

# Penerapan Rantai Markov Untuk Memprediksi Nilai Susut Tegangan Saat Waktu Beban Puncak Pada Jaringan Tegangan Rendah

Bima Yudha Wijaya<sup>1\*</sup>, Agung Trihasto<sup>1</sup>, Deria Pravitasari<sup>1</sup>, Hery Teguh Setiawan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tidar  
Jl. Kapten Suparman No.39, Potrobangsari, Kec. Magelang Utara, Kota Magelang, Jawa Tengah (56116)  
E-mail: [bima.yudha.wijaya@students.untidar.ac.id](mailto:bima.yudha.wijaya@students.untidar.ac.id)

Naskah Masuk: 02 Juli 2025; Diterima: 07 Agustus 2025; Terbit: 31 Agustus 2025

## ABSTRAK

**Abstrak** - Jaringan distribusi tegangan rendah mengalami jatuh tegangan saat beban puncak yang menyebabkan gangguan pada peralatan listrik. Susut ini merupakan hal yang tidak dapat dihindari, tetapi bisa diminimalkan dengan pengaturan tegangan yang tepat melalui prediksi nilai tegangan. Metode peramalan ARIMA dan ANFIS memiliki keterbatasan terhadap data yang tidak stabil. Rantai Markov dipilih karena mampu menangani data acak dan memberikan prediksi yang lebih fleksibel. Penelitian dilakukan pada satu pelanggan dengan tarif R1M 900 VA di Magelang. Model Rantai Markov digunakan untuk menganalisis peluang perubahan nilai tegangan. Hasil prediksi menunjukkan akurasi yang sangat tinggi. Evaluasi menggunakan Mean Absolute Percentage Error (MAPE) menunjukkan hasil berturut-turut sebesar 3,57% pada hari Rabu, 1,82% pada hari Kamis, dan 2,79% pada hari Jumat. Seluruh nilai MAPE berada di bawah 5%, yang menunjukkan tingkat akurasi prediksi sangat baik. Perhitungan susut tegangan dilakukan pada pukul 23.00 WIB hari Senin, 5 Mei 2025 (setelah beban puncak) dengan tegangan sebesar 231 V, dan pada pukul 15.00 WIB hari Jumat, 9 Mei 2025 (sebelum beban puncak) dengan tegangan sebesar 198 V. Berdasarkan persentase susut pada Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR) sebesar 4% dan Sambungan Rumah (SR) sebesar 1% dalam kondisi beban merata, prediksi menunjukkan tegangan pelanggan yang berada dekat trafo mencapai 243 V, melebihi batas standar 242 V. Sebaliknya, pelanggan di titik ujung hanya menerima 188 V, di bawah batas minimum 198 V. Hal ini menunjukkan ketidaksesuaian tegangan sesaat terhadap standar, meskipun tegangan kembali normal pada pukul 24.00 WIB (225 V) dan pukul 15.00 WIB (223 V) di hari yang sama. Prediksi menggunakan Rantai Markov menunjukkan distribusi tegangan dominan berada di peringkat C (rentang 221–231 V), masing-masing selama 23 jam (Rabu), 24 jam (Kamis), dan 19 jam (Jumat) dari total 24 jam. Informasi ini dapat menjadi dasar dalam pengaturan sadapan trafo untuk menstabilkan tegangan. Pengaturan yang tepat diharapkan dapat menurunkan susut pada jaringan distribusi dan menjadi bahan pertimbangan bagi penyedia tenaga listrik dalam pengambilan keputusan.

**Kata kunci:** Rantai Markov, susut tegangan, waktu beban puncak, jaringan tegangan rendah

## ABSTRACT

**Abstract** - Voltage drop in low-voltage distribution networks during peak load periods can disrupt the performance of electrical equipment. Although unavoidable, these losses can be minimized through accurate voltage forecasting and proper regulation. This study investigates the application of the Markov Chain model to predict voltage fluctuations, addressing the limitations of traditional forecasting methods such as ARIMA and ANFIS in handling unstable data. The research focuses on a residential customer with a 900 VA R1M tariff in Magelang, Indonesia. Evaluation of hourly voltage predictions using Mean Absolute Percentage Error (MAPE) produced values of 3.57%, 1.82%, and 2.79% on Wednesday, Thursday, and Friday respectively, all within the threshold for high prediction accuracy. Voltage measurements taken after and before peak load periods revealed values of 231 V and 198 V. By applying a 4% loss assumption for low-voltage overhead lines (SUTR) and 1% for house connections (SR), predicted voltages reached 243 V near the transformer—exceeding the standard upper limit of 242 V—and dropped to 188 V at the network's end, falling below the 198 V lower limit. These results indicate noncompliance with voltage standards during certain periods, although voltages returned to acceptable levels shortly thereafter. The Markov Chain model also identified a dominant voltage distribution in category C (221–231 V) across 23, 24, and 19 hours on Wednesday, Thursday, and Friday, respectively. These findings offer a practical basis for transformer tap adjustments to stabilize voltage and reduce network losses. The approach provides valuable insights for electricity providers in improving voltage regulation and maintaining service quality.

**Keywords:** Markov Chain, voltage drop, peak load time, low voltage network

Copyright © 2025 Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)

## 1. PENDAHULUAN

Jaringan tegangan rendah merupakan bagian dari suatu sistem distribusi tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik ke konsumen. Susut tegangan timbul dalam penyaluran energi listrik tersebut karena adanya arus yang mengalir pada suatu impedansi yang terdapat pada penghantar mengakibatkan daya atau tegangan yang diterima menjadi lebih kecil dari pada yang dikirim [1]. Tegangan yang berada dibawah atau lebih dari batas yang ditentukan akan menyebabkan peralatan listrik tidak bekerja dengan baik [2].

Perhitungan dan analisis susut tegangan dalam sistem distribusi tenaga listrik selama ini hanya dilakukan dengan analisis matematis. Analisis ini kemudian digunakan untuk menentukan nilai tegangan masih berada pada batas yang diijinkan atau tidak [3]. Susut tegangan yang dihitung pada saluran akhirnya dapat digunakan bagi produsen tenaga listrik sebagai bahan pertimbangan untuk penentuan dalam perbaikan sistem tenaga listrik.

Hal utama dalam menghindari susut tegangan adalah penentuan nilai tegangan yang optimal [4]. Namun, pada kenyataan fluktuasi tegangan yang terjadi di lapangan menandakan bahwa volatilitas dari tegangan tidaklah konstan, hal ini menyebabkan konsumen mengalami kesulitan dalam menentukan tegangan yang optimal. Volatilitas sering dihitung menggunakan varians dan deviasi standar [5].

Koefisien variasi rendah menandakan data yang lebih stabil dan dapat diandalkan dalam konteks analisis perubahan nilai tegangan. Meskipun tidak ada standar universal yang berlaku untuk semua bidang, beberapa pedoman umum dapat dijadikan acuan. Dalam bidang laboratorium klinis, nilai koefisien variasi di bawah 5% sering dianggap menunjukkan hasil yang teliti dan akurat [6]. Sebagai contoh, penelitian yang mengevaluasi kontrol kualitas pemeriksaan glukosa darah melaporkan nilai koefisien variasi sebesar 1,24%, yang berada di bawah batas maksimum 5% yang ditetapkan oleh standar terkait, menunjukkan bahwa hasil pemeriksaan tersebut baik atau teliti.

Setiap harinya konsumsi listrik pada waktu tertentu akan mengalami puncak penggunaan yang menjadi penyebab susut tegangan sehingga dipandang perlu untuk mengetahui model peramalan beban puncak listrik sebagai bahan pertimbangan bagi pengambil kebijakan untuk menstabilkan sistem energi listrik [7]. Berdasarkan jangka waktunya peramalan dapat dikelompokkan menjadi jangka pendek, jangka menengah dan jangka panjang [8].

Suatu metode peramalan yang dapat digunakan untuk mengamati tingkat hubungan antar faktor yang mempengaruhi suatu besaran tertentu adalah metode kausal. Model dari metoda ini dibagi menjadi model linier dan model stokastik. Model linier regresi adalah suatu model matematik yang memanfaatkan data masa lalu untuk menganalisa bentuk formulasi suatu variable terhadap variable yang lain, yang dapat digunakan dalam memprediksi pola kejadian pada masa yang akan datang [9]. Contoh dari model linier, yaitu Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA), regresi linier, dan Jaringan Syaraf Tiruan (JST).

Terdapat beberapa kelemahan pada metode peramalan linier time series ARIMA, diantaranya yaitu menghasilkan error yang besar, ketidakstabilan data, dan asumsi linieritas yang sering tidak terpenuhi [10]. Peramalan time series lainnya dengan metode ANFIS hanya akan bekerja dengan baik jika data yang digunakan mempunyai pola yang teratur [11]. Dalam kasus data yang digunakan mempunyai pola yang memiliki deviasi yang cukup tinggi secara statistik ANFIS memberikan rata-rata kesalahan yang masih cukup tinggi.

Rantai Markov tetap mempunyai sifat linieritas meskipun data yang digunakan acak [12]. Metode Rantai Markov dipilih karena analisis Markov telah digunakan dengan berhasil terhadap berbagai macam situasi keputusan [13]–[15]. Rantai Markov dapat memperkirakan perubahan-perubahan di waktu yang akan datang dalam variabel-variabel dinamis atas dasar perubahan-perubahan dari variabel-variabel dinamis tersebut waktu lalu sehingga diharapkan dapat digunakan untuk membuat model bermacam-macam sistem.

Berdasarkan Evaluasi Kinerja Semester I dan Rencana Strategi Semester II Tahun 2024 Unit Layanan Pelanggan (ULP) Magelang Kota lalu diketahui bahwa jumlah pelanggan yang melanggan di tegangan rendah adalah sejumlah 212.599. Selain itu, panjang jaringan tegangan rendah di wilayah kerja ULP Magelang kota yang mencapai 1.070,19 KMS menjadikan penelitian ini perlu untuk dilakukan. Penelitian ini dilakukan dengan menerapkan Rantai Markov untuk mengetahui besarnya peluang perpindahan nilai tegangan pada satu unit rumah pelanggan yang melanggan jaringan tegangan rendah dengan tarif R1M daya 900 VA. Perpindahan nilai tegangan ini diharapkan dapat digunakan untuk menghindari susut tegangan saat waktu beban puncak.

## 2. KAJIAN PUSTAKA

Penyaluran energi listrik dari pembangkit menuju konsumen (beban) merupakan aspek penting yang perlu dipahami [16]. Proses penyaluran ini berlangsung melalui beberapa tahapan, dimulai dari pembangkit

menuju jaringan transmisi (SUTET) dan diteruskan ke gardu induk. Dari gardu induk, listrik dialirkan ke jaringan distribusi primer (SUTM), lalu melalui gardu distribusi diteruskan ke jaringan distribusi sekunder (SUTR) hingga akhirnya sampai ke konsumen. Oleh karena itu, sistem distribusi tenaga listrik memiliki peran dalam menyalurkan energi listrik kepada pengguna akhir melalui jaringan tegangan rendah (JTR).

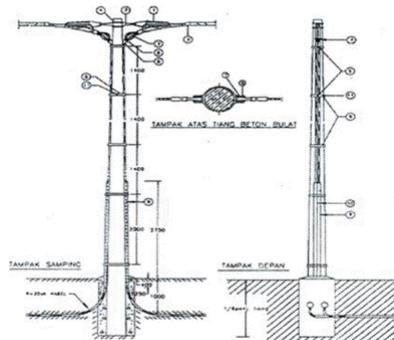
Jaringan distribusi umumnya menggunakan tegangan yang lebih rendah dibandingkan dengan tegangan pada saluran transmisi [17]. Daya yang disalurkan melalui jaringan distribusi juga cenderung lebih kecil jika dibandingkan dengan daya yang dibawa oleh saluran transmisi, dan disesuaikan dengan kebutuhan tegangan dari masing-masing konsumen. Tingkat tegangan untuk beban pelanggan ditentukan berdasarkan jenis beban tersebut. Beban industri yang membutuhkan daya cukup besar biasanya menggunakan tegangan menengah sebesar 20 kV, sedangkan beban rumah tangga yang memerlukan daya lebih kecil umumnya menggunakan tegangan rendah sebesar 220 V.

Upaya untuk mengurangi rugi-rugi (losses) daya pada sistem distribusi tenaga listrik telah menjadi isu penting satu dekade terakhir [18]. Sistem distribusi sebagai bagian dari sistem tenaga listrik yang mengalami kerugian paling besar dibandingkan komponen lainnya. Berdasarkan audit energi hingga tahun 2024, total kerugian energi listrik PLN di seluruh Indonesia mencapai 8,55%. Dari jumlah tersebut, sistem distribusi menyumbang kerugian terbesar yaitu sebesar 6,65%, sementara sistem transmisi hanya menyumbang 2,03%. Oleh karena itu, strategi pengurangan kerugian energi listrik pada sistem distribusi perlu dilakukan, mengingat besarnya proporsi kerugian yang terjadi pada jaringan ini dalam keseluruhan sistem tenaga listrik.

Peramalan pada dasarnya adalah suatu estimasi atau prediksi terhadap kejadian yang kemungkinan akan terjadi di masa depan [10]. Aktivitas ini merupakan langkah awal dalam proses perencanaan. Dalam konteks ketenagalistrikan, peramalan umumnya mencakup perkiraan terhadap kebutuhan energi listrik (Wh) serta prediksi beban listrik (W), yang dikenal sebagai demand and load forecasting. Hasil dari peramalan ini digunakan sebagai dasar dalam menyusun rencana pemenuhan kebutuhan energi, serta dalam merancang pengembangan sistem penyediaan tenaga listrik agar dapat berlangsung secara berkelanjutan, memadai, dan andal.

### 2.1. Jaringan Tegangan Rendah

Jaringan distribusi sekunder, atau yang dikenal juga sebagai jaringan distribusi tegangan rendah (JDTR), merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang langsung terhubung dengan konsumen. Oleh karena itu, tegangan yang digunakan pada jaringan ini adalah 130/230 V dan 130/400 V pada sistem lama, serta 230/400 V pada sistem yang lebih baru. Tegangan 130 V dan 230 V merujuk pada tegangan antara fasa dan netral, sedangkan tegangan 400 V merupakan tegangan antara fasa yang satu dengan fasa lainnya. Konstruksi tiang untuk jaringan distribusi sekunder dapat dilihat pada “Gambar 1” berikut.



Gambar 1. Jaringan distribusi sekunder 220 V

### 2.2. Kurva Beban dan Beban Puncak

Kurva beban digunakan untuk menunjukkan variasi beban pada suatu gardu dalam satuan kW, Ampere, atau kVA terhadap waktu. Interval waktu pengukuran disesuaikan dengan tujuan penggunaannya. Interval 30 atau 60 menit sering digunakan untuk menentukan kapasitas suatu rangkaian. Umumnya, pengukuran beban dilakukan dalam interval waktu 15 menit, 30 menit, satu hari, atau bahkan satu minggu. Kurva beban memperlihatkan permintaan (*demand*) atau kebutuhan energi listrik pada berbagai rentang waktu yang berbeda. Dengan menggunakan kurva ini, nilai beban maksimum dapat diidentifikasi, yang selanjutnya dapat dijadikan dasar untuk menentukan kapasitas pembangkitan yang dibutuhkan.

Kepadatan beban digunakan sebagai salah satu indikator dalam menentukan kebutuhan listrik di suatu wilayah. Ukurannya biasa dinyatakan dengan satuan MVA/km<sup>2</sup> atau KVA/m<sup>2</sup>, dengan MVA/km<sup>2</sup> sebagai satuan yang paling umum digunakan. Beban puncak didefinisikan sebagai beban tertinggi yang terjadi dalam suatu periode waktu tertentu harian, bulanan, atau tahunan. Untuk periode harian, yang dimaksud adalah variasi beban pada transformator distribusi selama satu hari penuh.

Penting untuk memahami bahwa beban puncak merupakan nilai rata-rata beban dalam rentang waktu tertentu ketika beban maksimum terjadi, bukan nilai sesaat. Sebagai contoh, jika beban tertinggi pada suatu transformator distribusi terjadi antara pukul 19.00 (titik A) hingga pukul 20.00 (titik B), maka nilai rata-rata antara titik A dan B merepresentasikan kebutuhan puncaknya. Rentang waktu yang digunakan untuk menghitung rata-rata beban puncak ini umumnya 15 menit, 30 menit, atau satu jam.

### 2.3. Susut Tegangan

Susut tegangan adalah selisih antara tegangan pada pangkal pengiriman (E) dan tegangan pada ujung penerima (V) tenaga listrik.

$$E = V + \Delta V \quad (1)$$

Keterangan:

E = tegangan di pangkal pengiriman (*sending end*)

V = tegangan di ujung penerima (*receiving end*)

$\Delta V$  = susut tegangan (*losses*)

Pada sistem tenaga listrik bolak-balik besarnya tergantung dari Z (impedansi) dan Y (admitansi) jaringan serta pada beban dan faktor daya ( $\cos \phi$ ). Susut tegangan relatif dinamakan regulasi tegangan (*voltage regulation*), dan dinyatakan oleh rumus:

$$VR = \frac{E-V}{E} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan:

E = tegangan pada pangkal pengiriman (*sending end*)

V = tegangan pada ujung penerimaan (*receiving end*)

VR = regulasi tegangan (*voltage regulation*)

Untuk jarak dekat regulasi tegangan tidak berarti (hanya beberapa % saja), tetapi untuk jarak sedang dan jauh dapat mencapai 5% ÷ 15%. Berdasarkan pernyataan tentang susut tegangan, maka dapat dirumuskan besarnya tegangan di pelanggan berikutnya (V) apabila mengalami susut tegangan adalah sebagai berikut [19].

Susut Trafo Distribusi,

$$Susut\ Trafo = 3\% \times E \quad (3)$$

Susut Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR),

$$Susut\ TR = 4\% \times E \quad (4)$$

Susut Sambungan Rumah (SR),

$$Susut\ SR = 1\% \times E \quad (5)$$

sehingga jika pelanggan (V) mengalami susut ketiganya, dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$V = E - (3\% \times E) - (4\% \times E) - (1\% \times E) \quad (6)$$

Pelanggan sebelumnya (E) apabila ditinjau dari tegangan pengukuran (V) yang dijadikan sebagai tegangan sumber acuan, maka dapat mengalami kenaikan tegangan sesuai besarnya susut yang dinyatakan oleh Markoni, 2018. Besarnya kenaikan tegangan berdasarkan regulasi tegangan (*Voltage Regulation*) tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$E = V / (100\% - VR\%) \quad (7)$$

dengan nilai susut tegangan dalam bentuk persentase (VR) di transformator distribusi 3%, saluran udara tegangan rendah (SUTR) 4% dan sambungan rumah (SR) 1%.

#### 2.4. Rantai Markov

Banyak fenomena acak yang ditemui dalam investigasi keandalan sistem tenaga dapat dijelaskan oleh variabel acak yang bergantung waktu, yang disebut proses stokastik dan dilambangkan sebagai  $X(t)$ . Ruang keadaan dan ruang parameter (biasanya waktu) dari suatu proses stokastik dapat bersifat kontinu atau diskrit. Oleh karena itu, proses stokastik dapat dibagi menjadi empat kategori:

1. Waktu diskrit (parameter) dan keadaan
2. Waktu kontinyu, keadaan diskrit
3. Waktu diskrit, keadaan kontinyu
4. Waktu dan keadaan berkelanjutan

Hanya kategori 1 dan 2 yang terlibat dalam investigasi keandalan sistem tenaga.

Proses stokastik  $X(t)$  dapat dijelaskan dengan probabilitas bersyarat. Distribusi variabel acak  $X(t_n)$  bergantung pada semua saat lampau  $t_i$  ( $1 \leq i \leq n-1$ ). Untuk kasus waktu diskrit (selanjutnya  $X(t_i)$  ditulis dengan mudah sebagai  $X_i$ ), probabilitas dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P[X_n = x_n | (X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_{n-1} = x_{n-1})] \quad (8)$$

Jika distribusi  $X$  hanya berhubungan dengan keadaan terkini dan tidak ke keadaan sebelumnya, yaitu ekspresi di atas menjadi

$$P(X_n = x_n | X_{n-1} = x_{n-1}) \quad (9)$$

$$P(X_n = x_n | X_{n-1} = x_{n-1}) \quad (10)$$

maka  $X$  adalah proses Markov atau proses kehilangan memori.

Proses Markov dengan waktu dan ruang keadaan diskrit biasanya disebut rantai Markov. Proses semacam ini dapat dijelaskan oleh probabilitas bersyarat dalam Persamaan (5). Untuk singkatnya, ini menunjukkan keadaan sekarang dengan  $i$  dan keadaan berikutnya dengan  $j$ ; maka Persamaan (11) menjadi

$$P[X_n = x_n | (X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_{n-1} = x_{n-1})] \quad (12)$$

di mana  $p_{ij}^{(n)}$  adalah probabilitas transisi dari keadaan  $i$  ke keadaan  $j$  pada langkah  $n$ . Jika probabilitas transisi tidak bergantung pada waktu  $t$ , dalam kasus proses Markov, atau  $n$ , dalam kasus rantai Markov, maka dikatakan bahwa rantai tersebut homogen terhadap waktu. Hanya rantai Markov homogen yang terlibat dalam analisis keandalan sistem daya yang akan datang.

$P_{ij}$  disebut probabilitas transisi satu langkah karena transisi dari keadaan  $i$  ke keadaan  $j$  di atas diselesaikan dalam satu langkah atau bisa disebut dengan lamda ( $\lambda$ ) [20]. Jika ada  $n$  keadaan, probabilitas transisi satu langkah dapat ditulis dalam bentuk matriks:

$$P = [p_{ij}] = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

dimana  $p_{ij} \geq 0$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, n$ :

$$\sum_{i=1}^n p_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

Persamaan (2.5) mendefinisikan sifat matriks stokastik.

Jika transisi dari keadaan  $i$  ke keadaan  $j$  memerlukan  $m$  langkah, maka

$$p_{ij}^{(m)} = p(X_{n+m} = j | X_n = i) \quad (15)$$

disebut probabilitas transisi  $m$ -langkah. Dapat dibuktikan bahwa probabilitas transisi  $m$ -langkah dapat dinyatakan dengan menggunakan matriks probabilitas transisi satu langkah:

$$P^{(m)} = P^m \quad (16)$$

Jika vektor probabilitas keadaan awal suatu proses adalah

$$P(0) = [P_1(0), P_2(0), \dots, P_n(0)] \tag{17}$$

maka vektor probabilitas memberikan probabilitas memulai proses dalam keadaan  $i$  dan memasuki keadaan  $j$  setelah  $m$  langkah diberikan oleh

$$P^{(m)} = P(0)P^m \tag{18}$$

Ketika suatu proses dimulai dari keadaan yang ditunjuk  $i$  biasanya memiliki  $p_i(0)$  sama dengan 1 dan setiap komponen lainnya sama dengan 0 untuk semua komponen  $P(0)$ .

**2.5. Akurasi Prediksi**

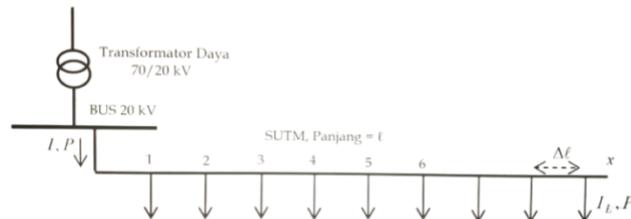
MAPE adalah singkatan dari Mean Absolute Percentage Error, yang merupakan metrik untuk mengukur tingkat kesalahan prediksi dalam suatu model. Secara sederhana, MAPE menunjukkan seberapa jauh nilai prediksi menyimpang dari nilai sebenarnya, dinyatakan dalam persentase. MAPE menghitung selisih absolut antara nilai prediksi dan nilai sebenarnya, kemudian membagi hasilnya dengan nilai sebenarnya, dan mengalikannya dengan 100% untuk mendapatkan persentase kesalahan.

$$MAPE = \frac{\sum |A-F|/A}{N} \times 100\% \tag{19}$$

Semakin kecil nilai MAPE, semakin akurat model peramalan tersebut. MAPE di bawah 10% biasanya dianggap sangat baik, 10-20% dianggap baik, dan di atas 20% mungkin perlu perbaikan [8].

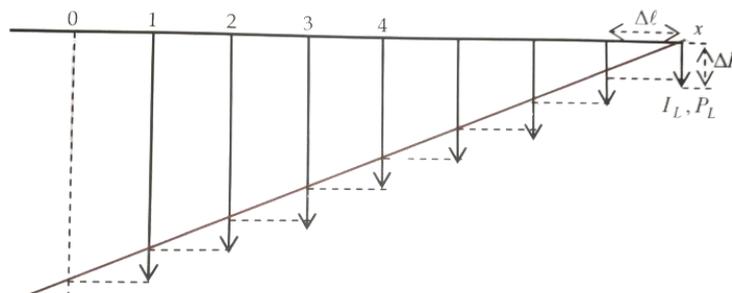
**2.6. Momen Beban Terdistribusi Rata**

Berdasarkan SOP P2TL mengukur tegangan ujung TM dan TR memang perlu melakukan 2 kali pengukuran [21]. Pengukuran pertama dilakukan pada papan bagi JTR atau di terminal sekunder trafo distribusi (khususnya trafo CSP) dengan AVO tang meter. Kedua, pengukuran tegangan ujung dapat dilakukan dengan memasang tangga pada JTR lalu mengukur tegangannya atau bisa juga dengan melakukan pengukuran pada pelanggan terdekat yang tersambung pada JTR tersebut. Namun apabila beban terdistribusi sama rata di sepanjang jaringan pada SUTM, sama halnya pada JTR di daerah pedesaan dengan kebutuhan daya terpasang yang relatif sama di 450 VA dan 900 VA, maka momen beban adalah jumlah superposisi momen beban seksi atau momen beban di titik-titik sepanjang jaringan SUTR [19].



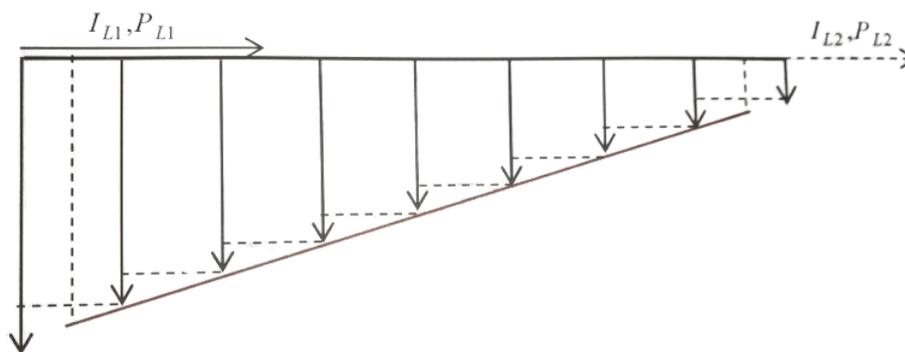
Gambar 2. SUTM dengan beban terdistribusi sama rata sepanjang jaringan

Jika distribusi beban sangat merata, semakin ke arah ujung jaringan beban menjadi nol sehingga luas bidang momen beban sama dengan luas segitiga.



Gambar 3. Momen beban terdistribusi sama rata, beban di ujung jaringan sangat kecil

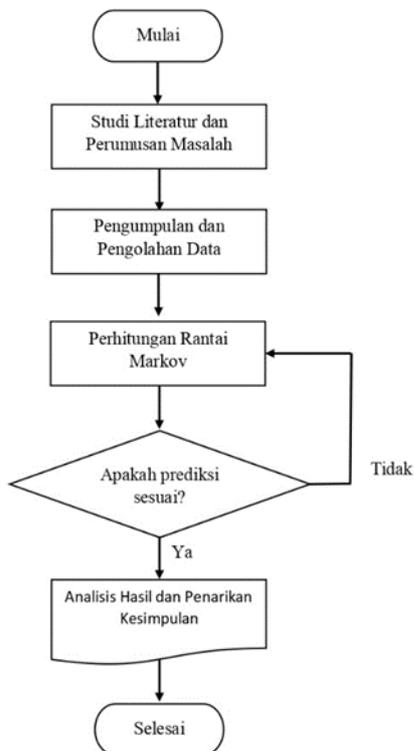
Namun dalam kenyataan beban di ujung jaringan tidak nol, sehingga luas bidang momen beban tidak lagi segitiga tetapi trapesium. Momen terdistribusi sama rata dan ada beban di ujung jaringan.



Gambar 4. Momen terdistribusi sama rata dan ada beban di ujung jaringan

**3. METODE PENELITIAN**

Penelitian dilaksanakan di satu unit rumah pelanggan yang melanggan jaringan tegangan rendah dengan tarif R1M daya 900 VA. Rumah tinggal tersebut berada di daerah pedesaan dengan kebutuhan tegangan catu untuk setiap pelanggan relatif sama. Lokasi ini berada di antara tarikan trafo distribusi dengan tarikan pelanggan terakhir dan dapat menjadi acuan untuk menentukan nilai tegangan kirim dari sisi trafo dan tegangan terima dari sisi pelanggan di tarikan terakhir tanpa harus mengukur kedua tempat tersebut [22]. Populasi dari penelitian ini adalah keseluruhan nilai tegangan setiap jam pada satu unit rumah pelanggan dengan tarif R1M daya 900 VA dalam 1 minggu. Nilai tegangan setiap jam selama 5 hari merupakan sampel yang dianggap dapat mewakili populasi tersebut [23]. Penelitian ini memiliki beberapa tahapan yang diawali perumusan masalah, melakukan kajian pustaka, pengumpulan data, analisis data, interpretasi hasil dan penarikan kesimpulan dengan uraian sebagai berikut dan dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 2. Tahapan penelitian

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses Markov dipilih untuk menghindari kebutuhan penggunaan banyak data yang diambil dalam peramalan berbasis deret waktu memungkinkan hasil yang lebih cepat [8]. Nilai tegangan per jam selalu berubah sesuai dengan kebutuhan konsumen sejalan dengan prinsip Rantai Markov (stokastik/acak). Pengukuran tegangan per jam telah dilakukan dan perhitungan nilai standar deviasi dari masing-masing data tegangan per jam di bawah 5%. Ini merupakan langkah pertama untuk uji validitas dan membuktikan bahwa data dinyatakan valid [23]. Data tegangan setiap jam di ambil nilai rata-ratanya, kemudian diuji kembali menggunakan uji stasioneritas dan autokorelasi. Meskipun terdapat data dengan nilai signifikansi lebih dari 5%, data ini tetap dianggap valid dan dapat digunakan untuk perhitungan karena tegangan setiap jamnya menunjukkan reliabilitas interpretasi data [24].

Perhitungan nilai tegangan telah dilakukan sesuai dengan Proses Markov [25]. Penentuan state/kondisi dari Proses Markov tersebut telah disesuaikan dengan SPLN 1, 1995 dengan membagi rentang tegangan setiap 5% [13]. Pembagian rentang ini dilakukan dengan memperhatikan pengaruh perubahan *tap changer* trafo distribusi yang digunakan untuk mengatur tegangan di sisi pelanggan agar sesuai dengan rekomendasi tegangan terminal dan tegangan pemanfaatan pada SNI 04 – 0227 – 2003 tentang “Tegangan Standar”. Penyusunan dan perhitungan matrik peluang transisi telah sesuai dengan Proses Markov [26]. Hasil Proses Markov menghasilkan distribusi peluang nilai tegangan pada hari berikutnya sesuai dengan distribusi peluang pada penelitian sebelumnya. Namun, terdapat hasil yang tidak sesuai, yaitu pada perhitungan prediksi Hari Sabtu. Hal ini karena nilai tegangan pada hari sebelumnya tidak memiliki distribusi stasioner tetap yang bukan nol. Ini menyebabkan bobot dari C tersebar ke keadaan lain yang tidak sesuai dengan Kaidah Markov [12].

Prediksi nilai tegangan menunjukkan bahwa sebagian besar nilai tegangan pada setiap jamnya berada pada peringkat C. Ini berarti tegangan berada dalam rentang antara 221 V sampai dengan 231 V. Hasil ini sesuai dengan standar yang ada [27]. Namun, masih terdapat nilai tegangan hasil prediksi yang nilai susutnya melebihi dari yang diperbolehkan. Nilai tegangan lebih yang melebihi standar yang diperbolehkan juga masih ada [3]. Oleh karena itu, kedepannya diperlukan koreksi dan evaluasi terhadap nilai tegangan tersebut. Ini merupakan langkah yang penting untuk menghindari pengambilan keputusan yang salah dan menyebabkan tegangan sistem berada di luar rentang yang diperbolehkan [28]. Meskipun, hasil prediksi berbeda dengan pengukuran sebenarnya dan pada hasil pengukuran menunjukkan hasil yang masih sesuai dengan standar hal ini juga dapat menjadi kajian yang menarik pada penelitian berikutnya.

##### 4.1. Prediksi nilai tegangan hari berikutnya menggunakan Rantai Markov

Langkah pertama untuk menuju ke proses Rantai Markov adalah menentukan state/kondisi dari sistem. Kondisi ini dibagi menjadi peringkat A, B, C, dan D. Pembagian rentang klasifikasi ini didasarkan pada SNI 04-0227-2003 tentang “Tegangan Standar” yang menyebutkan bahwa dengan memperhatikan julat tegangan suplai, pada kondisi pelayanan normal disarankan agar tegangan pada terminal suplai perbedaannya tidak boleh lebih besar dari  $\pm 10\%$  dari tegangan nominal sistem. Apabila dilihat kembali pada SPLN D3.002-2:2008 yang menjelaskan tentang spesifikasi transformator distribusi, maka pengaturan tegangan dapat dilakukan dengan pengaturan posisi sadapan tanpa tegangan. Penyadapan pada belitan primer transformator dengan pengaman sendiri fase tunggal  $20/\sqrt{3} - 231/462$  V dengan tipe 1: 5 langkah, julat sadapan  $\pm 2 \times 2,5\%$  sadapan No. 3 adalah sadapan utama. Berikut adalah tabel tegangan sadapan dan pembagian kondisi menggunakan Rantai Markov.

Tabel 1. Tabel sadapan dan pembagian kondisi

No. sadapan	1	2	3	4	5
Tegangan sisi primer (kV)	$21/\sqrt{3}$	$20,5/\sqrt{3}$	$20/\sqrt{3}$	$19,5/\sqrt{3}$	$19/\sqrt{3}$
Tegangan sisi sekunder (V)	232 – 242	221 – 231	220 (tegangan ideal)	209 – 220	198 – 208
Pembagian Rantai Markov	D	C	(sadapan utama tidak perlu diubah)	B	A

Peringkat A mengindikasikan terjadinya susut tegangan yang lebih parah yang menjadi peringatan bahwa tegangan akan berada di luar rentang yang diperbolehkan yaitu,  $-10\%$  dari 220 V antara 198 V sampai dengan 208 V. Peringkat B mengindikasikan terjadinya susut tegangan, tetapi masih dalam rentang yang diperbolehkan oleh sistem yaitu,  $-5\%$  dari 220 V antara 209 V sampai dengan 220 V. Peringkat C mengindikasikan terjadinya tegangan lebih, tetapi masih dalam rentang yang diperbolehkan oleh sistem  $+5\%$  dari 220 V antara 221 V sampai dengan 231 V. Peringkat D mengindikasikan terjadinya

tegangan lebih yang lebih tinggi yang menjadi peringatan bahwa tegangan akan melebihi dari rentang yang diperbolehkan, +10% dari 220 V antara 231 sampai dengan 242 V.

Tabel 2 menunjukkan jumlah nilai tegangan pada peringkat A ( $198 < x < 208$ ) adalah tetap. Sedangkan, jumlah nilai tegangan peringkat B ( $209 < x < 220$ ) yang pada awalnya memiliki jumlah 9 tegangan berpindah ke peringkat lainnya sebanyak 8 tegangan pada peringkat C ( $221 < x < 231$ ). Di saat yang sama, tidak ada tegangan dari peringkat yang lain yang berpindah menjadi peringkat B. Pada akhir periode atau awal periode kedua, jumlah tegangan peringkat B sebanyak 1 tegangan ( $9 - 8$ ).

Tabel 2. Perpindahan nilai tegangan senin ke selasa

Nilai Tegangan (V)	Jumlah Periode I	Perubahan Selama Periode		Jumlah Periode II
		Pindah Ke	Pindah Dari	
A (198 – 208)	0	0	0	0
B (209 – 220)	9	8	0	1
C (221 – 231)	12	0	9	21
D (232– 242)	3	1	0	2
<b>Total</b>	<b>24</b>			<b>24</b>

Penjabaran dari perpindahan nilai tegangan Tabel 2 dapat dilihat pada Tabel 3 yang menunjukkan pola dari masing-masing perpindahan nilai tegangan hari ke hari.

Tabel 3. Pola perpindahan nilai tegangan senin ke selasa

Nilai Tegangan	Jumlah Periode I	Tambahkan Dari				Pengurangan Ke				Jumlah Periode II
		A	B	C	D	A	B	C	D	
A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
B	9	0	0	0	0	0	0	8	0	
C	12	0	8	0	1	0	0	0	0	
D	3	0	0	0	0	0	0	1	0	
<b>Total</b>	<b>24</b>									<b>24</b>

Tabel 4 menunjukkan perpindahan tegangan dalam bentuk transisi. Ini meliputi penambahan dan pengurangan nilai dari dan ke masing-masing state/kondisi.

Tabel 4. Transisi nilai tegangan senin ke selasa

Nilai Tegangan Periode I	Periode II				Total
	A	B	C	D	
A	0	0	0	0	0
B	0	1	8	0	9
C	0	0	12	0	12
D	0	0	1	2	3
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>21</b>	<b>2</b>	<b>24</b>

Tabel 5 menunjukkan perpindahan dalam probabilitas. Masing-masing perpindahan nilai dibagi dengan jumlah periode sebelumnya menghasilkan nilai probabilitas.

Tabel 5. Probabilitas transisi tegangan senin ke selasa

Nilai Tegangan Periode I	Periode II			
	A	B	C	D
A	0	0	0	0
B	0	0,111	0,889	0
C	0	0	1	0
D	0	0	0,333	0,666

Matriks Probabilitas Transisi Hari Senin ke Selasa (P)

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0,000 & 0,000 \\ 0 & 0,111 & 0,889 & 0,000 \\ 0 & 0 & 1,000 & 0,000 \\ 0 & 0 & 0,333 & 0,666 \end{bmatrix}$$

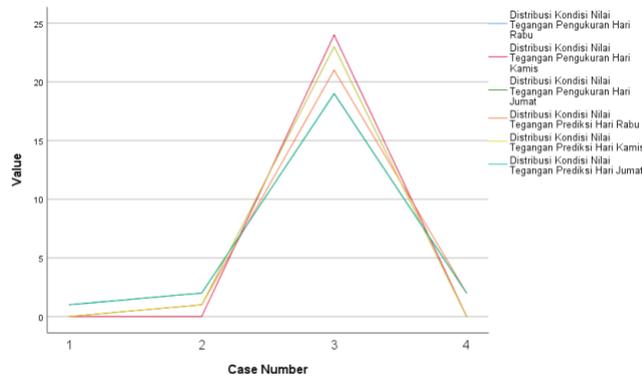
Distribusi Awal ( $v_0$ )

$$v_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 9/24 \\ 12/24 \\ 3/24 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,375 \\ 0,5 \\ 0,125 \end{bmatrix}$$

$$v_1 = [0 \quad 0,375 \quad 0,5 \quad 0,125] \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0,000 & 0,000 \\ 0 & 0,111 & 0,889 & 0,000 \\ 0 & 0 & 1,000 & 0,000 \\ 0 & 0 & 0,333 & 0,666 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,041625 \\ 0,875125 \\ 0,08325 \end{bmatrix}$$

Perhitungan distribusi dengan Rantai Markov pada periode 1 diperoleh hasil peringkat A mendapat 0, peringkat B mendapat 0,041625, peringkat C mendapat 0,875125, dan peringkat D mendapat hasil 0,08325. Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, maka 87,5% x 24 jam atau sekitar 21 jam di hari Rabu nilai tegangan akan berada pada peringkat C atau dalam rentang 221 V sampai dengan 231 V. Sisanya, yaitu 4,1% x 24 jam atau sekitar 1 jam di hari Rabu nilai tegangannya akan berada di peringkat B atau dalam rentang 209 V sampai dengan 220 V dan 8,3% x 24 jam atau sekitar 2 jam akan berada di peringkat D atau dalam rentang 232 V sampai dengan 242 V. Tidak adanya nilai pada peringkat A dan B menunjukkan bahwa nilai tegangan pada rentang 198 V sampai dengan 220 V tidak akan muncul atau berkemungkinan kecil untuk muncul pada hari berikutnya, hari Rabu.

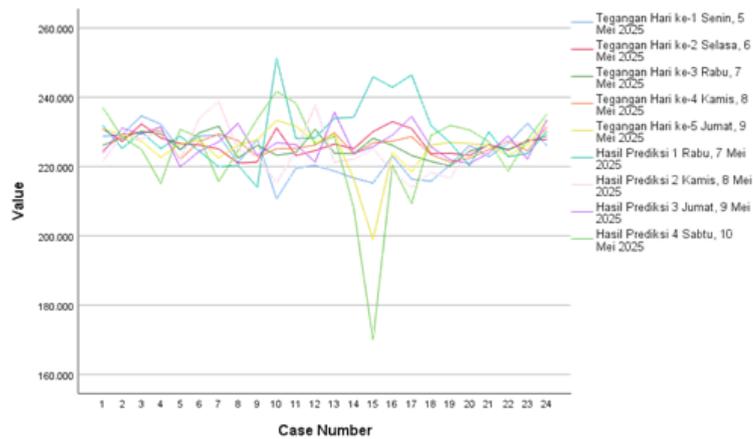
Hasil prediksi dibandingkan dengan hasil pengukuran sebenarnya pada hari berikutnya didapatkan hasil perbandingan akurat mencapai sebesar 87,5% yaitu peringkat C yang pasti terjadi dan sudah terjadi nilai tegangan pada rentang 221 V sampai dengan 231 V terjadi selama 21 jam pada hari itu. Sisanya, 12,5% adalah ketidakpastian variabel karena pada hari berikutnya ada nilai tegangan ada yang turun ke peringkat B pada rentang 209 V sampai dengan 220 V pada 1 jam tertentu, yaitu pada pukul 19:00. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan diperoleh perbandingan distribusi kondisi dari nilai tegangan prediksi menggunakan Rantai Markov dengan pengukuran sebenarnya yang dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 3. Perbandingan hasil prediksi dan pengukuran

#### 4.2. Prediksi nilai tegangan per jam menggunakan $\lambda$

Nilai Tegangan pada hari berikutnya dapat diprediksi dengan menggunakan perhitungan selisih atau  $\lambda$ . Perhitungan tersebut dapat dilakukan dengan menghitung selisih nilai tegangan pada dua hari sebelum hari yang ditentukan. Selisih kemudian dijumlahkan atau dikurangkan dengan nilai tegangan hari terakhir. Hasil perhitungan berupa nilai tegangan per jam. Hasil prediksi nilai tegangan per jam telah diketahui. Hasil tersebut kemudian dibandingkan dengan nilai aktual tegangan pada hari yang sama. Perbandingan hasil prediksi dan nilai aktual menghasilkan selisih yang menjadi ukuran akurasi. Nilai akurasi digunakan sebagai bahan pertimbangan untuk pengambil keputusan sebagai koreksi pengaturan tegangan di waktu berikutnya. Hasil prediksi dan hasil pengukuran tersebut disajikan dalam bentuk grafik garis dan dapat dilihat pada Gambar 7 berikut.



Gambar 4. Perbandingan hasil prediksi dan pengukuran

Nilai aktual dan prediksi nilai tegangan per jam diuji menggunakan MAPE untuk mengetahui seberapa jauh nilai prediksi menyimpang dari nilai sebenarnya. Hasil MAPE tersebut berturut-turut dari hari Rabu, Kamis, dan Jumat adalah 3.567663813, 1.819390053, 2.79196468. Semua nilai MAPE di bawah 5% yang menunjukkan kriteria dari akurasi prediksi yang sangat baik.

**4.3. Nilai tegangan saat waktu beban puncak**

Perhitungan rata-rata nilai tegangan saat waktu beban puncak dari Hari Senin, 5 Mei 2025 sampai dengan Jumat, 9 Mei 2025 dapat dilihat pada Tabel 4.6. Nilai ini jika dibandingkan dengan standar tegangan yang ada, SNI 04-0227-2003 (-15% ÷ +10%) sudah sesuai. Namun, beberapa saat sebelum dan sesudah beban puncak terdapat tegangan yang mungkin menyebabkan tidak sesuai dengan standar apabila diperhatikan lebih lanjut.

Tabel 6. Rata-rata nilai tegangan saat waktu beban puncak (V)

Hari ke-1	Hari ke-2	Hari ke-3	Hari ke-4	Hari ke-5
222.49990	227.12460	225.04660	225.80310	222.98560

Tegangan pukul 23:00 di Hari Senin, 5 Mei 2025 sesudah waktu beban puncak nilainya adalah 231 V dan pukul 15:00 di Hari Jumat, 9 Mei 2025 sebelum waktu beban puncak nilainya adalah 198 V. Untuk kasus tegangan lebih pada 231 V, dengan mempertimbangkan susut di saluran udara tegangan rendah (SUTR) 4% dan sambungan rumah (SR) 1% maka nilai tegangan pelanggan di sisi sumber (E) berdasarkan uraian diatas, yaitu:

$$E = (231 V) / (100\% - 1\% - 4\%)$$

$$E = (231 V) / (95\%)$$

$$E \approx 243 V$$

Jadi, tegangan pelanggan yang berada di dekat sumber atau trafo distribusi adalah 243 V lebih besar dari rentang standar yang diperbolehkan, 242 V.

Kasus susut di bawah standar pada 198 V kemudian dihitung. Apabila diperhitungkan nilai susutnya hanya pada kabel SR saja, maka tegangan di sisi pelanggan berikutnya sampai ke ujung akan mengalami susut sebesar 1% di setiap titik konektornya. Selanjutnya jika pelanggan tersebut berada pada tarikan tiang berikutnya akan mengalami susut sebesar 4% di setiap tiangnya, yaitu:

$$V = 198 V - (1\% \times 198 V) - (4\% \times 198 V)$$

$$V = 198 V - 2 V - 8 V$$

$$V \approx 188 V$$

Jadi, tegangan pelanggan di titik ujung adalah sebesar 188 V yang lebih rendah daripada standar yang diizinkan, 198 V. Perhitungan tegangan lebih dan susut tegangan tersebut merupakan hasil perkiraan berdasarkan persentase susut di saluran udara tegangan rendah (SUTR) 4% dan sambungan rumah (SR) 1% dalam keadaan beban terdistribusi merata [19]. Ini merupakan tegangan sesaat sistem yang tidak memenuhi standar yang diperhitungkan berdasarkan pengukuran waktu normal. Meskipun tegangan kembali normal dengan nilai 225 V pada pukul 24:00 di Hari Senin, 5 Mei 2025 dan 223 V pukul 15:00 di Hari Jumat, 9 Mei 2025, nilai ini menjadi bahan pertimbangan untuk evaluasi bagi penyedia tenaga listrik.

## 5. KESIMPULAN

Berdasarkan data yang telah didapatkan dan hasil perhitungan yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa prediksi tegangan pada hari berikutnya menggunakan Rantai Markov memiliki akurasi yang sangat baik dengan hasil MAPE di bawah 5%. Distribusi nilai tegangan pada periode berikutnya dominan di peringkat C (rentang 221 V – 231 V) menjadi bahan pertimbangan untuk pengaturan tegangan sadapan. Analisis Markov menghasilkan suatu informasi probabilistik yang dapat digunakan untuk membantu pembuatan keputusan dalam distribusi tenaga listrik khususnya untuk menjaga keandalan dan kualitas melalui pengaturan tegangan. Rantai Markov cukup fleksibel untuk digunakan karena kondisi yang dapat disesuaikan, serta perhitungan relatif cepat dibandingkan dengan metode lain karena hanya dengan menghitung probabilitas transisi dapat langsung dihitung hasil distribusi dari kondisi pada periode berikutnya. Namun, terdapat kelemahan pada metode ini. Kelemahan tersebut, yaitu jika terdapat satu distribusi pada satu kondisi dan yang lain seluruhnya bernilai nol atau tidak mengalami perubahan, maka Proses Markov akan berhenti bertransisi dan semua kondisi perlahan-lahan akan menuju nilai nol. Penelitian berikutnya dapat disarankan menggunakan data tegangan yang lebih banyak dan bervariasi pada peramalan jangka menengah atau jangka panjang agar perhitungan Rantai Markov tidak bernilai nol.

## REFERENSI

- [1] M. Amir dan I. A. Winarno, "Analisis Susut Tegangan Saluran Transmisi Tegangan Ekstra Tinggi 500 kV," *Sinusoida*, vol. 22, no. 2, pp. 1–9, 2020.
- [2] M. D. C. Ramadhan, N. L. B. Ginting, H. N. Muflih, N. R. D. K. Ningrum, dan C. F. Nugraha, "Perbaikan Jaringan Tegangan Rendah Dengan Sisip Trafo Distribusi Fase Tunggal Untuk Mengurangi Overload dan Jatuh Tegangan PT PLN (Persero) ULP Yogyakarta Kota," *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 22, no. 2, 2024.
- [3] H. L. Latupeirissa, H. M. Muskita, dan T. J. Tahalele, "Analisa Susut Daya Pada Sistem Distribusi Jaringan Tegangan Menengah," *J. Simetrik*, vol. 10, no. 1, pp. 313–321, 2020.
- [4] C. Chalimatusadiah, D. C. Lesmana, dan R. Budiarti, "Penentuan Harga Opsi Dengan Volatilitas Stokastik Menggunakan Metode Monte Carlo," *Jambura J. Math.*, vol. 3, no. 1, pp. 80–92, 2021.
- [5] S. Kustiara, I. M. Nur, dan T. W. Utami, "Arch Garch Method of Forecasting Consumer Price Index (Cpi) in Semarang," *J. Litbang Edusaintech*, vol. 1, no. 1, pp. 14–22, 2020.
- [6] F. Yudita, D. Purbayanti, F. H. Ramdhani, dan E. Jaya, "Evaluasi Kontrol Kualitas Pemeriksaan Glukosa Darah di Laboratorium X Palangka Raya," *Borneo J. Med. Lab. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 358–365, 2023.
- [7] L. M. K. Amali, Y. Mohamad, A. I. Tolago, N. Elysiantobuo, dan A. Y. Dako, "Analisis Konsumsi Energi Listrik Menggunakan Metode Internsitas Konsumsi Energi," *Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 6, no. 1, 2024.
- [8] E. D. Aruna, B. Fatkhurrozi, dan A. A. Kurniawan, "Peramalan Beban Listrik Kabupaten Cilacap," *ULIL ALBAB J. Ilm. Multidisiplin*, vol. 3, no. 2, 2024.
- [9] S. N. Dina, "Analisis Peramalan Beban Transformator Jaringan Distribusi Pada PT. PLN ULP Ambulu Penyulang Jatimulyo Menggunakan Regresi Linier," *Dielektrika*, vol. 8, no. 1, p. 60, 2021.
- [10] N. Hidayati, "Perbandingan Model Asymmetric Power Arch Dengan Threshold Garch Dalam Peramalan Kurs Poundsterling Terhadap Kurs Rupiah," *MATHunesa J. Ilm. Mat.*, vol. 12, no. 1, pp. 11–20, 2024.
- [11] A. S. Ari dan U. Budiyanto, "Prediksi Jumlah Produksi Perakitan Komponen Menggunakan ANFIS Yang Dioptimasi Dengan Algoritma K-Means," *CogITo Smart J.*, vol. 9, no. 2, pp. 252–265, 2023.
- [12] A. Nadhiroh N, S. U. Rahayu, M. Qiptiah, M. Misdayanti, dan D. R. Valencia, "Implementasi Penerapan Rantai Markov Chain Dalam Memprediksi Pemilihan Minat Masuk Ke Perguruan Tinggi Di Probolinggo," *J. Sains dan Teknol.*, vol. 5, no. 3, pp. 746–752, 2024.
- [13] S. Latifah dan Y. P. Astuti, "Penerapan Rantai Markov Dalam Menganalisis Persaingan Jasa Pengiriman Barang (Ekspedisi)," *MATHunesa J. Ilm. Mat.*, vol. 9, no. 3, pp. 458–465, 2021.
- [14] A. S. Phasa dan Y. P. Astuti, "Analisis Perilaku Brand Switching Dengan Metode Rantai Markov," *MATHunesa J. Ilm. Mat.*, vol. 9, no. 1, pp. 212–219, 2021.
- [15] I. D. N. A. Manuaba, I. B. G. Manuaba, dan M. Sudarma, "Komparasi Metode Peramalan Grey dan Grey-Markov untuk mengetahui Peramalan PNBPN di Universitas Udayana," *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 21, no. 1, p. 83, 2022.
- [16] R. D. Saputra, "Peningkatan Akurasi Penggunaan Daya Aktif Kepada Pelanggan Potensial PLN ULP Batu Melalui Pengukuran Tidak Langsung," *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 12, no. 1, 2024.
- [17] D. Fauziah, M. W. Agustian, and N. Hariyanto, "Optimasi Tegangan Jatuh dan Rugi Daya pada Saluran Distribusi 20 KV ULP Sukaraja," *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 12, no. 1, 2024.
- [18] C. A. Sihombing, S. Handoko, dan D. Darjat, "Perancangan Perbaikan Kualitas Daya Untuk Mitigasi Ketidakseimbangan Tegangan Dan Arus Dan Mitigasi Nilai Faktor Daya Di Departemen Teknik Kimia," *Transient J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 12, no. 3, 2023.
- [19] Markoni, *Operasi Sistem dan Pemeliharaan Jaringan Distribusi Tenaga Listrik*, 1st ed. Yogyakarta: iUntidar, 2018.
- [20] A. Akhdan dan A. Fauzy, "Pendekatan Rantai Markov Waktu Diskrit dalam Memprediksi Penurunan dan Kenaikan Jumlah Pelanggan Air Minum Baru PDAM Kota Surakarta," *Emerg. Stat. Data Sci. J.*, vol. 1, no. 2, 2023.
- [21] H. K. Adi, "Kajian Manajerial Efektifitas Pemeliharaan Jaringan Distribusi Menggunakan Uji ANOVA," *J. Tek. Mesin Sinergi*, vol. 20, no. 2, 2022.
- [22] S. S. Sudewanto, F. Hasan, dan M. A. Riyadi, "Pengukuran Listrik Jaringan Tegangan Rendah Secara Online dengan

- Mikrokontroler ESP32 di PLN UP3 Surabaya Selatan dan UP3 Surabaya Utara,” *TELKA - Telekomun. Elektron. Komputasi dan Kontrol*, vol. 9, no. 2, 2023.
- [23] S. Supardi, “Populasi dan Sampel Penelitian,” *Unisia*, vol. 13, no. 17, 1993.
- [24] A. D. A. Setya Budi, L. Septiana, dan B. E. Panji Mahendra, “Memahami Asumsi Klasik dalam Analisis Statistik: Sebuah Kajian Mendalam tentang Multikolinearitas, Heterokedastisitas, dan Autokorelasi dalam Penelitian,” *J. Multidisiplin West Sci.*, vol. 3, no. 01, 2024.
- [25] P. R. Novia, F. Rakhmawati, and R. Aprilia, “Metode Markov Chain Dalam Pengendalian Persediaan Untuk Perencanaan Biaya Persediaan Bahan Baku Pada Toko Airin Bakery & Cake Shop,” *J. Lebesgue J. Ilm. Pendidik. Mat. Mat. dan Stat.*, vol. 4, no. 1, pp. 391–401, 2023.
- [26] A. Shulhany, A. Fitriawati, D. Prariesa, Y. Y. Budiman, and K. A. Sasmito, “Penentuan Curah Hujan Menggunakan Rantai Markov Di Beberapa Daerah Provinsi Banten,” *STATMAT J. Stat. DAN Mat.*, vol. 4, no. 2, 2022.
- [27] D. Abdullah and B. Badaruddin, “Analisa Perbaikan Penampang Penghantar Guna Mengurangi Drop Tegangan dan Simulasi Etap 16.0 Pada JTR GD KRDB di Wilayah Kerja PT. PLN (Persero) ULP Serang Kota,” *J. Teknol. Elektro*, vol. 11, no. 1, 2020.
- [28] R. Shafira, C. Gagarin Irianto, and I. Kasim, “Analisa Jatuh Tegangan Pada Mass Rapid Transit (MRT) Jakarta,” *Jetri J. Ilm. Tek. Elektro*, 2022.