

EVALUASI KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI DI PT. PLN (Persero) ULP SINTANG

Ervin Prastio¹, M. Iqbal Arsyad², Purwoharjono³

ervinprastio17@student.untan.ac.id¹, iqbal.arsyad@ee.untan.ac.id²,

purwo.harjono@ee.untan.ac.id³

Universitas Tanjungpura

ABSTRAK

Ketidakseimbangan beban antar fasa pada transformator distribusi menyebabkan arus netral mengalir pada transformator dan dapat mengakibatkan rugi daya pada jaringan di PT. PLN ULP Sintang. Penelitian ini menghitung pembebanan trafo, ketidakseimbangan beban, rugi-rugi pada arus netral. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Persentase pembebanan penyulang MT. Haryono dengan rata-rata mencapai 41,24% saat siang dan 55,47% saat malam, penyulang Martiguna dengan rata-rata pembebanan 37,36% saat siang dan 32,56% saat malam. Persentase rata-rata ketidakseimbangan beban pada penyulang Martiguna mencapai 28,89% saat siang hari dan 26,52% saat malam, rata-rata ketidakseimbangan beban pada penyulang MT. Haryono mencapai 17,40% saat siang dan 14,84% saat malam, dengan kategori Baik ($\leq 10\%$) dengan total 20 Unit saat siang dan 26 unit saat malam, kategori Cukup ($10\% \leq 20\%$) dengan total 18 Unit saat siang dan 15 unit saat malam, Kurang ($20\% \leq 25\%$) dengan total 6 Unit saat siang dan 8 unit saat malam, terdapat 12 Unit saat siang dan 11 Unit saat malam, dengan total persentase Buruk ($\geq 25\%$) dengan total 22 Unit saat siang dan 17 unit saat malam. Total rugi-rugi daya pada penyulang MT. Haryono siang hari 6,8454 kW dan 14,274 kW saat malam dengan rugi-rugi energi 34,227 kWh saat siang hari dan 71,368 kWh saat malam, penyulang Martiguna dengan rugi-rugi daya 2,350 kW saat siang dan 1,955 kW saat malam dengan rugi-rugi energi 11,7545 kWh saat siang dan 9,7797 saat malam.

Kata Kunci: Transformator Distribusi, Pembebanan, Ketidakseimbangan Beban, Arus Netral, Rugi-Rugi Daya, Rugi-Rugi Energi.

PENDAHULUAN

Listrik adalah kebutuhan dasar manusia yang sangat penting. Seiring dengan kemajuan teknologi, listrik kini menjadi sumber energi utama yang mengoperasikan berbagai peralatan dari yang paling sederhana hingga yang paling kompleks baik di rumah tangga maupun industri. Transformator distribusi merupakan bagian dari sistem distribusi yang berperan dalam mengalirkan daya listrik dari jaringan tegangan menengah ke jaringan tegangan rendah, serta mengoperasikan nkan tegangan listrik dari tingkat menengah (20 kV) menjadi tingkat rendah (380 volt / 220 volt). Jaringan tegangan rendah ini merupakan bagian dari sistem distribusi sekunder yang terdiri dari tiga fasa dan empat kawat yaitu R, S, dan T. Kelancaran jaringan ini disebut seimbang ketika arus yang mengalir di dalamnya memiliki besar yang sama, jika tidak seimbang maka beban pada jaringan tersebut juga tidak seimbang. Ketidakseimbangan beban pada transformator mengakibatkan rugi-rugi daya yang mengalir pada penghantar netral.

Rugi-rugi daya sendiri merupakan suatu keadaan ketika hilangnya energi yang dibangkitkan mengurangi jumlah energi yang dijual kepada konsumen sehingga berpengaruh pada profitabilitas perusahaan. Ketidakseimbangan beban ini disebabkan karena dalam waktu penyalaan beban yang tidak serempak, penyambungan yang tidak seimbang pada tiap fasa (R, S, dan T), pemasangan beban yang tidak seimbang pada tiap

fasanya, dan terjadinya gangguan yang dapat mengakibatkan ketidakseimbangan beban itu sendiri [4].

PT. PLN (Persero) ULP Sintang merupakan penyedia tenaga listrik yang menyuplai dan mendistribusikan kebutuhan listrik untuk wilayah Kota Sintang dan sekitarnya. Sistem kelistrikan di ULP Sintang menggunakan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dan juga Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) untuk menghasilkan energi listrik. ULP Sintang membeban kebutuhan listrik untuk 11 penyulang, diantaranya penyulang Tebelian dengan panjang jaringan Kms memiliki 149 GD dan daya yang terpasang 120.30 kVA, Kedabang dengan panjang jaringan.

Penelitian dilakukan pada transformator distribusi di ke 2 penyulang yaitu penyulang MT. Haryono dan juga penyulang Martiguna. Pengambilan objek di ke 2 penyulang ini dilakukan untuk melakukan perbandingan pada wilayah permukiman yang padat penduduk dan juga wilayah yang penggunaan beban industrinya yang cukup besar, yang dimana beban ini nantinya akan dijadikan bahan dasar untuk menganalisis keadaan jaringan distribusi pada daerah tersebut. Maka dilakukan penelitian ini agar dapat mengetahui besarnya rugi-rugi yang disebabkan oleh ketidakseimbangan beban pada sistem distribusi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di PT. PLN (Persero) ULP Sintang, Kalimantan Barat, selama kurun waktu sekitar empat bulan dengan menggunakan data sekunder yang diperoleh dari tahun 2024. Penelitian ini memusatkan perhatian pada sistem kelistrikan yang terdiri atas PLTU dan PLTD sebagai sumber pembangkit listrik untuk 11 penyulang. Penyulang-penyulang tersebut memiliki karakteristik berbeda dari sisi panjang jaringan, jumlah gardu distribusi (GD), dan kapasitas daya. Fokus utama dalam penelitian ini adalah Penyulang MT. Haryono, yang memiliki panjang jaringan 33,78 km, 44 GD, serta total daya terpasang sebesar 8.210 kVA. Kawasan ini tergolong padat karena berada di pusat kota Sintang, sehingga beban listriknya cukup tinggi, mencakup rumah tangga, kantor kecil, usaha, sekolah, dan kampus.

Penelitian ini juga mengulas berbagai aspek teknis sistem distribusi, termasuk fungsi transformator dan komponen-komponennya seperti kumparan primer dan sekunder. Rumus-rumus teknis digunakan untuk menghitung arus beban, keseimbangan fasa, pembebanan trafo, serta ketidakseimbangan antar fasa. Penelitian juga menggunakan parameter standar dari SPLN No.17 Tahun 2014 untuk mengukur tingkat kesehatan transformator berdasarkan ketidakseimbangan arus dan pembebanan. Data arus dihitung menggunakan metode langsung dengan ampere meter atau metode tidak langsung menggunakan tang ampere, yang memberikan keuntungan praktis dalam pengukuran tanpa perlu memadamkan listrik.

Selain itu, penelitian membahas sistem distribusi tenaga listrik dari berbagai model jaringan seperti sistem radial, loop, dan spindel. Penekanan diberikan pada pengaruh arus netral yang tinggi terhadap efisiensi dan keamanan sistem, karena dapat menimbulkan panas berlebih dan menurunkan kualitas daya. Kerugian daya akibat arus netral dan saluran penghantar fasa juga dihitung untuk memahami potensi rugi-rugi energi dalam distribusi. Hasil dari penelitian ini penting untuk evaluasi teknis dan operasional kelistrikan di wilayah Sintang guna peningkatan efisiensi serta kestabilan sistem distribusi tenaga listrik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data hasil pengukuran

Dari hasil pengukuran langsung pada kedua penyulang di PT. PLN (Persero) ULP Sintang didapatkan data hasil pengukuran arus pada masing-masing trafo distribusi, dimana pengukuran pada siang hari dimulai pada jam (08:00 – 12:00), dan malam hari jam (18:00 – 21:00) yang disajikan dalam bentuk Tabel

Tabel 2 Data Pengukuran Transformator Distribusi Penyulang MT. Haryono

No	No Trafo	Siang Hari				Malam Hari			
		R (A)	S (A)	T (A)	N (A)	R (A)	S (A)	T (A)	N (A)
1.	ST0336	42,25	46,42	52,16	21,43	83,9	70,9	83,8	39,83
2.	ST0372	30,19	26,52	10,7	36,25	61	62,9	61,6	48,4
3.	ST0135	75,24	44,18	72,53	63,4	100,1	71,9	133,7	76,5
4.	ST0134	37,8	30,8	55,5	30,49	79,1	72,1	97,7	46,83
5.	ST0306	9,41	16,7	38,52	20,19	19,72	24,3	55,31	34,64
6.	ST0320	100,7	112,8	110,3	55,9	148,7	158,1	150,8	74
7.	ST0133	0	0	0	0	0	0	0	0
8.	ST0317	46,91	20,63	9,74	34,71	73,4	72,7	75,9	39,92
9.	ST0338	109,1	54,17	57,73	20,75	144,8	84,1	89,7	25
10.	ST0051	183,4	161,9	234,6	64,2	219,7	234,4	278,2	87,3
11.	ST0262	125,9	124,2	127,6	34,25	178	172,3	162,7	43,91
12.	ST0129	206,8	221,9	225,8	65,4	256,4	274,1	264,6	83,5
13.	ST0305	57,5	39,15	37,12	35,9	96,1	58,36	57,53	55,8
14.	ST0373	97,3	91,5	104,7	34,57	126,6	134,6	142,2	55,7
15.	ST0333	79,6	100,8	74,7	30,51	127,9	151,6	100,5	61,2
16.	ST0130	0	0	0	0	0	0	0	0
17.	ST0311	28,7	10,17	14,35	20,82	54,59	16,45	22,48	39,51
18.	ST0312	123,5	183,2	137,9	75,2	167,3	214,2	176,3	104
19.	ST0313	0	0	0	0	0	0	0	0
20.	ST0374	18,5	5,21	6,47	17,91	26,44	7,56	7,97	22,5
21.	ST0131	15,48	10,76	12,82	5,7	22,87	15,45	18,94	8,31
22.	ST0375	159,4	176,7	171,8	75,2	196,8	221,9	215,8	96,8
23.	ST0132	73,9	83,7	94,2	33,61	113,4	137,1	136,4	51,52
24.	ST0050	195,5	206,1	191,8	47,8	235,6	246,3	239,9	75,2
25.	ST0049	163,1	196,9	132,5	90,8	187,7	211,9	153,8	115,7
26.	ST0048	190,1	178,9	145,2	12,71	221	200,4	187,8	9,5
27.	ST0047	244,3	255,3	271,3	43,14	190,1	354,9	324,3	45,75

28.	ST0243	3,27	2,5	2,7	2,1	2,98	2,83	2,98	71
29.	ST0244	2,59	2,23	1,3	0,44	3,75	3,6	3,4	57
30.	ST0282	131,4	132,9	84,5	38,12	160,1	164,5	127,6	59,25
31.	ST0319	56,4	41,74	23,84	40,47	98,6	87,7	51,76	56,99
32.	ST0220	110,7	116,8	113,4	55,9	148,7	158,1	150,8	74
33.	ST0046	112,5	51,2	45,1	45,97	161,5	94,4	69,9	70,7
34.	ST0221	37,53	37,83	24,91	29,72	12,66	19,55	25,99	17,61
35.	ST0316	34,12	35,61	38,63	23,93	80,1	47,96	66,44	50,55
36.	ST0128	208,6	173,1	200,9	72,29	267,8	244,5	238,5	92,1
37.	ST0419	1,43	1,75	1,19	2,41	4,78	1,48	2,72	5,8
38.	ST0420	1,25	1,7	0,57	0,25	3,53	2,18	1,5	1
39.	ST0376	115,1	82,4	80,6	42,52	158,3	104,3	135,7	67,8
40.	ST0045	222,8	247	180,5	74,9	221,1	239,1	186,4	92,9
41.	ST0126	209,2	181,3	200	91,2	296	247,5	259,1	115,4
42.	ST0345	54,26	47,64	79,13	33,21	68,72	57,61	84,99	45,36
43.	ST0424	34,26	47,64	19,13	33,21	49,2	53,19	24,8	40,11
44.	ST0346	13,06	25,54	12,54	11,91	17,28	34,77	17,45	13,45

Tabel 3 Data Pengukuran Transformator Distribusi Penyulang Martiguna

No	No Trafo	Siang Hari				Malam Hari			
		R (A)	S (A)	T (A)	N (A)	R (A)	S (A)	T(A)	N (A)
1.	ST0401	87	92,6	81,7	29,96	97,7	110,6	100,7	35,7
2.	ST0408	8	0	0	10,3	11	0	0	12
3.	ST0136	36,85	18,65	8,8	28,25	46,91	20,63	9,74	34,71
4.	ST0379	30,19	26,52	10,7	12,41	47,25	35,9	22,31	20,57
5.	ST0380	127,5	120,1	91,23	92,1	178	172,3	162,7	33,91
6.	ST0139	72,5	55,15	70,3	17,44	92	74,4	90,9	28,72
7.	ST0245	0	0	0	0	0	0	0	0
8.	ST0140	196,1	207,9	190,5	34,96	223,5	262,3	216	21,3
9.	ST0321	18,92	14,15	8,7	20,54	36,55	32,89	14,63	27,19
10.	ST0322	0	0	0	0	0	0	0	0
11.	ST0246	6,19	8,19	8,52	24	7,55	10,71	9,63	58
12.	ST0247	90,1	88,7	94,9	80,8	6	5	6	2
13.	ST0326	0,12	5,4	6,63	5,74	2,3	6,21	12,65	6,81
14.	ST0300	140,1	68,7	74,9	80,8	120,6	94,6	73,4	78,8

15.	ST0141	35,87	22,7	18,9	18,2	9,83	11,2	8,22	10,6
16.	ST0334	3,28	10,81	8,58	4,9	6,74	8,33	14,03	12,25
17.	ST0142	100,3	157,9	107,1	80,96	110,7	179,5	134,4	96,5
18.	ST0335	19,49	11,49	10,66	4,89	28,04	12,71	19,64	23,4
19.	ST0411	37,85	36,6	43,73	36,9	46,94	45,32	53,95	42,6
20.	ST0143	69,7	102,3	78,6	29,9	141,14	155,3	121,7	40,66
21.	ST0355	1,61	6,68	5,58	4,72	2,92	11,97	10,2	9,27
22.	ST0423	6,4	0,92	0,03	6,18	7,16	1	0,04	7,38
23.	ST0353	140,7	148,1	103,2	35,43	160,1	164,5	127,6	59,25
24.	ST0354	35,91	28,7	35,7	23,5	49,26	36,69	49,19	32,71
25.	ST0144	0,04	0,85	33,34	32,96	6	62	58,42	28,43
26.	ST0145	65,24	34,18	62,53	30,31	75,8	39,97	71,9	44,39
27.	ST0381	145,9	154,9	147,2	34,25	178,4	183,9	185,3	45,91

Data pengukuran yang telah didapatkan melalui observasi lapangan, selanjutnya perhitungan dilakukan secara manual karena persamaan matematis yang digunakan hanya persamaan biasa yang bisa diselesaikan dengan cara manual tanpa menggunakan metode tertentu. Karena perhitungannya sama maka peneliti akan menghitung dari salah satu data siang dan malam harinya. Perhitungan menggunakan data transformator distribusi nomor ST0047 acuan data dari hasil pengukuran yang sudah dilakukan.

Dari hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa beban puncak pada trafo ST0047 terjadi pada saat malam hari dengan total pembebanan 76,28 %.

Didapatkan hasil perhitungan pembebanan pada setiap transformator distribusi yang dilayani 2 Penyulang di PT. PLN (Persero) ULP Sintang yang ditunjukkan pada

Tabel 4 Hasil Perhitungan Pembebanan Transformator Distribusi Penyulang MT.Haryono

No	No Trafo	Kapasitas Trafo (kVA)	Beban Penuh	Rata-Rata Beban Trafo (Ampere)		Pembebanan (%)	
				Siang	Malam	Siang	Malam
1.	ST0336	100	151,93	46,94	79,53	30,89	52,34
2.	ST0372	200	303,86	22,47	61,83	7,39	20,34
3.	ST0135	200	303,86	63,98	101,9	21	33,53
4.	ST0134	160	243,09	41,36	82,96	17	34,12
5.	ST0306	50	75,96	21,54	33,11	28,35	43,58
6.	ST0320	160	243,09	107,9	152,53	44,39	62,74
7.	ST0133	50	0	0	0	0	0
8.	ST0317	100	151,93	25,76	74	16,95	48,70
9.	ST0338	100	151,93	73,66	106,2	48,48	69,89

10.	ST0051	200	303,86	193,3	244,1	63,61	80,33
11.	ST0262	160	243,09	125,9	171	51,79	70,34
12.	ST0129	200	303,86	218,1	265,03	71,79	87,21
13.	ST0305	100	151,93	44,59	70,66	29,34	46,50
14.	ST0373	100	151,93	97,83	134,4	64,39	88,50
15.	ST0333	160	243,09	85,03	126,6	34,97	52,10
16.	ST0130	50	0	0	0	0	0
17.	ST0311	100	151,93	17,74	31,17	11,67	20,51
18.	ST0312	160	243,09	148,2	185,9	60,96	76,48
19.	ST0313	200	0	0	0	0	0
20.	ST0374	50	75,96	10,06	13,99	13,24	18,41
21.	ST0131	25	37,98	13,02	19,08	34,27	50,24
22.	ST0375	200	303,86	169,3	211,5	55,71	69,60
23.	ST0132	100	151,93	83,9	128,9	55,24	84,88
24.	ST0050	200	303,86	197,8	240,6	65,09	79,17
25.	ST0049	200	303,86	164,1	184,4	54,02	60,70
26.	ST0048	200	303,86	171,4	203,06	56,40	66,82
27.	ST0047	250	379,83	256,9	289,7	67,65	76,28
28.	ST0243	25	37,98	2,82	2,93	7,43	7,71
29.	ST0244	25	37,98	2,04	3,58	5,37	9,43
30.	ST0282	100	151,93	116,2	150,73	76,52	99,20
31.	ST0319	160	243,09	40,66	79,35	16,72	32,64
32.	ST0220	25	37,98	113,6	152,5	299,1	401,5
33.	ST0046	100	151,93	69,6	108,6	45,80	71,47
34.	ST0221	50	75,96	33,42	19,4	43,99	25,53
35.	ST0316	100	151,93	36,12	64,83	23,77	42,67
36.	ST0128	200	303,86	194,2	250,2	63,90	82,36
37.	ST0419	1500	2279,01	1,45	2,99	0,06	0,13
38.	ST0420	1500	2279,01	1,17	2,40	0,05	0,10
39.	ST0376	200	303,86	92,7	132,7	30,50	43,69
40.	ST0045	200	303,86	216,76	215,5	71,33	70,92
41.	ST0126	250	379,83	196,8	267,5	51,82	70,43

42.	ST0345	100	151,934	60,34	70,44	39,71	46,36
43.	ST0424	100	151,93	33,67	42,39	22,16	27,90
44.	ST0346	100	151,93	17,04	23,16	11,21	15,24

Tabel 5 Hasil Perhitungan Pembebanan Transformator Distribusi Penyulang Martiguna

No	No Trafo	Kapasitas Trafo (kVA)	Beban Penuh	Rata-Rata Beban Trafo (Ampere)		Pembebanan (%)	
				Siang	Malam	Siang	Malam
1.	ST0401	200	303,86	87,1	103	35,82	33,89
2.	ST0408	160	243,09	2,66	3,66	1,09	1,50
3.	ST0136	160	243,09	21,43	25,76	7,05	10,59
4.	ST0379	100	151,93	22,47	35,15	29,57	23,13
5.	ST0380	200	303,86	112,94	171	46,46	56,27
6.	ST0139	160	243,09	65,98	85,76	27,14	35,28
7.	ST0245	25	0	0	0	0	0
8.	ST0140	200	303,86	198,16	233,93	130,42	76,98
9.	ST0321	100	151,93	15,92	28,02	9,16	18,44
10.	ST0322	100	0	0	0	0	0
11.	ST0246	25	37,98	7,63	9,29	20,09	24,47
12.	ST0247	25	37,98	3,03	5,66	37,52	14,91
13.	ST0326	25	37,98	4,05	7,05	2,66	18,56
14.	ST0300	160	243,09	118,56	101,93	38,90	41,93
15.	ST0141	50	75,96	25,82	9,75	67,98	12,83
16.	ST0334	100	151,93	7,55	9,7	4,97	6,38
17.	ST0142	160	243,09	121,76	141,53	80,14	58,22
18.	ST0335	100	151,93	13,88	20,13	9,13	13,24
19.	ST0411	100	151,93	39,39	48,73	12,96	32,07
20.	ST0143	160	243,09	83,53	139,38	109,95	57,33
21.	ST0355	50	75,96	4,62	8,36	3,04	11
22.	ST0423	50	75,96	2,45	2,73	0,80	3,59
23.	ST0353	100	151,93	130,66	150,73	86	99,20
24.	ST0354	200	303,86	33,43	45,04	11	14,82
25.	ST0144	50	75,96	11,41	42,14	4,69	55,47

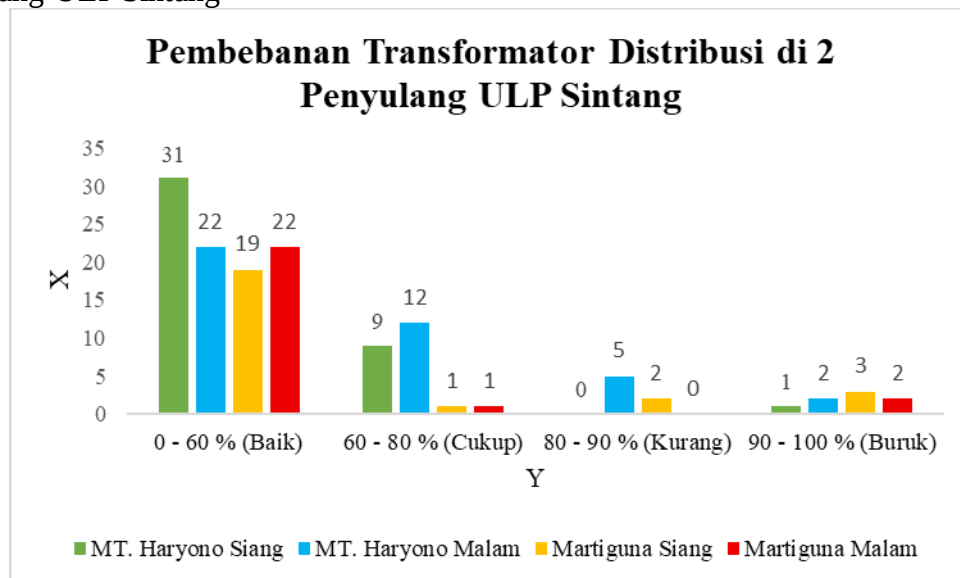
26.	ST0145	100	151,93	53,98	62,55	35,53	41,17
27.	ST0381	100	151,93	149,33	182,53	196,5	120,13

Dari Hasil Perhitungan Pembebanan Transformator Distribusi di 2 Penyulang ULP Sintang, untuk memudahkan analisa maka dikelompokkan berdasarkan jumlah trafo pada saat siang dan malam hari berdasarkan persentase pembebanan

Tabel 6 Pembebanan Berdasarkan Jumlah Trafo Distribusi di ULP Sintang

Persentase	Jumlah Siang	Jumlah Malam
0 - 60 % (Baik)	50	44
60 - 80 % (Cukup)	10	13
80 - 90 % (Kurang)	2	5
90 - 100 % (Buruk)	4	4
Jumlah Trafo	66	66

Jika dinyatakan dalam bentuk grafik pembebanan transformator distribusi di 2 Penyulang ULP Sintang



Grafik Pembebanan di ULP Sintang Berdasarkan Jumlah Trafo Distribusi pada 2 penyulang

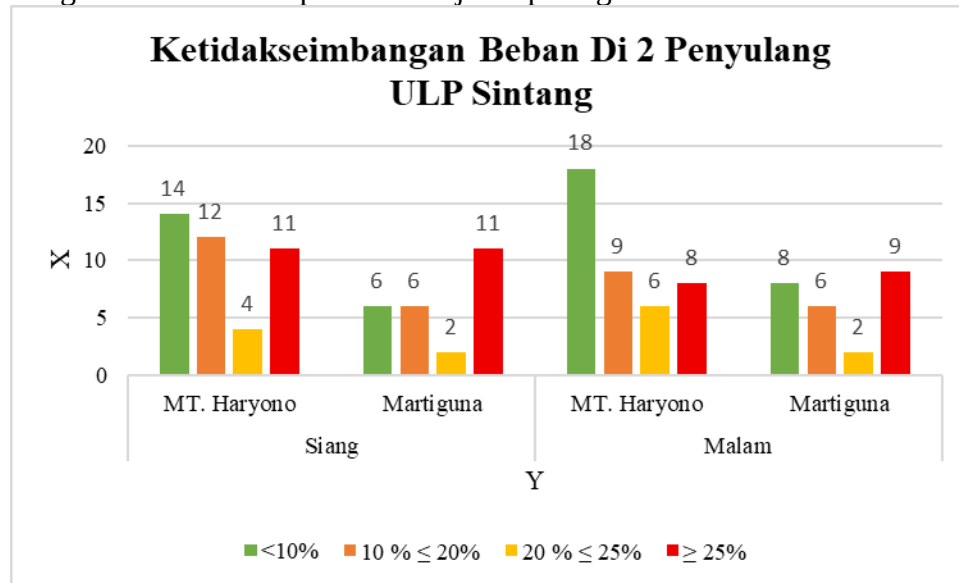
Data hasil perhitungan ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi di 2 Penyulang ULP Sintang dapat dilihat bahwa terdapat ketidakseimbangan beban pada siang hari dan malam hari dengan persentase ketidakseimbangan beban yang berbeda-beda, untuk memudahkan analisa data hasil perhitungan ketidakseimbangan beban direkapitulasi berdasarkan persentase pembebanan yang dapat dilihat

Tabel 7 Total Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator Distribusi di 2 Penyulang ULP Sintang Berdasarkan Jumlah Trafo

Persentase	Health Index	MT.Haryono		Martiguna	
		Siang	Malam	Siang	Malam
<10%	Baik	14	18	6	8
10 % $\leq$ 20%	Cukup	12	9	6	6

20 % ≤ 25%	Kurang	4	6	2	2
≥ 25%	Buruk	11	8	11	9
Jumlah Trafo		41	41	25	25

Jika dinyatakan dalam bentuk grafik, ketidakseimbangan beban pada 2 penyulang ULP Sintang berdasarkan rekapitulasi disajikan pada gambar



Gambar Grafik Pembebanan Pada Transformator

Perhitungan arus sisi Primer Transformator Distribusi

Akibat dari ketidakseimbangan beban yang terjadi di sisi sekunder berdampak pada sisi primer dimana untuk menghitung ketidakseimbangan pada sisi primer feeder maka diperlukan arus yang mengalir pada sisi primer transformator distribusi yang dilayani feeder yang dapat dihitung

Tabel 8 Arus Sisi Primer Transformasi Distribusi Penyulang Martiguna

No	No Trafo	Siang			Malam		
		R	S	T	R	S	T
1	ST0401	1,653	1,7594	1,5523	1,8563	2,1014	1,9133
2	ST0408	0,1520	0	0	0,2090	0	0
3	ST0136	0,7001	0,3543	0,1672	0,8912	0,3919	0,1850
4	ST0379	0,5736	0,5038	0,2033	0,8977	0,6821	0,4238
5	ST0380	2,4225	2,2819	1,7333	3,382	3,2737	3,0913
6	ST0139	1,3775	1,0478	1,3357	1,748	1,4136	1,7271
7	ST0245	0	0	0	0	0	0
8	ST0140	3,7259	3,9501	3,6195	4,2465	4,9837	4,104
9	ST0321	0,3594	0,2688	0,1653	0,6944	0,6249	0,2779
10	ST0322	0	0	0	0	0	0
11	ST0246	0,1176	0,1556	0,1618	0,1434	0,2034	0,1829
12	ST0247	1,7119	1,6853	1,8031	0,114	0,095	0,114
13	ST0326	0,0022	0,1026	0,1259	0,0437	0,1179	0,2403
14	ST0300	2,6619	1,3053	1,4231	2,2914	1,7974	1,3946
15	ST0141	0,6815	0,4313	0,3591	0,1867	0,2128	0,1561
16	ST0334	0,0623	0,2053	0,1630	0,1280	0,1582	0,2665
17	ST0142	1,9057	3,0001	2,0349	2,1033	3,4105	2,5536
18	ST0335	0,3703	0,2183	0,2025	0,5327	0,2414	0,3731

19	ST0411	0,7191	0,6954	0,8308	0,8918	0,8610	1,0250
20	ST0143	1,3243	1,9437	1,4934	2,6816	2,9507	2,3123
21	ST0355	0,0305	0,1269	0,1060	0,0554	0,2274	0,1938
22	ST0423	0,1216	0,0174	0,0005	0,1360	0,019	0,0007
23	ST0353	2,6733	2,8139	1,9608	3,0419	3,1255	2,4244
24	ST0354	0,6822	0,5453	0,6783	0,9359	0,6971	0,9346
25	ST0144	0,0007	0,0161	0,6334	0,1140	1,1780	1,1099
26	ST0145	1,2395	0,6494	1,1880	1,4402	0,7594	1,3661
27	ST0381	2,7721	2,9431	2,7968	3,3896	3,4941	3,5207

Perhitungan Nilai IN dan Rugi-Rugi Arus Netral

Perhitungan Nilai IN Akibat dari ketidakseimbangan beban tersebut maka akan terdapat arus yang mengalir pada fasa netral. Arus yang mengalir pada penghantar netral berbeda saat diukur langsung dan dihitung

Tabel 9 Nilai I_N Pada Transformator Distribusi Penyulang MT. Haryono

No	No Trafo	I_N Siang			I_N Malam		
		Real	Imaginer	IN	Real	Imaginer	IN
1	ST0336	-7,04	4,97	8,61	6,55	11,17	12,95
2	ST0372	11,58	-13,70	17,93	-1,25	-1,12	1,68
3	ST0135	16,88	24,55	29,79	-2,7	53,52	53,58
4	ST0134	-5,35	21,39	22,04	-5,8	22,17	22,91
5	ST0306	-18,2	18,89	26,23	-20,08	26,85	33,53
6	ST0320	-10,85	-2,16	11,06	-5,75	-6,32	8,54
7	ST0133	0	0	0	0	0	0
8	ST0317	31,72	-9,43	33,09	-0,9	2,77	2,91
9	ST0338	53,15	3,08	53,23	57,9	4,84	58,10
10	ST0051	-14,85	62,96	64,68	-36,6	37,93	52,71
11	ST0262	0	2,94	2,94	10,5	-8,31	13,39
12	ST0129	-17,05	3,37	17,38	-12,95	-8,22	15,34
13	ST0305	19,36	-1,75	19,44	38,15	-0,71	38,16
14	ST0373	-0,8	11,43	11,45	-11,8	6,58	13,51
15	ST0333	-8,15	-22,60	24,02	1,85	-44,25	44,29
16	ST0130	0	0	0	0	0	0
17	ST0311	16,44	3,61	16,83	35,12	5,22	35,51
18	ST0312	-37,05	-39,23	53,96	-27,95	-32,82	43,11
19	ST0313	0	0	0	0	0	0
20	ST0374	12,66	1,09	12,70	18,67	0,35	18,67
21	ST0131	3,69	1,78	4,09	5,675	3,02	6,42
22	ST0375	-14,85	-4,24	15,44	-22,05	-5,28	22,67
23	ST0132	-15,05	9,09	17,58	-23,35	-0,60	23,35
24	ST0050	-3,45	-12,38	12,85	-7,5	-5,54	9,32
25	ST0049	-1,6	-55,77	55,79	4,85	-50,31	50,54
26	ST0048	28,05	-29,18	40,47	26,9	-10,91	29,02
27	ST0047	-19	13,85	23,51	-149,5	-26,50	151,83
28	ST0243	0,67	0,17	0,69	0,07	0,12	0,15
29	ST0244	0,825	-0,80	1,15	0,25	-0,17	0,30
30	ST0282	22,7	-41,91	47,66	14,05	-31,95	34,90
31	ST0319	23,61	-15,50	28,24	28,87	-31,12	42,45
32	ST0220	-4,4	-2,94	5,29	-5,75	-6,32	8,54
33	ST0046	64,35	-5,28	64,56	79,35	-21,21	82,13
34	ST0221	6,16	-11,18	12,77	-10,11	5,57	11,54
35	ST0316	-3	2,61	3,97	22,9	16,00	27,93

36	ST0128	21,6	24,07	32,34	26,3	-5,19	26,80
37	ST0419	-0,04	-0,48	0,48	2,68	1,07	2,88
38	ST0420	0,115	-0,97	0,98	1,69	-0,58	1,78
39	ST0376	33,6	-1,55	33,63	38,3	27,19	46,97
40	ST0045	9,05	-57,59	58,29	8,35	-45,63	46,39
41	ST0126	18,55	16,19	24,62	42,7	10,04	43,86
42	ST0345	-9,125	27,27	28,75	-2,58	23,71	23,85
43	ST0424	0,875	-24,69	24,70	10,20	-24,58	26,62
44	ST0346	-5,98	-11,25	12,74	-8,83	-14,99	17,40

Perhitungan dan Rugi-Rugi Arus Netral

Dengan adanya arus yang mengalir pada fasa netral maka rugi-rugi (losses) dapat dihitung menggunakan persamaan 2.13 dan 2.14 dimana resistansi penghantar netral pada jaringan sekunder Transformator Distribusi yang menggunakan kabel AAAC (All Aluminium Alloy Conductor) 1x70 [mm]² dengan resistansi (0,438 Ω/km) + 1x150 [mm]² dengan resistansi (0,225 Ω/km). Arus yang mengalir pada penghantar netral adalah hasil yang diperoleh saat dilakukan pengukuran secara langsung

Tabel 10 Hasil Perhitungan Rugi-Rugi Arus Netral Pada Penyulang MT. Haryono

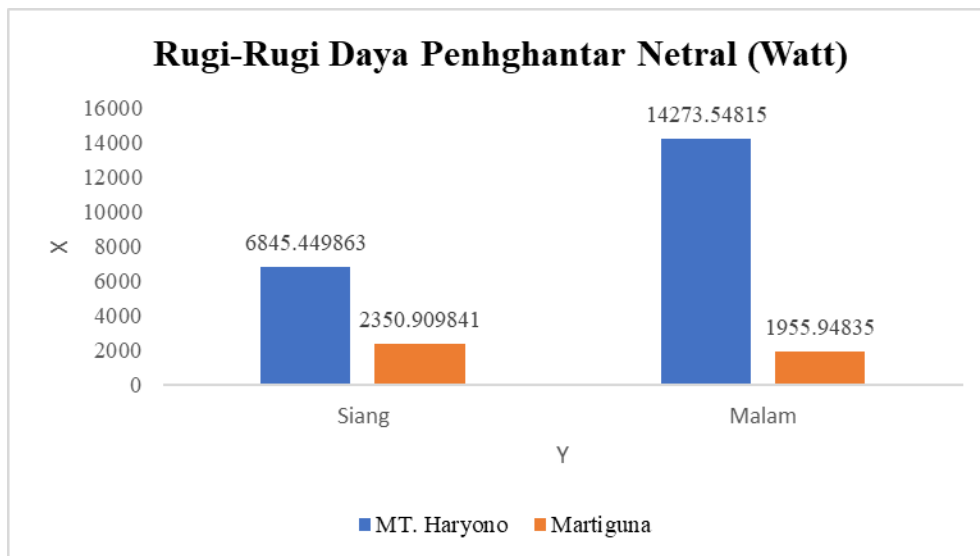
No	No Trafo	$R_N(\Omega)$	Jarak Penampang (KM)	Rugi-rugi Daya Penghantar Netral (Watt)		Rugi-rugi Energi penghantar Netral (kWh)	
				Siang	Malam	Siang	Malam
1	ST0336	0,225	2,6	43,44	98,11	0,2172	0,4905
2	ST0372	0,225	0,365	26,42	0,2324	0,1321	0,0011
3	ST0135	0,225	0,365	72,91	235,84	0,3645	1,1792
4	ST0134	0,438	0,070	14,90	16,10	0,0745	0,0805
5	ST0306	0,438	0,266	80,19	131,02	0,4009	0,6551
6	ST0320	0,438	1,1	60,42	36,04	0,3021	0,1802
7	ST0133	0,438	1,1	OFF	OFF	OFF	OFF
8	ST0317	0,438	1,1	540,7	4,19	2,7036	0,0209
9	ST0338	0,438	1,1	1,399	1,666	6,9957	8,3322
10	ST0051	0,225	0,050	47,07	31,25	0,2353	0,1562
11	ST0262	0,438	1,1	4,27	88,54	0,0213	0,4427
12	ST0129	0,438	1,1	149,12	116,19	0,7456	0,5809
13	ST0305	0,438	1,1	186,6	718,87	0,9331	3,5943
14	ST0373	0,438	1,1	64,82	90,11	0,3241	0,4505
15	ST0333	0,438	1,1	284,9	968,41	1,4249	4,8420
16	ST0130	0,438	1,1	OFF	OFF	OFF	OFF
17	ST0311	0,438	1,1	139,8	622,48	0,6994	3,1124
18	ST0312	0,438	1,1	1.437	917,40	7,1866	4,5870
19	ST0313	0,438	1,1	OFF	OFF	OFF	OFF
20	ST0374	0,438	1,1	79,70	172,21	0,3985	0,8610
21	ST0131	0,438	1,1	8,29	20,40	0,0414	0,1020
22	ST0375	0,438	1,1	117,74	253,77	0,5887	1,2688
23	ST0132	0,438	1,1	152,62	269,31	0,7631	1,3465
24	ST0050	0,438	0,217	15,70	8,26	0,0785	0,0413
25	ST0049	0,225	0,182	127,48	104,63	0,6374	0,5231
26	ST0048	0,225	0,169	62,30	32,04	0,3115	0,1602
27	ST0047	0,225	0,973	121,06	5,046	0,6053	25,2338
28	ST0243	0,438	0,057	0,0119	0,0005	5,9781	2,8086

29	ST0244	0,438	0,057	0,0331	0,0023	0,0001	1,1546
30	ST0282	0,438	0,057	56,72	30,42	0,2836	0,1521
31	ST0319	0,438	0,585	204,40	461,78	1,0220	2,3089
32	ST0220	0,438	0,186	2,28	5,94	0,0114	0,0297
33	ST0046	0,438	0,186	339,62	549,63	1,6981	2,7481
34	ST0221	0,438	0,186	13,29	10,86	0,0664	0,0543
35	ST0316	0,438	0,186	1,29	63,58	0,0064	0,3179
36	ST0128	0,225	0,200	47,07	32,34	0,2353	0,1617
37	ST0419	0,225	0,191	0,0101	0,3582	5,0882	0,0017
38	ST0420	0,225	0,191	0,0417	0,1376	0,0002	0,0006
39	ST0376	0,225	0,191	48,62	94,81	0,2431	0,4740
40	ST0045	0,225	0,191	146,05	92,51	0,7302	0,4625
41	ST0126	0,438	1	265,59	842,80	1,3279	4,2140
42	ST0345	0,438	1	362,21	249,18	1,8110	1,2459
43	ST0424	0,438	0,186	49,72	57,73	0,2486	0,2886
44	ST0346	0,438	1	71,17	132,69	0,3558	0,6634
Jumlah				6,84	14,273	34,22	71,36

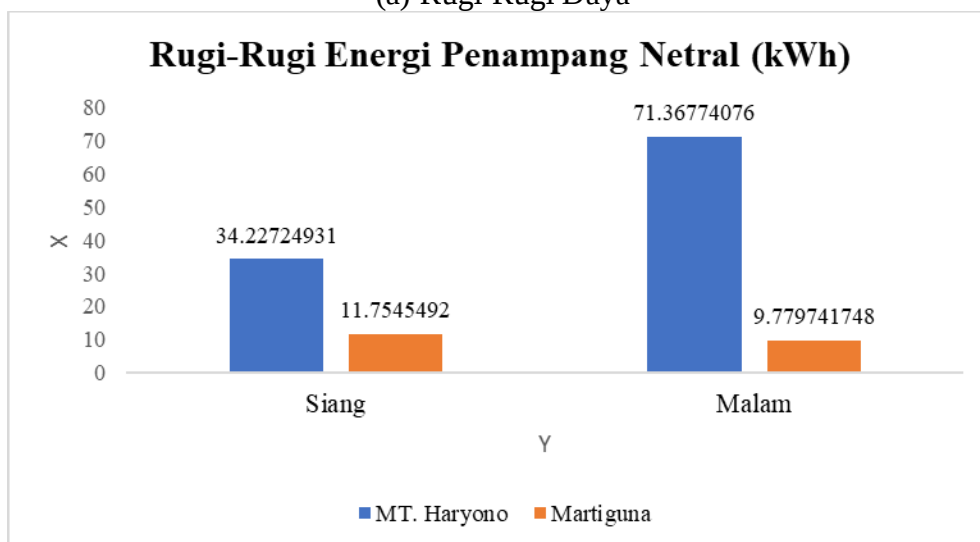
Tabel 11 Hasil Perhitungan Rugi-Rugi Arus Netral Pada Penyulang Martiguna

No	No Trafo	$R_N(\Omega)$	Jarak Penampang (KM)	Rugi-rugi Daya Penghantar Netral (Watt)		Rugi-rugi Energi penghantar Netral (kWh)	
				Siang	Malam	Siang	Malam
1	ST0401	0,225	1,4	28,07	43,06	0,1403	0,2153
2	ST0408	0,225	1,4	20,16	38,11	0,1008	0,1905
3	ST0136	0,225	0,6	82,01	147,88	0,4100	0,7394
4	ST0379	0,225	0,6	43,44	63,14	0,2172	0,3157
5	ST0380	0,225	1,9	471,05	76,68	2,3552	0,3834
6	ST0139	0,225	0,216	13,00	14,17	0,0650	0,0708
7	ST0245	0,225	0,216	0	OFF	OFF	OFF
8	ST0140	0,225	0,216	11,50	90,04	0,0575	0,4502
9	ST0321	0,438	0,262	9,00	24,38	0,0450	0,1219
10	ST0322	0,438	0,265	OFF	OFF	OFF	OFF
11	ST0246	0,225	0,257	0,2757	0,4475	0,0013	0,0022
12	ST0247	0,225	0,257	1,83	0,0578	0,0091	0,0002
13	ST0326	0,225	0,257	2,07	4,73	0,0103	0,0236
14	ST0300	0,225	0,257	271,41	96,95	1,3570	0,4847
15	ST0141	0,225	0,257	13,75	0,3859	0,0687	0,0019
16	ST0334	0,225	0,257	2,59	2,54	0,0129	0,0127
17	ST0142	0,225	0,257	171,87	211,90	0,8593	1,0595
18	ST0335	0,438	0,269	8,40	10,70	0,0420	0,0535
19	ST0411	0,225	1,2	11,74	17,04	0,0587	0,0852
20	ST0143	0,225	1,4	268,32	268,91	1,3416	1,3445
21	ST0355	0,225	1,6	8,04	26,01	0,0402	0,1300
22	ST0423	0,225	1,6	13,45	16,87	0,0672	0,0843
23	ST0353	0,225	1,6	655,20	459,26	3,2760	2,2963
24	ST0354	0,225	1,6	19,03	59,21	0,0951	0,2960
25	ST0144	0,438	0,260	123,28	172,47	0,6164	0,8623
26	ST0145	0,225	0,402	80,31	104,85	0,4015	0,5242
27	ST0381	0,438	0,676	21,01	6,07	0,1050	0,0303
Jumlah				2,350	1,955	11,75	9,77

Jika dinyatakan dalam bentuk grafik maka total rugi-rugi daya pada penghantar netral, rugi-rugi energi pada penghantar netral dapat dilihat



(a) Rugi-Rugi Daya



(b) Rugi-Rugi Energi

Gambar Rugi-Rugi Daya dan Energi Penghantar Netral Pada Transformator Distribusi Di 2 Penyulang ULP Sintang

Analisa Pembebanan Transformator pada penyulang MT. Haryono Dari 41 unit trafo aktif, hanya 1 unit (ST0220) mengalami overload (>80%) siang dan malam hari. Sebagian besar trafo memiliki pembebanan rendah. Dua trafo (ST0319 & ST0420) di Pasar Modern memiliki pembebanan sangat kecil (<1%) karena belum beroperasi penuh dengan Rata-rata pembebanan: 41,24% (siang), 55,47% (malam). Pada penyulang Martiguna Dari 25 unit aktif, 5 trafo mengalami overload siang hari, meningkat pada malam hari (terutama ST0353 & ST0381) dengan Rata-rata pembebanan: 37,36% (siang), 32,56% (malam).

Analisa Ketidakseimbangan Beban pada penyulang MT. Haryono Trafo ST0374 mengalami ketidakseimbangan tertinggi (~59%) karena dominasi arus pada satu fasa. Dan dengan 22 trafo (siang) dan 17 trafo (malam) memiliki ketidakseimbangan $\geq 25\%$ (kategori buruk). Pada penyulang Martiguna Ketidakseimbangan ekstrem terlihat pada ST0144 (128%) dan ST0408 (133%) karena arus hanya mengalir di satu fasa. Dan

Ketidakseimbangan buruk terjadi pada 11 trafo (siang) dan 9 trafo (malam).

Analisa Rugi-Rugi Arus Netral dan Energi penyulang MT. Haryono dengan Rugi-rugi daya tertinggi: Pada ST0312 (siang, 1,437 W) dan ST0047 (malam, 5,046 W), Energi tertinggi: ST0047 (malam, 25,23 kWh) dan Terendah: Pada ST0419 & ST0420 (hanya 0,0002–0,01 kWh). Pada penyulang Martiguna Rugi-rugi tertinggi: Pada ST0353, siang 655,2 W, malam 459,2 W, Energi rugi-rugi tertinggi: 3,27 kWh (siang), 2,29 kWh (malam) dan Terendah: Pada ST0246 (0,275 W, 0,001 kWh). Oleh karena itu, perlu dilakukan evaluasi distribusi beban dan penyeimbangan fasa guna mengurangi risiko overload dan efisiensi energi yang rendah.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisa ketidakseimbangan beban pada ULP Sintang, dapat disimpulkan bahwa penyulang MT. Haryono memiliki tingkat pembebanan yang lebih tinggi dan lebih merata dibandingkan penyulang Martiguna, dengan rata-rata pembebanan mencapai 41,24% pada siang hari dan meningkat menjadi 55,47% pada malam hari, sedangkan Martiguna hanya mencapai 37,36% pada siang hari dan turun menjadi 32,56% pada malam hari. Namun, dalam hal ketidakseimbangan beban, penyulang Martiguna menunjukkan kondisi yang lebih buruk dengan rata-rata ketidakseimbangan sebesar 28,89% (siang) dan 26,52% (malam), jauh lebih tinggi dibandingkan MT. Haryono yang hanya mencapai 17,40% dan 14,84% pada waktu yang sama, akibat aliran arus antar fasa yang tidak seimbang. Dari segi rugi-rugi daya dan energi, MT. Haryono kembali menunjukkan angka yang lebih tinggi, yaitu 155 Watt (0,77 kWh) pada siang hari dan 324,3 Watt (1,62 kWh) pada malam hari, dibandingkan dengan Martiguna yang hanya mencatat rata-rata rugi-rugi sebesar 87,07 Watt (0,43 kWh) di siang hari dan 72,44 Watt (0,36 kWh) pada malam hari. Temuan ini menunjukkan perlunya penataan ulang beban dan penyeimbangan fasa untuk mengurangi rugi-rugi energi dan menjaga performa sistem distribusi.

DAFTAR PUSTAKA

- Darwanto, A. (2021). Analisis Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator Distribusi Di PT. PLN (Persero) Rayon Cepu. *Simetris*, 15(1), 35-42.
- Djalil, M. S., & Suratno, S. (2021). Analisis Akibat Ketidakseimbangan Beban dan Losses Daya pada Penghantar Netral Gardu Induk Kota Bangun. *Jurnal Teknik Elektro Uniba (JTE UNIBA)*, 5(2), 130-136.
- Hontong, N. J., Tuegeh, M., & Patras, L. S. (2015). Analisa rugi-rugi daya pada jaringan distribusi di PT. PLN Palu. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, 4(1), 64-71.
- J. Rumakat and D. Fauziah, "Prosiding Seminar Nasional Energi, Telekomunikasi dan Otomasi SNETO 2021 Analisis Beban Tidak Seimbang Terhadap Arus Netral dan Rugi-Rugi pada Penghantar Netral Transformator di Rayon Baguala Ambon," 2021.
- Marwanto, T., & Abidin, Z. (2021). Analisis Ketidakseimbangan Beban Pada Feeder Sejangkung Di PT. PLN (PERSERO) ULP Sambas. *Journal of Electrical Engineering, Energy, and Information Technology (J3EIT)*, 9(2).
- Hontong, N. J., Tuegeh, M., & Patras, L. S. (2015). Analisa rugi-rugi daya pada jaringan distribusi di PT. PLN Palu. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, 4(1), 64-71.
- PAREIRA, W. H. (2016). Analisis Pengaruh Beban Tidak Seimbang Terhadap Kualitas Daya pada Jaringan Distribusi Radial di Area Atambua Kabupaten Belu (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Nasional Malang).
- Pln, "Metode Pemeliharaan Trafo Distribusi Berbasis Kaidah Manajemen Aset," 2014.
- Permen-ESDM-No.-28-Tahun-2016, Tentang: Tarif Tenaga Listrik perusahaan PT. PLN (Persero).

- Pratama, M. F., Arsyad, M. I., & Abidin, Z. Perhitungan Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator Distribusi di PT. PLN (Persero) ULP PUTUSSIBAU. *Journal of Electrical Engineering, Energy, and Information Technology (J3EIT)*, 11(1).
- Remigius, T., Musrady, M., Tony, C., & Ahmad, T. (2018). Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Efisiensi Transformator Tiga Fasa Di PT. PLN (Persero) Rayon Makassar Timur, Penyulang Kima. *Sinergi*, 16(1), 80-88.
- Syaroni, Z., & Rijanto, T. (2019). Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi 20 kV dan Solusinya Pada Jaringan Tegangan Rendah. *Jurnal Teknik Elektro*, 8(1).
- Suwardana, I. W., Sutawinaya, I. P., & Wulandari, I. A. R. (2017). Studi Analisis Rugi-Rugi Daya pada Penghantar Netral Akibat Sistem Tidak Seimbang di Jaringan Distribusi Gardu KA 1495 Penyulang Citraland Menggunakan Simulasi Program ETAP 7.0. *Logic: Jurnal Rancang Bangun Dan Teknologi*, 14(3), 157.
- Zulfikar, A. (2020). Analisis Ketidakseimbangan Beban Trafo Distribusi P10003 Penyulang Kelud PT. PLN (Persero) ULP Indralaya.
- Ten, C. W., & Hou, Y. (2024). *Modern power system analysis* Turan Gonen. CRC Press.
- Kadir, Abdul. 1989. *Transformator*, Penerbit: PT. Alex Media Komputindo. Jakarta.
- Moelyono Nono, 1991. *Sistem Distribusi Tenaga Listrik*, Surabaya: ITS.