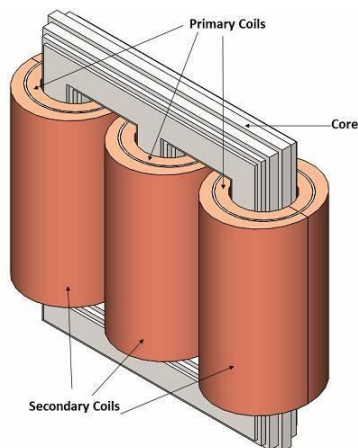


2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator

Menurut SNI 0225-5-521 (Badan Standardisasi Nasional, 2020), Transformator adalah sebuah aparatus statik dengan dua belitan atau lebih yang berfungsi memindahkan daya melalui induksi elektromagnetik pada sistem tegangan dan arus bolak-balik menjadi nilai tegangan dan arus yang berbeda dengan frekuensi yang sama. Belitan merupakan perakitan dari sebuah bentuk rangkaian listrik dengan nilai tegangan tertentu pada sebuah transformator (International Electrotechnical Commission, 2011). Belitan dibagi menjadi belitan tegangan tinggi dan belitan tegangan rendah. Pada transformator 3 fasa terdiri dari yaitu 3 belitan fasa *high voltage* dan 3 belitan fasa *low voltage*. Dimana setiap belitan memiliki panjang, lebar, dan tinggi yang umumnya sama untuk setiap belitan fasa.



Gambar 2.1 Koil Transformator

Sumber: *Emotors Design*. <https://twitter.com/EMWorksInc/status/895702823052075008>.

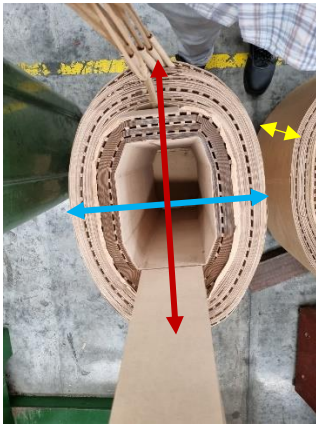
(2017). EMWorks Inc

2.1.1 Parameter Transformator

Pada proses pembuatan transformator ukuran belitan diukur, sebagai berikut:

1. *Inner Diameter Length* (Panjang) LV, HV
2. *Inner Diameter Width* (Lebar) LV, HV
3. *Inner Diameter Height* (Tinggi) LV, HV
4. *Outer Diameter Length* (Panjang) LV, HV
5. *Outer Diameter Width* (Lebar) LV, HV

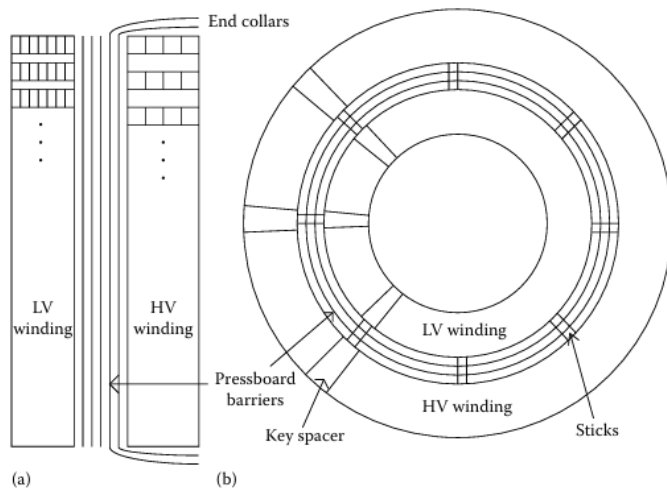
6. Outer Diameter Height (Tinggi) LV, HV



Gambar 2.2 Koil Transformator

Sumber: Dokumentasi Pribadi di PT. X

Panah biru menunjukkan lebar koil, panah merah menunjukkan panjang koil, dan panah kuning menunjukkan tinggi koil. Selain itu, sisi yang berwarna lebih gelap pada bagian dalam disebut koil tegangan rendah, dan sisi yang berwarna terang pada bagian luar disebut koil tegangan tinggi. Di antara koil tegangan rendah dan tinggi terdapat sedikit celah/gap yang diisi *pressboard* (Del Vecchio et al., 2018).



Gambar 2.3 Tampak Samping dan Tampak Atas Koil Transformator

Sumber: Del Vecchio, R. M., Poulin, B., Feghali, P. T., Shah, D. M., & Ahuja, R. (2018). *Transformer Design Principles Third Edition*.

2.2 Kriteria Pengujian Trafo

Pengujian transformator adalah langkah penting untuk memverifikasi kualitasnya dan memastikan kesesuaian hasil uji dengan spesifikasi desain. Sesuai dengan standar IEC 60076-1 (2011), terdapat tiga jenis pengujian utama: rutin, tipe, dan khusus. *Routine Test* adalah pengujian yang wajib dilakukan untuk setiap transformator yang diproduksi. Sementara itu, *Type Test* dilaksanakan pada satu transformator untuk setiap desain yang unik, dan hasilnya mencerminkan kualitas transformator dengan desain serupa. Sebuah transformator dianggap sebagai wakil jika dibangun dengan mengikuti gambar yang identik, menggunakan teknik dan bahan yang sama, dan diproduksi di pabrik yang sama. *Special Test*, di sisi lain, merupakan pengujian khusus yang tidak termasuk dalam uji tipe atau rutin, tetapi hasilnya disepakati secara bersama antara produsen dan pembeli untuk memenuhi persyaratan khusus yang mungkin tidak tercakup dalam pengujian rutin atau tipe. Selain itu, pada SPLN D3.002-1 (2020) telah dibuat mata uji sebagai syarat untuk serah terima transformator distribusi, sebagai berikut:

Tabel 2.1

Macam Pengujian SPLN D3.002-1

No.	Mata uji	Metode uji/acuan	Rutin	Jenis	Serah terima
1.	Pemeriksaan dimensi/konstruksi transformator - Pemeriksaan dimensi - Pemeriksaan konstruksi - Pemeriksaan lengkapan - Pengukuran jarak udara dan jarak rambat <i>bushing</i> - Pengujian berat	- Pasal 7 - Spesifikasi pabrikan - Pasal 8 - IEC 60076-3 - Sub-pasal 7.1.3 - Sub-pasal 8.1.3 dan 8.1.6 - Sub-pasal 7.1.3	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ -	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ -
2.	Pengukuran tahanan belitan	- IEC 60076-1, sub pasal 10.2	✓	✓	✓
3.	Pengukuran rasio tegangan dan pemeriksaan kelompok vektor	- IEC 60076-1, sub pasal 10.3	✓	✓	✓

No.	Mata uji	Metode uji/acuan	Rutin	Jenis	Serah terima
		- Deviasi pada nominal <i>tapping</i> adalah nilai terkecil (10% x impedans atau 0,5 %)			
4.	Pengukuran rugi berbeban dan tegangan impedansi	- Sub pasal 6.6 dan 6.7 - IEC 60076-1, sub pasal 10.4	✓	✓	✓
5.	Pengukuran rugi dan arus tanpa beban	- Sub pasal 6.6 - IEC 60076-1, sub pasal 10.5	✓	✓	✓
6.	Pengujian ketahanan tegangan	- Sub pasal 6.8 - IEC 60076-3	✓	✓	✓
7.	Pengujian tegangan lebih induksi	- IEC 60076-3	✓	✓	✓
8.	Pengukuran tahanan insulasi	- IEC 60076-3	✓	✓	✓
9.	Pengujian <i>load rejection</i> (untuk trafo Ynd5)	- IEC 60076-1 - Pengulangan item uji no 2-8 dengan kondisi baik	-	✓	-
10.	Pengujian ketahanan tegangan impuls petir	- IEC 60076-3 - IEC 60076-4	-	✓	-
11.	Pengujian kenaikan suhu	- Sub-pasal 6.9 - IEC 60076-2 - Tekanan maksimum 0,3 bar	-	✓	-
12.	Pengujian tingkat bising	- IEC 60076-10 - Sub pasal 6.10	-	✓	-
13.	Pengujian ketahanan hubung-singkat - Kemampuan termal	- IEC 60076-5, sub pasal 4.1	-	✓	-

Keterangan:

R_1	: tahanan resistif pada sisi primer
jX_1	: reaktansi induktif pada sisi primer
R_2	: tahanan resistif pada sisi sekunder
jX_2	: reaktansi induktif pada sisi sekunder
R_{c1}	: tahanan resistif pada inti besi
L_{m1}	: reaktansi induktif pada inti besi
I_0	: terdiri dari I_c dan I_m
I_c	: arus rugi-rugi
I_m	: arus medan magnet
I_1	: arus pada sisi primer
I_2	: arus pada sisi sekunder
E_1	: tegangan pada sisi primer
E_2	: tegangan pada sisi sekunder

Rangkaian ekivalen adalah susunan beberapa komponen yang merepresentasikan fenomena *physic* yang terjadi pada sebuah transformator. Transformator memiliki 2 komponen berupa lilitan tembaga dan inti besi. Pada rangkaian ekivalen, koil primer berupa lilitan tembaga yang terdiri dari tahanan resistif (R_1) dan reaktansi induktif (X_1) (Wiharja, 2009). Inti besi memiliki rugi-rugi yang berupa *eddy current* dan *hysteresis losses*. Dan rangkaian ekivalen koil sekunder berupa lilitan tembaga yang terdiri dari tahanan resistif (R_2) dan reaktansi induktif (X_2) (Wiharja, 2009).

2.3.1 Total Rugi Daya

Total rugi daya pada transformator terdiri dari rugi besi dan rugi tembaga. *Test open circuit* menghasilkan rangkaian ekivalen beban kosong dan rugi-rugi beban kosong (rugi besi). *Test short circuit* menghasilkan rangkaian ekivalen berbeban penuh dan rugi-rugi pada kondisi beban penuh (rugi tembaga). Rugi-rugi pada kondisi beban penuh ini yang terdiri dari rugi tembaga dan *stray losses*.

$$P_{TOT} = P_{NLL} + P_{LL} \quad (2.1)$$

Sumber: McLyman, C. W. T. (2004). *Transformer and inductor design handbook*. Marcel Dekker.

Keterangan:

P_{TOT} : total rugi besi dan tembaga

P_{NLL} : rugi besi atau *no load loss*

P_{LL} : rugi tembaga atau *load loss*

$$P_{LL} = P_{CU} + P_{OSL} \quad (2.2)$$

Sumber: McLyman, C. W. T. (2004). *Transformer and inductor design handbook*. Marcel Dekker.

Keterangan:

P_{LL} : total rugi tembaga atau *load loss*

P_{CU} : total rugi tembaga

P_{OSL} : *stray loss*

2.3.2 Impedansi *Short Circuit*

Tegangan impedansi adalah nilai tegangan yang dibutuhkan pada pengukuran *load loss* agar *rated current* dapat mengalir pada kumparan primer dimana kumparan sekunder dihubungsingkatkan, sementara kumparan yang primer beroperasi untuk mengalirkan *rated voltage* (Transformers Committee of the IEEE Power & Transformers Committee of the Energy Society, 2015). Nilai Impedansi transformator direpresentasikan sebagai nilai reaktansi induktif dan tahanan resistif (International Electrotechnical Commission, 2011). Nilai reaktansi induktif pada komponen *reactive* transformator diasosiasikan dengan *leakage flux* yang terjadi saat proses induksi antar belitan yang melalui *main gap* atau *insulation materials* dari pada inti besi transformator (Dawood et al., 2022). Sedangkan tahanan resistif/*Load loss* pada transformator adalah pengukuran rugi-rugi tahanan (resistif) pada belitan ketika terjadi beban penuh (International Electrotechnical Commission, 2011). Impedansi *short-circuit* memiliki nilai toleransi sebesar 10% sesuai tabel di bawah dan nilai minimum sesuai *rated power* (International Electrotechnical Commission, 2006).

Tabel 2.2

Toleransi impedansi

<i>Item</i>	<i>Tolerance</i>
1. <i>Measured short-circuit impedance for:</i>	

Item	Tolerance
- an auto-connected pair of winding, or - a specified second pair of separate windings in a multi-winding transformer	
a) principal tapping	±10% of the specified value
b) any other tapping of the pair	±10% of the design value for that tapping

Sumber: Power transformers. Part 1, General = Transformateurs de puissance. Partie 1, Généralités. (2011). International Electrotechnical Commission.

Tabel 2.3

Minimum values of short-circuit impedance

Short-circuit impedance at rated current	
Rated power kVA	Minimum short-circuit impedance %
25 ke 630	4,0
631 ke 1250	5,0
1251 ke 2500	6,0
2501 ke 6300	7,0
6301 ke 25000	8,0
25001 ke 40000	10,0
40001 ke 63000	11,0
63001 ke 100000	12,5
Above 100000	>12,5
<i>NOTE 1 Values for rated power greater than 100.000 kVA are generally subject to agreement between manufacturer and purchaser.</i> <i>NOTE 2 In the case of single-phase units connected to form a three-phase bank, the value of rated power applies to three-phase bank rating.</i>	

Sumber: Power transformers-Part 5: Ability to withstand short circuit. www.iec.ch/searchpub (2006). International Electrotechnical Commission.

$$Z = R + j(X_L - X_c) \quad (2.3)$$

$$X_L = \omega L \quad (2.4)$$

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (2.5)$$

Sumber: McLyman, C. W. T. (2004). *Transformer and inductor design handbook*. Marcel Dekker.

Keterangan:

Z : impedansi (Ω)

R : tahanan resistif (Ω)

X_L : reaktansi induktif (Ω)

X_c : reaktansi kapasitif (Ω)

ω : omega atau kecepatan sudut (rad/s)

L : induktor (H)

C : kapasitor (F)

2.3.3 Tahanan Resistif dan Reaktansi

Total rugi tembaga pada transformator disebabkan oleh tahanan resistif, reaktansi induktif maupun kapasitif. Tahanan resistif pada transformator disebabkan oleh panjang konduktor kawat pada belitan koil sehingga semakin panjang konduktor nilai tahanan yang menyebabkan rugi-rugi semakin besar (McLyman, 2004). Tahanan reaktansi induktif disebabkan adanya *leakage flux* dimana flux dimana nilai *flux* berbanding terbalik dengan jumlah belitan kumparan. Tahanan reaktansi kapasitif diabaikan karena nilainya yang kecil.

$$R = \rho \left(\frac{L}{A} \right) \quad (2.6)$$

Sumber: McLyman, C. W. T. (2004). *Transformer and inductor design handbook*. Marcel Dekker.

Keterangan:

R : tahanan konduktor

ρ : resistivitas bahan kawat

L : panjang kawat

A : luas penampang kawat

$$L_{coil} = \frac{\mu_r \mu_0 N^2 A}{l} = \frac{\mu_r \mu_0 N^2 \pi r^2}{l} \quad (2.7)$$

Sumber: McLyman, C. W. T. (2004). *Transformer and inductor design handbook*. Marcel Dekker.

Keterangan:

- L_{coil} : induktansi koil (H)
 μ_r : *relative permeability* inti besi
 μ_0 : *permeability of free space* $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)
 N : jumlah lilitan/belitan
 A : koil area (m²)
 r : koil radius (m)
 l : panjang vertikal/tinggi koil (m)

$$\Phi = \frac{V\sqrt{2}}{N_{turn} \times \omega} \quad (2.8)$$

$$\Phi = \frac{V}{4.44 \times N_{turn} \times f} \quad (2.9)$$

Sumber: McLyman, C. W. T. (2004). *Transformer and inductor design handbook*. Marcel Dekker.

Keterangan:

- Φ : *flux* magnet dalam weber
 V : tegangan konduktor
 N_{turn} : jumlah lilitan/belitan kumparan
 ω : $2\pi f$
 f : frekuensi dalam Hz

$$C = 0.0885 \left(\frac{K(N_{turn}-1)(MLT)(G)}{d} \right) \quad (2.10)$$

Sumber: McLyman, C. W. T. (2004). *Transformer and inductor design handbook*. Marcel Dekker.

Keterangan:

- K : *Dielectric Constant*
 MLT : *Mean Length Turn*
 N_{turn} : jumlah lilitan/belitan kumparan
 G : foil width, cm

d : layer insulation thickness, cm

Tabel 2.4

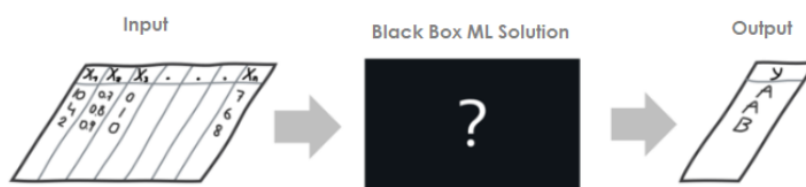
Dielektrik Konstan

Material	K
Kapton	3.2 – 3.5
Mylar	3 – 3.5
Kraft Paper	1.5 – 3.0
Fish Paper	1.5 – 3.0
Nomex	1.6 – 2.9

Sumber: McLyman, C. W. T. (2004). *Transformer and inductor design handbook*. Marcel Dekker.

2.4 Machine Learning

Machine learning adalah kumpulan metode yang dapat diterapkan untuk mendeteksi pola dalam data, dan menggunakan pola yang ditemukan untuk memprediksi data di masa depan, atau untuk melakukan pengambilan keputusan lain dalam situasi ketidakpastian secara otomatis (Murphy, 2012). Menurut Marsland (2015), *machine learning* dibagi menjadi tiga kategori: *supervised learning*, *unsupervised learning*, dan *reinforcement learning*. *Supervised learning* adalah pelatihan pada dataset dengan target/label yang disediakan dengan memprediksi target atau label dari sebuah variabel input. *Unsupervised learning* mencoba mengidentifikasi kesamaan antar *input* sehingga *input* tersebut mempunyai sesuatu yang sama atau umum untuk dikategorikan bersama, hal ini disebut *density estimation* (Marsland, 2015). *Reinforcement learning* adalah pendekatan di antara *supervised* dan *unsupervised learning*, dimana algoritma diberi tahu ketika jawaban yang diberikan salah, namun tidak diberi petunjuk tentang bagaimana cara memperbaikinya (Marsland, 2015).



Gambar 2.5 Block Diagram dari Model ML yang Disederhanakan

Sumber: Ajayi, O. (2023). *XAI for fault detection and classification in microgrids using a real-time simulation framework*.

2.4.1 Proses *Machine Learning*

1. Persiapan dan Koleksi Data

Data merupakan kumpulan objek dan atribut yang diatur dalam format yang terstruktur. Pada *machine learning* kuantitas data perlu disesuaikan karena semakin signifikan kuantitas data semakin baik asosiasi yang dapat dihasilkan untuk hubungan – hubungan yang mungkin terjadi antar data. Sebaliknya semakin sedikit kuantitas data akan mempengaruhi bagaimana *machine learning* dapat melakukan komputasi dengan tepat. Selain itu kemudahan dalam pengumpulan data perlu diperhatikan karena jumlah data untuk *machine learning* bisa mencapai ratusan hingga ribuan.

2. Seleksi Parameter

Seleksi parameter adalah proses identifikasi atribut atau parameter yang dapat berguna untuk menyelesaikan masalah. Pentingnya pemilihan parameter dilakukan dengan memperhatikan waktu dan juga pengurangan *noise* atau kemungkinan *outliner* pada data.

3. Pemilihan Algoritma

Pemilihan algoritma menyesuaikan dataset yang dimiliki serta kelebihan atau kekurangan dari algoritma yang akan digunakan untuk menyelesaikan permasalahan.

4. Parameter dan Model Seleksi

Parameter pada algoritma perlu disesuaikan untuk mendapatkan hasil komputasi yang baik. Parameter ini tergantung dengan algoritma yang digunakan, serta identifikasi pada kemungkinan yang dapat menyelesaikan masalah.

5. Pelatihan

Pelatihan adalah melakukan komputasional pada dataset yang digunakan untuk melatih model yang akan digunakan untuk memprediksi suatu nilai atau hubungan pada dataset.

6. Evaluasi

Aturan asosiasi atau pemodelan yang dibuat perlu dilakukan analisis dan uji guna menentukan keakuratan hasil pelatihan.

2.5 Interpretability

Interpretabilitas adalah sejauh mana manusia dapat memahami penyebab hasil prediksi atau sejauh mana manusia dapat secara konsisten memprediksi hasil model. Semakin mudah bagi seseorang untuk memahami mengapa keputusan atau prediksi tertentu telah dibuat berarti semakin tinggi interpretabilitas model *machine learning*. *Interpretability* biasa

disebut *explainability*. Interpretabilitas juga sebagai alat *debugging* yang berguna untuk mendeteksi bias dalam model *machine learning*.

2.6 Association Rule

Association rules adalah suatu metode untuk menemukan suatu aturan asosiasi yang memenuhi syarat nilai minimum support dan minimum *confidence* pada suatu *database*.

2.6.1 Support

Support adalah ukuran yang mempresentasikan jumlah itemset yang ditemukan dalam *database*. Untuk menghitung nilai *support* digunakan rumus seperti pada persamaan 2.11, berikut:

$$support(A) = \frac{\sum(A)}{\sum(itemset)} \quad (2.11)$$

Keterangan:

$\sum(A)$: Total kuantitas A

$\sum(itemset)$: Total keseluruhan itemset (A, B, C, D,)

2.6.2 Confidence

Confidence adalah ukuran yang digunakan untuk mengukur kekuatan keterikatan antara suatu itemset dengan itemset lainnya dalam *association rule* yang telah ditetapkan. Untuk menghitung nilai *confidence* diperlukan digunakan rumus seperti pada persamaan 2.12, berikut:

$$confidence(A \Rightarrow B) = \frac{count(A \cap B)}{count(itemset)} \quad (2.12)$$

2.6.3 Lift

Lift ratio adalah ukuran yang digunakan untuk mengukur kekuatan *association rules* yang didapati. Ukuran tersebut digunakan untuk mengetahui apakah aturan yang didapati valid atau tidak. Untuk menghitung nilai *lift ratio* digunakan rumus seperti pada persamaan 2.13, berikut:

$$Lift\ Ratio(A \Rightarrow B) = \frac{support(A)}{support(A) \cdot support(B)} \quad (2.13)$$

2.7 Algoritma *Equivalence Class Transformation* (ECLAT)

Equivalence Class Transformation (ECLAT) merupakan salah satu algoritma diantara algoritma yang digunakan untuk menemukan *itemset* yang sering muncul pada basis data. ECLAT melakukan pencarian secara *Depth First Search* (DFS) dengan urutan vertikal (Kaur & Grag, 2015). Jika dibandingkan dengan Apriori dan FP-growth, algoritma ECLAT merupakan yang paling efisien dan memerlukan waktu paling sedikit (X. Zhang et al., 2021). Algoritma *ECLAT* bekerja dengan memperhatikan *support value* dari setiap item. Kemudian *support value* tersebut dibandingkan dengan parameter *threshold*. Pembuatan itemset dibuat dari 1-itemset, 2-itemset kemudian dibandingkan dengan item yang lain untuk mendapatkan 3-itemset. Fungsi berulang ini terus dilakukan hingga tidak ditemukan itemset tersisa (X. Zhang et al., 2021).

ALGORITHM:

Input: $F_k = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$ // cluster of frequent k-itemsets.

Output: Frequent l-itemsets.

Bottom-Up (F_k) {

1. for all $I_i \in F_k$

2. $F_{k+1} = \emptyset$;

3. for all $I_j \in F_k, i < j$

4. $N = I_i \cup I_j$;

5. if $N.\text{sup} \geq \text{min_sup}$ then

6. $F_{k+1} = F_{k+1} \cup N$;

7. end

8. end

9. end

10. if $F_{k+1} \neq \emptyset$ then

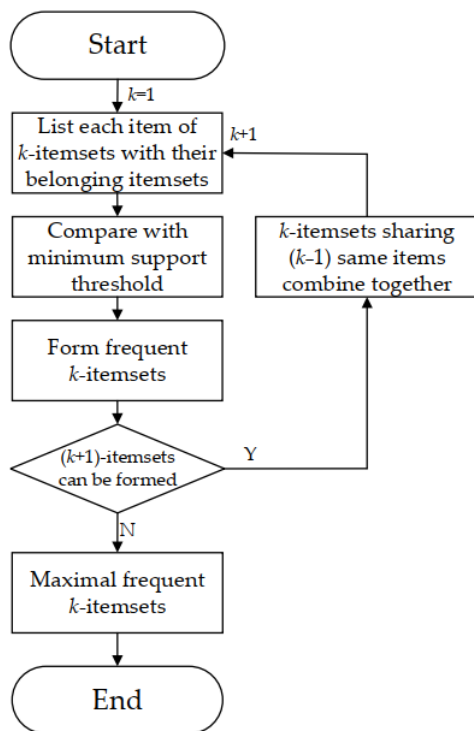
11. Bottom-Up (F_{k+1});

12. end

13. }

Gambar 2.6 Algoritma *ECLAT*

Sumber: Dehghani, M., Kamandi, A., Shabankhah, M., & Moeini, A. (2019). *Toward a distinguishing approach for improving the apriori algorithm*.



Gambar 2.7 Flow Chart ECLAT Algorithm

Sumber: Zhang, X., Tang, Y., Liu, Q., Liu, G., Ning, X., & Chen, J. (2021). *A fault analysis method based on association rule mining for distribution terminal unit*. Applied Sciences (Switzerland), 11(11). <https://doi.org/10.3390/app11115221>

2.8 Fault Diagnosis of Transformer using Association Rule Mining and Knowledge Base

Penggunaan algoritma asosiasi pada jurnal tentang *fault diagnosis of transformer*. Kegagalan dalam *power transformer* merupakan masalah yang kompleks. Pendekatan berbasis ARM (*Association Rule Mining*) digunakan algoritma Apriori untuk menghasilkan aturan, dan kemudian aturan tersebut disempurnakan oleh seorang ahli di bidangnya dan disimpan dalam basis pengetahuan. Untuk memvalidasi pendekatan digunakan metode *Three-Ratio* IEC untuk mendiagnosis dataset yang sama, sehingga perbandingan ini dapat menunjukkan kinerja dari metode ARM (T. Zhang et al., 2010). Ketika terdapat data baru dari transformator daya, maka aturan dalam basis data akan dicari dan dipasangkan untuk mendiagnosis kerusakan. Pendekatan menggunakan ARM mencapai akurasi yang lebih tinggi untuk setiap jenis kerusakan, terutama untuk diagnosis hipertermia dan *overheat*, mencapai 100% (T. Zhang et al., 2010).

Fault type	Number of Samples	Accuracy (%)	
		<i>Three-Ratio</i>	<i>The proposed approach</i>
Normal	33	81.8	90.9
Hyperthermia and superheating	10	80.0	100.0
High energy discharging	10	70.0	90.0
Low energy discharging	10	70.0	80.0
Medium temperature and superheating	10	80.0	80.0
Total	73	78.1	89.0

Gambar 2.8 Hasil Komparasi *Three-Ratio* & ARM

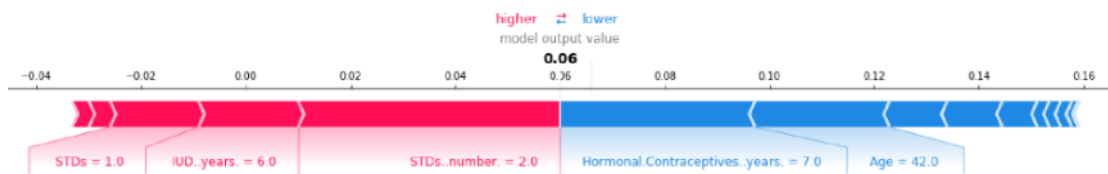
Sumber: Zhang, T., Lu, J., Zhang, G., & Ding, Q. (2010). *Fault diagnosis of transformer using association rule mining and knowledge base*.

2.9 Explainable AI

Explainable AI (XAI) adalah rangkaian *tools* dan *framework* yang dirancang untuk menginterpretasikan model *machine learning* (*supervised*) dalam mengambil keputusan. Model *machine learning* dianggap sebagai kotak hitam yang mustahil ditafsirkan. XAI membantu manusia dalam mengakses terhadap pengambilan keputusan yang mendasari *machine learning* dan memungkinkan untuk melakukan penyesuaian input parameter. XAI menerapkan teknik dan metode khusus untuk memastikan bahwa setiap keputusan diambil selama *machine learning* dapat dilacak dan dijelaskan (IBM, n.d.).

2.10 Algoritma *Shapley Additive exPlanations* (SHAP)

SHAP (*Shapley Additive exPlanations*) oleh Lundberg and Lee (2017) menjelaskan prediksi dari sebuah parameter x dengan menghitung kontribusi dari setiap parameter untuk prediksi nilai $f(x)$. SHAP didasarkan pada nilai *Shapley*. SHAP memiliki implementasi cepat untuk model berbasis pohon (Molnar, 2019). Prediksi dimulai dari *baseline* dimana garis dasar untuk nilai *Shapley* adalah rata-rata dari semua prediksi. Dalam plot, setiap nilai *Shapley* adalah panah yang mendorong untuk meningkatkan (nilai positif) atau menurunkan (nilai negatif) prediksi.



Gambar 2.9 Contoh Plot SHAP pada Dataset

Sumber: Molnar, C. (2019). *Interpretable machine learning a guide for making black box models explainable*. <http://leanpub.com/interpretable-machine-learning>

2.11 XAI for Energy dan Power System

Penggunaan *explainable AI* (XAI) pada bidang energi dan sistem tenaga pada sebuah jurnal. XAI digunakan untuk membantu para pakar dan pengguna listrik untuk memahami hasil keputusan oleh *machine learning*. XAI ini digunakan pada sektor pengelolaan energi yang optimal, aplikasi konsumsi energi dan pemantauan sistem tenaga seperti pada Gambar 2.10 (Machlev et al., 2022). Masing-masing sektor menggunakan *machine learning* yang beragam sesuai dengan kesesuaian pada masalah yang dihadapi dan algoritma *machine learning* yang dipakai juga digunakan pendekatan XAI yang cocok untuk *machine learning* tersebut (Machlev et al., 2022). Jurnal ini menyajikan banyak contoh dan peluang tentang bagaimana XAI dapat digunakan dalam setiap sektor energi dan sistem tenaga.

Building energy applications	AI model	XAI approach	Scope
Predicting long term cooling energy consumption in buildings	XGBoost	SHAP	Local
Predicting long term building energy performance	QLattice	Permutation feature importance	Local
Predicting energy usage models	–	Partial dependence plot, Surrogate model	Local
Predicting coefficient of performance of the cooling system	SVM, MLP, XGBoost, RF	LIME	Local
Performance forecast of irregular dew point cooler	Deep Neural Network	SHAP	Local
Short term forecasts of building energy consumption	Sequence to Sequence model	Attention mechanism & Feature importance	Local

Gambar 2.10 Rangkuman Pemanfaatan XAI

Sumber: Machlev, R., Heistrene, L., Perl, M., Levy, K. Y., Belikov, J., Mannor, S., & Levron, Y. (2022). *Explainable artificial intelligence (XAI) techniques for energy and power systems*:

review, challenges and opportunities. In Energy and AI (Vol. 9). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.egyai.2022.100169>