

ANALISIS MINIMUM IGNITION ENERGY (MIE) BAHAN BAKAR AVTUR (JET-A1)

Santosa Edy Wibowo
Program Studi Mekanik Industri & Desain, Politeknik TEDC
Email: santosaedy@poltektedc.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mendokumentasikan nilai Minimum Ignition Energy (MIE) atau energi penyalakan minimum dari bahan bakar JET A-1. MIE merupakan parameter krusial untuk keselamatan dalam penanganan dan penyimpanan bahan bakar penerbangan. Metodologi yang digunakan mengacu pada standar ASTM E582, dengan mengukur energi percikan listrik yang diperlukan untuk menyalakan uap JET A-1 pada kondisi standar (suhu 25°C dan tekanan 1 atm). Hasil penelitian menunjukkan bahwa MIE untuk bahan bakar JET A-1 berada dalam rentang 0.2 mJ hingga 0.5 mJ pada suhu bahan bakar 55°C– 65°C pada ketinggian 0 ft., mengonfirmasi bahwa bahan bakar ini memiliki risiko penyalakan sedang hingga tinggi. Nilai MIE ini sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti suhu dan tekanan. Pada suhu di atas titik nyala (>38°C), MIE menurun drastis, sementara kondisi dinamis seperti getaran dan sloshing dapat menurunkan batas flammability bahan bakar. Pemahaman mendalam tentang MIE JET A-1 sangat penting untuk memitigasi risiko kebakaran dan ledakan. Hasil penelitian ini menekankan perlunya penerapan langkah-langkah keselamatan yang ketat, seperti pengendalian sumber percikan api, grounding peralatan, dan ventilasi yang memadai, untuk meningkatkan standar keselamatan dalam industri penerbangan.

Kata Kunci: MIE, Avtur, Kebakaran, Energi.

Abstract

This research aims to analyze and document the Minimum Ignition Energy (MIE) of JET A-1 fuel. MIE, or the minimum energy required for ignition, is a crucial safety parameter in the handling and storage of aviation fuels. The methodology follows the ASTM E582 standard, measuring the electrical spark energy needed to ignite JET A-1 vapor under standard conditions (25°C and 1 atm). The study found that the MIE for JET A-1 fuel ranges from 0.2 mJ to 0.5 mJ at the optimum mixture ratio. This confirms that the fuel has a moderate to high ignition risk. The MIE value is significantly influenced by various factors, including temperature and pressure. At temperatures above its flash point (>38°C), the MIE decreases sharply, while dynamic conditions like vibration and sloshing can lower the fuel's flammability limits. A deep understanding of the MIE of JET A-1 is essential for mitigating fire and explosion risks. The findings emphasize the necessity of implementing strict safety measures, such as controlling spark sources, grounding equipment, and ensuring adequate ventilation, to enhance safety standards in the aviation industry.

Keywords: MIE, Avtur, Ignition, Energy.

I. PENDAHULUAN

Kebakaran tangki disebabkan oleh tiga faktor utama yang bertemu saat bersamaan yang dikenal dengan segitiga api atau triangle fire, yaitu: bahan bakar, oksigen dalam udara dan sumber ignition. Tiga komponen segitiga api tersebut ada di dalam pesawat, baik pesawat sipil maupun militer, sehingga upaya mencegah dan proteksi terhadap kebakaran pesawat merupakan hal yang penting dalam melindungi pesawat.



Gambar 1. MIE hasil penelitian BAE

Minimum Ignition Energy (MIE), atau Energi Penyalakan Minimum, merupakan parameter kritis dalam keselamatan penanganan dan penyimpanan bahan bakar, terutama untuk aplikasi penerbangan. MIE adalah jumlah energi terkecil yang dibutuhkan

untuk menyalakan campuran bahan bakar dan udara pada konsentrasi optimum. Bahan bakar Avtur yang dikenal sebagai JET A-1 adalah salah satu bahan bakar aviasi paling umum yang digunakan di pesawat jet bermesin turbin. Memahami MIE dari JET A-1 sangat penting untuk memitigasi risiko kebakaran dan ledakan, serta untuk desain sistem pengapian yang efisien. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mendokumentasikan nilai MIE dari bahan bakar JET A-1.

MIE bahan bakar Avtur, tidak hanya bergantung pada komposisi kimia bahan bakar itu sendiri tetapi juga dipengaruhi oleh beberapa faktor eksternal, antara lain:

1. Rerbandingan campuran bahan bakar dan udara (*Fuel-Air Ratio*); MIE paling rendah terjadi pada rasio stoikiometrik atau sedikit lebih kaya dari stoikiometrik. Rasio ini merupakan titik di mana jumlah bahan bakar dan oksigen cukup untuk reaksi pembakaran sempurna.
2. Tekanan dan Suhu: Peningkatan tekanan cenderung menurunkan MIE karena molekul lebih rapat, meningkatkan frekuensi tumbukan

- yang efektif. Peningkatan suhu juga menurunkan MIE karena molekul sudah memiliki energi kinetik yang lebih tinggi.
- Kelembaban: Kandungan uap air dalam udara dapat memengaruhi MIE, meskipun efeknya cenderung kecil.
 - Energi Pemicu: Jenis energi yang digunakan untuk penyalaan, misalnya percikan listrik (spark), laser, atau sumber panas lainnya, juga dapat memengaruhi nilai MIE yang terukur.

JET A-1 adalah jenis kerosin tingkat tinggi, memiliki titik nyala (*flash point*) yang relatif tinggi (di atas 38°C) dan titik beku rendah (-47°C). Karakteristik ini membuatnya aman untuk penanganan di suhu ruang, namun tetap memiliki risiko penyalaan jika berada dalam fase uap. Hal ini menjadi masalah bagi wilayah Indonesia yang memiliki variasi suhu yang bisa mencapai suhu hingga 40°C (Wibowo, 2020).

II. LANDASAN TEORI

Pada pesawat penumpang, semenjak peristiwa kecelakaan TWA, FAA membentuk tim ARAC (Aviation Rulemaking Advisory Circular) membangun aturan keselamatan terhadap kebakaran tangki bahan bakar, dan divisi keselamatan kebakaran melakukan studi serta serangkaian penelitian terkait flammability bahan bakar.

Bahan bakar Jet A dan Jet A-1 dipakai pada pesawat penumpang. Standard spesifikasi Jet A dan Jet A1 berdasar pada ASTM D1655. Tabel 1 menunjukkan perbandingan karakteristik antara JP-8 dengan Jet A dan Jet A1.

Tabel 1. Karakteristik

| Parameter | JET A1 (Avtur) |
|--|----------------|
| Massa jenis, kg/L at 15°C | 0,775-0,840 |
| Temperatur nyala, °C (minimum) | 38 |
| Titik beku, °C | -47 |
| Titik didih, °C (maximum) | 300 |
| Nilai kalor pembakaran (<i>Low Heating Value, LHV</i>) MJ/kg | 42,8 |

Penyebab terbakar dan meledaknya tangki bahan bakar secara umum dapat dinyatakan jika sumber ignition bereaksi dengan uap bahan bakar yang mudah terbakar (flammable) (Wibowo, 2020).

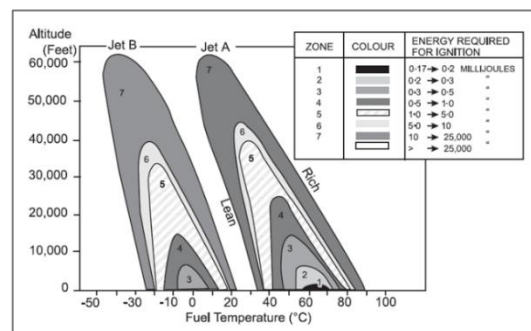
Tabel 2 menyatakan sumber-sumber *ignition* yang akan berpotensi mengakibatkan meledaknya tangki.

Tabel 2. Sumber Ignition

| Kategori | Bahaya | Penyebab |
|------------------|-------------------------------------|---|
| Kegagalan Sistem | Kabel listrik panas di dalam tangki | <ul style="list-style-type: none"> Korsleting (Short Circuit/SC) Arus terinduksi Kerusakan mekanis |

| Kategori | Bahaya | Penyebab |
|-----------------|--|--|
| | Keausan pompa bahan bakar | <ul style="list-style-type: none"> Keausan isolasi kabel Korsleting Loncat api listrik |
| | Pompa menghisap udara | <ul style="list-style-type: none"> Percikan api akibat gesekan mekanis |
| Permukaan Panas | Sistem yang berdekatan | <ul style="list-style-type: none"> Loncat api listrik di luar tangki bahan bakar Penyalaan dari permukaan panas |
| Lingkungan | Penumpukan listrik statis akibat sirkulasi bahan bakar | <ul style="list-style-type: none"> Pelepasan elektrostatik (ESD) dari permukaan bahan bakar ke dinding tangki |
| | Sambaran petir | <ul style="list-style-type: none"> Pelepasan elektrostatik (ESD) di dalam tangki bahan bakar Loncat api listrik antar komponen |
| Senjata | Bahaya Kebakaran dan Ledakan | <ul style="list-style-type: none"> HEI, API, dan hulu ledak |
| | Hydrodynamic Ram | <ul style="list-style-type: none"> Gerakan proyektil di dalam tangki Kerusakan struktur dinding tangki |

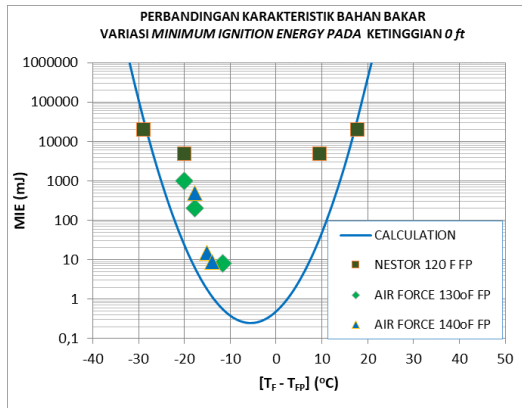
Hill (1998) menunjukkan bahwa British Aerospace melakukan evaluasi peta kontur energi minimum seperti ditunjukkan dalam Gambar 2 peta kontur ini sangat membantu dalam menganalisis flammability tangki bahan bakar, sebagai gambaran konservatif. Minimum Ignition Energi (MIE) atau energi terendah terjadinya ignition yang dibutuhkan uap bahan bakar. MIE yang dibutuhkan bahan bakar Jet A adalah 0,3 mJ saat temperaturnya 56 °C hingga 73 °C.



Gambar 2. MIE hasil penelitian Hill (1988)

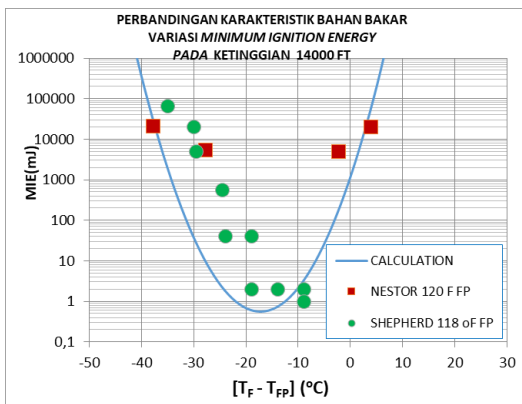
Berdasarkan penelitian Nestor (1967) dan Shepherd, et al (2000) dengan temperatur titik nyala

sebesar 120°F (49°C) pada ketinggian permukaan laut (0 ft) dan pada ketinggian 14000 ft. Nestor melakukan pengujian pada bahan bakar dengan temperatur nyala sebesar 49°C dengan temperatur bahan bakar 17°C diatas temperatur nyala dan dilakukan menggunakan energi dari percikan api sebesar 5 J dan 20 J. Sebagai pembandingan ditunjukkan dua hasil penelitian USAF yang menggunakan dua temperatur nyala yang berbeda yaitu 130°F (54°C) dan 140°F (60°C).



Gambar 3. Penelitian Nestor (1967)

Pada ketinggian 14000 ft, dibandingkan dengan penelitian Shepherd, et al (2000) kurang akurat namun memiliki tren grafik yang sama.



Gambar 4. Penelitian Nestor (1997) dan Shepperd (2000)

Gierass (2013) menyatakan bahwa energi penyalan disebabkan oleh faktor ketinggian dan suhu bahan bakar

$$MIE = \exp(f(H, T_f))$$

Tf adalah suhu bahan bakar dalam °F dan H adalah ketinggian dalam ft dan MIE dalam mJ.

Fungsi energi ignition terhadap ketinggian dengan persamaan:

$$\ln(E_{ign})_{min} = \frac{0.63 \times H - 1,395}{\sqrt{\left(1 - \frac{H}{67}\right)}}$$

Fungsi terhadap suhu bahan bakar:

$$\ln(E_{ign}) = \ln(MIE) + a \times (T_{fuel} - T_{min})^2$$

Dengan

$$T_{min} = T_{FP} + 22 - 1,5 \times H$$

$$a = (8,66 \times 10^{-5} \times H) + 6,73 \times 10^{-3}$$

koefisien a merupakan fungsi dari H dinyatakan dalam ft, dan TFP nyala bahan bakar dalam °F.

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan metode kualitatif dan kuantitatif. Kualitatif pengujian yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya dan metode kuantitatif dengan menentukan besarnya energi yang terjadi.

Pengujian dilakukan menggunakan peralatan standar untuk mengukur MIE, yaitu pengukur energi percikan (*spark ignition energy apparatus*) yang disesuaikan dengan standar ASTM E582.

Sampel bahan bakar JET A-1 disiapkan dalam wadah tertutup. Sampel dipanaskan hingga mencapai suhu yang diinginkan (25°C) untuk memastikan pembentukan uap yang cukup.

Uap bahan bakar dicampur dengan udara bersih dalam ruang uji (*combustion chamber*). Rasio campuran divariasikan untuk menemukan konsentrasi yang menghasilkan MIE terendah.

Percikan listrik dengan energi yang dapat diatur dilepaskan di dalam ruang uji. Energi percikan dinaikkan secara bertahap (misalnya, dari 0.1 mJ hingga 10 mJ) hingga terjadi pembakaran yang terdeteksi oleh sensor tekanan atau sensor optik. Nilai MIE dicatat saat terjadi tiga kali penyalan berturut-turut pada energi yang sama.

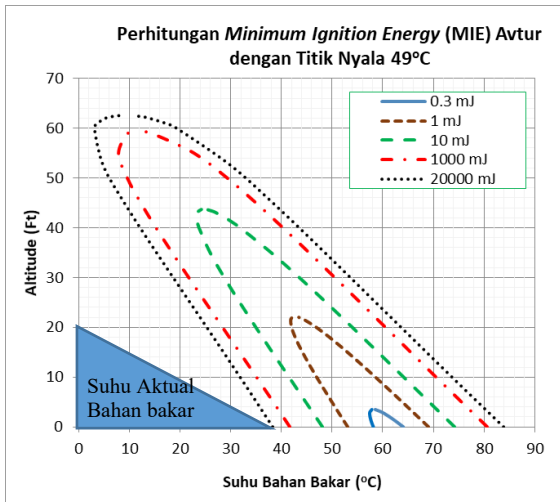
Data sample yang terkumpul dianalisis untuk menentukan nilai MIE rata-rata dari JET A-1 pada kondisi standar (25°C, 1 atm). Data kemudian diuji ulang dengan dengan perhitungan teori.

Analisis hasil dibandingkan dengan pendekatan matematis merujuk pada hasil penelitian Hill (1967) dan Gieras (2013).

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. MIE pada Kondisi Statis Setimbang

Hasil penelitian yang dilakukan oleh beberapa peneliti dari FAA dan USAF dapat dinyatakan dengan pendekatan teoritis. Perhitungan matematis pada persamaan menentukan MIE, dengan menginputkan variabel ketinggian dari 0 ft sampai dengan 65000 ft, untuk MIE masing-masing sebesar 0.3 mJ, 1 mJ, 10 mJ, 1000 mJ dan 20000 mJ maka dihasilkan peta kontur grafik MIE yang mirip dengan data MIE dari BAe. Perhitungan teoritis ditunjukkan pada gambar 5 (Wibowo, 2020).



Gambar 5. Hasil Perhitungan MIE Secara Teori

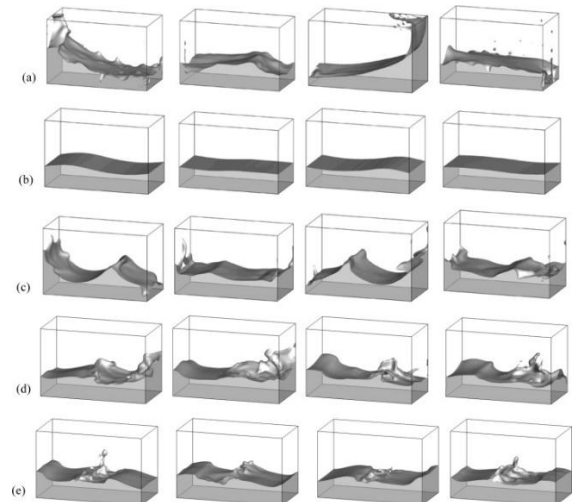
Plot hasil perhitungan untuk bahan bakar dengan temperatur titik nyala bahan bakar sebesar 120°F (49°C) pada ketinggian permukaan laut diperoleh MIE = 0,2478 mJ, saat temperatur bahan bakar sama dengan titik nyala ($T_f = T_{fp} = 49^\circ\text{C}$) dan dapat ditentukan temperatur terendah terjadi ignition (T_{min}) sebesar 62°C. Ketika temperatur bahan bakar (T_f) sebesar 38°C, dapat ditentukan MIE naik menjadi 35,5 mJ dan temperatur minimum untuk energi tersebut sebesar 62°C. Ketika temperature bahan bakar (T_f) sebesar 76,7°C dapat ditentukan bahwa MIE sebesar 48 mJ.

Dari kondisi ini suhu bahan bakar saat statis (tidak ada slosh) daerah operasi pesawat dibutuhkan energi yang besar (>20 J) untuk dapat terbakar.

B. MIE Pada Kondisi Dinamis

Kondisi dinamis dalam tangki bahan bakar pesawat terbang dapat mengakibatkan variasi dari peta batas flammability kondisi setimbang (equilibrium). Variasi tersebut akibat dari kondisi dinamis seperti getaran dan sloshing tangki. Sloshing dapat menghasilkan percikan bahan bakar yang membentuk titik-titik bahan bakar yang memudahkan bahan bakar terjadi penguapan.

Nestor (1967) dalam percobaannya menyatakan bahwa riak (sloshing) mengakibatkan konsentrasi uap bahan bakar meningkat sehingga pada temperatur yang lebih rendah dari batas setimbang terjadi penyalaan. Kabut uap bahan bakar yang terbentuk, lebih mudah mengalami penguapan sehingga konsentrasi uap bahan bakar meningkat mengakibatkan bahan bakar mudah terbakar, hal tersebut setara dengan pergeseran batas bawah flammability (LFL). Hasil perhitungan slosh ditunjukkan pada gambar 6 (Wibowo,2020).

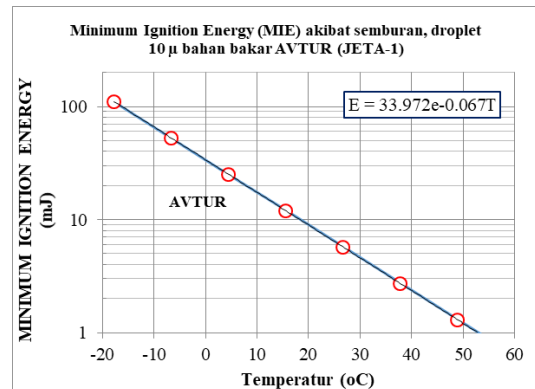


Gambar 6. Hasil Perhitungan Secara Teori

Kutcha (1975) menyatakan bahwa minimum ignition energi (MIE) pada saat ada semburan memerlukan energi yang lebih besar dari pada energi saat kondisi setimbang statis, ditunjukkan pada gambar 7 dan persamaan untuk Avtur ditentukan dengan persamaan berikut:

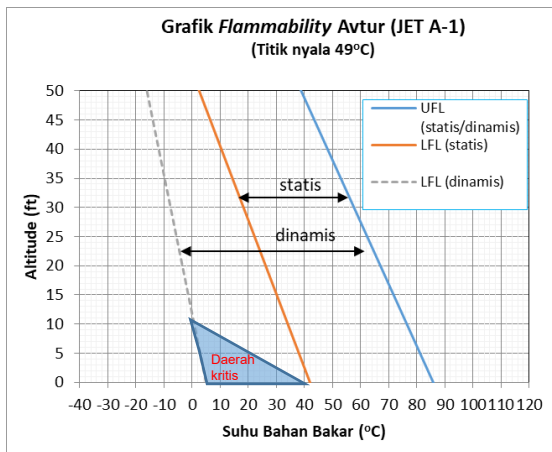
$$MIE = 33,972 e^{-0,067 T}$$

dengan T adalah temperatur bahan bakar terjadi ignition dalam °C.



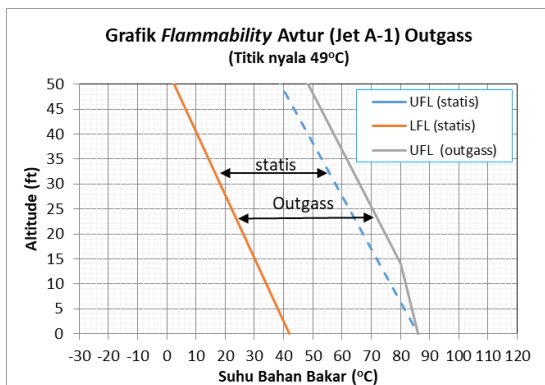
Gambar 7. MIE akibat slosh droplet 10 mikron

Menurut Nestor (1967) akibat ulakan (slosh) juga akan meningkatkan laju pelepasan gas (outgassing) dari udara yang terlarut dalam bahan bakar. Efek pelepasan udara hanya mempengaruhi batas atas flammability digambarkan pada dengan garis putus-putus.



Gambar 8. Efek kondisi statis dan dinamis

Ted Bidle (2004) menyatakan bahwa batas flammability akibat pelepasan gas mengakibatkan batas atas pada campuran kaya (*rich limit*) semakin lebar, sedangkan perubahan batas bawah flammability tidak signifikan sehingga bisa diabaikan.



Gambar 9. Efek outgass

C. Alternatif Pencegahan Terjadi Kebakaran
 Seperti disampaikan pada awal bab bahwa kebakaran disebabkan oleh tiga faktor utama yang bertemu saat bersamaan, yaitu: bahan bakar, oksigen dalam udara dan sumber *ignition*. Pencegahan dapat dilakukan dengan menekan kondisi batas sehingga salah satu dari tiga hal tersebut tidak bertemu. Sistem Inerting dilakukan dengan menekan kadar oksigen dengan cara menambah kadar nitrogen. Cara lain adalah dengan cara mencegah timbulnya sumber api. Dalam penelitian ini adalah mencegah dengan mengetahui karakteristik bahan bakar dan kondisi kritis bahan bakar berpotensi terbakar.

Dari hasil analisis kondisi aktual yang terjadi dari penelitian diatas ada daerah kritis yang bisa dihindari meskipun daerah tersebut masih dapat dikategorikan aman jika tidak ada energi lebih dari 20 J, yaitu dengan mencegah atau mengurangi terjadinya riak bahan bakar (*sloshing*) yang mengakibatkan pergeseran LFL bahan bakar.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Dari penelitian pendekatan matematis dari berbagai penelitian dapat digunakan untuk menghitung batas *flammability* secara akurat. Dengan perhitungan ini maka akan memudahkan desainer memprediksi kondisi kritis yang mungkin terjadi sehingga berkontribusi untuk meningkatkan keselamatan.

Pemahaman yang mendalam tentang MIE Avtur (JET A-1) berkontribusi pada peningkatan standar keselamatan dalam industri penerbangan. Penelitian ini mengonfirmasi bahwa Minimum Ignition Energy (MIE) dari bahan bakar avtur berada di kisaran 0.2 mJ - 0.5 mJ pada suhu bahan bakar 55°C– 65°C pada ketinggian 0 ft.

B. Saran

Nilai ini menekankan pentingnya langkah-langkah keselamatan ketat dalam penanganan dan penyimpanan bahan bakar untuk aviasi.

DAFTAR PUSTAKA

J. F. Gieras, 2013, Electrical Ignition of Fuel-Air Mixture in Aircraft Fuel Tanks, Electrical Review Journal, University of Technology and Life Sciences, Bydgoszcz, Poland.
 R. Hill, and Fuel Flammability Task Group, 1998; A Review Of The Flammability Hazard Of Jet A Fuel Vapor In Civil Transport Aircraft Fuel Tanks”, Fire Safety Section, AAR-422, Fuel Flammability Task Group, Federal Aviation Administration,
 J. M. Kutcha, 1975; Summary Of Ignition Properties Sof Jet Fuels And Other Aircraft Combustible Fluids, Technical Report AFAPL-TR-75-70, Air Force Aero Propulsion Laboratory, Ohio.
 L. J. Nestor, 1967; Investigation of Turbine Fuel Flammability Within Aircraft Fuel Tanks, FAA Report No. DS-67-7, Naval Air Propulsion Test Center.
 J. E. Shepherd and J.J. Lee, 2000; Spark Ignition Measurements in Jet A: part II, EDLR Report FM99-7, Explosion Dynamics Laboratory.
 Ted Bidle, 2004, Handbook Fuel Properties, Coordinating Research Council (CRC) Advisory Group.
 S. E. Wibowo, 2020, Perancangan Sistem Pelembam (Inerting) Tangki Bahan Bakar Pesawat Tempur IF-X, Master Thesis, Institute Teknologi Bandung.