

Optimasi Jaringan Pada Pangkalan Udara di Indonesia Menggunakan Metode *Minimum Spanning Tree*

Arie Prasetya Suwardi ^{1,*}, Mufti Arifin², Endah Yuniarti ³
^{1,2,3}Prodi Teknik Penerbangan, Fakultas Teknik Dirgantara dan Industri
Universitas Dirgantara Marsekal Suryadarma, Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 30 Agustus 2024
Direvisi: 20 September 2024
Diterima: 30 September 2024

Kata kunci:

Pangkalan Angkatan Udara
Minimum Spanning Tree
efisiensi operasional
rute udara.

Keywords:

Air Force Base
Minimum Spanning Tree
operational efficiency,
air routes.

Penulis Korespondensi:

Arie Prasetya Suwardi
Email:
arieprasetya100@gmail.com

ABSTRAK

Pangkalan Udara (Lanud) di Indonesia memiliki peran krusial dalam menjaga keamanan dan pertahanan negara, khususnya dalam mendukung operasional TNI Angkatan Udara. Penelitian ini bertujuan untuk mencari jaringan Minimum Spanning Tree antar Pangkalan Udara (Lanud) di Indonesia dengan menggunakan metode Minimum Spanning Tree (MST). Minimum Spanning Tree (MST) digunakan untuk menghubungkan semua Lanud. Dengan menggunakan analisa Metode Minimal Spanning Tree, dapat memberikan solusi optimal dengan menghasilkan total jarak tempuh yang minimal dengan prosedur penghubungan langsung pada titik-titik (node) yang ada pada sebuah jaringan. Berkontribusi positif dalam perencanaan kegiatan operasional, penggunaan sumber daya yang lebih efektif, dan respons cepat dalam situasi darurat. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder yaitu data jarak antar 44 lanud di Indonesia yang diperoleh dari Google Earth. Data ini menggunakan satuan nautical miles. Data yang diperoleh direpresentasikan dalam bentuk matriks dan graf, kemudian ditentukan parameter-parameter yang digunakan. Setelah itu, data dianalisis menggunakan minimum spanning tree. Hasil analisis Minimum Spaning Tree menunjukkan bahwa jaringan optimum yang menghubungkan 44 Lanud memiliki total jarak sejauh 6664 NM, yang meningkatkan efisiensi, kesiapan, dan fleksibilitas perencanaan operasional TNI AU dalam merespons situasi darurat oleh setiap lanud secara optimal. Sebagian besar pesawat TNI AU mampu menempuh jaringan minimum spanning tree dengan jarak terpanjang dari Lanud Halu Oleo ke Lanud El Tari sejauh 371 NM, kecuali pesawat SA-330 Puma hanya bisa menempuh sejauh 300 NM.

Air Force Bases (Lanud) in Indonesia have a crucial role in maintaining national security and defense, especially in supporting the operations of the Indonesian Air Force. This study aims to find the Minimum Spanning Tree network between Air Force Bases (Lanud) in Indonesia using the Minimum Spanning Tree (MST) method. Minimum Spanning Tree (MST) is used to connect all Lanud. By using the Minimal Spanning Tree Method analysis, it can provide an optimal solution by producing a minimum total travel distance with a direct connection procedure at the points (nodes) on a network. Contributing positively to operational activity planning, more effective use of resources, and rapid response in emergency situations. The data used in this study are secondary data, namely data on the distance between 44 Lanud in Indonesia obtained from Google Earth. This data uses nautical miles units. The data obtained is represented in the form of a matrix and graph, then the parameters used are determined. After that, the data is analysed using a minimum spanning tree. The results of the Minimum Spanning Tree analysis show that the optimum network connecting 44 Air Force Bases has a total distance of 6664 NM, which increases the efficiency, readiness, and flexibility of the TNI AU's operational planning in responding to emergency situations by each air force base optimally. Most TNI AU aircraft are able to travel the minimum spanning tree network with the longest distance from Halu Oleo Air Force Base to El Tari Air Force Base of 371 NM, except for the SA-330 Puma aircraft which can only travel 300 NM.

Copyright © 2024 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Pangkalan udara (Lanud) memiliki peran strategis dalam menjaga kedaulatan wilayah udara suatu negara [1], termasuk Indonesia yang memiliki luas wilayah dan letak geografis yang terdiri dari ribuan pulau. Keberadaan pangkalan udara yang tersebar di berbagai wilayah Indonesia menjadikan jaringan komunikasi dan logistik antar pangkalan menjadi faktor krusial dalam menunjang operasi militer dan penegakan hukum di udara. Optimalisasi jaringan yang efisien di antara pangkalan-pangkalan ini sangat penting untuk memastikan respons cepat, efektivitas, dan efisiensi operasional. Namun, tantangan dalam mengelola jaringan pangkalan udara di Indonesia sangat kompleks, terutama karena adanya jarak yang jauh antar pangkalan.

Penggunaan metode yang tepat untuk merancang jaringan dengan efisiensi maksimal sangat dibutuhkan agar tidak hanya meminimalkan biaya operasional tetapi juga memaksimalkan kecepatan respon dan keandalan komunikasi serta logistik yang menjangkau 44 pangkalan udara di Indonesia. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengoptimalkan jaringan antar pangkalan udara adalah dengan menggunakan konsep *Minimum Spanning Tree (MST)*. Metode MST memungkinkan perancangan jaringan yang menghubungkan semua pangkalan udara dengan jarak minimum tanpa ada redundansi atau jalur yang tidak diperlukan, sehingga menghasilkan efisiensi maksimal dalam hal biaya dan waktu tempuh untuk menjangkau 44 pangkalan udara. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan jaringan pada pangkalan udara di Indonesia dengan menerapkan metode *Spanning Tree*. Diharapkan hasil dari penelitian ini tidak hanya dapat memberikan solusi optimal dalam perancangan jaringan antar pangkalan udara tetapi juga dapat berkontribusi pada pengembangan strategi pertahanan yang lebih efisien dan efektif di Indonesia.

II. METODE PENELITIAN

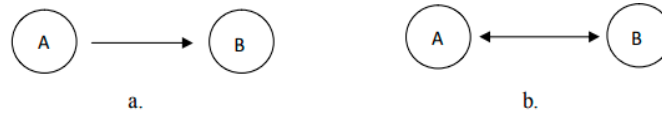
2.1 Model Jaringan

Jaringan (network) secara visual terdiri dari serangkaian node dan garis. Node merupakan titik-titik individual dalam struktur yang terhubung satu sama lain, sedangkan garis menghubungkan antar node dan mewakili hubungan, saluran, atau aliran di dalam jaringan. Garis dapat berupa anak panah yang menunjukkan arah aliran dari node awal atau sumber ke node akhir atau tujuan. Terdapat dua kemungkinan arah aliran yang dapat terjadi: pertama, aliran satu arah; kedua, aliran dua arah. Secara sederhana, model arus jaringan dapat dijelaskan sebagai kumpulan sisi yang menghubungkan berbagai titik, di mana setiap sisi dapat memiliki kapasitas arus yang menentukan jumlah maksimum arus yang dapat mengalir dari satu titik ke titik lain, atau jarak antara titik-titik tersebut. Sebuah jaringan umumnya direpresentasikan dalam bentuk diagram yang terdiri dari titik-titik (node), sisi-sisi (edge), dan parameter-parameter seperti kapasitas arus atau jarak. [2]

Table 2.1 Contoh Sistem Jaringan

Sistem Jaringan	Node / Simpul	Anak Panah / Garis	Jenis Arus
Transportasi darat	Kota, persimpangan	Jalan Raya	Kendaraan
Transportasi udara	Bandara	Rute penerbangan	Pesawat terbang
Transportasi laut	Pelabuhan	Rute pelayaran	Kapal
Pelistrikan	Pembangkit listrik, gardu induk	Jaringan kabel	Listrik
Bahan bakar	Pelabuhan penyulingan, depot induk, pompa bensin	Pipa, kendaraan pengangkut bahan bakar	Bahan bakar
Pabrik / perakitan	Bengkel	Penanganan material	Material

Dengan demikian, jaringan (network) adalah istilah yang digunakan untuk memvisualisasikan sebuah sistem agar struktur jaringan yang sebenarnya dapat dipahami dengan cepat dan tepat. Salah satu model jaringan yang umum digunakan adalah Model Pohon Rentang Minimum (*Minimum Spanning Tree*).



Gambar 2.1 (a). Sistem Jaringan Satu Arah (b). Sistem Jaringan Dua Arah

2.2 Graf

Graf adalah kumpulan simpul (*nodes*) yang terhubung satu sama lain melalui sisi/busur (*edges*). Suatu graf G terdiri dari dua himpunan, yaitu himpunan V (simpul) dan himpunan E (busur). Busur dapat merepresentasikan hubungan sembarang, seperti rute penerbangan, jalan raya, sambungan telepon, ikatan kimia, dan lain-lain. Notasi graf: $G(V, E)$ artinya graf G memiliki simpul V dan busur E . Menurut arah dan bobotnya, graf dibagi menjadi empat jenis, yaitu: [2]

1. Graf berarah dan berbobot: adalah jenis graf di mana setiap busur atau sisi memiliki arah dan berbobot.
2. Graf tidak berarah dan berbobot: adalah jenis graf di mana setiap busur atau sisi tidak memiliki arah dan berbobot.
3. Graf berarah dan tidak berbobot: adalah jenis graf di mana setiap busur memiliki arah ke simpul lainnya, tetapi tidak berbobot.
4. Graf tidak berarah dan tidak berbobot: adalah jenis graf di mana setiap sisi hanya menunjukkan hubungan antara dua simpul tanpa arah atau tanpa bobot.

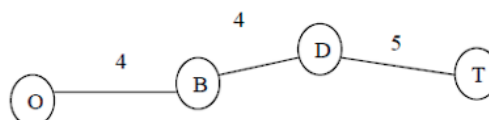
Contoh-contoh dari representasi graf yang umum digunakan termasuk: [2]

1. Matriks Kedekatan (*Adjacency Matrix*) Untuk sebuah graf dengan n simpul, matriks ketetanggaan memiliki ukuran $n \times n$ (n baris dan n kolom). Contoh matriks ketetanggaan untuk graf ABCDEFG dapat ditemukan dalam Tabel 2.2.

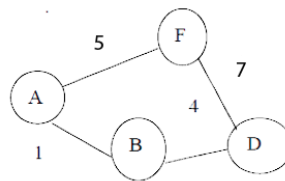
Table 2.2 Contoh Matriks Kedekatan

	A	B	C	D	E	F	G
A	0	1	1	0	0	0	0
B	1	0	1	1	1	0	0
C	1	1	0	1	0	1	0
D	0	1	1	0	1	1	1
E	0	1	0	1	0	0	1
F	0	0	1	1	0	0	1
G	0	0	0	1	1	1	0

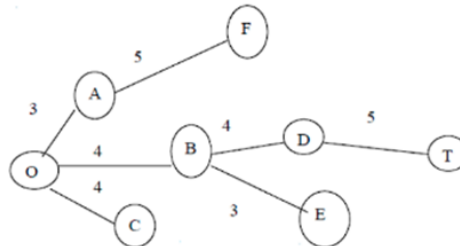
2. Senarai Kedekatan (*Adjacency List*) Simpul x dapat dianggap sebagai sebuah daftar yang berisi simpul-simpul tetangga dari x dalam graf tersebut: Simpul x dapat dianggap sebagai sebuah daftar yang berisi simpul-simpul tetangga dari x dalam graf tersebut
- 3.



Gambar 2.2 Contoh Rute (dari Node 0 ke Node T)



Gambar 2.3 Contoh Siklus



Gambar 2.4 Contoh Jaringan Berbentuk Pohon (Tree)

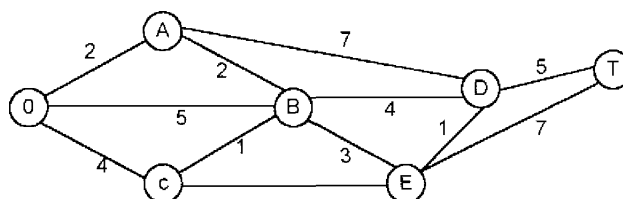
2.3 Persoalan Rentang Jaringan Minimum (*Minimum Spanning Tree*)

Model Rentang Jaringan Minimum (*Minimum Spanning Tree*) adalah model jaringan yang mengilustrasikan pemilihan hubungan antar simpul sedemikian rupa sehingga jaringan tersebut menghubungkan semua simpul dengan total panjang hubungan yang minimal. Dengan kata lain, model ini menghasilkan sebuah pohon (tree) dari graf asli yang mengandung semua simpul dengan jumlah bobot (atau panjang) edge yang minimum. Pada rute terpendek dicari lintasan/rute dari sumber ke tujuan yang memberikan total jarak minimum, sedangkan pada *minimum spanning tree* ini yang dipersoalkan adalah penentu sisi-sisi yang menghubungkan node yang ada pada jaringan, sehingga diperoleh panjang total busur minimum. Sedangkan persamaan pada kedua kasus ini adalah suatu jaringan tak terarah, dengan informasi yang mencakup node-node yang mencakup jarak berupa estimasi waktu dan besaran lainnya antar node. [3].

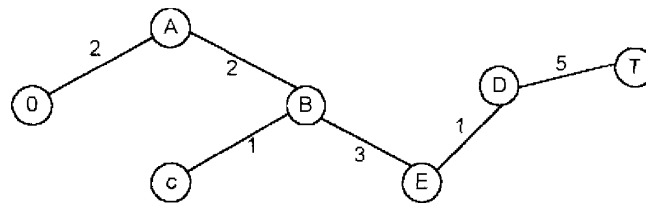
2.4 Menentukan Jarak Minimum dengan Pohon Rentang Minimum (*Minimum Spanning Tree*)

Penentuan jarak minimum dengan Pohon Rentang Minimum (*Minimum Spanning Tree*) adalah suatu metode yang umum digunakan dalam teori graf untuk menghubungkan semua titik atau simpul pada suatu jaringan dengan panjang sisi total yang minimum. Pohon Rentang Minimum (*Minimum Spanning Tree*) ini merupakan himpunan sisi-sisi yang membentuk pohon dan menghubungkan semua titik tanpa membentuk siklus. Berikut adalah langkah-langkah umum untuk menentukan Pohon Rentang Minimum: [3]

1. Tentukan graf yang merepresentasikan jaringan, dengan simpul sebagai titik-titik yang perlu dihubungkan dan sisi-sisi sebagai jarak antar titik.
2. Pilih salah satu sisi sebagai sisi awal untuk memulai pembentukan pohon rentang minimum.
3. Pilih sisi dengan panjang terkecil yang tidak membentuk siklus dengan sisi-sisi yang sudah dipilih sebelumnya. Pastikan bahwa sisi yang dipilih tidak membentuk siklus, sehingga pohon rentang minimum dapat terbentuk.
4. Ulangi Langkah 3: Lanjutkan memilih sisi dengan panjang terkecil yang tidak membentuk siklus hingga semua simpul terhubung dan pohon rentang minimum terbentuk.
5. semua node terhubung dan Hitung jumlah seluruh jarak untuk menghubungkan semua node.



Gambar 2.5 Contoh persoalan minimum spanning tree



Gambar 2.6 Alternatif tree dari jaringan pada gambar 2.6

2.5 Data Pangkalan Udara

Pangkalan udara didalam jajaran koopsudnas dibagi menjadi 3 sektor komando daerah operasi dan satuan Pendidikan yaitu koopsud I, II, III dan 3 pangkalan udara Pendidikan dibawah kendali kodiklatau yang bertotal seluruhnya ada 44 pangkalan udara. Data yang digunakan untuk penelitian ini berasal dari perangkat lunak Google Earth dan situs resmi Tentara Nasional Indonesia Angkatan Udara.

Tabel 2.3 Data 44 lanud di Indonesia ^{[4] [5] [6]}

No	Nama Lanud	SINGK.	Latitude	Longitude	Lokasi
1	Sultan IskandarMuda	SIM	5.522269°	95.420481°	Banda Aceh
2	Maimun Saleh	MUS	5.874709°	95.339685°	Sabang
3	Soewondo	SWO	3.561563°	98.675624°	Medan
4	Roesmin Noerjadin	RSN	0.458393°	101.444476°	Pekanbaru
5	Sutan Sjahrir	SUT	-0.875730°	100.352011°	Padang
6	Sri Mulyono Herlambang	SMH	-2.896453°	104.695103°	Palembang
7	Pangeran M. Bunyamin	BNY	-4.611431°	105.232436°	Lampung
8	Hang Nadim	HNM	1.122037°	104.119768°	Batam
9	Raja Haji Fisabilillah	RHF	0.924277°	104.534159°	Tj. Pinang
10	Raden Sadjad	RSA	3.907333°	108.387333°	Ranai
11	H. A S Hanandjoeddin	ASH	-2.743835°	107.754519°	Tj. Pandan
12	Supadio	SPO	-0.149603°	109.402746°	Pontianak
13	Harry Hadisoemantri	HAD	1.083386°	109.693878°	Singkawang
14	Iskandar	IKR	-2.703401°	111.671253°	Pangkalan Bun
15	Syamsuddin Noor	SAM	-3.442121°	114.761321°	Banjarmasin
16	Dhomber	DMB	-1.268119°	116.895145°	Balikpapan
17	Anang Busra	ANB	3.324925°	117.563875°	Tarakan
18	Halim Perdanakusuma	HLM	-6.266996°	106.890918°	Jakarta
19	Atang Sendjaja	ATS	-6.538903°	106.755279°	Bogor
20	Husein Sastranegara	HSN	-6.900549°	107.575973°	Bandung
21	Sulaiman	SLM	-6.981673°	107.570824°	Bandung
22	Suryadarma Kalijati	SDM	-6.531606°	107.659531°	Subang
23	Wiriadinata	WIR	-7.347909°	108.247009°	Tasikmalaya
24	Sugiri Sukani	SKI	-6.755951°	108.539760°	Majalengka
25	Adi Soemarmo	SMO	-7.517614°	110.750551°	Surakarta
26	Jenderal Besar Soedirman	JBS	-7.461179°	109.413429°	Purbalingga
27	Iswahjudi	IWJ	-7.613759°	111.433878°	Madiun
28	Abdul Rachman Saleh	ABD	-7.928418°	112.714984°	Malang
29	Muljono	MUL	-7.379701°	112.785460°	Surabaya
30	Adi Soetjipto	ADI	-7.788208°	110.432228°	Yogyakarta
31	I Gusti Ngurah Rai	RAI	-8.748522°	115.164138°	Bali
32	M Zainuddin Abdul Madjid	ZAM	-8.756152°	116.273793°	Mataram
33	El Tari	ELI	-10.171772°	123.670734°	Kupang
34	Sultan Hasanuddin	HND	-5.079611°	119.550502°	Makassar
35	Sam Ratulangi	SRI	1.551381°	124.925746°	Manado
36	Halu Oleo	HLO	-4.081717°	122.419066°	Kendari
37	Leo Wattimena	LWM	2.045971°	128.322652°	Morotai
38	Dominicus Dumatubun	DMN	-5.758992°	132.758670°	Tual
39	Ignatius Dewanto	DWT	-7.849753°	131.339625°	Saumlaki

No	Nama Lanud	SINGK.	Latitude	Longitude	Lokasi
40	Pattimura	PTM	-3.709019°	128.090914°	Ambon
41	Manuhua	MNA	-1.176295°	136.089305°	Biak
42	Silas Papare	SPR	-2.578292°	140.518020°	Jayapura
43	Yohanis Kapiyau	YKU	-4.530248°	136.888283°	Timika
44	Johannes Abraham Dimara	DMA	-8.518770°	140.417895°	Merauke

2.6 Data Jarak Tempuh antar Lanud

Berikut ini disajikan data jarak tempuh antar lanud beserta singkatan lanud dan graf jaringan yang terhubung dari lanud ke lanud lainnya. Data yang digunakan untuk penelitian ini dihasilkan dengan perangkat lunak Google Earth yang memanfaatkan lintang dan bujur Lanud di Indonesia untuk menentukan jarak antar Lanud. Tabel 2.4 data di representasi secara matriks kedekatan (adjacency Matrix), sedangkan Gambar 2.7 data di representasi secara graf. data ini menggunakan satuan nautical miles (NM).

Tabel 2.4 Matriks Kedekatan Jarak antar lanud dalam satuan *NM*

	SIM	MUS	SWO	RSN	SUT	SMH	BNY	HNM	RHF	RSA	ASH
SIM	0	22	227	471	483	750	844	584	611	783	890
MUS	22	0	243	489	503	768	863	598	626	790	906
SWO	227	243	0	249	283	529	627	358	385	583	663
RSN	471	489	249	0	103	280	379	165	187	465	425
SUT	483	503	283	103	0	288	368	256	273	561	459
SMH	750	768	529	280	288	0	107	243	228	463	184
BNY	844	863	627	379	368	107	0	349	333	543	188
HNM	584	598	358	165	256	243	349	0	28	306	318
RHF	611	626	385	187	273	228	333	28	0	293	292
RSA	783	790	583	465	561	463	543	306	293	0	399
ASH	890	906	663	425	459	184	188	318	292	399	0
SPO	905	917	682	480	546	327	366	327	300	249	184
HAD	896	907	678	497	573	383	433	335	310	186	256
IKR	1092	1106	866	643	689	419	403	508	481	441	235
SAM	1278	1291	1053	833	878	604	575	695	667	582	422
DMB	1351	1362	1132	934	994	739	728	781	755	597	556
ANB	1334	1341	1134	984	1065	858	880	819	796	552	692
HLM	984	1003	766	518	507	240	140	471	452	614	217
ATS	990	1009	774	526	512	250	147	484	465	632	235
HSN	1040	1059	822	573	563	295	196	522	502	647	248
SLM	1043	1062	825	576	566	298	199	526	505	651	253
SDM	1028	1047	809	560	553	280	185	504	483	625	226
WIR	1087	1106	868	619	611	340	243	563	541	672	276
SKI	1075	1094	854	606	604	325	236	540	518	637	244
SMO	1204	1222	981	733	738	455	373	651	627	696	337
JBS	1143	1161	921	673	671	393	303	603	580	682	299
IWJ	1240	1257	1015	769	776	492	412	682	657	712	365
ABD	1311	1328	1086	841	852	566	489	747	721	753	429
MUL	1295	1312	1069	826	840	553	481	727	701	724	409
ADI	1201	1218	978	730	731	450	364	653	629	709	341
RAI	1458	1475	1232	989	1004	717	642	886	860	858	570
ZAM	1513	1529	1286	1045	1063	775	704	937	911	892	623
ELI	1933	1948	1706	1473	1500	1212	1147	1350	1323	1242	1048
HND	1580	1593	1355	1136	1179	900	858	998	970	858	721
SRI	1786	1793	1581	1413	1484	1244	1239	1251	1226	1003	1063
HLO	1719	1731	1497	1288	1338	1065	1030	1142	1115	968	883
LWM	1983	1990	1782	1618	1690	1450	1442	1455	1431	1201	1268
DMN	2340	2351	2121	1916	1966	1690	1649	1768	1741	1573	1510
DWT	2296	2309	2074	1859	1902	1620	1571	1717	1690	1545	1443
PTM	2037	2048	1820	1620	1674	1404	1371	1469	1442	1268	1222
MNA	2475	2483	2267	2086	2149	1889	1865	1928	1902	1693	1706
SPR	2750	2758	2540	2354	2415	2150	2120	2198	2172	1968	1967
YKU	2561	2570	2345	2149	2204	1933	1897	1997	1971	1784	1751
DMA	2824	2835	2604	2395	2441	2161	2113	2250	2223	2058	1983

Tabel 2.5 Matriks Kedekatan Jarak Lanjutan Tabel 2.4

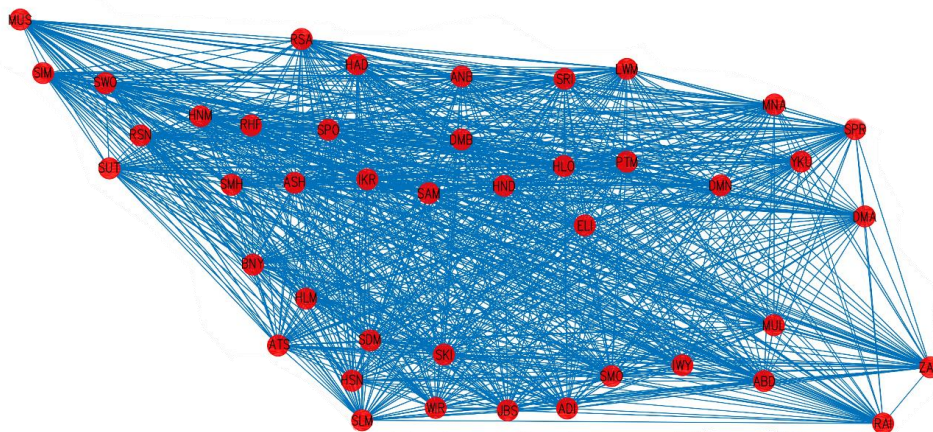
	SPO	HAD	IKR	SAM	DMB	ANB	HLM	ATS	HSN	SLM	SDM
SIM	905	896	1092	1278	1351	1334	984	990	1040	1043	1028
MUS	917	907	1106	1291	1362	1341	1003	1009	1059	1062	1047
SWO	682	678	866	1053	1132	1134	766	774	822	825	809
RSN	480	497	643	833	934	984	518	526	573	576	560
SUT	546	573	689	878	994	1065	507	512	563	566	553
SMH	327	383	419	604	739	858	240	250	295	298	280
BNY	366	433	403	575	728	880	140	147	196	199	185
HNM	327	335	508	695	781	819	471	484	522	526	504
RHF	300	310	481	667	755	796	452	465	502	505	483
RSA	249	186	441	582	597	552	614	632	647	651	625
ASH	184	256	235	422	556	692	217	235	248	253	226
SPO	0	76	205	377	455	533	395	414	418	422	395
HAD	76	0	255	407	455	491	470	488	493	498	471
IKR	205	255	0	190	325	505	357	373	351	354	332
SAM	377	407	190	0	183	438	500	514	477	479	463
DMB	455	455	325	183	0	277	670	685	652	654	637
ANB	533	491	505	438	277	0	860	877	856	859	837
HLM	395	470	357	500	670	860	0	18	56	59	49
ATS	414	488	373	514	685	877	18	0	54	55	54
HSN	418	493	351	477	652	856	56	54	0	4	23
SLM	422	498	354	479	654	859	59	55	4	0	27
SDM	395	471	332	463	637	837	49	54	23	27	0
WIR	435	511	344	454	632	848	104	101	48	46	60
SKI	398	473	306	421	599	810	103	107	58	59	54
SMO	447	517	292	341	524	766	242	245	193	192	194
JBS	437	510	314	399	581	809	167	168	115	114	119
IWJ	462	530	294	319	501	750	283	286	234	233	234
ABD	505	568	318	295	470	732	361	365	312	312	313
MUL	477	538	287	263	440	701	358	363	312	312	310
ADI	460	531	312	366	549	790	230	232	178	177	182
RAI	619	672	417	318	458	735	515	518	465	465	467
ZAM	659	707	454	330	449	726	579	582	530	529	530
ELI	1042	1073	844	667	668	885	1025	1029	976	975	976
HND	676	697	493	304	277	515	761	771	724	725	717
SRI	938	916	836	680	511	454	1179	1192	1156	1159	1143
HLO	816	824	650	461	372	530	939	949	903	904	895
LWM	1144	1121	1040	878	714	650	1379	1392	1354	1356	1341
DMN	1441	1443	1277	1088	989	1061	1547	1555	1506	1506	1501
DWT	1392	1403	1216	1026	950	1061	1461	1468	1417	1417	1414
PTM	1142	1142	987	800	688	759	1279	1288	1242	1243	1235
MNA	1606	1592	1471	1290	1155	1146	1778	1789	1744	1745	1735
SPR	1875	1865	1732	1547	1421	1423	2027	2036	1989	1990	1982
YKU	1671	1667	1517	1329	1216	1252	1798	1807	1759	1759	1753
DMA	1923	1928	1753	1563	1473	1541	2003	2009	1958	1958	1955

Tabel 2.6 Matriks Kedekatan Jarak Lanjutan Tabel 2.5

	WIR	SKI	SMO	JBS	IWJ	ABD	MUL	ADI	RAI	ZAM	ELI
SIM	1087	1075	1204	1143	1240	1311	1295	1201	1458	1513	1933
MUS	1106	1094	1222	1161	1257	1328	1312	1218	1475	1529	1948
SWO	868	854	981	921	1015	1086	1069	978	1232	1286	1706
RSN	619	606	733	673	769	841	826	730	989	1045	1473
SUT	611	604	738	671	776	852	840	731	1004	1063	1500
SMH	340	325	455	393	492	566	553	450	717	775	1212
BNY	243	236	373	303	412	489	481	364	642	704	1147
HNM	563	540	651	603	682	747	727	653	886	937	1350
RHF	541	518	627	580	657	721	701	629	860	911	1323
RSA	672	637	696	682	712	753	724	709	858	892	1242
ASH	276	244	337	299	365	429	409	341	570	623	1048
SPO	435	398	447	437	462	505	477	460	619	659	1042
HAD	511	473	517	510	530	568	538	531	672	707	1073
IKR	344	306	292	314	294	318	287	312	417	454	844
SAM	454	421	341	399	319	295	263	366	318	330	667
DMB	632	599	524	581	501	470	440	549	458	449	668
ANB	848	810	766	809	750	732	701	790	735	726	885
HLM	104	103	242	167	283	361	358	230	515	579	1025
ATS	101	107	245	168	286	365	363	232	518	582	1029
HSN	48	58	193	115	234	312	312	178	465	530	976
SLM	46	59	192	114	233	312	312	177	465	529	975
SDM	60	54	194	119	234	313	310	182	467	530	976
WIR	0	39	149	70	191	268	271	133	420	485	931
SKI	39	0	139	67	180	258	256	129	412	476	922
SMO	149	139	0	79	41	119	122	25	273	337	783
JBS	70	67	79	0	120	198	201	63	351	415	861
IWJ	191	180	41	120	0	78	82	60	232	296	742
ABD	268	258	119	198	78	0	33	136	154	218	664
MUL	271	256	122	201	82	33	0	142	164	223	667
ADI	133	129	25	63	60	136	142	0	288	352	798
RAI	420	412	273	351	232	154	164	288	0	66	511
ZAM	485	476	337	415	296	218	223	352	66	0	446
ELI	931	922	783	861	742	664	667	798	511	446	0
HND	689	666	546	622	509	443	427	569	342	295	392
SRI	1132	1101	1007	1074	977	925	902	1032	848	804	704
HLO	869	845	727	803	689	623	608	750	514	461	371
LWM	1328	1298	1198	1268	1165	1109	1088	1223	1018	968	781
DMN	1467	1448	1318	1397	1278	1203	1197	1338	1064	999	602
DWT	1376	1361	1226	1306	1185	1109	1105	1245	963	897	476
PTM	1206	1184	1062	1139	1023	953	941	1084	828	767	468
MNA	1709	1686	1565	1642	1527	1458	1445	1587	1332	1270	917
SPR	1952	1931	1806	1888	1766	1694	1684	1827	1559	1495	1103
YKU	1720	1701	1572	1651	1532	1458	1451	1593	1321	1256	857
DMA	1916	1902	1766	1846	1725	1648	1646	1784	1500	1434	998

Tabel 2.7 Matriks Kedekatan Jarak Lanjutan Tabel 2.6

	HND	SRI	HLO	LWM	DMN	DWT	PTM	MNA	SPR	YKU	DMA
SIM	1580	1786	1719	1983	2340	2296	2037	2475	2750	2561	2824
MUS	1593	1793	1731	1990	2351	2309	2048	2483	2758	2570	2835
SWO	1355	1581	1497	1782	2121	2074	1820	2267	2540	2345	2604
RSN	1136	1413	1288	1618	1916	1859	1620	2086	2354	2149	2395
SUT	1179	1484	1338	1690	1966	1902	1674	2149	2415	2204	2441
SMH	900	1244	1065	1450	1690	1620	1404	1889	2150	1933	2161
BNY	858	1239	1030	1442	1649	1571	1371	1865	2120	1897	2113
HNM	998	1251	1142	1455	1768	1717	1469	1928	2198	1997	2250
RHF	970	1226	1115	1431	1741	1690	1442	1902	2172	1971	2223
RSA	858	1003	968	1201	1573	1545	1268	1693	1968	1784	2058
ASH	721	1063	883	1268	1510	1443	1222	1706	1967	1751	1983
SPO	676	938	816	1144	1441	1392	1142	1606	1875	1671	1923
HAD	697	916	824	1121	1443	1403	1142	1592	1865	1667	1928
IKR	493	836	650	1040	1277	1216	987	1471	1732	1517	1753
SAM	304	680	461	878	1088	1026	800	1290	1547	1329	1563
DMB	277	511	372	714	989	950	688	1155	1421	1216	1473
ANB	515	454	530	650	1061	1061	759	1146	1423	1252	1541
HLM	761	1179	939	1379	1547	1461	1279	1778	2027	1798	2003
ATS	771	1192	949	1392	1555	1468	1288	1789	2036	1807	2009
HSN	724	1156	903	1354	1506	1417	1242	1744	1989	1759	1958
SLM	725	1159	904	1356	1506	1417	1243	1745	1990	1759	1958
SDM	717	1143	895	1341	1501	1414	1235	1735	1982	1753	1955
WIR	689	1132	869	1328	1467	1376	1206	1709	1952	1720	1916
SKI	666	1101	845	1298	1448	1361	1184	1686	1931	1701	1902
SMO	546	1007	727	1198	1318	1226	1062	1565	1806	1572	1766
JBS	622	1074	803	1268	1397	1306	1139	1642	1888	1651	1846
IWJ	509	977	689	1165	1278	1185	1023	1527	1766	1532	1725
ABD	443	925	623	1109	1203	1109	953	1458	1694	1458	1648
MUL	427	902	608	1088	1197	1105	941	1445	1684	1451	1646
ADI	569	1032	750	1223	1338	1245	1084	1587	1827	1593	1784
RAI	342	848	514	1018	1064	963	828	1332	1559	1321	1500
ZAM	295	804	461	968	999	897	767	1270	1495	1256	1434
ELI	392	704	371	781	602	476	468	917	1103	857	998
HND	0	509	181	676	791	723	518	1020	1266	1039	1262
SRI	509	0	368	206	641	680	367	692	968	805	1106
HLO	181	368	0	510	628	579	341	840	1090	868	1108
LWM	676	206	510	0	537	618	344	507	783	648	961
DMN	791	641	628	537	0	151	305	339	502	258	485
DWT	723	680	579	618	151	0	314	490	633	386	542
PTM	518	367	341	344	305	314	0	504	749	530	791
MNA	1020	692	840	507	339	490	504	0	277	205	508
SPR	1266	968	1090	783	502	633	749	277	0	247	355
YKU	1039	805	868	648	258	386	530	205	247	0	318
DMA	1262	1106	1108	961	485	542	791	508	355	318	0



Gambar 2.7 Graf jaringan yang menghubungkan 44 lanud

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Pengolahan Data untuk Mencari *Minimum Spanning Tree*

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data jarak antar 44 Lanud di Indonesia yang diperoleh dari Google Earth, yang dibuat dalam bentuk tabel matriks jarak antar Lanud pada Tabel 2.4. Data tersebut direpresentasikan dalam bentuk graf pada Gambar 2.7. Setelah itu, data dianalisis menggunakan metode minimum spanning tree untuk mencari jaringan minimum spanning tree. Pada bagian ini akan dipaparkan sebuah penyelesaian dari jarak tempuh antar 44 lanud menggunakan metode Minimum Spanning Tree dengan satuan *nautical miles (NM)*. Langkah-langkahnya adalah sebagai berikut:

Langkah 1

Pilih secara sembarang salah satu node, kemudian hubungkan node tersebut dengan node lain yang terdekat.

Jaringan MST = {MUS}

2. Langkah 2

Tentukan node lain yang belum terhubung yang jaraknya paling dekat dengan node yang sudah terhubung pada langkah sebelumnya. Kemudian hubungkan.

Jaringan MST = {MUS,SIM}

3. Langkah 3

Ulangi langkah 2 hingga seluruh node terhubung.

Jaringan MST = {MUS,.....DMA}

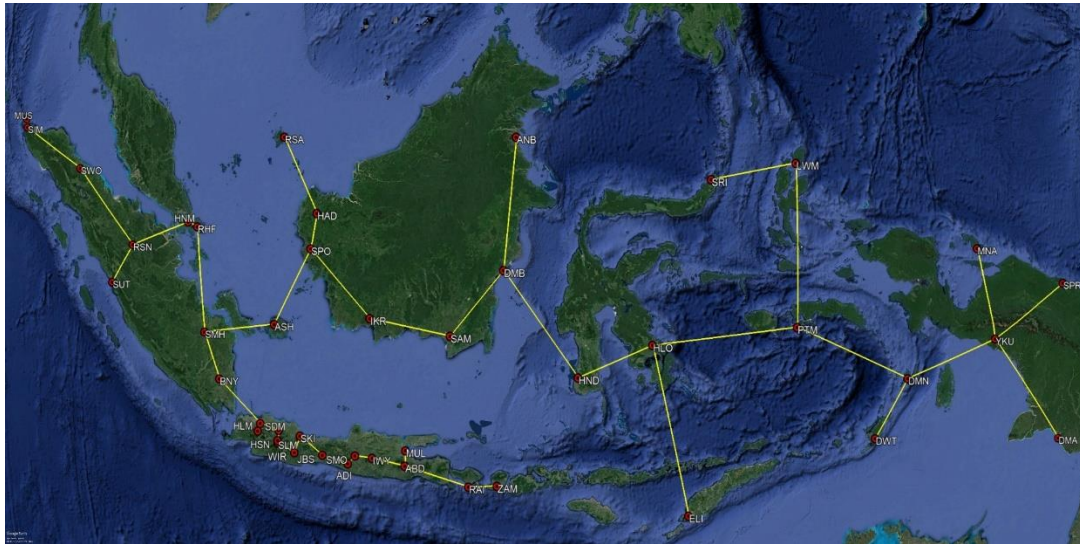
3.1 Jaringan Optimum Menurut Minimum Spanning Tree

Analisis Minimum Spanning Tree bertujuan untuk mengurangi jarak tempuh antar Lanud dengan memotong jarak yang memiliki jarak tempuh lebih panjang, yang menghubungkan 44 Lanud serta menghasilkan jarak tempuh optimal dengan mempertimbangkan variabel jarak dengan hasil pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Representasi Jaringan *Minimum Spanning Tree*

Rute	Nama Lanud	Jarak (NM)
MUS - SIM	Maimun Saleh - Sultan IskandarMuda	22
SIM - SWO	Sultan IskandarMuda - Soewondo	227
SWO - RSN	Soewondo - Roesmin Noerjadin	249
RSN - SUT	Roesmin Noerjadin - Sutan Sjahrir	103
RSN - HNM	Roesmin Noerjadin - Hang Nadim	165
HNM - RHF	Hang Nadim - Raja Haji Fisabilillah	28
RHF - SMH	Raja Haji Fisabilillah - Sri Mulyono Herlambang	228
SMH - BNY	Sri Mulyono Herlambang - Pangeran M. Bunyamin	107
BNY - HLM	Pangeran M. Bunyamin - Halim Perdanakusuma	140
HLM - ATS	Halim Perdanakusuma - Atang Sendjaja	18
HLM - SDM	Halim Perdanakusuma - Suryadarma Kalijati	49
SDM - HSN	Suryadarma Kalijati - Husein Sastranegara	23
HSN - SLM	Husein Sastranegara - Sulaiman	4
SLM - WIR	Sulaiman - Wiriadinata	46
WIR - SKI	Wiriadinata - Sugiri Sukani	39
SKI - JBS	Sugiri Sukani - Jenderal Besar Soedirman	67
JBS - ADI	Jenderal Besar Soedirman - Adi Soetjipto	63
ADI - SMO	Adi Soetjipto - Adi Soemarmo	25
SMO - IWJ	Adi Soemarmo - Iswahjudi	41
IWJ - ABD	Iswahjudi - Abdul Rachman Saleh	78
ABD - MUL	Abdul Rachman Saleh - Muljono	33
ABD - RAI	Abdul Rachman Saleh - I Gusti Ngurah Rai	154
RAI - ZAM	I Gusti Ngurah Rai - M Zainuddin Abdul Madjid	66
SMH - ASH	Sri Mulyono Herlambang - H. A S Hanandjoeddin	184
ASH - SPO	H. A S Hanandjoeddin - Supadio	184
SPO - HAD	Supadio - Harry Hadisoemantri	76
HAD - RSA	Harry Hadisoemantri - Raden Sadjad	186
SPO - IKR	Supadio - Iskandar	205
IKR - SAM	Iskandar - Syamsuddin Noor	190
SAM - DMB	Syamsuddin Noor - Dhomber	183
DMB - ANB	Dhomber - Anang Busra	277
DMB - HND	Dhomber - Sultan Hasanuddin	277
HND - HLO	Sultan Hasanuddin - Halu Oleo	181
HLO - ELI	Halu Oleo - El Tari	371
HLO - PTM	Halu Oleo - Pattimura	341
PTM - LWM	Pattimura - Leo Wattimena	344
LWM - SRI	Leo Wattimena - Sam Ratulangi	206
PTM - DMN	Pattimura - Dominicus Dumatubun	305
DMN - DWT	Dominicus Dumatubun - Ignatius Dewanto	151
DMN - YKU	Dominicus Dumatubun - Yohanis Kapiyau	258
YKU - MNA	Yohanis Kapiyau - Manuhua	205
YKU - SPR	Yohanis Kapiyau - Silas Papare	247
YKU - DMA	Yohanis Kapiyau - Johannes Abraham Dimara	318
TOTAL		6664

Hasil akhir analisis Minimum Spaning Tree menunjukkan bahwa jaringan optimum yang menghubungkan 44 Lanud menghasilkan total bobot 6664 NM. Jarak terdekat terjadi dari Lanud Husein Sastranegara ke Lanud Sulaiman dengan jarak 4 NM, sementara jarak terjauh adalah dari Lanud Halu Oleo ke Lanud El Tari dengan jarak 371 NM. Tabel 3.1 hasil akhir di dibuat dalam bentuk tabel, sedangkan Gambar 3.1 hasil akhir di aplikasikan pada peta indonesia.



Gambar 3.1 Jaringan Minimum Spanning Tree yang menghubungkan 44 Lanud di Indonesia

3.2 Analisis Jaringan Optimum pada Pesawat TNI AU

Berikut adalah perkiraan nilai jangkauan pesawat saat terisi penuh, yang dapat digunakan untuk menentukan kelayakan setiap jarak pada jaringan optimum :

Tabel 3.2 Data Jarak Tempuh Pesawat TNI AU ^{[5] [7] [8] [9] [10] [11]}

Type Pesawat	Nama Pesawat	Jarak Tempuh (NM)
Pesawat Tempur	Hawk 109/209	781
	F-16	2000
	F-16 C/D	2000
	Su-27/30	1800
	T-50i Golden Eagle	999
Helicopter	Emb-314 Super Tucano	2603
	NAS-332 Super Puma	460
	EC-120 Colibri	400
	SA-330 Puma	300
	EC-725	800
	NAS-332 L1 Super Puma	460
	AS-332 L2 Super Puma	460
Pesawat Latih	EC-120B COLIBRI	400
	Grob G-120 TP	640
	Cessna T-41D	580
Pesawat Transport & Logistik	KAI KT-1B	911
	CN-235	414
	CN-295	700
	BBJ-737 800	4935
	B-737 400 V	2100
	Fokker F28 V	1600
	C-130 V	2700
	C-130 H/HS	2700
	C-212	1240
	B-737 200	1200
	C-130 B/H	2700
	KC-130 B	2700
C-130	2700	

Dengan demikian, semua pesawat yang ada di Tabel 3.2 sebagian besar mampu menempuh jarak pada jaringan optimum yaitu jaringan minimum spanning tree yang menghubungkan 44 Lanud dengan jarak terpanjang dari Lanud Halu Oleo ke Lanud El Tari dengan jarak 371 NM, kecuali SA-330 Puma hanya bisa menempuh sejauh 300 NM. Rentang ini dapat bervariasi tergantung pada konfigurasi pesawat seperti berat pesawat, ketinggian, dan kondisi cuaca. Beberapa pesawat juga bisa memiliki jangkauan lebih jauh dengan peralatan tambahan seperti tangki bahan bakar eksternal.

4.6 Penerapan Jaringan *Minimum Spanning Tree (MST)* pada 44 Pangkalan Udara di Indonesia

Koordinasi Perencanaan Operasi Penyelamatan dan Tanggap Darurat

- **Tujuan:** Mengkoordinasikan perencanaan operasi penyelamatan dan tanggap darurat dengan jarak tempuh sebagai faktor utama, untuk mengurangi waktu respon, sehingga TNI AU dapat merencanakan operasi lebih efisien, kesiapan, dan fleksibilitas.
- **Proses:**
 1. **Node sebagai Lanud dan Pos Penyelamatan:** Lanud dan pusat operasi penyelamatan diidentifikasi sebagai node.
 2. **Edge sebagai Jarak Tempuh antara Titik Operasi:** Bobot pada edge adalah jarak tempuh antar Lanud
 3. **Metode Minimum Spanning Tree:** MST digunakan untuk membentuk jaringan operasi yang menghubungkan semua titik dengan total jarak tempuh minimum.
 4. **Implementasi:** Jaringan ini digunakan untuk mengarahkan pergerakan tim penyelamat dan peralatan dengan jarak tempuh paling singkat yang menjangkau 44 Lanud.
- **Hasil:**
 1. **Efisiensi Perencanaan Operasi**

Dengan adanya jaringan yang optimal, TNI AU dapat merencanakan mobilisasi, pengisian bahan bakar, dan logistik lainnya di titik-titik strategis, sehingga setiap Lanud siap berkontribusi dan menghadapi situasi darurat.
 2. **Koordinasi, Efektivitas, dan Respons Operasi Penyelamatan**

Operasi penyelamatan dapat dikoordinasikan dengan baik, mengurangi total jarak tempuh, mempercepat waktu respons, dan meningkatkan efektivitas tanggap darurat. Perencanaan operasi juga dapat dilaksanakan lebih cepat, mengurangi risiko kebingungan atau penundaan, sehingga proses mobilisasi sumber daya dapat dilakukan tanpa hambatan.
 3. **Fleksibilitas dalam Situasi Darurat**

Dalam situasi darurat, seperti bencana alam, jaringan MST yang terstruktur memungkinkan TNI AU untuk menyesuaikan rencana dengan cepat tanpa perlu merancang ulang secara keseluruhan, memberikan fleksibilitas yang tinggi dalam menghadapi hal-hal yang tak terduga.

IV. KESIMPULAN

Dengan metode *Minimum Spanning Tree (MST)*, pola jaringan udara antar 44 Pangkalan Angkatan Udara (Lanud) di Indonesia dapat diidentifikasi, menghasilkan jaringan optimum dengan total bobot 6664 NM, yang meningkatkan efisiensi, kesiapan, dan fleksibilitas perencanaan operasional TNI AU dalam merespons situasi darurat dengan optimal.

Sebagian besar pesawat yang dimiliki TNI AU dapat menempuh jaringan optimum *minimum spanning tree* dengan jarak terpanjang dari Lanud Halu Oleo ke Lanud El Tari sejauh 371 NM, kecuali SA-330 Puma memiliki keterbatasan jarak tempuh maksimal hanya sejauh 300 NM. Rentang ini adalah perkiraan dan dapat bervariasi tergantung pada berbagai faktor, termasuk konfigurasi pesawat seperti berat pesawat, ketinggian penerbangan, dan kondisi cuaca. Selain itu, beberapa pesawat dapat memiliki jangkauan yang lebih jauh dengan menggunakan peralatan tambahan seperti tangki bahan bakar eksternal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Setiani, “Prinsip-prinsip Manajemen Pengolaan Bandar Udara,” *J. Ilm. WIDYA*, vol. 25, pp. 25–32, 2015.
- [2] A. S. Sani, “Penggunaan Algoritma Genetika untuk Optimasi Sistem Distribusi dan Suplai Air (Studi Kasus : PDAM Kabupaten Sleman),” Universitas Islam Indonesia, 2011.
- [3] Triyono, “Algoritma Genetik untuk Pemecahan Persoalan Minimum Spanning Tree,” Universitas Islam Indonesia, 2004. [Online]. Available: <https://dspace.uui.ac.id/handle/123456789/3777>
- [4] TNI Angkatan Udara, “KOOPSUD I, II, III, KODIKLATAU,” tni-au.mil.id. Accessed: Mar. 01, 2023. [Online]. Available: <https://tni-au.mil.id/tentang-kami/profilsatuan>
- [5] Dinas Penerangan - TNI Angkatan Udara, “Koopsud I,” Dinas Penerangan - TNI Angkatan Udara. Accessed: Mar. 01, 2023. [Online]. Available: <https://tni-au.mil.id/portfolio/koopsau-i/>
- [6] Google Earth, “Model 3D Indonesia,” Earth.google.com. Accessed: Mar. 01, 2023. [Online]. Available: <https://earth.google.com>
- [7] SKYbrary Aviation Safety, “Aircraft types,” Skybrary.aero. Accessed: May 14, 2023. [Online]. Available: <https://skybrary.aero/aircraft-types>
- [8] Airforce Technology, “Projects,” Airforce-technology.com. Accessed: May 14, 2023. [Online]. Available: www.airforce-technology.com
- [9] H3 Grob Aircraft, “Technical Specification,” Grob-aircraft.com. Accessed: May 14, 2023. [Online]. Available: <https://grob-aircraft.com/en/g-120tp.html>
- [10] Dirgantara Indonesia, “Aircraft,” indonesian-aerospace.com. Accessed: May 14, 2023. [Online]. Available: <https://www.indonesian-aerospace.com/aircraft>
- [11] Airlines, “Aircraft Technical Data & Specifications,” Airliners.net. Accessed: May 14, 2023. [Online]. Available: <https://www.airliners.net/aircraft-data>