

Optimasi Dielektrika Isolator Polimer *Silicone Rubber* menggunakan Bahan Pengisi Limbah *Coal Fly Ash*

ANDI AMAR THAHARA¹, MARTIN CHOIRUL FATAH¹, IWA GARNIWA MULYANA^{1,2}, CHRISTIONO^{1,2}, MIFTAHUL FIKRI^{1,3}

¹Fakultas Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan, Institut Teknologi PLN, Jakarta

²Departmen Teknik Elektro, Universitas Indonesia, Depok

³Fakultas Teknik Elektro, Universiti Teknologi Malaysia, Johor

Email: andi2110011@itpln.ac.id

Received 13 Juli 2023 | *Revised* 30 Agustus 2023 | *Accepted* 15 Oktober 2023

ABSTRAK

Berdasarkan penelitian dengan judul "Electrical and Mechanical Properties of Fly Ash Filled Silicone Rubber for High Voltage Insulator" oleh Manjang dkk., (2015), telah dilakukan eksperimen uji karakteristik dielektrika fly ash sebagai filler pada isolator Silicone Rubber (SiR), namun belum adanya analisa optimasi komposisi kadar fly ash yang dilakukan, sehingga belum diperoleh nilai rekomendasi komposisi terbaik. Oleh karena itu, tujuan pada penelitian ini dilakukan studi lebih lanjut untuk menentukan nilai optimasi dari jenis komposisi pemanfaatan fly ash sebagai filler pada isolator SiR dengan metode analisa regresi kuadratik dan memperoleh model kuadrat komposisi fly ash yang mengoptimalkan kekuatan dielektrika. Hasil optimasi komposisi fly ash pada pengujian sifat hidrofobik sebesar 20.69% dari komposisi fly ash dan pengujian permitivitas relatif sebesar 80% dari komposisi fly ash.

Kata kunci: *fly ash batu bara, filler, optimasi, regresi kuadratik, silicone rubber*

ABSTRACT

Based on research entitled "Electrical and Mechanical Properties of Fly Ash Filled Silicone Rubber for High Voltage Insulators" by Manjang et al., (2015), experiments have been carried out to test the dielectric characteristics of fly ash as a filler on Silicone Rubber (SiR) insulators, but there is no the optimization analysis of the composition of the fly ash content was carried out, so that the best composition recommendation value has not been obtained. Therefore, the aim of this research is to conduct further studies to determine the optimization value of the type of composition utilizing fly ash as filler in SiR insulators using the quadratic regression analysis method and obtain a quadratic model of fly ash composition that optimizes dielectric strength. Optimization results of the fly ash composition in testing the hydrophobic properties of 20.69% of the fly ash composition and relative permittivity testing of 80% of the fly ash composition.

Keywords: *coal fly ash, filler, optimization, quadratic regression, silicone rubber*

1. PENDAHULUAN

Sebagian besar sumber energi listrik di Indonesia dipasok oleh Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), yang memanfaatkan batu bara sebagai bahan bakar utama, akibat dari proses tersebut Indonesia menghasilkan *fly ash* batu bara sekitar 8,31 Ton di tahun 2019 dan terus meningkat tiap tahunnya **(Petrus, dkk, 2020)** Besarnya jumlah produksi *fly ash* juga berdampak negatif terhadap lingkungan dan makhluk hidup, dampak yang dimaksudkan adalah hasil dari pembakaran batu bara, dimana salah satunya adalah *fly ash*. *Fly ash* memiliki beberapa partikel beracun yang terdiri dari Pb, Cd, As, Hg yang dapat larut ke dalam tanah atau air, dimana unsur tanah dan air adalah unsur yang sangat dekat dengan makhluk hidup. Saat ini pengelolaan limbah *fly ash* batu bara di Indonesia sangat memprihatinkan, sebab sebagian besar masih dikelola secara lokal dan hanya dihaparkan di ruang terbuka (*landfill*) dan dipadatkan dengan air **(Dindi, dkk, 2019)**. Seperti yang ditunjukkan Gambar 1 menunjukkan kondisi *fly ash* yang dihaparkan di ruang terbuka dan tidak dikelola dengan baik. Berdasarkan potensi dan dampak yang ditimbulkan, hal ini mendorong para peneliti dalam mencari solusi agar dapat memanfaatkan limbah *fly ash* sebagai material tepat guna **(Adamczyk, dkk, 2020) (Maqsood, 2022)**.

Fly ash batubara terbagi atas beberapa golongan yang bergantung pada tingkat kalorinya, terlepas dari tingkat kalori yang terkandung pada *fly ash* batu bara, dan serangkaian proses pembakaran, ada beberapa komponen penting yang terkandung di dalam *fly ash*, diantaranya silika, alumina, besi, kalsium, karbon, magnesium oksida, sulfat, fosfat, dan lain-lain **(Bielowicz, dkk, 2018) (Gollakota, dkk, 2019)** Persentasi kandungan silika pada *fly ash* batubara berbagai jenis sangat tinggi, kandungan silika sangat bermanfaat besar pada berbagai jenis produk semen, *filler* karet, dan lain-lain.



Gambar 1. Fly Ash Dihakarkan Diruang Terbuka (*Landfill*)

Dimana kandungan *filler* nanosilika mampu meningkatkan kemampuan tarik dari bahan polimer *Ethylene Propylene Diene Monomer* (EPDM) dan *Silicone rubber* (SiR) **(Ravindran, dkk, 2021)** Selain meningkatkan kemampuan mekanik pada material *polymer*, nanosilika juga mampu meningkatkan kemampuan dielektrika pada material *polymer* epoksi **(Patel, dkk, 2021)** Selain manfaat silika yang terkandung pada *fly ash* batubara, dan besarnya biaya yang dibutuhkan untuk memisahkan dari tiap kandungan *fly ash* batu bara **(Lv, dkk, 2022)**, *fly ash* batubara memiliki potensi besar sebagai *filler rubber* industri **(Kar, 2021)** Isolator sebagai salah satu peralatan listrik memegang peranan penting dalam proses penyaluran energi listrik. Isolator pemasangan luar yang populer dikembangkan saat ini adalah isolator berbahan

polimer, dikarenakan bahan polimer mempunyai banyak kelebihan dibandingkan bahan porselin dan gelas. Diantaranya adalah mempunyai sifat hidrofobik yang tinggi mempunyai rapat massa yang lebih rendah, mudah dibuat karena tidak memerlukan suhu yang sangat tinggi dalam proses pembuatannya, dan mempunyai tingkat kerekatan yang tinggi **(Chindaprasirt, dkk, 2022)**. *Silicone rubber* juga memiliki stabilitas termal dan sifat mekanik yang sangat baik dan banyak digunakan dalam material *aerospace*, manufaktur mekanikal, dan perekat pada suhu tinggi **(Han, dkk, 2022)**.

Berdasarkan penelitian sebelumnya dengan judul "*Electrical and Mechanical Properties Of Fly Ash Filled Silicone Rubber For High Voltage Insulator*" oleh **(Manjang, dkk, 2015)** memanfaatkan *fly ash* sebagai *filler* karena potensi silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) yang terkandung dalam *fly ash* yang tinggi. Hasil kandungan tersebut telah dibuktikan dengan pengujian XRF. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan memberikan variasi persentase pada komposisi *fly ash* sebagai *filler* material isolator polimer jenis *silicone rubber* RTV 683 dengan komposisi *filler* 0% hingga 80%. Kemudian, dilanjutkan dengan pengujian untuk melihat karakteristik mekanik dan elektrik berdasarkan standar *American Standard Testing Material* (ASTM). Hasil penelitian ini adalah adanya peningkatan mekanik dan elektrik dari pengaruh *fly ash* sebagai *filler*.

Kemudian berdasarkan penelitian sebelumnya dengan judul "*Effect Of Fly Ash Filler To Dielectric Properties Of The Insulator Material of Silicone Rubber And Epoxy Resin*" oleh **(Kitta, dkk, 2016b)** memanfaatkan limbah *fly ash* batubara yang dimanfaatkan sebagai *filler silicone rubber*. *Fly ash* mempunyai kandungan unsur silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), titanium dioksida (TiO_2), magnesium oksida (MgO) dan seng oksida (ZnO) berdasarkan uji XRF *fly ash* yang dilakukan pada penelitian ini, sehingga berpotensi sebagai bahan pengisi yang kemungkinan besar dapat digunakan sebagai campuran antara karet silikon dan resin epoksi untuk isolator listrik. Metode penelitian ini menggunakan eksperimen dengan mencampur *fly ash* sebagai *filler silicone rubber* berbentuk karet silikon dan epoksi resin berdasarkan komposisi *fly ash* 0% hingga 50% yang dilanjutkan pengujian karakteristik sifat dielektrika. Dari hasil analisa penelitian ini kekuatan dielektrika karet silikon meningkat dengan bertambahnya jumlah *fly ash*. Sebaliknya pada resin epoksi, kekuatan dielektrika menurun dengan meningkatnya jumlah *fly ash*.

Selanjutnya penelitian sebelumnya dengan judul "*Effect Of Fly Ash Filler Quantity On Electrical Properties Of Silicone Rubber Insulator Material*" oleh **(Kitta, dkk, 2016a)** menjelaskan pengaruh jumlah *fly ash* sebagai bahan pengisi isolator tegangan tinggi jenis *silicone rubber* terhadap karakteristik elektrik. Alasan menggunakan *fly ash* karena murah dan mudah diperoleh. Metode penelitian ini adalah eksperimen dimana *fly ash* dibagi menjadi 4 bentuk komposisi yaitu 20%, 30%, 40%, dan 50% yang dilanjutkan dengan pengujian elektrik berdasarkan standar *American Standard Testing Material* (ASTM). Hasil pengujian karakteristik elektrik meningkat setelah penambahan *filler fly ash* pada *silicone rubber*.

Kajian di atas hanya membahas tentang pengaruh komposisi *fly ash* sebagai *filler* terhadap kinerja mekanik isolator polimer SiR, namun tidak membahas komposisi *fly ash* sebagai *filler* yang mengoptimalkan kinerja dielektrika isolator polimer SiR. Oleh karena itu, penelitian ini akan membahas tentang pengaruh komposisi *fly ash* sebagai *filler* terhadap kinerja dielektrika isolator polimer SiR berdasarkan komposisi *fly ash* sebagai *filler* karet silikon tipe RTV 683 menggunakan analisis statistik dengan tujuan diperoleh komposisi optimum *fly ash* sebagai *filler* dalam bentuk persentase dari pemodelan analisa regresi kuadrat.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Persiapan Bahan dan pengujian

Penelitian ini menyiapkan bahan uji dari *fly ash* batubara dan *silicone rubber* tipe RTV 683 yang diproduksi oleh PT Mepel Chemical. Pencampuran *fly ash* batubara dilakukan tanpa memisahkan kandungan mineralnya. Kemudian dilakukan pencampuran secara manual kedua bahan tersebut (*fly ash* batubara dan RTV 683) dan diaduk menggunakan *hardener* hingga homogen. Selanjutnya bahan dituang ke dalam cetakan dengan kedalaman 2 mm dan ditekan hingga diperoleh bahan dengan keseragaman yang sama. Kemudian dilakukan proses *hardening* selama 24 jam. Setelah proses pengerasan, bahan uji dioven pada suhu 80°C selama 24 jam. Selanjutnya material siap untuk pengujian permitivitas relatif dan sifat hidrofobik material. Bahan dibuat dengan kadar *fly ash* yang berbeda untuk mengetahui pengaruh *fly ash* sebagai bahan pengisi. Pada Tabel 1 menunjukkan variasi dari komposisi *fly ash* sebagai *filler* dengan tujuan untuk melihat kemampuan efek *filler fly ash* batubara pada *silicone rubber*.

Tabel 1. Kode Sampel dan Persentase Isi Fly Ash Batu Bara

No	Kode Sampel	Persentase Kandungan Fly Ash Batubara (Berdasarkan Berat <i>Silicone rubber</i>)
1	SF0	0%
2	SF1	10%
3	SF2	20%
4	SF3	30%
5	SF4	40%
6	SF5	50%
7	SF6	60%
8	SF7	70%
9	SF8	80%

Uji hidrofobitas dilakukan dengan pengukuran sudut kontak statik. Faktor yang harus dijaga dengan baik untuk menghasilkan data yang akurat antara lain parameter seperti suhu atau temperatur, curah hujan udara, dan polusi (Manjang, dkk, 2015). Kontaminan pada permukaan bahan dibersihkan dengan menggunakan etil alkohol 80%. Pengukuran dilakukan dalam ruangan tertutup dengan tujuan agar aliran udara terjaga konstan, sehingga kebersihan udara dapat terjaga dengan baik. Pengujian dilakukan pada suhu ruangan sekitar 26° C dan kelembaban 85%. Pemberian tetesan air dilakukan dengan menggunakan mikropipet dengan volume tetesan 20 mikroliter. Air yang digunakan dalam percobaan ini adalah steril bidestilata yaitu air dengan tingkat kemurnian yang tinggi. Pengambilan gambar tetesan air kemudian diambil dalam 3 detik pada setiap pengukuran untuk membuat pengukuran seragam. Semua parameter yang dapat mempengaruhi nilai sudut kontak telah diusahakan dan dijaga konstan sehingga setiap pengukuran dianggap dilakukan dalam kondisi seragam. Citra tetesan air kemudian diolah menggunakan *software* pengolah citra *ImageJ* untuk mendapatkan nilai sudut kontak.

Relatif Permitivitas atau konstanta dielektrika diperoleh dengan mengukur kapasitansi bahan dengan alat ukur kapasitansi meter yang telah dikalibrasi untuk mengurangi ketidakakuratan pengukuran kapasitansi liar. Material ditempatkan diantara plat bulat paralel (metode plat paralel) dan pengukuran dilakukan dengan frekuensi 800 Hz. Pengukuran kapasitansi dilakukan pada suhu 26°C dan kelembaban sekitar 85%.

2.2 Metode optimasi

Pada penelitian ini menggunakan regresi kuadratik sebagai metode optimasi terhadap kriteria optimasi pada desain ekperimental disebut perbandingan kualitatif dari perbandingan beragam jenis kreteria untuk mendapatkan berbagai jenis parameter. Kriteria optimasi dipertimbangkan oleh p -means, dengan $-\infty \leq p \leq 1$ dimana variasi p antara $-\infty$ dan 0. Model regresi kuadratik diuraikan oleh Franz dan Firedrich pada tahun 1987 (**Preitschopf dan Pukelsheim, 1987**) Persamaan dari model regresi kuadratik diuraikan pada Persamaan (1) di bawah ini:

$$Y(x) = \beta_0 + \beta_1 X^1 + \beta_2 X^2 + \sigma e, \quad X \in [0,1] \quad (1)$$

Dimana e merupakan kesalahan acak dengan nilai rata-rata 0 dan varian 1 dan $\sigma > 0$ adalah faktor skala yang tidak diketahui.

2.3 Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

Mean Absolute Percentage Error (MAPE) merupakan salah satu metode alternatif evaluasi model yang digunakan untuk mengukur tingkat akurasi model suatu model. RMSE merupakan nilai rata-rata dari jumlah kesalahan absolut, nilai MAPE yang rendah menunjukkan bahwa variasi nilai yang dihasilkan model mendekati variasi pengamatan (**Azmi, dkk, 2020**). Untuk menentukan nilai MAPE maka digunakan Persamaan (2) di bawah ini:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (2)$$

Dengan:

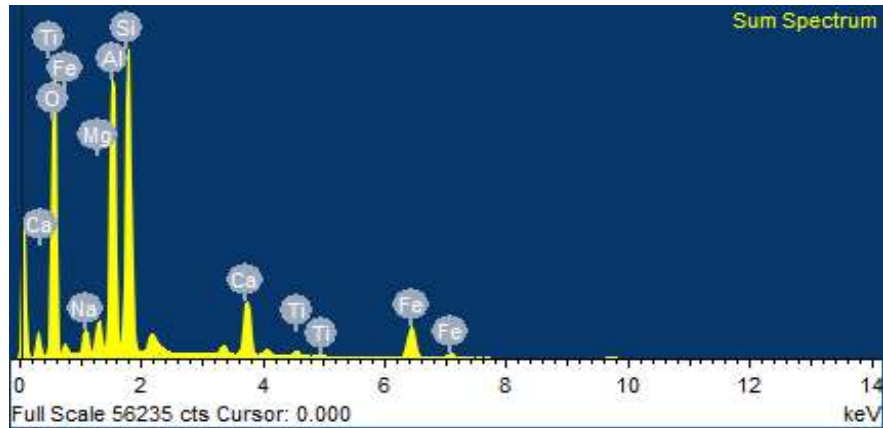
- y_i : Permintaan aktual ke i
- \hat{y}_i : Hasil peramalan ke i
- n : Jumlah data

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menggunakan analisis pemodelan optimasi dengan menghitung regresi polinomial kuadrat orde 2 dengan menggunakan persamaan (1) dimana nilai X adalah jumlah varian komposisi *fly ash* sebagai pengisi karet silikon mulai dari 0% *fly ash* hingga 80% *fly ash*, kemudian nilai Y merupakan nilai yang diperoleh dari beberapa pengujian yang dilakukan terhadap material *fly ash* terhadap *silicone rubber* dalam satuan. Pada penelitian ini dilakukan pengujian sifat hidrofobik dan Pengukuran Permittivitas relatif (ϵ_r).

3.1 Karakteristik *Fly Ash*

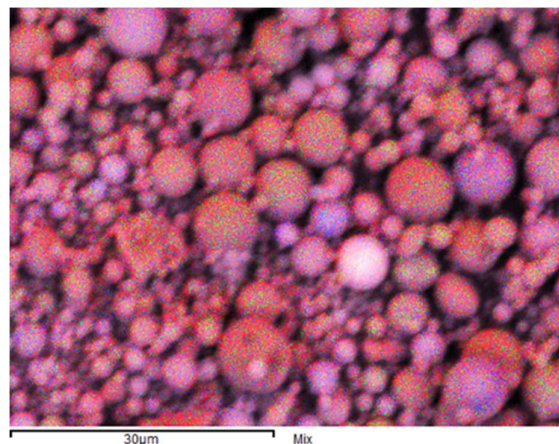
Fly ash merupakan material limbah batubara dari PT Semen Tonasa Indonesia. Berdasarkan standar ASTM C612 *fly ash* yang diuji merupakan *fly ash* tipe F dengan kandungan mineral SiO₂ yang tinggi, dimana *fly ash* tipe F mempunyai kombinasi kimia SiO₂, Al₂O₃, dan Fe₂O₃ (**Kar, 2021**). Kandungan tersebut dapat dilihat melalui *Scanning Electron Microscope* (SEM) pada gambar di bawah ini.



Gambar 2. Karakteristik Unsur Kimia *Fly Ash*

Karakteristik dari *fly ash* batu bara tergantung dari kualitas proses pembakaran, seperti yang di tunjukkan pada Gambar 2 yang menerangkan bahwa mayoritas kandungan dari *fly ash* terdiri dari SiO_2 , Fe_2O_3 , dan Al_2O_3 . Pada penelitian tersebut di laporkan bahwa karakteristik *fly ash* bersumber dari unsur kimia, ukuran *fly ash*, mikrostruktur dan resistansi elektrik **(Waris, dkk, 2018)**

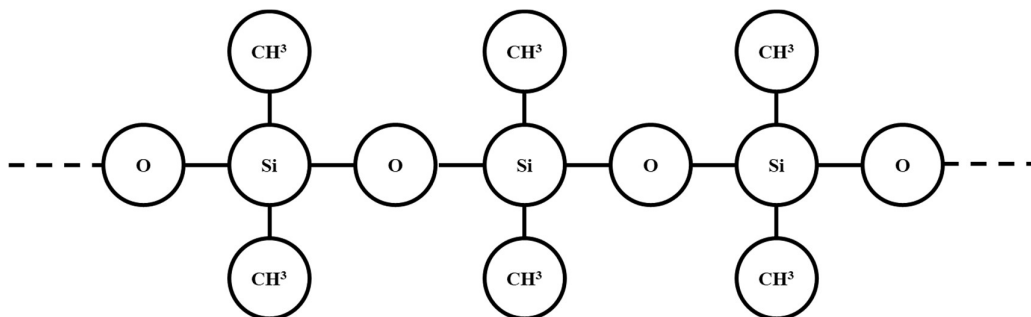
Pada Gambar 3 merepresentasikan bentuk mikrostruktur dari *fly ash* ditampilkan melalui hasil dari pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM). Dari gambar tersebut *fly ash* berwujud sebuah partikel kecil yang mempunyai ukuran dan bentuk yang tidak beraturan **(Waris, dkk, 2018)**



Gambar 3. Hasil Uji SEM *Coal Fly Ash* (CFA)

3.2 Karakteristik SiR

SiR atau *Silicone rubber* merupakan bahan jenis elastomer mengandung atom silikon yang mampu menjaga kestabilan pada suhu -55°C hingga $+300^\circ\text{C}$ sehingga memberikan karakteristik seperti stabilitas termal pelapukan, dan anti oksidasi. Kemudian, karakteristik tersebut dapat meningkatkan sifat listrik dan mekanik dimana struktur kimia SiR dapat dilihat pada Gambar 4 di bawah ini **(Akbar, dkk, 2019)**:



Gambar 4. Struktur Kimia *Silicone Rubber* (SiR)

Penelitian SiR dilakukan juga oleh **(Jamaludin, dkk, 2018)** dengan judul penelitian “*Effect of RTV Coating Material on Electric Field Distribution and Voltage Profiles on Polymer Insulator under Lightning Impulse*”. Berdasarkan hasil penelitian tersebut menyatakan bahwa penerapan pelapisan RTV ternyata efektif dalam hal memperkuat kemampuan menahan tegangan di bawah impuls petir, selain itu SiR dapat digunakan untuk memperbaiki dan melindungi kondisi permukaan isolator polimer, meningkatkan kinerja isolator polimer, meningkatkan masa pakai, dan meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik.

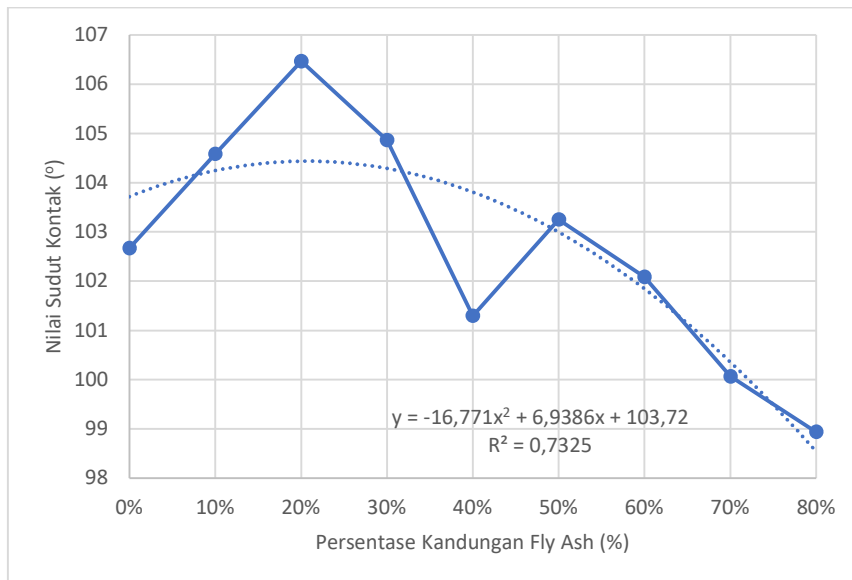
3.3 Optimasi Sifat Hidrofobik

Berdasarkan hasil pengambilan data sudut kontak *fly ash* sebagai bahan pengisi karet silikon RTV 683, didapatkan nilai hidrofobik yang dapat dilihat pada Tabel 2 berikut ini:

Tabel 2. Hasil Pengujian Sudut Kontak

Kode Sampel	Komposisi Kandungan <i>Fly Ash</i> Pada <i>Silicone Rubber</i> RTV	Angka Desimal	Nilai Sudut Kontak
SRFA0	<i>Fly ash</i> 0%	0	102,669
SRFA1	<i>Fly ash</i> 10%	0,1	104,586
SRFA2	<i>Fly ash</i> 20%	0,2	106,468
SRFA3	<i>Fly ash</i> 30%	0,3	104,867
SRFA4	<i>Fly ash</i> 40%	0,4	101,3
SRFA5	<i>Fly ash</i> 50%	0,5	103,255
SRFA6	<i>Fly ash</i> 60%	0,6	102,087
SRFA7	<i>Fly ash</i> 70%	0,7	100,062
SRFA8	<i>Fly ash</i> 80%	0,8	98,9385

Dengan menggunakan data pada Tabel 1, dilanjutkan dengan melihat grafik nilai uji komposisi terhadap nilai sudut kontak, grafik pengujian dapat dilihat pada Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Grafik Regresi Kuadratik Komposisi Fly Ash Terhadap Nilai Sudut Kontak

Berdasarkan grafik pada Gambar 5 dapat dilihat bahwa pengaruh penambahan *fly ash* mengalami peningkatan nilai sudut kontak pada komposisi 20% kadar *fly ash* dalam *silicone rubber* yaitu sebesar 106,46°. Sudut kontak pada komposisi tersebut meningkat sebesar 3,7% dibandingkan dengan *silicone rubber* tanpa *filler fly ash*. Kemudian, penambahan kadar *fly ash* sebesar 30% kedalam *silicone rubber* menunjukkan penurunan sudut kontak dari bahan *silicone rubber* tersebut.

Kemudian, dengan menggunakan *software* Ms. Excel. Nilai sudut kontak diproyeksikan dengan sumbu Y dan banyaknya variasi komposisi *fly ash* yang diproyeksikan dengan sumbu X, maka diperoleh model persamaan regresi kuadratik polinomial pada Persamaan (3) sebagai berikut

$$y = -16,771x^2 + 6,9386x + 103,72 \tag{3}$$

Nilai MAPE dihitung dari model regresi kuadratik polinomial menggunakan data pada Tabel 3 di bawah ini.

Tabel 3. Perhitungan Akurasi Pengujian Sudut Kontak Model Regresi Kuadratik

X	Y	Ŷ	Y- Ŷ	(Y- Ŷ)²
0	102,669	103,72	-1,051	1,1046
0,1	104,586	104,246	0,33985	0,1155
0,2	106,468	104,437	2,03112	4,12545
0,3	104,867	104,292	0,57481	0,33041
0,4	101,3	103,812	-2,51208	6,31055
0,5	103,255	102,997	0,25845	0,0668
0,6	102,087	101,846	0,2409	0,05803
0,7	100,062	100,359	-0,29723	0,08835
0,8	98,9385	98,5374	0,40106	0,16085

Dengan memasukkan data pada Tabel 3 menggunakan persamaan (2) diperoleh nilai MAPE sebesar 0,83% yang berarti nilai persentase *error* menggunakan persamaan ini sangat kecil.

Oleh karena itu, diperlukan model optimasi untuk mencari nilai komposisi terbaik untuk bahan uji *fly ash* yang digunakan sebagai bahan pengisi isolator karet silikon RTV 683. Dari Persamaan (3) di atas yaitu model persamaan regresi kuadrat polinomial yang diperoleh di atas dapat dilanjutkan untuk menentukan nilai komposisi *fly ash* yang optimum dalam menghasilkan nilai komposisi terbaik. Langkah-langkah perhitungan analisis nilai optimasi dengan menurunkan Persamaan (3), maka diperoleh:

$$\Leftrightarrow \frac{dy}{dx}(-16,771x^2 + 6,9386x + 103,72) = 0$$

$$\Leftrightarrow 2(-16,771x + 6,9386) = 0$$

$$x = \frac{6,9386}{33,542} = 0,2069$$

Dari proses ini diperoleh komposisi (x) sebesar 0,2069 atau dalam persentase komposisi 20,69% *fly ash* untuk karet silikon RTV 683 dan nilai sudut kontak optimum adalah 104,438°.

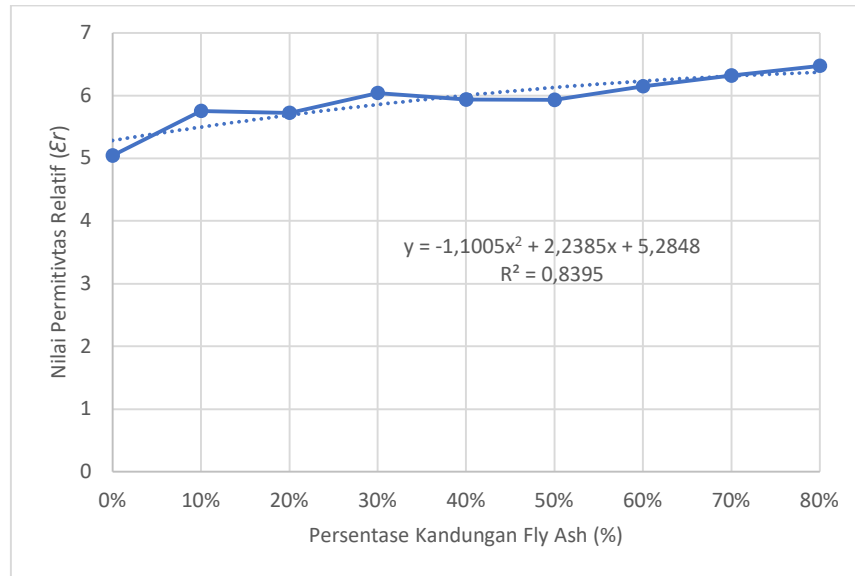
3.4 Pengukuran konstanta dielektrika (Permitivitas relatif)

Berdasarkan hasil pengambilan data uji permitivitas relatif *fly ash* sebagai bahan pengisi karet silikon RTV 683, didapatkan berbagai nilai permitivitas relatif yang dapat dilihat pada Tabel 4 berikut ini:

Tabel 4. Hasil Pengujian Permitivitas Relatif

Kode Sampel	Komposisi Kandungan <i>Fly Ash</i> Pada <i>Silicone Rubber</i> RTV	Angka Desimal	Nilai Permitivitas Relatif (ϵ_r)
SF0	<i>Fly ash</i> 0%	0	5,04602
SF1	<i>Fly ash</i> 10%	0,1	5,75411
SF2	<i>Fly ash</i> 20%	0,2	5,72496
SF3	<i>Fly ash</i> 30%	0,3	6,03987
SF4	<i>Fly ash</i> 40%	0,4	5,93869
SF5	<i>Fly ash</i> 50%	0,5	5,93052
SF6	<i>Fly ash</i> 60%	0,6	6,14834
SF7	<i>Fly ash</i> 70%	0,7	6,32023
SF8	<i>Fly ash</i> 80%	0,8	6,47427

Dengan menggunakan data pada Tabel 4, dilanjutkan dengan melihat grafik nilai uji komposisi terhadap nilai sudut kontak, grafik pengujian dapat dilihat pada Gambar 6 berikut.



Gambar 6. Grafik Regresi Kuadratik Komposisi *Fly Ash* Terhadap Nilai Permittivitas Relatif (ϵ_r)

Berdasarkan grafik pada Gambar 6 dapat dilihat bahwa pengaruh penambahan *fly ash* pada *silicone rubber* meningkatkan permittivitas relatif dari material *silicone rubber* hingga kadar *fly ash* mencapai 80% dalam *silicone rubber*. Peningkatan permittivitas relatif pada kadar *fly ash* sebesar 80% dalam *silicone rubber* mencapai 28,3% dibandingkan material *silicone rubber* tanpa *filler fly ash*.

Kemudian, dengan menggunakan *software* Ms. Excel. Nilai permittivitas relatif diproyeksikan dengan sumbu Y dan banyaknya variasi komposisi *fly ash* yang diproyeksikan dengan sumbu X, maka diperoleh model persamaan regresi kuadratik polinomial pada Persamaan (4) sebagai berikut.

$$y = -1,1005x^2 + 2,2385x + 5,2848 \tag{4}$$

Nilai MAPE dihitung dari model regresi kuadratik polinomial menggunakan data pada Tabel 5 di bawah ini.

Tabel 5. Perhitungan Akurasi Pengujian Permittivitas Relatif

X	Y	\hat{Y}	Y- \hat{Y}	(Y- \hat{Y}) ²
0	5,04602	5,2848	-0,23878	0,057015888
0,1	5,75411	5,497645	0,256465	0,065774296
0,2	5,72496	5,68848	0,03648	0,00133079
0,3	6,03987	5,857305	0,182565	0,033329979
0,4	5,93869	6,00412	-0,06543	0,004281085
0,5	5,93052	6,128925	-0,19841	0,039364544
0,6	6,14834	6,23172	-0,08338	0,006952224
0,7	6,32023	6,312505	0,007725	5,96756E-05
0,8	6,47427	6,37128	0,10299	0,01060694

Dengan memasukkan data pada Tabel 4 menggunakan Persamaan (2) diperoleh nilai MAPE sebesar 2,26% yang berarti nilai persentase *error* menggunakan persamaan ini kecil.

Oleh karena itu, diperlukan model optimasi untuk mencari nilai komposisi terbaik untuk bahan uji *fly ash* yang digunakan sebagai bahan pengisi isolator karet silikon RTV 683. Dari Persamaan (4) di atas yaitu model persamaan regresi kuadrat polinomial yang diperoleh di atas dapat dilanjutkan untuk menentukan nilai komposisi *fly ash* yang optimum dalam menghasilkan nilai komposisi terbaik. Langkah-langkah perhitungan analisis nilai optimasi dengan menurunkan Persamaan (4), maka diperoleh:

$$\Leftrightarrow \frac{dy}{dx}(-1,1005x^2 + 2,2385x + 5,2848) = 0$$

$$\Leftrightarrow 2(-1,1005x + 2,2385) = 0$$

$$x = \frac{2,2385}{2,201} = 1,01704$$

Dari proses ini diperoleh komposisi (x) sebesar 1,01704 atau dalam persentase komposisi 101,7% *fly ash* untuk karet silikon RTV 683 dan nilai permitivitas relatif yang optimum adalah 6,4231. Pada formulasi ini diperoleh nilai optimasi sebesar 101,7%, Namun, variabel komposisi kandungan *fly ash* pada *silicone rubber* hanya dari 0% hingga 80%. Jika ditetapkan nilai kandungan *fly ash* sebesar 101,7% maka akan berpengaruh negatif terhadap faktor lain yaitu sifat hidrofobik material, sebagaimana dijelaskan pada penelitian (**Mendoza, dkk, 2019**) dengan judul "*Super-hydrophobic zinc oxide/silicone rubber nanocomposite surfaces*" disebutkan bahwa ada 2 faktor yang mempengaruhi sifat hidrofobik yaitu pertama struktur permukaan yang menunjukkan kekerasan yang homogen dan distribusi rongga udara dan yang kedua adalah molekul bobot ringan atau *Low Molecular Weight* (LMW) yang menutupi partikel nano pada permukaan material uji. Sehingga, diharapkan kuantitas molekul LMW lebih besar didalam material untuk menjaga sifat hidrofobik pada material (**Sarathi dan Danikas, 2021**). Sehingga, jika persentase nilai optimal pada penambahan kandungan *fly ash* 101,7% akan memperbesar jarak ikatan LMW pada resin *silicone rubber* yang menurunkan sifat hidrofobik material. Oleh karena itu, pada penelitian ini ditentukan komposisi optimum pada pengujian permitivitas relatif pada komposisi 80% dengan nilai permitivitas relatif sebesar 6,37128.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan terhadap sifat hidrofobik dan Pengukuran permitivitas relatif isolator polimer *silicone rubber* (SiR) dengan bahan pengisi *fly ash* dan analisis optimasi menggunakan perhitungan statistik regresi polinomial kuadrat orde 2. Hasil pengujian sifat hidrofobik menunjukkan komposisi *fly ash* optimum sebesar 20,69% dan nilai sudut kontak sebesar 104,438° dengan nilai MAPE sebesar 0,83%. Dari hasil uji permitivitas relatif menunjukkan nilai komposisi optimum sebesar 80% dan nilai permitivitas relatif sebesar 6,37128 dengan nilai MAPE sebesar 2,26%.

DAFTAR RUJUKAN

- Adamczyk, Z., Komorek, J., Biańska, B., Nowak, J., dan Klupa, A. (2020). Assessment of the potential of polish fly ashes as a source of rare earth elements. *Ore Geology Reviews*, 124, 103638. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103638>
- Akbar, M., Ullah, R., dan Alam, S. (2019). Aging of silicone rubber-based composite insulators under multi-stressed conditions: an overview. *Materials Research Express*, 6(10), 102003.
- Azmi, U., Hadi, Z. N., dan Soraya, S. (2020). ARDL METHOD: Forecasting Data Curah Hujan Harian NTB. *Jurnal Varian*, 3(2), 73-82.
- Bielowicz, B., Botor, D., Misiak, J., dan Wagner, M. (2018). Critical elements in fly ash from the combustion of bituminous coal in major polish power plants. E3S Web of Conferences,
- Chindaprasirt, P., Jitsangiam, P., dan Rattanasak, U. (2022). Hydrophobicity and efflorescence of lightweight fly ash geopolymer incorporated with calcium stearate. *Journal of Cleaner Production*, 364, 132449. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132449>
- Dindi, A., Quang, D. V., Vega, L. F., Nashef, E., dan Abu-Zahra, M. R. (2019). Applications of fly ash for CO2 capture, utilization, and storage. *Journal of CO2 Utilization*, 29, 82-102. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.11.011>
- Gollakota, A. R., Volli, V., dan Shu, C.-M. (2019). Progressive utilisation prospects of coal fly ash: A review. *Science of the Total Environment*, 672, 951-989. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.337>
- Han, R., Li, Y., Zhu, Q., dan Niu, K. (2022). Research on the preparation and thermal stability of silicone rubber composites: A review. *Composites Part C: Open Access*, 8, 100249.
- Jamaludin, F. A., Ab-Kadir, M. Z. A., Izadi, M., Azis, N., Jasni, J., Abd Rahman, M. S., dan Osman, M. (2018). Effect of RTV coating material on electric field distribution and voltage profiles on polymer insulator under lightning impulse. 2018 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP),
- Kar, K. K. (2021). *Handbook of Fly Ash*. Butterworth-Heinemann.
- Kitta, I., Manjang, S., Tjaronge, W., dan Irmawaty, R. (2016a). Effect of fly ash filler quantity on electrical properties of silicone rubber insulator material. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(7), 4689-4695.

- Kitta, I., Manjang, S., Tjaronge, W., dan Irmawaty, R. (2016b). Effect of fly ash filler to dielectric properties of the insulator material of silicone rubber and epoxy resin. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 5(3), 120-124.
- Lv, B., Jiao, F., Chen, Z., Dong, B., Fang, C., Zhang, C., dan Deng, X. (2022). Separation of unburned carbon from coal fly ash: Pre-classification in liquid–solid fluidized beds and subsequent flotation. *Process Safety and Environmental Protection*, 165, 408-419. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.07.031>
- Manjang, S., Putera, R. P., Akil, Y. S., dan Kitta, I. (2015). Electrical and Mechanical Properties of Fly Ash Filled Silicone Rubber for High Voltage Insulator. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10(17), 7320-7327.
- Maqsood, K. (2022). Multiobjective optimization of thermophysical properties of Indonesian fly-ash nanofluid. *Materials Today: Proceedings*, 49, 1255-1262. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.304>
- Mendoza, A. I., Moriana, R., Hillborg, H., dan Strömberg, E. (2019). Super-hydrophobic zinc oxide/silicone rubber nanocomposite surfaces. *Surfaces and Interfaces*, 14, 146-157.
- Patel, S., Sengupta, R., Puntambekar, U., dan Shingne, N. (2021). Effect of different types of silica particles on dielectric and mechanical properties of epoxy nanocomposites. *Materials Today: Proceedings*, 44, 1848-1852. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.014>
- Petrus, H. T. B. M., Olvianas, M., Suprpta, W., Setiawan, F. A., Prasetya, A., dan Anggara, F. (2020). Cenospheres characterization from Indonesian coal-fired power plant fly ash and their potential utilization. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104116. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104116>
- Preitschopf, F., dan Pukelsheim, F. (1987). Optimal designs for quadratic regression. *Journal of statistical planning and inference*, 16, 213-218. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0378-3758\(87\)90070-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0378-3758(87)90070-X)
- Ravindran, A., Kamaraj, M., Vasanthmurali, N., Meghavarshini, V., dan Balachandran, M. (2021). Nanosilica reinforced EPDM silicone rubber blends: Experimental and theoretical evaluation of mechanical and solvent sorption properties. *Materials Today: Proceedings*, 46, 4381-4386. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.666>
- Sarathi, R., dan Danikas, M. (2021). RTV Silicone Rubber Coatings for Outdoor Insulators: A Concise Review of Some Factors Affecting their Behavior and Some Comments. *Journal of Engineering Science & Technology Review*, 14(1).

Waris, T., Murakami, Y., Hozumi, N., Kawashima, T., Manjang, S., dan Kitta, I. (2018). Improved Performance of Silicon Rubber Insulation with Coal Fly Ash Micro Filler. *EPI International Journal of Engineering*, 1(2), 81-86.
<https://doi.org/https://doi.org/10.25042/epi-ije.082018.13>