

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Tenaga listrik merupakan kebutuhan pokok dalam menunjang semua kegiatan masyarakat. Dalam menyalurkan tenaga listrik diperlukan transformator daya untuk mengubah listrik tegangan tinggi ke listrik tegangan rendah yang siap digunakan oleh konsumen. Kegagalan operasi transformator adalah merupakan hal yang buruk bagi masyarakat pengguna listrik, karena akan mengganggu kegiatan mereka, bahkan banyak perusahaan yang dirugikan karena mereka tidak dapat beroperasi. Oleh karena itu transformator daya perlu dirawat dan dijaga keandalannya, agar dapat tetap beroperasi dengan baik [1].

Transformator daya merupakan komponen kunci dalam infrastruktur sistem tenaga listrik modern. Sebagai inti dari jaringan distribusi dan transmisi listrik, transformator memainkan peranan penting dalam mengubah level tegangan listrik untuk memenuhi kebutuhan berbagai pengguna akhir [2]. Dari rumah tangga hingga industri berat, transformator daya menjamin bahwa energi listrik dapat disalurkan secara efisien dan aman melintasi jarak yang jauh. Sebagai tulang punggung jaringan listrik, keandalan dan efisiensi transformator daya adalah kunci utama untuk memastikan distribusi energi yang stabil dan berkelanjutan [3].

Transformator daya merupakan salah satu peralatan penting dalam sistem tenaga listrik, yang esensial untuk stabilitas dan keamanan jaringan. Kegagalan transformator dapat menyebabkan pemadaman listrik, perbaikan mahal, dan kerugian finansial besar [4]. Kegagalan transformator jarang terjadi, tetapi dampaknya sangat besar, termasuk pemadaman listrik, biaya perbaikan mahal, dan kerugian finansial signifikan. Oleh karena itu, pemantauan kondisi transformator menjadi diperlukan, dengan *Dissolved Gas Analysis* (DGA) sebagai metode utama untuk mendeteksi kerusakan isolasi secara dini melalui pengukuran gas terlarut dalam minyak transformator [5]. Untuk menjaga keandalan dan ketersediaan peralatan, pemantauan dini melalui pengukuran proses industri menjadi esensial, dengan *Dissolved Gas Analysis* (DGA) sebagai teknik populer, non-intrusif, dan sensitif untuk mendeteksi cacat isolasi dengan mengukur gas-gas seperti hidrogen

(H₂), metana (CH₄), etilena (C₂H₄), etana (C₂H₆), asetilena (C₂H₂), karbon monoksida (CO), dan karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan dari proses dekomposisi termal atau listrik [6].

Pola dan konsentrasi gas-gas ini dapat dihubungkan dengan jenis kerusakan tertentu, seperti *partial discharge*, *thermal fault*, atau *arcing*. Namun, interpretasi data DGA sering kali menghadapi tantangan karena sifatnya yang kompleks dan tidak pasti, yang dipengaruhi oleh variasi kondisi operasi dan lingkungan transformator. Untuk mengatasi ketidakpastian dalam interpretasi data DGA, pendekatan berbasis kecerdasan buatan, khususnya logika fuzzy, telah banyak diteliti. Logika fuzzy memungkinkan pemodelan ketidakpastian dengan menggunakan aturan berbasis linguistik, yang dapat menangani data yang ambigu atau tidak lengkap. Logika fuzzy dapat meningkatkan akurasi diagnosis kerusakan transformator dengan mengintegrasikan data DGA dan memetakan hubungan non-linear antara konsentrasi gas dan jenis kerusakan.

Pada praktiknya, pengujian *Dissolved Gas Analysis* (DGA) umumnya dilakukan melalui pengambilan sampel minyak transformator yang kemudian dianalisis secara langsung di laboratorium menggunakan peralatan khusus. Proses ini tidak hanya memerlukan waktu dan biaya, tetapi juga membutuhkan keahlian teknis yang memadai dalam menginterpretasikan hasil pengujian. Selain itu, hasil DGA yang diperoleh sering kali berupa data numerik dengan variasi nilai yang saling tumpang tindih antar jenis gangguan, sehingga penentuan kondisi transformator masih sangat bergantung pada pengalaman dan subjektivitas analis. Dalam konteks ini, logika fuzzy berperan sebagai metode yang mampu menerjemahkan data numerik DGA ke dalam bentuk linguistik dan aturan berbasis pengetahuan, sehingga proses penentuan kondisi transformator dapat dilakukan secara lebih terstruktur, konsisten, dan mudah dipahami sebagai dasar pengambilan keputusan pemeliharaan.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini mengusung penerapan logika fuzzy sebagai pendekatan kecerdasan buatan untuk mengolah dan menginterpretasikan data DGA dalam mendiagnosis kondisi transformator. Logika fuzzy digunakan untuk memodelkan hubungan antara konsentrasi gas terlarut dan kondisi

transformator melalui tahapan fuzzifikasi, basis aturan, inferensi, dan defuzzifikasi, sehingga mampu menghasilkan keluaran berupa penilaian kondisi transformator yang lebih representatif terhadap kondisi nyata. Melalui integrasi antara metode konvensional DGA dan pemodelan logika fuzzy, penelitian ini diharapkan dapat memberikan hasil diagnosis yang lebih objektif, konsisten, dan mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan berbasis kondisi secara lebih efektif, sekaligus mengurangi ketergantungan pada interpretasi subjektif operator.

1.2. Kajian Riset Terdahulu

Kajian riset terdahulu dilakukan untuk menegaskan keaslian penelitian, mencegah plagiarisme, memunculkan ide-ide baru, dan membandingkan dengan penelitian sebelumnya. Tabel 1.1 menyajikan referensi jurnal penelitian sebelumnya.

Tabel 1.1 Kajian riset terdahulu.

NO	JUDUL	NAMA PENELITI	TAHUN
1	Analisis Keandalan Sistem Trafo <i>Step Down</i> Menggunakan Metode Logika Fuzzy	A. Emirwati, Linda Sartika, Abdul Muis Prasetya	2023
2	<i>Fuzzy Logic and Decision Tree Models for Dissolved Gas Analysis in Power Transformer Fault Diagnosis</i>	K. O. Alawode dan F. Olowolafe	2023
3	<i>Hybrid Condition Monitoring System for Power Transformer Fault Diagnosis</i>	Engin Baker, Secil Varbak Nese, Erkan Dursun	2023
4	Identifikasi Penurunan Kinerja Pada Minyak Transformator di GI Lagadar Menggunakan <i>Total Dissolved Combustible Gas</i> ,	Setia Giri A, Salma Najla A, M Reza Hidayat, Een Taryana	2023

NO	JUDUL	NAMA PENELITI	TAHUN
	Rasio Doernenburg, Segitiga Duval dan <i>Water Content</i>		
5	Analisis Karakteristik Minyak Transformator Menggunakan Pengujian <i>Dissolved Gas Analysis</i> (DGA) Pada Ibt 1 Gardu Induk	Agus Siswanto, Abdul Rohman, Sugeng Suprijadi, Mudofar Baehaqi, Arifudin	2022
6	<i>Fuzzy Logic Approach to Dissolved Gas Analysis for Power Transformer Failure Index and Fault Identification</i>	Nitchamon Poonnoy, Cattareeya Suwanasri, dan Thanapong Suwanasri	2020

Penelitian oleh A. Emirwati dkk [7] membahas peningkatan keandalan transformator *step down* melalui penurunan ketidakseimbangan arus beban antar fasa menggunakan metode logika fuzzy Mamdani. Ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi menjadi masalah karena menyebabkan rugi-rugi daya, penurunan efisiensi, dan menurunnya keandalan sistem kelistrikan. Dalam penelitian ini, data arus fasa R, S, dan T dari beberapa trafo di PT PLN Tarakan digunakan sebagai *input* sistem fuzzy untuk menghasilkan keputusan perubahan arus tiap fasa agar lebih seimbang. Hasilnya menunjukkan bahwa metode fuzzy mampu menurunkan ketidakseimbangan beban dari nilai awal tertinggi 46,1% menjadi kurang dari 20%, bahkan hingga 2,6% pada beberapa kasus. Temuan ini menunjukkan bahwa logika fuzzy efektif sebagai metode cerdas untuk menyeimbangkan beban transformator secara otomatis dan menjadi acuan penting dalam pengembangan sistem pemantauan atau optimasi trafo berbasis kecerdasan buatan.

Penelitian oleh Alawode dan Olowolafe [8] membahas diagnosis gangguan awal (*incipient faults*) pada transformator daya menggunakan analisis gas terlarut (*Dissolved Gas Analysis*) yang diintegrasikan dengan kecerdasan buatan. Penelitian ini mengembangkan model logika fuzzy dan *decision tree* untuk meningkatkan

akurasi deteksi dibandingkan metode konvensional seperti *Rogers Ratio*, *IEC Ratio*, *Dornenburg*, dan *Duval Triangle*. Sebanyak 310 sampel data DGA dengan kondisi gangguan yang telah diketahui digunakan sebagai data pelatihan dan pengujian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model fuzzy *Duval Triangle* mencapai akurasi 91,9%, sedangkan model *decision tree* memberikan akurasi tertinggi sebesar 95,2% dalam mengidentifikasi jenis gangguan seperti *partial discharge*, *sparking*, *arcing*, dan *thermal fault*. Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan AI mampu mengatasi keterbatasan metode konvensional, terutama pada kasus data tidak pasti atau berada di batas zona gangguan, sehingga menjadi referensi penting untuk pengembangan sistem diagnosis transformator yang lebih cerdas dan andal.

Penelitian oleh Engin Baker dkk [9] mengusulkan sistem pemantauan kondisi *Hybrid Condition Monitoring System* (HCMS) untuk diagnosis gangguan transformator tenaga berbasis *Dissolved Gas Analysis* (DGA) yang dikombinasikan dengan Logika Fuzzy (FL) dan *Support Vector Machine* (SVM). Tujuan penelitian ini adalah meningkatkan akurasi diagnosis gangguan *internal* transformator seperti *partial discharge*, *arcing*, dan *thermal fault*. Sistem ini mengintegrasikan tiga metode utama DGA, yaitu *Key Gas Method* (KGM), *Simplified IEC Method* (SIM), dan *Duval Triangle Method* (DTM) ke dalam model fuzzy yang dikembangkan menggunakan *LabVIEW Fuzzy System Designer*. Setiap metode fuzzy diuji menggunakan 317 data gangguan nyata dari *database* IEC TC 10 dan TEIAS, menghasilkan tingkat akurasi masing-masing 92,11% untuk FSIM, 88,64% untuk FKGM, dan 94,64% untuk FDTM. Hasil terbaik diperoleh ketika sistem fuzzy diintegrasikan dalam model hibrida HCMS dengan pendekatan matematis mencapai 95,58%, sedangkan HCMS berbasis SVM mencapai 96,23%. Penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi metode DGA dan kecerdasan buatan mampu meningkatkan keandalan diagnosis kondisi transformator, serta menjadi dasar bagi pengembangan sistem monitoring cerdas yang dapat melakukan prediksi gangguan secara real-time dan adaptif.

Penelitian oleh Setia Giri A dkk [10] bertujuan untuk mengidentifikasi penurunan kinerja minyak pada transformator daya menggunakan metode konvensional, yaitu *Total Dissolved Combustible Gas* (TDCG), *Rasio*

Doernenburg, Segitiga Duval, serta analisis kadar air (*Water Content*). Studi ini difokuskan pada empat unit transformator daya yang beroperasi di Gardu Induk (GI) Lagadar. Hasil penelitian menunjukkan adanya indikasi gangguan pada salah satu transformator yang menyebabkan penurunan kinerjanya. Berdasarkan pengujian TDCG, transformator unit 2 memiliki konsentrasi gas terlarut tertinggi sebesar 1105 ppm, yang menandakan potensi kegagalan meskipun masih dalam batas aman. Sementara itu, pengukuran kadar air pada transformator unit 4 menunjukkan nilai tertinggi sebesar 26,71 ppm, yang mengindikasikan adanya gangguan tipe *low-heated cellulose* dan perlu segera dilakukan penanganan.

Penelitian oleh Agus Siswanto dkk [11] berfokus pada analisis karakteristik minyak transformator menggunakan metode *Dissolved Gas Analysis* (DGA) pada trafo IBT 1 di Gardu Induk Sunyaragi. Dalam penelitian ini digunakan tiga metode utama, yaitu *Total Dissolved Combustible Gas* (TDCG), *Rasio Roger*, dan Segitiga Duval yang mengacu pada standar IEEE C57.104-2008 dan IEC 60599. Analisis dilakukan dengan mengambil data hasil pengujian minyak selama periode 2017 hingga 2021 untuk mengetahui perkembangan kondisi isolasi minyak dan indikasi gangguan internal pada transformator. Berdasarkan hasil analisis, diketahui bahwa pada tahun 2017 hingga 2020 kondisi minyak berada pada level waspada dengan indikasi adanya *thermal fault* (T3). Namun, pada Desember 2020 ditemukan peningkatan signifikan pada gas H_2 dan C_2H_2 yang menunjukkan adanya kombinasi gangguan DT di dalam trafo. Setelah dilakukan tindakan filterisasi minyak, kadar gas turun drastis dari 1520 ppm menjadi 481 ppm, yang menandakan kondisi minyak kembali normal dan sistem trafo kembali bekerja dengan baik. Hasil penelitian ini menegaskan bahwa metode DGA dapat digunakan secara efektif untuk mendeteksi dini gangguan internal, memantau kondisi isolasi minyak, serta mendukung pelaksanaan pemeliharaan berbasis kondisi guna mencegah terjadinya kegagalan besar pada transformator.

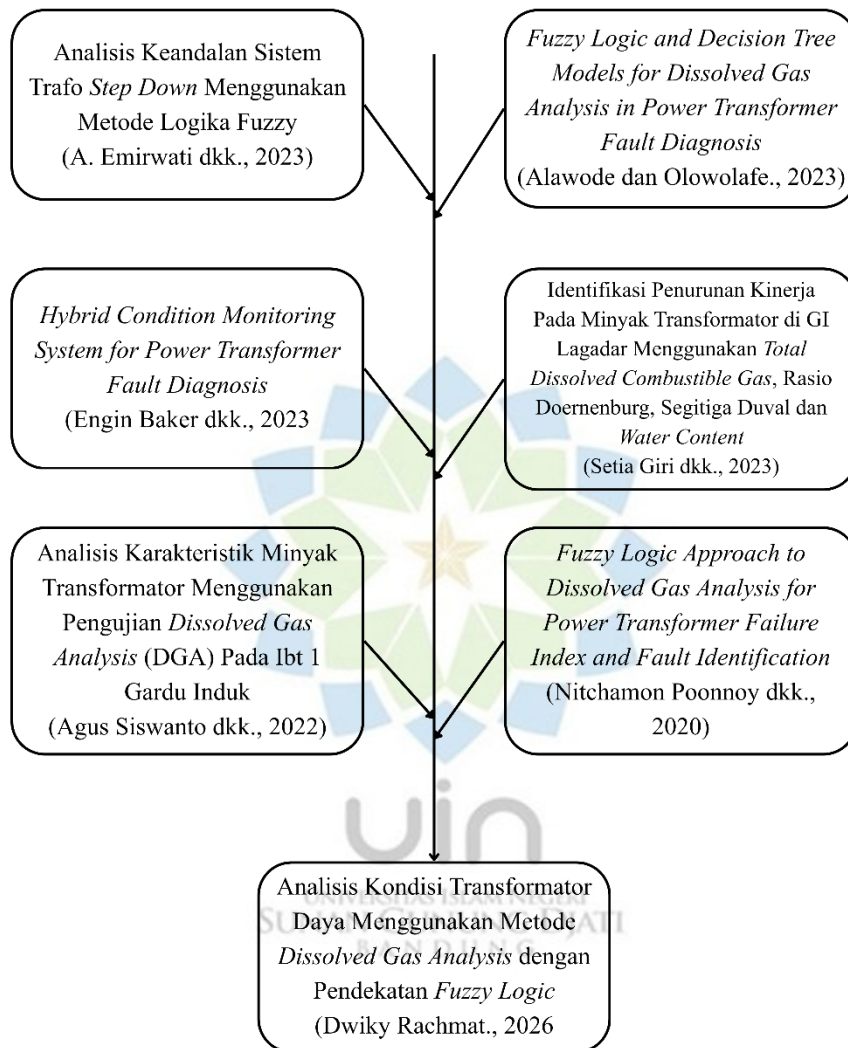
Penelitian oleh Poonnoy dkk [12] mengusulkan pendekatan logika fuzzy untuk menganalisis kondisi transformator tenaga berdasarkan metode *Dissolved Gas Analysis* (DGA) guna menentukan indeks kegagalan (*failure index*) dan jenis gangguan secara lebih akurat. Penelitian ini mengintegrasikan tiga metode DGA

konvensional seperti *key gas*, *IEC ratio*, dan *Duval Triangle* ke dalam sistem fuzzy untuk mengatasi keterbatasan interpretasi manual yang bersifat subjektif dan sering menghasilkan diagnosis yang tidak konsisten. Sistem fuzzy memproses konsentrasi gas terlarut seperti H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , CO , dan CO_2 untuk menentukan tingkat keparahan gangguan seperti *partial discharge*, *arcing*, *overheating* minyak atau selulosa, serta menghitung persentase *failure index* (%FI) yang menunjukkan kondisi kesehatan transformator. Metode ini divalidasi menggunakan lebih dari 200 data transformator nyata, termasuk dua transformator yang dibongkar untuk memastikan kebenaran diagnosis. Hasilnya menunjukkan bahwa pendekatan fuzzy mampu meningkatkan akurasi diagnosis hingga lebih dari 89% dan memberikan informasi tingkat keparahan gangguan yang dapat digunakan untuk strategi pemeliharaan berbasis kondisi. Penelitian ini menjadi dasar penting dalam pengembangan sistem pemantauan transformator cerdas berbasis AI.

Setelah melakukan studi literatur dari berbagai macam penelitian terdahulu yang sesuai dengan topik penelitian yang akan diangkat, maka penelitian ini melakukan analisis kondisi transformator menggunakan metode *dissolved gas analysis* dengan pendekatan *fuzzy logic* untuk penilaian kondisi transformator. Data pengujian dari transformator yang beroperasi, dengan analisis faktor-faktor seperti gas terlarut, kondisi minyak, dan usia operasional. Selain itu, penelitian ini menggunakan metode *Dissolved Gas Analysis* (DGA) secara konvensional sebagai acuan awal dalam menentukan kondisi dan jenis kerusakan transformator berdasarkan gas terlarut, kemudian hasil diagnosis tersebut dibandingkan dengan hasil diagnosis menggunakan pendekatan logika fuzzy. Perbandingan ini dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan logika fuzzy dalam mengakomodasi ketidakpastian data DGA serta meningkatkan keakuratan dan sensitivitas diagnosis kondisi transformator.

Penelitian ini merujuk pada enam referensi yang relevan dengan topik yang diteliti. Beberapa topik yang berkaitan meliputi analisis kondisi transformator menggunakan *Dissolved Gas Analysis* (DGA) sebagai metode diagnosis gangguan isolasi, serta penerapan pendekatan kecerdasan buatan untuk mengolah ketidakpastian data gas terlarut. Referensi tersebut digunakan sebagai dasar dalam pengembangan model diagnosis kondisi transformator serta sebagai pembanding

antara metode DGA konvensional dan pendekatan *fuzzy logic* dalam meningkatkan akurasi dan sensitivitas analisis. Hubungan antar penelitian sebelumnya dapat dilihat pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Hubungan penelitian.

1.3. Rumusan Masalah

1. Bagaimana diagnosis jenis kegagalan transformator daya berdasarkan metode *Dissolved Gas Analysis* (DGA) konvensional?
2. Bagaimana penerapan *fuzzy logic* dalam mengintegrasikan hasil diagnosis dari metode konvensional DGA menjadi kondisi akhir transformator daya?
3. Bagaimana hasil pengujian sistem *fuzzy logic* dalam mengklasifikasikan kondisi transformator daya?

1.4. Tujuan dan Manfaat

1.4.1. Tujuan

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah yang telah diuraikan, maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui diagnosis jenis kegagalan pada transformator daya dengan metode *Dissolved Gas Analysis* (DGA) konvensional.
2. Menerapkan *fuzzy logic* untuk mengintegrasikan hasil diagnosis dari metode DGA konvensional menjadi kondisi akhir transformator daya.
3. Menganalisis hasil pengujian sistem *fuzzy logic* dalam mengklasifikasikan kondisi transformator daya.

1.4.2. Manfaat

Manfaat penelitian ini diharapkan dapat dirasakan oleh bidang akademis dan bidang praktis, baik dalam aspek akademik maupun aplikatif.

1. Manfaat penelitian ini di bidang akademis adalah memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan di bidang sistem diagnosis kondisi transformator, khususnya melalui integrasi metode *Dissolved Gas Analysis* (DGA) dan logika fuzzy.
2. Manfaat praktis yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah memberikan dukungan bagi PT PLN (Persero), khususnya unit pengelola dan pemelihara transformator daya dalam menerapkan strategi pemeliharaan berbasis kondisi. Dengan adanya model ini diharapkan dapat membantu teknisi PLN dalam melakukan evaluasi kondisi transformator secara lebih objektif dan sistematis, sehingga risiko gangguan dapat diminimalkan, umur peralatan dapat dioptimalkan, serta biaya perbaikan besar akibat kegagalan mendadak dapat dikurangi.

1.5. Batasan Masalah

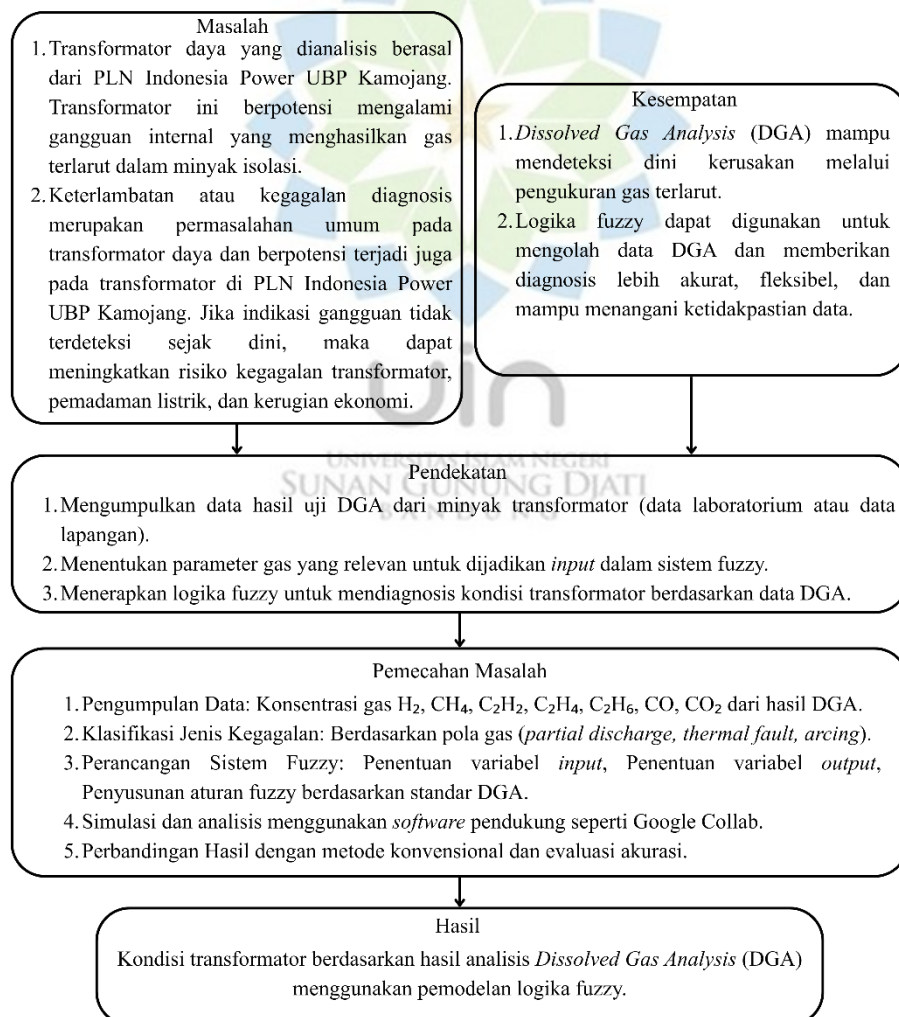
Masalah penelitian ini sangat luas, sehingga perlu dibatasi agar hasil penelitiannya lebih spesifik. Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Penelitian hanya difokuskan pada transformator daya yang menggunakan minyak sebagai media isolasi dan pendingin.

2. Data yang digunakan merupakan data laboratorium atau data operasional transformator yang sudah tersedia seperti data gas H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_2H_2 , CO , dan CO_2 .
3. Hasil diagnosis dibatasi pada klasifikasi kondisi transformator, yaitu Normal, Waspada, atau Kritis.
4. Metode *fuzzy logic* yang digunakan adalah metode Tsukamoto.

1.6. Kerangka Berpikir

Kerangka berpikir memuat jalan pemikiran yang berisi penjabaran sistematis mengenai informasi dari masalah penelitian yang diperkirakan mampu diselesaikan melalui pendekatan maupun analisisnya. Kerangka berpikir pada penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 1.2.



Gambar 1.2 Kerangka berpikir.

1.7. Sistematika Penulisan

Penulisan tugas akhir ini memiliki sistematika penulisan dengan total 6 bab. Adapun penjabaran dari setiap bab pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini meliputi latar belakang, kajian riset terdahulu, rumusan masalah, tujuan, manfaat, batasan masalah, kerangka berpikir, dan sistematika penulisan.

BAB II TEORI DASAR

Bab ini berisi tinjauan pustaka atau penjelasan tentang seluruh aspek yang terkait dengan penelitian, yaitu teori tentang transformator daya, sistem pendinginan pada transformator daya, *Dissolved Gas Analysis* (DGA), metode-metode pada *Dissolved Gas Analysis* (DGA), dan teori teori mengenai *fuzzy logic*.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi diagram alir serta tahapan-tahapan untuk pemecahan masalah yang terdapat pada penelitian dengan sistematis agar hasil yang didapatkan bisa sesuai dengan harapan.

BAB IV PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI

Bab ini membahas perancangan dan implementasi sistem diagnosis kondisi transformator daya menggunakan metode *Dissolved Gas Analysis* (DGA) dengan pendekatan *fuzzy logic*. Pembahasan meliputi persiapan data, perhitungan metode konvensional DGA, penentuan variabel *input* dan *output*, fuzzifikasi, *rule base*, inferensi fuzzy, defuzzifikasi, serta implementasi sistem menggunakan Python.

BAB V PENGUJIAN DAN ANALISIS

Bab ini menyajikan hasil pengujian dan analisis sistem *fuzzy logic* yang telah dirancang. Pembahasan meliputi pengujian manual, perbandingan hasil manual dengan program, pengujian data historis, pengujian data skenario, pengujian sensitivitas serta analisis kondisi akhir transformator berdasarkan *output* sistem fuzzy.

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian berdasarkan tujuan yang telah ditetapkan. Selain itu, bab ini juga memuat saran untuk pengembangan penelitian

selanjutnya baik dari sisi data, metode fuzzy, maupun implementasi sistem diagnosis transformator.

