

SIMULASI PENYEBARAN GAS BIOHIDROGEN DI DALAM LOJI BIOGAS MENGGUNAKAN PERKOMPUTERAN DINAMIK BENDALIR DAN PENILAIAN KESAN KEBAKARAN DAN LETUPAN

SIMULATION OF BIOHYDROGEN GAS DISPERSION IN A BIOGAS PLANT USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD) AND IMPACT ASSESSMENT OF FIRE AND EXPLOSION

Article history

Received

17 February 2021

Received in revised form

11 August 2022

Accepted

11 August 2022

Published Online

23 October 2022

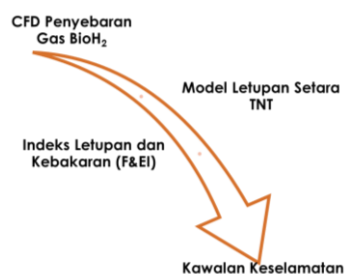
*Corresponding author
masli@ukm.edu.my

Masli Irwan Rosli^{a,b}, Ikhmal Zariq Al Imran Jamal Ikhsan^b, Dyg Siti Nurzailyn Abg Shamsuddin^b

^aInstitut Sel Fuel, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM, Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malaysia

^bJabatan Kejuruteraan Kimia dan Proses, Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM, Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malaysia

Graphical abstract



Abstrak

Pelepasan gas biohidrogen (bioH₂) secara tidak sengaja di dalam loji biogas berisiko tinggi dalam mengakibatkan insiden kebakaran dan letupan. Justeru, perkomputeran dinamik bendalir (CFD) telah digunakan untuk mengkaji penyebaran 158 kg gas bioH₂ melalui kebocoran paip pada tangki simpanan sfera bioH₂ tulen. Model letupan setara TNT mendapati zon ancaman yang boleh memusnahkan bangunan akibat tekanan lampau melebihi 55 kPa terletak pada radius 9.31 m dari pusat letupan di fermentor. Penilaian lanjut menggunakan indeks kebakaran dan letupan Dow (F&E) menjangkakan kemungkinan kerugian hari maksimum (MPDO) dan gangguan perniagaan (BI) sebanyak 43 hari dan USD165,210, masing-masing. Oleh itu, kawalan keselamatan dari segi penghapusan sumber pencucuhan, penggantian bahan, kawalan kejuruteraan, komponen keselamatan, reka bentuk susun atur, kawalan pentadbiran dan kelengkapan pelindung diri telah berjaya dicadangkan. Konklusinya, kajian ini telah berjaya mensimulasikan penyebaran gas bioH₂ dan menilai impak kebakaran dan letupan terhadap loji biogas.

Kata kunci: Penyebaran bioH₂, kebakaran dan letupan, perkomputeran dinamik bendalir, CFD, model letupan setara TNT, indeks kebakaran dan letupan Dow, F&E

Abstract

Accidental release of biohydrogen (bioH₂) gas in biogas plant has a high risk to cause fire and explosion incidents. Thus, computational fluid dynamics (CFD) was used to study the dispersion of 158 kg of bioH₂ gas through pipe leaks at a pure bioH₂ spherical storage tank. The TNT-equivalent explosion model found that the threat zone which can destroy buildings due to overpressure exceeding 55 kPa was located at a radius of 9.31 m from the centre of the explosion at the fermenter. Further evaluation using the Dow's fire and explosion index (F&E) expects a maximum probable day outage (MPDO) and business interruption (BI) of

43 days and USD165,210, respectively. Therefore, safety control in terms of elimination of ignition sources, material replacement, engineering controls, safety components, layout design, administrative controls and personal protective equipment have been successfully proposed. In conclusion, this study has successfully simulated the dispersion of bioH₂ gas and evaluated the impact of fire and explosion on biogas plant.

Keywords: BioH₂ dispersion, fire and explosion, computational fluid dynamics, CFD, TNT-equivalent explosion model, Dow's fire and explosion index, F&EI

© 2022 Penerbit UTM Press. All rights reserved

1.0 PENGENALAN

Hidrogen (H₂) telah memberikan harapan dalam memenuhi keperluan sumber tenaga alternatif yang mapan dan bersih bagi mengurangkan kebergantungan bahan api fosil. Proses biologi khususnya fermentasi gelap untuk menghasilkan bioH₂ lebih mendapat perhatian di dalam bidang penyelidikan sekitar 2 dekad ini kerana tidak memerlukan sebarang tenaga cahaya, keadaan proses yang sederhana, dan keperluan tenaga yang lebih rendah [1], [2]. Komposisi karbon dioksida (CO₂) dalam bioH₂ mentah daripada proses ini adalah sekitar 40 hingga 70 peratus isipadu [3].

Pelepasan efluen kilang minyak sawit (POME) ($\rho = 876 \text{ kg m}^{-3}$) tanpa pra-rawatan dapat memudaratkan alam sekitar kerana baunya yang tidak menyenangkan dan bahan organik terlarut terkandung di dalamnya mampu mencemarkan air [4]–[6]. Jabatan Alam Sekitar telah menguatkuasakan piawaian yang memerlukan POME dirawat sebelum membuangnya ke dalam saluran air [7]. Justeru, penggunaan POME sebagai bahan mentah untuk menghasilkan bioH₂ mampu merangsang ekonomi H₂, sekaligus mengurangkan impak efluen ini terhadap alam sekitar dengan merawatnya dan merendahkan kepekatan bahan pencemar. Di Malaysia, sesebuah kilang kelapa sawit kebiasaannya dapat menghasilkan POME sebanyak 630 hingga 672 tan/hari [8].

Seterusnya, penulenan gas bioH₂ diperlukan supaya ianya dapat digunakan untuk menjana kuasa elektrik melalui sistem sel fuel membran pertukaran-proton (PEMFC) [3], [9]. Proses penjerapan tekanan ayunan (PSA) merupakan sistem penulenan tipikal bagi gas sintesis (singas) dan juga reformate yang kaya dengan H₂ [10]. Proses ini beroperasi pada suhu ambien (298 K) sehingga (323 - 333 K), dan tekanan pula dianggarkan berada antara julat 10 sehingga 50 bar [11]–[13]. Ketulenan H₂ boleh mencapai sekitar 99.9 % [12], [14].

Perkomputeran Dinamik Bendalir (CFD) merupakan sebuah teknik komputer yang mampu menyelesaikan permasalahan aliran bendalir menggunakan kaedah numerikal [15]. Contohnya, Wang *et al.* [16] telah mensimulasikan penyebaran gas hidrogen dari kebocoran sebuah bekas simpanan menggunakan perisian Ansys Fluent. Keputusan

simulasi membuktikan bahawa bekas simpanan H₂ bertekanan tinggi yang mempunyai bukaan kebocoran yang luas mempunyai risiko besar untuk situasi berbahaya. Tauseef *et al.* [18] telah menjalankan kajian simulasi CFD untuk menentukan jenis model likat yang menghasilkan keputusan yang baik bagi kes penyebaran gas tumpat. Dalam kertas kajian ini, penulis membuktikan bahawa model likat $k-\epsilon$ *realizable* mampu menghasilkan keputusan yang lebih tepat jika dibandingkan dengan $k-\epsilon$ *standard*.

Impak letupan boleh dinilai menggunakan kaedah empirikal analitik, seperti model letupan setara TNT. Kaedah ini menganggarkan bahawa kuasa letupan awan wap (VCE) disamakan dengan jisim trinitrotoluena (TNT) yang akan menghasilkan letupan yang setara kuasanya [19]. Selain itu, penggunaan kaedah kualitatif iaitu indeks kebakaran dan letupan Dow (F&Ei) mampu menganggarkan kerugian angkara kebakaran dan letupan dari sudut ekonomi dengan efektif [20].

Fenomena pembakaran spontan berpunca daripada pelepasan atau kebocoran gas H₂ bertekanan tinggi akan mengakibatkan risiko kebakaran dan letupan yang tinggi daripada fasiliti bertekanan tinggi seperti saluran paip dan kebuk tekanan [21]. Oleh itu, kajian lanjut mengenai penyebaran bioH₂ dan kesan berturut-turut mesti dilakukan. Tambahan pula, tiada lagi penyelidikan khususnya kes pelepasan gas bioH₂ melalui proses biologi di loji biogas telah dilakukan buat masa ini. Seterusnya, keselamatan di dalam loji biogas juga boleh terjejas akibat daripada penyebaran gas bioH₂ jika tiada sebarang tindakan keselamatan dilakukan. Oleh itu, strategi dalam mengawal, mengurangkan atau mengelakkan penyebaran gas bioH₂ wajar dihasilkan supaya ianya dapat dipraktikkan jika berlakunya situasi yang tidak diingini di dalam loji biogas.

Kertas kajian ini dihasilkan untuk membangunkan model CFD bagi penyebaran gas bioH₂ di dalam loji biogas. Hasil simulasi akan digunakan untuk mengenal pasti impak letupan dan kebakaran kesan daripada penyebaran gas bioH₂. Akhirnya, kawalan keselamatan dapat dicadangkan bagi mengatasi atau mengurangkan risiko keselamatan samada dalam mencegah penyebaran gas bioH₂ atau mengurangkan impak kebakaran dan letupan di sebuah loji biogas.

2.0 METODOLOGI

2.1 Senario Insiden

Tangki simpanan bioH₂ tulen mengandungi 99.9% H₂, dan berkemungkinan penyebarannya berisiko paling tinggi terhadap kebakaran dan letupan berbanding unit operasi yang lain. Justeru, ruptur pada saluran paip gas bioH₂ tulen dari unit penjerapan tekanan ayunan (PSA) ke tangki simpanan tersebut dipilih sebagai punca pelepasan gas bioH₂. Insiden yang berlaku di sebuah loji biogas untuk jana kuasa sistem sel fuel membran pertukaran-proton (PEMFC) ini telah mengakibatkan pembentukan awan wap mudah terbakar di persekitaran loji. Seterusnya, pencucuhan pada awan wap tersebut menyebabkan letupan, iaitu sebuah proses yang menghasilkan gelombang bagas akibat pembebasan tenaga yang pesat. Gelombang bagas ini akan menjana tekanan lampau, lalu memberi kesan terhadap medium sekeliling dan udara akan menjadi panas disebabkan pemampatan [22].

2.2 Analisis Penyebaran Gas Biohidrogen

Pemproses komputer yang digunakan dalam pemodelan CFD ini ialah Intel® Core™ i5-8250U (sehingga 3.4 GHz), RAM 16 GB, dan kad grafik Nvidia GeForce MX150. Perisian Ansys versi 2021 R2 telah digunakan untuk analisis CFD. Bagi mengkaji penyebaran gas bioH₂ menggunakan CFD, pembinaan konsep loji biogas perlu dibuat terlebih dahulu. Untuk itu, penentuan diameter dalaman paip yang sesuai boleh ditentukan berdasarkan hubungan halaju gas, v terhadap kadar aliran isipadu sebenar Q_A (m³s⁻¹) dan luas dalaman paip, A (m²) yang mana v hendaklah kurang atau bersamaan 25 m s⁻¹.

$$v = \frac{Q_A}{A} \quad (1)$$

Bagi penentuan saiz ruptur paip gas, AIChE [23] telah mencadangkan jenis-jenis kejadian ruptur berdasarkan diameter paip (D_p) gas seperti berikut;

1. $D_p < 0.0508$ m: ruptur sepenuhnya
2. $0.0508 \text{ m} \leq D_p \leq 0.1016$ m: ruptur bersamaan paip bersaiz 0.0508 m
3. $D_p > 0.1016$ m: luas ruptur bersamaan 20% luas keratan rentas paip

Justeru, kuantiti gas H₂ yang terlepas ke udara, AQ boleh dikira dengan menggunakan Persamaan (2), yang mana P_a ialah tekanan mutlak ($P_g + 101.35$) (kPa), P_g ialah tekanan tolok pada aliran (kPa gauge), MW ialah jisim molekul H₂ (kg kmol⁻¹), T ialah suhu pada aliran (°C) dan D ialah diameter ruptur paip (mm).

$$AQ = 4.751 \times 10^{-6} D^2 P_a \sqrt{\frac{MW}{T + 273}} \quad (\text{kg s}^{-1}) \quad (2)$$

Seterusnya, strategi simulasi CFD ini bermula dengan pembinaan geometri 3D, kandang domain perkomputeran, dan keadaan sempadan dengan menggunakan perisian Ansys SpaceClaim. Proses penjaringan dibuat menggunakan perisian Ansys Fluent Meshing. Langkah seterusnya ialah dengan pengaturan model dan penyelesaian menggunakan perisian Ansys Fluent. Model CFD akan diselesaikan untuk mendapatkan profil kepekatan gas yang tersebar. Analisis kriteria penumpuan model CFD akan dibuat berdasarkan graf sisa berskala dan keseimbangan jisim. Akhir sekali, profil kepekatan yang paling signifikan daripada hasil simulasi akan dimanfaatkan untuk penentuan impak letupan di objektif yang seterusnya.

2.3 Analisis Impak Kebakaran dan Letupan

Model letupan setara TNT dibuat untuk mengkaji impak letupan menerusi nilai tekanan lampau secara spesifik, manakala F&EI dibuat khusus untuk mengkaji impak letupan & kebakaran terhadap ekonomi. Bagi kedua-dua analisis ini, unit operasi yang akan dipilih adalah bergantung kepada kepekatan bioH₂ yang tertinggi.

2.3.1 Penghasilan Model Letupan Setara TNT

Pertama, Persamaan (3) digunakan untuk mendapatkan fungsi kepada jarak berskala, Z_e (m kg^{-1/3}), yang mana x (m) ialah jarak dari pusat letupan, dan W_{TNT} (kg) ialah jisim setara TNT. W_{TNT} dapat dikira menggunakan Persamaan (4), yang mana W_{gas} (kg) ialah jisim gas mudah terbakar (H₂) yang mengambil tempat dalam letupan, ΔH_c ialah haba pembakaran gas mudah terbakar (H₂) (kJ kg⁻¹), dan E_{TNT} ialah tenaga letupan TNT (kJ kg⁻¹), manakala η ialah pecahan tenaga yang dilepaskan sebagai gelombang bagas [19]. Persamaan (5) digunakan untuk menentukan tekanan lampau, ΔP (kPa) oleh gelombang bagas disebabkan letupan [24].

$$Z_e = \frac{x}{(W_{TNT})^{1/3}} \quad (3)$$

$$W_{TNT} = \frac{W_{gas} \eta \Delta H_c}{E_{TNT}} \quad (4)$$

$$\Delta P = \frac{1772}{Z_e^3} - \frac{114}{Z_e^2} + \frac{108}{Z_e} \quad (5)$$

Seterusnya, tekanan lampau yang diperoleh akan diplotkan dalam bentuk graf melawan nilai x , iaitu jarak dari pusat letupan (m). Kekuatan tekanan lampau yang terhasil pada jarak yang berbeza akan dikaji terhadap impaknya pada keselamatan.

2.3.2 Penghasilan Indeks Kebakaran dan Letupan Dow (F&EI)

Secara ringkasnya penilaian impak menggunakan indeks F&EI adalah seperti di Rajah 1 berikut. Langkah

pertama dimulakan dengan memilih unit operasi yang paling tinggi kemungkinan untuk risiko hazard. Faktor bahan (MF) bagi gas H₂ ialah 21 [25]. Seterusnya, Jadual bahaya proses am (F1) dan Jadual bahaya proses khas (F2) dalam Jadual 4 dan 5 perlu diisi berdasarkan julat penalti yang diberi, kemudian hasil darab kedua-duanya akan mendapatkan F3.



Rajah 1 Ringkasan aliran penilaian impak (Sumber: AIChE [25])

Akhirnya, F&EI dapat dikira melalui hasil darab F3 dan juga MF. Persamaan (6) dan (7) digunakan untuk mendapatkan radius dan luas pendedahan.

$$\text{Radius Pendedahan, } R \text{ (m)} = 0.84 \times \text{F\&EI} \times 0.3048 \quad (6)$$

$$\text{Luas Pendedahan (m)} = \pi R^2 \quad (7)$$

Seterusnya, nilai luas pendedahan perlu ditentukan menggunakan Persamaan (8) berikut, yang mana nilai penggantian bersamaan dengan nilai luas pendedahan, dan faktor peningkatan pula dapat ditentukan menggunakan Persamaan (9),

$$\text{Nilai Penggantian} = \text{Kos Asal} \times 0.82 \times \text{Faktor Peningkatan} \quad (8)$$

$$\text{Faktor Peningkatan} = \frac{\text{CEPCI}_{2021}}{\text{CEPCI}_{1986}} \quad (9)$$

Bagi penilaian impak terhadap ekonomi, nilai luas pendedahan (nilai penggantian) akan digunakan untuk mengenal pasti jumlah hari yang rugi dan tidak dapat beroperasi. Jadi bagi penilaian ini, faktor kerosakan perlu ditentukan terlebih dahulu berdasarkan hubungkait antara faktor bahaya unit (F3) dan faktor bahan (MF) dengan menggunakan Rajah 8 dalam AIChE [25]. Seterusnya, nilai faktor kerosakan yang telah ditentukan akan digunakan untuk mendapatkan nilai asas kemungkinan kerosakan harta benda maksimum (MPPD_{Asas}) menggunakan Persamaan (10).

$$\text{MPPD}_{\text{Asas}} = \text{Nilai Luas Pendedahan} \times \text{Faktor Kerosakan} \quad (10)$$

Dengan tidak mempertimbangkan faktor kredit kawalan kerugian, kemungkinan kerosakan harta benda maksimum sebenar (MPPD) adalah bersamaan dengan nilai MPPD_{Asas}. Justeru, nilai ini

akan digunakan untuk mendapatkan kemungkinan kerugian hari maksimum (MPDO) dengan menggunakan Rajah 9 dalam AIChE [25] atau menggunakan Persamaan (11) berikut, yang mana X mewakili nilai MPPD (\$MM), dan Y mewakili nilai MPDO (hari) pada had kebarangkalian 70% atas.

$$\text{Log } Y = 1.550233 + 0.598416(\text{log} X) \quad (11)$$

Gangguan perniagaan (BI) dikira menggunakan Persamaan (12) berikut, yang mana VPM ialah nilai pengeluaran produk dalam sebulan (USD) dan nilai 0.7 mewakili kos tetap dan keuntungan.

$$\text{BI} = \frac{\text{MPDO}}{30} \times \text{VPM} \times 0.70 \quad (12)$$

2.4 Cadangan Kawalan Keselamatan

Teknik kawalan risiko daripada DOSH [26] akan digunakan berdasarkan hierarki kawalan keselamatan dan cadangan akan diberikan apabila impak kebakaran dan letupan dapat dikenal pasti. Antara skop cadangannya adalah terhadap kelengkapan, pekerja, tempat kerja dan lain-lain lagi.

3.0 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

3.1 Analisis Penyebaran Gas Biohidrogen Menggunakan CFD

Nisbah pengeluaran bioH₂ daripada POME melalui proses fermentasi gelap agak rendah iaitu 1.1 : 1 [8], [27]. Kapasiti yang tinggi adalah diperlukan untuk mencipta senario kes terburuk supaya penyebaran gas bioH₂ akan menjadi lebih meluas di sekitar kawasan loji biogas. Jadi, dengan memilih fermentor berkapasiti 3000 m³ (kapasiti kerja: 90%), sebanyak 2700 m³ POME/hari diperlukan untuk menghasilkan 2970 m³ bioH₂ mentah/hari. Seterusnya, Rajah 4 menunjukkan rajah aliran proses (PFD) penghasilan bioH₂, diadaptasikan dan diolah daripada loji biogas dalam kertas kajian daripada Mahmud *et al.* [8]. Lokasi loji biogas ditetapkan di Bestari Jaya. Pemilihan lokasi kajian adalah penting untuk mengkaji bagaimana keadaan cuaca memainkan peranan dalam penyebaran gas bioH₂ dan seterusnya mempengaruhi impak kebakaran dan letupan.

Pertama sekali, POME mentah pada suhu 353 hingga 363 K akan disalurkan ke dalam kolam penyejuk POME untuk mengurangkan suhu POME [8], [28], [29]. Seterusnya, POME mentah mengalir ke dalam fermentor (FR-101) melalui paip suntikan pada kadar aliran yang sebanyak 2,365,200 kg hari⁻¹ dan suhu terkawal pada 323 K. Kitar semula sisa produk ke dalam lubang pencampur mahupun ke proses pencernaan anaerobik untuk menghasilkan biometana (bioCH₄) seperti dalam Mahmud *et al.* [8] tidak diambil kira ke dalam pengiraan mahupun analisis bagi memudahkan proses kajian. Kemudian, bioH₂ mentah sebanyak 2,488.6 kg hari⁻¹ yang terhasil

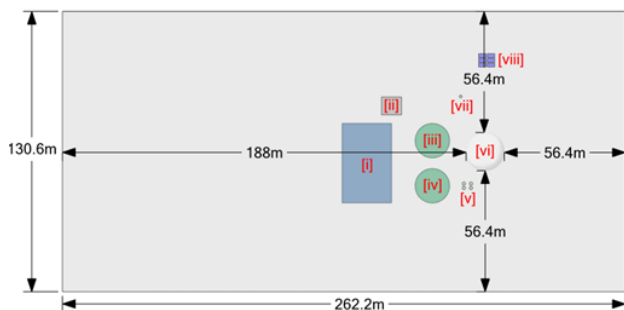
akan disimpan ke dalam tangki silinder (TK-101) sebagai persediaan sebelum memasuki proses PSA untuk mendapatkan bioH₂ berketulenan tinggi. BioH₂ tulen (99.9% H₂, 0.1% CO₂) pada kadar aliran 162.3 kg hari⁻¹ yang keluar daripada unit PSA ini akan disimpan ke dalam tangki sfera bertekanan tinggi (TK-102), sebelum digunakan sebagai bahan bakar oleh sistem sel fuel membran pertukaran-proton (PEMFC) untuk menghasilkan elektrik.

Pelepasan gas bioH₂ adalah dari ruptur paip pada tangki simpanan gas bioH₂ tulen, jadi berdasarkan data aliran 10 dalam Rajah 4 (suhu, tekanan, dan kadar aliran H₂), jadual data paip NPS 4 SCH 160, dan juga Persamaan (1), beberapa siri pengiraan telah dibuat dan akhirnya paip nominal bersaiz 0.1016 m berdiameter dalaman 0.09 m digunakan sebagai saiz saluran paip di aliran 10. Berdasarkan pengiraan saiz paip aliran 10 tersebut, diameter ruptur sebanyak 0.0508 m dipilih berdasarkan kes kedua bagi jenis-jenis kejadian ruptur berdasarkan diameter paip gas. Walaupun pada saluran paip ini terdapat juga gas CO₂, namun disebabkan kuantitinya yang begitu sedikit, hanya gas H₂ yang dijadikan sebagai andaian bagi kiraan ini. Justeru, dengan menggunakan Persamaan (2), AQ ialah bersamaan dengan 1.12 kg s⁻¹, manakala ketinggian pelepasannya dianggarkan sekitar 10 m dari tanah. Ukuran geometri bagi unit-unit operasi dapat dilihat pada Jadual 1 berikut.

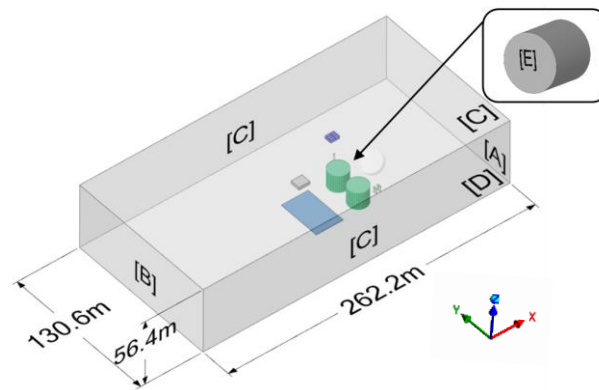
Penempatan dan jarak antara unit operasi dibuat berpandukan panduan daripada AIChE [30], manakala Rajah 2 dan Rajah 3 menunjukkan geometri loji biogas dan juga kod nama unit operasi serta kod nama keadaan sempadan yang terlibat.

Jadual 1 Ukuran geometri loji

Kod	Unit Operasi	Dimensi (P × L × T) (m)
[i]	Kolam POME	37 × 23 × 0.2
[ii]	Lubang pencampur	8.3 × 9.3 × 2.5
[iii]	Fermentor	16.04(D) × 15(T)
[iv]	Tangki silinder gas BioH ₂ mentah	16.04(D) × 15(T)
[v]	PSA (×1 unit)	1.5(D) × 3.7(T)
[vi]	Tangki sfera gas bioH ₂ tulen	17.8(D)
[vii]	Suar Gas	1.2(D) × 5.02(T)
[viii]	PEMFC (×1 unit)	3.5 × 1.9 × 2.3



Rajah 2 Pandangan atas geometri loji dan kod nama unit operasi



Rajah 3 Geometri loji dan kod nama keadaan sempadan

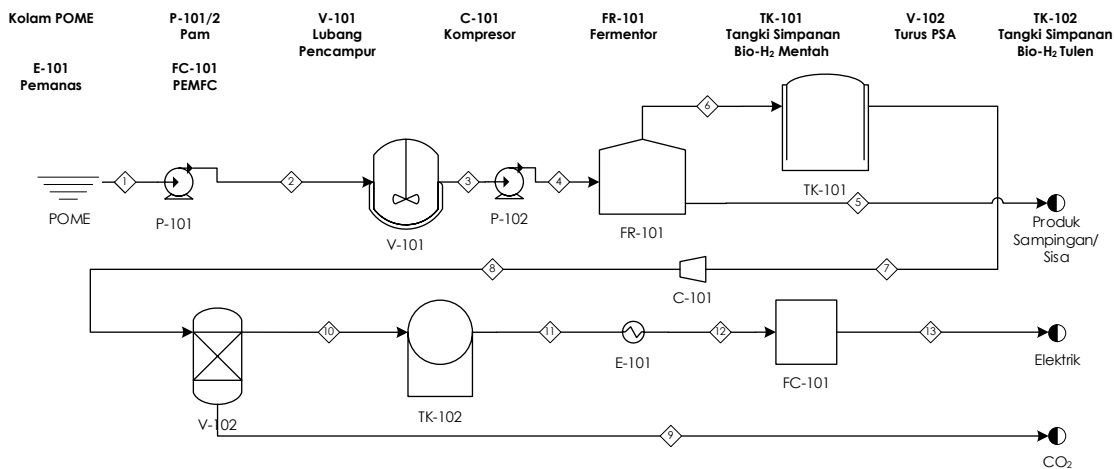
Jadual 2 menunjukkan keterangan bagi keadaan sempadan berdasarkan Tauseef, Rashtchian & Abbasi [17], Tominaga & Stathopoulos [31] dan Wijesooriya *et al.* [32]. Penyebaran gas diandaikan berlaku pada waktu malam, dan di Bestari Jaya, purata suhu pada waktu malam ialah 299.15K. Halaju udara yang rendah iaitu 2 m s⁻¹, berdasarkan kategori F dalam kelas kestabilan Passquill telah dipilih bagi mewakili analisis kes terburuk [33]. Jika halaju angin yang lebih laju digunakan, contohnya pada hari dan cuaca yang berangin, maka kadar pencairan bagi gas bioH₂ yang tersebar akan meningkat. Kedua-dua parameter ini digunakan bagi keadaan sempadan [A], untuk menghasilkan pengaliran angin dalam domain perkomputeran. Berdasarkan model Gaussian, arah dan kelajuan angin, serta kadar pelepasan gas bioH₂ adalah malar [34]. Sempadan [B] mewakili sempadan angin keluar dari domain perkomputeran dan jenis sempadan yang ditetapkan ialah aliran keluar bagi mewakili fluks resapan sifar.

Jadual 2 Keterangan keadaan sempadan

Kod	Sempadan	Jenis Sempadan	Nota
[A]	Sempadan angin masuk	Halaju masuk	2ms ⁻¹ , 299.15 K 23% O ₂ , 77% N ₂ (pecahan jisim)
[B]	Sempadan angin keluar	Aliran keluar	Fluks resapan sifar
[C]	Sempadan atas, sisi	Simetri	Kecerunan sifar bagi semua pembolehubah jenis aliran
[D]	Sempadan tanah, dinding bangunan	Dinding	Keadaan tidak licin
[E]	Sempadan gas masuk	Aliran masuk jisim	1.12 kg s ⁻¹ H ₂ , suhu 298 K

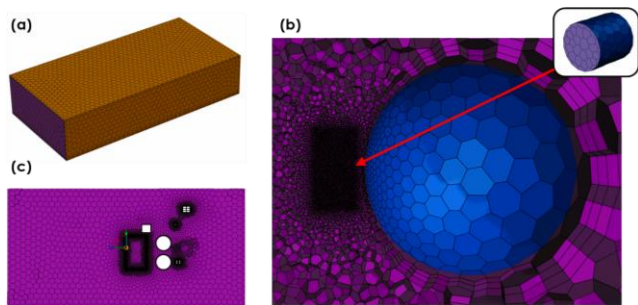
Rajah 5 menunjukkan hasil proses penjaringan, dan jenis jejaring yang digunakan ialah polihedron kerana menurut Wijesooriya *et al.* [32], ia mampu meramal aliran peredaran semula pada bilangan sel yang lebih rendah berbanding dengan sel tetrahedron. Proses penjaringan tempatan telah dilakukan di sekitar kawasan punca pelepasan gas menggunakan kaedah badan pengaruh (BOI) dan kaedah saiz muka dibuat pada punca pelepasan. Jejaring yang berkualiti haruslah mempunyai kepencongan maksimum dan nisbah aspek maksimum kurang daripada 0.95 dan 18, masing-masing, manakala kualiti orthogonal minimum pula hendaklah melebihi 0.01. Jumlah bilangan sel ialah sebanyak 367,326 manakala kepencongan maksimum, nisbah aspek maksimum dan kualiti orthogonal minimum telah mencapai nilai optimum yang diperlukan iaitu sebanyak 0.51, 10.16 dan 0.74, masing-masing.

Bagi proses pengaturan model dan penyelesaian, keadaan fana telah digunakan dalam simulasi ini kerana aliran penyebaran gas bioH₂ berubah mengikut masa. Pecutan graviti ditetapkan pada -9.81 m s⁻² pada paksi Z. Jenis penyelesai ialah berasaskan tekanan dan formulasi halaju ditetapkan sebagai mutlak. Di ruangan tetapan model pengangkutan spesies, campuran H₂-udara telah ditetapkan sebagai bahan campuran dan resapan sumber tenaga juga dihidupkan. Manakala model likat yang dipilih ialah *k-ε realizable* (2-persamaan), dengan menghidupkan jenis rawatan dekat-dinding kepada fungsi dinding standard. Pemalar-pemalar model dalam tetapan model *k-ε realizable* ini telah dibiarkan sebagai tetapan lalai. Penyelesai yang digunakan dalam Ansys Fluent ialah skema SIMPLE, dan jenis fluks ialah Rhie-Chow (berdasarkan jarak).



Nombor Strim	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Tekanan (bar)	1.0	2.0	1.5	2.0	1.0	1.0	1.0	10.1	10.1	10.1	8.0	3.0
Suhu (K)	333.2	333.2	328.2	328.2	323.2	323.2	298.2	298.2	298.2	298	298	313.2
Fasa	C	C	C	C	C	G	G	G	G	G	G	G
Kadar Alir Jisim (kg/d)	2365200	2365200	2365200	2365200	2362711	2488.6	2488.6	2488.6	2326.3	162.3	162.3	162.3
Kadar Alir Jisim Komponen (kg/d)												
POME	2365200	2365200	2365200	2365200	0	0	0	0	0	0	0	0
Hidrogen (H ₂)	0	0	0	0	0	160.2	160.2	160.2	0.2	160.0	160.0	160.0
Karbon Dioksida (CO ₂)	0	0	0	0	0	2328.5	2328.5	2328.5	2326.2	2.3	2.3	2.3
Sisa ke Kitar Semula/Proses Biogas CH ₄	0	0	0	0	2362711	0	0	0	0	0	0	0

Rajah 4 Rajah aliran proses penghasilan bioH₂ daripada fermentasi gelap POME



Rajah 5 Penjaringan: (a) penjaringan permukaan (b) penjaringan setempat (BOI) & saiz muka (c) penjaringan isipadu

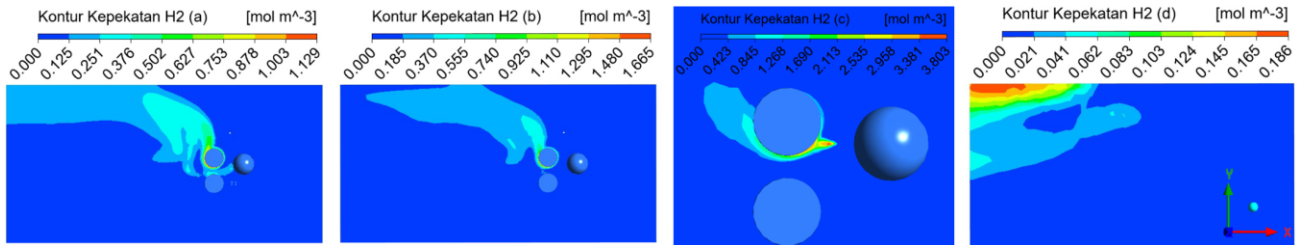
Langkah masa sebanyak 1,415 pada saiz langkah masa sebanyak 0.1 saat telah disetkan menjadikan jumlah masa pelepasan ialah sebanyak 141.5 saat atau 2.36 minit. Maka, pelepasan bioH₂ ialah sebanyak 158 kg H₂ daripada 160 kg H₂/hari yang terhasil dari unit PSA. Jumlah iterasi maksimum bagi setiap 1 langkah masa disetkan sebanyak 45 kali dan proses perkomputeran ini telah mengambil masa sekurang-kurangnya 48 jam. Analisis kriteria penumpuan model telah dibuat, dan berdasarkan graf sisa berskala, kesemua sisa telah berjaya mencapai penumpuan sekurang-kurangnya 10⁻³ manakala bagi analisis keseimbangan jisim,

peratusan ralat hanya 0.397%, membuktikan simulasi ini berjaya dan boleh diterima.

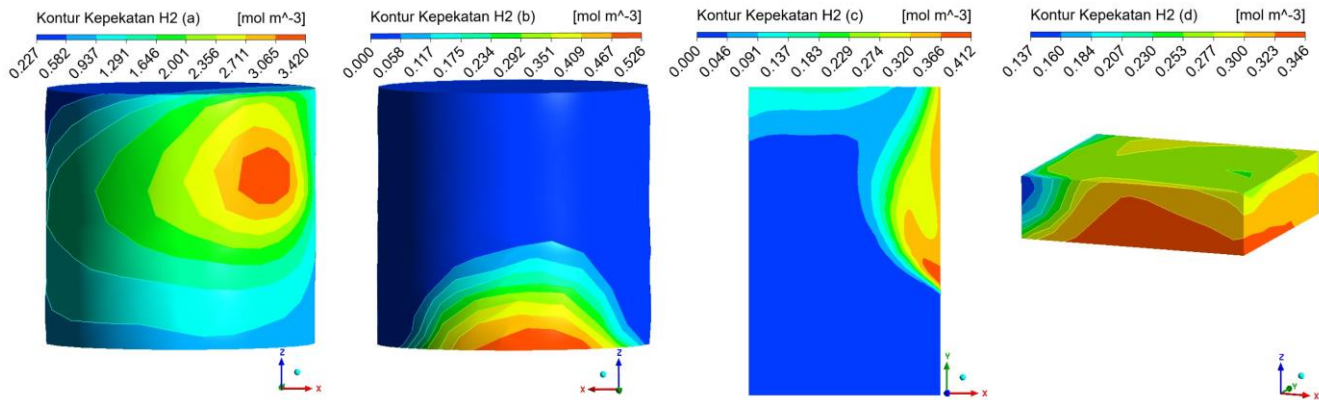
Rajah 6 menunjukkan kontur kepekatan gas bioH₂ pada ketinggian paksi-z yang berbeza bermula dari ketinggian 2.5 m, 5 m, 10.5 m dan 25 m dari tanah. Pada ketinggian 2.5 m dan 5 m, penyebaran kelihatan lebih meluas namun kepekatan maksimum di satah-satah ini tidak begitu tinggi iaitu sekitar 1.129 mol m⁻³ dan 1.665 mol m⁻³ di kawasan fermentor. Kepekatan agak tinggi terletak pada ketinggian 10.5 m, kerana gas tersebut terlepas pada ketinggian yang hampir sama. Pada ketinggian 25 m, kawasan penyebaran gas tidak kelihatan begitu meluas, namun gas ini mulai tersebar ke atas selepas

pelepasan disebabkan ketumpatan gas H₂ yang ringan daripada udara. Jadi, ini membuktikan bahawa, ketinggian punca pelepasan memainkan peranan penting dalam menentukan bentuk gas yang tersebar dan juga kepekatannya.

Berdasarkan Rajah 7, unit fermentor mempunyai kepekatan bioH₂ yang paling tinggi berbanding unit-unit lain iaitu 3.42 mol m⁻³. Kepekatan tertinggi berada di kawasan tersebut disebabkan kedudukannya yang terdekat dengan punca pelepasan. Disebabkan kepekatan bioH₂ adalah yang tertinggi di kawasan fermentor, maka unit operasi ini dipilih sebagai unit berisiko tertinggi untuk mengalami letupan dan kebakaran dalam analisis yang seterusnya.



Rajah 6 Kontur kepekatan bioH₂ pada t=2.36 minit dan (a) z=2.5m (b) z=5m (c) z=10.5 m (d) z=25m



Rajah 7 Kontur kepekatan bioH₂ pada unit (a) fermentor (b) tangki simpanan silinder gas bioH₂ mentah (c) kolam POME (d) lubang pencampur

3.2 Analisis Impak Kebakaran dan Letupan Menggunakan Model Letupan Setara TNT dan Indeks Kebakaran dan Letupan Dow (F&EI)

Model letupan setara TNT telah dibina untuk mengkaji impak letupan berpunca daripada unit fermentor. Jumlah bioH₂ (H₂ sahaja) yang tersebar ialah sebanyak 158 kg bersamaan dengan 1763 m³. Jadual 3 menunjukkan data-data analisis bagi model ini.

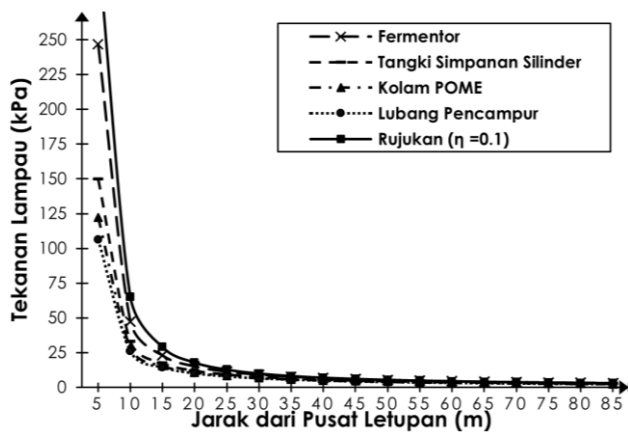
Jadual 3 Data model letupan setara TNT

Data	Unit	Nilai
Isipadu BioH ₂ yang Terlepas	m ³	1763
Kepekatan BioH ₂ di Unit Fermentor	mol m ⁻³	3.42

Data	Unit	Nilai
Jisim H ₂ (W _{Gas})	kg	12.16
Haba Pembakaran H ₂ (ΔH _C) ^a	kJ kg ⁻¹	120,021.6
Tenaga Letupan TNT (E _{TNT}) ^b	kJ kg ⁻¹	4,680
Pecahan Tenaga (η) ^c	-	0.05
Jisim Setara TNT (W _{TNT})	kg	15.59

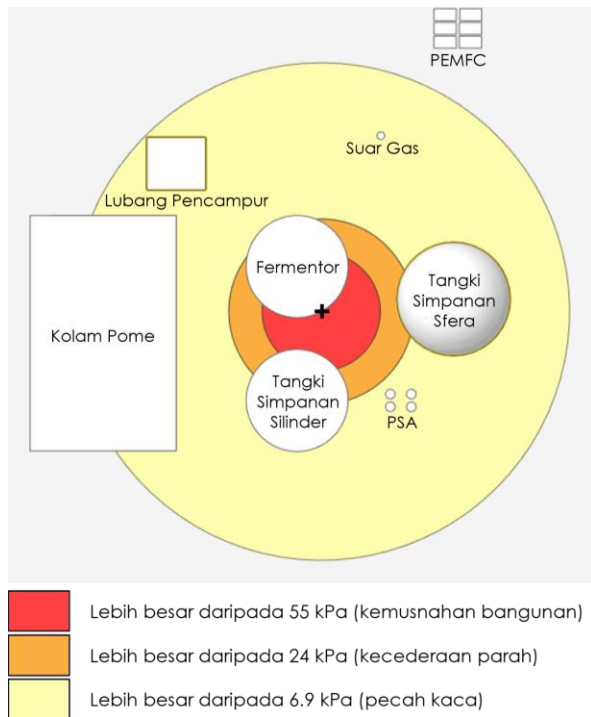
Sumber: Mannan [35]^a, Abdul Rashid et al. [22]^b, FM Global [36]^c

Dengan menggunakan Persamaan (4), jisim setara TNT (W_{TNT}) ialah 15.59 kg. Dengan menggunakan Persamaan (3) dan (5), graf tekanan lampau melawan jarak dari pusat letupan dapat dilihat dalam Rajah 8.



Rajah 8 Graf tekanan lampau melawan jarak dari pusat letupan

Perbandingan dengan pusat letupan pada unit-unit lain juga dibuat bagi menunjukkan kesan kepekatan yang berbeza terhadap impak letupan. Model ini telah ditentusahkan dengan hasil kajian daripada Soman & Sundararaj [37] mengenai letupan gas H₂ berjisim setara TNT sebanyak 27.22 kg dan membuktikan bahawa tekanan lampau adalah berkadar songsang terhadap jarak pusat letupan, dan kesemua graf menunjukkan corak yang sama. Rajah 9 menunjukkan zon ancaman letupan yang dibahagikan kepada tiga iaitu zon merah, jingga dan kuning bagi menunjukkan tahap perhatian tekanan lampau yang dapat memberikan impak di loji biogas ini [38].



Rajah 9 Zon ancaman letupan berdasarkan tekanan lampau

Pada jarak 9.31 m dari pusat letupan, tekanan lampau adalah sekurang-kurangnya 55 kPa, dan kemusnahan bangunan boleh berlaku dalam zon merah ini. Unit fermentor dan tangki simpanan silinder terletak dalam sebahagian zon merah ini, dan amat berisiko untuk musnah. Seterusnya, tekanan lampau sekurang-kurangnya sebanyak 24 kPa boleh berlaku pada jarak 14.56 m dari pusat letupan, dan ia boleh menyebabkan kecederaan yang parah jika sesiapa berada dalam zon jingga ini. Berdasarkan Jadual 1 dalam Abdul Rashid *et al.* [22], zon ini dianggarkan mampu menghancurkan batu bata rumah, dan menyebabkan 50% kemusnahan pada rumah. Justeru, zon ini juga mampu merosakkan unit fermentor, dan juga kedua-dua tangki simpanan gas.

Zon kuning mempunyai tekanan lampau sekurang-kurangnya 6.9 kPa pada jarak 39 m dari pusat letupan, dan hampir meliputi keseluruhan kawasan loji biogas ini, tidak termasuk unit PEMFC yang berada pada jarak yang sangat jauh dari unit-unit lain. Impak tertinggi boleh mengakibatkan kaca-kaca pecah, serta runtuh dinding konkrit, kerosakan kecil terhadap struktur dan sebagainya berdasarkan Jadual 1 dalam Abdul Rashid *et al.* [22]. Secara amnya, letupan ini memberikan impak yang besar terhadap unit-unit operasi utama dan sekurangnya 50% kerosakan dan kemusnahan dapat dianggarkan padanya. Namun, impaknya terhadap manusia berkemungkinan dapat dikurangkan sekiranya, pergerakan manusia di sekitar kawasan pemrosesan adalah terkawal, dan bangunan pentadbiran juga diletakkan sedikit jauh dari zon kuning.

Seterusnya, impak letupan dan kebakaran pada loji biogas ini dinilai terhadap kerugian ekonomi dengan menggunakan F&EI. Jadual 4 dan Jadual 5 diisi berdasarkan panduan diberi oleh AIChE [25] bersama pertimbangan sendiri yang sesuai dengan keadaan unit operasi.

Jadual 4 Bahaya proses am (F1)

Jenis Proses	Julat Penalti	Nilai
Faktor Asas	-	1
Reaksi Kimia Eksotermik	0.30 – 1.25	0.3
Pengendalian dan Pemindahan Bahan	0.25 – 1.05	0.85
Capaian/Akses	0.20 – 0.35	0.2

Bagi kategori reaksi eksotermik dalam Jadual 4, penalti sebanyak 0.3 telah dipilih kerana proses fermentasi gelap dalam fermentor ini boleh dianggap sebagai proses eksotermik ringan. Pengendalian dan pemindahan bahan dipilih sebanyak 0.85 kerana gas hidrogen mempunyai nilai N_f sebanyak 4 bagi pengkelasan NFPA [25]. Capaian atau akses pula dianggarkan sebanyak 0.2 dengan mengandaikan

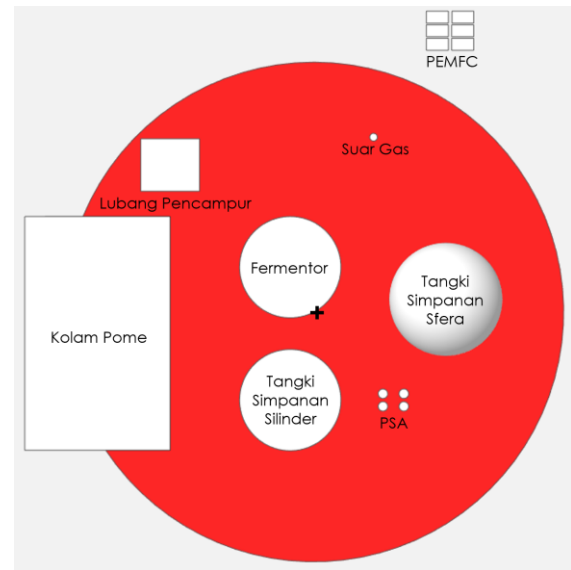
terdapat potensi masalah kawalan kebakaran disebabkan akses tidak mencukupi.

Seterusnya, bagi operasi dalam atau berdekatan julat kemudahbakaran dalam Jadual 5 nilai 0.3 telah dipilih bagi kategori proses terganggu atau pembersihan terganggu dengan mengandaikan unit fermentor ini akan berada atau menghampiri julat kemudahbakaran sekiranya terdapat kegagalan pada mana-mana unit peralatan atau instrumentasi. Bagi penalti tekanan pula, nilai 0.18 pula dipilih berdasarkan Rajah 2 dalam AIChE [25], berdasarkan tekanan operasi fermentor sebanyak 1.013 bar. Penalti bagi hakisan dan kakisan serta kebocoran pula dianggarkan pada nilai 0.75 dan 0.4, masing-masing. Akhir sekali, penalti sebanyak 0.5 diberikan kerana unit fermentor ini mempunyai pengacau.

Jadual 5 Bahaya proses khas (F2)

Jenis Proses	Julat Penalti	Nilai
Faktor Asas	-	1
Proses terganggu atau pembersihan terganggu	0.3	0.3
Tekanan	-	0.18
Hakisan dan Kakisan	0.1 – 0.75	0.75
Kebocoran	0.10 – 1.50	0.4
Peralatan berpusing	0.5	0.5

Akhirnya, nilai F1 dan F2 telah diperoleh sebanyak 2.35 dan 3.13 menjadikan nilai F3 dan F&EI sebanyak 7.36 dan 154.47, masing-masing. Justeru, insiden ini dikategorikan sebagai berat berdasarkan Jadual 6 dalam AIChE [25]. Dengan menggunakan Persamaan (6) dan (7), radius zon pendedahan ialah sebanyak 39.55 m, menjadikan luas zon ancaman sebanyak 4,916 m². Pada keluasan ini, unit-unit yang terkesan ialah kolam POME, lubang pencampur, fermentor, tangki simpanan bioH₂ mentah, PSA, tangki simpanan sfera bioH₂ tulen dan suar gas. Seterusnya, dengan merujuk Rajah 8 dalam AIChE [25], dan Faktor Bahan sebanyak 21, nilai Faktor Kerosakan ialah 0.82. Oleh itu, 82% kerosakan dianggarkan berlaku dalam zon ini. Radius zon pendedahan ancaman dapat dilihat seperti dalam Rajah 10 berikut. Pusat bahaya kebakaran dan letupan dianggarkan bersamaan dengan pusat letupan seperti dalam Rajah 9.



Rajah 10 Zon pendedahan ancaman kebakaran dan letupan daripada F&E

Berdasarkan Persamaan (9), faktor peningkatan dikira berdasarkan nilai CEPCI pada tahun 1986 dan 2021, iaitu sebanyak 318.4 dan 698.27 menjadikan nilainya ialah 2.19. Kos asal meliputi harga asal unit pemrosesan, dan juga bahan [25]. Justeru, Jadual 6 menunjukkan kos asal unit operasi dan termasuk kos bahan yang terkesan angka kebakaran dan letupan dalam analisis ini. Kos bagi fermentor, tangki-tangki simpanan, PSA dan suar gas dianggarkan dengan merujuk laman sesawang Alibaba.com. Kos unit-unit tambahan dan lain-lain turut diambil kira bagi analisis ini. Harga POME diabaikan kerana ia merupakan sisa efluen yang perlu dirawat agar patuh dengan peraturan alam sekitar [39]. Jadi, hanya harga keuntungan jualan H₂ dan CO₂ sahaja yang diambil kira. Berdasarkan Rajah 4, jumlah pengeluaran gas H₂ dan CO₂ ialah 160.2 kg H₂/hari dan 2,328.5 kg CO₂/hari, menjadikan nilainya ialah sebanyak USD4,805/hari dan USD699/hari, masing-masing. Jumlah kos asal ialah USD925,004, dengan menggunakan Persamaan (8), maka nilai luas pendedahan ialah sebanyak USD1,663,442.

Dengan menggunakan Persamaan (10) dan (11), MPPD ialah USD1,371,310 (\$MM1.371 pada paksi-x) dan MPDO pula ialah 43 hari jika limit kebarangkalian 70% atas yang digunakan. Berdasarkan nilai pengeluaran H₂ dan CO₂ sebanyak USD165,106/bulan (30 hari), dengan menggunakan Persamaan (12), BI dianggarkan sebanyak USD165,210.

Jadual 6 Kos asal

Kategori	Keterangan	Nilai (USD)
	Fermentor	73,000
	Tangki Simpanan Silinder	10,000
	Tangki Simpanan Sfera	100,000
Unit Operasi	PSA	80,000
	Suar Gas	8,000
	Pam (2 unit) & Kompresor ^a	60,000
	Pemanas ^a	30,000
	Unit Tambahan & lain-lain ^b	558,500
Bahan	H ₂ (USD30/kg) ^c	USD4,805/hari
	CO ₂ (USD0.3/kg) ^c	USD699/hari
JUMLAH		925 004

Sumber: Mahmud *et al.* [8]^a, Lok *et al.* [39]^b, Han *et al.* [40]^c

Disebabkan pengeluaran gas bioH₂ menerusi proses fermentasi gelap agak rendah, ia telah memberi kesan terhadap jumlah nilai pengeluaran H₂ dan CO₂ yang agak sedikit dalam kajian ini. Kendatipun begitu, jika proses ini telah dinaik taraf di masa akan datang, nilai pengeluaran bioH₂ akan meningkat dan sekaligus BI juga akan meningkat.

Model letupan setara TNT berjaya menunjukkan kerosakan yang mampu dihasilkan oleh letupan pada jarak yang berbeza dari pusat letupan, manakala analisis F&EI berjaya menganggarkan kerugian ekonomi disebabkan insiden ini. Berbeza dengan model letupan setara TNT, F&EI hanya mampu menganggarkan peratus kerosakan dalam zon ancaman, tanpa mengetahui secara spesifik tahap kerosakan pada setiap jarak dari pusat letupan. Radius dan luas zon yang terdedah kepada impak letupan mahupun kebakaran bagi kedua-dua analisis ini menunjukkan keputusan yang hampir sama. Justeru, gabungan kedua-dua analisis ini sangat serasi dan berkesan dalam menentukan impak insiden kebakaran dan letupan.

3.3 Cadangan Kawalan Keselamatan di Loji Biogas

Cadangan kawalan keselamatan di loji biogas bermula dengan penghapusan sumber pencucuhan, atau haba dalam segi tiga api. Antara contoh sumber pencucuhan ialah permukaan panas, nyala api dan gas panas, percikan api yang dihasilkan secara mekanikal, peralatan elektrik, dan juga elektrik statik [41].

Bagi kategori penggantian, keluli karbon boleh ditukar ganti kepada keluli tahan karat pada bahan binaan unit operasi. Saluran paip H₂ juga boleh digantikan kepada besi tahan karat berketulenan tinggi untuk mengelakkan fenomena rapuhan H₂ dan seterusnya kebocoran. Semakin tinggi kekuatan paip,

semakin rendah kebarangkalian paip bocor. Paip, injap pelega dan injap keselamatan yang telah rosak hendaklah diganti secepat mungkin bagi mengelakkan sebarang insiden tidak diingini.

Bagi kawalan kejuruteraan, kakitangan yang bertugas perlulah membuat penyelenggaraan berkala pada unit operasi yang berkenaan mengikut spesifikasi yang betul. Kemudian, mereka hendaklah menilai dan merekodkan segala isu-isu yang berlaku, supaya dapat menentukan waktu dan tarikh yang sesuai untuk proses selenggara semula. Pengesan gas boleh digunakan untuk mengesan sebarang kebocoran gas di loji biogas. Bagi gas mudah terbakar seperti H₂, dan hidrogen sulfida (H₂S), pengesan manik pemangkin dan pengesan inframerah sesuai digunakan [41]. Bagi gas CO₂, pengesan gas paling terkenal ialah pengesan gas inframerah tidak-menyebar (NDIR) [42]. Selain itu, reka bentuk tangki simpanan bioH₂ perlulah mempunyai ruang yang cukup bagi membenarkan pengudaraan yang baik dan mengawal tekanan dalam tangki pada kadar yang selamat. Kesemua unit operasi perlulah mempunyai kebolehcapaian yang baik bagi memudahkan kerja-kerja pemerhatian dan penyelenggaraan. Tangki simpanan bioH₂ juga boleh direka bentuk semula, dengan cara membahagikan tangki-tangki simpanan kepada kapasiti yang lebih kecil untuk mengurangkan impak sekiranya penyebaran berlaku. Berdasarkan Rajah 9, bilik kawalan hendaklah berada di luar zon kuning, namun jika perlu, pihak yang bertanggungjawab hendaklah mereka bentuk perlindungan letupan seperti dinding serap letupan pada bangunan tersebut.

Bagi kategori kawalan pentadbiran pula, pihak pentadbir hendaklah merangka pelan dan mengadakan latihan keselamatan setiap tahun kepada kakitangan lama mahupun baru oleh pihak yang bertauliah. Selain itu, pelan kecemasan yang bagus perlu dirangka sebaik mungkin dan mengemaskini pelan jika terdapat sebarang perubahan pada proses mahupun reka bentuk unit operasi, dan simulasi kecemasan kebakaran perlu diadakan setiap tahun secara rawak, untuk melatih setiap kakitangan loji terhadap sebarang kemungkinan. Seterusnya, pihak pentadbir hendaklah bertanggungjawab dalam memastikan setiap kakitangan loji mempunyai sijil pengikitrafan latihan dalam mengendalikan sebarang proses di loji. Sebarang insiden buruk yang berlaku di loji hendaklah direkodkan ke dalam rekod keselamatan, untuk meneliti dan membuat penambahbaikan terhadap sebarang langkah-langkah keselamatan yang tidak berkesan. Papan tanda larangan merokok dan Ex Zone hendaklah diletakkan di kawasan loji supaya dapat memberikan amaran awal kepada bahaya kebakaran dan letupan. Sementara itu, orang awam dan orang luar perlulah dihalang daripada memasuki kawasan loji tanpa kebenaran dan alasan yang kukuh. Alatan pemadam api hendaklah sentiasa berada dalam keadaan yang baik dan ditukar baru sekiranya telah tamat tarikh luput, dan diletakkan di kawasan yang mudah dicapai.

Kelengkapan pelindung diri mampu memberikan perlindungan tambahan terhadap setiap individu yang memakainya. Kakitangan yang terlibat disarankan memakai alat pernafasan serba lengkap (SCBA) di kawasan fermentor dan tangki simpanan bioH₂ sebagai langkah berjaga-jaga terhadap simptom asfiksia. Sut keselamatan yang sesuai, pelindung muka, cermin mata pelindung juga hendaklah dipakai untuk melindungi tubuh dan anggota badan dari percikan api ataupun iritasi disebabkan gas yang tersebar tanpa disedari.

4.0 KESIMPULAN

Analisis penyebaran gas bioH₂ dijalankan menggunakan kaedah CFD dimana kepekatan gas bioH₂ yang tertinggi iaitu 3.42 mol m⁻³ dikenalpasti di kawasan setempat tangki fermentor. Menerusi data tersebut, hasil model letupan setara TNT mendapati tekanan lampau yang dihasilkan adalah berkadar songsang dengan jarak dari pusat letupan yang berpusat di fermentor dan sekurang-kurangnya kemusnahan bangunan dan kecederaan parah dapat dikenalpasti pada jarak 9.31 m dan 14.56 m dari pusat letupan, masing-masing. Bagi analisis impak kebakaran dan letupan terhadap ekonomi dengan menggunakan F&EI, 82% kerosakan terhadap bangunan dianggarkan berlaku pada zon ancaman seluas 4,916 m², dan MPDO adalah sebanyak 43 hari dan BI dianggarkan sebanyak USD165,210. Konklusinya, model CFD, letupan setara TNT, dan F&EI menunjukkan kesepadanan bagi analisis kesan berturut penyebaran gas. Akhir sekali, cadangan langkah keselamatan dapat digunakan sebagai panduan am dalam pembangunan loji biogas yang selamat. Akhir kata, ketiga-tiga objektif telah berjaya dicapai bersama hasil keputusan yang meyakinkan, dan diharapkan dapat digunakan sebagai rujukan kepada analisis mendatang yang lebih kompleks.

Beberapa penambahbaikan boleh dilakukan terhadap kajian yang mendatang. Pertama, aliran angin perlulah disimulasikan dahulu tanpa sebarang aliran jisim bioH₂, untuk beberapa iterasi supaya aliran angin dapat terbentuk sepenuhnya di dalam domain perkomputeran CFD. Kedua, ujian kebebasan jejaring perlulah dilakukan untuk menentukan ketepatan hasil keputusan analisis CFD dan juga perbezaannya pada saiz jejaring yang berbeza. Di samping itu, CFD boleh dilakukan dengan menggunakan beberapa model likat yang berbeza untuk membandingkan keputusannya. Selain itu, model CFD letupan juga boleh dibangunkan sebagai kajian lanjut agar hasil kajian boleh dibandingkan dengan model letupan setara TNT dan F&EI untuk menentusahkan hasil kajian yang diperoleh.

Penghargaan

Penulis ingin merakamkan penghargaan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia di atas sokongan melalui geran penyelidikan DIP-2019-023.

Rujukan

- [1] B. Gopalakrishnan, N. Khanna, and D. Das. 2019. Dark-Fermentative Biohydrogen Production. *Biohydrogen*. 79-122.
- [2] S. V. Mohan and A. Pandey. 2013. Biohydrogen Production: An Introduction. *Biohydrogen*.
- [3] E. O. Koroglu, O. K. Ozdemir, B. Ozkaya, and A. Demir. 2019. An Integrated System Development Including PEM Fuel Cell/Biogas Purification during Acidogenic Biohydrogen Production from Dairy Wastewater. *Int. J. Hydrogen Energy*. 44(32): 17297-17303.
- [4] M. K. I. Sarwani, M. Fawzi, S. A. Osman, and A. B. Nasrin. 2019. Bio-methane from Palm Oil Mill Effluent (POME): Transportation Fuel Potential in Malaysia. *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.* 63(1): 1-11.
- [5] M. A. F. Hamzah, P. M. Abdul, A. M. Azahar, and J. M. Jahim. 2020. Performance of Anaerobic Digestion of Acidified Palm Oil Mill Effluent under Various Loading Rates and Temperatures. *Water*. 12: 2432.
- [6] C. I. Lim and W. K. Biswas. 2019. Sustainability Implications of the Incorporation of a Biogas Trapping System into a Conventional Crude Palm Oil Supply Chain. *Sustain*. 11(3).
- [7] A. Yap, K. Chung, and U. K. H. M. N. 2021. Computer Aided Simulation POME Biogas Purification System. 33(2): 293-316.
- [8] S. S. Mahmod, J. M. Jahim, P. M. Abdul, A. A. I. Luthfi, and M. S. Takriff. 2021. Techno-economic Analysis of Two-stage Anaerobic System for Biohydrogen and biomethane Production from Palm Oil Mill Effluent. *J. Environ. Chem. Eng.* 9(4): 105679.
- [9] S. N. A. Rahman *et al.* 2016. Overview Biohydrogen Technologies And Application in Fuel Cell Technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- [10] G. Di Marcoberardino, D. Vitali, F. Spinelli, M. Binotti, and G. Manzolini. 2018. Green Hydrogen Production from Raw Biogas: A Techno-economic Investigation of Conventional Processes using Pressure Swing Adsorption Unit. *Processes*. 6(3).
- [11] C. Allevi and G. Colodi. 2017. *Hydrogen Production in IGCC Systems*. Elsevier Ltd.
- [12] J. G. Speight. 2019. Chapter 15 - Hydrogen Production. *Heavy Oil Recovery and Upgrading*. J. G. Speight, Ed. Gulf Professional Publishing. 657-697.
- [13] N. Zhang, P. Bénard, R. Chahine, T. Yang, and J. Xiao. 2021. Optimization of Pressure Swing Adsorption for Hydrogen Purification based on Box-Behnken Design Method. *Int. J. Hydrogen Energy*. 46(7): 5403-5417.
- [14] I. I. A. A., S. I. K., and O. M. R. 2019. Optimizing Purity and Recovery of Hydrogen from Syngas by Equalized Pressure Swing Adsorption using Palm Kernel Shell Activated Carbon Adsorbent. *AIP Conference Proceedings* 2124. 020059.
- [15] R. Piemjaiswang, K. Ratanathamman, P. Kunchonthara, P. Piumsomboon, and B. Chalermsinuwan. 2016. CFD Study of Cyclone Performance: Effect of Inlet Section Angle and Particle Size Distribution. *J. Teknol.* 78(6-4): 83-89.
- [16] K. Wang, X. Zhang, Y. Miao, B. He, and C. Wang. 2020. Dispersion and Behavior of Hydrogen for the Safety Design of Hydrogen Production Plant Attached with Nuclear Power Plant. *Int. J. Hydrogen Energy*. 45(39): 20250-20255.
- [17] S. M. Tauseef, D. Rashtchian, and S. A. Abbasi. 2011. CFD-based Simulation of Dense Gas Dispersion in Presence of Obstacles. *J. Loss Prev. Process Ind.* 24(4): 371-376.
- [18] S. M. Tauseef, D. Rashtchian, T. Abbasi, and S. A. Abbasi. 2011. A Method for Simulation of Vapour Cloud Explosions based on Computational Fluid Dynamics (CFD). *J. Loss Prev. Process Ind.* 24(5): 638-647.
- [19] M. Assael and K. Kakosimos. 2010. *Fires, Explosions, and Toxic Gas Dispersions: Effects Calculation and Risk Analysis*. CRC Press.
- [20] Z. S. Nezamodini, Z. Rezvani, and K. Kian. 2017. Dow's Fire and Explosion Index: A Case-study in the Process Unit of an Oil Extraction Factory. *Electron. Physicist*. 9(2): 3878-3882.
- [21] H. Xiao, Q. Duan, and J. Sun. 2018. Premixed Flame

- Propagation in Hydrogen Explosions. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 81(June): 1988-2001.
- [22] Z. Abdul Rashid, A. Alias, K. Hamid, M. Bani, and M. El-Harbawi. 2015. Analysis the Effect of Explosion Efficiency in the TNT Equivalent Blast Explosion Model. *Proceedings of the International Conference on Global Sustainability and Chemical Engineering*. 381-390.
- [23] AIChE. 1994. *Dow's Chemical Exposure Index Guide*. 1st ed. American Institute of Chemical Engineers.
- [24] M. L. Costa Neto and G. N. Doz. 2017. Study of Blast Wave Overpressures using the Computational Fluid Dynamics. *Ibracon Struct. Mater. J.* 10(3): 669-677.
- [25] AIChE. 1994. *Dow's Fire & Explosion Index Hazard Classification Guide*. Wiley.
- [26] DOSH. 2008. *Department of Occupational Safety and Health, Ministry of Human Resources, Malaysia on Guidelines for Hazard Identification*. Risk Assessment and Risk Control (HIRARC).
- [27] S. S. Mahmud *et al.* 2019. Operation Performance of Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Bioreactor for Biohydrogen Production by Self-granulated Sludge using Pre-treated palm Oil Mill Effluent (POME) as Carbon Source. *Renew. Energy*. 134: 1262-1272.
- [28] S. Yacob, Y.-T. Hung, Y. Shirai, and M. Ali Hassan. 2006. Treatment of Palm Oil Wastewaters. *Waste Treat. Food Process. Ind.* 101-117.
- [29] M. A. Abd Nasir, J. M. Jahim, P. M. Abdul, H. Silvamany, R. M. Maaroff, and M. F. Mohammed Yunus. 2019. The Use of Acidified Palm Oil Mill Effluent for Thermophilic Biomethane Production by Changing the Hydraulic Retention Time in Anaerobic Sequencing Batch Reactor. *Int. J. Hydrogen Energy*. 3373-3381.
- [30] AIChE. 2003. *Guidelines for Facility Siting and Layout*. Wiley.
- [31] Y. Tominaga and T. Stathopoulos. 2018. CFD Simulations of Near-field Pollutant Dispersion with Different Plume Buoyancies. *Build. Environ.* 131(January): 128-139.
- [32] K. Wijesooriya, D. Mohotti, K. Chauhan, and D. Dias-da-Costa. 2019. Numerical Investigation of Scale Resolved Turbulence Models (LES, ELES and DDES) in the Assessment of Wind Effects on Supertall Structures. *J. Build. Eng.* 25(February), p. 100842, 2019.
- [33] R. Vázquez-Román, C. Díaz-Ovalle, E. Quiroz-Pérez, and M. S. Mannan. 2016. A CFD-based Approach for Gas Detectors Allocation. *J. Loss Prev. Process Ind.* 44: 633-641.
- [34] R. K. Jain, Z. "Cindy" Cui, and J. K. Domen. 2016. *Environmental Impact of Mining*. Elsevier.
- [35] S. Mannan. 2012. *Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control*. Fourth Edition. 1-2.
- [36] 2008. Guidelines for Evaluating the Effects of Vapor Cloud Explosions using a TNT Equivalency Method. FM Global.
- [37] A. R. Soman and G. Sundararaj. 2012. Consequence Assessment of Vapour cloud Explosion Involving Hydrogen Release. *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.* 2(11): 291-297. [Online].
- [38] J. L. Orozco *et al.* 2019. Assessment of an Ammonia Incident in the Industrial Area of Matanzas. *J. Clean. Prod.* 222: 934-941.
- [39] X. Lok, Y. J. Chan, and D. C. Y. Foo. 2020. Simulation and Optimisation of Full-scale Palm Oil Mill Effluent (POME) Treatment Plant with Biogas Production. *J. Water Process Eng.* 38(March): 101558.
- [40] W. Han, Z. Liu, J. Fang, J. Huang, H. Zhao, and Y. Li. 2016. Techno-economic Analysis of Dark Fermentative Hydrogen Production from Molasses in a Continuous Mixed Immobilized Sludge Reactor. *J. Clean. Prod.* 127: 567-572.
- [41] S. Basu. 2017. *Instrumentation Safety Implementation and Explosion Protection*. Plant Hazard Analysis and Safety Instrumentation Systems. Academic Press. 699-806.
- [42] T. V. Dinh, I. Y. Choi, Y. S. Son, and J. C. Kim. 2016. A Review on Non-dispersive Infrared Gas Sensors: Improvement of Sensor Detection Limit and Interference Correction. *Sensors Actuators, B Chem.* 231: 529-538.