

Analisis Penurunan Tekanan Gas Sulfur Hexafluorida (Sf6) Pada Pemutus Tenaga 150 KV Siemens 3AQ1EG

Analysis of the pressure drop of sulfur hexafluoride (sf6) gas in a circuit breaker 150 KV Siemens 3AQ1EG

Rohman¹, TB. Utami Adi Subekhi², Amri Abdullah³, Agus Suprayitno⁴, Maulana Kukuh Prasetyo⁵
^{1,2,3,4,5} Program Studi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Wastukencana, Purwakarta

¹rohman@wastukencana.ac.id, ²tb@wastukencana.ac.id, ³amri@wastukencana.ac.id,

⁴agusprayitno@wastukencana.ac.id, ⁵maulanakukuh57@wastukencana.ac.id

Corresponding author: maulanakukuh57@wastukencana.ac.id

Abstrak. Perkembangan teknologi era sekarang sangat pesat serta berpengaruh pada peningkatan energi listrik yang menjadi kebutuhan utama bagi industri besar maupun rumah tangga. Salah satu peralatan penyaluran energi listrik pada sistem transmisi adalah PMT atau Pemutus Tenaga Tinggi. PMT ini merupakan peralatan mekanik yang dilengkapi dengan media pemadam busur api gas sulfur hexafluorida (SF6). Proses pemadaman busur api terjadi karena adanya gerakan kontak akibat kerja dari mekanik yang mengakibatkan gesekan kontak menimbulkan busur api. Penurunan tekanan gas SF6 ini sangat mempengaruhi kehandalan ketika beroperasi, karena proses pemadaman busur api tidak sempurna. Hal tersebut dipengaruhi oleh umur peralatan dan jumlah kerja Pemutus Tenaga ketika beroperasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tekanan gas SF6 yang sesuai dengan standar tekanan normal 6,4 bar suhu lingkungan 34°C dapat meminimalisir terjadinya *breakdown* peralatan karena mampu memadamkan busur api dengan kecepatan gas SF6 58 cm/s.kA, dengan jarak celah kontak 3,61224 cm, sedangkan PMT tidak dapat dioperasikan pada tekanan 5,2 bar suhu lingkungan 34°C karena kecepatan Gas SF6 82 cm/s.kA dengan jarak celah kontak 5,10696. Disimpulkan semakin tinggi tekanan berpengaruh terhadap kecepatan dan jarak saat pemadaman busur api. Diketahui beberapa faktor yang mempengaruhi penurunan tekanan Gas SF6 dengan metode FMEA berdasarkan nilai teringgi *Risk Priority Number* (RPN) sebesar 810.

Kata kunci: Busur api, *Breakdown*, Pemutus Tenaga, Tekanan gas SF6

Abstract. The development of technology in the current era is very rapid and has an impact on increasing electrical energy which is a major need for large industries and households. One of the electrical energy delivery equipment in the transmission system is a PMT or High Connection Breaker. This PMT is a mechanical equipment equipped with sulfur hexafluoride (SF6) gas arc extinguishing media. The process of extinguishing the arc occurs due to contact due to work from the movement that causes the contact to cause an arc. This decrease in SF6 gas pressure greatly affects reliability when operating, because the arc extinguishing process is not perfect. This is determined by the age of the equipment and the number of operating breakers. The results showed that SF6 gas which is in accordance with the standard normal pressure of 6.4 bar with an ambient temperature of 34°C can minimize the occurrence of equipment damage because it is able to approach arc pressure with SF6 gas velocity of 58 cm/s.kA, with a contact gap of 3.61224 cm, while the PMT cannot be operated at a pressure of 5.2 bar with an ambient temperature of 34°C because the speed of SF6 gas is 82 cm/s.kA with a contact gap of 5.10696. It is concluded that the higher the pressure affects the speed and distance when extinguishing the arc. several factors that affect the decrease in SF6 gas pressure using the FMEA method based on the highest value of the Risk Priority Number (RPN) of 810.

Keywords: fire arc, *Breakdown*, Voltage breaker, SF6. gas pressure

1. Pendahuluan

Peralatan penyaluran tenaga listrik khususnya di sistem penyaluran transmisi adalah Pemutus Tenaga (PMT). Berdasarkan IECV (*International Electrotechnical Vocabulary*) 441-14-20 disebutkan Pemutus Tenaga atau Pemutus Tenaga (PMT) merupakan peralatan saklar mekanik / *switching* mekanis yang mempunyai media penggerak seperti : Pegas, Hidrolik, dan Pneumatik yang berfungsi menggerakkan *rod* gerak yang dapat menutup, mengalirkan serta memutus arus tegangan beban dalam kondisi keadaan normal dengan kontak tetap. Serta mampu menutup, mengalirkan (dalam periode waktu tertentu) dan memutus arus beban dalam spesifik kondisi abnormal / gangguan seperti kondisi *short circuit* / hubung singkat. Pemutus Tenaga (PMT) dilengkapi dengan berbagai media pemadam busur api (SKDIR 0520, 2009).

Gas sulfur Hexafluorida (SF₆) merupakan salah satu media pemadam busur api pada Pemutus Tenaga (PMT) yang paling baik (Robecca et al., 2019). Gas sulfur hexafluorida (SF₆) juga sebagai media isolasi mempunyai kekuatan dielektrik lebih tinggi dibandingkan dengan udara maupun minyak, dan kekuatan dielektrik ini bertambah seiringnya dengan pertambahan tekanan gasnya. Sebagaimana diketahui gas SF₆ pada Pemutus Tenaga (PMT) berfungsi sebagai media pemadam busur api listrik saat terjadi pemutusan arus listrik (arus beban atau arus gangguan) dan sebagai isolasi antara bagian-bagian yang bertegangan (kontak tetap dengan kontak bergerak pada ruang pemutus) dalam PMT, juga sebagai isolasi antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan pada PMT. Gas SF₆ sendiri mempunyai karakteristik yang lebih baik dari jenis media pemutus lainnya (SKDIR 0520, 2009).

Penurunan tekanan gas sulfur hexafluorida (SF₆) akibat kebocoran dapat mengganggu pasokan tenaga listrik karena Pemutus Tenaga tidak dapat bekerja sesuai dengan fungsinya dan dapat terjadi *breakdown* pada peralatan yang mengganggu sistem kelistrikan tegangan tinggi bahkan sampai konsumen rumah tangga dan sektor industri besar maupun kecil. Maka dari itu perlu dilakukan analisis mencari potensi kegagalan faktor penyebab penurunan tekanan gas SF₆.

FMEA adalah suatu cara dimana suatu bagian suatu proses yang mungkin gagal memenuhi suatu spesifikasi, menciptakan cacat atau ketidaksesuaian dan dampaknya pada pelanggan bila mode kegagalan itu tidak dicegah atau dikoreksi (Gaspersz, 2002). Serta membandingkan dengan hasil data pengujian pemeliharaan yang dilakukan petugas pemeliharaan pada periode atau jadwal yang sesuai dengan standar pemeliharaan yang telah ditetapkan berdasarkan SK DIR PLN 520. Serta mengetahui pengaruhnya faktor dan potensi ketika terjadi penurunan gas SF₆ terhadap kinerja PMT dalam proses memutus maupun menghubungkan tegangan tinggi dan mencari nilai *Risk Priority Number* berdasarkan nilai *rating Severity, Occurance dan Detection*.

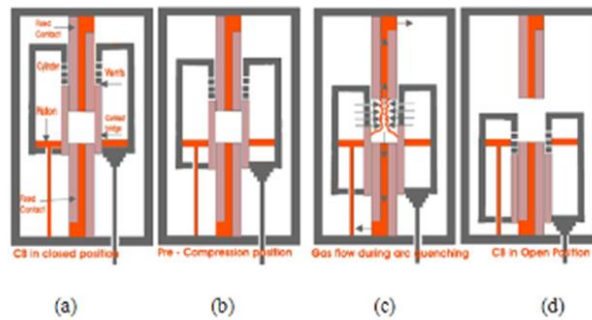
2. Kajian Pustaka

2.1 Pemutus Tenaga (PMT)

Pemutus Tegangan atau Pemutus Tenaga (PMT) merupakan peralatan yang terpasang di Gardu Induk yang berfungsi menutup, mengalirkan serta memutus arus beban dalam kondisi normal mengalirkan (dalam periode waktu tertentu) dan memutus arus beban dalam spesifik kondisi abnormal / gangguan seperti kondisi *short circuit* / hubung singkat dengan dilengkapi media pemadam atau peredam busur api dengan dilengkapi peralatan mekanik dalam menggerakkan kontak gerak. Fungsi utamanya adalah sebagai alat mekanik pembuka atau penutup suatu rangkaian listrik dalam kondisi berbeban, serta mampu membuka dan menutup saat terjadi arus gangguan (hubung singkat) pada jaringan atau peralatan lain (SKDIR 0520, 2009).

Klasifikasi Pemutus Tenaga dapat dibagi beberapa jenis, antara lain berdasarkan tegangan rating/nominal, jumlah mekanik penggerak, media isolasi, dan proses pemadaman busur api jenis gas SF₆ (Setiono, 2018). Syarat yang harus dipenuhi oleh PMT yaitu ditunjukkan pada Gambar 1 :

1. Mampu menyalurkan sistem tegangan tinggi secara terus menerus.
2. Mampu memutuskan serta menutup tegangan dalam keadaan berbeban maupun hubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan atau *Breakdown*.
3. Dapat memutuskan arus hubung singkat dengan kecepatan tinggi supaya arus hubung singkat tidak sampai merusak peralatan sistem serta dapat menutup,



Gambar 1. Prinsip Kerja PMT Gas SF6 (Harunanda et al., 2022).

2.2 Gas Sulfur Hexafluorida (SF6)

Gas SF6 pada Pemutus Tenaga (PMT) berfungsi sebagai media pemadam busur api listrik saat terjadi pemutusan arus listrik (arus beban atau arus gangguan) dan sebagai isolasi antara bagian – bagian yang bertegangan (kontak tetap dengan kontak bergerak pada ruang pemutus) dalam Pemutus Tenaga (PMT), juga sebagai isolasi antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan pada PMT. Saat ini gas SF6 banyak digunakan pada PMT atau GIS (*Gas Insulating Switchyard*) mulai dari tegangan 20 kV sampai dengan 500 kV karena gas SF6 mempunyai sifat / karakteristik yang lebih baik dari jenis media pemutus lainnya (Setiono, 2018).

Gas SF6 merupakan salah satu media isolasi yang baik, dapat berfungsi sebagai penyekat antara bagian bertegangan dengan *ground* hanya dengan jarak yang sangat pendek jika di dibandingkan dengan isolasi udara. Selain itu jika terjadi percikan api / busur api pada peralatan yang di isolasi gas SF6, maka gas tersebut berfungsi sebagai pemadam busur api, sehingga tidak terjadi kerusakan yang lebih parah pada peralatan tersebut (Setiono, 2018).

Menurut (Robecca et al., 2019) Gas SF6 memiliki Sifat :

1. Tidak Berwarna
2. Tidak Berbau
3. Tidak Beracun
4. Tidak Mudah Terbakar

Dengan konsentrasi SF6 melebihi 35% *volume* dalam udara itu berbahaya bagi manusia dan dapat berakibat mati lemas kekurangan oksigen. Pencemaran Gas SF6 adalah mengandung racun yang berakibat pada kulit, mata dan dapat merusak selaput lendir dan bila terpegang lama akan mengganggu pangkal tenggorokan dan gangguan paru-paru ,hati dan peredaran napas terhenti seperti pingsan (Setiono, 2018).

2.3 Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) dan Risk Priority Number (RPN)

FMEA merupakan sebuah metodologi yang digunakan untuk menganalisa serta menemukan semua kegagalan-kegagalan yang potensial terjadi pada suatu sistem, efek-efek dari kegagalan yang terjadi pada suatu sistem dilakukan penelitian secara mendalam tentang bagaimana cara untuk memperbaiki atau meminimalis kegagalan-kegagalan atau efek-efek pada sistem tersebut (perbaikan dan minimalis yang dilakukan biasanya berdasarkan pada ranking dari *Severity*, *Probability* dan *Detectability*).

FMEA adalah suatu cara dimana suatu bagian atau suatu proses yang mungkin gagal memenuhi suatu spesifikasi, menciptakan cacat atau ketidaksesuaian dan dampaknya pada pelanggan bila mode kegagalan itu tidak dicegah atau dikoreksi.

Metodologi *Risk Priority Number* (RPN) merupakan sebuah teknik untuk menganalisa resiko yang berhubungan dengan masalah-masalah yang potensial yang sudah diidentifikasi selama pembuatan FMEA (Gaspersz, 2002).

3. Metodologi Penelitian

3.1 Data Teknis Pemutus Tegangan (PMT)

Spesifikasi teknis pemutus tegangan (PMT) (Hamidy, 2016).

Merek	: Siemens
Tipe	: 3AQ1EG
Tahun Pembuatan	: 1997
Tahun Operasi	: 1998
Arus Hubung Singkat	: 40 KA
Arus Nominal	: 3150 A
Tekanan Normal 20°C	: 6,0 Bar
Alarm Low SF6	: 5,2 Bar
General Blok / Trip	: 5,0 Bar
Tekanan Hidrolik	: 253-375 Bar
Waktu Kerja Close	: 95 ± 5 ms
Waktu Kerja Open	: 36 ± 3 ms
Penempatan	: Bay Trafo 1 GI Pabuaran
Kapasitas Trafo	: 60 MVA 150/20 kV

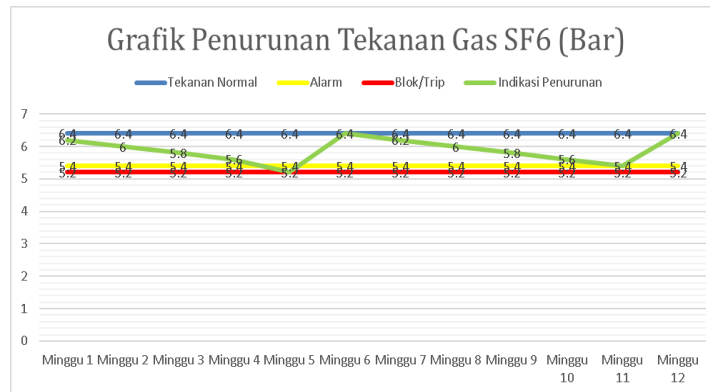
3.2 Perubahan Nilai Tekanan Gas SF6

Upaya yang sudah dilakukan oleh regu pemeliharaan PLN Unit purwakarta sebagai contoh tindakan preventif dan korektif ditunjukkan pada Tabel 3.1 :

Tabel 3.1 Upaya Penanganan dan Penambahan Tekanan Gas SF6 PMT Siemens 3AQ1EG

Tanggal Penangan	Deskripsi
04 September 2020	Pengisian GAS SF6 PMT TRAFO 1
01 Oktober 2020	Pengencangan Baut Chamber Bawah
01 Oktober 2020	Pengisian Gas SF6 PMT TRAFO 1
01 November 2020	Pengisian GAS SF6 PMT TRAFO 1
26 November 2020	Pengisian GAS SF6 PMT TRAFO 1
16 Desember 2020	Pengisian GAS SF6 PMT TRAFO 1
08 Januari 2021	Pengisian GAS SF6 PMT TRAFO 1
15 Januari 2021	Pengisian GAS SF6 PMT TRAFO 1

Berdasarkan hasil ceklis inspeksi level 1 *Condition Base Maintenance* (CBM IL1) yang dilakukan rutin setiap hari, masih terdapat penurunan tekanan gas SF6 dari nominal tekanan gas SF6 yang telah ditentukan sesuai dengan spesifikasi PMT. Sedangkan hasil yang diperoleh di lapangan ada indikasi penurunan gas dari tekanan 6,4 bar menjadi 6,2 bar hal ini menyebabkan timbul kecurigaan adanya kebocoran gas. Hal ini tindak lanjut dari petugas (Gardu Induk) GI untuk memantau atau memonitoring tekanan gas SF6 tiap hari pagi hari dan malam hari. Setelah di rekap dari catatan harian kemudian di rata rata menjadi data tekanan gas SF6 mingguan dan benar terjadi penurunan tekanan gas SF6 dari tiap minggunya ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Prinsip Kerja PMT Gas SF6

3.3 Menetapkan Rating Severity, Occurrence dan Detection

Dalam Metode *Risk Priority Number* (RPN) memerlukan analisa dari tim untuk menggunakan pengalaman masa lalu dan keputusan engineering untuk memberikan peringkat pada setiap potensial masalah, untuk mendapatkan penilaian dilakukan dengan cara mengumpulkan data hasil kegagalan serta menyebarkan kuesioner kepada pihak-pihak ahli (operator, teknisi) yang mengerti. Berikut adalah rating skala tersebut (Harunanda et al., 2022), ditunjukkan pada Tabel 3.2, 3.3 dan 3.4.

Tabel 3.2 Nilai *Rating Severity* (Tingkat Dampak Terjadi Pada Kegagalan) (Harunanda et al., 2022).

RANGKING	KRITERIA VERBAL
1	Negligible severity, kita tidak perlu memikirkan akibat dan berdampak pada kinerja produk pengguna akhir tidak memperhatikan kecacatan atau kegagalan
2	<i>Mid severity</i> , akibat yang ditimbulkan hanya bersifat ringan, pengguna akhir tidak merasakan perubahan kinerja
RANGKING	Kriteria Verbal
3	<i>Moderate severity</i> , pengguna akhir akan merasakan akibat penurunan kinerja atau penampilan namun masih berada dalam batas toleransi
4	
5	
6	
7	<i>High severity</i> , akibat akhir akan merasakan akibat buruk yang tidak dapat diterima berada diluar batas toleransi
8	
9	<i>Potential safety problem</i> , akibat yang ditimbulkan adalah sangat berbahaya dan bertentangan dengan hukum
10	

Catatan: tingkat *severity* berbeda-beda tiap produk, oleh karena itu pembuatan *rating* disesuaikan dengan proses dan berdasarkan pengalaman.

Ranking	Kriteria Verbal	Probabilitas Kegagalan
1	Tidak mungkin penyebab ini mengakibatkan kegagalan	1 dalam 1000000
2	Kegagalan akan jarang terjadi	1 dalam 200000
3		1 dalam 4000
4	Kegagalan agak mungkin terjadi	1 dalam 1000000
5		1 dalam 4000
6		1 dalam 80

Ranking	Kriteria Verbal	Probabilitas Kegagalan
7	Kegagalan adalah sangat mungkin terjadi	1 dalam 40
8		1 dalam 20
9	Hampir dapat dipastikan bahwa kegagalan mungkin terjadi	1 dalam 8
10		1 dalam 2

Catatan: probabilitas kegagalan berbeda-beda tiap produk, oleh karena itu pembuatan rating proses dengan berdasarkan pengalaman.

Tabel 3.3 Nilai *Rating Occurance* (Frekuensi Terjadinya Kegagalan) (Gaspersz, 2002).

Tabel 3.4 Nilai *Rating Detection* (Seberapa Jauh Suatu Kegagalan Dapat Diketahui) (Gaspersz, 2002).

Ranking	Kriteria Verbal	Probabilitas Kegagalan
1	Metode pencegahan atau deteksi sangat efektif, tidak ada kesempatan penyebab akan muncul lagi	1 dalam 1000000
2	Kemungkinan bahwa penyebab itu terjadi adalah sangat rendah	1 dalam 200000
3		1 dalam 4000
4	Kemungkinan penyebab bersifat moderate, metode deteksi masih memungkinkan kadang-kadang penyebab itu terjadi	1 dalam 1000000
5		1 dalam 4000

Ranking	Kriteria Verbal	Probabilitas Kegagalan
6		1 dalam 80
7	Kemungkinan penyebab itu masih tinggi, metode deteksi kurang efektif karena penyebab masih berulang lagi	1 dalam 40
8		1 dalam 20
9	Kemungkinan bahwa penyebab itu terjadi sangat tinggi, metode deteksi tidak efektif, penyebab akan selalu terjadi	1 dalam 8
10		1 dalam 2

Catatan: probabilitas kegagalan berbeda-beda tiap produk, oleh karena itu pembuatan rating proses berdasarkan pengalaman.

3.4 Pengaruh Tekanan Gas SF6 Terhadap Busur Api

Pengaruh tekanan terhadap gerak busur api telah diuji dengan rating nilai tekanan 100 kPa sampai dengan 510 kPa. Pengujian ini menunjukkan bahwa hubungan terbalik antara kecepatan aksial busur api dengan tekanan gas ditunjukkan pada Persamaan 1. Kecepatan arus normalisasi turun dengan rating 0,2 cm/s kPa pada jarak celah elektroda sejauh 6,6 cm. Pada gas SF6 bertekanan 1 atm kecepatan busur api yaitu sebesar 135 cm/s kA. Ditunjukkan pada Tabel 3.5 pengujian kecepatan busur api dengan celah konstan terhadap pengaruh tekanan (Yulistiawan, 2012).

$$\text{Kecepatan terhadap tekanan} = P_{\text{PMT}} - P_{\text{uji}} \quad (1)$$

Ditunjukkan Persamaan 2 bahwa kecepatan busur api 0,2 cm/s kA.

$$\text{Kecepatan faktor penurunan} = U \quad (2)$$

Ditunjukkan bahwa kecepatan beroperasi.

Kecepatan busur beroperasi = U_{PMT}

Tabel 3.5
Kecepatan Busur Terhadap Tekanan

Gas	Jarak Sela (cm)	Tekanan (kPa)	Tekanan (Bar)	Perhitungan (cm/s.kA)	Pengujian (cm/s.kA)
SF6	6,6	100	1	200	136
SF6	6,6	250	2,5	126	120
SF6	6,6	350	3,5	107	100
SF6	6,6	450	4,5	94	85
SF6	6,6	510	5,1	88	84

Persamaan 3 busur api ketika

api ketika (3) Perbandingan Api Terhadap

Sumber : (Siemens ,1998)

Dari tabel di atas menunjukkan bahwa semakin besarnya tekanan gas SF6 maka kecepatan busur api akan semakin kecil, ditunjukkan pada Persamaan 4 bahwa untuk menghentikan laju busur api selain dengan menaikkan tekanan gas SF6 pada PM, juga bisa dengan cara memperpanjang jarak antara celah kontak. Untuk mengetahui berapa jauh celah kontak yang dibutuhkan pada PMT bertekanan gas SF6 agar dapat menghentikan laju busur api. Berikut adalah tabel konversi untuk satuan tekanan ditunjukkan pada Tabel 3.6 :

Tabel 3.6 Konversi Satuan Tekanan

Item	Pa	Bar	Kg/cm ² at	atm	Lbf/in ² (psi)
1 Pa	1	10 ⁻⁵	10,2.10 ⁻⁶	9,86.10 ⁻³	145,05.10 ⁻⁶
1 bar	10 ⁵	1	1,02	0,987	14,505
1 Kg/cm ²	98100	0,981	1	0,968	14,224
1 atm	101,325	1,103	1,033	1	14,7
1 lbf/in ² (psi)	6892,8	0,06895	0,0703	0,06804	1

Sumber : Siemens (1998)

$$1 \text{ bar} = 100 \text{ kpa} = 0,1 \text{ MPa} = 1,02 \text{ kg/cm}^2 \text{ at}$$

$$\text{Arus pemutusan PMT} = \frac{I_{nom} \text{ PMT} = \frac{MVA \text{ Trafo}}{\sqrt{3} \times 20000}}{4}$$

Pada waktu pemutusan PMT (t_{data}) = 36 ms = 0,036 s, Ditunjukkan pada Persamaan 5 bahwa menghitung kecepatan busur api terhadap arus pemutusan

$$\text{Maka kecepatan busur api terhadap arus (} U_{arc} \text{)} = I_{nom} \text{ PMT} \times U_{PMT} \tag{5}$$

Ditunjukkan pada Persamaan 6 tentang perhitungan jarak celah kontak.

$$\text{Jarak celah kontak} = d = U_{arc} \times t \tag{6}$$

4 Hasil dan Pembahasan

4.4 Hasil Pengamatan Inspeksi

SF6 Pressure	Nilai tekanan	Suhu	Indikasi	Keterangan
Tekanan Nominal	6.4 Bar	34°C	-	Kondisi Normal
	6,2 Bar	34°C	-	Penurunan
	6,0 Bar	34°C	-	Penurunan
	5,8 Bar	34°C	-	Penurunan
	5,6 Bar	34°C	-	Penurunan
Stage 1	5.4 Bar	34°C	Alarm	Sinyal indikasi penurunan tekanan gas SF6 harus segera ditambah
Stage 2	5.2 Bar	34°C	Block/Trip	Terjadi penurunan tekanan gas SF6 sehingga tidak bisa dioperasikan (open/close)

Berdasarkan hasil pengamatan melalui pengecekan checklist harian terdapat ditemukan beberapa indikasi yaitu tekanan normal kemudian akibat penurunan gas SF6 dengan beberapa stage atau

tahapan sinyal yang menandakan tekanan turun. Tahapan indikasi yang ditemukan Stage 1 yang menandakan tekanan Low Pressure yang muncul pada panel kontrol, indikasi ini menandakan harus segera di tambah Gas SF6. Kemudian indikasi Stage 2 menandakan bahwa PMT (tidak bisa di operasikan. Berikut hasil tabel penurunan tekanan Gas SF6 ditunjukkan pada Tabel 4.1:

Tabel 4.1 Nilai Penurunan Tekanan Gas SF6

Berdasarkan hasil pengamatan inspeksi didapatkan penurunan setiap 0,2 Bar, penurunan ini dapat berpengaruh terhadap kecepatan dan jarak ketika proses pemadaman busur api ketika mekanik penggerak hidrolik bekerja ketika rod tetap dan rod gerak terpisah. Perawatan yang tidak diperhatikan dalam tiap-tiap komponen mesin harus diperbaiki, ketika naiknya suhu yang tinggi terjadi, maka proses kerja komponen kompresor akan bertambah untuk menstabilkan kinerja pada mesinnya dimana untuk menjaga efisiensi dan kualitas suhu (Suriaman et al., 2023).

4.2 Analisis Perhitungan Kecepatan dan Jarak Celah Kontak

Untuk mengetahui kecepatan busur api pada gas SF6 bertekanan dapat dilakukan dengan langkah berikut :

Berdasarkan data pada Tabel 5, kecepatan busur api pada tekanan 510 kPa adalah 84 cm/s kA. Sedangkan penurunan kecepatan busur api adalah 0,2 cm/s kA kPa. Sehingga :

4.2.1 Tekanan Normal : 640 kPa atau 6,4 Bar

$$P_{pmt} - P_{uji} = 640 - 510 = 130 \text{ kPa}$$

Dengan penurunan kecepatan busur api 0,2 cm/s kA kPa, maka kecepatan berkurang sampai :
 $U = 130 \text{ kPa} \times 0,2 \text{ cm/s kA kPa} = 26 \text{ cm/s kA}$.

Dari hasil data penurunan tingkat kecepatan busur api pada tekanan 640 kPa pada PMT Bay Trafo bermedia Gas SF6 sebesar :

$$U_{pmt} = 84 \text{ cm/s kA} - 26 \text{ cm/s kA} = 58 \text{ cm/s kA}$$

Jadi kecepatan busur api pada tekanan normal 640 kPa atau 6,4 Bar pada PMT Siemens 3AQ1EG yaitu sebesar 58 cm/s kA.

4.2.2 Tekanan Stage 1 Alarm : 540 kPa atau 5,4 Bar

$$P_{pmt} - P_{uji} = 540 - 510 = 30 \text{ kPa}$$

Dengan penurunan kecepatan busur api 0,2 cm/s kA kPa, maka kecepatan berkurang sampai :
 $U = 30 \text{ kPa} \times 0,2 \text{ cm/s kA kPa} = 6 \text{ cm/s kA}$.

Dari hasil data penurunan tingkat kecepatan busur api pada tekanan 540 kPa pada PMT Bay Trafo bermedia Gas SF6 sebesar :

$$U_{pmt} = 84 \text{ cm/s kA} - 6 \text{ cm/s kA} = 78 \text{ cm/s kA}$$

Jadi kecepatan busur api pada tekanan Stage 1 Alarm 540 kPa atau 5,4 Bar pada PMT Siemens 3AQ1EG yaitu sebesar 78 cm/s kA.

4.2.3 Tekanan Stage 2 Blok/Trip : 520 kPa atau 5,2 Bar

$$P_{pmt} - P_{uji} = 520 - 510 = 10 \text{ kPa}$$

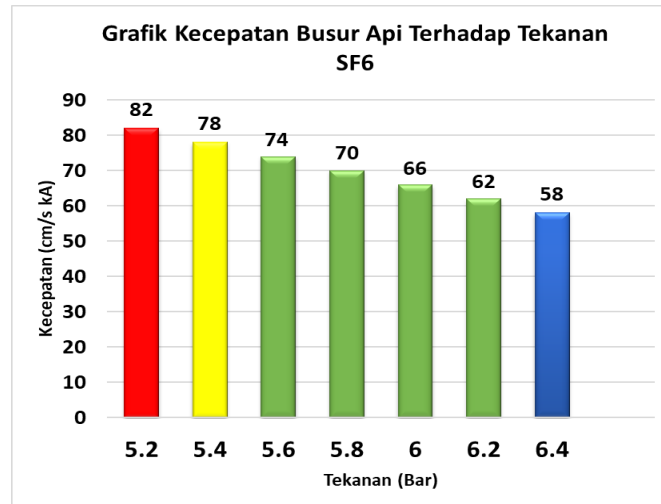
Dengan penurunan kecepatan busur api 0,2 cm/s kA kPa, maka kecepatan berkurang sampai :
 $U = 10 \text{ kPa} \times 0,2 \text{ cm/s kA kPa} = 2 \text{ cm/s kA}$.

Dari hasil data penurunan tingkat kecepatan busur api pada tekanan 520 kPa pada PMT Bay Trafo bermedia Gas SF6 sebesar :

$$U_{pmt} = 84 \text{ cm/s kA} - 2 \text{ cm/s kA} = 82 \text{ cm/s kA}$$

Jadi kecepatan busur api pada tekanan Stage 1 Alarm 540 kPa atau 5,4 Bar pada PMT Siemens 3AQ1EG yaitu sebesar 82 cm/s kA.

Ditunjukkan Gambar 4.1 grafik kecepatan terhadap tekanan gas SF6.



Gambar 4.1 Grafik Kecepatan Terhadap Tekanan Gas SF6.

4.2.4 Perhitungan Jarak Celah Terhadap Tekanan Stage 6,4 Bar

Untuk mengetahui berapa jauh celah kontak yang dibutuhkan dalam pemadaman busur api pada tekanan 6,4 Bar atau 640 kPa sebagai berikut :

$$\text{Arus pemutusan PMT} = I_{nom PMT} = \frac{MVA \text{ Trafo}}{\sqrt{3} \times 20000}$$

$$I_{nom PMT} = \frac{60.00 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 20000} = 1,73 \text{ kA}$$

$$\text{Waktu pemutusan PMT } (t_{data}) = 36 \text{ ms} = 0,036 \text{ s}$$

$$\text{Maka Kecepatan busur api } (U_{arc}) = I_{nom PMT} \times U_{PMT} = 1,73 \times 58 = 100,34 \text{ cm/s}$$

Jarak celah kontak

$$d = U_{arc} \times t = 100,34 \times 0,036 = 3,61224 \text{ cm}$$

4.2.5 Perhitungan Jarak Celah Terhadap Tekanan Stage 1 5,4 Bar.

Untuk mengetahui berapa jauh celah kontak yang dibutuhkan dalam pemadaman busur api pada tekanan 5,4 Bar atau 540 kPa sebagai berikut :

$$\text{Arus pemutusan PMT} = I_{nom PMT} = \frac{MVA \text{ Trafo}}{\sqrt{3} \times 20000}$$

$$I_{nom PMT} = \frac{60.00 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 20000} = 1,73 \text{ kA}$$

$$\text{Waktu pemutusan PMT } (t_{data}) = 36 \text{ ms} = 0,036 \text{ s}$$

$$\text{Maka Kecepatan busur api } (U_{arc}) = I_{nom PMT} \times U_{PMT}$$

$$= 1,73 \times 78 = 134,94 \text{ cm/s}$$

Jarak celah kontak

$$d = U_{arc} \times t = 134,94 \times 0,036 = 4,85784 \text{ cm}$$

4.2.6 Perhitungan Jarak Celah Terhadap Tekanan Stage 2 5,2 Bar

Untuk mengetahui berapa jauh celah kontak yang dibutuhkan dalam pemadaman busur api pada tekanan 5,2 Bar atau 520 kPa sebagai berikut :

$$\text{Arus pemutusan PMT} = I_{nom PMT} = \frac{MVA \text{ Trafo}}{\sqrt{3} \times 20000}$$

$$I_{nom PMT} = \frac{60.00 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 20000} = 1,73 \text{ kA}$$

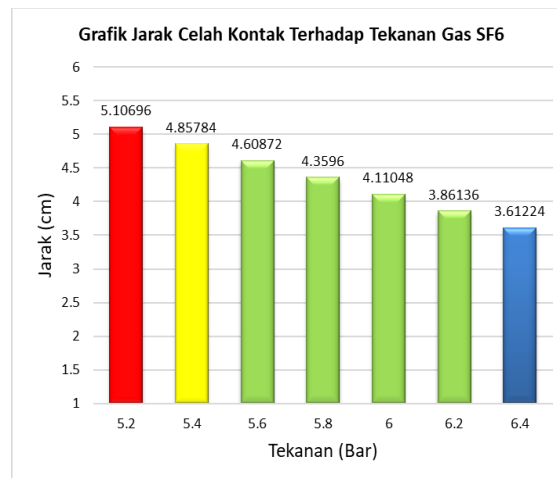
Waktu pemutusan PMT (t_{data}) = 36 ms = 0,036 s

Maka Kecepatan busur api (U_{arc}) = $I_{nomPMT} \times U_{PMT} = 1,73 \times 82 = 141,86 \text{ cm/s}$

Jarak celah kontak

$$d = U_{arc} \times t = 141,86 \times 0,036 = 5,10696 \text{ cm}$$

Ditunjukkan Gambar 4.2 grafik jarak celah kontak terhadap tekanan gas SF6.



Gambar 4.2 Grafik Jarak Celah Kontak Terhadap Tekanan Gas SF6.

Jadi pengaruh dari penurunan nilai tekanan dari gas SF6 sangat berpengaruh terhadap kecepatan busur api dan jarak celah kontak ketika beroperasi. Ditunjukkan Tabel 8 hasil analisis perhitungannya :

Tabel 4.2 Hasil Analisis Perhitungan Kecepatan dan Jarak Celah Busur Api.

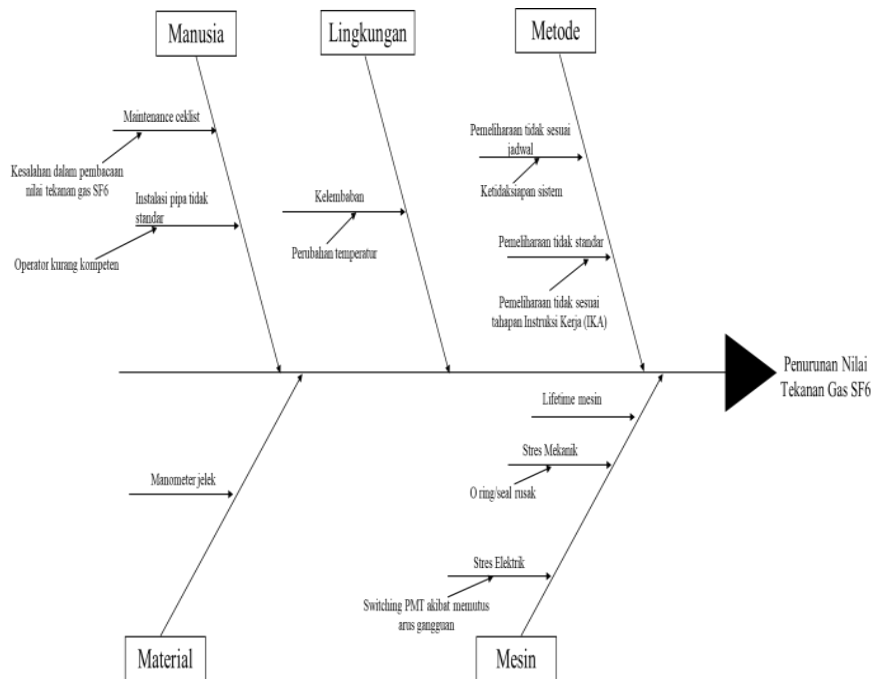
Gas	Jarak Celah (cm)	Tekanan (kPa)	Tekanan (Bar)	Perhitungan (cm/s.kA)
SF6	3,61224	640	6,4	58
SF6	3,86136	620	6,2	62
SF6	4,11048	600	6,0	66
SF6	4,3596	580	5,8	70
SF6	4,60872	560	5,6	74
SF6	4,85784	540	5,4	78
SF6	5,10696	520	5,2	82

4.3 Analisis Fishbone Diagram

Diagram fishbone adalah suatu pendekatan terstruktur yang memungkinkan dilakukan suatu analisis lebih terperinci dalam menemukan penyebab- penyebab suatu masalah, ketidaksesuaian, dan kesenjangan yang ada (Goeritno et al., 2014).

Berdasarkan hasil penelitian dan wawancara dengan pelaku operasional, maka diperoleh beberapa faktor penyebab yang terbagi diantaranya: Faktor Manusia, Metode, Material, Mesin, Lingkungan.

Faktor-faktor diatas dapat mengakibatkan terjadinya penurunan tekanan gas SF6 di pengaruhi oleh faktor mesin sehingga dapat di analisis dengan *fishbone diagram* untuk mengetahui rumusan masalah yang menjadi faktor penyebab penurunan tekanan gas SF6 pada PMT Siemens 3AQ1EG, rumusan penyebab-penyebab yang terbagi dalam beberapa faktor diatas dapat dilihat ditunjukkan Gambar 4.3 :



Gambar 4.3 Fishbone Diagram

4.4 Analisis Failure Mode and Effect Analysis

FMEA dibuat dengan tujuan menentukan prioritas perbaikan produk, untuk menghilangkan potensi kegagalan produk dan mengurangi peluang terjadinya potensi kegagalan produk yang kemudian diberikan usulan perbaikan produk untuk mengurangi dan mencegah mode kegagalan (Robecca et al., 2019). Berikut adalah hasil perhitungan dengan menggunakan *table* FMEA yang dihitung berdasarkan kategori-kategori diatas yaitu faktor manusia, material, metode, mesin dan lingkungan, dapat dilihat pada tabel dibawah ini dengan perhitungan nilai *Severity*, *Occurance*, *Detection* untuk mendapatkan nilai tertinggi yaitu RPN (*Risk Priority Number*). Dari *fishbone diagram* dapat disimpulkan bahwa faktor kegagalan disebabkan oleh faktor mesin hal ini juga dilihat dari lamanya waktu PMT itu beroperasi karena faktor usia peralatan tersebut berumur 20 Tahun lebih ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Formulir Analisis FMEA dan Nilai RPN

FMEA Formulir		System : Nilai Tekanan Gas SF6 Sub System : Mesin	Disiapkan Oleh : Maulana Kukuh P		Tanggal 14 Mei Tahun : 2022	RPN Value			
Equipment	Funcional	Funcional Failure	Funcional Mode	Funcional Effect	S	O	D	RP N	
1	Lifetime Mesin	Kehandalan sistem	Ketidaksiapan sistem	Performa PMT menurun	Penurunan nilai tekanan gas SF6 akibat kebocoran	10	6	8	480
2	Penurunan kualitas mekanik	Sebagai Penggerak	Permukaan O ring seal tidak rata	O ring seal rusak	Penurunan nilai tekanan gas SF6 yang signifikan akibat kebocoran yang besar dan dapat menyebabkan breakdown pada peralatan	9	10	9	810
3	Penurunan kualitas elektrik	Sebagai pemutus saat terjadi arus gangguan	Terjadi loncatan busur api/ <i>Arching</i>	Switching PMT akibat memutus arus gangguan	Penurunan nilai tekanan gas SF6 akibat kebocoran	8	10	4	320

4.5 Hasil Pegujian Kemurnian Gas SF6 (impurity test)

Pada pengujian kualitas gas SF6, parameter yang di uji yaitu kemurnian dari gas SF6 tersebut. Berdasarkan hasil pengujian kualitas gas SF6, dapat dilihat nilai purity atau kadar kemurniannya gas SF6. Tingkat keadaan normal kemurniannya ditentukan oleh beberapa standar seperti ASTM 2472 99,80 %, IEC 376 99,80 %, ASG 99 % dan standar SK DIR PLN 520 Tahun 2014 97%. Untuk standar ASTM 2472, IEC 376 dan ASG digunakan pada saat gas SF6 itu di isi baru tanpa adanya kebocoran atau pada saat komisioning PMT itu baru sebelum beroperasi (Setiono, 2018). Sedangkan untuk standart SK DIR PLN 520 Tahun 2014 ini standar baku yang ditetapkan untuk pengujiannya dijelaskan setiap 12 Tahun sekali atau bisa di lakukan pengujian jika diperlukan ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Kemurnian Gas SF6

Tanggal Pengujian	Hasil Pengujian	Standar Pengujian SK DIR PLN 520/2014	Keterangan
26 Desember 1997	99,91 %	97 %	Normal
10 Desember 2000	99,87 %	97 %	Normal
14 Desember 2005	99,10 %	97 %	Normal
05 Desember 2010	98,60 %	97 %	Normal
09 Desember 2015	97,10 %	97 %	Normal

11 Desember 2020	96,10 %	97 %	Dibawah Standar
-----------------------------	---------	------	--------------------

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dapat diketahui tekanan normal 6,4 bar, *stage* 1 5,4 bar, dan *stage* 2 5,2 bar dengan suhu temperatur 34°C, dari beberapa faktor penurunan tekanan gas SF6 berdasarkan hasil *fishbone diagram* dan FMEA nilai tertinggi karena faktor mesin dengan nilai *Risk Priority Number* 810 serta berdasarkan hasil pengujian adanya penurunan kualitas gas SF6 karena usia sudah lebih dari 20 tahun operasi, dari penurunan gas SF6 ini berpengaruh terhadap kecepatan busur api dan jarak celah kontak semakin lama kecepatan dan jarak celah semakin panjang dapat menyebabkan *breakdown* peralatan karena pengaruh busur api atau *arching*

REFERENSI

- Gaspersz. (2002). *Total Quality Management*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama.
- Goeritno, A., & Irawan Syaputra, B. (2014). *KELAYAKAN OPERASI PEMUTUS TENAGA (PMT) TEGANGAN EKSTRA TINGGI BERMEDIA GAS SULPHUR HEXAFLUORITE (SF6) BERDASARKAN KUALITAS GAS, KESEREMPAKAN TITIK TITIK KONTAK, DAN PARAMETER RESISTANS*. doi: <https://doi.org/10.32832/juteks.v1i1.740>
- Hamidy, F. (2016). PENDEKATAN ANALISIS FISHBONE UNTUK MENGUKUR KINERJA PROSES BISNIS INFORMASI E-KOPERASI. In *Jurnal TEKNOINFO* (Vol. 10, Issue 1). Retrieved from https://servicelink.pinnacol.com/pinnacol_docs/lp/
- Harunanda, P., & Fauziah, D. (2022). *Prosiding Seminar Nasional Energi, Telekomunikasi dan Otomasi SNETO 2021 Analisis Pengaruh Tekanan Gas SF6 terhadap Laju Busur Listrik pada PMT di Gardu Induk Cilegon PT PLN (Persero) Transmisi Jawa Bagian Barat*.
- Robecca, J., & Damayanti Pasaribu, M. V. (2019). METODE FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS UNTUK MENGURANGI CACAT PRODUK. *INAQUE: Journal of Industrial & Quality Engineering*, 7(2), 117–125. doi: 10.34010/iqe.v7i2.1857
- Setiono, I. (2018). *Gas SF 6 (Sulfur Hexa Fluorida) Sebagai Pemadam Busur Api Pada Pemutus Tenaga (PMT) Di Saluran Transmisi Tegangan Tinggi*. 13(12), 1–6. doi: <https://doi.org/10.14710/metana.v13i1.14676>
- Suriaman, I., Rajab, D. A., & Manulang, D. P. (2023). *Analisis Kinerja Mesin Chiller AKL5500AV Pada PT. XXX Performance Analysis of AKL5500AV Chiller Machine at PT. XXX*.

- SIEMENS. (1998). *Siemens AG EV SWH Schaltwerk Hochspanung Berlin. (1998). Manual Book PMT Siemens type 3AQ1EG. Germany . . BERLIN GERMANY: Siemens AG EV SWH Schaltwerk Hochspanung.*
- SKDIR0520. (2009). *Penyaluran Tenaga Listrik. (2009). Buku Petunjuk Batasan Operasi dan Pemeliharaan Peralatan. SKDIR 0520-2 DIR 2014. PMT. No Dokumen: 7-22/HARLUR-PST/2009. PT.PLN (Persero).*
- Yulistiawan. (2012). Analisis Penggunaan Gas SF6 pada Pemutus Tenaga PMT di Gardu Induk Cigereleng Bandung. *ELECTRANS Vol 11, No 2.*