelitian ini terdapat 2 faktor dengan masing-masing memiliki level yang berbeda. Pada faktor bahan bakar campuran terdapat 5 level dan faktor pembebanan terdapat 5 level. Tabel 3 merupakan penjabaran dari variabel kontrol.

Tabel 3.
Level Faktor

Jenis Kendaraan	Faktor Kontrol	Level
Internal Combustion Engine (ICE)	Pembebanan (A)	A ₁ : 2A
		A ₂ : 4A
		A ₃ : 6A
		A ₄ : 8A
		A ₅ : 10A
	Bahan Bakar Campuran (B)	B ₁ : 100% Pertamax Turbo (E0)
		B ₂ : 95% Pertamax Turbo dengan 5% bioethanol (E5)
		B ₃ : 90% Pertamax Turbo dengan 10% bioethanol (E10)
		B ₄ : 85% Pertamax Turbo dengan 15% bioethanol (E15)
		B ₅ : 80% Pertamax Turbo dengan 20% bioethanol (E20)
Hybrid Engine Vehicle (HEV)	Pembebanan (A)	A ₁ : 4A
		A ₂ : 5A
		A ₃ : 6A
		A ₄ : 7A
		A ₅ : 8A
	Bahan Bakar Campuran (B)	B ₁ : 100% Pertamax Turbo (E0)
		B ₂ : 95% Pertamax Turbo dengan 5% bioethanol (E5)
		B ₃ : 90% Pertamax Turbo dengan 10% bioethanol (E10)
		B ₄ : 85% Pertamax Turbo dengan 15% bioethanol (E15)
		B ₅ : 80% Pertamax Turbo dengan 20% bioethanol (E20)
Plug-In Hybrid Engine Vehicle (PHEV)	Pembebanan (A)	A ₁ : 4A
		A ₂ : 5A
		A ₃ : 6A
		A ₄ : 7A
		A ₅ : 8A
	Bahan Bakar Campuran (B)	B ₁ : 100% Pertamax Turbo (E0)
		B ₂ : 95% Pertamax Turbo dengan 5% bioethanol (E5)
		B ₃ : 90% Pertamax Turbo dengan 10% bioethanol (E10)
		B ₄ : 85% Pertamax Turbo dengan 15% bioethanol (E15)
		B ₅ : 80% Pertamax Turbo dengan 20% bioethanol (E20)

Faktor konstan adalah faktor yang tidak diteliti dalam penelitian. Nilai konstan dijaga agar tidak berubah selama percobaan, sehingga tidak mempengaruhi hasil penelitian secara signifikan. Sehingga rancangan orthogonal array yang dipilih dengan jumlah percobaan sebanyak 25 percobaan dengan jumlah faktor yang digunakan adalah 2. Orthogonal array pada percobaan ini adalah L₂₅(5²).

D. Langkah Analisis

Langkah analisis yang digunakan dalam penelitian ini pada penelitian ini ada beberapa langkah analisis sebagai berikut.

1. Menentukan *Orthogonal Array* dan rancangan percobaan
2. Melakukan transformasi masing-masing respon ke dalam *Signal to Noise Ratio* (SNR) yang sesuai

karakteristik data yang digunakan sesuai dengan persamaan (2) dan (3).

3. Menghitung PCR berdasarkan SNR dari setiap variabel respon. Dengan menghitung rata-rata sampel dan variasi masing-masing respon terlebih dahulu lalu menggunakan Persamaan (6) maka akan didapatkan nilai PCR-SNR masing-masing respon.
4. Mendapatkan nilai TOPSIS dari hasil PCR-SNR. Sehingga diperoleh alternatif yang memiliki jarak terdekat dengan solusi ideal positif (di+) dan jarak terjauh dari solusi ideal negatif (di-) sesuai dengan Persamaan (10) dan (11).
5. Menghitung PCR-TOPSIS menggunakan Persamaan (9).
6. Membuat ANOVA hasil PCR-TOPSIS untuk mengetahui faktor-faktor yang berpengaruh secara signifikan terhadap respon secara serentak serta menghitung persentase kontribusi masing-masing faktor dan persentase kontribusi error.
7. Membuat *main effect plot* dari hasil PCR-TOPSIS untuk mengetahui level faktor yang dapat mengoptimalkan respon secara serentak serta menghitung nilai mean setiap level. Sehingga pada langkah ini dapat diketahui level faktor yang dapat mengoptimalkan respon pada masing-masing variabel kontrol.
8. Menghitung nilai taksiran pada kondisi optimum setiap dengan menggunakan rancangan level optimum yang telah diperoleh pada langkah sebelumnya.
9. Membuat kesimpulan dan saran.

IV. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

A. Taguchi-PCR TOPSIS

Variabel respon yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya adalah torsi, daya dan SFC. Ketiga variabel tersebut dipilih sebagai variabel indikator dari performa kendaraan jenis ICE, HEV dan PHEV. Langkah pertama adalah mentransformasikan nilai masing-masing variabel respon ke S/N ratio. Dengan menggunakan Persamaan (3) dan (4), berikut adalah hasil perhitungan S/N Ratio pada masing-masing variabel respon.

- S/N Ratio pada variabel torsi percobaan nomor 1 kendaran jenis ICE.

$$\eta_{11} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$$

$$= -10 \log_{10} \left(\frac{1}{29,55^2} \right) = 29,411$$

- S/N Ratio pada variabel daya percobaan nomor 1 kendaran jenis ICE.

$$\eta_{12} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$$

$$= -10 \log_{10} \left(\frac{1}{20,88^2} \right) = 26,395$$

- S/N Ratio pada variabel SFC percobaan nomor 1 kendaran jenis ICE.

$$\eta_{13} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$$

$$= -10 \log_{10} (0,806^2) = 1,876$$

Selanjutnya untuk percobaan ke 2 hingga ke 25 pada masing-masing variabel respon dilakukan dengan cara yang sama untuk mendapatkan nilai transformasi S/N Ratio. Hasil perhitungan S/N Ratio secara keseluruhan dapat dilihat pada Lampiran 1.

Berdasarkan indeks kemampuan proses, nilai PCR-S/N Ratio dapat dihitung dengan mentransformasikan nilai S/N Ratio dari tiap variabel respon yang digunakan ke dalam persamaan indeks kemampuan proses. Hasil transformasi nilai S/N Ratio respon menjadi PCR- S/N Ratio dapat dihitung menggunakan Persamaan (6).

$$C_1^1 = \frac{\eta_{ij} - \bar{x}_{\eta_j}}{3s_{\eta_j}} = \frac{29,411 - 41,014}{3 \times 6,315} = -0,612$$

Perhitungan nilai transformasi PCR-S/N Ratio untuk percobaan ke 2 hingga ke 25 dilakukan dengan cara yang sama untuk seluruh jenis kendaraan. Hasil PCR-S/N Ratio secara keseluruhan dapat dilihat pada Lampiran 2.

Setelah mendapatkan nilai PCR-S/N Ratio maka tahap langkah terakhir yaitu menghitung nilai PCR-TOPSIS. Dengan menggunakan Persamaan (10) dan (11) didapatkan hasil jarak solusi ideal positif dan negatif sebagai berikut.

Tabel 4.
Jarak solusi ideal

ICE		HEV		PHEV	
d+	d-	d+	d-	d+	d-
1.805	0.446	2.282	0.000	2.422	0.121
1.787	0.591	1.265	1.278	1.548	1.395
1.941	0.384	1.276	1.142	1.558	1.264
1.474	0.804	1.610	0.899	1.692	1.241
1.718	0.576	1.488	1.164	1.651	1.284
1.086	1.118	1.146	1.163	1.603	0.899
1.051	1.177	0.841	1.474	1.130	1.820
1.130	1.100	0.697	1.629	1.210	1.419
0.908	1.293	1.165	1.245	1.362	1.667
0.873	1.341	0.940	1.686	1.438	1.435
0.863	1.338	0.896	1.436	1.256	1.272
0.682	1.508	0.499	1.831	0.863	1.825
0.841	1.453	0.422	1.879	0.785	1.781
0.558	1.633	1.008	1.274	0.971	1.714
0.485	1.702	0.541	1.822	1.121	1.437
0.432	1.782	0.732	1.595	0.979	1.567
0.235	2.028	0.286	2.007	0.764	1.731
0.639	1.688	0.397	1.937	0.527	2.072
0.450	1.812	0.875	1.468	0.800	1.799
0.450	1.792	0.365	2.049	0.936	1.598
0.713	1.611	0.766	1.610	0.758	1.922
0.554	1.721	0.345	2.002	0.796	1.781
0.386	1.916	0.534	1.933	0.415	2.194
0.485	1.833	0.852	1.609	0.754	1.766
0.361	1.928	0.167	2.139	0.857	1.677

Berdasarkan perhitungan jarak solusi ideal positif maupun negative tersebut, maka dapat diperoleh nilai PCR-TOPSIS dengan menggunakan Persamaan (9).

$$S^i = \frac{d^{i-}}{d^{i+} + d^{i-}} = \frac{0,446}{1,805 + 0,446} = 0,198$$

Perhitungan PCR-TOPSIS tersebut dilakukan pada ketiga jenis kendaraan uji, yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 5 sebagai berikut.

Tabel 5.
PCR-TOPSIS

Percobaan no.	PCR-TOPSIS ICE	PCR-TOPSIS HEV	PCR-TOPSIS PHEV
1	0.198	0.000	0.047
2	0.249	0.503	0.474
3	0.165	0.472	0.448
4	0.353	0.358	0.423
5	0.251	0.439	0.437
6	0.507	0.504	0.359
7	0.528	0.637	0.617
8	0.493	0.700	0.540
9	0.587	0.517	0.550
10	0.606	0.642	0.500
11	0.608	0.616	0.503
12	0.689	0.786	0.679
13	0.634	0.817	0.694
14	0.745	0.558	0.638
15	0.778	0.771	0.562
16	0.805	0.686	0.615
17	0.896	0.875	0.694
18	0.726	0.830	0.797
19	0.801	0.626	0.692
20	0.799	0.849	0.631
21	0.693	0.678	0.717
22	0.756	0.853	0.691
23	0.832	0.784	0.841
24	0.791	0.654	0.701
25	0.842	0.927	0.662

Hasil perhitungan PCR-TOPSIS yang terangkum dalam Tabel 4.1 merupakan variabel baru yang terbentuk untuk merepresentasikan ketiga variabel respon pada masing-masing jenis kendaraan. Sebagai contoh performa kendaraan jenis ICE pada percobaan pertama direpresentasikan oleh nilai sebesar 0,198. Nilai tersebut mewakili dari ketiga variabel respon torsi, daya dan SFC.

B. Analysis of Variance

ANOVA digunakan untuk mengetahui pengaruh variabel kontrol terhadap variabel serentak yang direpresentasikan oleh hasil PCR-TOPSIS.

Tabel 6.
ANOVA pada Kendaraan Jenis ICE

Source	DF	SS	MS	F
Pembebanan	4	1,06730	0,266826	107,60
Bahan Bakar	4	0,04070	0,010175	4,10
Residual Error	16	0,03968	0,002480	
Total	24	1,14768		

Tabel 6 menunjukkan bahwa pembebanan dan bahan bakar campuran memberikan pengaruh yang signifikan terhadap performa kendaraan ICE. Kesimpulan tersebut berdasarkan nilai F_{hitung} pada variabel respon yang secara berturut-turut sebesar 107,6 dan 4,10 lebih besar dari $F_{0,05(4,16)}$ (3,006).

Setelah melakukan uji signifikansi parameter pada kendaraan jenis ICE maka dilanjutkan menguji hal yang sama pada kendaraan jenis HEV. Tabel 7 adalah hasil uji ANOVA pada kendaraan jenis HEV.

Tabel 7.
ANOVA pada Kendaraan Jenis HEV

Source	DF	SS	MS	F
Pembebanan	4	0,62519	0,156299	27,02
Bahan Bakar	4	0,26019	0,065048	11,24
Residual Error	16	0,09256	0,005785	
Total	24	0,97795		

Berdasarkan hasil uji ANOVA didapatkan hasil bahwa nilai F_{hitung} pada kedua variabel kontrol yaitu pembebanan dan

bahan bakar campuran menunjukkan nilai F_{hitung} lebih dari $F_{0,05(4,16)}$ sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa pada kendaraan jenis HEV, kedua faktor kontrol mempengaruhi secara signifikan performa dari kendaraan tersebut.

Kemudian dilanjutkan pada kendaraan uji ketiga yaitu jeni *Plug-In Hybrid Electric Vehicle* (PHEV) dengan hasil ANOVA yang ditertera pada Tabel 8.

Tabel 8.
ANOVA pada Kendaraan Jenis HEV

Source	DF	SS	MS	F
Pembebanan	4	0,41484	0,103710	18,12
Bahan Bakar	4	0,13931	0,034828	6,08
Residual Error	16	0,09160	0,005725	
Total	24	0,64575		

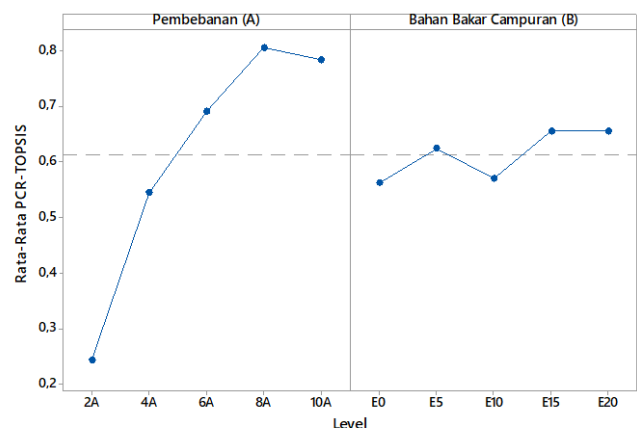
Pada taraf signifikan 5% maka dapat diambil kesimpulan berdasarkan Tabel 4.1 bahwa pembebanan dan variasi bahan bakar campuran memberikan pengaruh yang signifikan terhadap performa kendaraan PHEV. Kesimpulan tersebut berdasarkan nilai F_{hitung} pada variabel pembebanan sebesar 18,12 dan F_{hitung} variabel bahan bakar campuran dibandingkan dengan $F_{0,05(4,16)}$ adalah 3,006 sehingga dapat diambil keputusan bahwa tolak H_0 .

C. Penentuan Kombinasi Level Faktor Optimum dan Besar Kontribusi Faktor

Kondisi optimum yang didasarkan pada nilai PCR-TOPSIS menunjukkan bahwa nilai tertinggi yang tertera pada Tabel 4.1 adalah sebesar 0,896 yaitu percobaan ke 17 pada kendaraan jenis ICE, 0,872 yaitu percobaan ke 17 pada kendaraan jenis HEV dan 0,901 yaitu percobaan ke 21 pada kendaraan jenis PHEV. Sehingga kondisi optimum dapat dicapai dengan kombinasi sebagai berikut.

- Kendaraan jenis ICE yaitu beban 8A dan bahan bakar pertamax turbo 95% bioethanol 5%.
- Kendaraan jenis HEV yaitu beban 8A dan bahan bakar pertamax turbo 80% bioethanol 20%.
- Kendaraan jenis PHEV yaitu beban 8A dan bahan bakar pertamax turbo 90% bioethanol 10%.

Selain itu juga, penentuan kombinasi optimum dapat didekati dengan cara menghitung rata-rata PCR-TOPSIS pada masing-masing level faktor yang diteliti sehingga kombinasi level faktor optimum yang dapat terpilih. Level yang dipilih untuk menentukan kondisi optimum adalah level yang memberikan nilai rata-rata PCR-TOPSIS yang terbesar pada masing-masing respon. Nilai PCR-TOPSIS pada kendaraan jenis ICE dari masing-masing level faktor dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Plot Pengaruh Faktor Utama pada Kendaraan ICE.

Berdasarkan pada Gambar 1 menunjukkan bahwa kondisi optimum yang dapat dicapai kendaraan jenis ICE adalah pada kombinasi A₄ dan B₄. A₄ adalah faktor pembebanan pada level 8A sedangkan B₄ adalah faktor bahan bakar campuran pada level pertamax turbo 85% dan bioethanol 15%. Hal tersebut menunjukkan perbedaan hasil dengan menggunakan pendekatan nilai PCR-TOPSIS. Selanjutnya nilai rata-rata PCR-TOPSIS setiap level faktor pada Gambar 1 tertera pada Tabel 9.

Tabel 9.
Nilai Rata-rata Setiap Level Faktor Kendaraan ICE

Level	Pembebanan (A)	Bahan Bakar Campuran (B)
1	0,2432	0,5623
2	0,5444	0,6236
3	0,6907	0,5700
4	0,8054	0,6555
5	0,7831	0,6554
Delta	0,5622	0,0933
Rank	1	2

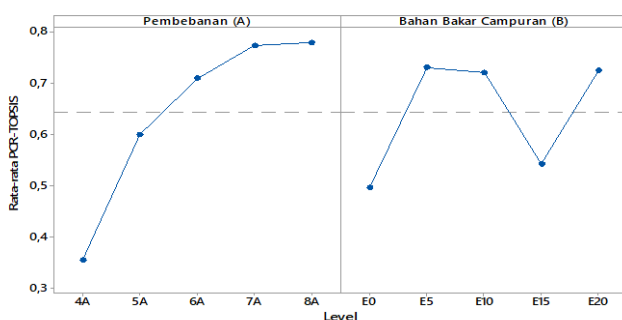
Berdasarkan pengujian signifikansi parameter diketahui bahwa kedua faktor kontrol yang digunakan yaitu pembebanan dan bahan bakar campuran merupakan variabel yang signifikan, dimana pembebanan merupakan faktor yang paling berpengaruh terhadap ketiga respon. Hal ini dapat dilihat dari peringkat pada masing-masing faktor yang menunjukkan faktor pembebanan peringkat 1 dan bahan bakar campuran peringkat 2. faktor terhadap ketiga respon dapat menunjukkan bahwa pembebanan adalah faktor yang memang memberikan pengaruh yang paling besar terhadap ketiga respon dengan kontribusi sebesar 92% sedangkan faktor variasi bahan bakar campuran hanya berkontribusi sebesar 2,68%.

Kemudian penentuan kombinasi level faktor yang optimum pada kendaraan jenis HEV berdasarkan nilai rata-rata PCR-TOPSIS.

Tabel 10.
Nilai Rata-rata Setiap Level Faktor Kendaraan HEV

Level	Pembebanan (A)	Bahan Bakar Campuran (B)
1	0,3544	0,4965
2	0,5998	0,7306
3	0,7095	0,7206
4	0,7732	0,5427
5	0,7791	0,7256
Delta	0,4247	0,2341
Rank	1	2

Berdasarkan Tabel 10 dapat dilihat bahwa ranking dari besar pengaruh setiap faktor terhadap respon yang diteliti. Hal ini dapat dilihat dari peringkat pada masing-masing faktor yang menunjukkan faktor pembebanan peringkat 1 dan bahan bakar campuran peringkat 2.

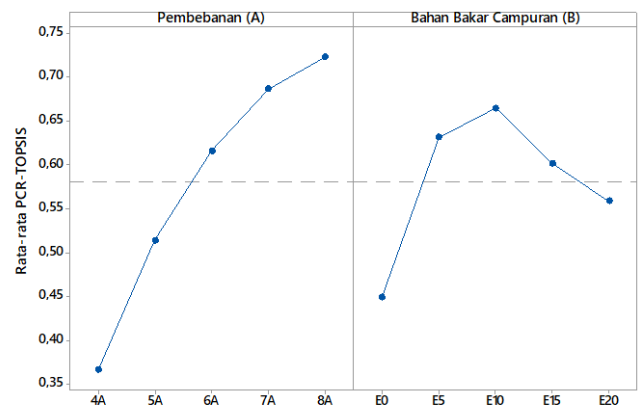


Gambar 2. Plot Pengaruh Faktor Utama pada Kendaraan HEV.

Gambar 2 menunjukkan bahwa kondisi optimum yang dapat dicapai kendaraan jenis HEV adalah pada kombinasi A₅ dan B₂. A₅ adalah faktor pembebanan pada level 8A sedangkan B₂ adalah faktor bahan bakar campuran pada level pertamax turbo 95% dan bioethanol 5%.

Berdasarkan perhitungan persentase kontribusi masing-masing faktor terhadap ketiga respon dapat menunjukkan bahwa pembebanan adalah faktor yang memang memberikan pengaruh yang paling besar terhadap ketiga respon dengan kontribusi sebesar 61,56% sedangkan faktor variasi bahan bakar campuran hanya berkontribusi sebesar 24,54%.

Selanjutnya yaitu penentuan kombinasi level faktor yang optimum pada kendaraan jenis PHEV berdasarkan nilai rata-rata PCR-TOPSIS tertera pada Gambar 3. Berdasarkan pada Gambar 3 menunjukkan bahwa kondisi optimum yang dapat dicapai kendaraan jenis PHEV adalah pada kombinasi A₅ dan B₃. A₅ adalah faktor pembebanan pada level 8A sedangkan B₃ adalah faktor bahan bakar campuran pada level pertamax turbo 90% dan bioethanol 10%.



Gambar 3. Plot Pengaruh Faktor Utama pada Kendaraan PHEV.

Nilai tertinggi tersebut menunjukkan bahwa performa terbaik dapat dicapai pada level tersebut berdasarkan nilai rata-ratanya. Seperti halnya kendaraan jenis ICE dan HEV, pembebanan yang optimum berada pada 8A sedangkan jika melebihi itu mengakibatkan penurunan performa dan muncul indikasi yang menyebabkan kerusakan pada kendaraan. Hal tersebut diakibatkan adanya pengaruh kelebihan pembebanan sehingga terjadi *loses*. Dalam pengujian ini pembebanan didapat dari kerja *loadcell* yang menyalurkan beban ke roller dynamometer yang bergesekan langsung dengan roda kendaraan. Beban yang diterima roller akan menghambat laju putaran roda kendaraan. Oleh karenanya kelebihan pembebanan dapat mengakibatkan slip pada roda dan juga overheating yang terjadi pada mesin. Kemudian komposisi dari pertamax turbo dan bioethanol berpengaruh besar terhadap reaksi dari campuran bahan bakar tersebut. Penambahan bioethanol menaikkan besar *air-fuel ratio* pada kendaraan sehingga terjadi peningkatan tekanan pembakaran yang ada di ruang bakar. Pada kendaraan PHEV ditunjukkan bahwa setelah mencapai level terbaik pada E5 terjadi penurunan rata-rata performa kendaraan hal tersebut diakibatkan pencampuran kedua bahan bakar yg tidak mendekati homogen.

Berdasarkan pengujian signifikansi parameter diketahui bahwa kedua faktor kontrol yang digunakan yaitu pembebanan dan bahan bakar campuran merupakan variabel yang berpengaruh signifikan, dimana pembebanan merupakan faktor yang paling berpengaruh terhadap ketiga respon. Hal ini dapat dilihat dari peringkat pada masing-

Lampiran. S/N Ratio

Percobaan no.	ICE			HEV			PHEV		
	Torsi (η_{i1})	Daya (η_{i2})	SFC (η_{i3})	Torsi (η_{i1})	Daya (η_{i2})	SFC (η_{i3})	Torsi (η_{i1})	Daya (η_{i2})	SFC (η_{i3})
1	32.055	23.846	1.876	34.353	29.726	3.833	34.578	32.060	6.319
2	29.757	23.680	3.631	36.609	31.545	12.280	36.663	32.208	13.888
3	35.937	26.423	-2.740	36.872	31.918	11.106	37.077	32.098	13.100
4	38.778	24.092	4.220	35.189	30.567	9.969	35.785	31.924	13.134
5	33.077	23.321	3.178	35.436	30.512	11.817	36.776	31.394	13.292
6	39.151	29.728	7.082	37.948	33.152	10.363	37.840	33.330	10.380
7	38.155	30.488	7.882	38.967	34.508	11.809	39.027	33.695	15.700
8	42.213	32.846	4.008	39.514	34.834	12.745	39.173	33.589	13.247
9	44.535	30.548	7.151	37.127	32.569	11.585	37.321	33.096	15.224
10	40.878	31.259	8.995	37.385	33.407	14.559	37.037	32.936	13.957
11	41.195	33.934	7.743	39.122	35.497	10.577	39.044	34.598	11.871
12	43.681	34.499	9.076	40.424	36.114	13.271	40.740	34.819	14.933
13	46.744	35.942	5.816	41.655	36.340	12.924	41.472	35.293	14.179
14	47.125	34.846	9.373	39.645	33.779	10.131	39.851	34.818	14.478
15	46.235	35.739	10.396	40.827	34.449	14.070	39.624	34.449	12.889
16	45.154	35.524	12.042	40.612	35.928	10.989	40.582	36.075	12.478
17	47.847	36.116	14.326	42.253	36.521	13.702	42.242	35.852	13.164
18	49.481	37.479	7.554	42.776	36.571	12.621	42.840	36.910	14.803
19	49.613	37.629	9.611	40.971	35.402	9.848	40.976	36.120	14.028
20	48.151	37.848	9.875	41.822	35.058	15.248	40.698	35.550	13.024
21	48.734	37.028	6.848	40.925	36.361	10.487	40.966	36.872	14.430
22	49.348	37.031	8.529	43.182	36.722	12.894	43.133	37.066	12.120
23	51.522	38.013	10.166	43.608	36.975	11.545	47.069	36.910	13.404
24	50.828	37.965	9.114	42.734	35.843	9.508	42.660	36.537	12.731
25	51.260	38.139	10.440	43.195	36.038	14.765	42.331	36.536	12.143

Lampiran. PCR-S/N Ratio

Percobaan no.	ICE			HEV			PHEV		
	Torsi	Daya	SFC	Torsi	Daya	SFC	Torsi	Daya	SFC
1	-0.612	-0.595	-0.517	-0.655	-0.717	-1.134	-0.620	-0.458	-1.233
2	-0.734	-0.606	-0.354	-0.380	-0.439	0.083	-0.374	-0.431	0.132
3	-0.408	-0.427	-0.945	-0.348	-0.382	-0.086	-0.325	-0.451	-0.010
4	-0.258	-0.579	-0.299	-0.553	-0.588	-0.250	-0.477	-0.483	-0.004
5	-0.558	-0.629	-0.396	-0.523	-0.597	0.016	-0.360	-0.579	0.024
6	-0.238	-0.211	-0.034	-0.217	-0.193	-0.193	-0.234	-0.228	-0.501
7	-0.290	-0.161	0.040	-0.093	0.014	0.015	-0.094	-0.162	0.459
8	-0.076	-0.007	-0.319	-0.026	0.064	0.150	-0.077	-0.181	0.016
9	0.046	-0.157	-0.028	-0.317	-0.282	-0.017	-0.296	-0.270	0.373
10	-0.147	-0.111	0.143	-0.285	-0.154	0.411	-0.329	-0.299	0.144
11	-0.130	0.064	0.027	-0.074	0.166	-0.163	-0.092	0.002	-0.232
12	0.001	0.101	0.151	0.085	0.260	0.225	0.109	0.042	0.320
13	0.163	0.195	-0.151	0.235	0.295	0.176	0.195	0.127	0.184
14	0.183	0.123	0.179	-0.010	-0.097	-0.227	0.004	0.041	0.238
15	0.136	0.182	0.273	0.134	0.005	0.341	-0.023	-0.025	-0.048
16	0.079	0.168	0.426	0.108	0.232	-0.103	0.090	0.269	-0.122
17	0.221	0.206	0.638	0.308	0.322	0.288	0.287	0.229	0.001
18	0.307	0.295	0.010	0.372	0.330	0.132	0.357	0.420	0.297
19	0.314	0.305	0.201	0.152	0.151	-0.268	0.137	0.277	0.157
20	0.237	0.319	0.225	0.255	0.099	0.510	0.104	0.174	-0.024
21	0.268	0.266	-0.056	0.146	0.298	-0.176	0.135	0.413	0.230
22	0.300	0.266	0.100	0.421	0.353	0.171	0.392	0.449	-0.187
23	0.415	0.330	0.252	0.473	0.392	-0.023	0.857	0.420	0.045
24	0.378	0.327	0.154	0.367	0.219	-0.317	0.336	0.353	-0.077
25	0.401	0.338	0.278	0.423	0.248	0.441	0.297	0.353	-0.183

masing faktor yang menunjukkan faktor pembebanan peringkat pertama dengan persentase kontribusi sebesar 61,14% dan bahan bakar campuran peringkat 2 dengan persentase kontribusi sebesar 18,02%.

Tabel 11.
Nilai Rata-rata Setiap Level Faktor Kendaraan PHEV

Level	Pembebanan (A)	Bahan Bakar Campuran (B)
1	0,3660	0,4485
2	0,5132	0,6309
3	0,6152	0,6640
4	0,6859	0,6010
5	0,7224	0,5582
Delta	0,3563	0,2155
Rank	1	2

D. Estimasi Hasil pada Kondisi Optimum

Pendekatan PCR-TOPSIS dilakukan dengan tujuan agar mendapatkan kondisi optimum yang dapat mengoptimalkan ketiga respon yang diteliti. Oleh karena itu perlu dilakukan estimasi untuk melihat apakah kondisi optimum optimum yang telah diperoleh tersebut dapat menghasilkan nilai yang optimum untuk respon.

Tabel 12.
Estimasi Hasil Kondisi Optimum

	TORSI	DAYA	SFC
ICE	295,213	71,496	0,252
HEV	143,356	70,066	0,221
PHEV	173,312	71,567	0,206

Berdasarkan perhitungan tersebut, apabila menggunakan kombinasi level A_4 dan B_4 , maka akan diperoleh hasil estimasi nilai torsi pada kendaraan jenis ICE adalah sebesar 295,213 Nm, kendaraan jenis HEV adalah sebesar 143,356 Nm, kendaraan jenis PHEV adalah sebesar 175,312 Nm. Apabila menggunakan kombinasi level A_4 dan B_4 , maka akan diperoleh hasil estimasi nilai daya pada kendaraan jenis ICE adalah sebesar 71,496 kW, kendaraan jenis HEV adalah sebesar 70,066 kW, kendaraan jenis PHEV adalah sebesar 71,567 kW. Apabila menggunakan kombinasi level A_4 dan B_4 , maka akan diperoleh hasil estimasi nilai SFC pada kendaraan jenis ICE adalah sebesar 0,2520,20 kg/kWh, kendaraan jenis HEV adalah sebesar 0,221 kg/kWh, kendaraan jenis PHEV adalah sebesar 0,206 kg/kWh.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan tentang optimasi kendaraan jenis ICE, HEV dan PHEV menggunakan metode taguchi dengan pendekatan PCR-TOPSIS dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Kedua faktor kontrol yang digunakan yaitu pembebanan dan bahan bakar campuran pertamax turbo dengan bioethanol berpengaruh signifikan terhadap performa kendaraan.
2. Persentase kontribusi dari ketiga jenis kendaraan menunjukkan bahwa pembebanan memiliki kontribusi lebih besar dibandingkan dengan bahan bakar campuran.
3. Kondisi optimum yang dicapai adalah kombinasi pembebanan 8A dan bahan bakar campuran pertamax turbo 85% dengan bioethanol 15% untuk kendaraan

jenis ICE. Kemudian pada kendaraan jenis HEV kombinasi optimumnya adalah 8A dengan bahan bakar campuran pertamax turbo 95% dan bioethanol 5%. Lalu pada kendaraan jenis PHEV menunjukkan untuk mendapatkan kondisi yang optimum maka kombinasi terbaiknya adalah pembebanan 8A dengan bahan bakar campuran pertamax turbo 90% dan bioethanol 10%.

B. Saran

Dengan berpengaruh signifikannya hasil uji bahan bakar campuran, maka bahan bakar campuran bioethanol dapat dijadikan sebagai solusi untuk mengatasi permintaan bahan bakar yang terus meningkat. Selain itu dapat dijadikan referensi untuk pengembangan bahan bakar nabati agar menjadi masukan untuk mengembangkan *bioenergy* lebih gencar sehingga dapat dijual secara komersil.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Winarno, J., 2011. Studi Eksperimental Pengaruh Penambahan Bioethano pada Bahan Bakar Pertamax terhadap Unjuk Kerja Motor Bensin. *Jurnal Teknik*, 1(1), pp. 33-39
 - [2] Winanda, P. H. & Sudarmanta, B., 2016. Uji Unjuk Kerja dan Durability 5000 KM Mobil Bensin 1497 CC Berbahan Bakar Campuran Bensin-Bioethanol. *Jurnal Teknik ITS*, 4(1), pp. 1-6.
 - [3] Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), 2018. *Indoneisa Outlook Energi 2018*. [Online] Available at: www.bppt.go.id
 - [4] Balavendram, N., 1995. *Quality by Design*. Great Britain: Prentice Hall International
 - [5] Soejanto, I., 2009. *Design Experimen dengan Metode Taguchi*. Yogyakarta: Graha Ilmu
 - [6] Ross, P. J., 1996. *Taguchi Techniques For Quality Engineering*. 2 ed. New York: Mc.Graw-Hill International.
- Djani, R. J. & Sunaryo, S., 2014. Metode PCR-TOPSIS untuk Optimasi Taguchi Multirespon. *Statistika*, Volume 2, pp. 46-55.