

PERAMALAN PENJUALAN ENERGI LISTRIK PRABAYAR RUMAH TANGGA MENGGUNAKAN MODEL VARMAX DI PLN UP3 BALIKPAPAN

Maria Goretti Indrawati Gunawan^{1,*}, Syamsir Abduh², Marwan Rosyadi³

^{1,2,3}Program Studi Magister Teknik Elektro, Institut Teknologi PLN, Jakarta, Indonesia

¹maria2310010@itpln.ac.id

²syamsir@itpln.ac.id

³marwanrosyadi@itpln.ac.id

Abstract— This study aims to forecast household prepaid electricity sales in PLN UP3 Balikpapan using the Vector Autoregressive Moving Average with Exogenous Variables (VARMAX) model, with endogenous variables of sales (kWh) and customer count, and exogenous variables of temperature, GRDP, and inflation. The prepaid segment is prioritized due to its rapid growth and dominance in the household customer base. Monthly data for the 2020–2024 period were analyzed through stationarity testing, optimal lag identification, parameter estimation, and residual diagnostics. Several model specifications were compared, and VARMAX(1,0,1) with exogenous lag $p=1$, $q=0$, and $s=1$ was selected as the best model, as it yielded the lowest AIC/SC values while satisfying stability and white-noise criteria.

The forecasting results for 2025–2028 indicate a consistent upward trend, with sales projected to increase from 570.96 million kWh to 737.38 million kWh, representing growth of +29.1% and a CAGR of 8.9%. The analysis also reveals that customer growth significantly influences sales at lag-1, while macroeconomic factors such as GRDP and inflation show significant effects, and temperature acts as a short-term seasonal factor. These findings confirm the relevance of VARMAX as a predictive tool to support energy planning, RKAP preparation, and data-driven managerial strategies within PLN.

Keywords— VARMAX, forecasting, electricity sales, prepaid customers, temperature, GRDP, inflation.

Intisari— Penelitian ini bertujuan meramalkan penjualan listrik rumah tangga prabayar di PLN UP3 Balikpapan menggunakan model *Vector Autoregressive Moving Average with Exogenous Variables* (VARMAX) dengan variabel endogen penjualan (kWh) dan jumlah pelanggan, serta variabel eksogen suhu, PDRB, dan inflasi. Fokus penelitian pada segmen prabayar karena pertumbuhannya yang pesat dan mendominasi populasi pelanggan rumah tangga. Data bulanan periode 2020–2024 dianalisis melalui uji stasioneritas, identifikasi lag optimal, estimasi parameter, dan diagnostik residual. Hasil identifikasi membandingkan beberapa spesifikasi model, di mana VARMAX(1,0,1) dengan lag eksogen $p=1$, $q=0$, dan $s=1$ dipilih sebagai model terbaik karena memiliki nilai AIC/SC terendah yang memenuhi syarat uji stabilitas serta bersifat *white noise*.

Hasil peramalan penjualan didapatkan untuk periode 2025–2028 yang menunjukkan tren meningkat secara konsisten, penjualan diproyeksikan naik dari 570,96 juta kWh menjadi 737,38 juta kWh atau bertumbuh +29,1% dan CAGR 8,9%. Dalam analisis ini juga menunjukkan bahwa pertumbuhan pelanggan berpengaruh signifikan terhadap penjualan pada lag-1, sementara faktor makroekonomi seperti PDRB dan inflasi terbukti signifikan, sementara suhu berperan sebagai faktor musiman jangka pendek. Temuan

ini menegaskan bahwa VARMAX relevan digunakan sebagai alat prediktif untuk mendukung perencanaan energi, penyusunan RKAP, serta strategi manajerial berbasis data di PLN.

Kata Kunci—VARMAX, peramalan, energi listrik, pelanggan prabayar, suhu, PDRB, inflasi.

I. PENDAHULUAN

Permintaan listrik rumah tangga di Balikpapan—kota penyangga IKN—terus meningkat, sementara layanan prabayar kian dominan karena kemudahan transaksi, ketiadaan denda keterlambatan, serta fungsi smart meter yang memungkinkan kendali konsumsi [1], [2], [3], [4]. Data operasional menunjukkan pada akhir 2024 pelanggan rumah tangga prabayar UP3 Balikpapan tumbuh $\pm 30\%$ dibanding 2020 dan mencapai 71,57% (~296.723 pelanggan); penjualan energi naik 43,57% dan pendapatan 51,46%, menegaskan urgensi peramalan yang andal untuk perencanaan dan penganggaran [5] [6].

Secara ilmiah, praktik peramalan nasional masih banyak bertumpu pada pendekatan univariat (ARIMA, regresi, pemulusan), sehingga interaksi antarvariabel dan pengaruh eksogen kurang tertangkap [7], [8], [9], [10]. Penelitian ini berupaya mengisi kesenjangan tersebut melalui penerapan model VARMAX, yang mampu memodelkan hubungan dinamis antara variabel penjualan dan jumlah pelanggan sekaligus mengintegrasikan variabel eksogen seperti suhu, inflasi, dan PDRB. Kerangka pemodelan ini memungkinkan penangkapan efek keterlambatan (*lagged effects*) serta respons terhadap guncangan (*shock*) melalui komponen *moving average* (MA). Ruang lingkup difokuskan pada pelanggan rumah tangga prabayar TR di UP3 Balikpapan, menggunakan data bulanan 2020–2024, untuk proyeksi 2025–2028. Tujuan khususnya: (i) menganalisis pengaruh jumlah pelanggan terhadap penjualan; (ii) menilai dampak suhu, inflasi, PDRB; dan (iii) meramalkan penjualan golongan tarif R periode 2025–2028 dengan VARMAX guna mendukung perencanaan operasional.

II. METODE PENELITIAN

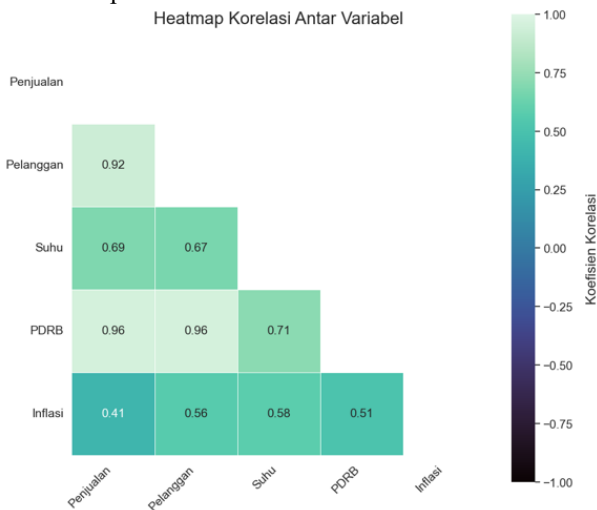
Studi ini observasional kuantitatif-eksplanatori pada deret waktu bulanan Jan 2020–Des 2024 di wilayah PLN UP3 Balikpapan. Objek penelitian adalah data internal penjualan kWh prabayar dan jumlah pelanggan prabayar

(endogen), serta eksogen: suhu rata-rata (BMKG Sepingan), inflasi Kota Balikpapan (BI/BPS), dan PDRB. Seluruh seri disusun bulanan; PDRB tahunan diinterpolasi ke bulanan dan direkonsiliasi lintas-sumber sebelum analisis. Teknik pengambilan sampel: dokumentasi data sekunder (sensus bulanan selama periode). Teknik pengambilan data: kompilasi dokumen internal PLN dan publikasi resmi BMKG/BI/BPS [6].

Analisis memakai kerangka VARMAX untuk memodelkan keterkaitan simultan penjualan-pelanggan serta pengaruh tertunda eksogen. Tahapan: statistik deskriptif & visualisasi (*heatmap korelasi*), uji stasioneritas ADF, identifikasi orde p, q, s via AIC/SC, estimasi VARMAX(p,q,s), uji stabilitas (akar VAR/VMA di dalam lingkaran satuan), diagnostik residual (*Ljung-Box white-noise* dan pemeriksaan normalitas), serta analisis dinamika (*Granger causality*, IRF, FEVD) [7], [11], [12]. Model terpilih VARMAX(1,0,1) digunakan untuk peramalan 48 bulan (Jan 2025–Des 2028); akurasi dievaluasi dengan MAPE dan RMSE; implementasi komputasi menggunakan Python versi 3.11.5.[13], [14], [15].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Heatmap Korelasi



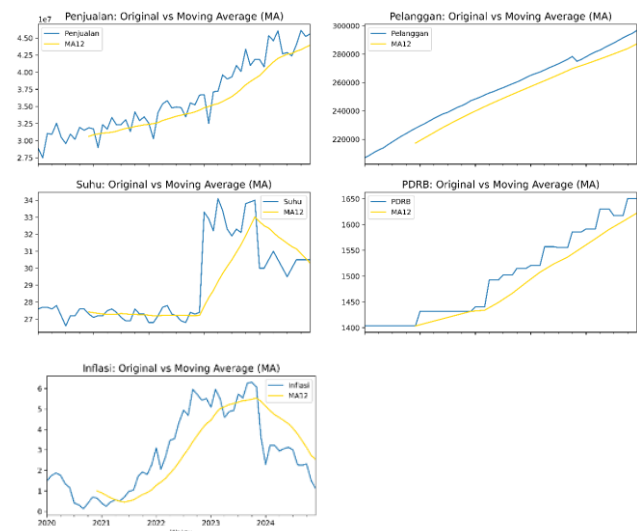
Gambar 1. Heatmap Korelasi antar Variabel

Heatmap korelasi (*Pearson*, -1 s.d. +1) digunakan untuk memetakan kekuatan dan arah hubungan linear antar variabel Penjualan, Jumlah Pelanggan, Suhu, PDRB, dan Inflasi. Hasilnya menunjukkan korelasi sangat kuat antara Penjualan–Pelanggan ($r = 0,92$) dan Penjualan–PDRB ($r = 0,96$), menandakan bahwa kenaikan basis pelanggan dan pertumbuhan ekonomi berasosiasi erat dengan peningkatan penjualan. Hubungan Penjualan dengan Suhu ($r = 0,69$) bersifat moderat dan dengan Inflasi ($r = 0,41$) relatif rendah. Dari sisi pelanggan, keterkaitan dengan PDRB ($r = 0,96$) sangat kuat, sementara dengan Suhu ($r = 0,67$) dan Inflasi ($r = 0,56$) bersifat moderat. Antar-variabel eksogen juga saling terkait pada tingkat menengah: Suhu–PDRB ($r = 0,71$), Suhu–Inflasi ($r = 0,58$), dan PDRB–Inflasi ($r = 0,51$). Secara keseluruhan, penjualan listrik Prabayar di UP3 Balikpapan terutama bergerak sejalan dengan jumlah pelanggan dan PDRB, sedangkan suhu dan inflasi berperan sebagai faktor tambahan dengan pengaruh yang lebih moderat.

B. Pengujian Stasioner

Pengujian stasioner dimaksudkan untuk mendapatkan data yang memiliki rata-rata dan ragam yang stabil tidak mengandung akar unit (unsur waktu). Data yang telah dinyatakan stasioner berarti data tersebut telah stabil untuk dilakukan proses peramalan, karena model yang dapat menghasilkan peramalan yang akurat berasal dari data yang stabil dalam rata-rata maupun dalam ragam.

Pengujian stasioner rata-rata dilakukan dengan *Augmented Dikey Fuller Test (ADF Test)*. Kriteria pengujian menyatakan bahwa apabila $p\ value \leq\ level\ of\ significance\ (\alpha\ (\alpha) = 5\%)$ maka data dinyatakan stasioner, dan sebaliknya apabila $p\ value > level\ of\ significance\ (\alpha\ (\alpha) = 5\%)$ maka data dinyatakan tidak stasioner terhadap rata-rata, sehingga data harus dilakukan transformasi (*defferensi*).



Gambar 2. Grafik perbandingan kondisi aktual dan *Moving Average*

Hasil pengujian stasioner dapat dilihat melalui rangkuman pada tabel berikut:

Tabel I
Augmented Dikey Fuller Test

Dataset	Level	ADF Statistik	$p\ value$
Penjualan	Data level	-0.205627	0.937848
Pelanggan	Data level	-1.581589	0.492835
Suhu	Data level	-1.408563	0.578164
PDRB	Data level	0.805977	0.991732
Inflasi	Data level	-1.049215	0.734894
Penjualan	1st differencing	-5.976574	0.000001
Pelanggan	1st differencing	-4.140226	0.000830
Suhu	1st differencing	-4.543648	0.000164
PDRB	1st differencing	-5.124909	0.000012
Inflasi	1st differencing	-3.743531	0.003541

Berdasarkan hasil pengujian pada tabel di atas diketahui bahwa data pada tingkat *1st differencing* menunjukkan *p value* < *level of significance* (α) = 0.05) sehingga semua data dinyatakan stasioner pada differensiasi pertama, sehingga untuk proses selanjutnya pemodelan dilakukan menggunakan data differensiasi pertama.



Gambar 3. Grafik Seri Terdiferensiasi Orde Pertama (Δ) dengan MA(12)

C. Pengujian Granger Causality

Tabel II
Granger Causality Test

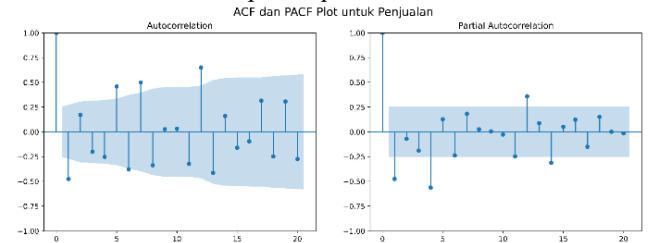
Causalitas	Lag	Chi Square	p value
Pelanggan →Penjualan	1	13.6347	0.0002
	2	5.0355	0.0806
	3	6.6126	0.0853
	4	7.6309	0.1061
	5	5.9016	0.3159
	6	8.3271	0.2151
	7	9.5182	0.2176
	8	12.5572	0.1280
	9	12.4463	0.1893
	10	19.8567	0.0306
Penjualan →Pelanggan	1	0.0034	0.9536
	2	2.9953	0.2237
	3	3.3499	0.3408
	4	4.1983	0.3798
	5	6.8418	0.2327
	6	6.6177	0.3576
	7	7.8437	0.3466
	8	12.7251	0.1217
	9	36.4291	0.0000
	10	36.7088	0.0001

Hasil *Granger Causality Test* yang menunjukkan hubungan antara Pelanggan dan Penjualan dapat diinterpretasikan berdasarkan nilai *Chi Square* dan *p-value*

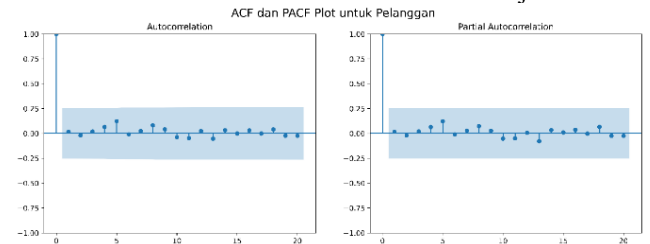
pada setiap *lag* (periode waktu). Berikut adalah analisis untuk kedua arah kausalitas tersebut:

1. Pelanggan terhadap Penjualan
Terdapat kausalitas signifikan pada lag-1 ($\chi^2=13,63$; $p=0,0002$), menunjukkan bahwa pertumbuhan pelanggan segera diikuti kenaikan penjualan pada periode berikutnya. Pada lag 2–9, pengaruh tidak signifikan; terdapat sinyal tambahan pada lag-10 ($p=0,0306$) namun tidak konsisten antar-lag sehingga ditafsirkan sebagai efek yang lemah/tidak persisten dalam jangka lebih panjang.
2. Penjualan terhadap Pelanggan
Tidak signifikan pada lag 1–7; signifikan pada lag-9 dan lag-10 ($p=0,0000$; $p=0,0001$), mengindikasikan bahwa dinamika penjualan baru berdampak pada ekspansi pelanggan setelah jeda waktu lebih panjang.
Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa Pelanggan memiliki pengaruh signifikan terhadap Penjualan pada lag 1, sementara Penjualan mempengaruhi Pelanggan pada lag 9 dan 10. Hal ini menunjukkan bahwa hubungan antara keduanya mungkin bersifat dinamis, di mana pengaruh yang lebih kuat terjadi pada periode waktu tertentu.

D. Identifikasi Order p dan q dari VARMAX



Gambar 1 Grafik ACF dan PACF Plot Penjualan



Gambar 2. Grafik ACF dan PACF Plot Pelanggan

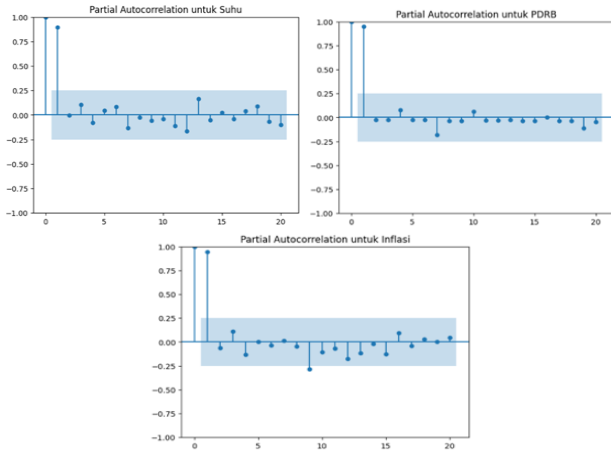
Berdasarkan grafik ACF dan PACF untuk variabel Penjualan dan Pelanggan, identifikasi awal order p (AR) dan q (MA) dari model VARMAX:

1. Variabel Penjualan: Grafik ACF menunjukkan *spike* signifikan pada lag-1 lalu mereda (mendatar), mengindikasikan komponen MA memiliki $q=1$. Grafik PACF menunjukkan *spike* signifikan pada lag-1 diikuti penurunan nilai setelahnya, mengidentifikasi komponen AR memiliki $p=1$. Dengan demikian, kandidat awal model VARMAX memiliki $p=1$ dan $q=1$.
2. Variabel Pelanggan: Grafik ACF tidak menunjukkan ada *spike* signifikan pada lag-1 maupun pada lag berikutnya, mengindikasikan komponen MA memiliki $q=0$. Grafik PACF juga tidak menunjukkan *spike* signifikan pada lag-1, sehingga komponen AR memiliki $p=0$. Oleh karena itu, kandidat awal model VARMAX memiliki $p=0$ dan $q=0$.

Hasil ACF dan PACF merupakan diagnostik awal. Untuk mendapatkan model yang lebih optimal, peneliti akan menguji beberapa kombinasi dan menggunakan kriteria seperti AIC atau BIC untuk pemilihan model yang lebih tepat.

E. Identifikasi *Order s* dari VARMAX

Untuk mengidentifikasi *orde s* pada variabel eksogen suhu, PDRB dan inflasi, dapat dilihat melalui *plot* PACF berikut:



Gambar 3. *Plot* PACF untuk Seri Δ suhu, Δ PDRB, Δ Inflasi (Jan 2020–Des 2024)

Berdasarkan *plot* PACF untuk seri terdiferensiasi Δ suhu, Δ PDRB, dan Δ inflasi pada gambar di atas, ketiganya menampilkan *spike* signifikan pada lag-1 diikuti peredaan nilai PACF pada lag berikutnya. Pola tersebut konsisten dengan orde eksogen $s=1$ dalam kerangka VARMAX:

- Δ Suhu: spike signifikan pada lag-1 $\rightarrow s=1$.
- Δ PDRB: spike signifikan pada lag-1 $\rightarrow s=1$.
- Δ Inflasi: spike signifikan pada lag-1 $\rightarrow s=1$.

Identifikasi melalui PACF bersifat diagnostik awal; penetapan akhir spesifikasi VARMAX(p,q,s) tetap dikukuhkan dengan pemilihan model berbasis AIC/BIC dan uji diagnostik lanjutan.

F. Mencari Model Terbaik dari VARMAX melalui AIC dan SC

Identifikasi model VARMAX dimaksudkan untuk mendapatkan model VARMAX(p,q,s) dari data yang telah

stasioner. Model tentatif *orde p* dan *q* didapat melalui nilai *Akaike information criterion* (AIC) dan *Schwarz Criterion* (SC) terkecil pada masing-masing kandidat model VARMAX. Pada kasus ini akan dicobakan nilai maksimal order $p = 4$ dan maksimal order $q = 3$. Adapun nilai order $s = 1$ dibuat tetap karena hasil identifikasi sebelumnya sudah sangat jelas bahwa setiap variabel eksogen memiliki order $s = 1$.

Berdasarkan hasil tentatif model VARMAX di bawah, didapatkan bahwa model VARMAX(1,0,1) adalah model terbaik untuk memodelkan data variabel endogen Penjualan dan Pelanggan dengan variabel eksogen Suhu, PDRB, dan inflasi.

Berikut ini hasil perbandingan model *tentative* VARMAX:

Tabel III
Tentatif Model VARMAX

Model VARMAX(p,q,s)	AIC	SC
VARMAX(1,0,1)	2765.412943	2808.682247
VARMAX(1,1,1)	2772.976543	2824.487618
VARMAX(1,2,1)	2774.520508	2834.273356
VARMAX(1,3,1)	failed: Schur decomposition solver error.	
VARMAX(2,0,1)	2768.578962	2820.090037
VARMAX(2,1,1)	2780.974924	2840.727772
VARMAX(2,2,1)	2788.060987	2856.055607
VARMAX(2,3,1)	2791.294408	2867.530800
VARMAX(3,0,1)	2794.909497	2854.662344
VARMAX(3,1,1)	2802.414949	2870.409568
VARMAX(3,2,1)	2807.856454	2884.092846
VARMAX(3,3,1)	2812.378827	2896.856990
VARMAX(4,0,1)	2866.506071	2934.500690
VARMAX(4,1,1)	2869.175309	2945.411700
VARMAX(4,2,1)	2870.505567	2954.983730
VARMAX(4,3,1)	2875.703512	2968.423448

G. Model VARMAX terbaik

Berdasarkan hasil tentative model VARMAX di atas, didapatkan bahwa model VARMAX(1,0,1) adalah model terbaik untuk memodelkan data yang ada.

Tabel IV
Estimasi Model VARMAX

Parameter	Coefisien	Std Error	z	p value
Penjualan				
intercept	-557500.00	0.15	-3740000.00	0.0000
Penjualan_lag1	-0.51	0.13	-4.00	0.0000
Pelanggan_lag1	219.25	120.47	1.82	0.0690
Suhu	146000.00	0.12	1240000.00	0.0000
PDRB	109600.00	1.62	67700.00	0.0000
Inflasi	100100.00	0.06	1780000.00	0.0000
Suhu_lag1	285600.00	0.23	1230000.00	0.0000
PDRB_lag1	38380.00	0.83	46000.00	0.0000
Inflasi_lag1	-583800.00	0.22	-2650000.00	0.0000

Tabel V
Estimasi Model VARMAX

Parameter	Coefisien	Std Error	z	p value
Pelanggan				
intercept	1504.31	519.49	2.90	0.0040
Penjualan_lag1	0.001	0.0001	-0.98	0.3280
Pelanggan_lag1	-0.01	0.31	-0.03	0.9790
Suhu	29.48	242.05	0.12	0.9030
PDRB	7.71	12.10	0.64	0.5240
Inflasi	615.03	128.43	4.79	0.0000
Suhu_lag1	-14.89	160.04	-0.09	0.9260
PDRB_lag1	3.89	16.82	0.23	0.8170
Inflasi_lag1	-82.11	300.70	-0.27	0.7850

Model VARMAX(1,0,1) selanjutnya digunakan untuk memodelkan data Penjualan dan Pelanggan, dapat dilihat melalui persamaan berikut:

$$Y_t = \sum_{i=1}^p A_i Y_{t-i} + \sum_{j=0}^s B_j X_{t-j} + \sum_{k=1}^q M_k \varepsilon_{t-k} + \varepsilon_t \quad (1)$$

Dengan:

Y_t : vektor variabel endogen (misalnya: penjualan energi listrik, jumlah pelanggan),

X_t : vektor variabel eksogen (suhu, PDRB, inflasi),

A_i : matriks koefisien autoregresif,

B_j : matriks pengaruh variabel eksogen,

M_k : matriks koefisien *moving average*,

ε_t : vektor error (*white noise*),

$p, q,$ dan s : masing-masing orde AR, MA, dan lag variabel eksogen.

$$\begin{bmatrix} Y_{1t} \\ Y_{2t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -557500.00 \\ 1504.31 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.51 & 219.25 \\ 6.2312 & 0.001 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{1t-1} \\ Y_{2t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 146000.00 & 285600.00 \\ 29.48 & -14.89 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{1t} \\ X_{1t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 109600.00 & 38380.00 \\ 7.71 & 3.89 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{2t} \\ X_{2t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 100100.00 & -583800.00 \\ 615.03 & -82.11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{3t} \\ X_{3t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{1t} \\ \varepsilon_{2t} \end{bmatrix}$$

dimana,

Y_{1t} : Penjualan

Y_{2t} : Pelanggan

X_{1t} : Suhu

X_{2t} : PDRB

X_{3t} : Inflasi

Hasil model VARMAX yang dianalisis menunjukkan hubungan yang kompleks antara variabel-variabel dalam dua sistem yang terpisah, yaitu Penjualan dan Pelanggan.

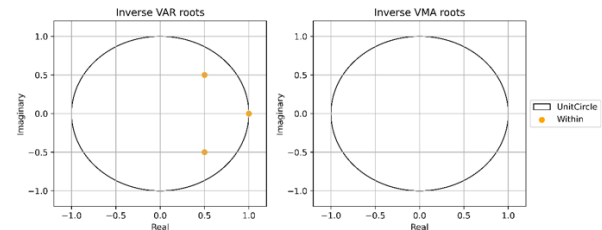
Pada persamaan Penjualan, komponen Penjualan_{t-1} berpengaruh negatif dan signifikan (koef. -0,51; p<0,001) yang menunjukkan efek koreksi jangka pendek. Variabel eksogen bulan berjalan—Suhu, PDRB, dan Inflasi—berpengaruh positif dan signifikan (p<0,001), sedangkan Inflasi_{t-1} berpengaruh negatif dan signifikan (koef.

-583.800; p<0,001). Pelanggan_{t-1} berdampak positif namun nyaris signifikan (p=0,069).

Pada persamaan Pelanggan, hanya Inflasi bulan berjalan yang positif signifikan (koef. 615,03; p<0,001); variabel lain—termasuk komponen lag (Suhu_{t-1}, PDRB_{t-1}, Inflasi_{t-1})—tidak signifikan.

Secara keseluruhan, hasil dari model VARMAX ini menunjukkan bahwa faktor eksternal seperti suhu, PDRB, dan inflasi memiliki pengaruh signifikan terhadap penjualan, sementara untuk jumlah pelanggan, hanya inflasi yang memberikan pengaruh signifikan. Banyak variabel lainnya, terutama yang berkaitan dengan lag, tidak menunjukkan hubungan yang signifikan dengan kedua variabel tersebut.

H. Evaluasi Model VARMAX terbaik



Gambar 4. Uji stabilitas model VARMAX

Gambar di atas menunjukkan hasil uji stabilitas untuk model VARMAX (1,0,1), yang menampilkan *inverse roots* untuk komponen VAR (kiri) dan VMA (kanan). Seluruh titik berada di dalam lingkaran satuan, sehingga memenuhi kriteria stabilitas: bagian VAR bersifat stasioner dan bagian VMA *invertibel*. Dengan demikian, spesifikasi VARMAX yang dipilih tidak menunjukkan indikasi ketidakstabilan dan layak digunakan untuk inferensi serta peramalan.

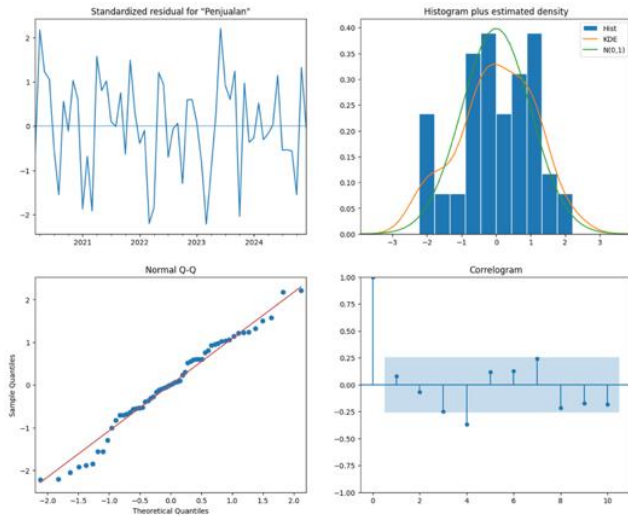
I. Diagnostik Model

Pengujian diagnostik dilakukan untuk memastikan model VARMAX(1,0,1) memenuhi prasyarat analisis deret waktu multivariat. *White noise* diuji dengan Ljung-Box (Q) pada taraf $\alpha=0,05$; hasil pada Tabel 6 menunjukkan p-value residual Penjualan = 0,722183 dan Pelanggan = 0,08532, keduanya > 0,05, sehingga tidak terdapat autokorelasi tersisa dan informasi relevan telah terserap model.

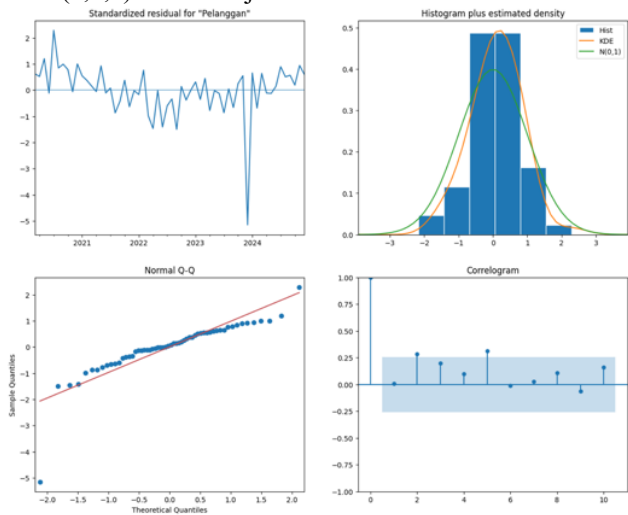
Tabel VI
Penguujian *white noise*

Variabel	Q-Stat	P value	Keterangan
Penjualan	0.650953	0.722183	<i>White Noise</i>
Pelanggan	4.922686	0.08532	<i>White Noise</i>

Normalitas diperiksa melalui Q–Q plot dan histogram; sebar titik yang mengikuti garis diagonal serta bentuk histogram yang mendekati $N(0,1)$ mengindikasikan residual berdistribusi mendekati normal.



Gambar 5. Diagnostik Plot residual model VARMAX (1,0,1) untuk Penjualan



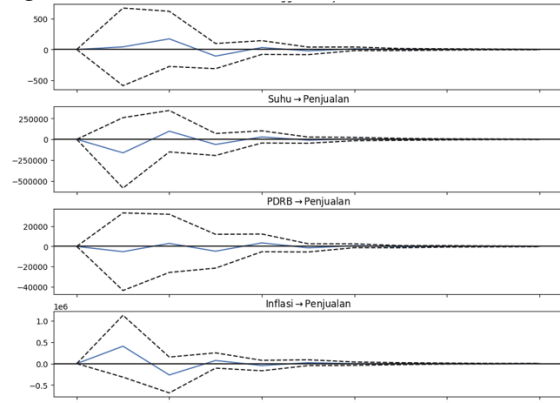
Gambar 6. Diagnostik Plot residual model VARMAX (1,0,1) untuk Pelanggan

Dengan terpenuhinya kedua asumsi ini, model VARMAX(1,0,1) dinyatakan layak digunakan untuk tujuan peramalan. Artinya, proyeksi penjualan listrik prabayar dan jumlah pelanggan yang dihasilkan memiliki dasar empiris yang kuat, didukung oleh validasi diagnostik yang memastikan reliabilitas model. Walaupun demikian, untuk menjaga ketepatan prediksi di masa mendatang, disarankan agar model diperbarui secara berkala dan dilakukan evaluasi ulang terhadap asumsi diagnostik setiap kali tersedia data terbaru.

J. *Impulse Response Function (IRF)* dan *Forecast Error Variance Decomposition (FEVD)*

1. IRF terhadap Penjualan

IRF mengevaluasi respons dinamis Penjualan terhadap guncangan (*shock*) pada dirinya sendiri maupun pada variabel lain dalam sistem. Hasil IRF terhadap penjualan sebagai berikut:



Gambar 7. IRF Penjualan terhadap *shock* pada Penjualan, Pelanggan, Suhu, PDRB, dan Inflasi

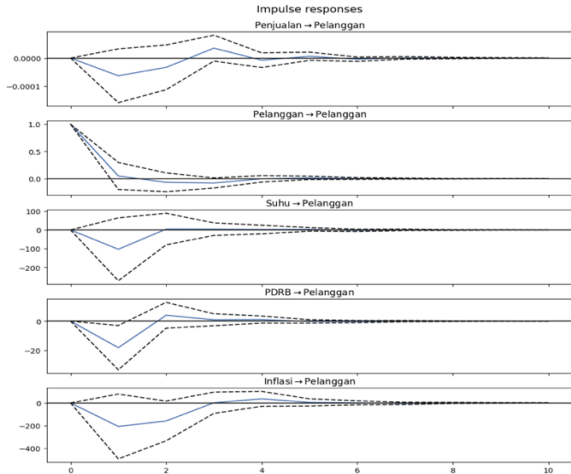
- i. Penjualan → Penjualan: Efek awal positif kuat, kemudian mereda perlahan dan bertahan selama beberapa periode sebelum mencapai keadaan stabil—menunjukkan efek berlanjut jangka panjang.
- ii. Pelanggan → Penjualan: Negatif pada periode pertama, lalu berbalik positif. Mengindikasikan bahwa fluktuasi jumlah pelanggan memberikan dampak awal yang negatif kemudian memberikan dampak positif dalam jangka panjang.
- iii. Suhu → Penjualan: Dampak yang sangat kuat pada periode awal, kemudian penurunan yang tajam dan kemudian sedikit stabil. Mengindikasikan suhu berpengaruh signifikan dalam jangka pendek, tetapi dampaknya mulai berkurang setelah beberapa periode.
- iv. PDRB → Penjualan: Dampak positif signifikan pada periode pertama, namun dampaknya mulai berkurang setelah beberapa periode. Ini menunjukkan bahwa pertumbuhan ekonomi daerah (PDRB) memberikan pengaruh positif terhadap penjualan dalam jangka pendek.
- v. Inflasi → Penjualan: Dampak negatif inflasi terhadap penjualan cukup besar pada awalnya, namun seiring berjalannya waktu, dampaknya mulai stabil.

Secara keseluruhan, gambar ini menunjukkan bagaimana setiap variabel makroekonomi (pelanggan, suhu, PDRB, inflasi) memengaruhi penjualan, baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Setiap variabel memiliki pola respons yang berbeda, yang menggambarkan dinamika kompleks antara variabel-variabel tersebut.

2. IRF terhadap Pelanggan

Pada Gambar berikut, ditunjukkan respon penjualan listrik ketika dipengaruhi oleh guncangan pada jumlah pelanggan, serta respon jumlah pelanggan itu sendiri

terhadap guncangan internal. Hasil IRF terhadap Pelanggan sebagai berikut:

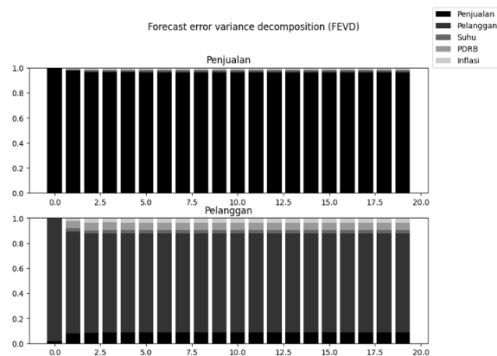


Gambar 8. (IRF) Penjualan terhadap *shock* pada Penjualan, Pelanggan, Suhu, PDRB, dan Inflasi

- i. Penjualan → Pelanggan: Terlihat kenaikan pelanggan setelah penjualan meningkat, dengan tren naik yang cukup stabil. Ini menandakan hubungan positif antara penjualan dan pertumbuhan pelanggan.
- ii. Pelanggan → Pelanggan: Terdapat penurunan kecil di awal, lalu cenderung menurun stabil setelah beberapa periode. Pola ini mencerminkan dinamika pelanggan yang melemah bertahap meski sempat berfluktuasi
- iii. Suhu → Pelanggan: Dampaknya besar pada awal periode, kemudian cepat berkurang dan mendekati stabil. Artinya, pengaruh suhu bersifat jangka pendek.
- iv. PDRB → Pelanggan: Turun tajam di awal, lalu pulih ke level lebih tinggi. Ini menunjukkan efek penyesuaian sementara sebelum pemulihan jumlah pelanggan.
- v. Inflasi → Pelanggan: Terjadi penurunan tajam jumlah pelanggan dan bertahan stabil di level lebih rendah. Hal ini menandakan dampak negatif inflasi yang berkelanjutan terhadap pelanggan.

3. Hasil FEVD

Hasil dari *Forecast Error Variance Decomposition* (FEVD) menggambarkan bagaimana satu variabel bereaksi terhadap perubahan (*shock*) pada variabel lain dalam sistem model VARMAX (1,0,1) dengan hasil sebagai berikut:



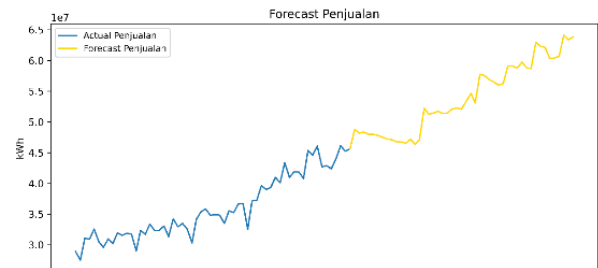
Gambar 9. Hasil FEVD Penjualan dan Pelanggan

- i. Penjualan: didominasi oleh Penjualan sendiri = 96,13%. Kontribusi eksternal relatif kecil: Inflasi 1,87%, Suhu 1,31%, Pelanggan 0,51%, PDRB 0,16% → inflasi adalah pengaruh eksternal terbesar untuk penjualan.
- ii. Pelanggan: pada awal periode dikendalikan oleh Pelanggan sendiri, 98,56%, turun menjadi 79,10% pada horizon panjang. Kontribusi variabel lain: Penjualan 8,55%, PDRB 6,13%, Inflasi 3,65%, Suhu 2,56% → PDRB menjadi pendorong eksternal terbesar untuk pelanggan

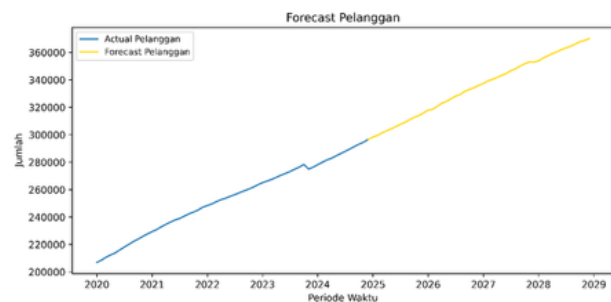
FEVD menegaskan keterkaitan erat faktor makroekonomi dengan sistem penjualan-pelanggan: inflasi terutama memengaruhi ketidakpastian penjualan, sementara PDRB lebih besar perannya pada pelanggan. Temuan ini mendukung perlunya strategi penjualan dan pengelolaan pelanggan yang adaptif terhadap perubahan ekonomi dan iklim.

K. Peramalan

Peramalan menggunakan VARMAX(1,0,1), horizon 48 bulan (Jan 2025–Des 2028). Data latih Jan 2020–Des 2024. Endogen: penjualan kWh prabayar dan jumlah pelanggan. Eksogen: suhu, inflasi, PDRB dimasukkan sebagai nilai proyeksi konstan sehingga memungkinkan skenario.



Gambar 10 Plot peramalan jumlah penjualan



Gambar 11 Plot peramalan Pelanggan

Hasil peramalan ditunjukkan pada Gambar di atas sebagai berikut:

- a. Penjualan listrik prabayar pada Januari 2025 diperkirakan sebesar 48,81 juta kWh, dan menurun sedikit hingga 46,53 juta kWh pada akhir 2025. Setelah itu, tren kembali meningkat secara konsisten, mencapai 63,80 juta kWh pada Desember 2028.
 - i. Total penjualan selama 2025 diproyeksikan sebesar 570,96 juta kWh, meningkat menjadi 737,38 juta kWh pada 2028.
 - ii. Laju pertumbuhan rata-rata tahunan (CAGR) selama periode 2025–2028 adalah sekitar 8,9%.

- b. Jumlah pelanggan pada Januari 2025 diproyeksikan sebanyak 298.363 pelanggan, meningkat secara bertahap hingga 370.044 pelanggan pada Desember 2028.
- Penambahan pelanggan rata-rata per tahun sekitar 23.500 pelanggan, atau sekitar 1.950 pelanggan per bulan.
 - Laju pertumbuhan pelanggan prabayar rata-rata tahunan (CAGR) selama periode 2025-2028 adalah sekitar 7,4 %.

Pola hasil peramalan menunjukkan bahwa meskipun penjualan sempat mengalami sedikit penurunan pada awal 2025, tren jangka menengah hingga 2028 tetap positif baik dari sisi konsumsi listrik maupun jumlah pelanggan. Pertumbuhan jumlah pelanggan yang stabil berkontribusi langsung pada peningkatan total penjualan.

IRF menegaskan suhu dan PDRB berdampak positif jangka pendek pada penjualan, sedangkan inflasi memberikan pengaruh negatif pada periode awal; karena itu faktor eksternal perlu dipantau berkala agar target tercapai. Secara manajerial, hasil peramalan mendukung: (i) penetapan target penjualan & akuisisi pelanggan dalam RKAP, (ii) strategi pemasaran adaptif terhadap cuaca dan kondisi ekonomi, dan (iii) pengaturan pasokan energi yang efisien untuk mengantisipasi pertumbuhan konsumsi prabayar.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil estimasi model VARMAX, uji diagnostik, serta analisis dinamis (IRF/FEVD) dan evaluasi akurasi peramalan, diperoleh kesimpulan penelitian sebagai berikut:

- Terdapat hubungan kuat dan dua arah antara jumlah pelanggan dan penjualan. Uji Granger menunjukkan Pelanggan \rightarrow Penjualan signifikan pada lag-1 ($p=0,0002$); estimasi VARMAX(1,0,1) memberi koefisien Pelanggan₋₁ positif dan hampir signifikan ($p=0,069$). IRF menegaskan: *shock* pelanggan negatif di awal lalu berbalik positif dalam jangka panjang, sementara kenaikan penjualan juga mendorong pertumbuhan pelanggan. *Heatmap* menunjukkan korelasi sangat kuat ($r=0,92$). Implikasinya, pertumbuhan basis pelanggan merupakan pendorong utama peningkatan penjualan listrik prabayar.
- Hasil *heatmap* korelasi menunjukkan bahwa variabel eksogen terhadap penjualan rumah tangga prabayar dipengaruhi faktor makro: PDRB ($r=0,96$), suhu ($r=0,69$), dan inflasi ($r=0,41$). Dalam estimasi VARMAX, ketiganya signifikan ($p=0,0000$). Hal ini menunjukkan bahwa penjualan listrik rumah tangga prabayar lebih dipengaruhi oleh faktor makroekonomi, khususnya PDRB dan inflasi, sementara suhu berperan sebagai faktor musiman jangka pendek.
- Proyeksi hingga 2028 menunjukkan tren pertumbuhan yang konsisten. Penjualan energi meningkat dari 570,96 juta kWh tahun 2025 menjadi 737,38 juta kWh pada tahun 2028 atau tumbuh +29,1%, sedangkan jumlah pelanggan bertambah dari 298.363 pada tahun 2025 menjadi 370.044 pada tahun 2028 atau tumbuh +24,0%. Hasil ini menegaskan relevansi model

VARMAX untuk mendukung perencanaan strategis dan penyusunan RKAP di PLN UP3 Balikpapan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Saya menyampaikan ucapan terima kasih kepada PT PLN (Persero) UID Kaltimra - UP3 Balikpapan yang telah mengizinkan melakukan observasi dan pengumpulan data sehingga penelitian ini dapat diselesaikan.

REFERENSI

- H. Siregar and D. Putri, "Efisiensi dan kepuasan konsumen pada sistem listrik pintar (prepaid electricity)," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 8, no. 1, pp. 15–22, 2019.
- Susanto and R. Hidayat, "Analisis perbandingan sistem listrik pascabayar dan prabayar di Indonesia," *Jurnal Energi dan Kelistrikan*, vol. 12, no. 2, pp. 55–62, 2020, doi: 10.33322/jek.v12i2.456.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, "Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia 2021," Jakarta, 2021.
- PT PLN (Persero), "Peraturan Direksi PT PLN (Persero) Nomor 0730.K/DIR/2023 tentang Listrik Prabayar (Listrik Pintar)," Jakarta, 2023.
- Kementerian PPN/Bappenas, "Dampak Pembangunan IKN terhadap Pertumbuhan Ekonomi Balikpapan," 2024.
- PT PLN (Persero), "Profil Kinerja PLN 2024," 2024.
- H. Lütkepohl, *New Introduction to Multiple Time Series Analysis*. Berlin: Springer, 2005.
- W. Enders, *Applied Econometric Time Series*, 4th ed. Wiley, 2014.
- C. W. J. Granger and P. Newbold, *Forecasting Economic Time Series*, 2nd ed. San Diego: Academic Press, 1986.
- R. J. Hyndman and G. Athanasopoulos, *Forecasting: Principles and Practice*, 3rd ed. OTexts, 2021.
- J. D. Hamilton, *Time Series Analysis*. Princeton University Press, 1994.
- G. E. P. Box, G. M. Jenkins, and G. C. Reinsel, *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, 5th ed. Wiley, 2015.
- Badan Pusat Statistik, "Statistik Wilayah Kota Balikpapan," 2024.
- Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, "Data Suhu Rata-Rata Bulanan Kota Balikpapan 2020–2024," 2025.
- Bank Indonesia, "Indeks Harga Konsumen dan Inflasi Daerah Kalimantan Timur," 2024.