




A Rule-Based Expert System for Evaluating the Performance of Recycled PVC Cable Insulators with NPCC and Plasticizer Additives

Aina Afrina Fairuziyya ^{a,1}, Anang Habibi ^{a,2,*}, Dimas Cahyono ^{a,3}, Angguh Prastoko ^{a,4}

^a Fakultas Teknik, Universitas Islam Malang, Jl. Mayjen Haryono No.193, Dinoyo, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Indonesia

¹ 22201053032@unisma.ac.id; ² ananghabibi@unisma.ac.id *; ³ 22201053012@unisma.ac.id; ⁴ 22201053025@unisma.ac.id

ARTICLE INFO	ABSTRAK
<p>Article History Submission : 28-01-2026 Revision : 02-03-2026 Accepted : 14-03-2026</p> <p>Kata Kunci: Sistem Pakar, PVC Daur Ulang, Nano Precipitated Calcium Carbonate, Isolator Kabel, Rule-Based Reasoning</p>	<p>Pemanfaatan Polyvinyl Chloride (PVC) daur ulang sebagai material isolator kabel memerlukan metode evaluasi kelayakan yang objektif dan terstruktur. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem pakar berbasis aturan (rule-based expert system) menggunakan Python untuk menentukan kelayakan material isolator kabel PVC daur ulang berdasarkan komposisi Nano Precipitated Calcium Carbonate (NPCC) dan plasticizer. Metode penelitian dilakukan melalui pembuatan tiga sampel komposit PVC daur ulang dengan variasi gramasi NPCC dan volume plasticizer, kemudian dilakukan pengujian laboratorium meliputi resistansi isolasi, kuat tarik, dan elongasi. Data hasil pengujian dianalisis menggunakan statistik deskriptif berupa nilai rata-rata (mean) dan standar deviasi sebagai dasar penyusunan aturan keputusan sistem pakar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Sampel 1 memiliki nilai resistansi isolasi sebesar $0,00164 \pm 0,0017 \text{ M}\Omega$ dan dikategorikan sebagai Tidak Layak. Sampel 2 memiliki nilai resistansi sebesar $0,13436 \pm 0,0120 \text{ M}\Omega$ dan dikategorikan sebagai Perlu Optimasi, sedangkan Sampel 3 sebesar $0,08464 \pm 0,0240 \text{ M}\Omega$ dengan karakteristik mekanik paling mendekati produk pasaran sehingga dikategorikan sebagai Layak/Mendekati. Penelitian ini berkontribusi dalam menyediakan alat bantu pengambilan keputusan yang objektif dan konsisten untuk evaluasi material isolator kabel berbasis PVC daur ulang.</p> <p style="text-align: right;">This is an open access article under license CC-BY-SA.</p> 

1. Pendahuluan

Isolator kabel merupakan komponen vital dalam sistem tenaga listrik karena berfungsi menjaga keamanan, stabilitas, dan kontinuitas aliran energi listrik dengan mencegah terjadinya kebocoran arus maupun percikan listrik ke lingkungan sekitar [1]. Salah satu material isolasi yang paling banyak digunakan pada kabel tegangan rendah hingga menengah adalah Polyvinyl Chloride (PVC) karena sifat dielektriknya yang baik, proses fabrikasi yang mudah, serta biaya produksi yang relatif rendah [2]. Namun, tingginya konsumsi PVC dalam

industri kabel menyebabkan meningkatnya volume limbah PVC pasca-konsumsi, sementara material ini bersifat tidak mudah terurai serta berpotensi menghasilkan senyawa berbahaya seperti dioksin ketika dibakar [3]. Tantangan lingkungan inilah yang mendorong penelitian terkait pemanfaatan kembali limbah PVC melalui proses daur ulang sebagai material isolator kabel alternatif dalam kerangka ekonomi sirkular.

Dalam pengembangannya daur ulang PVC umumnya memerlukan tambahan filler dan aditif untuk memperbaiki sifat mekanik, termal, dan dielektriknya. Salah satu filler anorganik yang menjanjikan adalah Nano Precipitated Calcium Carbonate (NPCC) yang terbukti mampu meningkatkan stabilitas termal dan kekuatan mekanik komposit PVC [4]. Demikian juga penggunaan plasticizer sebagai aditif mampu meningkatkan fleksibilitas dan elongasi sehingga komposit daur ulang PVC dapat mendekati karakteristik PVC virgin [5]. Namun, kombinasi NPCC dan plasticizer tidak selalu menghasilkan performa optimal [6]. Rasio campuran, distribusi partikel, serta interaksi kimia antarkomponen sangat menentukan kelayakan material sebagai isolator kabel [7]. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu metode evaluasi yang mampu menilai kelayakan material secara sistematis berdasarkan data uji laboratorium.

Hingga kini, sebagian besar penelitian mengenai komposit PVC daur ulang masih bertumpu pada analisis eksperimental konvensional, seperti pengukuran resistansi isolasi, kuat tarik, elongasi putus, serta karakterisasi morfologi filler menggunakan SEM. Sebagai contoh, penelitian [8] menunjukkan bahwa ukuran filler dan kompatibilitas antar-fase memengaruhi konstanta dielektrik material komposit. Sementara itu, penelitian [9] mengenai karakterisasi PVC pasca iradiasi juga menjelaskan perubahan struktur dan sifat mekanik material. Namun, kedua penelitian tersebut belum menyediakan mekanisme evaluasi otomatis yang dapat mengintegrasikan berbagai parameter uji menjadi keputusan kelayakan material secara langsung. Akibatnya, proses penilaian masih sangat bergantung pada interpretasi subjektif peneliti dan memerlukan waktu lama untuk mengolah data secara manual.

Di sisi lain, pendekatan berbasis *multi criteria decision making* (MCDM) atau sistem pakar sederhana telah diterapkan pada bidang pemilihan material komposit, seperti pada studi [10] yang memanfaatkan metode GRA dan TOPSIS. Namun, pendekatan tersebut tidak didesain khusus untuk komposit PVC daur ulang, tidak mempertimbangkan parameter dielektrik secara langsung, serta belum diarahkan untuk menghasilkan kategori kelayakan praktis seperti Tidak Layak, Perlu Optimasi, dan Layak bagi kebutuhan industri kabel.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, diperlukan suatu sistem evaluasi yang mampu mengintegrasikan data hasil pengujian laboratorium menjadi penilaian kelayakan material yang objektif, cepat, dan konsisten meskipun jumlah sampel yang tersedia terbatas. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah mengembangkan dan mengimplementasikan sistem pakar berbasis *rule-based reasoning* menggunakan bahasa pemrograman Python untuk mengevaluasi kelayakan isolator kabel berbahan PVC daur ulang dengan penambahan NPCC dan plasticizer berdasarkan parameter uji laboratorium utama, yaitu resistansi isolasi, kuat tarik, elongasi putus, serta kualitas dispersi filler dari hasil pencitraan SEM.

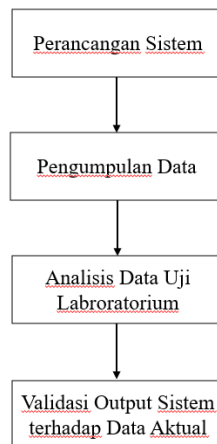
Sistem pakar yang dikembangkan menyusun aturan keputusan berdasarkan analisis data eksperimen, kemudian secara otomatis mengklasifikasikan setiap sampel komposit ke dalam tiga kategori kelayakan utama, yaitu Tidak Layak, Perlu Optimasi, dan Layak. Metode penelitian meliputi pengumpulan dan ekstraksi data uji laboratorium, perumusan aturan berbasis ambang batas parameter material, serta implementasi sistem pakar menggunakan Python.

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil keluaran sistem terhadap data sampel eksperimen dan produk pembanding yang digunakan di industri. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi strategis berupa mekanisme evaluasi komposit PVC daur ulang yang lebih objektif, terstandar, dan aplikatif bagi laboratorium pengujian, industri kabel, serta pengembangan material isolasi ramah lingkungan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental yang dikombinasikan dengan sistem pakar berbasis aturan (*rule-based expert system*) untuk merekomendasikan kelayakan material isolator kabel berbasis limbah Polyvinyl Chloride (PVC) berdasarkan gramasi *Nano Precipitated Calcium Carbonate* (NPCC) dan *plasticizer*. Hasil pengujian laboratorium terhadap sifat mekanik dan dielektrik material digunakan sebagai dasar dalam proses akuisisi pengetahuan untuk menyusun basis aturan pada sistem pakar.

Metode ini dirancang agar hubungan antara komposisi material NPCC dan plasticizer dengan performa mekanik dan dielektrik dapat dimodelkan secara sistematis melalui penalaran berbasis aturan sehingga menghasilkan keputusan yang objektif. Tahapan penelitian meliputi perancangan sistem, pengumpulan data uji laboratorium, analisis statistik data, penyusunan aturan keputusan (*rule base*), serta validasi hasil keluaran sistem terhadap data aktual.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

Berikut penjelasan dari setiap tahap penelitian berdasarkan Gambar 1 Tahapan Penelitian.

1. Perancangan Sistem

Perancangan sistem bertujuan untuk mengembangkan sistem pakar berbasis aturan yang mampu merekomendasikan kategori kelayakan material isolator kabel berdasarkan input gramasi NPCC dan plasticizer. Sistem dikembangkan menggunakan dengan tiga kategori keluaran, yaitu Tidak Layak, Perlu Optimasi, dan Layak.

Parameter mekanik dan dielektrik (resistansi isolasi, kuat tarik, dan elongasi) tidak digunakan sebagai input langsung sistem pakar, tetapi dimanfaatkan sebagai dasar ilmiah dalam proses pembentukan basis pengetahuan untuk menentukan batasan gramasi NPCC dan plasticizer yang memenuhi kriteria kelayakan material isolator kabel.

2. Pengumpulan Data

Data diperoleh dari hasil uji laboratorium terhadap bahan isolator kabel berbasis limbah PVC dengan penambahan bahan aditif seperti *Nano Precipitated Calcium Carbonate* (NPCC) dan *plasticizer* sebagai modifikator sifat mekanik dan dielektrik. Parameter uji meliputi:

- Resistansi isolasi ($M\Omega$), diukur menggunakan megger insulation tester;
- Kuat tarik (MPa) dan elongasi (%), untuk menilai ketahanan mekanik bahan;
- Distribusi filler, diamati melalui *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk mengevaluasi homogenitas campuran.

Adapun tahapan dalam memperoleh data aktual yaitu diawali dengan pengumpulan dan pemilahan sampah PVC kemudian limbah PVC dibersihkan dan dihancurkan hingga menjadi serbuk halus dilanjutkan dengan pembuatan cetakan sampel. Setelah itu dilakukan pencampuran material PVC dengan bahan kimia NPCC dan plasticizer yang kemudian dilebur dengan suhu $180^{\circ}C$ agar meleleh dan tercampur. Material yang sudah tercampur merata dituang ke dalam cetakan sampel dan didinginkan pada suhu ruang. Setelah itu dilakukan pengujian laboratorium.

Tiga sampel hasil eksperimen yang sudah melewati proses uji laboratorium dan satu produk pasar dijadikan dataset awal sebagai dasar pengembangan sistem pakar.

3. Analisis Data Uji Laboratorium

Tahap ini dilakukan sebagai dasar penyusunan aturan keputusan dalam sistem pakar. Seluruh parameter dievaluasi mengacu pada nilai hasil pengujian sampel komposit PVC daur ulang yang diformulasikan dengan NPCC dan plasticizer kemudian dianalisis menggunakan statistik deskriptif berupa nilai rata-rata (mean) dan standar deviasi (SD). Analisis ini dilakukan untuk mengetahui kestabilan hasil pengujian resistansi isolasi pada setiap sampel serta sebagai dasar penentuan batas kelayakan material berdasarkan standar SNI yang relevan dan temuan penelitian terdahulu.

Tabel 1: Tabel Statistik

Sampel	Mean ($M\Omega$)	Standar Deviasi ($M\Omega$)
Sampel 1	0.00164	± 0.0017
Sampel 2	0.13436	± 0.0120
Sampel 3	0.08464	± 0.0240

Hasil analisis statistik ini digunakan sebagai dasar penyusunan aturan keputusan dalam sistem pakar dengan struktur:

IF (parameter memenuhi batas) THEN (kategori kelayakan)

Sebagaimana aturan yang dipakai:

- IF resistansi $\geq 0.22 M\Omega$ THEN Disarankan
- IF $0.10 M\Omega \leq$ resistansi $< 0.22 M\Omega$ THEN Mendekati
- IF resistansi $< 0.10 M\Omega$ THEN Tidak Disarankan

4. Validasi Output Sistem terhadap Data Aktual

Validasi dilakukan untuk memastikan bahwa keluaran sistem pakar mampu merepresentasikan kondisi nyata material isolator kabel PVC daur ulang. Validasi dilakukan

dengan membandingkan hasil klasifikasi sistem pakar terhadap kategori aktual berdasarkan hasil uji laboratorium.

Evaluasi kinerja sistem dilakukan menggunakan confusion matrix serta metrik evaluasi berupa accuracy, precision, recall, dan F1-score.

Tabel 2: Confusion Matrix

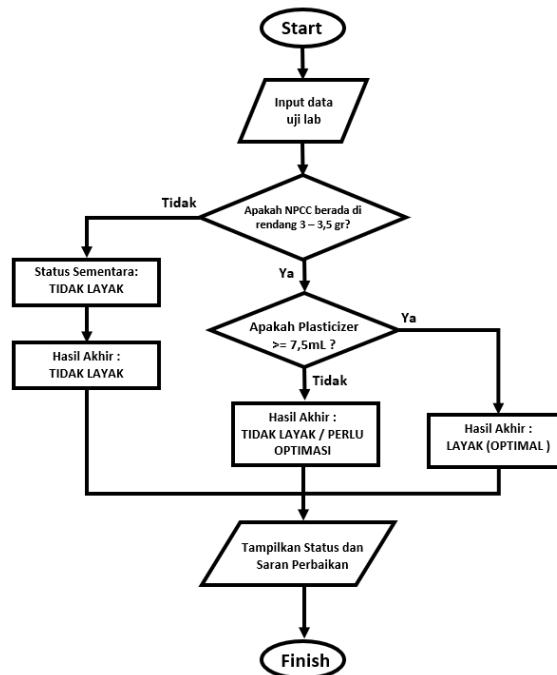
Prediksi	Layak	Perlu Optimasi	Tidak Layak
Layak	1	0	0
Perlu Optimasi	0	1	0
Tidak Layak	0	0	1

Berdasarkan Tabel 2 confusion matrix tersebut diperoleh nilai:

- Accuracy = 100%
- Precision = 1,00
- Recall = 1,00
- F1-score = 1,00

Hasil ini menunjukkan bahwa sistem pakar mampu mengklasifikasikan seluruh sampel sesuai dengan kategori aktual. Namun, nilai akurasi yang tinggi dipengaruhi oleh jumlah dataset yang masih terbatas sehingga diperlukan pengujian lanjutan dengan jumlah data yang lebih besar untuk meningkatkan reliabilitas sistem.

2.1 Flowchart Penelitian



Gambar 2. Flowchart Sistem Pakar

Gambar 2 menunjukkan flowchart sistem pakar yang dimulai dengan proses input data komposisi material berupa gramasi NPCC dan volume plasticizer. Batasan nilai NPCC dan

plasticizer yang digunakan dalam sistem pakar diperoleh dari hasil analisis data uji laboratorium (resistansi isolasi, kuat tarik, dan elongasi) pada tahap sebelumnya.

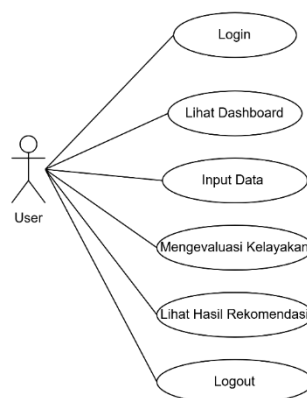
Setelah data diinput, sistem melakukan pemeriksaan pertama terhadap parameter NPCC. Pada tahap ini sistem mengevaluasi apakah jumlah NPCC berada pada rentang yang telah ditetapkan yaitu 3-3,5 gram. Rentang ini ditentukan berdasarkan analisis hasil uji laboratorium yang menunjukkan bahwa pada kisaran tersebut sifat mekanik dan stabilitas material berada pada kondisi yang paling mendukung untuk aplikasi isolator kabel. Apabila jumlah NPCC berada di luar rentang tersebut, maka sistem secara otomatis memberikan status sementara Tidak Layak dan langsung menetapkan hasil akhir sebagai Tidak Layak, karena komposisi filler dianggap tidak memenuhi syarat dasar kelayakan material.

Apabila jumlah NPCC memenuhi rentang yang ditetapkan, proses evaluasi dilanjutkan ke tahap berikutnya yaitu pemeriksaan parameter plasticizer. Sistem memeriksa apakah volume plasticizer yang digunakan lebih besar atau sama dengan 7,5 mL. Parameter ini berperan penting dalam menentukan fleksibilitas dan elongasi putus material isolator. Jika volume plasticizer memenuhi atau melebihi ambang batas tersebut, maka sistem menetapkan hasil akhir sebagai Layak (Optimal) yang menunjukkan bahwa kombinasi komposisi material berada pada kondisi paling ideal berdasarkan aturan yang dirumuskan.

Sebaliknya, apabila kandungan NPCC telah memenuhi kriteria namun volume plasticizer masih berada di bawah 7,5 mL, sistem memberikan hasil akhir Tidak Layak / Perlu Optimasi. Kategori ini menunjukkan bahwa material memiliki potensi untuk digunakan sebagai isolator kabel namun masih memerlukan optimasi formulasi khususnya pada penambahan plasticizer, agar sifat mekanik dan dielektriknya dapat memenuhi standar yang diharapkan.

Setelah keputusan akhir ditentukan, sistem menampilkan status kelayakan material beserta saran perbaikan yang relevan. Saran perbaikan ini disesuaikan dengan hasil evaluasi, misalnya rekomendasi penyesuaian jumlah NPCC atau peningkatan volume plasticizer untuk mencapai kondisi material yang lebih optimal. Proses evaluasi kemudian diakhiri pada tahap finish, yang menandai selesainya satu siklus penilaian kelayakan isolator kabel oleh sistem pakar.

2.2 Use Case Diagram



Gambar 3. Use Case Diagram

Gambar 3 merupakan use case diagram dimana user dapat mengakses login kemudian user dapat melihat dashboard. Setelah itu user dapat menginputkan data hasil uji lab kemudian

sistem mengevaluasi kelayakan berdasarkan parameter yang telah ditetapkan. Setelah itu user dapat melihat hasil rekomendasi kelayakan dari hasil uji labnya. Kemudian user dapat logout.

2.3 Prosedur Pengambilan Data



Gambar 4. Tahapan Riset Pembuatan Isolator

Berdasarkan Gambar 4 sampah plastik PVC pasca konsumsi dikumpulkan kemudian dipilah dan dibersihkan untuk menghilangkan kotoran serta kontaminan. Material PVC yang telah bersih dicacah menjadi ukuran kecil dan selanjutnya dihaluskan hingga berbentuk serbuk. Serbuk PVC kemudian dicampur secara homogen dengan *Nano Precipitated Calcium Carbonate* (NPCC) dan plasticizer sesuai komposisi yang ditentukan. Campuran tersebut dilebur dalam oven pada suhu rata-rata 180 °C hingga mencapai titik leleh PVC, kemudian dicetak menggunakan cetakan berbahan plat besi dengan dimensi 7 cm × 1 cm × 1 cm sesuai standar konstruksi isolator kabel NYM berdasarkan SNI 2699:1999. Sampel yang telah terbentuk selanjutnya diuji sifat elastomer dan kelistrikkannya, meliputi pengujian kuat tarik, elongasi putus, serta resistansi isolasi mengacu pada SNI 04-6629:2011 dan SPLN 42-2:1992. Data hasil pengujian tersebut dianalisis sebagai dasar evaluasi kelayakan dan optimasi komposisi material isolator kabel.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Data Hasil Perbandingan Produk Penelitian dengan Produk Pasaran

Berikut ini meruakan hasil pengujian laboratorium terhadap sampel isolator kabel berbahan PVC daur ulang hasil penelitian serta produk pasaran yang digunakan sebagai pembandingan. Data yang ditampilkan meliputi parameter mekanik utama, yaitu gaya maksimum (*force at peak*), tegangan tarik (*tensile stress*), elongasi maksimum, dan persentase elongasi pada titik puncak yang digunakan sebagai dasar analisis perbandingan performa material.

Tabel 3 : Hasil Pengujian Benda uji Penelitian Dengan Produk Pasaran

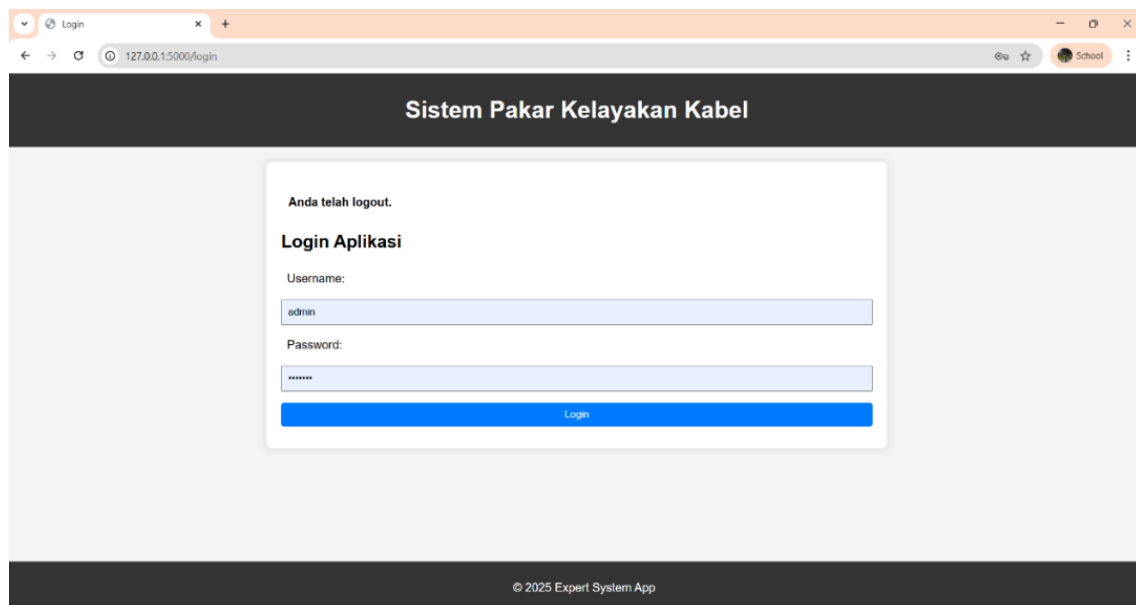
No	Pengujian	Benda Uji			Pengujian Produk Pasaran	
		Sampel 1	Sampel 2	Sampel 3	Sampel 1	Sampel 2
1	Force @ peak (kgf)	5,86	5,43	5,26	17,6	15,89
2	Tensile Stress (Mpa)	0,718	1,668	1,433	2,157	1,948
3	Elong. @ peak (mm)	37,643	40,007	45,293	34,773	35,954
4	Elongation Percentage @ peak (%)	34,221	30,775	64,704	69,546	51,363

Berdasarkan Tabel 3 terlihat adanya perbedaan karakteristik mekanik yang cukup signifikan antara ketiga sampel isolator kabel hasil penelitian. Dari keempat parameter yang diuji yaitu *force at peak*, *tensile stress*, *elongation at peak*, dan persentase elongasi, Sampel 3 menunjukkan performa yang paling mendekati karakteristik produk pasaran yang digunakan sebagai pembandingan. Meskipun nilai gaya maksimum dan tegangan tarik Sampel 3 masih berada di bawah produk pasaran, tren peningkatan nilai *tensile stress* dan *elongation at peak* menunjukkan bahwa material memiliki kemampuan deformasi yang lebih baik dibandingkan Sampel 1 dan Sampel 2.

Nilai *elongation at peak* dan persentase elongasi Sampel 3 masing-masing mencapai 45,293 mm dan 64,704%, yang berada pada rentang yang relatif sebanding dengan produk pasaran, khususnya pada aspek fleksibilitas material. Hal ini mengindikasikan bahwa komposisi material pada Sampel 3 mampu menghasilkan sifat elastomer yang lebih mendekati isolator kabel komersial. Sebaliknya, Sampel 1 dan Sampel 2 menunjukkan nilai elongasi yang lebih rendah dan cenderung menyimpang dari karakteristik produk pasaran yang mengindikasikan keterbatasan performa mekanik pada formulasi tersebut.

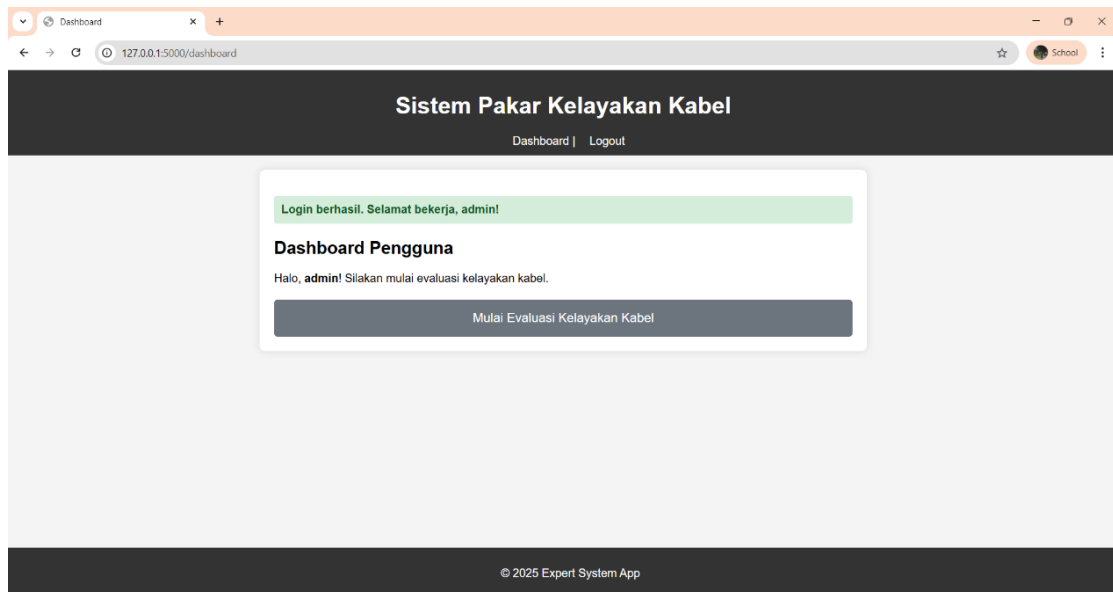
Berdasarkan hasil perbandingan ini, Sampel 3 dapat dikategorikan sebagai sampel yang paling berhasil dalam penelitian ini, karena secara keseluruhan menunjukkan keseimbangan sifat mekanik yang paling mendekati produk pasaran. Temuan ini selanjutnya dijadikan dasar dalam perumusan aturan (*rule base*) pada sistem pakar yang dikembangkan. Parameter komposisi material, khususnya jumlah gramasi NPCC dan volume plasticizer yang digunakan pada Sampel 3, diidentifikasi sebagai kombinasi yang menghasilkan performa material paling optimal berdasarkan hasil uji laboratorium. Oleh karena itu, nilai-nilai komposisi tersebut digunakan sebagai referensi utama dalam penentuan ambang batas evaluasi kelayakan pada sistem pakar untuk mengklasifikasikan material ke dalam kategori Layak (Optimal), Mendekati, dan Tidak Layak.

3.2. Hasil Sistem Pakar Kelayakan Isolator Kabel



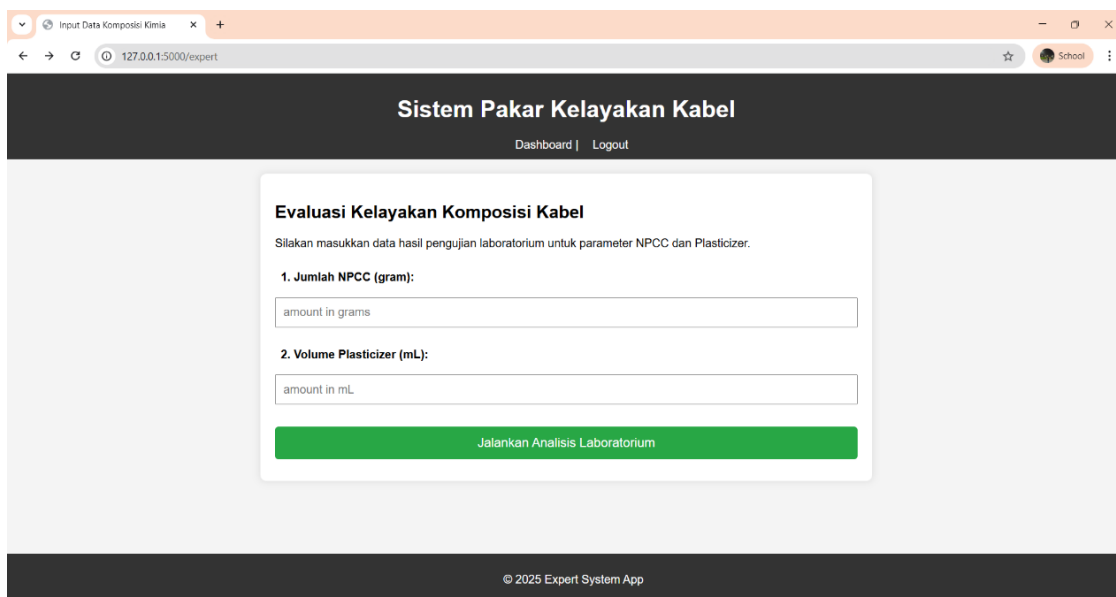
Gambar 5. Tampilan Awal Form Login

Gambar 5 merupakan tampilan awal pada form login. Pengguna dapat memasukkan username dan password agar dapat masuk ke dashboard aplikasi.



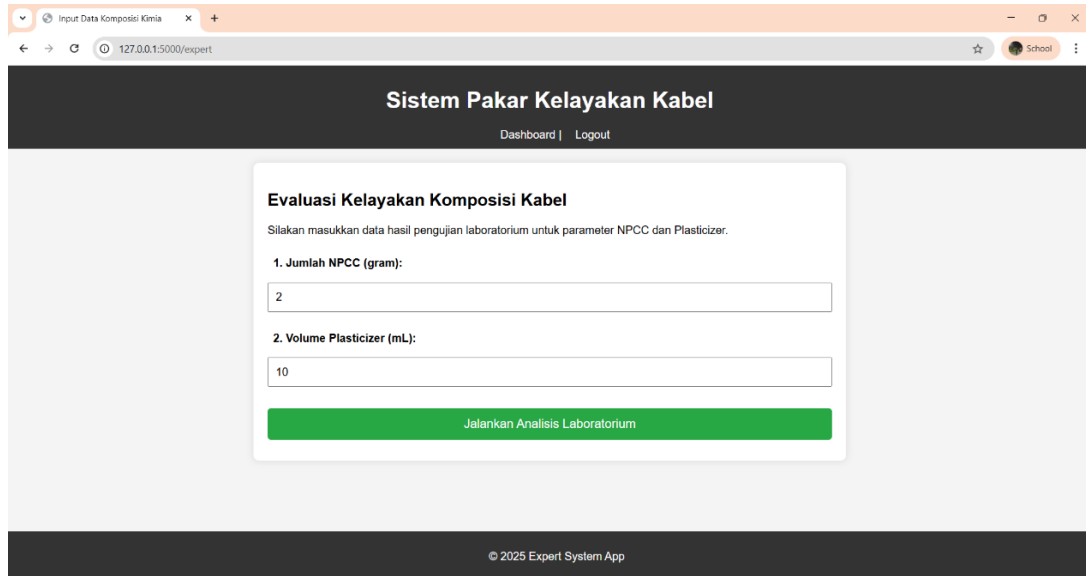
Gambar 6. Tampilan Dashboard Aplikasi

Gambar 6 merupakan tampilan dashboard dari aplikasi setelah pengguna berhasil login. Pada dashboard ini pengguna dapat langsung memulai evaluasi kelayakan isolator kabel.



Gambar 7. Tampilan Form Evaluasi Kelayakan Komposisi Kabel

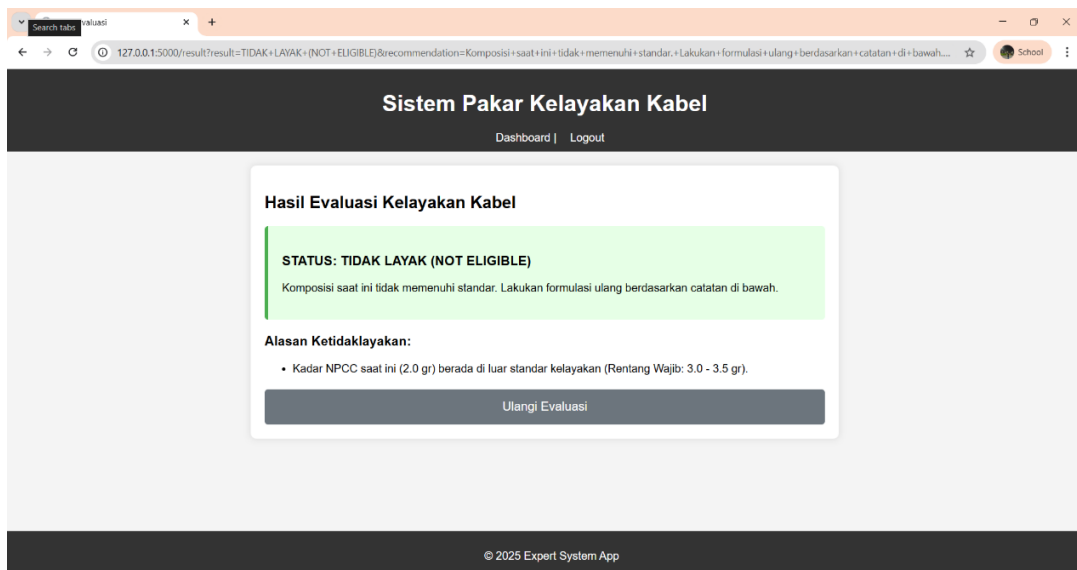
Gambar 7 merupakan tampilan form evaluasi kelayakan komposisi kabel dimana pengguna dapat memasukkan jumlah NPCC dan volume plasticizer yang digunakan dalam sampel penelitian. Setelah itu pengguna dapat menjalankan analisis yang nantinya aplikasi menampilkan kelayakan sesuai parameter yang telah ditetapkan.



The screenshot shows a web browser window with the URL '127.0.0.1:5000/expert'. The page title is 'Sistem Pakar Kelayakan Kabel'. Below the title, there are links for 'Dashboard' and 'Logout'. The main content area is titled 'Evaluasi Kelayakan Komposisi Kabel'. It contains a text prompt: 'Silakan masukkan data hasil pengujian laboratorium untuk parameter NPCC dan Plasticizer.' Below this, there are two numbered input fields: '1. Jumlah NPCC (gram):' with the value '2' and '2. Volume Plasticizer (mL):' with the value '10'. At the bottom of the form is a green button labeled 'Jalankan Analisis Laboratorium'. The footer of the page reads '© 2025 Expert System App'.

Gambar 8. Inputan Jumlah NPCC & Plasticizer

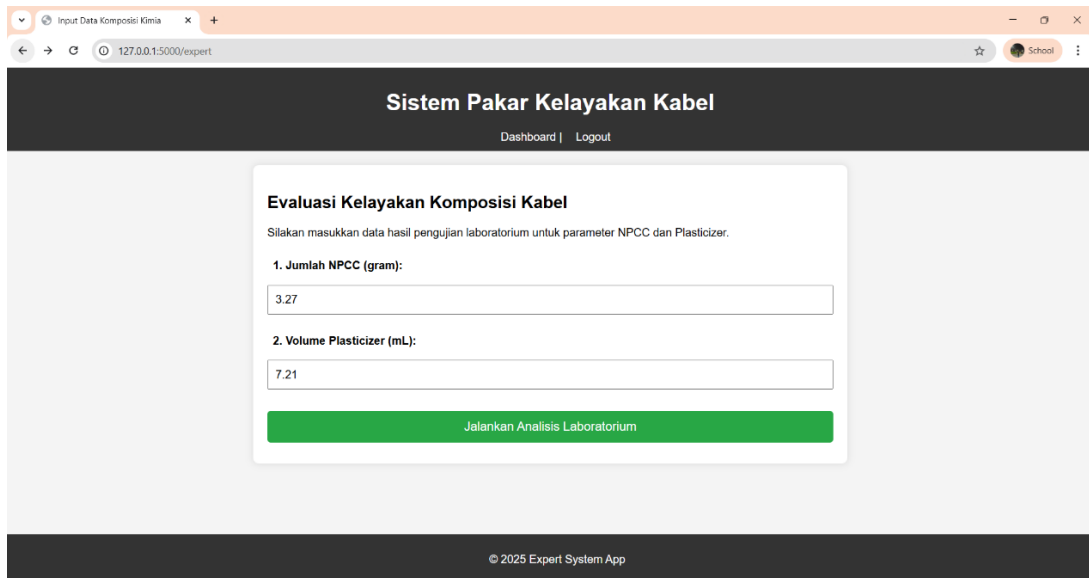
Gambar 8 merupakan inputan jumlah NPCC sebanyak 2 gram dan volume plasticizer 10 mL. Setelah itu pengguna dapat menjalankan analisis kelayakan maka aplikasi akan menampilkan hasilnya.



The screenshot shows the same web browser window, but now displaying the evaluation result. The page title is 'Sistem Pakar Kelayakan Kabel'. Below the title, there are links for 'Dashboard' and 'Logout'. The main content area is titled 'Hasil Evaluasi Kelayakan Kabel'. It contains a green box with the text: 'STATUS: TIDAK LAYAK (NOT ELIGIBLE)'. Below this, there is a text prompt: 'Komposisi saat ini tidak memenuhi standar. Lakukan formulasi ulang berdasarkan catatan di bawah.' Below this, there is a section titled 'Alasan Ketidaklayakan:' with a bullet point: 'Kadar NPCC saat ini (2.0 gr) berada di luar standar kelayakan (Rentang Wajib: 3.0 - 3.5 gr)'. At the bottom of the result box is a button labeled 'Ulangi Evaluasi'. The footer of the page reads '© 2025 Expert System App'.

Gambar 9. Hasil kelayakan komposisi kabel

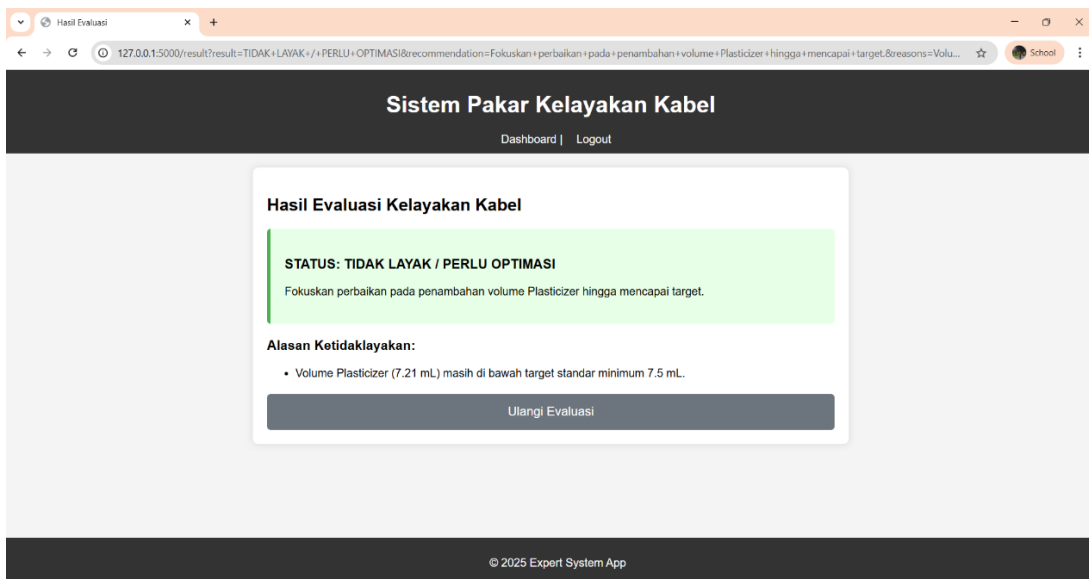
Gambar 9 merupakan hasil kelayakan komposisi kabel berdasarkan inputan jumlah NPCC 2 gram dan volume plasticizer sebanyak 10 mL didapatkan hasil tidak layak karena jumlah NPCC berada di luar standart parameter yang telah ditentukan.



The screenshot shows a web browser window with the URL '127.0.0.1:5000/expert'. The page title is 'Sistem Pakar Kelayakan Kabel'. Below the title, there are links for 'Dashboard' and 'Logout'. The main content area is titled 'Evaluasi Kelayakan Komposisi Kabel'. It contains a sub-header 'Evaluasi Kelayakan Komposisi Kabel' and a paragraph: 'Silakan masukkan data hasil pengujian laboratorium untuk parameter NPCC dan Plasticizer.' There are two input fields: '1. Jumlah NPCC (gram):' with the value '3.27' and '2. Volume Plasticizer (mL):' with the value '7.21'. A green button labeled 'Jalankan Analisis Laboratorium' is at the bottom of the form. The footer of the page says '© 2025 Expert System App'.

Gambar 10. Inputan jumlah NPCC & plasticizer

Gambar 10 merupakan inputan jumlah NPCC sebanyak 3,27 gram dan volume plasticizer 7,21 mL. Setelah itu pengguna dapat menjalankan analisis kelayakan maka aplikasi akan menampilkan hasilnya.



The screenshot shows the same web browser window, but the URL is '127.0.0.1:5000/result?result=TIDAK+LAYAK+PERLU+OPTIMASI&recommendation=Fokuskan+perbaikan+pada+penambahan+volume+Plasticizer+hingga+mencapai+target.&reasons=Volu...'. The page title is 'Sistem Pakar Kelayakan Kabel'. Below the title, there are links for 'Dashboard' and 'Logout'. The main content area is titled 'Hasil Evaluasi Kelayakan Kabel'. It contains a green box with the text: 'STATUS: TIDAK LAYAK / PERLU OPTIMASI' and 'Fokuskan perbaikan pada penambahan volume Plasticizer hingga mencapai target.' Below this, there is a section 'Alasan Ketidaklayakan:' with a bullet point: 'Volume Plasticizer (7.21 mL) masih di bawah target standar minimum 7.5 mL.' A grey button labeled 'Ulangi Evaluasi' is at the bottom of the form. The footer of the page says '© 2025 Expert System App'.

Gambar 11. Hasil kelayakan komposisi kabel

Gambar 11 merupakan hasil kelayakan komposisi kabel berdasarkan inputan jumlah NPCC 3,27 gram dan volume plasticizer sebanyak 7,21 mL didapatkan hasil perlu optimasi karena jumlah secara jumlah NPCC sudah berada dalam rentang 3-3,5 gram sedangkan volume plasticizer masih di bawah standart parameter yang telah ditetapkan.

The screenshot shows a web browser window with the URL '127.0.0.1:5000/expert'. The page title is 'Sistem Pakar Kelayakan Kabel' with a 'Dashboard | Logout' link. The main content area is titled 'Evaluasi Kelayakan Komposisi Kabel' and contains the following text: 'Silakan masukkan data hasil pengujian laboratorium untuk parameter NPCC dan Plasticizer.' Below this, there are two numbered input fields: '1. Jumlah NPCC (gram):' with the value '3,27' and '2. Volume Plasticizer (mL):' with the value '8,72'. A green button labeled 'Jalankan Analisis Laboratorium' is positioned below the input fields. The footer of the page reads '© 2025 Expert System App'.

Gambar 12 Inputan jumlah NPCC & plasticizer

Gambar 12 merupakan inputan jumlah NPCC sebanyak 3,27 gram dan volume plasticizer 8,72 mL. Setelah itu pengguna dapat menjalankan analisis kelayakan maka aplikasi akan menampilkan hasilnya.

The screenshot shows the same web browser window, but the URL is '127.0.0.1:5000/result?result=LAYAK+(OPTIMAL)&recommendation=Komposisi+campuran+sudah+memenuhi+semua+standar+parameter+kimia.+Siap+untuk+tahap+selanjutnya.&reasons='. The page title is 'Sistem Pakar Kelayakan Kabel' with a 'Dashboard | Logout' link. The main content area is titled 'Hasil Evaluasi Kelayakan Kabel' and features a green box with the text: 'STATUS: LAYAK (OPTIMAL)' and 'Komposisi campuran sudah memenuhi semua standar parameter kimia. Siap untuk tahap selanjutnya.' Below this, there is a grey button labeled 'Ulangi Evaluasi'. The footer of the page reads '© 2025 Expert System App'.

Gambar 13 Hasil kelayakan komposisi kabel

Gambar 13 merupakan hasil kelayakan komposisi kabel berdasarkan inputan jumlah NPCC 3,27 gram dan volume plasticizer sebanyak 8,72 mL didapatkan hasil bahwa sampel penelitian telah layak & sesuai dengan parameter yang telah ditetapkan.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem pakar berbasis rule-based reasoning untuk mengevaluasi kelayakan isolator kabel berbahan PVC daur ulang dengan penambahan Nano Precipitated Calcium Carbonate (NPCC) dan plasticizer berdasarkan data uji laboratorium. Tujuan penelitian untuk menghasilkan mekanisme evaluasi yang objektif, cepat, dan konsisten

Aina Afrina Fairuziya (A Rule-Based Expert System for Evaluating the Performance of Recycled PVC Cable Insulators with NPCC and Plasticizer Additives)

terhadap kelayakan material isolator kabel telah tercapai melalui integrasi parameter mekanik dan kelistrikan ke dalam aturan keputusan sistem pakar.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa dari tiga sampel yang diteliti, sampel 3 memiliki karakteristik mekanik yang paling mendekati produk pasaran khususnya pada parameter elongasi dan persentase elongasi sehingga dapat dikategorikan sebagai sampel yang paling berhasil. Komposisi NPCC dan plasticizer pada sampel 3 selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam perumusan knowledge base dan aturan evaluasi pada sistem pakar untuk menentukan kategori kelayakan material, yaitu Layak, Perlu Optimasi, dan Tidak Layak.

Keunggulan penelitian ini dibandingkan penelitian sebelumnya terletak pada penerapan sistem pakar sebagai alat bantu evaluasi material komposit PVC daur ulang, yang tidak hanya mengandalkan analisis eksperimental konvensional tetapi juga mampu mengintegrasikan berbagai parameter uji menjadi keputusan kelayakan yang praktis dan mudah diinterpretasikan. Pendekatan ini mengurangi subjektivitas dalam penilaian serta memungkinkan proses evaluasi dilakukan secara lebih terstandar meskipun jumlah sampel yang tersedia terbatas.

Sistem ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menambahkan parameter uji lain seperti sifat termal dan karakteristik dielektrik yang lebih komprehensif, serta dengan memperluas jumlah sampel untuk meningkatkan tingkat akurasi dan generalisasi sistem. Selain itu, metode *rule-based* ini dapat dikombinasikan dengan pendekatan kecerdasan buatan lain, seperti machine learning atau fuzzy logic, guna menghasilkan sistem evaluasi material isolator kabel yang lebih adaptif dan presisi. Dengan demikian, penelitian ini berpotensi diterapkan sebagai alat bantu pengambilan keputusan dalam pengembangan material isolasi ramah lingkungan bagi laboratorium, industri kabel, dan penelitian lanjutan di bidang material polimer daur ulang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Sumiyati *et al.*, "Konsep Dasar Transmisi Tenaga Listrik : Klasifikasi , Komponen Serta Gangguannya," vol. 11, no. 2, pp. 612–617, 2024, doi: 10.37859/jst.v12i1.8195.
- [2] K. Lewandowski, "A Brief Review of Poly(Vinyl Chloride) (PVC) Recycling," 2022, doi: 10.3390/polym14153035.
- [3] Z. Ait-touchente *et al.*, "Recent advances in polyvinyl chloride (PVC) recycling," 2024, doi: 10.1002/pat.6228.
- [4] M. Rohmatullah, A. P. Bayuseno, and R. Ismail, "PENGARUH PENGGUNAAN NANO PRECIPITATED CALCIUM CARBONATE (NPCC) HASIL EKSTRAKSI ASPAL BUTON MELALUI METODE SINTESIS HYDROTHERMAL SEBAGAI FILLER KOMPOSIT POLIVINIL KLOORIDA (PVC)," vol. 12, no. 2, pp. 117–122, 2024.
- [5] M. R. Syaifulah, F. L. Aditia, B. K. Putra, A. Afrina, A. Subakti, and I. S. Ingsih, "STUDI KUAT TARIK DAN ELASTISITAS KOMPOSIT PVC-NPCC-PLASTIZER ALTERNATIF ISOLATOR KABEL," vol. 15, no. 1, pp. 333–340, 2025.
- [6] Z. Eslami, S. Elkoun, M. Robert, and K. Adjall, "A Review of the Effect of Plasticizers on the Physical and Mechanical Properties of Alginate-Based Films," 2023.
- [7] A. Said, M. . Abdallah, A. G. Nawar, A. E. Elsayed, and S. Kamel, "Enhancing the electrical and physical nature of high- voltage XLPE cable dielectric using different nanoparticles,"

- J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 33, no. 10, pp. 7435–7443, 2022, doi: 10.1007/s10854-022-07868-9.
- [8] Q. Wang, J. Che, and W. Wu, “Contributing Factors of Dielectric Properties for Polymer Matrix Composites,” 2023, doi: 10.3390/polym15030590.
- [9] A. Gogo and M. Bayquni, “KARAKTERISASI STRUKTUR DAN GUGUS FUNGSI MATERIAL INSULASI KABEL LISTRIK TEGANGAN RENDAH DARI PRODUK LOKAL PASCA IRADIASI GAMMA,” vol. 28, no. 2, pp. 79–88, 2022, doi: 10.17146/urania.2022.28.2.6615.
- [10] G. Omosa and F. Mwema, “Matrix-phase material selection for shape memory polymer composites : A comparative analysis of multi-criteria decision-making,” no. April, pp. 3363–3378, 2024, doi: 10.1002/pen.26775.
- [11] Darmansah, I. Chairuddin, and T. N. Putra, “Perancangan Sistem Pakar Jenis Kepribadian Menggunakan Metode Forward Chaining Berbasis Web,” vol. 8, no. 3, pp. 1200–1213, 2021.
- [12] A. Nurjumala, N. A. Prasetyo, and H. W. Utomo, “Sistem Pakar Diagnosis Penyakit Rhinitis Menggunakan Metode Forward Chaining Berbasis Web,” vol. 9, no. 1, pp. 69–78, 2022, doi: 10.30865/jurikom.v9i1.3815.
- [13] Melyani, F. Roni, A. J. Wahidin, F. Yusuf, A. Sudrajat, and D. I. Sari, “The Expert System Application to Diagnose Computer Damage Using UML Model (Unified Modeling Language),” vol. 3, no. 3, pp. 401–413, 2024.
- [14] W. Noviandi, J. Husna, and Y. A. Safitri, “Sistem Pakar untuk Studi Kelayakan Bisnis Menggunakan Metode Forward Chaining Berbasis Website,” vol. 3, no. 1, pp. 11–16, 2021.
- [15] N. Susanto, Junadhi, H. Yenni, and M. Jamaris, “Sistem Pakar Kelayakan Perizinan pada Dinas Penanaman Modal dan Pelayanan Terpadu Satu Pintu Menggunakan Metode Forward Chaining,” vol. 6, no. 4, 2022.