

Penaksiran Risiko Sel Bahan Api Oksida Pepejal (SOFC)-Menggunakan Rangkaian Bayesan

(Risk Assessment of Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs)-Using Bayesian Networks)

MUTHIEAH MULLIYATDI¹, DARMAN NORDIN^{2,*}, NURZAILYN SHAMSUDDIN², MASLI IRWAN ROSLI², ZAMIRA HASANAH ZAMZURI³

¹Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43000 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malaysia

²Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43000 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malaysia

³Fakulti Sains Matematik, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43000 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malaysia

Diserahkan: 10 Jun 2022/Diterima: 26 September 2022

ABSTRAK

Tenaga boleh baharu menjadi tumpuan dunia sebagai sumber tenaga alternatif bagi penggantian penggunaan tenaga petroleum. Tenaga boleh baharu yang mendapat perhatian adalah penggunaan sel bahan api oksida pepejal (SOFC) kerana tenaga ini mempunyai pelepasan karbon yang minimum di samping kelestarian tenaga yang bersih. Walau bagaimanapun, penggunaan SOFC dalam penjanaan tenaga elektrik adalah terhad kerana terdapat risiko dari segi suhu, pelepasan bahan kimia, serta kaedah penyimpanan tenaga penjaanaan yang mampu memberi kesan kemusnahan serta kemalangan yang membawa kepada gangguan terhadap pengendalian operasi dan keadaan sekeliling. Oleh itu, penaksiran risiko memainkan peranan penting dalam memastikan pengoperasian keseluruhan sistem berada dalam keadaan selamat melalui pendekatan keselamatan berdasarkan kepada data yang didapati secara langsung atau data kemalangan terdahulu. Penyelidikan ini mengkaji senario yang membawa kepada kemusnahan melalui kaedah pemetaan Bayesan menggunakan program perisian sumber terbuka, *GeNie* dalam mengenal pasti risiko terhadap operasi. Keadaan operasi pada suhu tinggi dikenal pasti sebagai punca utama yang menyumbang kepada risiko. Kerosotan sebanyak 76% sehingga 90% boleh berlaku sekiranya suhu operasi melebihi suhu optimum bersama kerosotan parameter utama operasi.

Kata kunci: Degradasi; kerosakan; penaksiran risiko; sel bahan api oksida pepejal

ABSTRACT

Renewable energy becomes the world's attention as an alternative energy resource to replace petroleum energy usage. Renewable energy that is getting attention is solid oxide fuels cell (SOFCs) because they produce minimum carbon emission with clean sustainable energy. However, SOFCs usage in electricity generation is limited due to the risks of temperature, chemical substance emission, and generation power storage method that is able to cause destruction and accidents that will bring disruption to the handling operation and the surrounding. Therefore, risk assessment plays an important role to ensure the overall operation system in safe condition through safety approach based on the direct data or previous accidents data. This study investigates the consequences scenario due to high operating temperature through Bayesian mapping method using open resource software programme, *GeNie* in identifying risks towards operation. The operation condition in high temperature is identified as the main cause that contributes to the risk. The degeneration of 76% to 90% can happen if the operation temperature exceeds the optimum temperature with the degradation of the main operation parameter.

Keywords: Degradation; fault; risk assessment; solid oxide fuel cells

PENDAHULUAN

Sumber tenaga petroleum merupakan sumber terpenting dan terbesar di dalam pembahagian keuntungan ekonomi dunia. Namun, kadar hasil tenaga petroleum

ini dijangka menurun antara 20 sehingga 30 tahun akan datang disebabkan eksploitasi berlebihan bahan api fosil telah menyebabkan kerosotan persekitaran ekologi global yang serius. Ini membawa kepada inisiatif dalam

penelitian dan penyelidikan terhadap pelbagai tenaga bersih dan penggunaan sumber tenaga alternatif yang boleh diperolehi secara semula jadi dan dijana berulang kali dalam memenuhi keperluan tenaga yang saban tahun meningkat. Abdul Hamid, Zakaria dan Othman (2019) menyatakan pemilihan tenaga alternatif adalah untuk menangani masalah alam sekitar.

Pada masa kini, tenaga elektrik berasaskan sel bahan bakar mencipta potensi besar dalam industri tenaga. Sel bahan bakar menghasilkan tenaga elektrik melalui hasil buangan domestik yang terdiri daripada hidrogen dan bahan bakar lain yang boleh digunakan berulang kali dan mengeluarkan hasil akhir pelepasan karbon pada kadar yang rendah (Nanik Indayaningsih, Muljadi & Erfan Yundra 2008). Sel bahan bakar yang digunakan terdiri daripada sel bahan api alkali (AFC), sel bahan api membran proton (PEMFC), sel bahan api asid fosforik (PAFC), sel bahan api karbonat cair (MCFC) dan sel bahan api oksida pepejal (SOFC) (Abdul Rosyid & Oktoufik 2018; Irshad et al. 2016). Dalam pelbagai jenis sel bahan api, SOFC menjadi tumpuan kerana kecekapan menukar tenaga yang tinggi, kestabilan penghasilan tenaga yang baik dan mapan serta kelebihan terhadap pemulihan sisa haba yang dikenali sebagai sistem kuasa generasi ketiga (Wu et al. 2019; Yang et al. 2021).

Sistem operasi SOFC merupakan gabungan haba dan elektrik pegun penjaan kuasa, iaitu proses pemanasan permulaan operasi adalah pada 600 °C. Sistem pemanasan SOFC dikelaskan kepada tiga kategori mengikut sumber haba yang digunakan dalam penghantaran tenaga pada tempat pembakaran atau elektrik sahaja atau pada kedua-dua tempat. Haba yang dibekalkan kepada satu komponen boleh diagihkan kepada komponen lain melalui kaedah perolakan, pengaliran dan sinaran. Suhu aliran haba pada sistem terhad kepada 900 °C dan boleh meningkat dengan kehadiran gas asli yang digunakan sebagai pembakar. Seterusnya, keseluruhan sistem dipanaskan secara menyeluruh dengan haba pembakaran sahaja menggunakan pemeluwapan wap air (Finkenrath et al. 2004).

Proses penghasilan tenaga ini berlaku ketika oksigen melepasi satu elektrod dan bergabung dengan hidrogen dalam penjaan elektrik, air dan haba. Bahan api hidrogen dimasukkan pada parameter dan oksigen di katod yang kemudiannya digalakkan oleh pemangkin menyebabkan atom hidrogen berpecah menjadi proton dan elektron yang mengambil laluan berbeza pada katod. Elektron yang terhasil mencipta arus berasingan yang kemudiannya digunakan pada katod dengan melakukan tindak balas dengan hidrogen dan oksigen dalam molekul air (Johnston, Mayo & Khare 2005).

SOFC terdiri daripada tiga lapisan utama iaitu lapisan seramik yang diapit antara dua elektrod (parameter dan katod). Penggunaan bahan terhadap komponen SOFC adalah berbeza mengikut kriteria yang ditentukan dalam memastikan kecekapan operasi penjaan tenaga pada suhu yang tinggi untuk jangka masa yang lama sehingga 50,000 jam (Irshad et al. 2016). Komponen baharu yang digunakan dalam penjaan elektrik menggunakan bahan yang diperbuat daripada zirkonia sebagai bahan kajian elektrolit yang dilakukan oleh Nernst pada tahun 1899. SOFC terdiri daripada elektrolit yang diperbuat daripada yttria-stabil zirkonia (YSZ), parameter yang diperbuat daripada nikel dan yttria-stabil zirkonia (Ni/YSZ) dan katod berlian yang menggunakan LaMnO_3 (LSM).

Walau bagaimanapun, pengoperasian SOFC pada suhu yang tinggi boleh menyebabkan penjaan tenaga terganggu walaupun kestabilan penghasilan tenaga dibuktikan melalui pelbagai kajian dan simulasi. Mekanisme kemerosotan terdiri daripada kemerosotan yang boleh balik dan tidak boleh balik kerana suhu tinggi membawa kepada tegasan terma yang menyebabkan ketakselajaran merentasi elektrod dan elektrolit. Secara asasnya, suhu yang tinggi membawa kemerosotan seperti kerosakan bekalan bahan api, kebocoran, keracunan anod dan katod, ketumpatan bahan bakar dan kerosakan sistem (Behravan et al. 2021; Feng, Jiang & Wang 2020; Kabir & Papadopoulos 2019; Sanuy et al. 2020; Wu et al. 2019; Wu & Gao 2017; Wu & Ye 2016; Yang et al. 2021; Zaccaria et al. 2016a, 2016b).

Penaksiran risiko terhadap pengoperasiannya perlu dilakukan dalam penentuan kemungkinan kemalangan dan kemusnahan dengan menggunakan kaedah pengenalpastian *hazard* terhadap teknikal dan keselamatan. Proses penaksiran dari perspektif keselamatan merupakan teras utama dalam menilai kelancaran sistem dan parameter operasi. Penaksiran risiko meliputi kedua-dua analisis risiko dan penaksiran risiko. Analisis risiko adalah metod untuk menghitung risiko kepada sesuatu sistem atau proses yang ditimbulkan oleh sesuatu peristiwa. Penaksiran risiko biasanya terdiri daripada tiga langkah seperti pengenalpastian *hazard*, ancaman dan peluang (sumber), sebab dan akibat menggunakan kebarangkalian dan ramalan nilai. Penilaian risiko atau analisis bahaya proses boleh digunakan dengan menggunakan beberapa metod (Garner & Ibrahim 2016). Penaksiran risiko boleh dinilai menggunakan model, uji kaji atau data untuk mengenal pasti parameter operasi yang membawa kemerosotan dan menilai keperluan keselamatan sistem, pemantauan dan pemulihan pengoperasian. Kajian kepustakaan sedia ada terhadap penilaian risiko sistem SOFC berdasarkan

suhu pengoperasian jauh lebih rendah daripada jumlah kepustakaan tentang sifat elektrokimia dan fizikal bahan SOFC.

Di samping itu, kaedah penaksiran risiko yang sering digunakan seperti *Hazard and Operability Analysis* (HAZOP), matriks risiko dan indeks keselamatan contohnya, tidak mampu untuk menghubungkan kebergantungan penyebab kemalangan antara komponen (Kabir & Papadopoulos 2019; Zarei et al. 2017). Kaedah penaksiran risiko terdiri daripada bagaimana-jika-analisis, HAZOP, ETA, FMEA, MORT dan penilaian risiko perisian (Ericson 2005; Leimeister & Kolios 2018; Monica et al. 2012; Xin 2017; Sayed Ali 2018; Sharif, Basri & Ali 2014; Vilela et al. 2017; William 2008).

Demi mengatasi jurang kajian ini, kaedah rangkaian Bayesian (BN) dibina sebagai komponen utama penaksiran risiko terhadap pengoperasian SOFC dalam suhu tinggi. Pemilihan BN dalam penilaian risiko terbukti memberangsangkan kerana strukturnya yang fleksibel, kaedah penaksiran risiko yang dilakukan menggunakan data kebolehpercayaan dalam mempertimbangkan kegagalan punca dengan kebergantungan bersyarat (Akbarizan et al. 2018; Amin, Khan & Imtiaz 2019; Bahoo Toroody et al. 2020; Feng, Jiang & Wang 2020; Kabir & Papadopoulos 2019; Lee et al. 2010; Riascos, Simoes & Miyagi 2007; Romessis & Mathioudakis 2006; Xin, Khan & Ahmed 2017; Yazdi & Kabir 2017; Zarei et al. 2017).

Kajian ini menggunakan BN untuk melakukan penaksiran risiko terhadap operasi SOFC. BN merupakan kaedah jangkaan dan diagnostik menggunakan permodelan grafik yang menganalisis data dari segi kualitatif (graf kitaran grafik) dan kuantitatif (kebarangkalian bersyarat) yang dikenali sebagai model rangkaian sebab-akibat menggunakan parameter yang dipilih sebagai pemboleh ubah kepada setiap parameter yang dipilih. Model grafik ini berbentuk graf asiklik berarah yang menghubungkan ketidakpastian pemerhatian dalam mendapatkan sebuah kesimpulan melalui parameter dan arka terarah (Amin, Khan & Imtiaz 2019).

BN merupakan satu cabang permodelan Bayes selain permodelan hierarki berasaskan simulasi. Analisis terhadap taburan kebarangkalian sukar dikawal penganggarannya melalui permodelan berasaskan simulasi. Manakala, dalam BN, taburan kebarangkalian dianalisis dengan data didiskret, diperoleh untuk analisis. Pendekatan dua kaedah permodelan ini menggunakan pergantungan bersyarat antara pemboleh ubah berdasarkan teorem Bayes. Permodelan hierarki digunakan pada interaksi rumit menggunakan taburan

berparameter dan *time-slices-model*. BN juga merupakan permodelan menggunakan domain yang didiskret dan analisis yang digunakan boleh dibandingkan dengan pengurusan perbezaan parameter yang diperlukan (Uusitalo 2007). BN dibina dalam tiga langkah utama iaitu menentukan pergantungan sebab akibat dalam kalangan pemboleh ubah, menganggar taburan kebarangkalian, serta menganggar taburan kebarangkalian bersyarat.

Perangkaan senario terhadap kesan dan punca parameter yang membawa kepada kemerosotan SOFC diteliti dan dirangka menggunakan BN dalam perantian *GeNe*. Perangkaan parameter dibuat berlandaskan jadual kebarangkalian bersyarat (CPT). Analisis kepekaan digunakan untuk menganggar risiko parameter kebarangkalian kemerosotan pengoperasian melalui perubahan nilai kebarangkalian pada setiap parameter pada nilai 0.1, 0.5 dan 1.0 (Castillo, Gutierrez & Hadi 1997). Pemilihan nilai ini menunjukkan aras terhadap kebarangkalian kesan dan ancaman dengan ketetapan 0.1 sebagai rendah, 0.5 sebagai sederhana dan 1.0 pada tahap tinggi (Nikolić & Ružić-Dimitrijević 2009). Nilai kebarangkalian ini diadaptasi berdasarkan Zhang et al. (2019) dengan nilai 0.05, 0.025 dan 0.5 dan Zarei et al. (2017) pada nilai 1.0. Kajian ini merupakan lanjutan kepada hasil kajian Aman et al. (2020) dalam menentukan kesan haba SOFC pada komponen semasa pengoperasian.

Objektif kajian ini dalam pengenalpastian senario yang membawa kepada kemerosotan pengoperasian adalah penting untuk memastikan keselamatan penggunaan SOFC sebagai sumber tenaga alternatif utama. Oleh itu, penaksiran risiko digunakan dalam menganalisis kesan dan punca yang membawa kepada kemerosotan operasi SOFC. Melalui penganggaran kebarangkalian risiko, tanda aras terhadap kemerosotan pengoperasian boleh dijadikan rujukan dalam keselamatan pengoperasian. Justeru, kajian ini menggunakan kaedah penaksiran risiko terhadap kebarangkalian kemalangan menggunakan BN kerana kebolehlenturan dalam analisis data yang pelbagai dengan kebenaran gabungan data mengikut pengetahuan domain selain menunjukkan hubungan sebab dan akibat antara pemboleh ubah.

KAEDAH KAJIAN

Metod perangkaan penaksiran risiko bagi kajian ini diadaptasi daripada Xin, Khan dan Ahmed (2017) dan Zhang et al. (2019). Penaksiran ini dimulai dengan perangkaan senario berdasarkan kepada parameter yang dimulai dengan mengenal pasti punca berlakunya kemerosotan sistem SOFC terhadap suhu operasi yang

tinggi melalui kajian kepustakaan terhadap kemerosotan dan kerosakan SOFC. Kemudian, perangkaan model senario BN dibentuk setelah mengenal pasti pengelasan, perangkaan dan pergantungan parameter dipilih. Selepas itu, analisis model BN menggunakan pendekatan rantai sebab-akibat menggunakan CPT yang kemudiannya menganalisis secara menyeluruh menggunakan analisis kepekaan. Penggunaan analisis BN dalam mengenal pasti punca berlakunya kemerosotan digunakan dalam kajian ini kerana sistemnya yang fleksibel mengikut cara beroperasi, persekitaran dan parameter dalam penaksiran risiko berdasarkan pemilihan kebarangkalian yang diperlukan (Akbarizan et al. 2018; Fenton et al. 2019; Ferreira et al. 2018; Plomaritis, Costas & Ferreira 2018; Wu et al. 2020).

Data kemerosotan SOFC diperoleh daripada kajian kepustakaan dengan kata kunci penaksiran risiko, keselamatan operasi, SOFC, kerosakan kegagalan dan kesan suhu tinggi kepada SOFC. Berdasarkan carian dan kepustakaan yang terdahulu, penaksiran risiko SOFC pada suhu tinggi adalah terhad. Walau bagaimanapun, berdasarkan kajian kepustakaan, beberapa senario operasi yang menyebabkan kemerosotan operasi dikenal pasti dan digunakan dalam pemetaan BN.

PERANGKAAN RANGKAIAN BAYESAN BERDASARKAN NILAI JADUAL KEBARANGKALIAN BERSYARAT

Senario yang terdapat berdasarkan kajian terdahulu terhadap penggunaan SOFC diteliti mengikut spesifikasi. Melalui data yang diperoleh dalam perangkaan senario *hazard* yang dipilih, pengenalpastian parameter bagi setiap senario *hazard* ditentukan berdasarkan kepada faktor dan kebarangkalian yang boleh berlaku mengikut setiap pemboleh ubah yang dimasukkan menggunakan kaedah perangkaan BN. Kaedah pengiraan teorem Bayes ini dapat dilihat melalui contoh yang diberikan menggunakan formula:

$$P(\theta/X) = \frac{P(X/\theta)XP(\theta)}{P(X)}$$

dengan $P(\theta)$ ialah prior kenyataan; $P(X)$ ialah kebarangkalian pemerhatian atau bukti; $P(X/\theta)$ ialah kebarangkalian bersyarat oleh (X) pada (θ) ; $P(\theta/X)$ ialah kebarangkalian bersyarat oleh (θ) pada (X) .

Untuk menghitung taburan kebarangkalian bersama dan mengemas kini kebarangkalian yang digunakan secara kualitatif dan kuantitatif menggunakan CPT. BN dibina dalam tiga langkah utama melalui penentuan pergantungan sebab akibat dalam kalangan

pemboleh ubah, penganggaran taburan kebarangkalian dan penganggaran taburan kebarangkalian bersyarat. Setiap parameter yang dikenal pasti didiskret mengikut pemerhatian. Jangkaan kebarangkalian yang diketengahkan dijana menggunakan perantian *GeNie-Academic* untuk melihat kebergantungan antara pemboleh ubah merangkumi kemungkinan yang berevolusi mengikut semua kemungkinan yang disenaraikan secara menyeluruh dan maksimum. Kebarangkalian terhadap data yang diperoleh dikeluarkan berdasarkan kepada kriteria yang ditentukan melalui kesan atau risiko yang boleh berlaku dalam skala maksimum. Kebarangkalian terhadap data yang diperoleh akan dikeluarkan berdasarkan kriteria yang ditentukan melalui kesan atau risiko yang boleh berlaku dalam skala maksimum. Data CPT dikemaskini menggunakan mekanisme BN, manakala data terdahulu boleh digunakan sebagai perbandingan terhadap kesahihan data yang digunakan dalam penaksiran risiko yang memenuhi keperluan kestabilan dan kebolehpercayaan sistem terhadap penaksiran risiko (Wang et al. 2012).

Pengenalpastian parameter

Melalui data yang diperoleh dalam perangkaan senario *hazard* yang dipilih, pengenalpastian parameter bagi setiap senario *hazard* akan ditentukan berdasarkan kepada parameter yang sesuai bagi pemprosesan data menggunakan BN yang bergantung sepenuhnya kepada data yang dipilih bertepatan dengan tujuannya dalam menganalisis penyebab dan kebarangkalian yang boleh berlaku mengikut setiap pemboleh ubah yang dimasukkan.

Pengelasan dan perangkaan asas parameter

Setiap data yang dikenal pasti parameter yang bertepatan mengikut keperluan BN perlu didiskret mengikut pemerhatian, jangkaan *hazard* dan kesinambungan kepada kesan serta kebarangkalian yang diketengahkan berdasarkan kepada pemerhatian dan penilaian kepada *hazard*.

Perangkaan pergantungan parameter

Diskret BN membolehkan setiap parameter mempunyai nilai yang berbeza dalam pembuktian setiap parameter dipertimbangkan berdasarkan nilai terendah dan tertinggi. Perangkaan pergantungan parameter yang baik dapat meningkatkan kemampuan setiap pemboleh ubah parameter terhadap hubungan yang dikenal pasti.

Perangkaan pergantungan parameter

Perangkaan BN membolehkan kebergantungan antara pemboleh ubah yang dihitung menggunakan pemetaan CPT berdasarkan kepada pembelajaran data yang merangkumi semua kemungkinan senario yang berevolusi mengikut semua kemungkinan yang disenaraikan dalam perangkaan yang lebih menyeluruh dan maksimum.

HASIL KAJIAN DAN PERBINCANGAN

Berdasarkan hasil kajian kepustakaan, kemerosotan utama yang berlaku disebabkan oleh suhu yang tinggi mendapati kemerosotan yang sering berlaku adalah degradasi anod, pemendapan karbon, kebocoran dan keracunan anod dan katod. Yang et al. (2021) menyatakan degradasi anod, keracunan anod dan katod, kerosakan pada sistem bekalan bahan dan haba. Wu et al. (2019) mengesan pemendapan karbon dan kerosakan pada penukar haba. Vijay et al. (2019) mendapati adanya kebocoran bahan api dan gas, perubahan komposisi saluran masuk katod dan kerosakan sel. Gazzarri dan Kesler (2007) menjelaskan bahawa gangguan ketumpatan arus Faraday dengan caj elektronik akan membuatkan prestasi sel menurun apabila pengaliran bahan api dan gas berkurang menjadikan elektrokimia tidak aktif. Costamagna et al. (2019) mengesan kemerosotan timbunan SOFC dan reformis melalui kebocoran gas dan bahan api. Sharifzadeh dan Rashtchian (2020) menyatakan bahawa pemendapan karbon, keracunan sulfur, pelekangan elektrod, keretakan elektrod, pengoksidaan semula anod dan perkembangan lapisan oksida membawa kepada kerosakan yang tidak dapat dipulihkan dan membawa kerosakan yang besar. Arsie et al. (2010) menilai bahawa penghembus gas, pra-pemanas udara, pra-reformer, keadaan selepas pembakaran dan kebocoran gas pada timbunan SOFC disebabkan perubahan suhu yang menyebabkan tekanan terma.

Wang et al. (2012) menyatakan ketumpatan arus, kadar aliran gas dan gas hidrogen bersama suhu dan voltan tindanan yang berbeza berdasarkan penggunaan bahan api dan gas. Hasil kajian Kalib et al. (2018) mendapati pekali pengembangan terma, kegagalan struktur pengedapan dan penggunaan bahan mempengaruhi tegasan terma operasi. Peng et al. (2021) menyatakan bahawa ayunan termoelektrik, defisit bahan api, mendapan karbon, keracunan elektrod dan degradasi komponen berlaku pada bila-bila masa dan lokasi dalam sistem. Ploner, Hagen dan Hauch (2018) menyenaraikan punca kemerosotan yang berlaku bila tempoh pengoperasian yang lama dan perkitaran bahan yang digunakan untuk tempoh yang lama adalah pemendapan karbon pada operasi metana dan rintangan

resapan. Zhang et al. (2019) menyatakan bahawa kebocoran gas, bahan api dan pembakar membuktikan bahawa ini merupakan kemerosotan biasa yang berlaku. Ringkasan hasil kajian ini disimpulkan seperti dalam Jadual 1.

PARAMETER KEMEROSOTAN PENGOPERASIAN SOFC

Berdasarkan kepada ringkasan diagnosis kerosakan SOFC adalah pemendapan karbon, kebocoran, kontaminasi dan keracunan merupakan punca utama dalam prestasi pengoperasian SOFC. Nilai CPT parameter yang dikenal pasti dimasukkan ke dalam peranti dan disimulasikan untuk mengenal pasti punca yang memberi kesan paling tinggi dalam prestasi pengoperasian SOFC melalui ketebalan arka. Pemendapan anod merupakan punca dan kesan utama dalam mengganggu prestasi pengoperasian diikuti oleh kebocoran, kontaminasi dan keracunan anod. Berdasarkan kepada empat parameter utama ini, kebarangkalian untuk berlakunya kemerosotan operasi sekiranya kesemua parameter ini mempunyai kerosakan adalah 0.52 dan dengan peratusan kebarangkalian kerosakan sebanyak 88%.

Parameter yang membawa kepada kemerosotan ini berkaitan dengan operasi SOFC pada suhu tinggi yang membawa kepada tekanan haba, pembentukan karbon dan keracunan mangkin disebabkan oleh kemerosotan pada interaksi komponen pada unit proses lain. Kemerosotan ini akan membawa gangguan kepada penjanaan kuasa kerana ketidakstabilan sistem pengoperasian. Berdasarkan hasil kajian Forrai et al. (2005), terdapat empat punca utama yang menyebabkan sel bahan api tidak dapat berfungsi seperti kehilangan pengaktifan, penyelang bahan api yang menyebabkan kehilangan arus dalaman, kehilangan ohmik dan kekurangan kepekatan jisim yang berlaku pada katod. Ini disebabkan sebahagian daripada voltan yang dihasilkan hilang pemacu tindak balas kimia yang memindahkan elektron dari satu elektrod ke elektrod yang lain. Silang bahan api dan kehilangan arus dalaman. Kehilangan tenaga ini terhasil daripada pembaziran bahan api yang mengalir daripada sisa bahan api yang melalui elektrolit. Kehilangan ohmik berlaku disebabkan oleh kejatuhan voltan pada rintangan kepada aliran elektron melalui elektrod dan penyambung. Pengangkutan jisim atau kehilangan kepekatan ini terhasil daripada perubahan kepekatan bahan tindak balas pada permukaan elektrod semasa bahan api digunakan. Memandangkan pengurangan kepekatan adalah akibat kegagalan untuk mengangkut bahan tindak balas yang mencukupi ke permukaan elektrod, jenis kehilangan ini sering digelar kehilangan 'pengangkutan jisim'.

JADUAL 1. Ringkasan diagnosis kerosakan SOFC

Rujukan	Tajuk	Kaedah analisis	Kerosakan	Hasil keseluruhan
Yang et al. (2021)	<i>SOFC system fault diagnosis: critical summarization, classification, and perspectives</i>	Pengesanan dan pengasingan kesalahan (FDI)	Degradasi parameter Keracunan parameter dan katod Kerosakan bekalan bahan Kerosakan bekalan haba	Kerosakan SOFC boleh berlaku pada dalaman dan luaran disebabkan oleh: Degradasi Penyebaran Pensinteran Pengoksidaan semula Keracunan sulfur Pembentukan dan pemendapan karbon Bahan api yang tidak tulen Kebocoran saluran paip H ₂ Kebocoran saluran paip gas Kerosakan peniup gas Kerosakan pembakar Kerosakan saluran paip wap
Wu et al. (2019)	<i>Fault detection and assessment for solid oxide fuel cell system gas supply unit based on novel principal component analysis</i>	Pengesanan dan pengasingan kesalahan (FDI)	Pemendapan karbon Kerosakan penukar haba	Pemendapan karbon dan kerosakan pada penukar haba merupakan kerosakan yang paling memberi kesan kepada sistem operasi SOFC
Costamagna et al. (2019)	<i>Data-driven techniques for fault diagnosis in power generation plants based on solid oxide fuel cells</i>	Pengesanan dan pengasingan kesalahan (FDI) dalam pengelasan yang perlu diselia Mesin vektor sokongan (SVM) dan hutan rawak (RF) dalam pengelasan antara kelas	Kerosakan timbunan SOFC Kebocoran gas Kebocoran bahan api Kerosakan reformis	Kerosakan yang dijana oleh timbunan SOFC adalah sebanyak 160%. Aliran gas sebanyak 50% dan 95%, aliran bahan api dan tekanan gas sebanyak 30% dan 95% cukup untuk merosakkan set SOFC. Set ujian maksimal ralat yang digunakan adalah sebanyak 2%, 4% dan 6%
Sharifzadeh & Rashtchian (2020)	<i>Fault detection, loss prevention, hazard mitigation, and safe operation of solid oxide fuel cell systems</i>	Hasil kajian dalam bidang pengesanan kesalahan, pencegahan kehilangan dan keselamatan operasional berkaitan teknologi SOFC	Pemendapan karbon Keracunan sulfur Pelekangan elektrod Keretakan elektrod Pengoksidaan semula parameter Perkembangan lapisan oksida	Kerosakan terhadap operasi SOFC memberi kesan besar pada ekonomi dan ketahanan teknologi kerana kerosakan yang berlaku tidak dapat dipulihkan

Wang et al. (2012)	<i>SOFC modelling based on discrete bayesian network for system diagnosis use</i>	Rangkaian Bayesian	Ketumpatan arus Kadar aliran gas dan hidrogen Suhu relau Penggunaan bahan api dan udara Suhu dan voltan tindanan	Sistem pengoperasian pada suhu yang tinggi menjadi parameter utama dalam melihat kesan kepada kemerosotan prestasi
Kalib et al. (2018)	<i>Factors influencing thermal stress development in solid Oxide fuel cells</i>	Hasil kajian	pekali pengembangan terma kegagalan struktur pengedapan penggunaan bahan	Tegasan terma mempengaruhi kemerosotan pada sistem operasi SOFC
Peng et al. (2021)	<i>Solid oxide fuel cell (SOFC) performance evaluation, fault diagnosis and health control: A review</i>	Hasil kajian melalui permodalan, uji kaji dan ramalan prestasi	Ayunan termoelektrik Defisit bahan api Mendapan karbon Keracunan elektrod Degradasi komponen	Semasa pengoperasian sistem SOFC, kerosakan boleh berlaku tidak mengira masa dan lokasi dalam sistem
Ploner, Hagen & Hauch (2018)	<i>Carbon deposition diagnostics for reliability and state-of-health assessment of SOFC</i>	<i>State-of-health assessment</i>	Pemendapan karbon berlaku pada operasi metana Rintangan resapan	Pemendapan karbon berlaku disebabkan bahan dan tempoh masa pengoperasian
Zhang et al. (2019)	<i>Intelligent simultaneous fault diagnosis for solid oxide fuel cell system based on deep learning</i>	Pemacu data	Kebocoran gas Kebocoran bahan api Kebocoran pembakar	Kemerosotan yang sering berlaku adalah disebabkan oleh kebocoran gas, bahan api dan pembakaran
Arsie et al. (2010)	<i>Fault tree analysis aimed to design and implement on-field fault detection and isolation schemes for sofc systems</i>	Analisis pokok gagal (FTA) dan pengesanan dan pengasingan kesalahan (FDI)	Penghembus gas Pra-pemanas gas Pra-reformer Selepas pembakaran Kebocoran gas Timbunan SOFC	Penilaian interaksi komponen kemerosotan utama adalah: Kerosakan sistem peniup gas Kebocoran gas antara pemampat gas dan pra-pemanas Suhu yang melebihi optimum Pre-reformer Timbunan SOFC

KESAN DAN PUNCA KEMEROSOTAN PENGOPERASIAN

Degradasi SOFC dipengaruhi oleh faktor intrinsik dan ekstrinsik. Faktor intrinsik berlaku disebabkan oleh komponen bahan yang bertindak balas semasa pengoperasian yang disebabkan struktur bahan sesama pengitaran haba semasa pengoperasian, penguraian oksida induk, tindak balas kimia dengan komponen sel lain dan kandungan pemendapan pada katod daripada elektrolit. Faktor ekstrinsik pula disebabkan oleh keracunan daripada bahan yang bercampur semasa pengoperasian. Faktor penting dalam ketidakstabilan operasi adalah suhu yang tinggi iaitu pada 600 °C sehingga 1000 °C (Kalib et al. 2018). Sistem operasi SOFC terdiri daripada gabungan tindak balas kimia semasa pengangkutan tenaga elektrik, variasi suhu dan beban mekanikal. Dengan sistem operasi ini pada suhu yang tinggi mendorong kepada perkembangan tegasan mekanikal. Tegasan mekanikal merupakan faktor penting dalam mempengaruhi ketidakstabilan mekanikal SOFC yang membawa kepada delaminasi, rayapan dan detasmen tindanan (Kalib et al. 2018). Kerosotan SOFC cenderung untuk berlaku apabila daya pemuatan melebihi titik alah dan perubahan struktur pada komponen dan bahan. Tegasan haba berlaku apabila terdapat kekangan pada komponen yang mengembang atau mengecut pada variasi suhu yang mengganggu pada nilai pekali pengembangan terma (TEC). Tegasan termal menyumbang kepada kegagalan struktur disebabkan oleh keretakan apabila bahan pada struktur mikro cenderung untuk berlakunya pemendapan.

Kerosotan prestasi akan berlaku dalam setiap komponen mengikut kebarangkalian yang berbeza. Kejadian pemendapan karbon apabila terdapat karbon yang tidak lengkap pembakaran ditiup ke dalam manifold sistem. Menurut Wu et al. (2019), penggunaan bahan komponen yang terdiri daripada Ni/YSZ yang mengakibatkan pengurangan penggunaan bahan api dan penyahaktifan parameter melalui resapan atom karbon pada permukaan zarah Ni (Wang et al. 2017). Berikutan kepada pemendapan karbon, keracunan anod boleh berlaku disebabkan oleh sulfur yang dinyahaktifkan ketika tindak balas elektrokimia (Yang et al. 2021) disebabkan kesan keracunan klorin yang berlaku apabila kadar tindak balas elektrokimia yang berkurangan disebabkan oleh kehadiran elektronegatif yang mengurangkan penjerapan H₂ pada permukaan Ni (Sreedhar et al. 2020). Melalui pemerhatian yang dinyatakan oleh Mahato et al. (2015), kesan terhadap keracunan sulfur adalah penurunan ketara dalam voltan sel apabila pendedahan H₂S berterusan dalam bahan api

di mana apabila penggunaan H₂S dalam bahan api, sulfur terserap pada kawasan yang aktif dan menghalang proses elektrokimia berlaku dan menyebabkan mekanisme keracunan anod berlaku. Ini adalah kerana tindak balas bahan yang digunakan pada anod dan H₂S.

Kesan kerosakan disebabkan oleh pemendapan karbon dan keracunan berpunca disebabkan oleh bahan, persekitaran dan bahan api yang membawa kepada kebocoran dan mengurangkan kecekapan bahan api. Selain itu, kebocoran gas dan bahan api boleh membawa kepada letupan dan kebakaran apabila gas bertindak balas pada suhu yang tinggi (Jia, Han & Chen 2017; Sharifzadeh & Rashtchian 2020). Kebocoran boleh menyebabkan kerosotan unit lain seperti kegagalan pengedap dengan kehadiran liang kecil dalam elektrolit boleh menyebabkan kebocoran gas pada parameter dan katod yang membawa kesan kepada penurunan prestasi sel dengan ketara (Jia, Han & Chen 2017; Zhang et al. 2019) disebabkan oleh kerosakan pada bahan pengedap. Ini berlaku kerana kebocoran mengakibatkan kekurangan keberkesanan bahan pengedap dalam membekalkan udara kepada katod untuk meneruskan operasi. Pengaliran udara digunakan untuk mengawal sistem suhu semasa beroperasi. Apabila kebocoran berlaku, sistem operasi akan merosot manakala suhu tindanan akan meningkat dan menyebabkan jumlah gas yang tersalur berkurangan daripada jumlah yang diperlukan.

Kebocoran merupakan faktor penting yang mengakibatkan penurunan kadar aliran bahan api ke dalam timbunan (Li, Cao & Yang 2018). Aliran udara digunakan bagi mengawal suhu tindanan dan menyediakan oksidan untuk tindak balas elektrokimia dalam sistem operasi SOFC kerana apabila kebocoran udara berlaku, ini akan menyebabkan ketidakstabilan suhu sistem dan kerosakan tindanan. Jika sistem SOFC berada di bawah perubahan beban yang pantas, masalah seperti kekurangan bahan api dan suhu di luar julat selamat juga boleh berlaku dengan mudah berpunca daripada tindak balas dinamik perlahan sistem bekalan gas (Peng et al. 2021). Walaupun timbunan SOFC mampu menampung kitaran redoks berganda dibangunkan, bagi SOFC yang disokong oleh anod tebal terhadap perubahan isi padu menyebabkan retak dan kebocoran kecil dengan kesan buruk daripada pembakaran gas dan bahan api (Sharifzadeh & Rashtchian 2020). Terdapat banyak kebarangkalian kerosakan yang terjejas disebabkan oleh kebocoran, seperti menjejaskan jisim bahan api dan udara yang masuk ke dalam timbunan (Wu et al. 2017). Risiko kepada kebocoran yang mungkin berlaku kerana berlakunya kerosakan pada penyedap boleh menyebabkan letupan (Pijolat 2012).

Kerosakan sistem dan kegagalan komponen boleh menyebabkan kemerosotan prestasi sistem SOFC yang seterusnya menghalang operasi sistem yang cekap dan lama. Mekanisme degradasi berkaitan suhu tinggi adalah faktor utama kemerosotan prestasi SOFC kerana pekali pengembangan terma (CTE) berbeza bagi setiap komponen sel. Suhu operasi yang tinggi dan kecerunan terma melalui sel terhadap tekanan haba juga boleh menyebabkan kebocoran dan kemerosotan prestasi seperti pemendapan karbon, keracunan elektrod dan kemerosotan pada komponen lain yang menghadkan hayat dan kebolehpercayaan sistem operasi SOFC.

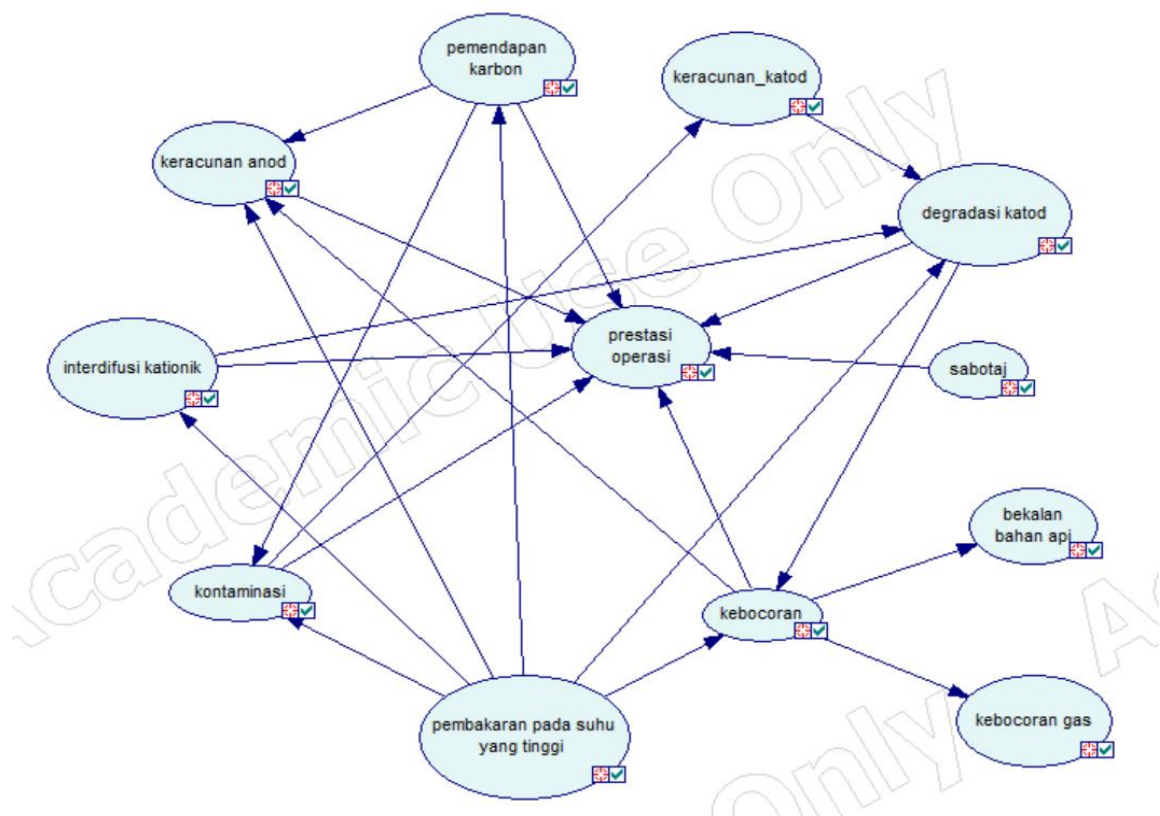
Merujuk kepada Jadual 2, analisis kepekaan pada suhu operasi terhadap subsistemnya dapat dilihat secara terperinci menunjukkan bahawa peningkatan suhu operasi boleh mempengaruhi prestasi operasi untuk tidak berfungsi dengan nilai peratusan tertinggi pada berbeza kebarangkalian adalah kebocoran pada kebarangkalian 0.1, pemendapan karbon pada kebarangkalian 0.5 dan 1.0 dengan peratusan 60%, 85% dan 95%. Manakala, pada keracunan anod, pemendapan karbon memberi kesan dengan kebarangkalian 0.5 dan 1.0 dengan peratusan masing-masing 85% dan 90%. Ini berlaku apabila karbon daripada bahan api yang digunakan menyebabkan kadar deposit pada permukaan parameter sebagai CO₂.

JADUAL 2. Kesan peningkatan parameter kepada sistem SOFC

Kesan peningkatan	Parameter	Peratusan parameter terhadap kebarangkalian kerosakan (%)		
		0.1	0.5	1.0
Suhu	Prestasi operasi untuk tidak berfungsi	77	84	86
	Kebocoran	68	83	90
	Kontaminasi	58	73	79
	Pemendapan karbon	60	85	95
	Keracunan anod	67	84	91
	Suhu SOFC beroperasi	31	80	100
Keracunan anod	Prestasi operasi untuk tidak berfungsi	76	83	86
	Kebocoran	72	83	87
	Kontaminasi	67	73	76
	Pemendapan karbon	71	85	90
	Suhu SOFC beroperasi	61	80	88
Pemendapan karbon	Prestasi operasi untuk tidak berfungsi	76	84	86
	Kebocoran	74	83	86
	Kontaminasi	60	73	78
	Keracunan anod	69	84	89
	Suhu SOFC beroperasi	51	80	89
Kebocoran	Prestasi operasi untuk tidak berfungsi	76	84	86
	Pemendapan karbon	76	85	88
	Kontaminasi	67	73	76
	Keracunan anod	72	84	88
	Suhu SOFC beroperasi	62	80	88

Apabila pemendapan karbon dan keracunan anod membawa peratusan kerosakan yang tinggi pada 0.5 dan 1.0 dengan nilai 84% dan 89% membuktikan kenyataan Mahato et al. (2015) bahawa sifat deposit karbon dalam suhu yang dikaji kebanyakannya amorf dengan sejumlah kecil grafit yang didapati berorientasikan rawak dalam matriks karbon amorf yang meningkat dengan kenaikan suhu melebihi 750 °C, kadar kakisan meningkat dengan jumlah karbon grafit pada permukaan Ni dan membawa kebocoran kepada kekonduksian dan kemerosotan prestasi sel. Ini

berlaku apabila bahan api dan gas yang diperoleh dalam penjanaan tenaga haba tidak mencukupi daripada kadar yang ditetapkan, akan membawa kesan kepada suhu operasi yang dapat dilihat pada kadar kemerosotan 0.1 iaitu suhu SOFC akan meningkat sebanyak 62% lebih tinggi berbanding parameter lain. Kebocoran bahan api boleh menyebabkan bahan api yang masuk ke dalam tindanan berkurangan dan kemudian mengakibatkan degradasi timbunan yang menyebabkan kerosakan teruk apabila mencapai titik bahaya kritikal iaitu pada 88% peningkatan suhu. Hubungan kerosotan operasi ini dapat dilihat dalam Rajah 1 dan 2.

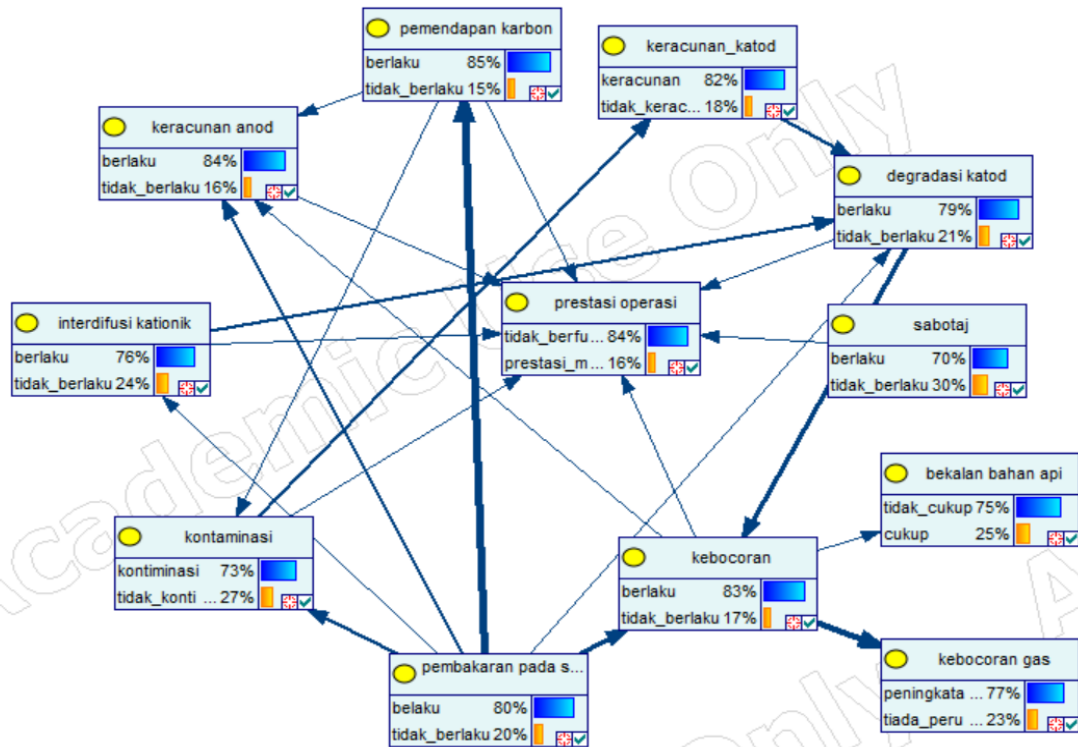


RAJAH 1. Perangkaan Bayes terhadap pembakaran pada suhu yang tinggi

RISIKO

Analisis menggunakan BN membawa kepada kebarangkalian risiko dengan pemetaan dan menunjukkan bahawa kemerosotan setiap parameter yang berlaku. Berdasarkan kepada data yang digunakan, kebarangkalian sistem operasi SOFC terjejas adalah disebabkan oleh peningkatan suhu, keracunan anod, pemendapan karbon dan kebocoran yang berlaku

disebabkan oleh kerosakan dalaman mahupun luaran. Punca utama dalam kemerosotan operasi pada suhu tinggi adalah disebabkan oleh pemendapan karbon dan diikuti dengan kontaminasi, keracunan anod dan kebocoran pada bahan api dan gas. Kesan kepada pemendapan karbon ini adalah disebabkan oleh kepelbagaian penggunaan bahan api dalam penjanaan kuasa. Kepelbagaian penggunaan bahan api



RAJAH 2. Punca kemerosotan operasi

merupakan sebab utama dalam pemilihan penjanaan kuasa masa hadapan. Walau bagaimanapun, kepelbagaian penggunaan bahan api membawa kepada pelbagai risiko yang membawa kepada kemalangan dan kemerosotan terhadap operasi SOFC.

Berdasarkan kepada hasil kemerosotan pengoperasian, dapat disimpulkan bahawa sekiranya kerosakan berlaku secara 100% pada beberapa parameter utama mampu membawa kerosakan yang menjejaskan prestasi penjanaan tenaga (Peng et al. 2021) seperti yang boleh dilihat pada Jadual 3 melalui analisis kepekaan sistem operasi untuk setiap senario parameter. Kebarangkalian senario pertama merupakan senario utama kerana ia merupakan gabungan kerosakan yang berlaku hasil gabungan kerosakan parameter lain. Pada senario kedua pula didapati bahawa suhu yang tinggi memainkan peranan lebih penting. Analisis kepekaan menunjukkan jika parameter suhu ini meningkat, prestasi operasi boleh merosot sehingga 86.2%. Sekiranya suhu diturunkan, kebarangkalian operasi merosot hanya 72%. Analisis keseluruhan kepekaan sistem pengoperasian dapat dilihat seperti dalam Jadual 3 yang menerangkan nilai yang boleh menjejaskan

pengoperasian pada tahap maksimum dan pengurangan kemerosotan melalui nilai minimum yang dijangkakan.

Antara risiko yang boleh terjadi sepanjang operasi adalah kesan akibat kebocoran gas yang terbahagi kepada beberapa jenis seperti letupan wap mengembang cecair mendidih (BLEVE). Letupan awan wap tidak terkurung (UVCE), pancar api dan pelepasan toksik. Kejadian BLEVE berlaku akibat suhu pada sistem penyimpanan berada lebih tinggi daripada takat optimumnya bersama pembebasan gas mudah terbakar disebabkan oleh kebocoran yang disertai nyalaan dan menyebabkan ia pecah dengan pelepasan tekanan. Manakala, kebakaran jet pula disebabkan oleh pembakaran bahan mudah terbakar yang terlepas secara berterusan daripada saluran yang bertekanan dan pencacahan segera dan memberikan kesan kepada kawasan berdekatan (Deshpande et al. 2022). Di samping itu, kebakaran disebabkan pancar api boleh berlaku akibat pelepasan bahan mudah terbakar pada tempat terbuka yang membawa kepada kebakaran tanpa letupan disebabkan oleh ketumpatan bahan api.

Pelbagai bahan api mempunyai ketumpatan yang berbeza berbanding dengan udara dan menunjukkan tingkah laku kebocoran yang berbeza. Sebagai tambahan

JADUAL 3. Analisis kepekaan sistem pengoperasian

Node	Senario									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sabotaj berlaku	ü			ü	ü					ü
Degradasi katod berlaku										
Keracunan anod berlaku	ü		ü	ü	ü					ü
Interdifusi berlaku	ü		ü	ü			ü			ü
Kontaminasi berlaku	ü		ü		ü				ü	ü
Pemendapan berlaku	ü		ü	ü	ü	ü			ü	ü
Pembakaran pada suhu tinggi		ü				ü	ü	ü	ü	
Sabotaj tidak berlaku			ü							
Kebocoran berlaku			ü	ü	ü			ü		ü
Kontaminasi tidak berlaku				ü						
Interdifusi tidak berlaku					ü					
Degradasi katod tidak berlaku										
Prestasi operasi tidak berfungsi (Nilai maksimum)	0.8597	0.8628	0.8465	0.8438	0.8429	0.8379	0.8451	0.8379	0.8426	0.8398
Prestasi operasi tidak berfungsi (Nilai minimum)	0.6045	0.7242	0.7371	0.7781	0.7857	0.7822	0.7953	0.7984	0.8053	0.8025
Derivatif	0.2552	0.1386	0.1094	0.0657	0.0572	0.0557	0.0498	0.0395	0.0373	0.0373

kepada kebimbangan mudah terbakar, sesetengah bahan seperti metanol boleh menjadi toksik melalui proses penyedutan, penyerapan pada kulit atau penghadaman apabila langkah keselamatan termasuk pencegahan daripada tumpahan dan pengumpulan

melalui pembendungan dan pengudaraan perlu dilakukan dengan teliti. Antara sumber pencucuh ialah daripada permukaan panas, percikan api yang dihasilkan daripada percikan elektrostatik daripada motor, suis dan peranti mekanikal. SOFC menggunakan bahan

kimia yang berbahaya dalam komponennya kerana bahan-bahan ini berada dalam sistem tertutup dengan pendedahan risiko yang minimum. Walau bagaimanapun, penting untuk melindungi kakitangan daripada potensi pendedahan semasa proses pelupusan atau ketika SOFC rosak kerana sesetengah bahan api boleh menjadi beracun atau penyebab kanser. Contohnya, campuran metanol-udara berbahaya kepada kesihatan manusia dan mendorong kepada keperluan pertimbangan am mengenai pengendalian manual, latihan dan prosedur kecemasan (Wu et al. 2017).

HSE mengeluarkan garis panduan pada tahun 2004 mengenai pemasangan selamat bahan api, serta mengawal risiko operasi. Bahaya operasi yang dikenal pasti adalah kebakaran dan letupan serta pendedahan kepada bahan berbahaya kerana terdapat tiga unsur penting untuk berlakunya kebakaran atau letupan iaitu bahan api, oksigen dan sumber nyalaan. Sistem SOFC beroperasi secara fleksibel dengan pelbagai bahan api seperti hidrogen, gas asli, metanol, etanol, dimetil eter, hidrokarbon cecair dan gas sintesis daripada sumber biojisim dan arang batu. Antara bahan api yang digunakan ialah hidrogen iaitu bahan api yang paling berbahaya kerana julat mudah terbakarnya yang sangat luas, tenaga pencucuhan rendah yang meningkatkan kemungkinan letupan berlaku. Selain itu, hidrogen terbakar dengan nyalaan yang hampir tidak kelihatan. Had letupan bawahnya (LEL) ialah 4% v/v dengan had atas 75% v/v dengan nisbah bagi tenaga pencucuhan untuk campuran hidrogen adalah 2:1 yang bermaksud percikan api kecil boleh menyalakan campuran hidrogen-udara (Li, Cao & Yang 2018).

RUMUSAN DAN CADANGAN

Kajian ini menggunakan BN untuk menilai penaksiran risiko SOFC. Kaedah penaksiran ini menggunakan data dan rujukan daripada kajian lain melalui kajian kepustakaan. Kesimpulan utama menyatakan bahawa kemerosotan pengoperasian SOFC dibina berdasarkan keputusan yang penting dan sering berlaku dalam SOFC sebelum pemetaan BN dibuat.

BN adalah kaedah yang teguh dan fleksibel untuk pemodelan sistem kompleks secara kuantitatif dalam analisis keselamatan. Penjangkaan terhadap pengaruh pemboleh ubah dan analisis kekuatan pergantungan pemboleh ubah melalui arka membenarkan pengenpastian parameter yang paling mempengaruhi dalam sesebuah senario. Selain itu, hubungan antara setiap parameter yang diwakili dengan nilai kebarangkalian membolehkan penjangkaan

terhadap risiko yang membawa kepada kemerosotan pada pelbagai kebarangkalian.

Penggunaan SOFC secara komersial masih lagi sedikit memandangkan pelbagai cabaran terhadap pemilihan bahan pada komponen, reka bentuk, kos fabrikasi serta risiko mengoperasikannya yang memerlukan pemerhatian yang lebih lanjut terhadap teknik pemendapan yang digunakan dan substrat dalam memastikan pengoperasian beres dalam keadaan stabil dan tahan untuk penggunaan jangka panjang. Hubungan antara punca kemerosotan dan prestasi pengoperasian SOFC pada suhu yang tinggi merupakan tumpuan utama dalam pengenpastian parameter yang membawa kemerosotan penggunaannya. Berdasarkan kepada hasil analisis, objektif kajian ini tercapai dan membuktikan bahawa punca kemerosotan utama SOFC adalah pemendapan karbon, kebocoran, keracunan parameter dan kontaminasi. Rumusan terhadap hasil kajian ini adalah, sebanyak 76% - 90% untuk SOFC tidak berfungsi sekiranya terdapat kemerosotan pada parameter utama pengoperasian. Oleh itu, pengoperasian SOFC pada suhu yang tinggi perlu dikawal peratusan kerosakan untuk tidak melebihi 70% untuk memastikan keselamatan dan kelestarian penajaan SOFC.

Cadangan untuk meningkatkan keselamatan penggunaan SOFC sebagai punca tenaga utama adalah melakukan penaksiran risiko pada setiap parameter utama menggunakan kaedah dinamik yang menjangkakan kemerosotan secara langsung, selain kajian terhadap hubungan kait bahan bakar yang digunakan di Malaysia terhadap pengoperasian SOFC. Di samping itu, penaksiran risiko keselamatan terhadap sabotaj perlu dijadikan sebagai satu penanda aras keselamatan pengoperasian SOFC. Bagi kajian akan datang, adalah dicadangkan untuk melanjutkan penaksiran risiko ini dengan lebih luas dan terperinci dengan memasukkan parameter lain yang boleh menyebabkan kemerosotan sistem pengoperasian pada suhu yang tinggi dan ditambah dengan melakukan langkah keselamatan dan pencegahan.

PENGHARGAAN

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pengajian Tinggi, Malaysia untuk dana Skim Geran Penyelidikan Transdisiplinari (TRGS) dengan kod TRGS/1/2019/UKM/01/1/1. Penulis juga ingin merakamkan penghargaan kepada Pusat Penyelidikan dan Instrumentasi (CRIM), Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) untuk kemudahan yang disediakan.

RUJUKAN

- Abdul Hamid, H.H., Zakaria, I. & Othman, M.S. 2019. Tenaga boleh diperbaharui bagi penjana tenaga elektrik di Malaysia: Satu kajian literatur. *Journal on Technical and Vocational Education (JTVE)* 4(3) Special Edition NASCO: 129-140.
- Abdul Rosyid, O. & Oktaufik, M.A.M. (2009). Infrastruktur hidrogen untuk aplikasi *fuel cell* dalam era ekonomi hidrogen. *J. Ilm. Tek. Energi* 1(9): 1-14.
- Akbarizan, Kurniawan, R., Nazri, M.Z.A., Abdullah, S.N.H.S., Murhayati, S. & Nurcahaya. 2018. Using Bayesian Network for determining the recipient of Zakat in BAZNAS Pekanbaru. *2nd International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICon EEI)*. <https://doi.org/10.1109/ICon-EEI.2018.8784142>
- Aman, N.A.M.N., Muchtar, A., Rosli, M.I., Baharuddin, N.A., Somalu, M.R. & Kalib, N.S. 2020. Influence of thermal conductivity on the thermal behavior of intermediate-Temperature solid oxide fuel cells. *Journal of Electrochemical Science and Technology* 11(2): 132-139. <https://doi.org/10.33961/jecst.2019.00276>
- Amin, M.T., Khan, F. & Imtiaz, S. 2019. Fault detection and pathway analysis using a dynamic Bayesian network. *Chemical Engineering Science* 195: 777-790. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.10.024>
- Arsie, I., Filippi, A. di Marra, D., Pianese, C. & Sorrentino, M. 2010. Fault tree analysis aimed to design and implement on-field fault detection and isolation schemes for SOFC systems. *ASME 2010 8th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology Conference*. <http://dx.doi.org/10.1115/FuelCell2010-33344>
- Bahoo Toroody, A., de Carlo, F., Paltrinieri, N., Tucci, M. & van Gelder, P.H.A.J.M. 2020. Bayesian regression based condition monitoring approach for effective reliability prediction of random processes in autonomous energy supply operation. *Reliability Engineering & System Safety* 201: 106966. <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.106966>
- Behravan, A., Kiamanesh, B. & Obermaisser, R. 2021. Fault diagnosis of DCV and heating systems based on causal relation in fuzzy Bayesian belief networks using relation direction probabilities. *Energies* 14(20): 6607. <https://doi.org/10.3390/en14206607>
- Castillo, E., Gutierrez, J.M. & Hadi, A.S. 1997. Sensitivity analysis in discrete Bayesian networks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 27(4): 412-423. <https://doi.org/10.1109/3468.594909>
- Costamagna, P., de Giorgi, A., Moser, G., Serpico, S.B. & Trucco, A. 2019. Data-driven techniques for fault diagnosis in power generation plants based on solid oxide fuel cells. *Energy Conversion and Management* 180(1336): 281-291. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.107>
- Deshpande, G., Shrikhande, S., Sawarkar, A.N. & Patle, D.S. 2022. Multiobjective optimization of ultrasound intensified and ionic liquid catalyzed *in situ* algal biodiesel production considering economic, environmental and safety indicators. *Chemical Engineering Research and Design* 180: 134-152. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.02.011>
- Ericson, C.A. 2005. *Hazard Analysis Techniques for System Safety*. New York: John Wiley & Sons.
- Feng, X., Jiang, J. & Wang, W. 2020. Gas pipeline failure evaluation method based on a Noisy-OR gate bayesian network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 66: 104175. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104175>
- Fenton, N., Lagnado, D., Dahlman, C. & Neil, M. 2019. The opportunity prior: A proof-based prior for criminal cases. *Law, Probability and Risk* 18(4): 237-253. <https://doi.org/10.1093/lpr/mgz007>
- Ferreira, O., Viavattene, C., Jiménez, J.A., Bolle, A., das Neves, L., Plomaritis, T.A., McCall, R. & van Dongeren, A.R. 2018. Storm-induced risk assessment: Evaluation of two tools at the regional and hotspot scale. *Coastal Engineering* 134: 241-253. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.10.005>
- Finkenrath, M., Lokurlu, A., Blum, L. & Stolten, D. 2004. *Dynamic Simulation Model of a High Temperature Fuel Cell System*. 5th European Congress on Modelling and Simulation Conference.
- Forrai, A., Funato, H., Yanagita, Y. & Kato, Y. 2005. Fuel-cell parameter estimation and diagnostics. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 20(3): 668-675. <https://doi.org/10.1109/TEC.2005.845516>
- Garner, S. & Ibrahim, Z. 2016. Gas turbine common issues, failure investigations, root cause analyses, and preventative actions. *ASME 2016 Power Conference*. <https://doi.org/10.1115/power2016-59352>
- Gazzarri, J.I. & Kesler, O. 2007. Non-destructive delamination detection in solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources* 167(2): 430-441.
- Irshad, M., Siraj, K., Raza, R., Ali, A., Tiwari, P., Zhu, B., Rafique, A., Ali, A., Kaleem Ullah, M., & Usman, A. 2016. A brief description of high temperature solid oxide fuel cell's operation, materials, design, fabrication technologies and performance. *Applied Sciences* 6(3): 75. <https://doi.org/10.3390/app6030075>
- Jia, C., Han, M. & Chen, M. 2017. Analysis of gas leakage and current loss of solid oxide fuel cells by screen printing. *ECS Transactions* 78(1): 1533-1540. <https://doi.org/10.1149/07801.1533ecst>
- Johnston, B., Mayo, M.C. & Khare, A. 2005. Hydrogen: the energy source for the 21st century. *Technovation* 25(6): 569-585. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2003.11.005>
- Kabir, S. & Papadopoulos, Y. 2011. Applications of Bayesian networks and Petri nets in safety, reliability, and risk assessments: A review. *Safety Science* 115: 154-175. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.009>

- Kalib, N.S., Muchtar, A., Rao Somalu, M., Kamal, A., Mohd Ihsan, A., Ashikin, N., Aman, M.N. & Akidah Baharuddin, N. 2018. Factors Influencing thermal stress development in solid oxide fuel cells. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences Journal Homepage* 50: 146-152. www.akademiabaru.com/arfmnts.html
- Lackner, M.A., Rogers, A.L. & Manwell, J.F. 2008. Uncertainty analysis in MCP-based wind resource assessment and energy production estimation. *Journal of Solar Energy Engineering* 130(3): 031006. <https://doi.org/10.1115/1.2931499>
- Lee, Y.K., Mavris, D.N., Volovoi, V.V., Yuan, M. & Fisher, T. 2010. A fault diagnosis method for industrial gas turbines using Bayesian data analysis. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 132(4): 041602. <https://doi.org/10.1115/1.3204508>
- Leimeister, M. & Kolios, A. 2018. A review of reliability-based methods for risk analysis and their application in the offshore wind industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 91: 1065-1076. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.004>
- Li, S., Cao, H. & Yang, Y. 2018. Data-driven simultaneous fault diagnosis for solid oxide fuel cell system using multi-label pattern identification. *Journal of Power Sources* 378: 646-659. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.01.015>
- Mahato, N., Banerjee, A., Gupta, A., Omar, S. & Balani, K. 2015. Progress in material selection for solid oxide fuel cell technology: A review. *Progress in Materials Science* 72: 141-337. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.01.001>
- Monica, I., Larisa, I., Serban, M. & Alina, R. 2012. *Hazard Identification and Risk Assessment in Sustainable Enterprise*. 52(12): 58-61. <http://www.ipedr.com/vol52/012-ICEME2012-C00027.pdf>
- Nanik Indayaningsih, Muljadi & Erfin Yundra Febrianto. 2008. Studi awal penggabungan antar komponen sel bahan bakar berbasis keramik. *Jurnal Fisika Himpunan Fisika Indonesia* 8(1): 12-23.
- Nikolić, B. & Ružić-Dimitrijević, L. 2009. Risk assessment of information technology systems. *Issues in Informing Science and Information Technology (IISIT)* 6: 595-615.
- Peng, J., Huang, J., Wu, X., Xu, Y., Chen, H. & Li, X. 2021. Solid oxide fuel cell (SOFC) performance evaluation, fault diagnosis and health control: A review. *Journal of Power Sources* 505: 230058. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230058>
- Pijolat, C. 2012. Screen-printing for the fabrication of solid oxide fuel cells (SOFC). In *Printed Films: Materials Science and Applications in Sensors, Electronics and Photonics*, edited by Prudenziati, M. & Hormadaly, J. Wood Publishing: Elsevier. hlm. 469-495. <https://doi.org/10.1533/9780857096210.2.469>
- Plomaritis, T.A., Costas, S. & Ferreira, Ó. 2018. Use of a Bayesian Network for coastal hazards, impact and disaster risk reduction assessment at a coastal barrier (Ria Formosa, Portugal). *Coastal Engineering* 134: 134-147. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.07.003>
- Ploner, A., Hagen, A. & Hauch, A. 2018. Carbon deposition diagnostics for reliability and state-of-health assessment of SOFC. *ECS Transactions* 85(4): 25-32. <https://doi.org/10.1149/08504.0025ecst>
- Riascos, L.A.M., Simoes, M.G. & Miyagi, P.E. 2007. A Bayesian network fault diagnostic system for proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources* 165(1): 267-278. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.12.003>
- Romessis, C. & Mathioudakis, K. 2006. Bayesian network approach for gas path fault diagnosis. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 128(1): 64-72. <https://doi.org/10.1115/1.1924536>
- Sanuy, M., Jiménez, J.A. & Plant, N. 2020. A Bayesian network methodology for coastal hazard assessments on a regional scale: The BN-craf. *Coastal Engineering* 157: 103627. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.103627>
- Sayed Ali, S. 2018. Testing and evaluation the new safety job analysis guideline. Master's Thesis in Risk Management, University of Stavanger, Norway (Tidak diterbitkan).
- Sharif, A.M., Basri, S. & Ali, H. 2014. Strength and weakness of software risk assessment tools. *International Journal of Software Engineering & Its Applications* 8(3): 389-398.
- Sharifzadeh, M. & Rashtchian, D. 2020. Fault detection, loss prevention, hazard mitigation, and safe operation of solid oxide fuel cell systems. In *Design and Operation of Solid Oxide Fuel Cells: The Systems Engineering Vision for Industrial Application*, edited by Sharifzadeh, M. hlm. 255-274. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815253-9.00008-2>
- Sreedhar, I., Agarwal, B., Goyal, P. & Agarwal, A. 2020. An overview of degradation in solid oxide fuel cells-potential clean power sources. *Journal of Solid State Electrochemistry* 24(6): 1239-1270. <https://doi.org/10.1007/s10008-020-04584-4>
- Uusitalo, L. 2007. Advantages and challenges of Bayesian networks in environmental modelling. *Ecological Modelling* 203(3-4): 312-318. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.11.033>
- Vijay, P., Tadé, M.O. & Shao, Z. 2019. Adaptive observer based approach for the fault diagnosis in solid oxide fuel cells. *Journal of Process Control* 84: 101-114. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2019.09.010>
- Vilela, J., Castro, J., Martins, L.E.G. & Gorschek, T. 2017. Integration between requirements engineering and safety analysis: A systematic literature review. *Journal of Systems and Software* 125: 68-92. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2016.11.031>
- Wang, B., Albarracín-Suazo, S., Pagán-Torres, Y. & Nikolla, E. 2017. Advances in methane conversion processes. *Catalysis Today* 285: 147-158. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2017.01.023>
- Wang, K., Marion-Péra, M-C., Hissel, D., Yousfi-Steiner, N., Pohjoranta, A. & Pofahl, S. 2012. SOFC modelling based on discrete Bayesian network for system diagnosis use. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* 8: 675-680.

- William, B. 2008. *Selection of Hazard Evaluation Techniques*. https://process-improvement-institute.com/_downloads/Selection_of_Hazard_Evaluation_Techniques.pdf
- Wu, X., Xu, Y-W., Zhao, D., Li, Z., Zhong, X., Chen, M., Jiang, J., Deng, Z., Fu, X. & Li, X. 2019. Fault detection and assessment for solid oxide fuel cell system gas supply unit based on novel principal component analysis. *Journal of Power Sources* 436: 226864. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.226864>
- Wu, X.J. & Ye, Q. 2016. Fault diagnosis and prognostic of solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources* 321: 47-56. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.04.080>
- Wu, X. & Gao, D. 2017. Fault tolerance control of SOFC systems based on nonlinear model predictive control. *International Journal of Hydrogen Energy* 42(4): 2288-2308. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.203>
- Wu, X-L., Xu, Y-W., Xue, T. & Li, X. 2017. Fault modeling and simulation of pure hydrogen solid oxide fuel cell system. *2017 Chinese Automation Congress (CAC)*. <https://doi.org/10.1109/CAC.2017.8243231>
- Wu, Z., Shen, Y., Wang, H. & Wu, M. 2020. Urban flood disaster risk evaluation based on ontology and Bayesian Network. *Journal of Hydrology* 583: 124596. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124596>
- Xin, P-W. 2017. Risk-based design tools for process facilities. Master's Thesis. Memorial University of Newfoundland (Tidak diterbitkan).
- Xin, P., Khan, F. & Ahmed, S. 2017. Dynamic hazard identification and scenario mapping using Bayesian network. *Process Safety and Environmental Protection* 105: 143-155. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.11.003>
- Yang, B., Guo, Z., Wang, J., Wang, J., Zhu, T., Shu, H., Qiu, G., Chen, J. & Zhang, J. 2021. Solid oxide fuel cell systems fault diagnosis: Critical summarization, classification, and perspectives. *Journal of Energy Storage* 34: 102153. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102153>
- Yazdi, M. & Kabir, S. 2017. A fuzzy Bayesian network approach for risk analysis in process industries. *Process Safety and Environmental Protection* 111: 507-519. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.08.015>
- Zaccaria, V., Tucker, D. & Traverso, A. 2016. A distributed real-time model of degradation in a solid oxide fuel cell, part I: Model characterization. *Journal of Power Sources* 311: 175-181. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.02.040>
- Zaccaria, V., Tucker, D. & Traverso, A. 2016. A distributed real-time model of degradation in a solid oxide fuel cell, part II: Analysis of fuel cell performance and potential failures. *Journal of Power Sources* 327: 736-742. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.01.027>
- Zarei, E., Azadeh, A., Aliabadi, M.M. & Mohammadfam, I. 2017. Dynamic safety risk modeling of process systems using Bayesian network. *Process Safety Progress* 36(4): 399-407. <https://doi.org/10.1002/prs.11889>
- Zhang, Z., Li, S., Xiao, Y. & Yang, Y. 2019. Intelligent simultaneous fault diagnosis for solid oxide fuel cell system based on deep learning. *Applied Energy* 233-234: 930-942. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.113>

*Pengarang untuk surat-menyurat; email: darman@ukm.edu.my