

FRAMEWORK ASESMEN TEKNOLOGI DALAM PENGAMBILAN KEPUTUSAN STRATEGIS UTILITAS**Brian Bramantyo S.D.A. Harsono¹⁾, Putu Agus Aditya Pramana²⁾, Kevin Gausultan Hadith Mangukusumo³⁾, Handrea Bernardo Tambunan⁴⁾, Muhammad Ridwan⁵⁾, Istiqomah⁶⁾**^{1,2,3,4,5,6} PT PLN (Persero) Pusat Penelitian dan Pengembangan KetenagalistrikanEmail: brian.adiputro@pln.co.id¹⁾

Nomor Telp : +62 817 9881 162

Asal Negara: Indonesia

ABSTRAK

Perkembangan teknologi berperan penting dalam pengelolaan aset yang dimiliki oleh utilitas di Indonesia. Sebagai contoh, perkembangan teknologi insulator pasang luar untuk saluran transmisi udara bermanfaat dalam meningkatkan efisiensi proses pemeliharaan mengingat jumlah petugas pemeliharaan yang tidak sebanding dengan banyaknya aset saluran transmisi udara yang ada. Meskipun demikian, teknologi baru tersebut perlu melewati suatu proses asesmen sebelum diputuskan penerapannya pada aset yang ada. Pada makalah ini disajikan sebuah *framework* asesmen teknologi untuk teknologi insulator pasang luar saluran transmisi udara, yang terdiri dari asesmen dari sudut pandang teknis (sifat hydrophobic permukaan, profil sirip, *creepage distance*, dan bobot), finansial (*Net Present Value* dari setiap biaya yang muncul), dan risiko. Hasil evaluasi teknis menunjukkan bahwa teknologi insulator A memiliki unjuk kerja paling baik terhadap pengotor, sementara hasil evaluasi finansial menunjukkan bahwa teknologi insulator B memberikan keunggulan ekonomis paling tinggi untuk rentang waktu 30 tahun. Meskipun demikian, hasil evaluasi risiko menunjukkan bahwa potensi risiko dari insulator A dan insulator B lebih tinggi dari insulator eksisting karena keduanya belum pernah diimplementasikan pada saluran udara 500 kV di Indonesia. Oleh karena itu, perlu dilakukan *pilot project* dari kedua teknologi insulator tersebut dengan mempertimbangkan mitigasi risiko serta kajian *engineering* lebih lanjut sehingga diperoleh data unjuk kerja lapangan yang representatif.

Kata kunci: *framework*, teknologi, asesmen, saluran transmisi udara**ABSTRACT**

Improvement on technology is essential for asset management in several utilities in Indonesia. For example, development on outdoor insulator technology for overhead transmission line provides maintenance efficiency improvement to solve the miss-match between small number of maintenance team and large number of overhead transmission line asset. However, any new technology should be assessed by using a certain framework before being implemented on the existing network. This paper presents a technology assessment framework of outdoor insulator technology for overhead transmission line using three perspectives, namely technical (surface hydrophobicity, under rib profile, creepage distance, and weight), financial (net present value for any expenditure of the insulator during its lifetime), and risk. Technical evaluation showed that insulator A has the best performance toward pollution, while financial evaluation showed that insulator B has the highest economical benefit for 30-year time period. However, risk evaluation showed that risk potential of insulator A and insulator B are higher than existing insulator since both of them have never been installed 500 kV overhead transmission line in Indonesia. Therefore, pilot project for both technologies can be considered with respect of risk mitigation and comprehensive engineering review in order to obtain representative field performance data.

Keywords: *framework, technology, assessment, overhead transmission line***1. PENDAHULUAN**

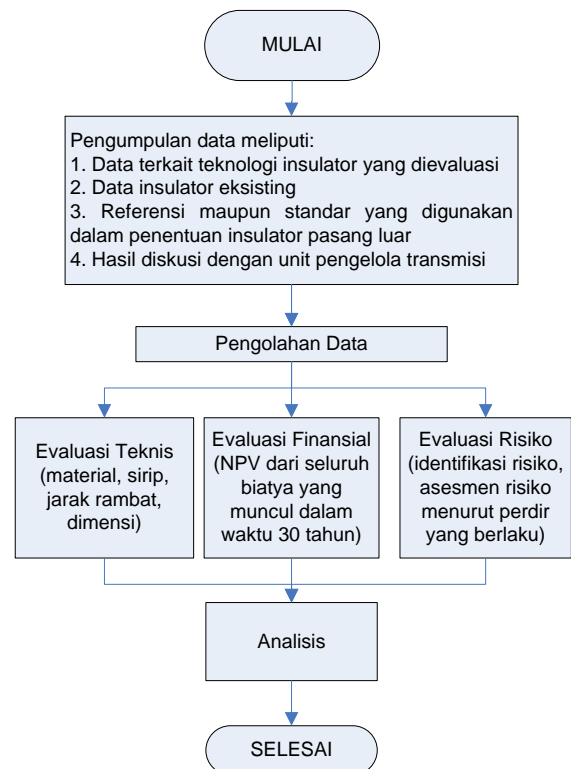
Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) memiliki peran penting untuk menyalurkan daya listrik dari pembangkit hingga ke jaringan distribusi. Penggunaan tegangan tinggi pada operasi saluran transmisi bertujuan untuk menurunkan nilai arus untuk aliran daya yang sama, sehingga besarnya nilai rugi-rugi I^2R menjadi lebih rendah. Oleh karena

tegangan operasinya yang tinggi, material insulator dari SUTT/SUTET memegang peranan penting untuk memisahkan bagian bertegangan (konduktor) dengan bumi (struktur tower). Berdasarkan hasil diskusi dengan unit pengelola transmisi di Jawa, faktor paparan pengotor dari lingkungan menjadi salah satu isu yang mempengaruhi unjuk kerja insulator SUTT/SUTET yang berada di dekat garis pantai, kawasan industri, maupun pembangkit listrik

tenaga uap. Tingginya paparan pengotor menyebabkan proses pembersihan harus dilakukan dengan frekuensi yang lebih sering untuk menjaga kehandalan dari proses transmisi daya yang dilakukan. Hal tersebut menjadi tantangan bagi pengelola unit transmisi mengingat jumlah SDM yang dimiliki tidak sebanding dengan jumlah ruas transmisi yang berada di daerah dengan tingkat pengotor berat hingga sangat berat. Salah satu teknologi yang berkembang untuk insulator pasang luar adalah insulator batang keramik (diberi nama “insulator A”) dan insulator berbahan polimer (diberi nama “insulator B”) yang diklaim memiliki unjuk kerja terhadap pengotor yang lebih baik dibandingkan dengan insulator eksisting. Untuk mengetahui *risk – cost – benefit* dari kedua teknologi insulator tersebut, maka diperlukan suatu *framework* asesmen sebagai masukan dalam pengambilan keputusan (van Wezel et al. 2018). Makalah ini menyajikan suatu *framework* atau *role model* asesmen dari suatu teknologi dengan 3 perspektif utama yang meliputi: evaluasi teknis, evaluasi finansial, dan evaluasi risiko.

2. METODE

Asesmen teknologi pada makalah ini menggunakan sejumlah tahapan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Studi literatur dilakukan untuk mengetahui pertimbangan dalam pemilihan teknologi insulator dari suatu saluran udara melalui standar maupun referensi lain yang terkait. Berdasarkan studi literatur tersebut, maka dapat dirumuskan data yang dibutuhkan untuk melakukan asesmen teknologi, contohnya: data teknis dan elektrik dari insulator, pengalaman terpasang di lapangan, serta data lain yang terkait. Pengumpulan data dapat dilakukan melalui studi literatur terkait maupun diskusi dengan pengelola unit transmisi dan narasumber yang relevan. Setelah data yang diperlukan diperoleh, maka dilakukan evaluasi menggunakan 3 perspektif: teknis, finansial, dan risiko. Evaluasi teknis dilakukan terhadap sejumlah parameter teknis seperti jenis material, desain sirip bawah, jarak rambat, dan dimensi. Evaluasi dari sisi finansial menggunakan pendekatan *net present value*/NPV dari setiap biaya yang muncul dari awal investasi hingga masa operasi selama 30 tahun. Evaluasi risiko dilakukan dengan melakukan identifikasi potensi risiko yang mungkin terjadi serta penilaian risiko berdasarkan *likelihood* serta dampak yang dihasilkan. Hasil evaluasi dari sudut pandang teknis, finansial, dan risiko kemudian dianalisis menjadi satu kesatuan sehingga dapat dirumuskan tindak lanjut dari teknologi yang dievaluasi.



Gambar 1. Framework asesmen teknologi yang digunakan

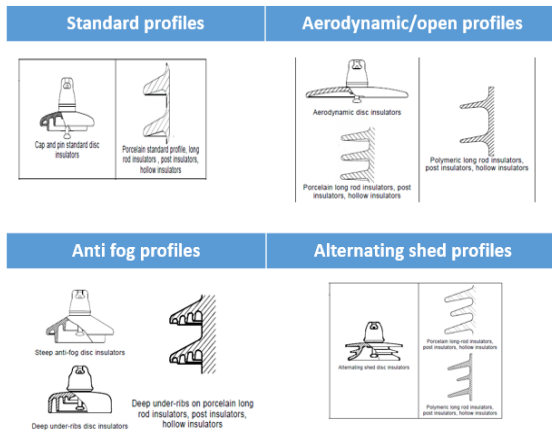
3. DASAR TEORI

3.1. Pemilihan Insulator

Menurut IEC (60815-1 2018), terdapat 3 pendekatan yang dapat dilakukan dalam pemilihan insulator yaitu: a) Pendekatan berdasarkan data/pengalaman lapangan, b) Pendekatan berdasarkan penentuan kelas pengotor dari lingkungan/SPS dan input data SUTT/SUTET yang kemudian dievaluasi melalui uji laboratorium untuk mendapatkan jenis insulator yang sesuai, dan c) Pendekatan berdasarkan penentuan kelas SPS dan input data SUTT/SUTET yang kemudian diputuskan secara langsung jenis insulator mana yang akan digunakan. Berdasarkan keterkaitannya dengan unjuk kerja insulator terhadap pengotor, terdapat 2 parameter yang memiliki pengaruh cukup dominan yaitu: jenis profil dari insulator dan *creepage distance*.

Profil dari suatu insulator merupakan satu kesatuan parameter geometri yang dapat memberikan pengaruh pada unjuk kerja insulator tersebut pada pengotor. Umumnya, insulator memiliki 4 jenis profil (60815-1 2018; Cigre 2008) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 dengan karakteristik: a) *Standard profile* untuk untuk daerah dengan laju pengotor ringan hingga sedang; b) *Aerodynamic/open profile* untuk daerah dengan pengotor yang dibawa oleh angin (contoh: gurun, kawasan industri, daerah di dekat pantai namun tidak berada tepat di garis pantai) dan memiliki periode musim kering yang lama, c) *Antifog profile* untuk daerah yang terpapar langsung

oleh pengotor berupa air garam, kabut garam, maupun pengotor lain yang bersifat terlarut dengan nilai *Non-Soluble Deposit Density* (NSDD) kecil; dan d) *Alternating shed* yang memiliki karakteristik yang sama dengan *aerodynamic/open profile* namun lebih handal untuk kondisi hujan deras maupun kondisi dingin/es.

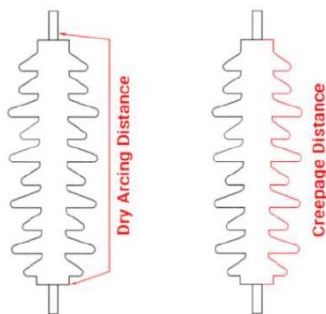


Gambar 2. Jenis *profile* insulator

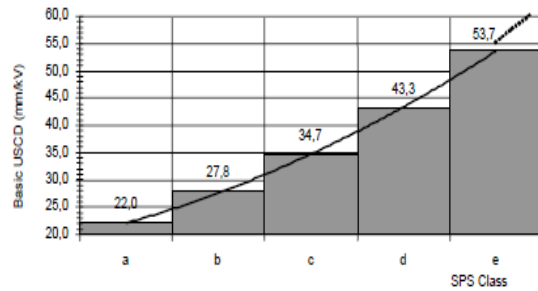
Setelah diketahui pilihan *profile* yang tersedia serta karakteristik dari lingkungan, maka dilakukan perhitungan kebutuhan *creepage distance* dari suatu insulator. *Creepage distance* merupakan jarak terpendek atau penjumlahan dari beberapa jarak terpendek di sepanjang insulasi dari suatu insulator di antara bagian yang terhubung dengan sisi bertegangan dan sisi pembumian. Nilai *creepage distance* minimum untuk insulator kaca maupun keramik dapat dinyatakan pada persamaan 1 (60815-1 2018).

$$Creepage\ distance = RUSCD \cdot Um \quad (1)$$

dimana *RUSCD*: *Reference Unified Specific Creepage Distance* dari setiap kelas pengotor (dalam mm/kV) dan *Um*: nilai tegangan maksimum yang ditanggung oleh insulator selama beroperasi (dalam kV). Kelas SPS dinyatakan dalam 5 kelompok, yaitu: pengotor sangat ringan (a), pengotor ringan (b), pengotor menengah (c), pengotor berat (d) dan pengotor sangat berat (e) (Gambar 3).



Gambar 3. *Creepage distance* dari suatu insulator



Gambar 4. Nilai RUSCD untuk masing-masing kelas SPS

3.2. Net Present Value/NPV dari Biaya yang Timbul selama Operasi

Menurut CIGRE, tujuan utama dari pengambilan keputusan manajemen adalah untuk meminimalkan nilai NPV dari biaya tahunan yang muncul dari suatu aset pada suatu rentang waktu tertentu (CIGRE WG 22 13 2000). Untuk mendapatkan hasil yang dapat dibandingkan, maka setiap biaya yang timbul di masa yang akan datang harus diubah menjadi nilai saat ini dengan menggunakan persamaan 2 dan persamaan 3.

$$NPV = \sum_{i=0}^{i=n} \frac{C_i}{(1+r)^i} \quad (2)$$

$$C_i = E_i + R_i \quad (3)$$

dimana *NPV*: *net present value* dari biaya tahunan yang muncul (dalam Rupiah), *n*: rentang observasi yang digunakan (dalam tahun), *r*: suku bunga (dalam %), *C_i*: biaya tahunan pada tahun ke-*i* (dalam Rupiah), *E_i*: biaya tahunan yang terencana pada tahun ke-*i* (dalam Rupiah), dan *R_i*: biaya *probabilistic* yang terkait dengan risiko kegagalan pada tahun ke-*i* (dalam Rupiah). Pada saluran transmisi udara, biaya tahunan yang muncul berkaitan dengan siklus hidup yang dari saluran transmisi udara tersebut yaitu, khususnya pada tahapan EPC serta tahapan operasi dan pemeliharaan. Biaya yang muncul dari setiap tahapan dapat dihitung maupun diasumsikan berdasarkan pengalaman historis dari suatu utilitas maupun berdasarkan referensi/acuan standar lain yang relevan dengan kondisi utilitas tersebut.

3.3. Asesmen Risiko

Menurut Perdir 0071.P/DIR/2021, risiko adalah efek dari ketidakpastian terhadap sasaran. Dalam melakukan asesmen pada risiko, terdapat tiga tahapan utama yaitu identifikasi risiko, analisis risiko, dan evaluasi risiko. Tahapan identifikasi risiko bertujuan untuk mendata risiko yang dapat menghalangi suatu perusahaan dalam mencapai tujuan yang sudah ditetapkan. Berdasarkan referensi, *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) adalah salah satu metode yang dapat digunakan dalam identifikasi risiko dari suatu teknologi (CIGRE WG 22 13 2000). Tahapan analisis risiko bertujuan untuk mengetahui penyebab dan dampak dari suatu risiko

sehingga diperoleh signifikansi dari risiko tersebut. Kriteria kemungkinan risiko (sangat kecil hingga sangat besar) dan kriteria dampak risiko (tidak signifikan hingga sangat signifikan) dapat mengacu pada Perdir 0071.P/DIR/2021. Tahapan evaluasi risiko bertujuan untuk menilai risiko terhadap selera risiko/*risk appetite* dari perusahaan dan menentukan apakah mitigasi lebih lanjut perlu untuk dilakukan (Dokic et al. 2016; Habegger et al. 2008).

4. EVALUASI TEKNIS, FINANSIAL, DAN RISIKO

Evaluasi dari setiap aspek memiliki kriteria dan penilaian berbeda-beda. Penilaian total yang diusulkan pada makalah menggunakan rumusan 4.

$$V_{AT} = \frac{(V_T + V_F + V_R)}{3} \quad (4)$$

V_{AT} : nilai asesmen dari suatu teknologi, V_T : nilai evaluasi dari perspektif teknis, V_F : nilai evaluasi dari perspektif finansial, dan V_R : nilai evaluasi dari perspektif risiko.

4.1. Evaluasi Teknis

Parameter yang digunakan sebagai perbandingan 2 teknologi insulator yang dievaluasi dapat dinyatakan pada Tabel 1. Evaluasi secara elektrik dan mekanis melalui pengujian laboratorium tidak dilakukan dalam evaluasi teknis ini, karena setiap teknologi insulator yang dibandingkan diasumsikan telah memenuhi referensi standar yang diacu oleh masing-masing insulator. Perbandingan dari masing-masing parameter untuk setiap teknologi insulator serta bobot penilaian dapat dinyatakan pada Tabel 2. Nilai evaluasi teknis diperoleh dengan penjumlahan dari setiap nilai dari parameter dibagi dengan jumlah parameter yang digunakan, dimana nilai total tertinggi menunjukkan bahwa insulator tersebut memiliki keunggulan dari sudut pandang teknis.

Tabel 1. Parameter dalam evaluasi teknis

No	Parameter	Keterangan	Kriteria
1	Sifat <i>hydrophobic</i> permukaan	Sudut kontak dari permukaan insulator	$<90^\circ = 0,33$ $90^\circ - 150^\circ = 0,67$ $>150^\circ = 1$
2	Profil dari sirip	Keefektifan sirip dari insulator	Kurang baik = 0,33 Normal = 0,67 Baik = 1
3	Creepage distance	Panjang total untuk 1 string	$<Cd_{min} = 0,33$ $Cd_{min} = 0,67$ $>Cd_{min} = 1$
4	Bobot	Bobot 1 segmen/keping dan bobot 1 unit utuh	$>W_{eksisting} = 0,33$ $=W_{eksisting} = 0,67$ $<W_{eksisting} = 1$

Mengacu pada IEC maupun CIGRE (60815-1 2018; Cigre 2008), pemilihan material insulator yang akan digunakan dipengaruhi oleh faktor lingkungan, kebutuhan dari peralatan tegangan tinggi di mana insulator tersebut akan terpasang, kebijakan dari sisi user, serta faktor finansial. Insulator jenis keramik sudah umum dan lama digunakan, sehingga karakteristiknya terhadap pengotor telah diketahui. Meskipun demikian, *creepage distance* dari insulator keramik berpotensi menjadi faktor yang menghambat jika ada batasan dimensi yang diharuskan dalam pembangunan SUTT/SUTET. Sementara itu, teknologi insulator polimer yang lebih baru daripada insulator jenis keramik memiliki keunggulan di sisi desain dan unjuk kerja terhadap pengotor. Meskipun demikian, perlu menjadi catatan bahwa terdapat kemungkinan perubahan sifat permukaan dari insulator polimer menjadi *hydrophilic* akibat paparan lingkungan yang ekstrim. Oleh karena material dari insulator A menyerupai insulator eksisting, maka sifat *hydrophobic* dari permukaan berada di bawah insulator B yang memiliki sudut kontak $90 - 150^\circ$. Hal tersebut akan berpengaruh pada proses pembersihan alami dari pengotor yang menempel pada permukaan insulator serta periode pembersihan yang diperlukan. Dengan mengasumsikan bahwa kondisi pemasangan insulator memiliki tingkat pengotor berat hingga sangat berat (berada di tepi pantai, di dekat PLTU, dan di dekat kawasan industri), maka hasil perbandingan efisiensi profil menurut referensi dari CIGRE (Cigre 2008) menunjukkan bahwa insulator A memiliki efisiensi sirip yang lebih baik dibandingkan insulator B maupun insulator eksisting. Sebagai catatan, evaluasi yang dilakukan menurut referensi CIGRE hanya mempertimbangkan jenis profil tanpa memperhatikan sifat *hydrophobic* dari material.

Berdasarkan data teknis, dapat diketahui bahwa insulator A memiliki *creepage distance* berkisar 47% lebih panjang daripada panjang *creepage distance* minimum (Cd_{min}) untuk daerah dengan kondisi pengotoran berat (13.749,6 mm). Di sisi lain, insulator B memberikan *creepage distance* berkisar 16% lebih panjang daripada insulator eksisting. Bobot total 1 string insulator A berkisar 38,7% lebih ringan dibandingkan insulator eksisting, sementara bobot 1 unit insulator B berkisar 95% lebih ringan dibandingkan insulator eksisting. Meskipun demikian, perlu menjadi catatan bahwa berat satu segmen insulator A berkisar berkisar 6,75 kali lebih berat dibandingkan satu keping insulator eksisting dan berkisar 4,07 kali lebih berat dibandingkan satu unit insulator B.

Berdasarkan kriteria yang telah dibuat pada Tabel 1, maka dapat diketahui bahwa insulator B memiliki penilaian teknis yang lebih baik dibandingkan insulator eksisting dan insulator A.

Tabel 2. Hasil evaluasi teknis

No	Parameter	Sifat <i>hydrophobic</i> permukaan	Profil dari sirip	Creepage distance (untuk 500 kV)	Bobot	Total nilai dari setiap parameter	Nilai evaluasi teknis (V _T)
1	Insulator eksisting	90 – 150°	Normal (vertical) Kurang baik (horizontal)	17.325 mm	384 kg	3	0,75
2	Insulator A	90 – 150°	Baik	20.310 mm	243 kg	3,67	0,9167
3	Insulator B	>150°	Baik	15.985 mm	19,9 kg	3,33	1

4.2. Evaluasi Finansial

Evaluasi finansial dari insulator A dan insulator B dilakukan melalui pendekatan NPV dari biaya tahunan yang muncul dengan sejumlah asumsi umum yang ditetapkan di awal. Terdapat 2 parameter yang digunakan dalam evaluasi finansial seperti yang dinyatakan pada Tabel 3. Penilaian dilakukan melalui metode perbandingan terhadap NPV insulator eksisting; apabila NPV nya lebih rendah maka nilainya adalah 1 sementara apabila NPV lebih tinggi maka nilainya adalah 0,33.

Tabel 3. Parameter dalam evaluasi finansial

No	Parameter	Keterangan	Kriteria
1	Biaya akuisisi	Biaya investasi awal, biaya transportasi, dan biaya pemasangan	> NPV insulator eksisting = 0,33
2	Biaya Operation dan Maintenance	Biaya pemeliharaan, biaya penggantian setelah lifetime, biaya penggantian saat terjadi gangguan, <i>failure cost</i>	= NPV insulator eksisting = 0,67 < NPV insulator eksisting = 1

Skenario yang digunakan dalam proses evaluasi ini hanya meliputi penggantian insulator dari 1 tower SUTET 500 kV sirkit ganda eksisting. Biaya investasi awal dari SUTET (contohnya: biaya pembebasan lahan, biaya pembangunan tower, biaya pembelian dan pemasangan konduktor, serta biaya aksesoris lainnya) tidak dimasukkan di dalam evaluasi ini. Diasumsikan bahwa ketiga insulator yang digunakan dalam evaluasi finansial memiliki tingkat ketersediaan di pasaran yang relatif sama dan seluruh insulator kompatibel dengan desain SUTET 500 kV eksisting. Span waktu yang digunakan adalah 30 tahun. Acuan suku bunga yang digunakan dalam perhitungan NPV adalah sebesar 3,5%. Harga rupiah jual listrik yang digunakan dalam perhitungan *energy not served/ENS* adalah Rp 1444,70/kWh. Pengolahan insulator setelah usia pakainya habis tidak dimasukkan dalam perhitungan ini (biaya disposal serta residual value diabaikan). Sejumlah referensi yang relevan juga digunakan untuk asumsi spesifik

yang digunakan dalam biaya investasi awal dan biaya O&M (Alhajri 2019; Ran et al. 2019; Zhang et al. 2019). Hasil perbandingan NPV dari 2 teknologi insulator terhadap insulator eksisting ditunjukkan pada Tabel 4, dimana biaya yang muncul dari 2 teknologi insulator dinormalkan terhadap biaya dari teknologi insulator eksisting. Berdasarkan Tabel 4, dapat diketahui bahwa insulator B memiliki nilai asesmen finansial yang lebih tinggi dibandingkan dengan insulator eksisting dan insulator teknologi A.

Tabel 4. Hasil evaluasi finansial

	Biaya akuisisi	Biaya O&M	Total NPV 30 tahun	Nilai evaluasi finansial (V _F)
Insulator eksisting	1,00	1,00	1,00	0,67
Insulator A	0,88	0,87	0,88	1
Insulator B	0,28	0,81	0,58	1

4.3. Evaluasi Risiko

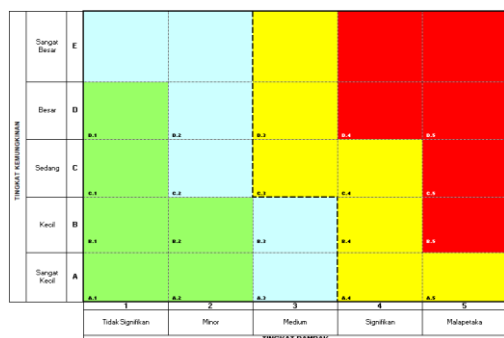
Evaluasi risiko dilakukan dengan melakukan asesmen risiko, sehingga dapat diperoleh *key risk indicator* (KRI) yang muncul selama penggunaan teknologi insulator. Oleh karena kedua teknologi merupakan teknologi insulator pasang luar yang sama dengan insulator eksisting, maka KRI yang muncul mirip. Penilaian yang digunakan dalam evaluasi risiko adalah total nilai KRI dari masing-masing teknologi insulator dibagi dengan jumlah KRI yang ada (Tabel 5). Semakin tinggi nilai yang diperoleh, maka suatu teknologi memiliki penilaian risiko yang lebih baik.

Tabel 5. Parameter dalam evaluasi risiko

No	Parameter	Nilai
1	KRI berada pada selera risiko rendah	1
2	KRI berada pada selera risiko moderat	0,75
3	KRI berada pada selera risiko tinggi	0,5
4	KRI berada pada selera sangat tinggi	0,25

Menurut referensi (Ash and C.L 2017; Category, Lectures, and Guide 2021; Vosloo, Macey,

and De Turreil 2018), *Failure Mode* dari insulator jenis keramik meliputi a) korosi pada Pin untuk daerah dengan kontaminasi tinggi, b) *external flashover* akibat polusi sehingga *power arc* yang mengikuti flashover dapat merusak lapisan glaze, c) internal puncture karena proses fabrikasi, d) pemisahan mekanis/*decapping* dari metal cap terhadap badan keramik, e) *partial break of dielectric shell*, dan f) *radial cracking* karena *cement growth* saat penggunaan semen Portland yang berlebihan. Menurut SKDIR 520, FMEA dari insulator keramik meliputi a) degradasi *creepage distance* akibat insulator pecah, gompal, degradasi sifat *hydrophobic* permukaan, benda asing menempel pada insulator, maupun *puncture*, dan b) penurunan nilai BIL insulator karena penurunan *arc distance*, insulator pecah, benda asing menempel, maupun *puncture*. Menurut referensi (Gorur 2011), terdapat sejumlah risiko kegagalan dari insulator pasang luar keramik meliputi a) *external flashover* karena polusi maupun sambaran petir, b) *mechanical separation/decapping* yang terjadi karena proses aging yang menyebabkan *puncture*, c) *internal puncture* karena *void* dan *micro crack* saat proses fabrikasi, d) *partial breakage* karena vandalisme maupun proses handling yang buruk, dan e) *radial cracking*. Apabila potensi risiko tersebut diselaraskan dengan hasil diskusi dengan unit pengelola transmisi, maka dapat diperoleh 5 *key risk indicator* (KRI) yaitu: 1) insulator mengalami kerusakan saat proses EPC, 2) insulator mengalami *infant failure*, 3) insulator mengalami kegagalan elektrik, 4) insulator mengalami kegagalan mekanis, dan 5) insulator mengalami kerusakan saat proses pembersihan. Evaluasi terhadap tingkat dampak (tidak signifikan hingga malapetaka) dan tingkat kemungkinan (sangat kecil hingga sangat besar) dilakukan berdasarkan hasil diskusi dengan pengelola aset transmisi serta studi literatur yang terkait, sehingga dapat dilakukan pemetaan selera risiko dari masing-masing KRI seperti yang dinyatakan pada Gambar xx. Batas selera risiko yang dapat diterima perusahaan ada rendah (warna hijau) dan biru (moderat), sementara selera risiko tinggi (kuning) dan sangat tinggi (merah) memerlukan mitigasi lebih lanjut.



Gambar 5. Peta risiko yang digunakan PLN

Tabel 6 menunjukkan bahwa insulator eksisting memiliki nilai asesmen risiko yang lebih tinggi daripada insulator A dan insulator B.

Tabel 6. Perbandingan KRI

Jenis	KRI					Nilai evaluasi risiko (V_R)
	1	2	3	4	5	
Insulator eksisting	Rendah	Moderat	Sangat tinggi	Tinggi	Moderat	0,65
Insulator A	Rendah	Tinggi	Sangat tinggi	Sangat tinggi	Moderat	0,55
Insulator B	Rendah	Tinggi	Tinggi	Sangat tinggi	Moderat	0,6

5. DISKUSI

Berdasarkan sudut pandang material yang digunakan, insulator A memiliki karakteristik *hydrophobic* permukaan yang mirip dengan insulator eksisting namun tidak sebaik insulator B. Sifat *hydrophobic* tersebut mempengaruhi unjuk kerja insulator terhadap pengotor (Watanabe 2009), khususnya terkait dengan sifat *self-cleaning* pada saat terjadi hujan. Meskipun demikian, perlu menjadi catatan bahwa sifat *hydrophobic* dari insulator polimer memiliki peluang untuk mengalami penurunan hingga menjadi *hydrophilic* akibat penuaan maupun paparan stres lingkungan yang tinggi. Meskipun insulator A dan insulator eksisting menggunakan jenis material insulasi yang sama, keduanya memiliki profil sirip bagian bawah yang berbeda. Jenis profil *alternating shed* pada insulator A mirip dengan profil insulator B, dimana keduanya memiliki keunggulan ketika dipasang pada area dengan tingkat pengotor berat hingga sangat berat (seperti direct coastal, liquid industrial, dan particulate industrial) dibandingkan dengan insulator eksisting (Khatoun, Khan, and Singh 2017; Krystian Leonard Chrzan 2008; Seifert, Petrusch, and Janssen 2007; Thanasaksiri n.d.). Apabila menggunakan referensi panjang 1 string dari insulator eksisting, maka dapat diketahui bahwa insulator A memiliki *creepage distance* yang lebih panjang daripada insulator B maupun insulator eksisting. Apabila digabungkan antara sifat *hydrophobic* permukaan, jenis profil sirip yang digunakan, serta panjang *creepage distance*, insulator A dan insulator B memiliki performa terhadap pengotor yang lebih baik dibandingkan dengan insulator eksisting. Meskipun demikian, kajian engineering lebih lanjut diperlukan untuk mengetahui kompatibilitas insulator A dan insulator B dengan tower SUTET 500 kV eksisting. Selain itu, perbedaan berat serta dimensi dari insulator A dan B dapat mempengaruhi workability saat proses penggantian insulator eksisting pada SUTET 500 kV yang berada di daerah dengan medan yang sulit.

Berdasarkan Tabel 4, besarnya nilai NPV untuk insulator A berkisar 12% lebih rendah dibandingkan insulator eksisting. Hal tersebut dipengaruhi oleh harga investasi awal insulator A

yang berkisar 12% lebih rendah dibandingkan insulator keramik, sehingga semua komponen biaya pada fase hidup insulator A yang melibatkan pembelian/investasi awal akan menjadi lebih rendah dibandingkan dengan insulator eksisting. Apabila dibandingkan dengan insulator B, total NPV dari insulator A berkisar 30% lebih tinggi. Hal tersebut disebabkan karena harga investasi awal dari insulator B berkisar 60% dari harga investasi awal insulator A. Meskipun insulator B tidak memerlukan pembersihan permukaan seperti insulator eksisting, namun total biaya penggantian untuk periode 30 tahun menjadi lebih tinggi dibandingkan insulator A dan insulator eksisting karena asumsi lifetime nya yang lebih pendek. Berdasarkan hasil evaluasi NPV, kedua insulator A dan insulator B memberikan keunggulan dibandingkan insulator eksisting.

Berdasarkan evaluasi risiko, dapat diketahui bahwa dua dari lima KRI tersebut masuk dalam kategori risiko yang sangat tinggi, yaitu kegagalan insulator secara elektrik dan kegagalan insulator secara mekanis oleh karena insulator A dan insulator B belum pernah dipasang pada saluran transmisi udara *backbone* 500 kV. Peluang kegagalan secara elektrik dapat dipengaruhi oleh adanya kejadian kenaikan tegangan yang melebihi *basic impulse insulation level* (BIL) dari insulator maupun adanya penurunan nilai BIL dari insulator (karena insulator pecah, insulator tertempel benda asing, terdapat deposit pengotor, hingga terjadi penurunan sifat hydrophobic permukaan). Peluang kegagalan secara mekanis umumnya disebabkan karena korosi serta terjadinya vandalisme, dimana vandalisme pada satu segmen insulator A maupun satu unit insulator B dapat berpotensi menyebabkan 1 string insulator terputus (Vosloo et al. 2018). Berdasarkan rumusan 4, dapat diketahui bahwa insulator teknologi B memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan teknologi insulator eksisting dan insulator A (Tabel 5). Meskipun demikian, perlu menjadi catatan bahwa teknologi A dan teknologi B belum pernah digunakan pada jaringan 500 kV sehingga PLN selaku utilitas ketenagalistrikan belum memiliki pengalaman operasional terhadap teknologi tersebut.

Tabel 7. Penilaian asesmen teknologi

Jenis	Nilai
Insulator eksisting	0,69
Insulator A	0,82
Insulator B	0,87

6. KESIMPULAN

Usulan *framework* atau *role model* dari asesmen teknologi menggunakan pendekatan sudut pandang teknis, finansial, dan risiko telah disajikan dalam makalah ini. Berdasarkan hasil asesmen, insulator B memiliki penilaian total yang lebih tinggi dibandingkan dengan insulator A dan insulator eksisting. Oleh karena teknologi insulator B tersebut

belum pernah dipasang pada saluran transmisi udara 500 kV dengan kondisi lingkungan seperti Indonesia, maka dapat dipertimbangkan untuk dilakukan pilot project dengan mempertimbangkan mitigasi risikonya serta kajian engineering yang lebih lanjut dapat dilakukan sehingga dapat diperoleh data unjuk kerja lapangan yang representatif.

DAFTAR PUSTAKA

- 60815-1, IEC. 2018. "Selection and Dimensioning of High-Voltage Insulators Intended for Use in Polluted Conditions – Part 1: Definitions, Information and General Principles." *International Electrotechnical Commission* 1–2.
- Alhajri, M. F. 2019. "Life Expectancy and Future Performance of SiR and EPDM Nonceramic Insulators Through FTIR Spectroscopy and Analytical Methods." *2018 IEEE Conference on Technologies for Sustainability, SusTech 2018* (3):38–45. doi: 10.1109/SusTech.2018.8671373.
- Ash, Mr. Prasanta, and Dr. Kappagomtula C.L. 2017. "Enhancing the Performance Consistency of Porcelain Insulators by Understanding Failure Modes: Case Study Approach." *Ijireeice* 5(2):1–14. doi: 10.17148/ijireeice.2017.5201.
- Category, Articles B. Y., Online Lectures, and Buyers Guide. 2021. "Overview of Failure Modes of Porcelain , Toughened Glass & Composite Insulators."
- Cigre. 2008. "Outdoor Insulation in Polluted Conditions: Guidelines for Selection and Dimensioning. Part 1: General Principles and the AC Case." *Tb 361* (June):58.
- CIGRE WG 22 13. 2000. "CIGRE Technical Brochure 175 - Management of Existing Transmission Lines." (December).
- Dokic, Tatjana, Payman Dehghanian, Po Chen Chen, Mladen Kezunovic, Zenon Medina-Cetina, Jelena Stojanovic, and Zoran Obradovic. 2016. "Risk Assessment of a Transmission Line Insulation Breakdown Due to Lightning and Severe Weather." *Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences* 2016-March:2488–97. doi: 10.1109/HICSS.2016.311.
- Gorur, Ravi S. 2011. "Failure Modes of Porcelain and Toughened Glass Suspension Insulators." *2011 Electrical Insulation Conference, EIC 2011* (June):221–25. doi: 10.1109/EIC.2011.5996150.
- Habegger, Beat, Andreas Wenger, Victor Mauer, and Myriam Dunn Cavelty. 2008. *International Handbook on Risk Analysis and Management: Professional Experiences*.
- Khatoun, Shabana, Asfar Ali Khan, and Sakshi Singh. 2017. "A Review of the Flashover Performance of High Voltage Insulators

- Constructed with Modern Insulating Materials.” *Transactions on Electrical and Electronic Materials* 18(5):246–49. doi: 10.4313/TEEM.2017.18.5.246.
- Krystian Leonard Chrzan. 2008. “Influence of Profile on the Pollution Performance of Ceramic Longrod Insulators.” *Ukrainian Journal Technicna Elektrodynamika*, part 1(2):113–16.
- Ran, Chen, Zhang Lingle, Yang Dong, Zhou Li, and Zhang Zhao Yang. 2019. “Research on Power-off Replacement Calculation of Transmission Line Insulators Based on Life Cycle Cost.” *2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid, IGBSG 2019* 236–40. doi: 10.1109/IGBSG.2019.8886286.
- Seifert, J. M., W. Petrusch, and H. Janssen. 2007. “A Comparison of the Pollution Performance of Long Rod and Disc Type HVDC Insulators.” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 14(1):125–29. doi: 10.1109/TDEI.2007.302880.
- Thanasaksiri, T. n.d. “Comparison of Simulation Tools ATPDraw and TFlash for Lightning Overvoltage Studies.”
- Vosloo, W. L., R. E. Macey, and C. De Turreil. 2018. “The Practical Guide to Outdoor High Voltage Insulators.” 202.
- Van Wezel, Annemarie P., Harro van Lente, Johannes J. M. van de Sandt, Hans Bouwmeester, Rens L. J. Vandeberg, and Adrienne J. A. M. Sips. 2018. “Risk Analysis and Technology Assessment in Support of Technology Development: Putting Responsible Innovation in Practice in a Case Study for Nanotechnology.” *Integrated Environmental Assessment and Management* 14(1):9–16. doi: 10.1002/ieam.1989.
- Watanabe, Toshiya. 2009. “Wettability of Ceramic Surfaces - A Wide Range Control of Surface Wettability from Super Hydrophilicity to Super Hydrophobicity, from Static Wettability to Dynamic Wettability.” *Journal of the Ceramic Society of Japan* 117(1372):1285–92. doi: 10.2109/jcersj.2.117.1285.
- Zhang, Yi, Zhijin Zhang, Xingliang Jiang, Tian Liang, and Dongdong Zhang. 2019. “Research on Lifespan Prediction of Composite Insulators in a High Altitude Area Experimental Station.” *Applied Sciences (Switzerland)* 9(16). doi: 10.3390/app9163364.