

Analisis Pengaruh Parameter Operasi terhadap Partial Discharge pada Generator Sinkron PT PLN MCTN Menggunakan Metode Regresi Struktural Berbasis SmartPLS

Hendrik Tanjung* Dhany Harmeidy Barus

Institut Teknologi PLN, Indonesia

Email: Hendrik2410734@itpln.ac.id*, dhany@itpln.ac.id

Keywords:

Synchronous Generator, Partial Discharge, Operating Parameters, SmartPLS, Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM), Multiple Linear Regression, IRIS Power.



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2026 by Author.
Published by
Riviera Publishing

Kata Kunci:

Generator sinkron, *Partial Discharge*, Parameter Operasi, SmartPLS, Regresi Linier Berganda, IRIS Power.

Abstract

Degradation of insulation quality in synchronous generators can be indicated by the occurrence of partial discharge (PD), which may develop into serious insulation failure if not detected early. This study aims to analyze the effect of Operating Parameters on PD in synchronous generators at PT PLN MCTN and evaluate the structural relationship between variables using Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) based on SmartPLS. As a comparison, multiple linear regression using SPSS was employed to examine the consistency of findings. The study adopted a quantitative approach using historical generator operating data and online PD monitoring data from the IRIS Power system. The analysis included evaluation of the measurement model (outer model) and structural model (inner model). The results indicate that the measurement model meets the validity and reliability criteria. Operating Parameters have a positive and significant effect on PD with a path coefficient of 0.345, t-statistic of 2.472, and p-value of 0.013. The R^2 value of 0.119 indicates that Operating Parameters explain 11.9% of the variance in PD. In contrast, multiple linear regression shows a positive but statistically insignificant relationship. These differences are attributed to the distinct characteristics of the two methods, where PLS-SEM analyzes relationships among latent constructs, while multiple linear regression analyzes direct relationships among observed variables. Overall, PLS-SEM is more appropriate for modeling the relationship between Operating Parameters and PD, particularly with limited sample sizes, while multiple linear regression serves as a comparative analysis that strengthens the research findings.

Abstrak

Penurunan kualitas isolasi pada generator sinkron dapat diindikasikan oleh munculnya *partial discharge* (PD), yang berpotensi berkembang menjadi kegagalan isolasi serius jika tidak terdeteksi sejak dini. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh Parameter Operasi terhadap PD pada generator sinkron PT PLN MCTN serta mengevaluasi hubungan struktural antarvariabel menggunakan *Partial Least Squares Structural Equation Modeling* (PLS-SEM) berbasis SmartPLS. Sebagai pembandingan, digunakan regresi linier berganda dengan SPSS untuk menguji konsistensi temuan. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan data historis operasi generator dan data pemantauan *online* PD dari sistem IRIS Power. Analisis mencakup evaluasi model pengukuran (*outer model*) dan model struktural (*inner model*). Hasil menunjukkan bahwa model pengukuran memenuhi kriteria validitas dan reliabilitas. Parameter Operasi berpengaruh positif dan signifikan terhadap PD dengan koefisien jalur 0,345, t-statistik 2,472, dan p-value 0,013. Nilai R^2 sebesar 0,119 menunjukkan bahwa Parameter Operasi menjelaskan 11,9% variasi PD. Sebaliknya, regresi linier berganda menunjukkan hubungan positif namun tidak signifikan secara

statistik. Perbedaan ini disebabkan oleh karakteristik metode, di mana PLS-SEM menganalisis hubungan antar konstruk laten, sedangkan regresi linier berganda menganalisis hubungan langsung antar variabel observasi. Dengan demikian, PLS-SEM lebih sesuai untuk memodelkan hubungan Parameter Operasi terhadap PD, terutama pada sampel terbatas, sedangkan regresi linier berganda berfungsi sebagai analisis pembandingan yang memperkuat temuan penelitian.

PENDAHULUAN

PT PLN MCTN (Mandau Cipta Tenaga Nusantara) merupakan perusahaan yang bergerak di bidang penyediaan energi untuk mendukung kegiatan industri migas di Wilayah Kerja Rokan. Sebagai bagian dari PT PLN (Persero), perusahaan ini berperan dalam menyediakan pasokan listrik dan uap yang dibutuhkan dalam proses produksi minyak bumi. Operasional utamanya berada di fasilitas North Duri Cogeneration yang terletak di Duri, Provinsi Riau. Selain menyediakan tenaga listrik, PT PLN MCTN juga memproduksi uap untuk kebutuhan injeksi sumur minyak. Perusahaan ini memiliki kapasitas pembangkit sebesar 3×100 MW dan mampu menghasilkan sekitar 360.000 steam barrel per day. Dengan kapasitas tersebut, PT PLN MCTN menjadi salah satu pendukung penting dalam menjaga kelangsungan operasional industri migas, khususnya di area Rokan. Di samping itu, perusahaan juga mengembangkan layanan lain seperti pemeliharaan operasional, peningkatan kualitas daya listrik, serta penyediaan fasilitas pendukung untuk kebutuhan industri di Indonesia.

Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) merupakan salah satu jenis pembangkit yang memiliki peran strategis dalam sistem tenaga listrik modern, khususnya sebagai pembangkit dengan respon cepat terhadap perubahan beban. Karakteristik utama PLTG adalah kemampuannya untuk melakukan start-up dan load following dengan waktu yang relatif singkat dibandingkan pembangkit konvensional lainnya. Dalam sistem tenaga yang semakin kompleks akibat penetrasi energi terbarukan dan fluktuasi beban yang tinggi, PLTG sering dioperasikan sebagai pembangkit penyeimbang (balancing plant). Kondisi ini menyebabkan peralatan utama PLTG, khususnya generator sinkron, mengalami variasi parameter operasi yang signifikan dan berulang sepanjang siklus operasinya. Generator sinkron pada PLTG berfungsi mengubah energi mekanik dari turbin gas menjadi energi listrik dengan tingkat tegangan menengah hingga tinggi. Keandalan generator sinkron menjadi faktor krusial dalam menjamin kontinuitas pasokan energi listrik. Gangguan atau kegagalan pada generator tidak hanya berdampak pada unit pembangkit itu sendiri, tetapi juga dapat memengaruhi stabilitas sistem tenaga secara keseluruhan. Salah satu penyebab utama kegagalan generator sinkron yang paling sering dilaporkan adalah degradasi sistem isolasi belitan stator, yang umumnya berkembang secara gradual dan sulit terdeteksi pada tahap awal (Stone, 2004).

Sistem isolasi stator generator sinkron dirancang untuk menahan tegangan listrik, termal, dan mekanik selama proses operasi. Namun, pada pembangkit listrik tenaga gas (PLTG), generator bekerja dengan kondisi operasi yang dinamis sehingga daya aktif, daya reaktif, tegangan keluaran, dan pembebanan terus berubah mengikuti kebutuhan sistem. Perubahan parameter operasi tersebut memengaruhi distribusi medan listrik dan temperatur pada isolasi stator. Salah satu indikasi awal terjadinya penurunan kualitas isolasi adalah munculnya Partial Discharge (PD), yaitu pelepasan muatan listrik lokal pada sistem isolasi tanpa menyebabkan hubung singkat penuh (IEC 60270). Walaupun energi yang dilepaskan relatif kecil, aktivitas PD

yang terjadi secara berulang dapat menyebabkan degradasi isolasi hingga berpotensi menimbulkan kegagalan generator.

Pada generator sinkron PLTG, Partial Discharge umumnya terjadi pada slot stator, antarmuka konduktor dengan isolasi utama, serta daerah ujung belitan (end-winding). Bagian end-winding menjadi lokasi yang paling rentan karena memiliki distribusi medan listrik yang tidak merata serta dipengaruhi oleh temperatur dan getaran mekanik selama operasi. Peningkatan daya aktif akan meningkatkan arus stator sehingga temperatur konduktor dan isolasi ikut meningkat, sedangkan perubahan daya reaktif dan tegangan keluaran dapat mengubah distribusi medan listrik di dalam generator. Kombinasi kondisi tersebut memperbesar kemungkinan terjadinya Partial Discharge dan mempercepat proses penuaan isolasi, terutama pada generator yang beroperasi secara dinamis.

Pemantauan Partial Discharge secara tradisional dilakukan dalam kondisi off-line, namun metode ini belum sepenuhnya menggambarkan kondisi operasi generator yang sebenarnya. Oleh karena itu, pengukuran Partial Discharge secara on-line mulai banyak diterapkan sebagai bagian dari strategi condition-based maintenance. Meskipun demikian, pengukuran on-line memiliki tantangan berupa gangguan (noise) dari sistem eksitasi, peralatan listrik, maupun lingkungan elektromagnetik pembangkit. Kondisi tersebut menyebabkan hasil pengukuran Partial Discharge perlu dianalisis dengan mempertimbangkan parameter operasi generator agar dapat dibedakan antara peningkatan aktivitas PD yang normal akibat perubahan operasi dan yang disebabkan oleh degradasi isolasi.

Berbagai penelitian sebelumnya telah membahas Partial Discharge pada generator sinkron. Soewono, (2022) menggunakan pemantauan Partial Discharge secara on-line untuk mendeteksi dini kerusakan isolasi stator berdasarkan tren peningkatan aktivitas (PD. Widodo et al., 2020) menerapkan regresi linier untuk menganalisis hubungan antara aktivitas Partial Discharge dan usia isolasi generator, sedangkan (Mahardika & Prayogo, 2025) mengembangkan sistem peringatan dini yang menggabungkan data Partial Discharge dengan parameter operasi generator secara real-time. Meskipun demikian, penelitian yang mengkaji hubungan parameter operasi terhadap Partial Discharge menggunakan pendekatan regresi struktural berbasis SmartPLS masih sangat terbatas.

Kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan PLS-SEM untuk memodelkan hubungan antar konstruk laten secara simultan, yang mengatasi keterbatasan regresi linier berganda yang hanya menganalisis hubungan parsial antarvariabel observasi. Penelitian ini juga memperkenalkan konstruk laten "Parameter Operasi" sebagai representasi terintegrasi dari daya reaktif, tegangan keluaran, dan pembebanan generator, yang memberikan pemahaman lebih utuh mengenai pengaruh kondisi operasi terhadap *partial discharge* dibandingkan studi sebelumnya yang masih menganalisis parameter secara terpisah. Selain itu, penelitian ini memberikan kontribusi metodologis melalui perbandingan PLS-SEM dan regresi linier berganda, yang menegaskan bahwa PLS-SEM lebih sesuai untuk memodelkan hubungan struktural pada penelitian dengan sampel terbatas.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini mengangkat judul "Analisis Pengaruh Parameter Operasi terhadap Partial Discharge pada Generator Sinkron PT PLN MCTN Menggunakan Metode Regresi Struktural Berbasis SmartPLS." Penelitian bertujuan menganalisis pengaruh Parameter Operasi terhadap Partial Discharge, mengidentifikasi kontribusi daya aktif, daya reaktif, tegangan keluaran, dan pembebanan generator dalam

membentuk konstruk Parameter Operasi, serta membangun model struktural hubungan antarvariabel menggunakan SmartPLS. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi bagi pengembangan ilmu pengetahuan, mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan generator di PT PLN MCTN, serta memberikan masukan bagi praktisi, peneliti, dan pengembangan sistem pemeliharaan berbasis kondisi (condition-based maintenance) pada pembangkit listrik.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode *Partial Least Square Structural Equation Modeling* (PLS-SEM) berbantuan SmartPLS sebagai alat analisis utama untuk menguji pengaruh parameter operasi generator terhadap *Partial Discharge*. Metode ini dipilih karena mampu menganalisis hubungan antar variabel laten pada data dengan jumlah sampel terbatas dan distribusi yang tidak selalu normal, serta bersifat eksplanatori untuk menjelaskan hubungan sebab-akibat antar variabel. Penelitian dilaksanakan pada generator sinkron PLTG Unit 2 PT PLN MCTN yang berlokasi di Duri, Kabupaten Bengkalis, Provinsi Riau, selama lima bulan (Februari–Juni 2026), meliputi studi pustaka, observasi, pengumpulan data, pengolahan data menggunakan PDLitePro, analisis dengan SmartPLS dan SPSS, serta penyusunan laporan penelitian. Data dikumpulkan melalui observasi langsung terhadap kondisi operasi generator dan sistem *On-line Partial Discharge Monitoring*. Data parameter operasi diperoleh dari *logsheet* operasi, SCADA, histori monitoring, dan dokumen pemeliharaan, sedangkan data *Partial Discharge* diperoleh menggunakan perangkat IRIS Power *Portable Partial Discharge Analyzer* yang melakukan pengukuran secara *online* tanpa menghentikan operasi generator, sesuai prosedur standar pengukuran menggunakan perangkat PDLitePro.

Analisis data utama dilakukan menggunakan SmartPLS melalui evaluasi model pengukuran (*outer model*) yang meliputi uji validitas konvergen, validitas diskriminan, reliabilitas konstruk, dan uji multikolinearitas, serta evaluasi model struktural (*inner model*) melalui uji koefisien determinasi (R^2), ukuran efek (f^2), relevansi prediktif (Q^2), dan pengujian hipotesis menggunakan *bootstrapping*. Variabel independen dalam penelitian ini adalah Parameter Operasi yang terdiri atas daya aktif, daya reaktif, tegangan keluaran, dan pembebanan generator, sedangkan variabel dependennya adalah nilai *Partial Discharge* pada tiga titik pengukuran. Sebagai metode pembanding, penelitian juga menerapkan analisis regresi linier berganda dengan IBM SPSS Statistics melalui uji statistik deskriptif, uji asumsi klasik, uji F, uji t, dan koefisien determinasi untuk menguji konsistensi hasil dan memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara Parameter Operasi dan *Partial Discharge*.

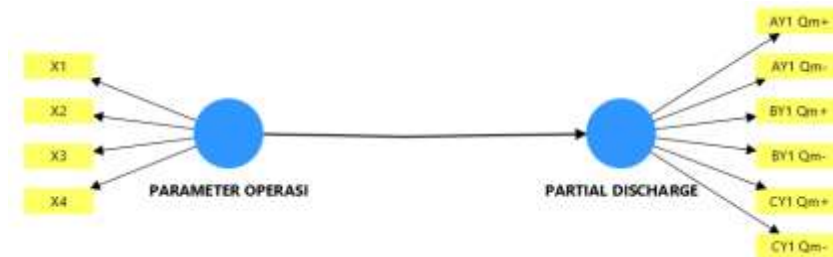
HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji Model Pengukuran (Outer model)

Pengujian model pengukuran (*outer model*) bertujuan untuk mengevaluasi kualitas hubungan antara variabel laten dengan indikator-indikator penyusunnya. Pada penelitian ini, model pengukuran terdiri atas satu variabel independen, yaitu Parameter Operasi, yang diukur menggunakan empat indikator, yaitu daya aktif (X1), daya reaktif (X2), tegangan keluaran (X3), dan pembebanan generator (X4). Sedangkan variabel dependen adalah pada fasa A Qm+

(AY1 Qm+), fasa A Qm- (AY1 Qm-), fasa B Qm+ (BY1 Qm+), fasa B Qm- (BY1 Qm-), fasa C Qm+ (CY1 Qm+) dan fasa C Qm- (CY1 Qm-).

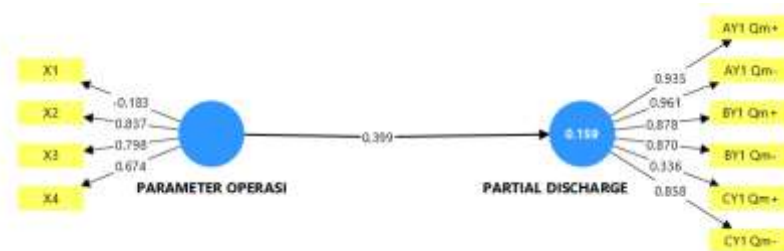
Evaluasi *outer model* dilakukan untuk memastikan bahwa setiap indikator mampu merepresentasikan variabel laten yang diukurnya. Pengujian dilakukan melalui analisis *convergen validity*, *construct reliability and validity*, *discriminant validity*. Kemudian dianalisis dengan menggunakan aplikasi SmartPLS 4.



Gambar 1. Model Penelitian

Sumber: Hasil analisis peneliti, 2026

Model penelitian merupakan gambaran konseptual mengenai hubungan antar variabel yang akan dianalisis dalam penelitian. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh parameter operasi generator terhadap aktivitas *partial discharge* (PD) pada generator sinkron PT PLN MCTN menggunakan metode Structural Equation Modeling–Partial Least Squares (SEM-PLS).

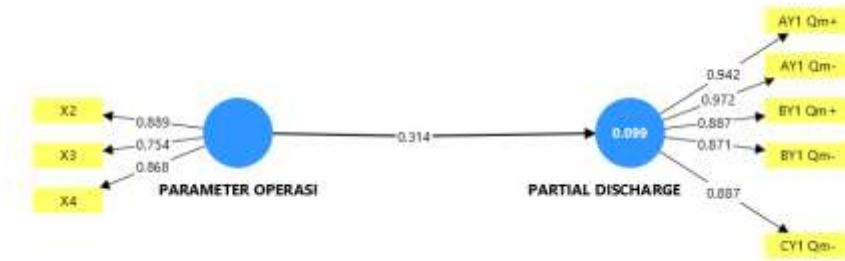


Gambar 2. Diagram Jalur (Path) dan Nilai Faktor Loading awal

Sumber: Hasil analisis SmartPLS, 2026

Pada Gambar 2 terlihat hasil evaluasi model pengukuran (*outer model*) menunjukkan bahwa masih terdapat beberapa indikator yang memiliki nilai *outer loading* di bawah batas yang direkomendasikan, yaitu 0,70. Menurut Hair et al. (2022), indikator dengan nilai *outer loading* di atas 0,70 menunjukkan bahwa indikator tersebut mampu menjelaskan lebih dari 50% varians konstruk yang diukur. Sebaliknya, indikator yang memiliki nilai *outer loading* di bawah 0,70 menunjukkan kontribusi yang relatif rendah terhadap pembentukan konstruk.

Untuk memperbaiki evaluasi model pengukuran maka dilakukan drop pada indikator variabel. Sehingga didapatkan diagram jalur (Path) dan nilai faktor loading seperti pada gambar 3.



Gambar 3. Diagram Jalur (Path) dan Nilai Faktor Loading
Sumber: Hasil analisis SmartPLS, 2026

Collinearity Statistic (VIF)

Sebelum dilakukan pengujian hubungan antar konstruk, model pengukuran perlu dievaluasi untuk memastikan tidak terjadi multikolinearitas yang tinggi antar indikator. Pengujian tersebut dilakukan menggunakan nilai Variance Inflation Factor (VIF). VIF merupakan ukuran yang menunjukkan seberapa besar suatu indikator memiliki hubungan linear dengan indikator lainnya dalam konstruk yang sama. Apabila nilai VIF terlalu tinggi, berarti terdapat indikator yang membawa informasi yang hampir sama sehingga dapat menyebabkan ketidakstabilan dalam proses estimasi model.

Tabel 1. Uji Collinearity Statistic (VIF)

Collinearity Statistic (VIF)	
	VIF
AY1 Qm+	21,673
AY1 Qm-	18,745
BY1 QM+	5,212
BY1 QM-	14,339
CY1 Qm-	5,199
X2	5,025
X3	1,192

Sumber: Hasil analisis SmartPLS, 2026

Batas nilai VIF yang digunakan mengacu pada rekomendasi Hair et al. (2022), yaitu $VIF \leq 5$ dan beberapa peneliti juga menyebutkan nilai $VIF < 10$ masih memenuhi kriteria. Nilai VIF di bawah 5 menunjukkan bahwa tidak terdapat masalah multikolinearitas yang berarti, sedangkan nilai VIF di atas 5 mengindikasikan adanya hubungan yang sangat kuat antar indikator sehingga perlu dilakukan evaluasi terhadap model pengukuran. Berdasarkan hasil pada Gambar 4.4 terlihat bahwa beberapa indikator masih memiliki nilai VIF yang cukup tinggi. Nilai VIF terbesar terdapat pada indikator AY1 Qm+ sebesar 21,673 dan AY1 Qm- sebesar 18,745. Selain itu, indikator BY1 Qm+, BY1 Qm-, CY1 Qm-, dan X2 juga memiliki nilai VIF yang berada di atas batas yang direkomendasikan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa terdapat hubungan yang sangat kuat antar beberapa indikator sehingga perlu dilakukan penyempurnaan model.

Selanjutnya dilakukan evaluasi terhadap indikator-indikator yang memiliki nilai VIF tinggi dengan mempertimbangkan hasil outer loading, validitas konstruk, serta keterwakilan setiap fasa partial discharge. Dari proses evaluasi tersebut diperoleh model yang lebih sederhana dengan mempertahankan indikator yang memiliki kemampuan representatif paling baik terhadap masing-masing konstruk.

Tabel 2. Evaluasi Uji Uji Collinearity Statistic (VIF)

Collinearity Statistic (VIF)	
	VIF
AY1 Qm+	2,982
BY1 QM+	4,771
CY1 Qm-	4,871
X2	5,025
X3	1,192
X4	4,973

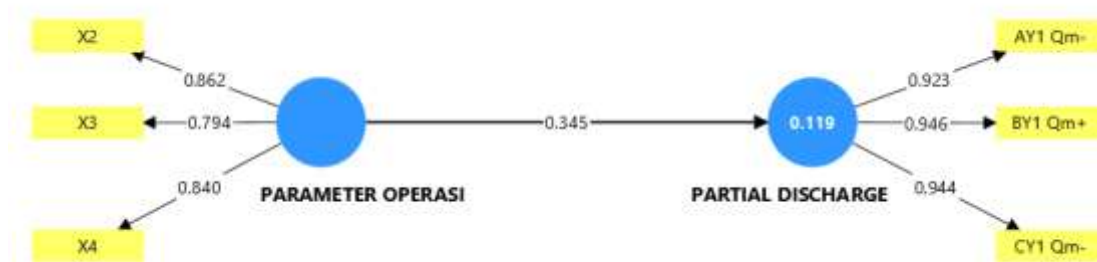
Sumber: Hasil analisis SmartPLS, 2026

Tabel 2 menunjukkan bahwa nilai VIF pada konstruk Partial Discharge mengalami penurunan yang cukup signifikan dibandingkan model awal. Seluruh indikator partial discharge telah memiliki nilai VIF di bawah batas maksimum sehingga tidak lagi menunjukkan adanya multikolinearitas yang mengganggu proses estimasi model. Pada konstruk Parameter Operasi, indikator X3 dan X4 juga memenuhi kriteria, sedangkan nilai VIF X2 berada sangat dekat dengan batas maksimum (5,025). Akan tetapi beberapa peneliti juga menyampaikan VIF <10 masih memenuhi kriteria. Nilai tersebut masih dapat diterima karena selisihnya sangat kecil dan indikator daya reaktif memiliki dasar teoritis yang kuat sebagai parameter operasi generator.

Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa model akhir telah memenuhi kriteria uji multikolinearitas sehingga layak digunakan untuk tahap analisis berikutnya, yaitu pengujian validitas, reliabilitas, dan hubungan struktural antar konstruk menggunakan SmartPLS.

Evaluasi Uji Model Pengukuran (Outer model)

Setelah dilakukan evaluasi dengan penghapusan indikator dengan mempertimbangkan outer loading, validitas konvergen, reliabilitas konstruk, dan collinearity, maka didapatkan diagram jalur (Path) dan nilai faktor loading seperti pada gambar 4.4.

**Gambar 4.** Evaluasi Diagram Jalur (Path) dan Nilai Faktor Loading

Sumber: Hasil analisis SmartPLS, 2026

Tabel 3. Hasil Pengujian Outer Model

Latent Variabel	Indikator	outer loading >0.7	Crombach's alpha 0.7-0.9	Composite Relebiality >0.7	AVE >0.5
Parameter Operasi (X)	X2	0,862	0,791	0,814	0,693
	X3	0,794			
	X4	0,840			

Partial Discharge (Y)	AY1 QM-	0,923	0,931	0,935	0,879
	BY1 QM+	0,946			
	CY1 QM-	0,944			

Sumber: Hasil analisis SmartPLS, 2026

Hasil Uji Outer Loading

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh indikator memiliki nilai outer loading di atas 0,70, yaitu X2 sebesar 0,862, X3 sebesar 0,794, X4 sebesar 0,840, AY1 QM- sebesar 0,923, BY1 QM+ sebesar 0,946 dan CY1 QM- sebesar 0,944. Nilai tersebut menunjukkan bahwa setiap indikator memiliki hubungan yang sangat kuat dengan konstruk yang diukur. Dengan demikian, seluruh indikator memenuhi kriteria validitas konvergen dan dinyatakan valid sebagai pengukur variabel laten.

Hasil Uji Average Variance Extracted (AVE)

Nilai AVE untuk Parameter Operasi sebesar 0,693, sedangkan untuk Partial Discharge sebesar 0,879. Kedua nilai tersebut lebih besar dari 0,50, yang menunjukkan bahwa masing-masing konstruk mampu menjelaskan lebih dari 50% varians indikator-indikatornya. Dengan demikian, persyaratan validitas konvergen berdasarkan nilai AVE telah terpenuhi.

Hasil Uji Cronbach's Alpha

Nilai Cronbach's Alpha pada variabel Parameter Operasi sebesar 0,791, sedangkan pada variabel Partial Discharge sebesar 0,931. Kedua nilai tersebut berada pada rentang 0,70–0,95, sehingga menunjukkan bahwa masing-masing konstruk memiliki tingkat konsistensi internal yang sangat baik.

Hasil Uji Composite Reliability

nilai Composite Reliability untuk Parameter Operasi sebesar 0,814 dan Partial Discharge sebesar 0,935. Karena kedua nilai melebihi batas minimum 0,70, maka dapat disimpulkan bahwa indikator-indikator pada masing-masing konstruk mampu mengukur variabel laten secara konsisten dan reliabel.

Hasil Uji Validitas Diskriminan

Validitas diskriminan bertujuan untuk memastikan bahwa setiap konstruk dalam model penelitian memiliki karakteristik yang berbeda sehingga masing-masing konstruk mengukur konsep yang berbeda. Pada penelitian ini, pengujian validitas diskriminan dilakukan menggunakan metode Heterotrait-Monotrait Ratio (HTMT). Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai HTMT antara variabel Parameter Operasi dan Partial Discharge adalah sebesar 0,368. Nilai tersebut berada jauh di bawah batas maksimum 0,90, bahkan juga memenuhi kriteria yang lebih ketat yaitu 0,85. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kedua konstruk memiliki validitas diskriminan yang sangat baik. Nilai HTMT yang rendah menunjukkan bahwa indikator-indikator pada variabel Parameter Operasi tidak mengukur konsep yang sama dengan indikator-indikator pada variabel Partial Discharge. Dengan kata lain, kedua variabel laten memiliki tingkat diskriminasi yang memadai sehingga masing-masing mampu merepresentasikan konstruk yang berbeda sesuai dengan konsep penelitian.

Uji Model Struktural (Inner Model)

Uji model struktural (*inner model*) bertujuan untuk mengevaluasi hubungan kausal antara variabel laten dalam model penelitian. Pada penelitian ini, model struktural digunakan untuk

menganalisis pengaruh Parameter Operasi, yang terdiri atas indikator daya reaktif dan pembebanan generator, terhadap Partial Discharge. Evaluasi model struktural dilakukan melalui pengujian nilai koefisien determinasi (R^2), ukuran efek (*Effect Size* atau f^2), relevansi prediktif (Q^2) apabila dilakukan prosedur blindfolding, serta uji signifikansi koefisien jalur (*path coefficient*) menggunakan metode *bootstrapping*.

Hasil Uji R Square (R^2)

Koefisien determinasi (*R-Square*) digunakan untuk mengetahui seberapa besar kemampuan variabel independen dalam menjelaskan variasi variabel dependen. Dalam penelitian ini, variabel independen terdiri atas daya reaktif, tegangan dan pembebanan generator, sedangkan variabel dependen adalah Partial Discharge. Berdasarkan hasil analisis menggunakan SmartPLS, diperoleh nilai R-Square sebesar 0,119 pada variabel *Partial Discharge*. Nilai tersebut menunjukkan bahwa 11,9% variasi aktivitas *Partial Discharge* dapat dijelaskan oleh variabel daya reaktif, tegangan dan pembebanan generator, sedangkan 88,1% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain yang tidak dimasukkan dalam model penelitian. Selain itu, nilai Adjusted R-Square sebesar 0,075 menunjukkan bahwa setelah disesuaikan dengan jumlah variabel independen yang digunakan, kemampuan model dalam menjelaskan variasi *Partial Discharge* adalah sebesar 7,5%.

Menurut Hair et al. (2022) nilai $R^2 < 0.25$ tergolong sangat lemah. nilai R^2 sebesar 0,119 menunjukkan bahwa kemampuan model dalam menjelaskan variasi *Partial Discharge* masih relatif rendah. Artinya, pengaruh tersebut nyata secara statistik, tetapi besarnya kontribusi terhadap perubahan *Partial Discharge* hanya sekitar 11,9 %. Dengan kata lain, masih terdapat sekitar 88,1% variasi aktivitas *Partial Discharge* yang dipengaruhi oleh faktor-faktor lain di luar model penelitian.

Hasil Uji Q Square (Q^2)

Q^2 (Q-square) atau Predictive Relevance adalah ukuran dalam SEM-PLS yang digunakan untuk mengetahui kemampuan model dalam memprediksi variabel endogen berdasarkan variabel eksogen. “Nilai Q^2 berada antara 0 dan 1, dan semakin mendekati 1, semakin akurat model tersebut. Mengacu pada (Hair, Jr. et al., 2022), Suatu model dikatakan memiliki relevansi prediktif yang sangat baik jika nilai Q-Square-nya lebih besar dari nol, sedangkan dikatakan memiliki kemampuan prediktif yang tidak memadai jika nilainya kurang dari nol.”

Dari hasil koefisien determinasi (R Square), maka rumus menentukan nilai Q^2 (Predictive Relevance) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Q^2 &= 1 - (1 - R^2) \\ &= 1 - (1 - 0,119) \\ &= 1 - 0,881 \\ &= 0,119 \end{aligned}$$

Nilai $Q^2 = 0,119$ menunjukkan bahwa model memiliki kemampuan prediksi (predictive relevance) karena nilainya lebih besar dari nol, tetapi kemampuan prediksinya tergolong kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa model masih mampu memprediksi variabel Partial Discharge, namun kontribusi variabel daya reaktif, tegangan dan pembebanan generator terhadap kemampuan prediksi tersebut masih terbatas.

Pengaruh Antar Variabel Laten

Pengujian pengaruh antar variabel laten dilakukan untuk mengetahui apakah variabel Parameter Operasi, yang terdiri atas daya reaktif, tegangan dan pembebanan generator, berpengaruh terhadap variabel Partial Discharge. Pengujian dilakukan menggunakan metode *bootstrapping* pada SmartPLS dengan melihat nilai koefisien jalur (*path coefficient*), T Statistics, dan P Values.

Hasil Uji Path coefficient (β) Pengaruh Langsung

Tabel 4. Hasil Uji R Path coefficient (β)

Hubungan antar variabel	Path coefficients	Arah Hubungan
PARAMETER OPERASI -> PARTIAL DISCHARGE	0,345	positif

Sumber: Hasil analisis SmartPLS, 2026

Berdasarkan Tabel 4, diperoleh nilai *path coefficient* (β) sebesar 0,345 pada hubungan antara Parameter Operasi terhadap *Partial Discharge*, yang bertanda positif dan menunjukkan bahwa peningkatan nilai parameter operasi akan diikuti oleh peningkatan aktivitas PD. Dalam penelitian ini, Parameter Operasi direpresentasikan oleh daya reaktif, tegangan keluaran, dan pembebanan generator, sehingga hasil tersebut mengindikasikan bahwa semakin tinggi ketiga parameter tersebut, aktivitas PD pada generator sinkron cenderung meningkat. Hal ini terjadi karena peningkatan daya reaktif memperbesar arus eksitasi dan medan listrik pada isolasi stator, sedangkan peningkatan pembebanan menyebabkan kenaikan arus stator dan temperatur belitan yang mempercepat degradasi material isolasi. Meskipun demikian, nilai koefisien sebesar 0,345 menunjukkan pengaruh yang relatif kecil, yang sejalan dengan nilai R^2 sebesar 0,119, artinya perubahan Parameter Operasi hanya berkontribusi 11,9% terhadap aktivitas PD, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain seperti kondisi isolasi, temperatur belitan stator, tekanan hidrogen, kelembapan, umur isolasi, dan faktor operasional lainnya.

Hasil Uji Hipotesis Pengaruh Langsung (Bootstrapping)

Pengujian hipotesis pengaruh langsung dilakukan menggunakan metode *bootstrapping* pada SmartPLS untuk mengetahui signifikansi hubungan antarvariabel laten dalam model penelitian. Tingkat signifikansi pengaruh ditentukan berdasarkan nilai t-statistics dan p-values yang dihasilkan dari proses *bootstrapping*.

Tabel 5. Hasil Uji Hipotesis Pengaruh Langsung (Bootstrapping)

Original sample (O)	Sample mean (M)	T statistics ($ O/STDEV $)	P values
0,345	0,401	2,472	0,013

Sumber: Hasil analisis SmartPLS, 2026

Berdasarkan Tabel 5, diperoleh nilai Original Sample (β) sebesar 0,345. Nilai tersebut menunjukkan bahwa hubungan antara variabel Parameter Operasi terhadap Partial Discharge memiliki arah hubungan positif. Nilai Sample Mean (M) sebesar 0,401 menunjukkan bahwa rata-rata koefisien jalur hasil proses *bootstrapping* mendekati nilai Original Sample, sehingga estimasi parameter dapat dikatakan relatif stabil. Nilai Standard Deviation (STDEV) sebesar

0,140 menunjukkan bahwa variasi hasil estimasi koefisien jalur dari proses *bootstrapping* relatif kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa hasil estimasi memiliki tingkat penyebaran yang rendah. Selanjutnya, nilai T Statistics sebesar 2,472 lebih besar daripada nilai kritis 1,96, sedangkan nilai P Values sebesar 0,013 lebih kecil dari 0,05. Berdasarkan kriteria pengujian hipotesis, hasil tersebut menunjukkan bahwa pengaruh Parameter Operasi terhadap Partial Discharge adalah signifikan secara statistik.

Metoda Pembandingan Regresi Linear berbasis SPSS

Analisis statistik deskriptif

Tabel 6. statistik deskriptif

	Mean	Std. Deviation	N
AY1 Qm-	130,364	14,670	22
BY1 Qm+	164,000	18,424	22
CY1 Qm-	73,045	11,684	22
X2	7,229	8,805	22
X3	14,282	0,210	22
X4	0,849	0,037	22

Sumber: Hasil analisis SmartPLS, 2026

Sebelum dilakukan analisis regresi linier berganda, terlebih dahulu dilakukan analisis statistik deskriptif terhadap 22 data pengamatan untuk memberikan gambaran karakteristik data, meliputi nilai rata-rata (*mean*) dan simpangan baku (*standard deviation*). Variabel independen terdiri atas daya reaktif (X2) dengan rata-rata 72,23 MVar (SD 8,80 MVar), tegangan keluaran (X3) dengan rata-rata 14,28 kV (SD 0,21 kV), dan pembebanan generator (X4) dengan rata-rata 0,849 atau 84,9% kapasitas (SD 0,037), yang menunjukkan variasi data yang relatif kecil dan kondisi operasi yang cukup stabil. Sementara itu, variabel dependen Partial Discharge menunjukkan nilai rata-rata tertinggi pada BY1 Qm+ sebesar 164,00 mV (SD 18,42 mV), diikuti AY1 Qm- sebesar 130,36 mV (SD 14,67 mV), dan CY1 Qm- sebesar 73,05 mV (SD 11,68 mV), yang mengindikasikan adanya variasi intensitas PD pada setiap titik pengukuran. Secara keseluruhan, nilai simpangan baku seluruh variabel lebih kecil dibandingkan nilai rata-ratanya, sehingga data memiliki tingkat penyebaran yang rendah dan layak digunakan untuk analisis regresi linier berganda sebagai metode pembandingan terhadap hasil SmartPLS.

Koefisien Determinasi (R^2)

Koefisien determinasi (*coefficient of determination*) digunakan untuk mengetahui besarnya kemampuan variabel independen dalam menjelaskan variasi variabel dependen pada model regresi. Nilai koefisien determinasi dinyatakan dengan R Square (R^2) yang berada pada rentang 0 sampai 1. Semakin besar nilai R^2 , semakin besar pula kemampuan model dalam menjelaskan perubahan variabel dependen. Sebaliknya, nilai R^2 yang kecil menunjukkan bahwa masih terdapat faktor lain di luar model yang memengaruhi variabel dependen.

Tabel 7. Hasil Uji Koefesien Determinasi

Variabel Dependen	R	R ²	Adjusted R ²
BY1 Qm+	0,425	0,181	0,044
AY1 Qm-	0,411	0,169	0,030
CY1 Qm-	0,355	0,126	-0,020

Sumber: Hasil analisis SmartPLS, 2026

Berdasarkan Tabel 7 Hasil Uji Koefesien Determinasi, model regresi pada indikator BY1 Qm+ menghasilkan nilai R sebesar 0,425, yang menunjukkan adanya hubungan positif antara daya reaktif, tegangan keluaran, dan pembebanan generator terhadap *Partial Discharge*. Nilai R² sebesar 0,181 menunjukkan bahwa ketiga variabel independen mampu menjelaskan 18,1% variasi nilai *Partial Discharge* pada indikator BY1 Qm+, sedangkan 81,9% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain yang tidak dimasukkan ke dalam model penelitian.

Pada indikator AY1 Qm-, diperoleh nilai R sebesar 0,411 dengan R² sebesar 0,169. Hal ini menunjukkan bahwa daya reaktif, tegangan keluaran, dan pembebanan generator secara bersama-sama mampu menjelaskan 16,9% variasi *Partial Discharge*, sedangkan 83,1% variasi lainnya dipengaruhi oleh faktor-faktor lain di luar model.

Sementara itu, model regresi pada indikator CY1 Qm- menghasilkan nilai R sebesar 0,355 dengan R² sebesar 0,126. Nilai tersebut menunjukkan bahwa ketiga variabel independen hanya mampu menjelaskan 12,6% variasi *Partial Discharge*, sedangkan 87,4% sisanya dipengaruhi oleh variabel lain yang tidak dianalisis dalam penelitian ini. Dibandingkan dengan dua indikator sebelumnya, kemampuan model dalam menjelaskan variasi *Partial Discharge* pada CY1 Qm- relatif lebih rendah.

Uji Simultan (Uji F)

Uji simultan (Uji F) dilakukan untuk mengetahui apakah variabel independen, yaitu daya reaktif (X2), tegangan keluaran (X3), dan pembebanan generator (X4), secara bersama-sama berpengaruh terhadap variabel dependen *Partial Discharge*. Pengujian dilakukan menggunakan taraf signifikansi sebesar 5% ($\alpha = 0,05$). Apabila nilai signifikansi lebih kecil dari 0,05, maka variabel independen secara simultan berpengaruh signifikan terhadap variabel dependen. Sebaliknya, apabila nilai signifikansi lebih besar dari 0,05, maka pengaruh yang dihasilkan tidak signifikan.

Tabel 8. Hasil Uji Simultan (Uji F)

Variabel Dependen	Variabel	t-hitung	Sig.
BY1 Qm+	X2	0,916	0,372
	X3	1,539	0,141
	X4	-0,845	0,409
AY1 Qm-	X2	1,225	0,237
	X3	0,941	0,359
	X4	-0,842	0,411
CY1 Qm-	X2	0,817	0,425
	X3	1,086	0,292
	X4	-0,626	0,539

Sumber: Hasil analisis SPSS, 2026

Berdasarkan Tabel 8 model regresi pada indikator BY1 Qm+ menghasilkan nilai F hitung sebesar 1,325 dengan nilai signifikansi 0,297. Nilai tersebut lebih besar dari taraf signifikansi 0,05 sehingga menunjukkan bahwa daya reaktif, tegangan keluaran, dan pembebanan generator secara simultan belum memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai *Partial Discharge* pada indikator BY1 Qm+. Pada indikator AY1 Qm-, diperoleh nilai F hitung sebesar 1,219 dengan nilai signifikansi 0,332. Hasil ini juga menunjukkan bahwa ketiga variabel independen secara bersama-sama tidak berpengaruh signifikan terhadap *Partial Discharge*. Sementara itu, pada indikator CY1 Qm-, nilai F hitung sebesar 0,863 dengan nilai signifikansi 0,478. Nilai signifikansi tersebut merupakan yang terbesar dibandingkan dua model lainnya, sehingga menunjukkan bahwa kemampuan model dalam menjelaskan variasi *Partial Discharge* pada indikator CY1 Qm- relatif lebih rendah.

Uji Parsial (Uji t)

Uji parsial (Uji t) dilakukan untuk mengetahui pengaruh masing-masing variabel independen, yaitu daya reaktif (X2), tegangan keluaran (X3), dan pembebanan generator (X4), terhadap variabel dependen *Partial Discharge*. Pengujian dilakukan pada tingkat signifikansi 5% ($\alpha = 0,05$). Apabila nilai signifikansi lebih kecil dari 0,05 maka variabel independen dinyatakan berpengaruh signifikan terhadap variabel dependen. Sebaliknya, apabila nilai signifikansi lebih besar dari 0,05 maka variabel tersebut tidak berpengaruh signifikan.

Tabel 9. Hasil Uji Parsial (Uji t)

Variabel Dependen	F Hitung	Sig.
BY1 Qm+	1,325	0,297
AY1 Qm-	1,219	0,332
CY1 Qm-	0,863	0,478

Sumber: Hasil analisis SPSS, 2026

Berdasarkan Tabel 9 Hasil Uji Parsial (Uji t) pada indikator BY1 Qm+, variabel daya reaktif (X2) memiliki nilai t hitung sebesar 0,916 dengan nilai signifikansi 0,372, sehingga tidak berpengaruh signifikan terhadap *Partial Discharge*. Variabel tegangan keluaran (X3) memiliki nilai t hitung sebesar 1,539 dengan nilai signifikansi 0,141. Meskipun menunjukkan arah hubungan positif, pengaruh tersebut belum mencapai tingkat signifikansi yang ditetapkan. Sementara itu, pembebanan generator (X4) memiliki nilai t hitung sebesar -0,845 dengan nilai signifikansi 0,409, sehingga juga tidak berpengaruh signifikan. Koefisien beta yang bernilai negatif menunjukkan bahwa pada model ini peningkatan pembebanan cenderung diikuti oleh penurunan nilai *Partial Discharge*, namun hubungan tersebut tidak signifikan secara statistik.

Pada indikator AY1 Qm-, daya reaktif (X2) menghasilkan nilai t hitung sebesar 1,225 dengan nilai signifikansi 0,237, sedangkan tegangan keluaran (X3) memperoleh nilai t hitung sebesar 0,941 dengan nilai signifikansi 0,359. Pembebanan generator (X4) memiliki nilai t hitung sebesar -0,842 dengan nilai signifikansi 0,411. Ketiga variabel menunjukkan nilai signifikansi di atas 0,05, sehingga secara parsial belum memberikan pengaruh yang signifikan terhadap *Partial Discharge*.

Hasil yang serupa diperoleh pada indikator CY1 Qm-. Variabel daya reaktif (X2), tegangan keluaran (X3), dan pembebanan generator (X4) masing-masing memiliki nilai

signifikansi sebesar 0,425, 0,292, dan 0,539. Seluruh nilai tersebut lebih besar dari 0,05, sehingga tidak terdapat pengaruh yang signifikan secara parsial terhadap *Partial Discharge* pada indikator CY1 Qm-.

Evaluasi Model Pengukuran (Outer Model)

Tahap awal analisis dilakukan melalui evaluasi model pengukuran (*outer model*) untuk memastikan bahwa indikator yang digunakan mampu merepresentasikan konstruk laten secara valid dan reliabel. Pada model awal, variabel Parameter Operasi terdiri atas empat indikator, yaitu daya aktif (X1), daya reaktif (X2), tegangan keluaran (X3), dan pembebanan generator (X4). Sementara itu, variabel Partial Discharge terdiri atas enam indikator, yaitu dua sensor pada masing-masing fasa A, B, dan C (AY1 QM+, AY1 QM-, BY1 QM+, BY1 QM-, CY1 QM+, dan CY1 QM-). Evaluasi model pengukuran (*outer model*) merupakan tahapan awal dalam analisis Structural Equation Modeling berbasis Partial Least Squares (SEM-PLS). Tahap ini bertujuan untuk memastikan bahwa indikator yang digunakan telah mampu merepresentasikan konstruk laten secara tepat sebelum dilakukan pengujian hubungan antar konstruk pada model struktural. Karena penelitian ini menggunakan model pengukuran reflektif (Mode A), maka evaluasi dilakukan melalui pengujian validitas konvergen, reliabilitas konstruk, validitas diskriminan, dan collinearity antar indikator.

Pada proses pemodelan awal, seluruh indikator yang mewakili konstruk Parameter Operasi dan Partial Discharge dimasukkan ke dalam model. Hasil evaluasi awal menunjukkan bahwa beberapa indikator belum memenuhi kriteria yang dipersyaratkan. Oleh karena itu, dilakukan penyempurnaan model melalui penghapusan indikator yang memiliki kontribusi rendah atau menyebabkan nilai collinearity tinggi. Proses ini dilakukan secara bertahap dengan tetap memperhatikan kesesuaian teori serta karakteristik data penelitian. Setelah beberapa kali evaluasi, diperoleh model akhir yang memenuhi kriteria pengujian *outer model*.

Validitas konvergen digunakan untuk mengetahui sejauh mana indikator mampu menjelaskan konstruk yang diwakilinya. Pengujian dilakukan dengan melihat nilai *outer loading* dan *Average Variance Extracted* (AVE). Menurut Hair et al. (2022), indikator dinyatakan memenuhi validitas konvergen apabila memiliki nilai *outer loading* lebih besar dari 0,70, sedangkan nilai AVE minimal sebesar 0,50.

Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh indikator pada model akhir memiliki nilai *outer loading* di atas batas minimum yang direkomendasikan. Konstruk Parameter Operasi dibentuk oleh tiga indikator, yaitu daya reaktif (X2), tegangan keluaran (X3), dan pembebanan generator (X4), dengan nilai *outer loading* masing-masing sebesar 0,862, 0,794, dan 0,840. Nilai tersebut menunjukkan bahwa ketiga indikator mempunyai hubungan yang kuat dengan konstruk Parameter Operasi.

Di antara ketiga indikator tersebut, daya reaktif memiliki nilai *outer loading* tertinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa variasi daya reaktif memberikan kontribusi paling besar dalam merepresentasikan kondisi operasi generator dibandingkan indikator lainnya. Sementara itu, tegangan keluaran memiliki nilai *outer loading* paling rendah, namun nilainya masih berada di atas batas minimum sehingga tetap dinyatakan valid dan layak dipertahankan dalam model.

Konstruk Partial Discharge direpresentasikan oleh tiga indikator, yaitu AY1 Qm-, BY1 Qm+, dan CY1 Qm-. Nilai *outer loading* masing-masing sebesar 0,923, 0,946, dan 0,944. Seluruh indikator menunjukkan nilai yang sangat tinggi sehingga mampu menjelaskan konstruk

Partial Discharge secara baik. Nilai outer loading yang tinggi tersebut menunjukkan bahwa indikator yang digunakan memiliki hubungan yang erat dengan konstruk laten sehingga mampu menggambarkan kondisi partial discharge pada generator sinkron secara konsisten.

Selain outer loading, validitas konvergen juga dievaluasi melalui nilai AVE. Hasil analisis menunjukkan bahwa konstruk Parameter Operasi memiliki nilai AVE sebesar 0,693, sedangkan konstruk Partial Discharge sebesar 0,879. Kedua nilai tersebut telah melebihi batas minimum 0,50, sehingga dapat disimpulkan bahwa lebih dari separuh variasi indikator mampu dijelaskan oleh konstruk yang diukur. Dengan demikian, validitas konvergen pada kedua konstruk telah terpenuhi.

Reliabilitas konstruk bertujuan untuk mengetahui tingkat konsistensi indikator dalam mengukur konstruk laten. Pada penelitian ini, reliabilitas dievaluasi menggunakan nilai Cronbach's Alpha dan Composite Reliability. Hasil analisis menunjukkan bahwa konstruk Parameter Operasi memiliki nilai Cronbach's Alpha sebesar 0,791 dan Composite Reliability sebesar 0,814. Sementara itu, konstruk Partial Discharge memiliki nilai Cronbach's Alpha sebesar 0,931 dan Composite Reliability sebesar 0,935. Nilai Cronbach's Alpha pada kedua konstruk berada di atas batas minimum 0,70 yang menunjukkan bahwa indikator memiliki konsistensi internal yang baik. Demikian pula dengan nilai Composite Reliability yang seluruhnya melebihi 0,70, sehingga dapat disimpulkan bahwa indikator pada masing-masing konstruk mampu memberikan hasil pengukuran yang stabil dan reliabel. Hasil tersebut menunjukkan bahwa indikator-indikator yang digunakan dalam penelitian ini telah memiliki tingkat konsistensi yang baik dalam mengukur Parameter Operasi maupun Partial Discharge, sehingga layak digunakan pada tahap analisis berikutnya.

Validitas diskriminan bertujuan untuk memastikan bahwa setiap konstruk benar-benar mengukur konsep yang berbeda dengan konstruk lainnya. Pada penelitian ini, pengujian dilakukan menggunakan metode Heterotrait-Monotrait Ratio (HTMT). Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai HTMT antara konstruk Parameter Operasi dan Partial Discharge sebesar 0,368. Nilai tersebut berada jauh di bawah batas maksimum sebesar 0,90. Selain itu, hasil bootstrapping menunjukkan bahwa interval kepercayaan HTMT berada pada rentang 0,173 hingga 0,625, sehingga tidak mencakup nilai 1. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kedua konstruk memiliki tingkat diskriminasi yang baik. Dengan kata lain, Parameter Operasi dan Partial Discharge merupakan dua konstruk yang berbeda dan masing-masing mampu mengukur konsep yang memang menjadi fokus penelitian. Oleh karena itu, validitas diskriminan pada model penelitian ini dapat dinyatakan telah terpenuhi.

Berdasarkan seluruh hasil pengujian yang telah dilakukan, model pengukuran pada penelitian ini telah memenuhi kriteria evaluasi SEM-PLS. Seluruh indikator yang dipertahankan memiliki nilai outer loading di atas 0,70, nilai AVE di atas 0,50, nilai Cronbach's Alpha dan Composite Reliability di atas 0,70, serta nilai HTMT di bawah 0,90. Hasil pengujian collinearity juga menunjukkan bahwa model telah berada pada kondisi yang dapat diterima setelah dilakukan penyempurnaan indikator. Dengan terpenuhinya seluruh persyaratan tersebut, konstruk Parameter Operasi dan Partial Discharge dinyatakan valid dan reliabel dalam merepresentasikan variabel laten yang diteliti. Oleh karena itu, model pengukuran telah layak digunakan untuk melanjutkan analisis pada model struktural (inner model), yaitu pengujian hubungan antara Parameter Operasi terhadap Partial Discharge pada generator sinkron PT PLN MCTN menggunakan metode SmartPLS.

Evaluasi Model Struktural (Inner Model)

Setelah model pengukuran (outer model) dinyatakan memenuhi persyaratan validitas dan reliabilitas, tahap selanjutnya adalah melakukan evaluasi model struktural (inner model). Evaluasi ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan model dalam menjelaskan hubungan antar konstruk laten yang diteliti. Pada penelitian ini, evaluasi model struktural dilakukan melalui analisis koefisien determinasi (R^2), koefisien jalur (path coefficient), dan pengujian signifikansi menggunakan teknik bootstrapping.

Koefisien determinasi (R^2) digunakan untuk mengukur kemampuan konstruk eksogen dalam menjelaskan variasi konstruk endogen. Semakin besar nilai R^2 , semakin besar pula kemampuan model dalam menjelaskan variabel dependen. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai R^2 untuk konstruk Partial Discharge sebesar 0,119. Hal ini berarti bahwa 11,9% variasi nilai Partial Discharge dapat dijelaskan oleh konstruk Parameter Operasi, sedangkan 88,1% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain yang tidak dimasukkan ke dalam model penelitian. Nilai R^2 sebesar 0,119 menunjukkan bahwa kemampuan prediksi model masih tergolong rendah. Kondisi tersebut dapat dipahami karena fenomena partial discharge pada generator sinkron tidak hanya dipengaruhi oleh parameter operasi berupa daya aktif, daya reaktif, tegangan keluaran, dan pembebanan generator, tetapi juga dipengaruhi oleh berbagai faktor lain, seperti kondisi isolasi stator, umur isolasi, temperatur belitan, kelembapan, tingkat kontaminasi, kualitas sistem pendingin, serta kondisi lingkungan operasi generator. Dengan demikian, Parameter Operasi hanya mampu menjelaskan sebagian kecil variasi Partial Discharge yang terjadi pada generator sinkron PT PLN MCTN.

Koefisien jalur menunjukkan arah dan besarnya hubungan antara konstruk eksogen terhadap konstruk endogen. Nilai koefisien positif menunjukkan hubungan yang searah, sedangkan nilai negatif menunjukkan hubungan yang berlawanan. Hasil analisis SmartPLS menunjukkan bahwa hubungan antara Parameter Operasi terhadap Partial Discharge memiliki nilai koefisien jalur sebesar 0,345. Nilai tersebut menunjukkan bahwa hubungan kedua konstruk bersifat positif. Dengan kata lain, perubahan kondisi parameter operasi generator cenderung diikuti oleh perubahan nilai Partial Discharge pada arah yang sama. Koefisien sebesar 0,345 menunjukkan bahwa pengaruh Parameter Operasi terhadap Partial Discharge berada pada tingkat yang relatif sedang. Hal ini mengindikasikan bahwa perubahan parameter operasi memang memiliki kontribusi terhadap perubahan aktivitas partial discharge, namun pengaruhnya tidak terlalu besar karena masih terdapat faktor-faktor lain yang turut memengaruhi kondisi isolasi generator.

Pengujian hipotesis dilakukan menggunakan metode bootstrapping untuk mengetahui apakah hubungan antar konstruk bersifat signifikan secara statistik. Keputusan pengujian dilakukan berdasarkan nilai t-statistic dan p-value. Pada tingkat signifikansi 5%, suatu hipotesis dinyatakan diterima apabila nilai t-statistic lebih besar dari 1,96 dan p-value lebih kecil dari 0,05. Berdasarkan hasil pengujian diperoleh nilai t-statistic sebesar 2,472, lebih besar dibandingkan nilai kritis 1,96, sedangkan nilai p-value sebesar 0,013, lebih kecil dari 0,05. Dengan demikian, hipotesis penelitian diterima. Hasil tersebut menunjukkan bahwa Parameter Operasi berpengaruh positif dan signifikan terhadap Partial Discharge pada generator sinkron PT PLN MCTN. Artinya, perubahan pada parameter operasi yang terdiri atas daya reaktif, tegangan keluaran, dan pembebanan generator berhubungan dengan perubahan nilai partial

discharge yang terukur pada sistem monitoring generator. Walaupun hubungan yang diperoleh signifikan secara statistik, nilai koefisien determinasi yang relatif kecil menunjukkan bahwa Parameter Operasi bukan satu-satunya faktor yang menentukan tingkat Partial Discharge. Oleh karena itu, hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa pengendalian parameter operasi dapat menjadi salah satu upaya untuk memantau kondisi isolasi generator, namun evaluasi kondisi generator secara menyeluruh tetap perlu mempertimbangkan faktor-faktor lain yang tidak dimasukkan dalam model penelitian.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa Parameter Operasi memiliki pengaruh positif terhadap Partial Discharge. Secara teknis, kondisi operasi generator dapat memengaruhi distribusi medan listrik pada sistem isolasi stator. Perubahan daya reaktif, tegangan keluaran, maupun tingkat pembebanan akan menyebabkan perubahan kondisi elektromagnetik dan termal pada generator. Apabila perubahan tersebut berlangsung secara terus-menerus atau mendekati batas operasi, tegangan listrik yang diterima sistem isolasi juga akan berubah sehingga aktivitas partial discharge berpotensi meningkat. Meskipun demikian, besarnya pengaruh Parameter Operasi terhadap Partial Discharge masih relatif terbatas. Hal ini menunjukkan bahwa aktivitas partial discharge pada generator sinkron merupakan fenomena yang kompleks dan dipengaruhi oleh berbagai faktor selain parameter operasi. Kondisi fisik isolasi, proses penuaan material, kontaminasi permukaan isolasi, kelembapan, temperatur belitan, serta kualitas sistem pendingin merupakan beberapa faktor yang dapat memberikan pengaruh terhadap munculnya partial discharge. Dengan demikian, hasil penelitian ini mendukung bahwa Parameter Operasi memiliki peranan dalam perubahan Partial Discharge, namun pengaruh tersebut bukan merupakan satu-satunya faktor yang menentukan kondisi isolasi generator. Oleh karena itu, sistem monitoring partial discharge tetap perlu dipadukan dengan pemantauan parameter kondisi lainnya agar evaluasi kesehatan generator dapat dilakukan secara lebih komprehensif.

Analisis Metoda Pembandingan Regresi linear berganda SPSS berdasarkan hasil Uji statistic deskriptif, koefisien determinasi, uji simultan (f) dan uji parsial (t)

Sebagai pelengkap analisis utama menggunakan Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM), penelitian ini juga menerapkan analisis regresi linier berganda dengan bantuan IBM SPSS Statistics sebagai metode pembandingan. Tujuan penggunaan dua metode ini adalah untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara Parameter Operasi dan Partial Discharge pada generator sinkron PT PLN MCTN. Berdasarkan hasil statistik deskriptif, seluruh variabel penelitian memiliki karakteristik data yang relatif stabil. Daya reaktif memiliki rata-rata sebesar 72,23 MVar dengan simpangan baku 8,80 MVar, sedangkan tegangan keluaran generator memiliki rata-rata 14,28 kV dengan variasi yang relatif kecil. Pembebanan generator selama periode pengamatan berada pada rata-rata sekitar 84,9% kapasitas operasi. Sementara itu, nilai Partial Discharge menunjukkan variasi pada setiap titik pengukuran, yang mengindikasikan bahwa aktivitas pelepasan muatan tidak terjadi secara seragam di seluruh bagian generator. Variasi tersebut mencerminkan adanya pengaruh kondisi lokal sistem isolasi terhadap besarnya aktivitas Partial Discharge. Meskipun demikian, penyebaran data masih berada dalam batas yang wajar sehingga memenuhi syarat untuk dilakukan analisis regresi.

Hasil regresi linier berganda menunjukkan bahwa kemampuan model dalam menjelaskan variasi Partial Discharge masih relatif rendah. Nilai koefisien determinasi (R^2) yang diperoleh

sebesar 0,181 pada indikator BY1 Qm+, 0,169 pada AY1 Qm-, dan 0,126 pada CY1 Qm-. Hal tersebut menunjukkan bahwa daya reaktif, tegangan keluaran, dan pembebanan generator hanya mampu menjelaskan sekitar 12,6%–18,1% variasi Partial Discharge, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model penelitian, seperti kondisi fisik isolasi, umur generator, temperatur belitan, kelembapan, tingkat kontaminasi, tekanan hidrogen, maupun efektivitas sistem pendinginan. Hasil tersebut sejalan dengan analisis menggunakan SmartPLS yang menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,119, sehingga dapat disimpulkan bahwa Parameter Operasi hanya memberikan sebagian kontribusi terhadap perubahan Partial Discharge. Dengan demikian, kedua metode memberikan kesimpulan yang konsisten bahwa fenomena Partial Discharge merupakan fenomena yang kompleks dan dipengaruhi oleh banyak faktor selain parameter operasi generator.

Pada pengujian hipotesis menggunakan regresi linier berganda, hasil Uji F menunjukkan bahwa model regresi belum signifikan pada seluruh indikator Partial Discharge. Nilai signifikansi masing-masing sebesar 0,297, 0,332, dan 0,478, yang seluruhnya lebih besar dari taraf signifikansi 0,05. Demikian pula pada Uji t, seluruh variabel independen, yaitu daya reaktif, tegangan keluaran, dan pembebanan generator, belum menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap Partial Discharge. Meskipun demikian, arah hubungan yang dihasilkan tetap konsisten dengan hasil SmartPLS, di mana daya reaktif dan tegangan keluaran cenderung berhubungan positif dengan Partial Discharge, sedangkan pembebanan generator pada beberapa model menunjukkan hubungan negatif. Perbedaan utama terlihat pada tingkat signifikansinya. SmartPLS justru menunjukkan bahwa Parameter Operasi berpengaruh positif dan signifikan terhadap Partial Discharge, dengan koefisien jalur sebesar 0,345, nilai t-statistic sebesar 2,472, dan p-value sebesar 0,013. Perbedaan tersebut bukan menunjukkan adanya pertentangan hasil, tetapi mencerminkan karakteristik masing-masing metode. Regresi linier berganda menganalisis hubungan langsung antarvariabel observasi, sedangkan SmartPLS memodelkan hubungan antar konstruk laten yang sebelumnya telah melalui pengujian validitas dan reliabilitas sehingga menghasilkan model yang lebih representatif.

Secara keseluruhan, analisis perbandingan ini menunjukkan bahwa kedua metode menghasilkan arah hubungan yang relatif sama, yaitu Parameter Operasi memiliki kecenderungan meningkatkan aktivitas Partial Discharge, namun tingkat signifikansi yang diperoleh berbeda. Regresi linier berganda belum mampu menunjukkan hubungan yang signifikan karena jumlah sampel penelitian relatif terbatas, yaitu hanya 22 data pengamatan, sehingga daya uji statistik menjadi lebih rendah. Sebaliknya, SmartPLS dirancang untuk mampu memberikan estimasi yang lebih baik pada ukuran sampel kecil serta tidak mensyaratkan distribusi data normal secara ketat. Selain itu, SmartPLS melakukan evaluasi terhadap indikator melalui pengujian outer model, sehingga hanya indikator yang memenuhi kriteria validitas dan reliabilitas yang digunakan dalam analisis struktural. Oleh karena itu, hasil regresi linier berganda tidak melemahkan temuan penelitian, melainkan berfungsi sebagai perbandingan yang memperkuat bahwa SmartPLS merupakan metode yang lebih sesuai untuk memodelkan hubungan antara Parameter Operasi dan Partial Discharge pada generator sinkron PT PLN MCTN, terutama pada penelitian dengan jumlah sampel yang terbatas dan melibatkan konstruk laten.

Pengaruh Daya Reaktif, tegangan keluaran dan Pembebanan Generator terhadap Partial Discharge

Daya reaktif, tegangan keluaran, dan pembebanan generator merupakan parameter operasi yang berpengaruh terhadap kondisi sistem isolasi generator sinkron. Peningkatan daya reaktif dapat mengubah distribusi medan listrik akibat perubahan arus eksitasi, sedangkan kenaikan tegangan keluaran secara langsung meningkatkan kuat medan listrik pada isolasi. Di sisi lain, peningkatan pembebanan generator menyebabkan arus dan temperatur belitan stator meningkat sehingga mempercepat proses penuaan isolasi. Apabila isolasi telah mengalami cacat atau degradasi, perubahan kondisi operasi tersebut dapat meningkatkan kemungkinan terjadinya Partial Discharge. Namun, pengaruh ketiga parameter tersebut tidak bersifat langsung, melainkan dipengaruhi pula oleh kondisi isolasi, sistem pendinginan, temperatur operasi, dan lingkungan kerja generator.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa daya reaktif, tegangan keluaran, dan pembebanan generator secara bersama-sama membentuk konstruk Parameter Operasi, yang selanjutnya berpengaruh positif terhadap Partial Discharge. Temuan ini menunjukkan bahwa perubahan kondisi operasi generator dapat memengaruhi kondisi kerja sistem isolasi sehingga aktivitas Partial Discharge ikut mengalami perubahan. Meskipun demikian, nilai koefisien determinasi (R^2) yang diperoleh masih relatif rendah, sehingga menunjukkan bahwa aktivitas Partial Discharge tidak hanya dipengaruhi oleh parameter operasi, tetapi juga oleh faktor lain seperti kondisi fisik isolasi, umur peralatan, kelembapan, temperatur belitan, tingkat kontaminasi, tekanan hidrogen, dan efektivitas sistem pendinginan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter operasi memiliki kontribusi terhadap perubahan aktivitas Partial Discharge, namun bukan merupakan satu-satunya faktor yang menentukan kondisi isolasi generator. Oleh karena itu, pemantauan parameter operasi perlu dilakukan secara terpadu dengan sistem condition monitoring, seperti pengukuran Partial Discharge secara online, agar kondisi generator dapat dievaluasi secara lebih akurat. Pendekatan ini diharapkan mampu mendukung deteksi dini kerusakan isolasi, meningkatkan efektivitas pemeliharaan prediktif, serta menjaga keandalan dan kontinuitas operasi generator sinkron.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa Parameter Operasi berpengaruh positif dan signifikan terhadap Partial Discharge pada generator sinkron PT PLN MCTN, dengan hasil analisis SmartPLS menunjukkan koefisien jalur sebesar 0,345, t-statistic sebesar 2,472, dan p-value sebesar 0,013. Konstruk Parameter Operasi dibentuk oleh indikator daya reaktif, tegangan keluaran, dan pembebanan generator yang telah memenuhi kriteria validitas dan reliabilitas, sedangkan indikator daya aktif tidak dipertahankan karena tidak memenuhi evaluasi outer model. Selain itu, model struktural berbasis SmartPLS mampu menggambarkan hubungan antara Parameter Operasi dan Partial Discharge lebih baik dibandingkan regresi linier berganda, karena SmartPLS menganalisis hubungan antar konstruk laten yang telah teruji validitas dan reliabilitasnya, sementara regresi linier berganda hanya menguji hubungan langsung antarvariabel observasi. Berdasarkan temuan tersebut, PT PLN MCTN disarankan untuk meningkatkan pemantauan parameter operasi, khususnya daya reaktif, tegangan keluaran, dan pembebanan generator, serta mengintegrasikannya dengan sistem pemantauan

Partial Discharge secara daring guna mendukung deteksi dini penurunan kualitas isolasi. Penelitian selanjutnya juga disarankan menambahkan variabel lain yang berkaitan dengan aktivitas Partial Discharge, seperti temperatur belitan stator, tekanan hidrogen, kelembapan, umur isolasi, kondisi sistem pendingin, dan faktor lingkungan, menggunakan jumlah data yang lebih besar serta periode pengamatan yang lebih panjang, serta membandingkan SmartPLS dengan metode lain seperti regresi linier berganda atau Covariance-Based Structural Equation Modeling (CB-SEM) agar diperoleh model yang lebih komprehensif dan representatif.

DAFTAR PUSTAKA

- Bandri, S., Anthony, Z., Andari, R., Program,), Teknik, S., Sarjana, E., Teknik, F., & Padang, I. T. (n.d.). *Analisis Perubahan Pembebanan Terhadap Arus Exitasi Unit 1 Pada PT PLN (Persero) Sektor PLTU Teluk Sirih (Sepannur Bandri, Zuriman Anthony, Rafika Andari: Halaman 14-27) Analisa Perubahan Pembebanan Terhadap Arus Exitasi Unit 1 Pada PT PLN (Persero) Sektor Pembangkitan Teluk Sirih.*
- Campbell, S. R., Stone, G. C., Sedding, H. G., Klemptner, G. S., McDermid, W., & Bussey, R. G. (1994). Practical on-line partial discharge tests for turbine generators and motors. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9(2), 1043–1052. <https://doi.org/10.1109/60.300147>
- Fikri, M., Christiono, M. K. I. G., Abdul-Malek, Z., Romadhonid, M. L., & Esa, M. R. M. (2024). *Comparison of corona discharge identification in 20 kV cubicles based on voltage and noise using ED, HMM, and FCM. J Teknol (Sci Eng)*, 86(5), 11-22.
- Jasim, H., & Abdalla, K. (2026). Excitation control enhancement for the synchronous generator using effective control methodology. *Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering*, 22(1), 540–552. <https://doi.org/10.37917/ijeee.22.1.48>
- Jiang, T., Liu, B., Liu, G., Wang, B., Li, X., & Zhang, J. (2024). Forced oscillation source location of bulk power systems using synchrosqueezing wavelet transform. *IEEE Transactions on Power Systems*, 39(5), 6689–6701. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2024.3351915>
- Kong, T.-S. (2015). Analysis of Partial Discharge Patterns for Generator Stator Windings. *American Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 4(2), 17. <https://doi.org/10.11648/j.epes.20150402.11>
- Mahardika, A., & Prayogo, B. (2025). Generator Early Warning System Based on Partial Discharge & Operation Parameters to Prevent Catastrophic Failure *. *Journal of Mechanical Design and Testing*, 7(1), 45–53. <https://doi.org/10.22146/jmdt.108701>
- Muhamad Fikri, N. (2025). *Print) Jurnal INTEKNA : Informasi Teknik dan Niaga ISSN* (Vol. 25, Number 2). <http://ejurnal.poliban.ac.id/index.php/intekna/issue/archive>
- Mustiningsih, P. I. A. (2018). *Analisis Pengaruh Arus Eksitasi Terhadap Daya Reaktif Terhadap Generator Sinkron Pltu PT. DSS* (Doctoral dissertation, ITPLN).
- Mutiara Sari, P., & Munir, N. A. A. (2023). *Analisis Pengaruh Partial Discharge Terhadap Degradasi Kualitas Isolasi Belitan Stator Generator Gt 3.1 Pltgu Priok* (Doctoral dissertation, S1 Teknik Elektro).
- Nakamura, S., Kanegami, M., Kuraishi, T., & Miyazaki, S. (2025). Development and validation of estimation of breakdown voltage of stator windings of generator from partial discharge magnitude. *Electrical Engineering in Japan*, 218, e23489. <https://doi.org/10.1002/eej.23489>
- Permatasari, K. N., & Sampurno, S. (2017). *Studi Kurva Kemampuan Generator Sinkron Pltu Unit 4 Muara Karang* (Doctoral dissertation, ITPLN).
- Putra, S. A., & Santoso, D. B. (2022). *Analisis Pengaruh Arus Eksitasi Terhadap Daya Reaktif Generator Sinkron Unit 3 Plta Ubrug Analysis Of The Effect Of Excitation Current On*

- Reactive Power Of Synchronous Generator Unit 3 Ubrug Hepp. 13(2)*, 113–122. <https://doi.org/10.34001/jdpt.v12i2>
- Rifki Hidayat, I., & Hidayat, S. (2023). *Studi Analisis Kondisi Generator Unit# 3 Plta Tes Menggunakan Metode Pengukuran Partial Discharge, Insulation Resistance, Dan Polarization Index* (Doctoral dissertation, S1 Teknik Elektro).
- Romphuchaiyapruet, K., & Wattanawongpitak, S. (2025). Frequency-based density estimation and identification of partial discharges signal in high-voltage generators via Gaussian mixture models. *Eng*, 6(4), 64. <https://doi.org/10.3390/eng6040064>
- Soewono, S. (2022). Online Partial Discharge Measurement As A Predictive Maintenance Tool Of Motor And Generator Stator Windings. *Eduvest-Journal of Universal Studies*, 2(2), 229–243. <http://eduvest.greenvest.co.id>
- Stone, G. C., Sedding, H. G., & Costello, M. J. (1996). Application of partial discharge testing to motor and generator stator winding maintenance. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 31(3), 459–475. <https://doi.org/10.1109/28.491498>
- Szamel, L., & Oloo, J. (2024). Monitoring of stator winding insulation degradation through estimation of stator winding temperature and leakage current. *Machines*, 12(4), 220. <https://doi.org/10.3390/machines12040220>
- Wang, Z., Guo, L., Li, X., Zhou, X., Zhu, J., & Wang, C. (2025). Multi-swing PLL synchronization transient stability of grid-connected paralleled converters. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 16(1), 716–729. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2024.3481417>
- Widodo, K., Haddin, M., & Gunawan, G. (2020). Analisis Partial Discharge dan Prediksi Usia Layak Isolasi Belitan Stator Generator 143,4 MVA. *ENERGI & KELISTRIKAN*, 12(1), 53–64. <https://doi.org/10.33322/energi.v12i1.927>