Jurnal Praktik
Keinsinyuran
e-ISSN:3063-7449

Jurnal **Praktik Keinsinyuran** Vol.3 No.6 (November 2026)
journal homepage: http://ejournal.atmajaya.ac.id/index.php/jpk

Rekonstruksi Mekanisme Kegagalan GTM-CNG Tipe 1 ISO 11439 Berdasarkan Bukti Visual dan Data KNKT: Studi Kasus Kecelakaan Sukabumi 2023

Cahyo Wibowo[1], Tri Murniati[2], Djoko Setyanto[3]*

[1]Program Studi Program Profesi Insinyur, Fakultas Biosains, Teknologi, dan Inovasi, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya, Jalan Sudirman 51, Jakarta 12930
[2]Program Studi Teknik Mesin, Universitas Mpu Tantular, Jalan Cipinang Besar No.2 Jakarta Timur 13410

Article Info

Article history:

Received
14 September 2026

Accepted
8 October 2026

Keywords:
Compressed Natural Gas (CNG), Gas Transportation Module (GTM), ISO 11439:2013, corrosion, accident investigation; KNKT, system integrity

Abstract

Gas Transportation Module (GTM) based on Compressed Natural Gas (CNG) is a high-pressure transportation system requiring high reliability and safety. The Type 1 CNG GTM accident in Sukabumi in 2023 involved cylinders designed to comply with ISO 11439:2013. This study analyzes the failure mechanism using photographic evidence and KNKT investigation data. Fault Tree Analysis (FTA) and Root Cause Analysis (RCA) are used to evaluate three hypotheses: valve-first, frame-first, and corrosion-first. Results show that KNKT data strongly indicate internal pitting corrosion and external general/uniform attack due to acidic water vapor (pH 4–5) with high water content (74–335 lb/mmscf) as the initiating failure. Corrosion potentially reduces cylinder wall integrity, but no quantitative wall-thickness reduction or visual rupture was found. KNKT stated the cylinder leaked before fracture. Valve and frame damage are significant findings in the failure chain, but the sequence of events cannot be definitively determined. This study emphasizes a system-level integrity approach and the need for destructive testing.

Info Artikel

Histori Artikel:

Diserahkan:
14 September 2026

Diterima:
8 Oktober 2026

Kata Kunci:
Compressed Natural Gas (CNG), Gas Transportation Module (GTM); ISO 11439:2013, korosi, investigasi kecelakaan, KNKT, integritas sistem.

Abstrak

Gas Transportation Module (GTM) berbasis *Compressed Natural Gas* (CNG) merupakan sistem transportasi gas bertekanan tinggi yang menuntut keandalan dan keselamatan tinggi. Kecelakaan GTM CNG Tipe 1 yang dirancang menurut ISO 11439:2013 terjadi di Sukabumi pada 2023. Penelitian ini menganalisis mekanisme kegagalan berdasarkan dokumentasi fotografi, data investigasi Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT), dan literatur korosi. Metode yang digunakan adalah studi kasus retrospektif dengan *Fault Tree Analysis* (FTA) dan *Root Cause Analysis* (RCA). Tiga hipotesis diuji: *valve-first* (H1), *frame-first* (H2), dan *corrosion-first* (H3). Hasil menunjukkan H3 paling didukung data KNKT, yaitu korosi internal berupa *pitting corrosion* dan korosi eksternal berupa *general/uniform attack* akibat uap air asam (pH 4–5) dengan kadar air tinggi (74–335 lb/mmscf). Korosi berpotensi menurunkan integritas dinding tabung, tetapi tidak ditemukan bukti kuantitatif penurunan ketebalan dinding maupun *rupture* visual pada badan tabung. KNKT menyatakan tabung bocor sebelum *fracture*. Kerusakan katup dan rangka merupakan temuan signifikan, tetapi urutan kejadian belum dapat ditetapkan secara definitif. Penelitian ini menekankan pentingnya pendekatan integritas tingkat sistem dan perlunya pengujian destruktif.

*Corresponding author. Djoko Setyanto
Email address: djoko.setyanto@atmajaya.ac.id

1. PENDAHULUAN

Compressed Natural Gas (CNG) digunakan sebagai bahan bakar dan komoditas yang diangkut melalui moda transportasi darat. Untuk mendistribusikan CNG ke wilayah tanpa jaringan pipa gas, digunakan *Gas Transportation Module* (GTM) yang terdiri atas tabung bertekanan tinggi, katup, *manifold*, sistem pengekangan, dan struktur rangka penopang (KNKT, 2026). Seluruh komponen dirangkai menjadi *skid* yang diangkut menggunakan kendaraan. Desain tabung mengacu pada ISO 11439:2013, sedangkan aspek bejana tekan umum mengikuti prinsip ASME BPVC (ASME, 2019).

Keselamatan GTM tidak hanya bergantung pada integritas *pressure vessel*, tetapi juga pada keandalan seluruh komponen pendukung. Kegagalan satu subsistem dapat memicu kegagalan komponen lain dan berkembang menjadi rantai kejadian yang berpotensi menyebabkan pelepasan CNG (ISO, 2013). Dalam investigasi kecelakaan, komponen yang mengalami kerusakan paling parah tidak selalu merupakan komponen yang gagal paling awal (Taylor, 2003; Mobley, 1999). Oleh karena itu, identifikasi *initiating failure* menjadi aspek penting.

Kecelakaan GTM CNG Tipe 1 ISO 11439 di Sukabumi pada 2023 menyediakan dokumentasi fotografi pasca kejadian (KNKT, 2026). Namun, analisis berbasis bukti visual memiliki keterbatasan. Penelitian ini mengintegrasikan bukti visual dengan data investigasi resmi KNKT, meliputi pemeriksaan luar dan dalam tabung, pengukuran pH cairan, dan data kualitas gas CNG (KNKT, 2026).

Studi terdahulu oleh Mirzaei *et al*. (2013) menggunakan simulasi elemen hingga untuk memodelkan deformasi dan fraktur tabung CNG yang meledak, tetapi tidak mengintegrasikan data investigasi resmi dan aspek korosi. Roberge (2019) membahas korosi pada bejana tekan secara umum. Bhavsar & Bali. (2022) menunjukkan kontaminan sulfur dan CO_2 dalam CNG dapat menyebabkan *dezincification* pada katup kuningan. Lie & Li, (2014) mengembangkan *Failure Assessment Diagram* (FAD) untuk memprediksi tekanan kegagalan tabung CNG retak. Belum ada studi yang secara komprehensif mengintegrasikan data investigasi KNKT dengan rekonstruksi mekanisme kegagalan GTM CNG serta interaksi antara korosi, kegagalan katup, dan kegagalan struktur rangka. *Research gap* inilah yang menjadi fokus penelitian ini.

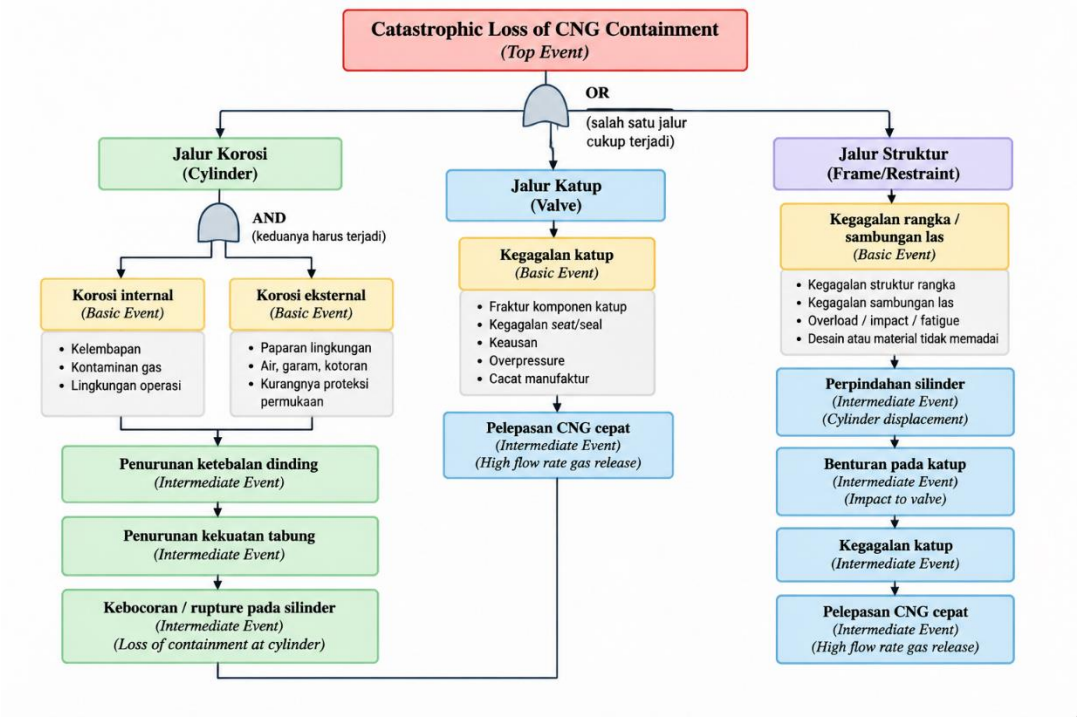
Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi *failure modes*, membangun hubungan kausal melalui FTA dan RCA, mengevaluasi hipotesis kegagalan, dan merekonstruksi urutan kejadian yang paling konsisten dengan bukti visual dan data KNKT.

2. METODE PELAKSANAAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus retrospektif berbasis bukti visual dan data investigasi (Taylor, 2003). Analisis dilakukan berdasarkan dokumentasi fotografi, informasi teknis, laporan (KNKT, 2026), literatur ilmiah, standar, prinsip mekanika, dan *engineering judgment*, tanpa investigasi langsung di lapangan (Mobley, 1999). Data dikelompokkan menjadi: (1) dokumentasi pasca kejadian; (2) kronologi dan kondisi kejadian; (3) data teknis GTM; (4) literatur dan standar; (5) pengetahuan teknis.

Sistem GTM didekomposisi menjadi *CNG cylinder*, *cylinder valve*, *manifold/piping*, *restraint/support*, *structural frame*, dan *welded joint* (Smith, 2011). Rekonstruksi urutan kejadian disusun mengikuti alur kondisi awal → *initiating event* → propagasi kegagalan → *loss of containment* → potensi *ignition/accident* → kondisi pasca kejadian. Setiap temuan diklasifikasikan sebagai observasi, inferensi, atau hipotesis (Mobley, 1999).

Analisis *Fault Tree Analysis* (FTA) memodelkan hubungan logis antara *failure modes* dan *top event*, yaitu *Catastrophic Loss of CNG Containment* (Vesely *et al*., 1981). Gerbang logika AND dan OR digunakan untuk merepresentasikan hubungan sebab-akibat. Diagram FTA disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1.
Diagram *Fault Tree Analysis* (FTA) yang dikembangkan dalam penelitian.

Untuk menguji mekanisme kegagalan, tiga hipotesis kompetitif dirumuskan: H1 (*valve-first*), H2 (*frame-first*), dan H3 (*corrosion-first*). Analisis bukti visual dan data KNKT dilakukan melalui empat tahapan: observasi bukti, interpretasi kondisi, pengujian hubungan terhadap hipotesis, dan evaluasi konsistensi bukti, sebagaimana disajikan pada Tabel 2.

Analisis mekanika struktur dilakukan secara teoritis. Tegangan *hoop* dihitung menggunakan Persamaan (1):

$$\sigma = \frac{P \times r}{t} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Dengan σ adalah tegangan *hoop*, P adalah tekanan internal, r adalah jari-jari tabung, dan t adalah ketebalan dinding. Nilai t setelah korosi tidak diketahui karena tidak tersedia data pengukuran aktual. Oleh karena itu, analisis difokuskan pada evaluasi kualitatif. Studi Lie & Li. (2014) menggunakan *Failure Assessment Diagram* dengan Persamaan (2):

$$Kr = \frac{K_I}{K_{mat}}, Lr = \frac{P}{P_c} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

Persamaan ini dapat menilai integritas tabung yang mengalami korosi, meskipun data retak aktual tidak tersedia. Data kuantitatif dari KNKT dirangkum pada Tabel 1.

Seluruh hasil analisis diintegrasikan melalui *Root Cause Analysis* (RCA) untuk membangun *causal chain* yang menghubungkan *initiating failure*, propagasi kerusakan, kegagalan komponen berikutnya, hingga *loss of containment* (Mobley, 1999).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kondisi Pasca Kejadian dan Failure Modes

Truk CNG membawa 20 tabung CNG berukuran 150 liter. Pasca ledakan, 14 tabung masih terikat di rak, 4 tabung terlepas namun masih di atas rak, 1 tabung terlempar sejauh 40 meter, dan 1 tabung belum ditemukan. Tidak ditemukan indikasi *rupture* pada badan tabung secara visual. Kerusakan teridentifikasi pada katup dan struktur penopang. Beberapa tabung terlepas dan berpindah posisi; deformasi profil rangka dan kerusakan sambungan las juga teramati. Kondisi truk CNG pasca ledakan ditunjukkan pada Gambar 2.

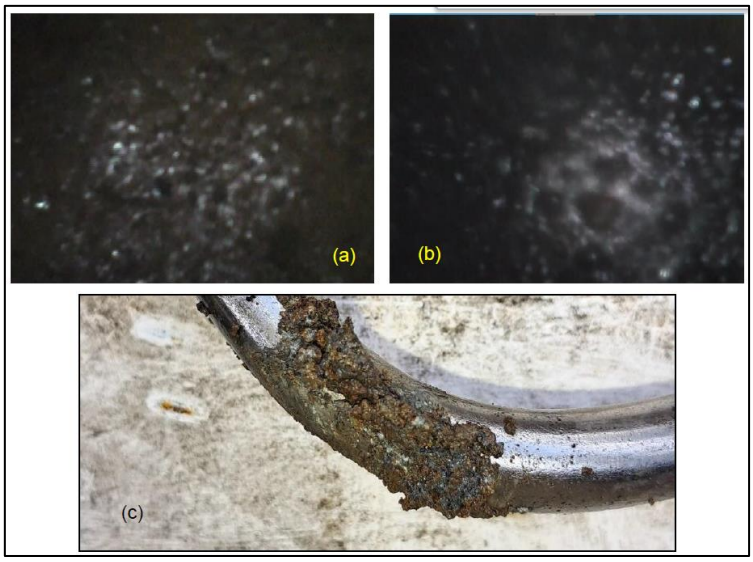


Gambar 2.
Dokumentasi pasca kejadian GTM CNG Sukabumi 2023.
(Sumber: Suara.com, 2023)

KNKT, (2026) menemukan korosi luar berupa *initial corrosion* akibat kerusakan lapisan cat, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Pemeriksaan *borescope* menemukan *pitting corrosion* pada permukaan dalam tabung, seperti pada Gambar 4. Cairan dalam tabung sekitar 150 ml dengan pH 4–5 (KNKT, 2026). Kadar air CNG berkisar 74–335 lb/mmscf, jauh di atas batas maksimum 3,0 lb/mmscf (KNKT, 2026). Kandungan H_2S terdeteksi 5–6 ppm (KNKT, 2026). Material tabung adalah *steel* 30CrMo4, dinyatakan aman hingga 300 bar berdasarkan *hydrostatic test* (KNKT, 2026). Tekanan operasional 200 bar (KNKT, 2026). Data kuantitatif tersebut dirangkum pada Tabel 1.



Gambar 3.
Korosi awal (*initial corrosion*) pada bagian luar tabung yang mengalami kerusakan pada lapisan cat (lingkaran merah).
(Sumber: KNKT, 2026)



Gambar 4.
(a) Kondisi permukaan lapisan dalam tabung pada posisi bagian bawah tabung terpasang (jam 6); (b) kondisi permukaan lapisan dalam tabung pada posisi bagian atas tabung terpasang (jam 12); (c) kondisi permukaan lapisan dalam tabung saat dikeruk.
(Sumber: KNKT, 2026)

Tabel 1.
Data kuantitatif dari laporan KNKT

Parameter	Nilai	Satuan	Sumber
Tekanan operasional	200	bar	hlm. 22
Tekanan pengisian maks	260	bar	hlm. 35
Tekanan *hydrotest*	300	bar	hlm. 35
Material tabung	Steel 30 CrMo4	–	hlm. 35
Kapasitas tabung	150	liter	hlm. 22
Jumlah tabung	20	unit	hlm. 10
pH cairan	4–5	–	hlm. 21
Kadar air	74–335	lb/mmscf	hlm. 36
Batas maks air	3,0	lb/mmscf	hlm. 36
Kandungan H_2S	5–6	ppm	hlm. 32
Batas maks H_2S	8	ppm	hlm. 32
Laju korosi Indonesia	C3–C5 (25–200)	µm/year	hlm. 26

Failure modes potensial meliputi *cylinder rupture*, *valve fracture*, *frame fracture*, *weld failure*, *restraint failure*, dan korosi. Matriks observasi dan interpretasi disajikan pada Tabel 2.

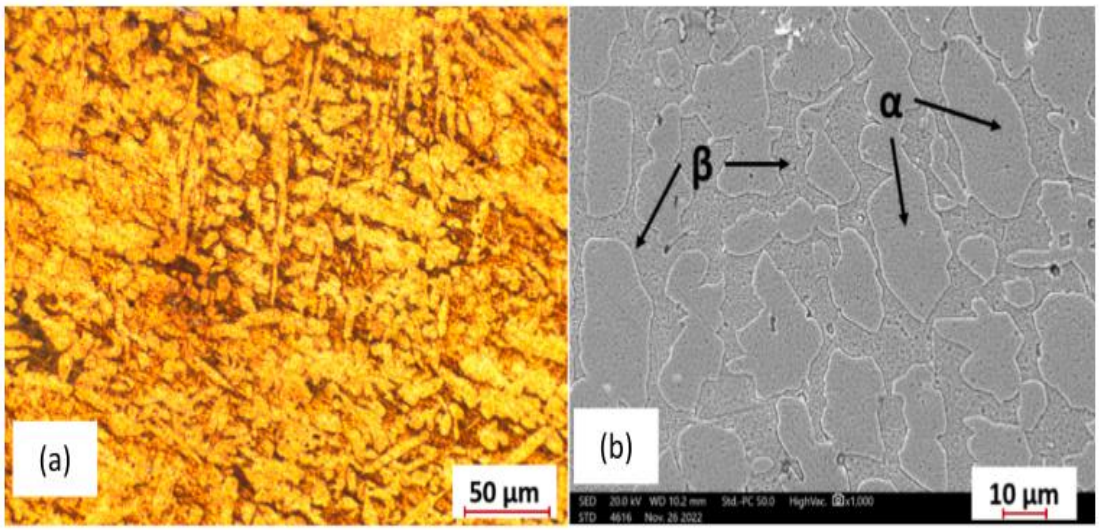
Tabel 2
Matriks bukti dan hipotesis

Bukti Visual	Observasi	Interpretasi	H1	H2	H3
Badan *cylinder*	Tidak tampak *rupture*	Tidak ada bukti	–	–	✓
Valve	Patah	*Mechanical failure*	✓	✓	–
Frame	Deformasi	*Structural failure*	±	✓	–
Sambungan las	Kerusakan	*Weld failure*	±	✓	–
Posisi *cylinder*	Berubah	*Loss of restraint*	–	✓	–
Korosi luar	*Initial corrosion*	*General attack*	–	–	✓
Korosi dalam	*Pitting corrosion*	*Pitting corrosion*	–	–	✓
pH cairan	4–5	Asam	–	–	✓
Kadar air	74–335	Tinggi	–	–	✓

3.2 Evaluasi Hipotesis

3.2.1 Hipotesis 1 (Valve-first)

H1 mengasumsikan kegagalan katup terjadi lebih dahulu dan menyebabkan pelepasan CNG cepat, sedangkan kerusakan struktur penopang adalah konsekuensi sekunder. Secara mekanis, *valve* patah di dalam leher silinder kecil kemungkinan terjadi akibat tekanan internal saja karena tekanan bekerja simetris. Kegagalan leher *valve* lebih masuk akal akibat beban lateral, *bending*, atau *impact*. H1 murni *valve-first* tanpa *external impact* hanya masuk akal jika *valve fracture* disebabkan *impact*, yang justru mengarah pada H2. Studi Bhavsar & Bali, (2022) menunjukkan katup kuningan dapat gagal akibat *dezincification*, seperti ditunjukkan pada hasil pengujian SEM pada Gambar 5. Namun, material katup Sukabumi tidak disebutkan kuningan dan tidak ada indikasi *dezincification*. Dengan demikian, H1 tidak didukung bukti cukup.

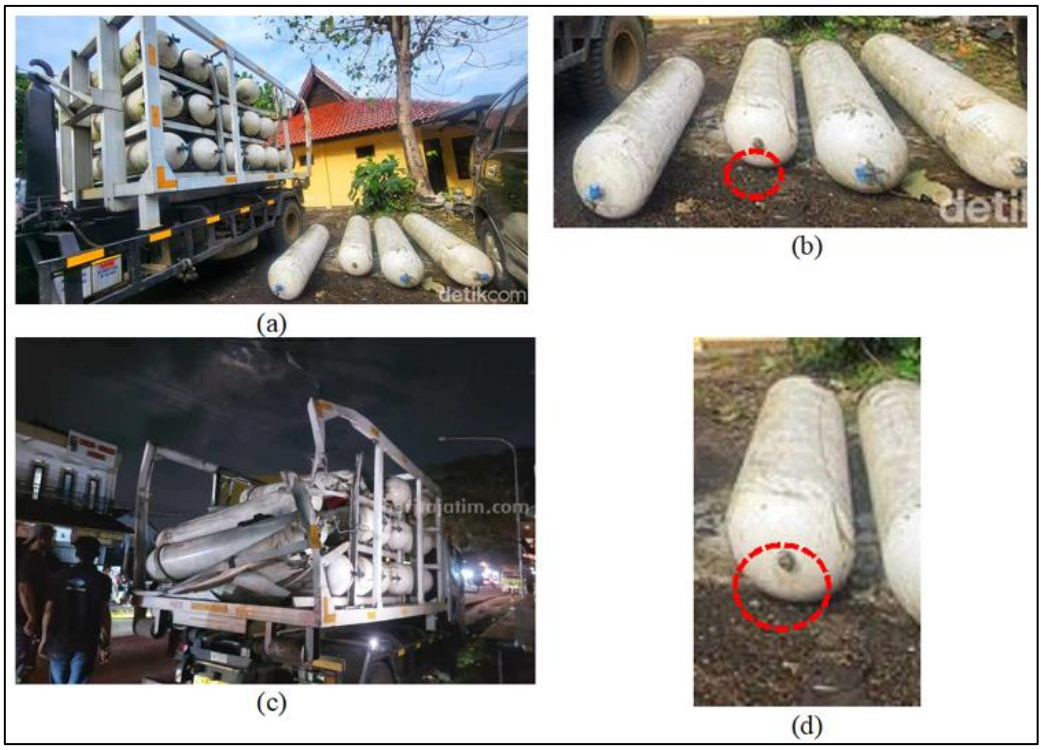


Gambar 5.
Hasil analisis SEM-EDS yang mengilustrasikan *dezincification* pada katup kuningan CNG (Sumber: Bhavsar & Bali, 2022)

3.2.2 *Hipotesis 2 (Frame-first)*

H2 mengasumsikan kegagalan struktur penopang terjadi lebih dahulu, menyebabkan perpindahan silinder dan benturan pada katup. Kerusakan katup merupakan *secondary failure*. KNKT melaporkan rak tabung CNG tidak memiliki standar teknis dan sertifikasi (KNKT, 2026).

Temuan visual pendukung H2 meliputi: beberapa silinder terlepas dan berpindah posisi, tidak terlihat patahan pada sambungan las UNP 50 dan UNP 100 vertikal, serta deformasi profil UNP 50 yang dapat menyebabkan perubahan konfigurasi penopang. Kondisi ini ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7. Namun, data dimensi, sifat material, dan NDT tidak tersedia, sehingga H2 belum dapat dipastikan sebagai *initiating failure*.



Gambar 6.
(a) Kondisi *cylinder* tidak lepas dari *frame* seluruhnya; (b) empat buah *cylinder* utuh tidak ada penampakan *rupture*; (c) lasan pada *frame* terlihat terlepas tanpa ada bekas yang berarti; (d) *valve* patah menempel di *cylinder*.
(Sumber: Tim detikJabar, 2023).

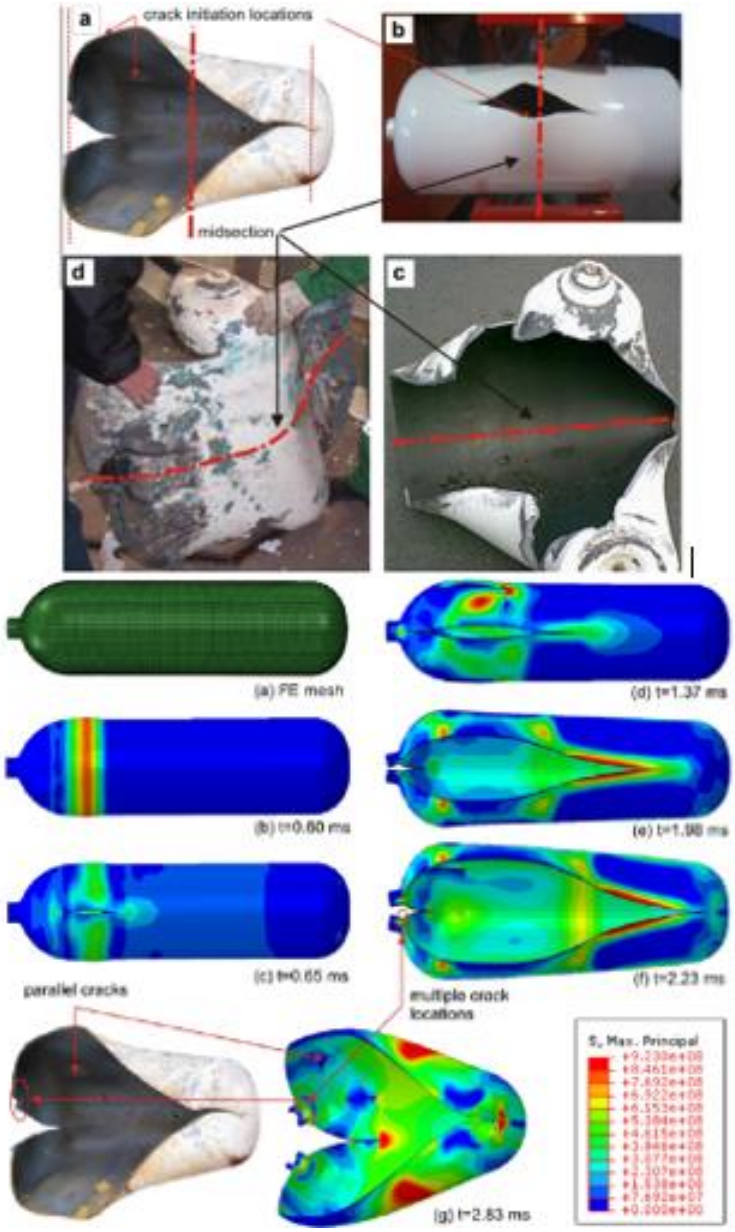


Gambar 7.
Deformasi pada rangka dimulainya patahan awal.
(Sumber: KNKT, 2026 & Tim detikJabar, 2023).

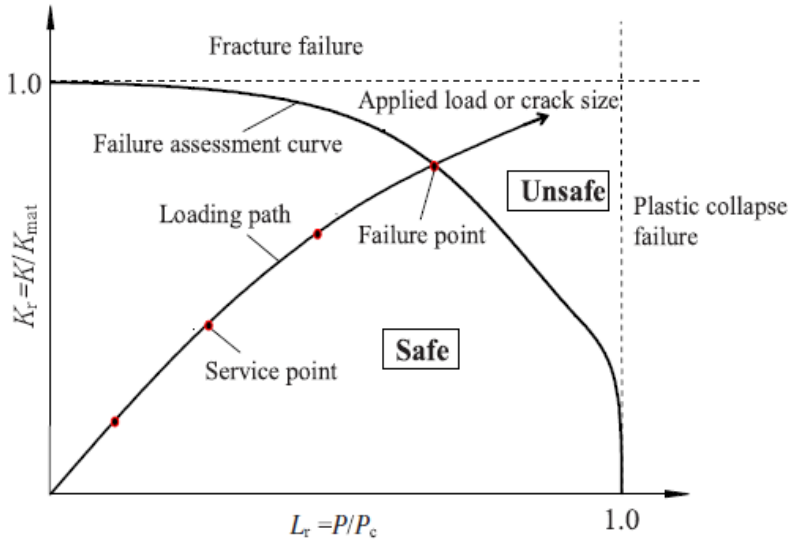
3.2.3 *Hipotesis 3 (Corrosion-first)*

H3 mengasumsikan korosi akibat kontaminan uap air asam sebagai *initiating failure* yang menurunkan kekuatan tabung. KNKT, (2026) menyimpulkan bahwa faktor penyebab ledakan tabung CNG adalah kandungan asam pada kontaminan uap air dalam CNG kisaran pH 4 sampai 5. Bagian dalam tabung mengalami *pitting corrosion*, sedangkan luar tabung terjadi korosi jenis *general or uniform attack* akibat kerusakan pada lapisan cat. Material *steel* 30CrMo4 dinyatakan aman, tetapi korosi pada bagian dalam dan luar tabung memengaruhi ketebalan dan kekuatan tabung dalam menahan tekanan.

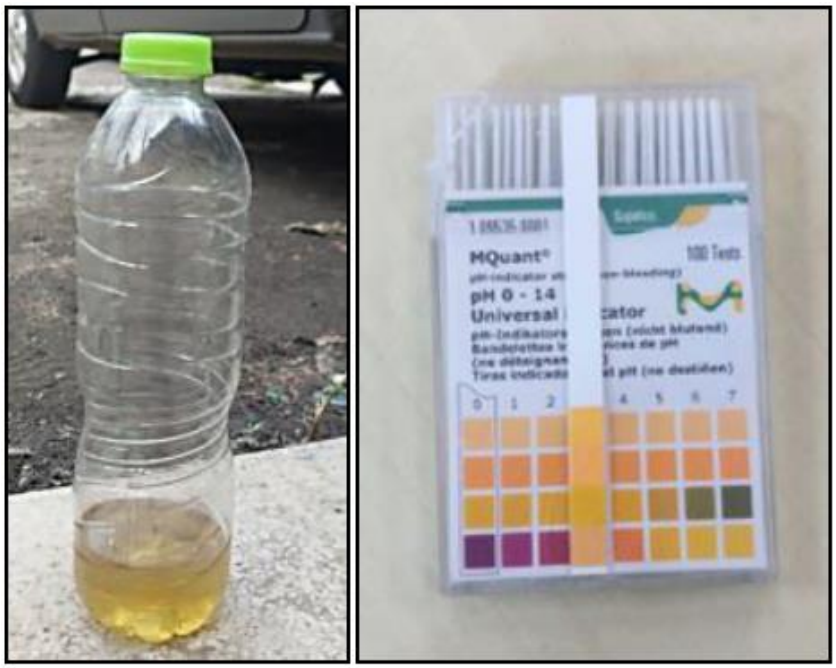
Pitting corrosion berbahaya karena sulit dideteksi dan dapat menjadi awal retak lebih parah seperti *intergranular corrosion* (IGC), *stress corrosion cracking* (SCC), dan *fatigue corrosion* (Roberge, 2019). Kandungan air tinggi dan pH asam mempercepat laju korosi. Indonesia berada pada laju korosi C3–C5 (KNKT, 2026). Mirzaei *et al*. (2013) menunjukkan pola deformasi *rupture* yang berbeda dengan kondisi Sukabumi, seperti ditunjukkan pada Gambar 8, sehingga memperkuat dugaan bukan *rupture* badan tabung. Kurva FAD dari Lie dan Li (Lie & Li, 2014) pada Gambar 9 digunakan untuk menilai integritas tabung. Cairan pH 4–5 di dalam silinder ditunjukkan pada Gambar 10. Berdasarkan seluruh bukti, H3 didukung data KNKT, tetapi tidak ada bukti terjadinya ledakan akibat *rupture* dari tabung, sedangkan H1 dan H2 tidak didukung bukti hasil analisis KNKT.



Gambar 8.
Hasil simulasi FE terhadap *cylinder* CNG sebagai pembanding jika kegagalan tersebut disebabkan oleh *cylinder* yang meledak.
(Sumber: Mirzaei *et al*., 2013)



Gambar 9.
Failure Assessment Diagram (FAD) untuk menilai integritas tabung retak.
(Sumber: Lie & Li, 2014)



Gambar 10.
Cairan pH 4–5 di dalam silinder.
(Sumber: KNKT, 2026)

3.3 Evaluasi Kualitatif Struktur dan Sambungan Las

Struktur penopang harus mempertahankan posisi silinder dan menahan beban statis, dinamis, *impact*, *fatigue*, serta korosi. Kegagalan dapat terjadi akibat cacat pengelasan seperti *incomplete fusion* dan *lack of penetration*, atau retak pada *weld toe* (Blodgett, 1966). Namun, data dimensi, sifat material, dan NDT tidak tersedia dalam laporan KNKT, (2026), sehingga analisis bersifat kualitatif. Kerusakan sambungan las dan struktur rangka ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11.
Kerusakan pada sambungan las dan struktur rangka.
(Sumber: Tim detikJabar, 2023).

Berdasarkan Tabel 3, kerusakan *valve* saja tidak cukup membedakan H1 dan H2. Pembeda fundamental adalah urutan kerusakan. Namun, data KNKT menunjukkan penyebab utama adalah korosi, bukan kegagalan struktur. H3 merupakan hipotesis paling didukung bukti. Perbandingan konsistensi hipotesis disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3.
Perbandingan konsistensi hipotesis

Parameter	H1	H2	H3
Valve damage	Konsisten	Konsisten	Tidak esensial
Tanpa *cylinder rupture*	Konsisten	Konsisten	Konsisten
Cylinder displacement	Kurang diperlukan	Sangat relevan	Tidak esensial
Frame deformation	Sekunder	Primer	Sekunder
Weld damage	Sekunder	Sangat relevan	Tidak esensial
Impact	Tidak esensial	Esensial	Tidak esensial
Korosi	Tidak dijelaskan	Tidak dijelaskan	Primer
pH asam	Tidak dijelaskan	Tidak dijelaskan	Didukung data
Kadar air tinggi	Tidak dijelaskan	Tidak dijelaskan	Didukung data

3.4 Implikasi dan Keterbatasan

Komponen dengan kerusakan paling berat tidak otomatis menjadi sumber awal kegagalan. Berdasarkan H3, rangkaian kejadian yang paling mungkin adalah: korosi internal dan eksternal → penurunan ketebalan dan kekuatan tabung → kebocoran gas → *pressure wave* → kerusakan sekunder pada *frame* dan *valve*. Strategi mitigasi harus fokus pada pengendalian korosi.

Integritas silinder tidak menjamin integritas sistem. *Frame* memiliki fungsi keselamatan kritis; inspeksi GTM perlu mencakup *frame*, *restraint*, sambungan las, korosi, deformasi, dan perlindungan katup. Keterbatasan utama: tidak tersedia pemeriksaan fisik langsung, NDT, fraktografi, riwayat operasi, dan data temporal. KNKT tidak melakukan pengujian destruktif terhadap sampel tabung, sehingga kesimpulan penurunan kekuatan tabung bersifat inferensial. Tidak ada bukti visual *rupture*; KNKT menyatakan tabung bocor sebelum *fracture* (KNKT, 2026). Verifikasi lanjutan diperlukan melalui pemeriksaan lapangan, metalurgi, dan korelasi bukti kerusakan.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

1. Terdapat indikasi kuat korosi internal (*pitting corrosion*) dan eksternal (*general/uniform attack*) akibat kontaminan uap air asam (pH 4–5) dengan kadar air tinggi (74–335 lb/mmscf). Korosi berpotensi menurunkan integritas dinding tabung, namun tidak terdapat bukti kuantitatif penurunan ketebalan dinding dan tidak ada bukti visual *rupture* pada badan tabung.
2. Tidak ditemukan bukti visual *rupture* pada badan tabung. Tidak ada pengukuran laju kebocoran atau identifikasi lokasi kebocoran. Mekanisme pasti pelepasan gas memerlukan verifikasi lanjutan.
3. Material tabung *steel* 30CrMo4 dinyatakan aman hingga 300 bar berdasarkan *hydrostatic test*. Tidak ada bukti kegagalan material tabung merupakan penyebab langsung pelepasan gas.
4. Kerusakan katup dan struktur rangka merupakan temuan signifikan yang berpotensi menjadi bagian rantai kegagalan. Urutan kejadian—apakah kegagalan katup atau struktur terjadi lebih dahulu—belum dapat ditetapkan definitif.
5. Integritas keselamatan GTM tidak dapat dinilai hanya dari integritas *pressure vessel*, tetapi memerlukan pendekatan integritas tingkat sistem yang mencakup silinder, katup, *restraint*, *frame*, dan sambungan las.
6. Hipotesis H3 (*corrosion-first*) didukung data KNKT, sedangkan H1 (*valve-first*) dan H2 (*frame-first*) tidak didukung bukti cukup. Namun, mekanisme pasti pelepasan gas belum dapat ditetapkan definitif.
7. Tidak ada bukti dan pernyataan dari laporan KNKT yang menyatakan kegagalan disebabkan oleh cylinder CNG ISO 11439.

4.2 Saran

1. Investigasi lanjutan perlu dilakukan secara sistematis dan berbasis bukti, meliputi *visual testing* (VT), *ultrasonic testing* (UT), *magnetic particle testing* (MT) atau *liquid penetrant testing* (PT), pengukuran ketebalan, karakterisasi sifat material, pemeriksaan metalurgi, fraktografi, serta analisis tegangan dan *fatigue*.
2. Perlu dilakukan pengujian destruktif terhadap sampel tabung CNG yang tersisa atau identik, seperti pemotongan untuk mengukur ketebalan dinding aktual, pemeriksaan metalurgi, uji kekerasan, dan fraktografi.
3. Perlu dilakukan evaluasi desain terhadap sistem penopang GTM, khususnya profil kanal dudukan silinder, konfigurasi *restraint*, distribusi beban, dan kapasitas sambungan las.
4. Program inspeksi dan pemeliharaan GTM perlu memasukkan struktur penopang dan sambungan las sebagai komponen keselamatan kritis.
5. Evaluasi keselamatan GTM selanjutnya direkomendasikan menggunakan pendekatan integritas tingkat sistem dan analisis rantai kegagalan.
6. Penerapan pendekatan berbasis risiko (*risk-based inspection and maintenance*) perlu dipertimbangkan.
7. Pencegahan kegagalan serupa memerlukan perubahan paradigma dari pemeriksaan yang berorientasi pada integritas *pressure vessel* menuju pengendalian integritas keseluruhan sistem GTM.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT) atas publikasi laporan investigasi yang menjadi sumber data utama. Apresiasi juga

disampaikan kepada Program Studi Program Profesi Insinyur, Fakultas Biosains, Teknologi, dan Inovasi (FBTI), Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya.

DAFTAR PUSTAKA

1. ASME. (2019). Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII. New York, NY: ASME.
2. Bhavsar, V., & Bali, S. C. (2022). Effect of Compressed Natural Gas (CNG) on corrosion behaviour of brass valve of CNG cylinder. *Engineering Failure Analysis*, 140, 106507.
3. Blodgett, O. W. (1966). Design of Welded Structures. Cleveland, OH: James F. Lincoln Arc Welding Foundation.
4. International Organization for Standardization. (2013). Gas cylinders — High pressure cylinders for the on-board storage of natural gas as a fuel for automotive vehicles (ISO 11439:2013). Geneva: ISO.
5. KNKT. (2026). Laporan Akhir Investigasi Kecelakaan Lalu Lintas dan Angkutan Jalan: Ledakan Tabung CNG pada Truk Pengangkut, Jalan Raya Sukabumi-Bogor, Cibadak, Sukabumi, 27 November 2023 (KNKT.23.11.10.01). Jakarta: KNKT.
6. Lie, S. T., & Li, T. (2014). Failure pressure prediction of a cracked compressed natural gas (CNG) cylinder using failure assessment diagram. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 18, 474–483.
7. Mirzaei, M., Malekan, M., & Sheibani, E. (2013). Failure analysis and finite element simulation of deformation and fracture of an exploded CNG fuel tank. *Engineering Failure Analysis*, 30, 91–98.
8. Mobley, R. K. (1999). Root Cause Failure Analysis. Woburn, MA: Butterworth-Heinemann.
9. Roberge, P. R. (2019). Handbook of Corrosion Engineering (3rd ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
10. Smith, D. J. (2011). Reliability, Maintainability and Risk: Practical Methods for Engineers. Oxford: Butterworth-Heinemann.
11. Pratama, R. M. (2023, 1 Desember). *Apa itu CNG? Tabung gas meledak di Sukabumi makan 2 korban meninggal dunia.* **(**https://www.suara.com/tekno/2023/12/01/100619/apa-itu-cng-tabung-gas-meledak-di-sukabumi-makan-2-korban-meninggal-dunia). Diakses tanggal 30 Agustus 2026
12. Taylor, J. R. (2003). Risk Analysis for Process Plant, Pipelines and Transport. London: Routledge.
13. Tim detikJabar. (2023, 30 November). *Dahsyatnya ledakan tabung gas di Sukabumi*. **(***detikJabar*. https://www.detik.com/jabar/hukum-dan-kriminal/d-7063455/dahsyatnya-ledakan-tabung-gas-di-sukabumi). Diakses tanggal 1 September 2026
14. Vesely, W. E., Goldberg, F. F., Roberts, N. H., & Haasl, D. F. (1981). Fault Tree Handbook (NUREG-0492). Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission.