

Optimasi Tegangan Jatuh dan Rugi Daya pada Saluran Distribusi 20 KV ULP Sukaraja

DINI FAUZIAH, MUHAMMAD WAHYU AGUSTIAN, NASRUN HARIYANTO

Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia
Email: dinifauziah@itenas.ac.id

Received 1 November 2023 | *Revised* 30 Desember 2023 | *Accepted* 5 Januari 2024

ABSTRAK

Saluran distribusi 20 kV ULP Sukaraja merupakan saluran distribusi yang cukup panjang. Hal ini memungkinkan terjadinya tegangan jatuh dan rugi daya yang cukup besar. Pada saat beban dalam Waktu Beban Puncak (WBP) tegangan yang diterima pada gardu PAIGD sebesar 18,794 kV atau tegangan jatuhnya sebesar 6,53%. Artinya tegangan jatuh yang terjadi pada sistem distribusi 20 kV ULP Sukaraja tidak sesuai dengan standar SPLN 72:1987 maksimal sebesar 5%. Metoda penelitian memodelkan aliran daya pada sistem distribusi tersebut menggunakan aplikasi ETAP. Hasil penelitian menunjukkan berdasarkan beberapa alternatif solusi yang disimulasikan, untuk menurunkan tegangan jatuh dan rugi daya paling optimal yaitu untuk jangka pendek dengan metode manuver jaringan karena dapat memberikan cost reduction tertinggi sebesar Rp 1.065.175.911,35 per tahun sedangkan untuk jangka panjang dengan metode penggantian penghantar disertai pengaturan tap changer dengan tegangan jatuh terendah sebesar 2,85%.

Kata kunci: ETAP, PAIGD, Rugi daya, Tegangan jatuh, ULP Sukaraja.

ABSTRACT

The 20 kV distribution line of ULP Sukaraja is a fairly long distribution line. This allows for considerable voltage drops and power losses. When the load is in Peak Load Time (WBP) the voltage received at the PAIGD substation is 18.794 kV or the voltage drop is 6.53%. This means that the voltage drop that occurs in the 20 kV distribution system of ULP Sukaraja is not in accordance with the SPLN 72: 1987 standard of a maximum of 5%. The research method modelled the power flow in the distribution system using the ETAP application. The results showed that based on several alternative solutions simulated, to reduce the voltage drop and the best power loss is for the short term with the network manoeuvre method because it can provide the highest cost reduction of Rp 1,065,175,911.35 per year while for the long term with the conductor replacement method accompanied by tap changer settings with the lowest voltage drop of 2.85%.

Keywords: Drop voltage, ETAP, Losses, PAIGD, ULP Sukaraja

1. PENDAHULUAN

Saluran distribusi memegang peranan penting dalam penyediaan tenaga listrik yang handal dan bermutu. Saluran distribusi berfungsi sebagai penyaluran tenaga listrik dari gardu induk menuju konsumen. Pada saat operasi terkadang saluran distribusi mengalami kendala yang mengakibatkan penyaluran tenaga listrik menjadi tidak handal. Kendala yang sering terjadi pada saluran distribusi yaitu tegangan jatuh dan rugi daya.

Untuk meningkatkan kinerja saluran distribusi yang baik adalah dengan menjaga nilai tegangan jatuh sesuai standar agar dapat meminimalisir terjadinya rugi daya. **(Wachjoe & Zein, 2020)**. Perhitungan rugi daya sendiri merupakan parameter penting yang harus dipertimbangkan saat membuat desain sistem tenaga listrik yang optimal terutama terkait pemilihan konfigurasi jaringan dan penampang kabel **(Armas & Ikanov, 2019)**.

Beberapa penyebab terjadinya jatuh tegangan dan rugi daya diantaranya ukuran konduktor yang tidak sesuai, saluran distribusi yang panjang dan adanya beban lebih pada saluran. **(Jamil, dkk, 2018)(Sulaeman, dkk, 2023)**. Jika tidak diperbaiki, hal ini dapat menyebabkan menurunnya reabilitas sistem tenaga listrik sehingga memicu kerugian yang cukup besar **(Lu, dkk, 2018)** baik kerugian teknis maupun non teknis **(Wang, dkk, 2021)** sehingga salah satu persyaratan yang penting dalam merencanakan suatu saluran harus memperhatikan kualitas tegangan di saluran, dan kontinuitas pelayanan yang baik terhadap konsumen. Berdasarkan SPLN 72:1987 besarnya nilai tegangan jatuh pada saluran distribusi diizinkan sebesar 5% dari tegangan kerja bagi sistem radial diatas tanah dan sistem simpul. **(SPLN 72:1987, 1987)**. Adapun penyebab lain tingginya tegangan jatuh dan rugi daya disebabkan faktor daya yang kurang baik akibat tingginya daya reaktif yang menyebabkan kapasitas jaringan berkurang dan beban pada transformator meningkat sehingga diperlukan kompensasi untuk memperbaiki faktor daya tersebut **(Kumar, dkk, 2018)(Balandin, dkk, 2019)**. Penelitian menunjukkan bahwa dengan menambahkan kapasitor *bank*, faktor daya dapat meningkat sehingga jatuh tegangan dan rugi daya berkurang **(AlAhmad & AlDahmi, 2021)(Thongsuk, dkk, 2023)**.

Pada penelitian Murad analisis tegangan jatuh dilakukan dengan simulasi aliran daya pada aplikasi ETAP. Hasil dari penelitian tersebut tegangan terima pada LSA 355 Wonosari I sebesar 94,35%, dan LSA 233 Wonosari II sebesar 91,27% sehingga tegangan jatuhnya melebihi 5%. Solusi yang dilakukan pada penelitian terkait yaitu dengan pemasangan kapasitor *bank*, setelah melakukan pemasangan kapasitor *bank* pada saluran distribusi tersebut tegangan terima yang terjadi pada LSA 355 Wonosari I sebesar 95,04%, dan LSA 233 Wonosari II sebesar 95,88% **(Murad, 2021)**. Kemudian penelitian Nelwan, dkk menunjukkan bahwa penyulang SU2 jaringan distribusi Minahasa Utara khususnya pada jalur MAL dan MAT tegangan jatuh yang terjadinya melebihi standar yang ditentukan oleh PLN. Tegangan jatuh jalur MAL pada titik MAL51 menuju MAL22 dengan panjang 2,921 km dan jenis serta luas penampang kawat AAAC 150mm² dan 70mm² sebesar 11,76%, dan pada jalur MAT dititik MAL01 menuju MAT24 dengan panjang 1.974 km dan jenis serta luas penampang kawat AAAC 150mm² sebesar 5,24% **(Nelwan, dkk, 2015)**. Berdasarkan penelitian penggantian penghantar pada ukuran yang lebih besar dapat menurunkan tegangan jatuh dan rugi daya secara signifikan **(Awwad, 2019)**.

Selain itu, pada penelitian Thakur dan Chawla membahas tentang pasokan listrik di India dalam bidang distribusi listrik sering mengalami fluktuasi frekuensi dan juga sistem distribusi yang tidak ekonomis. Sehingga dalam penelitian tersebut dilakukan perhitungan tegangan jatuh pada sistem distribusi di penyulang perkotaan di India, untuk menentukan nilai hasil yang lebih ekonomis terhadap sistem distribusi di India. **(Thakur & Chawla, 2015)**. Ada

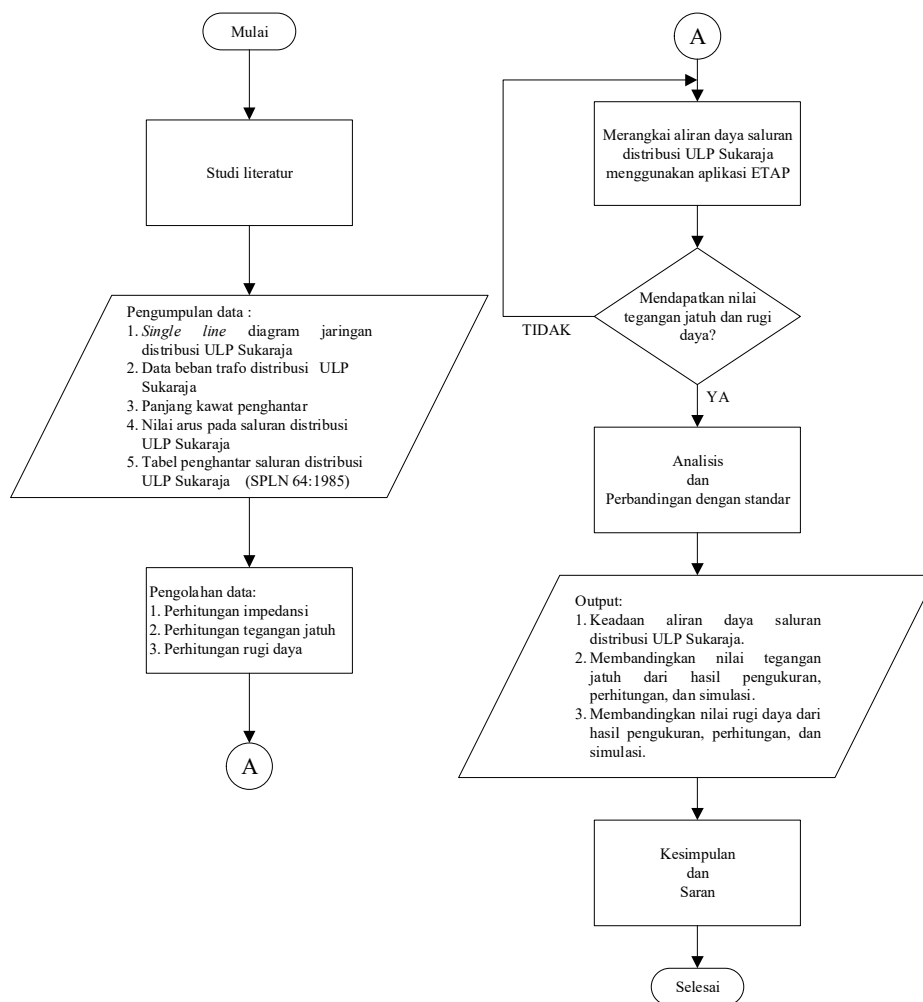
juga penelitian yang menjelaskan tentang pembuatan model saluran menggunakan aplikasi DigSILENT yang kemudian model saluran tersebut digunakan untuk menganalisis tegangan jatuh dan rugi daya yang terjadi pada sistem distribusi 10 kV. Pada akhirnya nilai tersebut dibandingkan dengan nilai yang terhubung ke sistem distribusi (Ymeri, dkk, 2014).

Saluran distribusi 20 kV ULP Sukaraja merupakan saluran distribusi yang cukup panjang. Hal ini memungkinkan terjadinya tegangan jatuh dan rugi daya yang cukup besar. Oleh karena itu, penelitian ini akan menganalisis beberapa alternatif metode untuk menurunkan tegangan jatuh dan rugi daya ditinjau dari segi teknis dan biaya sehingga diharapkan akan mendapat solusi yang paling optimal untuk mengatasi masalah jatuh tegangan dan rugi daya di ULP Sukaraja.

2. METODOLOGI

2.1 Langkah Penelitian

Gambar 1 menunjukkan langkah-langkah yang dilakukan dalam melakukan penelitian ini.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Tabel 1. Data Penghantar Jenis AAAC (SPLN 41-8:1981, 1981)

Penampang Nominal (mm ²)	Jari-jari (mm)	Urat	GMR (mm)	Impedansi (Ω/km)	KHA (A)
35	3,3371	7	2,4227	0,9217+J0,3790	170
50	3,9886	7	2,8957	0,6452+J0,3678	210
70	4,7193	7	3,4262	0,4608+J0,3572	255
95	5,4979	19	4,1674	0,3396+J0,3449	320
120	6,1791	19	4,6837	0,2688+J0,3376	365
150	6,9084	19	5,2365	0,2162+J0,3305	425
185	7,6722	19	5,8155	0,1744+J0,3239	490
240	8,7386	19	6,6238	0,1344+J0,3158	585

Tabel 2. Data Penghantar Jenis XLPE (SPLN 43-5-1:1995, 1995)

Penampang Nominal (mm ²)	R (Ω/km)	L (mH/km)	C (mF/km)	Impedansi (Ω/km)	KHA (A)
150	0,206	0,33	0,26	0,206+J0,104	299
240	0,125	0,31	0,31	0,125+J0,097	390
300	0,1	0,3	0,34	0,100+J0,094	447

2.3 Pengolahan Data

2.3.1 Perhitungan Nilai Tegangan Jatuh

Pada proses ini kita melakukan perhitungan tegangan jatuh yang terjadi pada saluran distribusi tersebut. Data yang diperlukan dalam melakukan perhitungan tegangan jatuh ini adalah data arus saluran dan data penghantar. Setelah data-data tersebut dihasilkan selanjutnya adalah menghitung tegangan jatuh yang terjadi dengan menggunakan rumus sebagai berikut. (Syufrijal & Monantun, 2014)

$$DV = \frac{\sqrt{3} \times \ell \times I (R_k \cos \theta + X_k \sin \theta)}{V_{LL}} \times 100\% \quad (1)$$

2.3.2 Perhitungan Nilai Rugi Daya

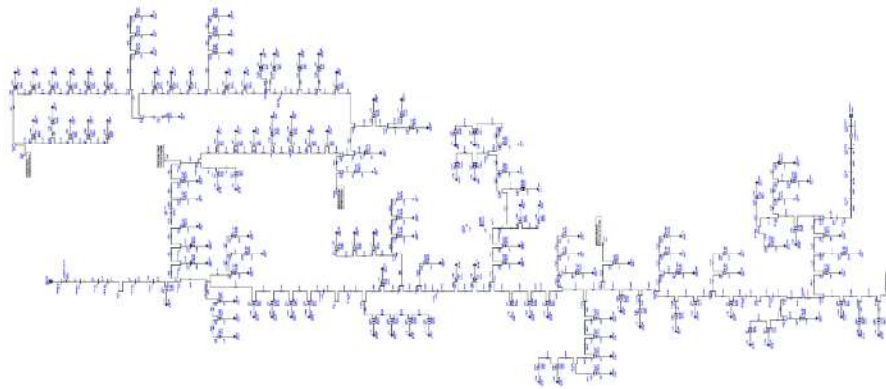
Untuk menghitung nilai rugi daya yang terjadi pada saluran distribusi tersebut diperlukan beberapa data antara lain, nilai arus yang mengalir pada saluran distribusi tersebut, impedansi saluran dan faktor daya pada saluran tersebut. Perhitungan rugi daya yang terjadi dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut. (Syufrijal & Monantun, 2014)

$$\Delta P_{3\phi} = 3 \cdot I^2 \cdot R_S \quad (2)$$

$$\Delta Q_{3\phi} = 3 \cdot I^2 \cdot X_S \quad (3)$$

2.4 Simulasi pada ETAP

Dalam penyusunan penelitian ini, dilakukan simulasi aliran daya saluran distribusi PT. PLN ULP Sukaraja menggunakan aplikasi *Electrical Transient Analysis Program* (ETAP). Gambar 3 menunjukkan pemodelan saluran distribusi 20 kV ULP Sukaraja pada aplikasi ETAP.

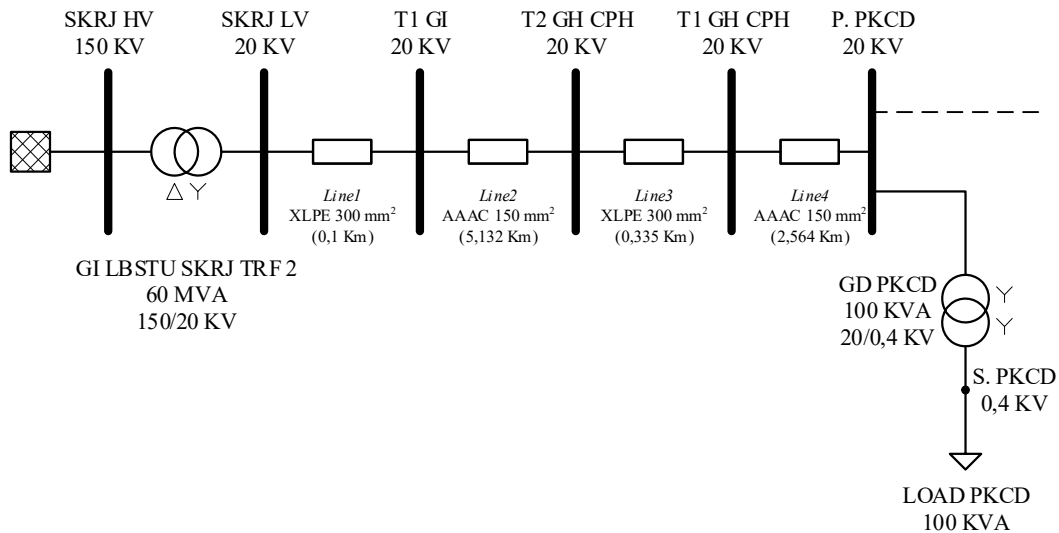


Gambar 3. Pemodelan Aliran Daya Saluran Distribusi 20 kV ULP Sukaraja pada Aplikasi ETAP

3. HASIL DAN ANALISIS

3.1 Kondisi Awal

Berikut ini merupakan sampel perhitungan matematis tegangan jatuh dan rugi daya pada saluran distribusi 20 kV ULP Sukaraja saat kondisi awal dengan pembebanan WBP (Waktu Beban Puncak), seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Berdasarkan data yang didapatkan, nilai arus saluran dengan pembebanan WBP sebesar 156,6 A.



Gambar 4. Sampel Perhitungan Matematis Tegangan Jatuh dan Rugi Daya pada Gardu Distribusi PKCD saat Kondisi Awal

Gambar 4 merupakan sampel perhitungan matematis untuk menentukan tegangan jatuh pada gardu distribusi PKCD saat kondisi awal dengan pembebanan WBP, maka tegangan jatuh yang terjadinya :

$$\begin{aligned}
 DV &= \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot L (R \cos \theta + X \sin \theta)}{V_{LL}} \times 100\% \\
 &= \left[\frac{\sqrt{3} \times 156,6 \times 0,100 \times ((0,1000 \times 0,85) + (0,0940 \times 0,53))}{V_{LL}} \times 100\% \right] + \\
 &\quad \left[\frac{\sqrt{3} \times 156,6 \times 5,132 \times ((0,2162 \times 0,85) + (0,3305 \times 0,53))}{V_{LL}} \times 100\% \right] + \\
 &\quad \left[\frac{\sqrt{3} \times 156,8 \times 0,335 \times ((0,2060 \times 0,85) + (0,1040 \times 0,53))}{V_{LL}} \times 100\% \right] + \\
 &\quad \left[\frac{\sqrt{3} \times 156,8 \times 2,564 \times ((0,2162 \times 0,85) + (0,3305 \times 0,53))}{V_{LL}} \times 100\% \right] = 3,91\%
 \end{aligned}$$

Sedangkan sampel perhitungan matematis untuk menentukan rugi daya pada *line2* saat kondisi awal dengan pembebanan WBP, maka tegangan jatuh yang terjadi sebagai berikut:

$$\Delta P_{3\phi} = 3 \cdot I^2 \cdot R = 3 \cdot I^2 \cdot R_S \cdot L = 3 \times 156,6^2 \times 5,132 \times 0,2162 = 81,629 \text{ kW}$$

Dari hasil perhitungan matematis, tegangan jatuh yang terjadi pada gardu distribusi PKCD saat pembebanan WBP sebesar 3,91% dan rugi daya yang terjadi pada *line2* dengan pembebanan WBP sebesar 81,629 kW.

3.1.1 Hasil Tegangan Jatuh

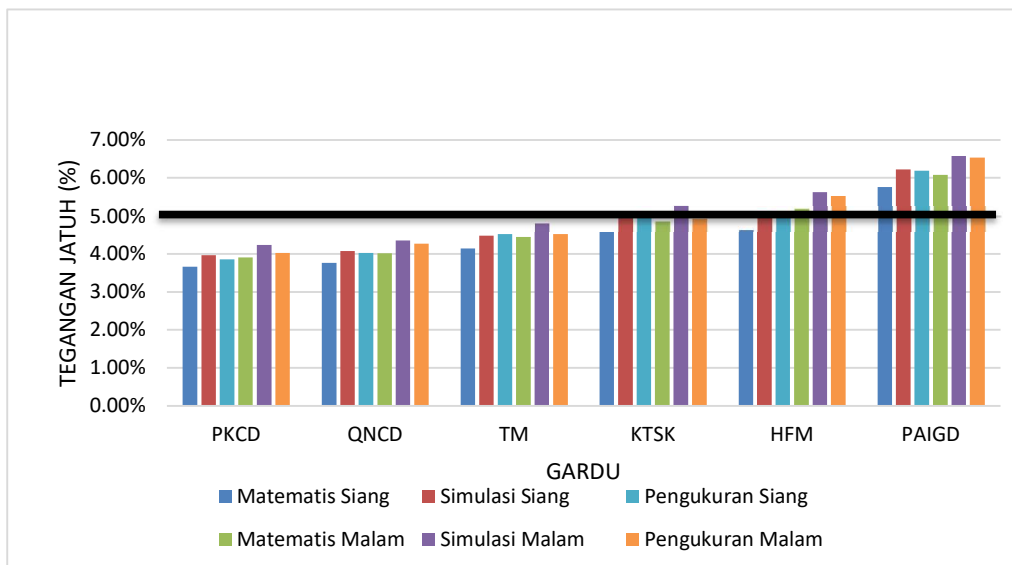
Tabel 3 menunjukkan sampel tegangan jatuh yang terjadi pada saluran distribusi 20 kV ULP Sukaraja dari hasil perhitungan matematis dan simulasi pada aplikasi ETAP saat kondisi awal dengan pembebanan LWBP dan WBP.

Tabel 3. Sampel Tegangan Jatuh pada Saluran Distribusi 20 kV ULP Sukaraja saat Kondisi Awal

ID	Siang (LWBP)						Malam (WBP)					
	Matematis		Simulasi		Terukur		Matematis		Simulasi		Terukur	
	ΔV (kV)	DV (%)	ΔV (kV)	DV (%)	ΔV (kV)	DV (%)	ΔV (kV)	DV (%)	ΔV (kV)	DV (%)	ΔV (kV)	DV (%)
PKCD	0,73	3,67	0,79	3,97	0,77	3,85	0,78	3,91	0,85	4,23	0,80	4,02
QNCD	0,75	3,77	0,82	4,08	0,80	4,02	0,80	4,02	0,87	4,35	0,85	4,27
TM	0,83	4,14	0,90	4,48	0,90	4,52	0,89	4,45	0,96	4,82	0,90	4,52
KTSK	0,92	4,61	1,00	4,99	1,01	5,03	0,97	4,87	1,05	5,27	0,99	4,94
HFM	0,93	4,65	1,01	5,04	1,01	5,03	1,04	5,19	1,13	5,63	1,11	5,53
PAIGD	1,15	5,76	1,25	6,23	1,24	6,20	1,22	6,08	1,32	6,58	1,31	6,53

Pada Tabel 3 gardu HFM berjarak $\pm 20,889$ km dan PAIGD berjarak $\pm 23,396$ km merupakan gardu yang letaknya diujung penyulang. Saat WBP tegangan jatuh yang terjadi pada gardu HFM sebesar 5,19% (matematis), 5,63% (simulasi), dan 5,53% (terukur). Dan gardu PAIGD sebesar 6,08% (matematis), 6,58% (simulasi), dan 6,53% (terukur). Adanya perbedaan nilai antara hasil perhitungan matematis, simulasi, dan pengukuran disebabkan oleh beberapa faktor, salah satunya adalah impedansi kawat penghantar. Dimana impedansi kawat AAAC ukuran 150 mm² default pada aplikasi ETAP sebesar $(0,210 + j0,3305) \Omega/Km$, dan saat perhitungan matematis impedansi kawatnya merujuk pada Tabel 1 sebesar $(0,2162 + j0,3305) \Omega/Km$.

Gambar 5 menunjukkan grafik sampel perbandingan tegangan jatuh yang terjadi pada saluran distribusi 20 kV ULP Sukaraja dari hasil perhitungan matematis dan simulasi pada aplikasi ETAP saat kondisi awal.



Gambar 5. Sampel Grafik Perbandingan Tegangan Jatuh pada Saluran Distribusi 20 kV ULP Sukaraja saat Kondisi Awal

Dari Gambar 5 mengacu saat pembebanan WBP karena memiliki pembebanan yang lebih besar. Gardu HFM tegangan jatuhnya sebesar 5,19% (matematis), 5,63% (simulasi), dan 5,53% (pengukuran). Serta gardu PAIGD tegangan jatuhnya sebesar 6,08% (matematis), 6,58% (simulasi), dan 6,50% (pengukuran). Artinya bahwa pada gardu distribusi HFM dan PAIGD tegangan jatuh yang terjadinya melebihi standar yang diizinkan sebesar 5%. (**SPLN 72:1987, 1987**). Oleh karena itu perlu adanya perbaikan guna meminimalisir tegangan jatuh yang terjadi pada saluran distribusi 20 kV ULP Sukaraja agar memenuhi standar yang diizinkan.

3.1.2 Hasil Rugi Daya

Tabel 4 menunjukkan sampel rugi daya yang terjadi pada saluran distribusi 20 kV ULP Sukaraja dari hasil perhitungan matematis dan simulasi pada aplikasi ETAP saat kondisi awal dengan pembebanan LWBP dan WBP.

Tabel 4. Sampel Rugi Daya pada Saluran Distribusi 20 kV ULP Sukaraja saat Kondisi Awal

ID	Siang (LWBP)				Malam (WBP)			
	Matematis		Simulasi		Matematis		Simulasi	
	kW	kVAR	kW	kVAR	kW	kVAR	kW	kVAR
Line1	0,648	0,609	0,494	2,607	0,736	0,692	0,561	2,512
Line2	71,928	109,955	83,783	103,000	81,629	124,785	95,084	117,000
Line3	1,257	0,635	1,542	2,197	1,426	0,720	1,750	2,097
Line4	0,375	0,189	0,459	0,654	0,425	0,215	0,521	0,624
Line5	21,840	33,386	25,415	31,213	24,781	37,882	28,840	35,723
Line6	17,188	26,275	20,010	24,599	19,503	29,813	22,706	28,151
Line7	2,620	4,005	3,049	3,745	2,968	4,538	3,455	4,280
Line8	0,193	0,295	0,225	0,175	0,230	0,352	0,268	0,232
Line9	0,304	0,465	0,354	0,276	0,362	0,553	0,421	0,364
Line10	0,000	0,000	0,000	0,216	0,000	0,000	0,000	0,215
Total Losses Saluran	147,600	220,210	171,572	253,267	169,785	251,279	197,313	279,589

Pada Tabel 4 penghantar *line2* merupakan penghantar yang paling dekat dengan penyulang sehingga arus yang mengalir pada saluran tersebut besar yaitu sebesar 156,6 A untuk pembebanan WBP, serta penghantar tersebut memiliki panjang penghantar $\pm 5,132$ km. Maka rugi daya penghantar *line2* saat pembebanan WBP rugi daya penghantar *line2* sebesar 81,629 kW dan 124,785 kVAR (matematis), serta sebesar 95,084 kW dan 117,000 kVAR (simulasi). Dan rugi daya total saluran sebesar 169,785 kW dan 251,279 kVAR (matematis), serta sebesar 197,313 kW dan 279,589 kVAR (simulasi). Sedangkan total daya yang disalurkan sebesar 4,605 MW dan 2,958 MVAR. Artinya rugi daya total yang terjadi pada saluran distribusi 20 kV ULP Sukaraja saat kondisi awal sebesar 6,26%.

3.2 Perbandingan Tegangan Jatuh dan Rugi Daya saat Kondisi Awal, Pengaturan Tap *Changer*, Penggantian Penghantar, Penggantian Penghantar dan Pengaturan Tap *Changer*, serta Manuver Jaringan

Berikut ini merupakan perbandingan tegangan jatuh dan rugi daya yang terjadi pada saluran distribusi 20 kV ULP Sukaraja saat kondisi awal, pengaturan tap *changer* sebesar -2,5% disisi primer transformator daya ULP Sukaraja, penggantian penghantar *mainline* AAAC 150 mm² menjadi 240 mm² sepanjang $\pm 22,760$ km, penggantian penghantar dan pengaturan tap *changer*, serta manuver jaringan ke penyulang Sukalarang.

3.2.1 Perbandingan Hasil Tegangan Jatuh

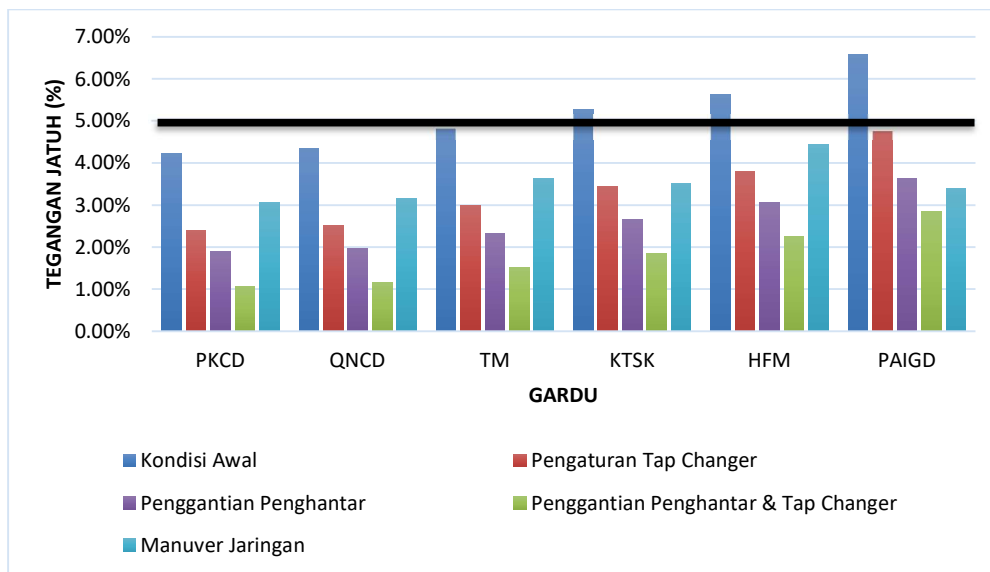
Berikut ini merupakan perbandingan tegangan jatuh dari hasil simulasi pada aplikasi ETAP dengan pembebanan WBP saat kondisi awal, pengaturan tap *changer*, penggantian penghantar, penggantian penghantar dan pengaturan tap *changer*, serta manuver jaringan seperti ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Sampel Perbandingan Tegangan Jatuh saat Kondisi Awal, Pengaturan Tap *Changer*, Penggantian Penghantar, Penggantian Penghantar dan Pengaturan Tap *Changer*, serta Manuver Jaringan

ID	Kondisi Awal		Pengaturan Tap <i>Changer</i>		Penggantian Penghantar		Penggantian Penghantar + Pengaturan Tap <i>Changer</i>		Manuver Jaringan	
	Malam		Malam		Malam		Malam		Malam	
	ΔV (kV)	DV (%)	ΔV (kV)	DV (%)	ΔV (kV)	DV (%)	ΔV (kV)	DV (%)	ΔV (kV)	DV (%)
PKCD	0,85	4,23	0,48	2,39	0,38	1,89	0,22	1,08	0,61	3,07
QNCD	0,87	4,35	0,50	2,51	0,40	1,98	0,23	1,17	0,63	3,16
TM	0,96	4,82	0,60	2,99	0,47	2,33	0,30	1,52	0,73	3,63
KTSK	1,05	5,27	0,69	3,44	0,53	2,66	0,37	1,86	0,71	3,53
HFM	1,13	5,63	0,76	3,80	0,61	3,05	0,45	2,26	0,89	4,45
PAIGD	1,32	6,58	0,95	4,77	0,73	3,64	0,57	2,85	0,68	3,39

Tabel 5 menunjukkan tegangan jatuh yang terjadi pada gardu HFM sebesar 5,63% untuk kondisi awal, sebesar 3,80% setelah melakukan pengaturan tap *changer*, sebesar 3,05% setelah melakukan penggantian penghantar, sebesar 2,26% setelah melakukan penggantian penghantar disertai dengan pengaturan tap *changer*, dan sebesar 4,45% setelah melakukan manuver jaringan. Sedangkan tegangan jatuh pada gardu PAIGD sebesar 6,58% untuk kondisi awal, sebesar 4,77% setelah melakukan pengaturan tap *changer*, sebesar 3,64% setelah melakukan penggantian penghantar, sebesar 2,85% setelah melakukan penggantian penghantar disertai dengan pengaturan tap *changer*, dan sebesar 3,39% setelah melakukan manuver jaringan.

Gambar 6 menunjukkan grafik perbandingan tegangan jatuh saat kondisi awal, setelah melakukan pengaturan tap *changer*, setelah melakukan penggantian penghantar, setelah melakukan penggantian penghantar dan pengaturan tap *changer*, serta manuver jaringan.



Gambar 6. Sampel Grafik Perbandingan Tegangan Jatuh saat Kondisi Awal, Pengaturan Tap *Changer*, Penggantian Penghantar, Penggantian Penghantar dan Pengaturan Tap *Changer*, serta Manuver Jaringan

Gambar 6 menunjukkan perbandingan tegangan jatuh yang terjadi pada saluran distribusi 20 kV ULP Sukaraja. Tegangan jatuh pada gardu PAIGD sebesar 6,58% untuk kondisi awal, sebesar 4,77% setelah melakukan pengaturan tap *changer*, sebesar 3,64% setelah melakukan penggantian penghantar, sebesar 2,85% setelah melakukan penggantian penghantar disertai dengan pengaturan tap *changer*, dan sebesar 3,39% setelah melakukan manuver jaringan. Artinya setelah melakukan usulan perbaikan dengan beberapa metode yang dilakukan, tegangan jatuh yang terjadi pada saluran distribusi 20 kV ULP Sukaraja memenuhi standar yang diizinkan yaitu tidak lebih dari 5%. **(SPLN 72:1987, 1987)**

Melihat Gambar 6 bahwa metode usulan perbaikan untuk meminimalisir terjadinya tegangan jatuh secara optimal adalah dengan metode manuver jaringan dan metode penggantian penghantar disertai dengan pengaturan tap *changer*. Akan tetapi untuk metode penggantian penghantar disertai pengaturan tap *changer* mempunyai kelemahan dalam hal aspek ekonomis dan waktu pemadaman yang dibutuhkan sehingga solusi ini lebih tepat untuk diaplikasikan sebagai solusi jangka panjang untuk menurunkan tegangan jatuh.

3.2.2 Perbandingan Hasil Rugi Daya

Berikut ini merupakan perbandingan rugi daya dari hasil simulasi pada aplikasi ETAP dengan pembebanan WBP saat kondisi awal, pengaturan tap *changer*, penggantian penghantar, penggantian penghantar dan pengaturan tap *changer*, serta manuver jaringan seperti ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Sampel Perbandingan Rugi Daya saat Kondisi Awal, Pengaturan Tap *Changer*, Penggantian Penghantar, Penggantian Penghantar dan Pengaturan Tap *Changer*, serta Manuver Jaringan

ID	Kondisi Awal		Pengaturan Tap <i>Changer</i>		Penggantian Penghantar		Penggantian Penghantar + Tap <i>Changer</i>		Manuver Jaringan	
	Malam		Malam		Malam		Malam		Malam	
	kW	kVAR	kW	kVAR	kW	kVAR	kW	kVAR	kW	kVAR
Line1	0,561	2,512	0,575	2,577	0,472	2,489	0,484	2,553	0,295	2,891
Line2	95,084	117,000	97,538	121,000	53,270	115,000	54,644	118,000	49,969	58,149
Line3	1,750	2,097	1,795	2,152	1,474	2,116	1,512	2,170	0,920	2,500
Line4	0,521	0,624	0,535	0,640	0,439	0,630	0,450	0,646	0,274	0,744
Line5	28,840	35,723	29,584	36,645	16,158	34,949	16,575	35,851	15,166	17,713
Line6	22,706	28,151	23,292	28,877	12,721	27,537	13,050	28,247	11,942	13,967
Line7	3,455	4,280	3,544	4,391	1,936	4,186	1,986	4,294	1,802	2,102
Line8	0,268	0,232	0,275	0,238	0,150	0,217	0,154	0,223	0,276	0,239
Line9	0,421	0,364	0,432	0,374	0,235	0,340	0,241	0,349	0,433	0,375
Line10	0,000	0,215	0,000	0,220	0,000	0,219	0,000	0,225	0,000	0,221
ΔP_{tot}	197,313	279,589	202,407	287,779	114,001	276,388	116,942	283,553	100,206	173,184

Tabel 6 menunjukkan perbandingan rugi daya dari hasil simulasi dengan pembebanan WBP menggunakan aplikasi ETAP. Pada penghantar *line2* rugi daya yang dihasilkan sebesar 95,084 kW dan 117,000 kVAR untuk kondisi awal, sebesar 97,538 kW dan 121,000 kVAR setelah melakukan pengaturan tap *changer*, sebesar 53,270 kW dan 115,000 kVAR setelah melakukan penggantian penghantar, sebesar 54,644 kW dan 118,000 kVAR setelah melakukan penggantian penghantar dan pengaturan tap *changer*, dan sebesar 49,969 kW dan 58,149 kVAR setelah melakukan manuver jaringan. Rugi daya total saluran saat kondisi awal sebesar 197,313 kW dan 279,589 kVAR atau sebesar 6,26%, setelah melakukan pengaturan tap *changer* sebesar 202,407 kW dan 287,779 kVAR atau sebesar 6,43%, setelah melakukan penggantian penghantar sebesar 114,001 kW dan 276,388 kVAR atau sebesar 5,46%, setelah melakukan penggantian penghantar dan pengaturan tap *changer* sebesar 116,942 kW dan 283,553 kVAR atau sebesar 5,60%, serta setelah melakukan manuver jaringan sebesar 100,206 kW dan 173,184 kVAR atau sebesar 3,65%.

3.2.3 Skoring Usulan Perbaikan

Tabel 7 menunjukkan skoring untuk menentukan usulan perbaikan untuk meminimalisir terjadinya tegangan jatuh yang paling optimal. Usulan perbaikan dengan metode manuver jaringan dan metode penggantian penghantar disertai pengaturan tap *changer* merupakan usulan perbaikan yang paling optimal, dikarenakan memiliki skor yang paling tinggi dari metode-metode usulan perbaikan yang lain.

Tabel 7. Skoring Usulan Perbaikan

NO	Kriteria dan Pertimbangan	Pengaturan Tap <i>Changer</i>		Penggantian Penghantar		Penggantian Penghantar + Pengaturan Tap <i>Changer</i>		Manuver Jaringan	
		Hasil	Skor	Hasil	Skor	Hasil	Skor	Hasil	Skor
1	Tegangan sistem dipertahankan +5% sampai -5% dari tegangan nominal, sesuai aturan <i>Grid Code</i> 20 kV (Permen ESDM, 2007).	Ujung penyulang (PAIGD) $V_S = 20,385$ kV $V_R = 19,432$ kV	1	Ujung penyulang (PAIGD) $V_S = 20,124$ kV $V_R = 19,396$ kV	2	Ujung penyulang (PAIGD) $V_S = 20,382$ kV $V_R = 19,812$ kV	3	Ujung penyulang (PAIGD) $V_S = 19,965$ kV $V_R = 19,287$ kV	0
2	Waktu operasional pekerjaan untuk melakukan usulan perbaikan.	Tidak perlu pemadaman.	2	Pemadaman cukup lama.	0	Pemadaman cukup lama.	0	Pemadaman 1 Hari (4 Jam)	1
3	Aspek ekonomis untuk melakukan usulan perbaikan.	Tidak perlu biaya.	3	Rp 2.246.280.000,00	0	Rp 2.246.280.000,00	0	Tidak perlu biaya.	3
4	Hasil DV (%) maksimal 5%, sesuai (SPLN 72:1987, 1987).	Ujung penyulang (PAIGD) DV = 4,77%	0	Ujung penyulang (PAIGD) DV = 3,05%	2	Ujung penyulang (PAIGD) DV = 2,85%	3	Ujung penyulang (PAIGD) DV = 3,39%	1
5	<i>Cost reduction</i> dari usulan perbaikan (pertahun).	Rp 55.999.042,85	0	Rp 921.819.538,11	2	Rp 889.637.735,23	2	Rp 1.065.175.911,35	3
Total Skor Usulan Perbaikan		6		6		8		8	

Keterangan : skor tertinggi merupakan usulan yang paling optimal.

Usulan perbaikan dengan metode manuver jaringan memiliki kelebihan diantaranya, tidak memerlukan biaya pekerjaan untuk melakukan manuver jaringan dikarenakan penyulang Sukalarang sudah ada dan penyulang tersebut merupakan penyulang untuk *back-up* dari konsumen khusus. *Cost reduction* yang dihasilkan sebesar Rp 1.065.175.911,35. Waktu operasional pekerjaan yang dibutuhkan untuk melakukan manuver jaringan hanya 1 hari (4 jam) pemadaman. Sedangkan kekurangan usulan perbaikan dengan metode manuver jaringan adalah, tegangan sistem paling ujung penyulang atau pada gardu PAIGD (V_R) sebesar 19,287 kV, sehingga apabila dimasa mendatang terdapat pertumbuhan beban yang signifikan, memungkinkan tegangan sistem yang terjadi pada gardu PAIGD tidak sesuai dengan standar. Dan penyulang Sukalarang merupakan *feeders express* atau sebagai *back-up* untuk konsumen khusus yang keandalan penyaluran tenaga listriknya harus dijaga, sehingga usulan perbaikan dengan metode manuver jaringan hanya dapat dipakai untuk jangka pendek.

Sedangkan usulan perbaikan dengan metode penggantian penghantar disertai pengaturan tap *changer* memiliki kelebihan diantaranya, tegangan sistem paling ujung penyulang atau pada gardu PAIGD (V_R) sebesar 19,812 kV, sehingga apabila dimasa mendatang terdapat pertumbuhan beban yang signifikan, memungkinkan tegangan sistem yang terjadi pada gardu PAIGD masih memenuhi standar. *Cost reduction* yang dihasilkan sebesar Rp 889.637.735,23. Tegangan jatuh yang terjadi diujung penyulang atau pada gardu PAIGD paling kecil diantara metode-metode usulan perbaikan yang lain yaitu sebesar 2,85%. Sedangkan kekurangan usulan perbaikan dengan metode penggantian penghantar disertai pengaturan tap *changer* adalah, waktu operasional pekerjaan yang dibutuhkan untuk melakukan penggantian

penghantar disertai pengaturan tap *changer* cukup lama, sehingga terjadi pemadaman berkala pada saluran distribusi tersebut. Biaya yang diperlukan untuk melakukan penggantian penghantar disertai pengaturan tap *changer* cukup besar yaitu Rp 2.246.280.000,00.

4. KESIMPULAN

Saluran distribusi 20 kV ULP Sukaraja memiliki 122 gardu distribusi, gardu HFM dan PAIGD merupakan gardu yang letaknya paling jauh dengan penyulang dan tegangan jatuh yang terjadi pada gardu tersebut paling besar. Gardu HFM memiliki jarak $\pm 20,889$ km dari penyulang sedangkan gardu PAIGD memiliki jarak $\pm 23,396$ km. Nilai tegangan jatuh yang terjadi pada gardu PAIGD sebesar 6,58% saat kondisi awal, sebesar 4,77% saat pengaturan tap *changer*, sebesar 3,64% saat penggantian penghantar, sebesar 2,85% saat penggantian penghantar disertai pengaturan tap *changer*, dan sebesar 3,39% saat manuver jaringan ke penyulang Sukalarang. Total rugi daya saluran saat beban keadaan puncak (WBP) dari hasil simulasi menggunakan aplikasi ETAP, untuk kondisi awal sebesar 197,313 kW dan 279,589 kVAR atau 6,26% dari daya yang disalurkan, saat pengaturan tap *changer* sebesar 202,407 kW dan 287,779 kVAR atau 6,43% dari daya yang disalurkan, saat penggantian penghantar sebesar 114,001 kW dan 276,388 kVAR atau 5,46% dari daya yang disalurkan, saat penggantian penghantar disertai pengaturan tap *changer* sebesar 116,942 kW dan 283,553 kVAR atau 5,60% dari daya yang disalurkan, serta saat manuver jaringan ke penyulang Sukalarang sebesar 100,206 kW dan 173,184 kVAR atau 3,65% dari daya yang disalurkan. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa untuk menurunkan tegangan jatuh dan rugi daya paling optimal yaitu untuk jangka pendek dengan metode manuver jaringan karena dapat memberikan cost reduction tertinggi sebesar Rp 1.065.175.911,35 per tahun sedangkan untuk jangka panjang dengan metode penggantian penghantar disertai pengaturan tap *changer* dengan tegangan jatuh terendah sebesar 2,85%.

DAFTAR RUJUKAN

- AlAhmad, O. & AlDahmi, M. (2021). Voltage Profile Improvement Analysis of 11 kV Feeders Using Capacitor Banks. *International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*, (pp. 83-87).
- Armas, J. & Ivanov, A. (2019). Determination of the total cost of active power losses and methods to reduce power losses in low-voltage distribution networks. *IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, (pp. 1-6).
- Awwad, H. (2019). Applied Study of Energy Saving, Voltage Drop Reducing Technically Using Reactive Power Compensation and Cable Resizing in Gaza Electrical Grid and its Program Simulation Quality Improvement. *10th International Conference on Information and Communication Systems (ICICS)*, (pp. 77-82).
- Balandin V.S., Neshina Y.G. , & Bilichenko A.P. (2019). Reducing Electrical Power Losses with the Use of Compensation Devices. *IEEE International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, (pp. 1-3).

- Jamil, U., Amin, A., & Mahmood, A. (2018). A comparative study of control techniques for power loss minimization in a distribution network. *1st International Conference on Power, Energy and Smart Grid (ICPESG)*, (pp. 1-5).
- Kumar, S., Faizan ur Rehman, C. K., Shaikh, S. A. & Sahito, A. A. (2018). Voltage improvement and power loss reduction through capacitors in utility network. *International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)*, (pp. 1-5).
- Lu, J., et al. (2018). An Optimal Reactive Power Compensation Allocation Method Considering the Economic Value Affected by Voltage Sag. *IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*, (pp. 1-6).
- Murad, T. K. (2021). *Analisis Jatuh Tegangan Sistem Jaringan Distribusi 20 KV pada Penyulang BE 03 Paya Bili ULP Langsa Kota*. Jakarta: Institut Teknologi PLN.
- Nelwan, M. N., Tuegeh, M., & Lisi, F. (2015). Penyusutan Energi Listrik pada Penyulang SU2 Jaringan Distribusi Minahasa Utara. *E-Journal Teknik Elektro dan Komputer*, 67-76.
- Permen ESDM. (2007). *Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik Jawa-Madura-Bali*. Jakarta: Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral.
- PT. PLN ULP Sukaraja. (2020). *Saluran Distribusi 20 KV PT. PLN (Persero) ULP Sukaraja*. Sukabumi: Perusahaan Umum Listrik Negara.
- SPLN 41-8:1981. (1981). *Hantaran Aluminium Campuran (AAAC)*. Jakarta: Perusahaan Umum Listrik Negara.
- SPLN 43-5-1:1995. (1995). *Kabel Pilin Tanah Berisolasi XLPE dan Berselubung PE/PVC dengan Tegangan Pengenal 12/20 (24) KV*. Jakarta: Perusahaan Umum Listrik Negara.
- SPLN 72:1987. (1987). *Spesifikasi Desain untuk Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan Jaringan Tegangan Rendah (JTR)*. Jakarta: Departemen Pertambangan dan Energi Perusahaan Umum Listrik Negara.
- Sulaeman, I., Sudrajat, M. I., Moonen, N., Popovic, J. & Leferink, F. (2023). Trade-off of Losses, Voltage Drop, and Harmonics in Cable Selection of Remote Microgrids. *IEEE 7th Global Electromagnetic Compatibility Conference (GEMCCON)*, (pp. 1-2).
- Syufrijal, & Monantun, R. (2014). *Jaringan Distribusi Tenaga Listrik*. Jakarta: Kementrian Pendidikan Dasar Menengah dan Kebudayaan Republik Indonesia.
- Thakur, R., & Chawla, P. (2015). Voltage Drop Calculations & Design of Urban Distribution Feeders. *IRJET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, 04(12), 43-53.

- Thongsuk, S., et al. (2023). An approach for voltage drop improvement in 22 kV PEA distribution system based on high voltage capacitor placement. *Energy Reports*, 09(11), 48-54.
- Wachjoe, C.K., & Zein, H. (2020). A Method for Voltage Drop Monitoring on Load Sides in Medium Voltage Feeder. *7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, (pp. 1215-1220).
- Wang, W., et al. (2021). Analysis of Technical Losses in Hubei Power Grid. *IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*, (pp. 1-5).
- Ymeri, A., Dervishi, L., & Qorolli, A. (2014). Impacts of Distributed Generation in Energy Losses and Voltage Drop in 10 kV Line in The Distribution System. *IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, (pp. 1385-1389).