

# Peningkatan Kecekapan Proses Penyahoksigenan Minyak Isirung Sawit kepada Bahan Api Biojet melalui Pengoptimuman Pemangkin FeMo/AC<sub>B</sub> menggunakan Kaedah Rangsangan Permukaan

(Improving the Efficiency of Palm Kernel Oil Deoxygenation Process to Biojet Fuel through FeMo/AC<sub>B</sub> Catalyst Optimization using Surface Stimulation Method)

N. ASIKIN-MIJAN<sup>1,\*</sup>, SALMA SAMIDIN<sup>2</sup>, N. SYAHIRAH ZAKI<sup>1</sup>, MEGAN XIN YI RAVINDRAN<sup>1</sup>, MOHD SYAWAL YUSOP<sup>1,5</sup>, ABDULKAREEM-ALSULTAN GHASSAN<sup>3</sup>, TAUFIQ-YAP YUN HIN<sup>1</sup> & LEE HWEI VOON<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Jabatan Sains Kimia, Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

<sup>2</sup>Jabatan Kejuruteraan Kimia & Proses, Fakulti Kejuruteraan & Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

<sup>3</sup>Pusat Kecemerlangan Sains dan Teknologi Katalisis (PutraCAT), Fakulti Sains, Universiti Putra Malaysia, 43400 UPM Serdang, Selangor, Malaysia

<sup>4</sup>Nanoteknologi dan Pusat Penyelidikan Katalisis (NanoCaT), Institut Pengajian Siswazah, Universiti Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia

<sup>5</sup>Jabatan Sains dan Teknologi, Universiti Putra Malaysia Kampus Bintulu, 97008 Bintulu, Sarawak, Malaysia

Diserahkan: 19 September 2024/Diterima: 25 Februari 2025

## ABSTRAK

Akibat daripada kesan pemanasan global dan krisis kehabisan sumber tenaga fosil, terdapat alternatif baharu untuk menggantikan penggunaan bahan api fosil kepada bahan api boleh diperbaharui iaitu biojet daripada proses penyahoksigenan (DO) minyak isirung sawit (PKO) menggunakan mangkin FeMo/AC<sub>B</sub>. Proses pengoptimuman ke atas penyahoksigenan PKO menggunakan mangkin FeMo/AC<sub>B</sub> telah dijalankan dengan metodologi rangsangan permukaan (RSM) bersama dengan reka bentuk komposit pusat (CCD). Tiga parameter telah difokuskan; jumlah mangkin (1-9) wt%, suhu tindak balas (270-350) °C dan tempoh tindak balas (30-300) min. Tindak balas yang dikaji ialah hasil selektiviti terhadap bahan api jet (BJF) aktiviti biojet. Model kuadratik dan model linear telah dipilih untuk menentukan selektiviti bahan api jet (C<sub>10</sub>-C<sub>17</sub>). Penilaian ke atas interaksi antara parameter telah dikaji dan keputusan menunjukkan bahawa kesan interaksi antara suhu tindak balas dan masa memberikan kesan yang besar terhadap kenaikan aktiviti DO. Pekali variasi dan R<sup>2</sup> masing-masing adalah 3.38% dan 0.9652 menunjukkan ketepatan model yang tinggi. DO terus dioptimumkan menggunakan RSM dan keputusan menunjukkan bahawa tindak balas DO berjaya dicapai pada paras optimum suhu 320 °C dan masa tindak balas 165 minit dengan menghasilkan 95% produk memilih terhadap bahan api jet.

Kata kunci: Kaedah Rangsangan Permukaan (RSM); mangkin; minyak isirung sawit (PKO); pengoptimuman; penyahoksigenan (DO)

## ABSTRACT

Due to the effects of global warming and the depletion of fossil fuel resources, new alternatives have emerged to replace fossil fuels with renewable fuels, such as biojet fuel from the deoxygenation (DO) process of palm kernel oil (PKO) using an FeMo/AC<sub>B</sub> catalyst. The optimization process for the DO of PKO using the FeMo/AC<sub>B</sub> catalyst was conducted using the Response Surface Methodology (RSM) along with Central Composite Design (CCD). Three parameters were focused on: catalyst amount (1-9 wt%), reaction temperature (270-380 °C), and reaction time (30-240 min). The response studied was the result of the secessivities to jet fuel (BJF) of biojet activity. Quadratic and linear models were selected to determine hydrocarbon selectivity/Bio jet (BJF) (C<sub>10</sub>-C<sub>17</sub>). The evaluation of the interactions between the parameters was studied, and the results showed that the interaction between reaction temperature and time had a significant impact on the increase in DO activity. The coefficient of variation and R<sup>2</sup> were 3.38% and 0.9652, respectively, suggesting high accuracy of the model. DO was further optimized using RSM, and the results showed that the DO reaction was successfully achieved at an optimum temperature of 320 °C and a reaction time of 165 min with 95% bio jet fuel selectivity.

Keywords: Catalyst; deoxygenation (DO); optimization; palm kernel oil (PKO); Response Surface Methodology (RSM)

## PENGENALAN

Kebelakangan ini, pencemaran bahan api fosil semakin dibimbangi oleh banyak pihak. Pencemaran bahan bakar dalam yang utama ialah karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) (Ammar et al. 2022). Kebiasaannya, pencemaran ini sering dikaitkan dengan sektor perindustrian dan penerbangan. Ini kerana kapal terbang menggunakan bahan api fosil, seperti bahan api jet (BJF) dan petrol penerbangan untuk beroperasi yang mengakibatkan pelepasan CO<sub>2</sub> dan seterusnya menyumbang kepada pemanasan global. Menurut kajian IPCC 2023, purata suhu global telah meningkat sebanyak 1.1 °C antara tahun 2011-2020, berbanding purata pada tahun 1850 hingga 1900. Pemanasan global dijangka terus meningkat sehingga 2040 akibat pelepasan CO<sub>2</sub> yang berterusan dalam kebanyakan senario yang dikaji. Malaysia dijangka melepasi had 1.5 °C menjelang 2040, seperti yang ditetapkan dalam Perjanjian Paris. Peningkatan penggunaan bahan api jet akan menyumbang kepada pelepasan CO<sub>2</sub> tambahan dan memperburuk perubahan iklim.

Oleh yang demikian, para penyelidik telah memberi tumpuan khusus kepada penyelidikan mengenai alternatif penggunaan sumber yang boleh diperbaharui seperti bahan bakar bio, hidroelektrik dan biojisim. Bahan api jet adalah bahan api berasaskan tumbuhan yang menyokong kelestarian alam sekitar dan digunakan untuk menggerakkan kapal terbang. Ia mestilah memenuhi piawai kualiti yang lebih tinggi daripada petrol (Itthibenchapong et al. 2017). Trigliserida (TG) ialah sejenis ester yang mana tiga molekul asid lemak, terikat kepada molekul alkohol gliserol. Penggunaan TG sebagai salah satu bahan mentah berpotensi tinggi untuk pengeluaran bahan api jet kerana struktur kimianya yang ringkas dan kandungan oksigen yang lebih rendah berbanding minyak pirolisis biojisim. Pelbagai TG yang berbeza telah diterokai secara meluas untuk pengeluaran berkesan. Antaranya seperti minyak tumbuhan, minyak kelapa, minyak kacang soya dan minyak isirung sawit (Gamal et al. 2020).

Minyak sawit isirung (PKO) yang mempunyai komponen utamanya seperti TG telah dijadikan sebagai salah satu bahan mentah dominan dalam penghasilan bahan api jet terbiodegradasi. PKO mempunyai komposisi asid lemak utama seperti asid laurik (C12:0) dan asid palmitik (C16:0). Kajian Why et al. (2022) berjaya membuktikan kemampuan PKO untuk menggantikan penggunaan bahan api fosil kepada bahan api biojet dengan menghasilkan alkana dan alkena yang terdiri daripada spesies hidrokarbon berantai (C<sub>10</sub>-C<sub>16</sub>) melalui proses penyahoksigenan (DO). DO adalah proses penyingkiran oksigen dan menghasilkan produk sampingan. Hidrokarbon yang diperolehi daripada penyahoksigenan asid lemak terdiri daripada satu karbon lebih pendek daripada asid lemak yang asal (C<sub>n-1</sub>) (Derawi, Zahidi & Baharudin 2023).

Bagi kajian ini, proses DO akan melalui dua peringkat iaitu proses penyahkarbonilasi (DCO) dan

penyahkarbosilasi (deCOx). DCO atau deCOx merujuk kepada proses penyahoksigenan yang menyingkirkan CO<sub>2</sub> atau CO, iaitu punca kepada pengurangan bilangan karbon dalam produk hidrokarbon (Asikin-Mijan et al. 2020a, 2020b). Tindak balas DO memerlukan kehadiran mangkin, iaitu bahan yang digunakan bagi meningkatkan kelajuan tindak balas kimia atau mengurangkan suhu atau tekanan yang diperlukan untuk memulakan tindak balas, tanpa bertindak balas secara langsung dengan bahan kimia yang digunakan. Mangkin yang digunakan dalam DO adalah mangkin logam heterogen, khususnya yang disokong oleh karbon. Kajian terbaharu oleh Ravindran et al. (2022) melaporkan keberkesanan mangkin FeMo/AC<sub>B</sub> dengan AC diperbuat daripada biojisim buluh. Mangkin tersebut bersifat magnetik kerana kehadiran Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> yang memberikan sifat magnetik. Molibdenum pula digunakan dalam proses DO kerana ia mempunyai luas permukaan tinggi pada kekosongan oksigen dan berupaya mengeluarkan atom oksigen daripada bahan mentah beroksigen. Mereka juga melaporkan aktiviti DO dengan hasil hidrokarbon (~80%) dan selektiviti biojet (~80%) dicapai dalam masa 1 jam menggunakan 5wt% FeMo/AC<sub>B</sub>. Mangkin ini terbukti jauh lebih baik berbanding pemangkin komersil Raney-nickel. Walau bagaimanapun, aktiviti pengoptimuman DO PKO menggunakan FeMo/AC<sub>B</sub> masih belum dilaporkan.

Langkah pengoptimuman dalam tindak balas DO bagi penghasilan bahan api biojet adalah penting untuk memperoleh hasil produk dan selektiviti yang lebih baik. Kajian terdahulu menggunakan kaedah satu-pemboleh ubah-pada-satu-masa (OVAT) untuk proses bahan api boleh diperbaharui. Namun, menurut kajian Zdainal Abidin et al. (2019), kaedah OVAT tidak menggambarkan interaksi antara pemboleh ubah, kerana ia menghapuskan kesan interaktif antara parameter. Selain itu, teknik ini memerlukan kos yang tinggi dan masa yang lama kerana jumlah ujian yang diperlukan adalah banyak. Kaedah rangsangan permukaan (RSM) adalah teknik statistik yang digunakan untuk merancang uji kaji, membina model, menilai kesan faktor dan mencari keadaan optimum bagi tindak balas. Teknik ini mengurangkan kos, penggunaan bahan kimia, masa analisis dan bilangan uji kaji, serta membantu mengenal pasti hubungan antara faktor pemboleh ubah tindak balas menggunakan statistik, pengoptimuman dan regresi.

Ramai penyelidik telah menggunakan RSM dalam kajian DO dan telah terbukti bahawa keberkesanan RSM dalam kajian dapat menyorot kelebihannya dalam meramalkan dan mengoptimumkan proses (Ong et al. 2021). Oleh itu, kajian ini memfokus kepada pengoptimuman DO PKO menggunakan FeMo/AC<sub>B</sub> dalam sistem aliran N<sub>2</sub> dengan pendekatan RSM. Pemboleh ubah utama bagi kajian pengoptimuman ini adalah jumlah mangkin (wt%), suhu tindak balas (°C) dan tempoh tindak balas (min). Secara keseluruhannya, tujuan penyelidikan ini dijalankan adalah untuk mengkaji kesan interaksi antara pemboleh ubah DO terhadap jumlah hasil hidrokarbon rantai lurus tepu dan tidak tepu yang terhasil daripada

proses DO yang kemudiannya diproses menjadi bahan api yang diperbaharui. Seterusnya untuk mengesahkan model RSM.

## METODOLOGI

### KAEDAH SINTESIS MANGKIN

Untuk mensintesis  $\text{FeMo/AC}_B$ , karbon teraktif ( $\text{AC}_B$ ) diperoleh dengan memanaskan buluh pada suhu  $600\text{ }^\circ\text{C}$  selama 30 minit dalam atmosfera Ar tulen (99.999%,  $150\text{ mL min}^{-1}$ ) melalui proses pirolisis (Farabi et al. 2019). Biochar yang terhasil dirawat dengan larutan pengaktif KOH (85% ketulen) pada nisbah berat 1:1 selama 12 jam, kemudian dikeringkan selama 24 jam pada suhu  $150\text{ }^\circ\text{C}$ . Karbon teraktif yang diperoleh kemudiannya dipanaskan dalam atmosfera Ar pada suhu  $800\text{ }^\circ\text{C}$  selama 1 jam untuk menghasilkan biochar teraktif. Biochar ini kemudiannya disejukkan dan dirawat dengan HCl ( $1\text{ mol L}^{-1}$ ) untuk mengekstrak sebatian K, diikuti dengan pembasuhan menggunakan air ternyahion.

Selepas itu, kaedah ko-pemendakan dijalankan untuk menyediakan pemangkin  $\text{FeMo/AC}_B$  (Ravindran et al. 2022). Pertama,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  magnetik disediakan dengan melarutkan  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  dan  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  dalam nisbah mol 2:1 ke dalam  $100\text{ mL}$  air suling untuk menghasilkan garam  $\text{Fe}^{3+}$  dan  $\text{Fe}^{2+}$ . Larutan tersebut kemudian diaduk selama 10 minit pada suhu  $40\text{ }^\circ\text{C}$ . Seterusnya,  $20\text{ mL}$  larutan  $\text{NH}_4\text{OH}$  10% ditambahkan secara perlahan sehingga pH mencapai 11. Larutan garam Mo yang telah dilarutkan ditambahkan ke dalam campuran tersebut. Kemudian,  $8\text{ g}$  serbuk karbon aktif ditambahkan sambil mengekalkan pH 11 dan larutan dibiarkan selama 24 jam pada suhu  $40\text{ }^\circ\text{C}$  di bawah pengacauan mekanikal. Selepas 24 jam, mendakan yang terbentuk ditapis, dibasuh beberapa kali dengan aseton dan dikeringkan pada suhu  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . Akhir sekali, mendakan dikumpulkan dan dikalsinasi pada suhu  $530\text{ }^\circ\text{C}$  selama 2 jam di bawah aliran  $\text{N}_2$ .

### PENYAHOKSIGENAN BERMANGKIN KE ATAS MINYAK ISIRUNG SAWIT

Reaktor semi-kumpulan  $250\text{ mL}$ , seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1, digunakan untuk tindak balas DO bermangkin terhadap PKO. Proses ini dilakukan dengan pengacauan mekanikal dalam keadaan separa vakum di bawah aliran gas  $\text{N}_2$  lengai. Tindak balas DO PKO dijalankan pada suhu  $320\text{ }^\circ\text{C}$  dengan aliran gas  $\text{N}_2$  lengai ( $50\text{ cc min}^{-1}$ ) selama 2 jam 45 minit. Sebanyak 5 wt% mangkin  $\text{FeMo/AC}_B$  yang telah disintesis dicampurkan dengan  $10\text{ g}$  PKO dan dimasukkan ke dalam reaktor. Gas  $\text{N}_2$  dialirkan pada kadar  $20\text{ cc min}^{-1}$  untuk mengeluarkan oksigen dari dalam reaktor. Wap yang dihasilkan semasa tindak balas DO dikondensasikan menjadi produk cecair menggunakan kondenser penyejuk pada suhu  $12\text{ }^\circ\text{C}$  dan dikumpulkan dalam bekas pengumpul. Produk yang diperoleh akan dianalisis menggunakan Kromatografi

Gas Pengesanan Pengionan Nyalaan (GD-FID) untuk menentukan jumlah hasil produk dan selektiviti. Proses ini diulang dengan variasi jumlah mangkin, suhu dan masa berdasarkan nilai yang ditentukan oleh perisian 'Design Expert 13', seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 1. Dalam jadual tersebut, A mewakili jumlah mangkin, B adalah suhu tindak balas dan C merujuk kepada tempoh tindak balas, seperti yang dinyatakan dalam Jadual 2.

### PENCIRIAN MANGKIN

Kehabluran dan sifat struktur pemangkin  $\text{FeMo/AC}_B$  dikenal pasti melalui analisis XRD menggunakan difraktometer Shimadzu XRD-6000 dengan sinaran  $\text{Cu-K}\alpha$  pada kadar pengimbasan  $2^\circ\text{ min}^{-1}$  dalam julat  $2\theta$  antara  $10\text{--}70^\circ$ . Teori BET digunakan untuk mengukur luas permukaan, purata diameter, isi padu liang dan keliangan pemangkin melalui penjerapan  $\text{N}_2$ . Instrumen Micromeritics ASAP 2020 digunakan untuk analisis sifat fizikal pemangkin, dengan penjerapan  $\text{N}_2$  dijalankan di bawah rendaman cecair nitrogen pada suhu kriogenik ( $-196\text{ }^\circ\text{C}$ ). Analisis  $\text{NH}_3$ -Penyahjerapan Berprogram Suhu ( $\text{NH}_3$ -TPD) merupakan sebuah teknik analisis yang digunakan untuk mengkaji sifat asid mangkin. Teknik ini membantu dalam memahami sifat permukaan sampel, interaksi antara molekul dengan permukaan dan kestabilan mangkin. Untuk memulakan analisis,  $50$  hingga  $60\text{ mg}$  sampel serbuk halus dimasukkan ke dalam tiub kuarza berbentuk U yang telah dimuatkan dengan kapas kuarza. Untuk langkah pembersihan, sampel dipanaskan pada suhu  $300\text{ }^\circ\text{C}$  di bawah aliran  $\text{N}_2$  selama 30 minit, pada kadar aliran  $20\text{ mL min}^{-1}$ . Seterusnya, penjerapan gas  $\text{NH}_3$  dimulakan pada kadar aliran  $20\text{ mL min}^{-1}$  pada suhu selama 1 jam. Kemudian, sampel dicuci dengan aliran He untuk mengeluarkan  $\text{NH}_3$  yang terjerap secara fizikal sehingga isyarat TCD asas stabil. Akhirnya,  $\text{NH}_3$ -TPD dilaksanakan hingga  $900\text{ }^\circ\text{C}$  (kadar pemanasan  $10\text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$ ) di bawah aliran He ( $20\text{ mL min}^{-1}$ ) dan jumlah penyahjerapan  $\text{NH}_3$  direkodkan menggunakan TCD. FESEM-EDX digunakan untuk mengkaji morfologi dan komposisi unsur pemangkin pada pembesaran sehingga  $430,000\times$ . Ciri magnetik pemangkin dicirikan menggunakan VSM (Lake Shore siri 7404) untuk memeriksa sifat magnet melalui gelung histeresis magnet.

### CIRI FIZIKOKIMIA DAN KOMPOSISI ASID LEMAK PKO MELALUI PROSES TRANSESTERIFIKASI

Kajian ini menggunakan PKO sebagai bahan mentah yang diperoleh daripada MPOB. Jadual 3 menunjukkan sifat fizikokimia PKO selepas transesterifikasi trigliserida kepada FAME (nisbah metanol kepada minyak 1:15, suhu  $65\text{ }^\circ\text{C}$ , selama 3 jam). Asid lemak utama dalam PKO adalah asid laurik ( $\text{C}_{12:0}$ ) (43%) diikuti oleh asid miristik ( $\text{C}_{14:0}$ ) (~14%) and asid oleik ( $\text{C}_{18:1}$ ) (13.8%). Dari segi fizikokimia, nilai asid  $3.4\text{ mg KOH/g}$ , kelikatan  $35.3\text{ mm}^2/\text{s}$ , ketumpatan  $0.88\text{ kg/m}^3$  dan tahap FFA rendah (1.7%) (Jadual 3).



RAJAH 1. Susunan alat radas untuk tindak balas DO

JADUAL 1. Reka bentuk uji kaji yang dihasilkan daripada RSM dan rangsangan daripada setiap tindak balas

| Jenis ruang | A: Jumlah mangkin (wt.%) | B: Suhu (°C) | C: Masa (min) | Jangkaan nilai selektiviti (%) | Selektiviti BJF (%) |
|-------------|--------------------------|--------------|---------------|--------------------------------|---------------------|
| Faktorial   | 7                        | 300          | 90            | 62                             | 60                  |
| Faktorial   | 7                        | 340          | 90            | 92                             | 95                  |
| Faktorial   | 7                        | 300          | 240           | 93                             | 96                  |
| Faktorial   | 3                        | 300          | 240           | 93                             | 90                  |
| Faktorial   | 3                        | 340          | 240           | 86                             | 88                  |
| Faktorial   | 3                        | 340          | 90            | 80                             | 77                  |
| Faktorial   | 3                        | 300          | 90            | 61                             | 60                  |
| Faktorial   | 7                        | 340          | 240           | 96                             | 96                  |
| Aksial      | 5                        | 320          | 39            | 66                             | 68                  |
| Aksial      | 5                        | 286          | 165           | 68                             | 70                  |
| Aksial      | 8.3                      | 320          | 165           | 96                             | 94                  |
| Aksial      | 1.6                      | 320          | 165           | 87                             | 90                  |
| Aksial      | 5                        | 353          | 165           | 87                             | 86                  |
| Aksial      | 5                        | 320          | 291           | 97                             | 96                  |
| Tengah      | 5                        | 320          | 165           | 95                             | 98                  |
| Tengah      | 5                        | 320          | 165           | 95                             | 92                  |
| Tengah      | 5                        | 320          | 165           | 95                             | 92                  |
| Tengah      | 5                        | 320          | 165           | 95                             | 95                  |
| Tengah      | 5                        | 320          | 165           | 95                             | 96                  |

JADUAL 2. Faktor-lima-empat CCD parameter DO

| Faktor | Nama    | Unit | Jenis Sub  | Minimum | Maksimum | Kod rendah  | Kod tinggi  | Min    | Sisihan piawai |
|--------|---------|------|------------|---------|----------|-------------|-------------|--------|----------------|
| A      | Mangkin | wt%  | Berterusan | 1.64    | 8.36     | -1 ↔ 3.00   | +1 ↔ 7.00   | 5.00   | 1.70           |
| B      | Suhu    | °C   | Berterusan | 286.36  | 353.64   | -1 ↔ 300.00 | +1 ↔ 340.00 | 320.00 | 16.96          |
| C      | Time    | Min  | Berterusan | 38.87   | 291.13   | -1 ↔ 90.00  | +1 ↔ 240.00 | 165.00 | 63.59          |

JADUAL 3. Sifat fizikokimia dan komposisi asid lemak PKO

| Sifat                  | Nilai <sup>a</sup> | Nilai <sup>b</sup> | Kaedah               |
|------------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Nilai asid (mg KOH/g)  | 3.4                | 2.7±0.3            | AOCS Ca 5a-40        |
| FFA (%)                | 1.7                | 1.35±0.15          | AOCS Ca 5a-40        |
| Lembapan               |                    | 0.5 maks           |                      |
| Ketumpatan             | 0.88               | 0.86-0.9           | D1298                |
| Komposisi asid lemak   |                    |                    | AOCS Ce1-62 & Ce-661 |
| Asid kaprilik (C8:0)   | -                  | 3.0                |                      |
| Asid kaprik (C10:0)    | -                  | 4.0                |                      |
| Asid laurik (C12:0)    | 43.1               | 48.0               |                      |
| Asid miristik (C14:0)  | 13.9               | 16.0               |                      |
| Asid palmitik (C16:0)  | 9.0                | 8                  |                      |
| Asid oleik (C18:0)     | 13.8               | -                  |                      |
| Lain-lain <sup>c</sup> | 0.9                | 5.5                |                      |

a= Nilai yang diperoleh secara uji kaji

b= Nilai yang diperoleh daripada kepustakaan

c= Jumlah nilai FFA Asid stearik (C18:0), Asid linoleik (C18:2), Asid arakinoik (C20:0)

## ANALISIS BAHAN API BIOJET

Kromatografi Gas Pengesan Pengionan Nyalaan (GC-FID) (Shimadzu GC-14B) bersama lajur kapilari HP-5 (panjang: 30 m, diameter dalam: 0.32 mm, ketebalan filem: 0.25 mm) yang beroperasi pada suhu 300 °C telah digunakan untuk mengenal pasti dan menilai secara kuantitatif produk cecair yang telah melalui proses DO. Sebelum analisis dilakukan, produk cecair tersebut dicairkan dengan n-heksana gred GC. Bagi tujuan analisis kuantitatif, 1-bromo heksana telah digunakan sebagai piawai rujukan. Suhu injeksi ditetapkan pada 250 °C dan gas pembawa yang digunakan adalah nitrogen. Oven GC dipanaskan awal pada 40 °C dan dikekalkan pada suhu tersebut selama 6 minit sebelum dipanaskan secara beransur-ansur kepada 270 °C pada kadar 7 °C min<sup>-1</sup>. Produk cecair dikenal pasti menggunakan piawaian alkana dan alkena dari <sub>n</sub>C<sub>8</sub> hingga <sub>n</sub>C<sub>20</sub>. Peratusan hasil hidrokarbon ( $\mathcal{X}$ ) untuk alkana dan alkena (C<sub>8</sub>-C<sub>20</sub>) boleh dikira menggunakan Persamaan (1).

$$\mathcal{X} = \frac{\sum n_o + \sum n_i}{\sum n_z} \times 100\% \quad (1)$$

dengan  $\mathcal{X}$  ialah hasil hidrokarbon alkana dan alkena (C<sub>8</sub>-C<sub>20</sub>) (%);  $n_o$  ialah kawasan puncak alkena (C<sub>8</sub> - C<sub>20</sub>);  $n_i$  ialah kawasan puncak alkana (C<sub>8</sub>-C<sub>20</sub>); dan  $n_z$  ialah kawasan puncak produk.

## KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Berdasarkan difraktogram XRD (Rajah 2), spesies penyokong pada pemangkin FeMo/AC<sub>B</sub> menunjukkan puncak yang luas, iaitu dikelaskan sebagai karbon jenis amorfus. Dalam kes mangkin FeMo/AC<sub>B</sub>, profil XRD menunjukkan kewujudan struktur kubik milik Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> pada 2θ= 30.5°, 35.24°, 36.90°, 53.32°, 56.97°, 62.62°, 62.74° dan 73.60° (No. kad JCPDS 00-001-1111), struktur hexagonal milik Fe<sub>2</sub>Mo pada 2θ =41.38° dan 71.88° (no. kad JCPDS 00-006-0622) dan struktur tetragonal iaitu FeMo pada 2θ=42.79°, 49.20° and 66.04° (No. Kad JCPDS 00-015-0539). Dapat dilihat juga, puncak Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> yang jelas pada puncak XRD bagi pemangkin FeMo/AC<sub>B</sub> segar membuktikan bahawa bahan pemangkin mempunyai ciri magnetik yang tinggi (Ravindran et al. 2022). Manakala, ketiadaan fasa Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> boleh dikaitkan dengan proses pengoksidaan yang semakin berkurang semasa tindak balas dan pembentukan fasa aktif Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (Abu

Tahari et al. 2020). Dalam keadaan ini, proses pemisahan mangkin FeMo/AC<sub>B</sub> daripada medium tindak balas selepas proses kimia menjadi lebih mudah.

Jerapan dan penyahjerapan bagi pemangkin FeMo/AC<sub>B</sub> serta luas permukaan, saiz liang dan isi padu mangkin ditentukan menggunakan persamaan BET (Brunauer-Emmett-Teller) dan BJH (Barrett-Joyner-Halenda) seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3(a). Luas permukaan, saiz liang dan isi padu mangkin FeMo/AC<sub>B</sub> masing-masing adalah 1797 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>, 3.8 nm dan 1.7 cm<sup>3</sup> g<sup>-1</sup>. Isoterma penjerapan gas N<sub>2</sub> menunjukkan lengkung histeresis yang dikelaskan sebagai jenis IV (Ravindran et al. 2022). Isoterma jenis IV memberikan maklumat berguna mengenai struktur mesolintang melalui lengkung histeresisnya dan terdapat perbezaan yang jelas antara cabang penjerapan dan penyahjerapan. Selain itu, mangkin FeMo/AC<sub>B</sub> menunjukkan liang dengan julat 2-50 nm yang bersifat mesolintang (Wan Khalit et al. 2022). Kajian terdahulu melaporkan bahawa pemangkin dengan luas permukaan lebih besar daripada 1000 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> adalah lebih tinggi dalam tindak balas deCO<sub>x</sub> dan menghasilkan produk bahan api yang sangat selektif (Ayadi et al. 2020). Hal ini juga dipersetujui melalui penemuan dalam kajian oleh Soltani et al. (2017).

Keasidan pemangkin FeMo/AC<sub>B</sub> telah ditentukan menggunakan instrumen Autochem II Plus TPD-NH<sub>3</sub> dan puncak penyahjerapan dikelaskan kepada tapak berasid yang lemah (< 250 °C), sederhana (250-500 °C) dan kuat (> 500 °C). Rajah 3(b) menunjukkan bahawa pemangkin FeMo/AC<sub>B</sub> menunjukkan kewujudan tapak berasid kuat pada 661 °C dan 908 °C dengan jumlah kekuatan keasidan 2965 μmol g<sup>-1</sup>. Ciri berasid ini dikaitkan dengan unsur Fe, Mo dan ACB. Berdasarkan data yang diperolehi, ini membuktikan bahawa FeMo/AC<sub>B</sub> adalah pemangkin berasid yang baik dari segi bilangan tapak asid dan kekuatan asid (Gamal et al. 2020). Keasidan mangkin bergantung kepada bilangan tapak asid dan kekuatan asid. Lebih banyak tapak asid meningkatkan aktiviti pemangkin, manakala kekuatan asid (diukur melalui suhu penyahjerapan) menunjukkan keupayaan menderma proton (H<sup>+</sup>). Keseimbangan antara bilangan dan kekuatan tapak asid penting untuk kecekapan pemangkin. Mangkin dengan banyak tapak asid lemah kurang berkesan dalam pemecahan (cracking), tetapi jika kekuatan asid mencukupi, hasil tetap dapat ditingkatkan. Sebaliknya, tapak asid kuat dengan kekuatan rendah mengurangkan keupayaan pemilihan hidrokarbon. Oleh itu, mangkin berasid yang baik harus mempunyai bilangan tapak asid yang mencukupi dan kekuatan asid yang sesuai untuk meningkatkan hasil dan keupayaan pemilihan produk.

Sifat magnetik bagi mangkin FeMo/AC<sub>B</sub> diukur pada suhu bilik menggunakan analisis Getaran Sampel Magnetometer (VSM). Berdasarkan Rajah 4, mangkin FeMo/AC<sub>B</sub> menunjukkan sifat feromagnetik kerana gelung histeresis yang sempit menghampiri sifar dan selari dengan keputusan (Dodrill 2015; Ravindran et al. 2022). Walaupun bahan ini tidak mempunyai kemagnetan yang

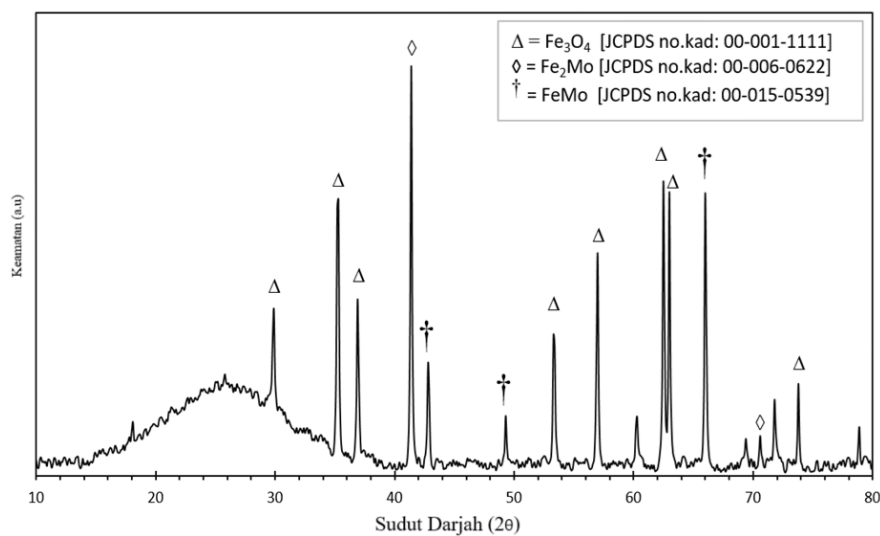
kuat secara semula jadi, ia sangat responsif terhadap medan magnet luaran dan dapat menyimpan sebahagian medan magnet itu untuk tempoh tertentu selepas medan luaran dikeluarkan. Tambahan pula, nilai paksaan yang tinggi (3.3 G) menunjukkan bahawa pemangkin berjaya mengekalkan sifat magnetnya walaupun selepas medan magnet luaran ditarik balik. Ini jelas menunjukkan bahawa pemangkin mempunyai sifat magnet yang kuat, yang boleh memudahkan pemisahan magnet antara pemangkin dan bahan tindak balas. Peningkatan ini akan memudahkan pemisahan daripada tapak tindak balas, sekali gus meningkatkan hasil (Rajah 4).

Rajah 5 menunjukkan hasil analisis imej FESEM dan kuantitatif EDX bagi pemangkin segar FeMo/AC<sub>B</sub>. Pemerhatian menunjukkan terdapat kehadiran aglomerasi zarah, yang berpotensi mempengaruhi prestasi pemangkin dalam tindak balas. Analisis kuantitatif EDX yang dipaparkan dalam bentuk graf menunjukkan kehadiran unsur C, Fe dan Mo. Kewujudan spesies Fe dan Mo menunjukkan kejayaan pengikatan Fe dan Mo terhadap AC<sub>B</sub> yang disokong oleh kajian Ravindran et al. (2022). Analisis EDX juga membuktikan bahawa spesies C sebagai komponen utama sebanyak ~86% yang dapat menyumbang sebagai halangan pensinteran dengan lebih cekap.

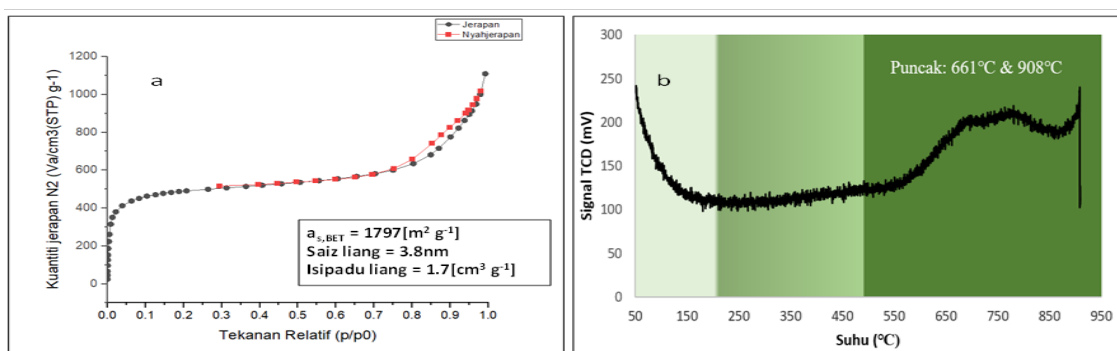
Analisis regresi digunakan untuk mengkaji hubungan antara model empirik atau ramalan yang dihasilkan daripada data uji kaji. Penyelidikan ini memfokus kepada tindak balas selektiviti hidrokarbon bahan api jet (C<sub>10</sub>-C<sub>17</sub>). Jadual 4 menunjukkan turutan model hasil tambah kuasa dua bagi data selektiviti hidrokarbon yang dihasilkan. Antara model yang diuji (linear, interaksi dua faktor (2FI), kuadratik dan kubik), model kuadratik atau linear dicadangkan sebagai model terbaik untuk menggambarkan tindak balas yang dihasilkan daripada reka bentuk uji kaji. Walau bagaimanapun, model kuadratik dipilih sebagai model terbaik kerana ia menunjukkan interaksi antara dua faktor dan mempunyai nilai F yang lebih besar berbanding model lain (Zdinal Abidin et al. 2019). Seterusnya, persamaan model berdasarkan nilai berkod A, B dan C untuk penghasilan selektiviti dinyatakan dalam Persamaan (2). Persamaan model yang dihasilkan menunjukkan bahawa pekali positif bagi A, B, C dan AB memberikan kesan linear terhadap respons. Namun begitu, hasil tambah kuasa dua bagi A<sup>2</sup>, B<sup>2</sup>, C<sup>2</sup> dan AC serta BC menunjukkan kesan negatif yang mengurangkan selektiviti produk.

$$\text{Selektiviti} = 94.62 + 2.83A + 5.63B + 9.15C + 2.5AB - 0.49AC - 6.75BC - 1.04A^2 - 5.99B^2 - 4.58C^2 \quad (2)$$

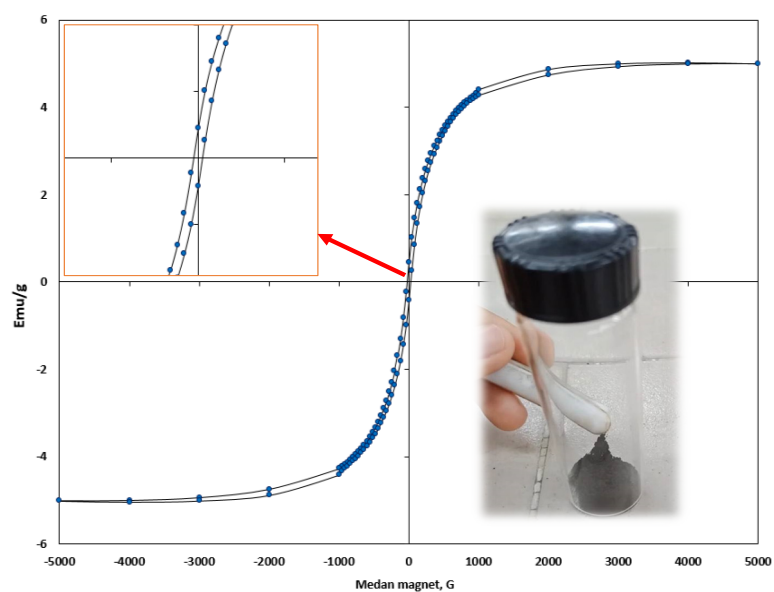
Nilai F-Model sebanyak 27.2 menunjukkan model ini adalah signifikan. Hanya terdapat peluang sebanyak 0.01% bahawa nilai F sebesar ini berlaku disebabkan oleh kebingaran. Nilai p kurang daripada 0.0500 menunjukkan bahawa model adalah signifikan. Dalam kes ini A, B, C, BC, B<sup>2</sup>, C<sup>2</sup> adalah model yang signifikan.



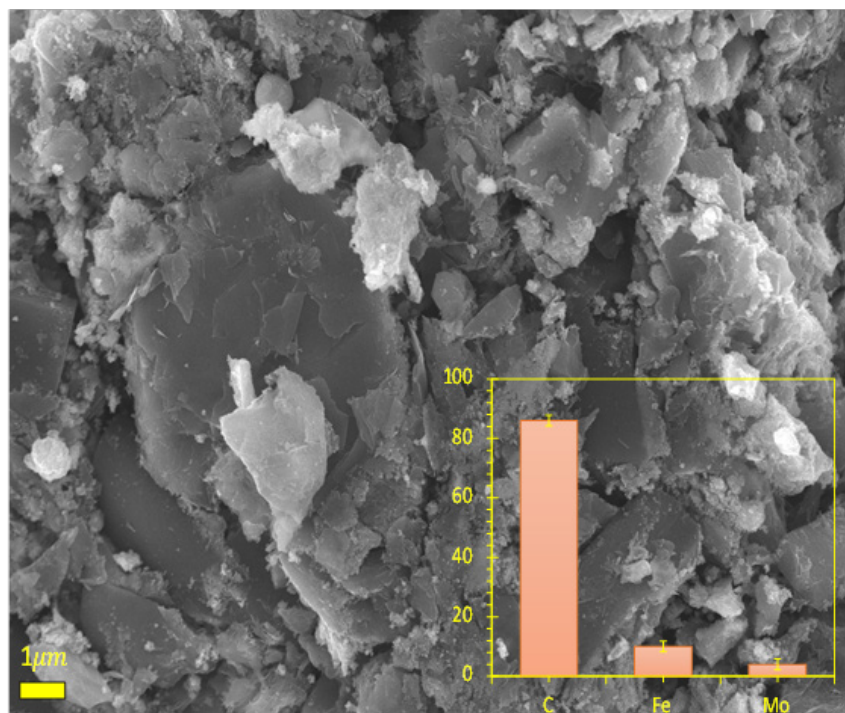
RAJAH 2. Difraktogram XRD bagi mangkin  $\text{FeMo}/\text{AC}_B$  bersih



RAJAH 3. (a) Isotherma jerapan nyahjerapan  $\text{N}_2$  dan (b) TPD- $\text{NH}_3$  bagi  $\text{FeMo}/\text{AC}_B$



RAJAH 4. Lengkuk histerisis magnetik bagi  $\text{FeMo}/\text{AC}_B$



RAJAH 5. Imej FESEM dan pemetaan EDX bagi FeMo/AC<sub>B</sub>

Berdasarkan Jadual 5, hasil analisis varians (ANOVA) bagi model kuadratik rangsangan permukaan yang bertujuan untuk menilai kesan beberapa faktor terhadap tindak balas yang dikaji. Hasil ini menampilkan jumlah kuasa dua, darjah kebebasan (Df), nilai F dan nilai P bagi setiap faktor serta interaksi antara faktor tersebut. Nilai F digunakan untuk menentukan sama ada faktor tertentu mempunyai kesan yang signifikan terhadap tindak balas, manakala nilai P memberikan ukuran kebarangkalian bahawa kesan tersebut berlaku secara kebetulan. Model keseluruhan mempunyai nilai F sebanyak 27.2 dan nilai  $P < 0.0001$  yang menunjukkan bahawa model ini adalah signifikan secara statistik dengan kebarangkalian hanya 0.01% bahawa kesan yang diperhatikan berlaku secara kebetulan. Faktor A (Jumlah Mangkin): Nilai F sebanyak 9.82 dengan nilai  $P \sim 0.012$  menunjukkan bahawa jumlah mangkin memberi kesan yang signifikan terhadap tindak balas. Faktor B (Suhu): Suhu juga signifikan dengan nilai F 38.72 dan nilai  $P$  0.0121, menunjukkan kesan yang penting terhadap tindak balas yang diperoleh. Faktor C (Masa) menunjukkan kesan paling kuat dengan nilai F 102.42 dan nilai  $P < 0.0001$ , yang menjadikannya faktor paling signifikan dalam kajian ini. Untuk interaksi antara faktor: Interaksi suhu dan masa (BC) menunjukkan interaksi yang paling kuat antara interaksi faktor lain. Secara keseluruhannya, model ini adalah signifikan, seperti yang ditunjukkan oleh nilai  $R^2$  sebanyak 0.9652 dan pekali variasi adalah 3.88, yang menunjukkan ketepatan model (Rajah 6(a)). Hal ini selari dengan nisbah isyarat kepada hingar sebanyak 0.23 menunjukkan bahawa model ini

cukup baik untuk digunakan bagi reka bentuk kajian masa depan.

Selain itu, kajian ke atas baki (*residual*) untuk menentukan kesesuaian model tindak balas telah dijalankan. Baki adalah perbezaan antara tindak balas yang diperhatikan dan tindak balas yang diramalkan. Analisis ini dilakukan melalui plot kebarangkalian normal bagi baki (Rajah 6(b)) dan plot baki melawan tindak balas yang dijalankan (Rajah 6c). Plot kebarangkalian normal bagi baki menunjukkan bahawa kesemua nilai adalah berada berdekatan dengan garisan garisan merah, menandakan bahawa model yang digunakan adalah sesuai. Sementara itu, plot baki melawan tindak balas menunjukkan penyebaran yang rawak, namun masih berada dalam had yang mungkin menunjukkan bahawa anggaran model adalah tepat.

Plot regresi umum yang mewakili persamaan regresi diberikan dalam bentuk plot permukaan tindak balas tiga dimensi (3D) dan plot kontur dua dimensi (2D). Kedua-dua plot permukaan 3D dan plot kontur 2D (Rajah 7(a)-7(c)) menggambarkan kesan interaksi dua pemboleh ubah terhadap selektiviti. Dapat dilihat bahawa apabila tindak balas pemangkin berlaku pada suhu tinggi, masa tindak balas dan peningkatan jumlah pemangkin menunjukkan kesan positif terhadap penghasilan hidrokarbon rantai lurus sehingga mencapai tahap maksimum. Rajah 8(a1)-8(a2) menunjukkan 2D plot kontur dan 3D plot permukaan tindak balas bagi kesan interaksi antara jumlah pemangkin (A) dan suhu tindak balas (B) terhadap selektiviti produk. Hasil kajian

menunjukkan bahawa peningkatan jumlah pemangkin berserta peningkatan suhu tindak balas jelas meningkatkan aktiviti DO (>90% selektiviti) di bawah masa tindak balas yang tetap dan suhu tindak balas 300-340 °C. Oleh itu, suhu tindak balas memainkan peranan penting dalam memulakan proses DO, manakala jumlah pemangkin yang tinggi membantu secara positif dalam tindak balas tersebut. Dalam kajian ini, kesan interaksi antara jumlah pemangkin (A) dan suhu tindak balas (B) terhadap selektiviti produk ditunjukkan dalam Rajah 8(a1)-8(a2). Hasil menunjukkan bahawa interaksi kedua-dua parameter tindak balas memberikan kesan positif terhadap aktiviti DO apabila

jumlah pemangkin berada dalam julat 3-7wt.% dan suhu tindak balas dalam lingkungan 300-340 °C. Peningkatan jumlah mangkin dan suhu menyebabkan peningkatan selektiviti bahan api jet. Jumlah tapak aktif yang cukup menyebabkan kesan positif ke atas tindak balas DO dan meningkatkan selektiviti terhadap penghasilan bahan api jet produk. Hal ini selari dengan kesan suhu tindak balas, suhu yang tinggi akan meningkatkan pemecahan ikatan C-O dan C-C dan seterusnya meningkatkan aktiviti DO. Hal ini selaras dengan Persamaan (2), iaitu interaksi positif antara A dan B, yang menunjukkan peningkatan selektiviti bahan api jet apabila kedua-dua parameter tersebut melebihi tahap optimum.

JADUAL 4. Turutan model hasil tambah kuasa dua (selektiviti)

| Sumber             | Jumlah kuasa dua | Df | Min kuasa dua | Nilai F | Nilai P | Catatan     |
|--------------------|------------------|----|---------------|---------|---------|-------------|
| Min vs Jumlah      | 1.414E+05        | 1  | 1.414E+05     |         |         |             |
| Linear vs Min      | 1688.70          | 3  | 562.90        | 7.03    | 0.0036  |             |
| 2FI vs Linear      | 416.50           | 3  | 138.83        | 2.12    | 0.1505  |             |
| Kuadratik vs 2FI   | 683.81           | 3  | 227.94        | 20.38   | 0.0002  | Dicadangkan |
| Kubik vs Kuadratik | 72.30            | 4  | 18.08         | 3.18    | 0.1179  | Dialihkan   |
| Baki               | 1.414E+05        | 1  | 1.414E+05     |         |         |             |
| Jumlah             | 1688.70          | 3  | 562.90        | 7.03    | 0.0036  |             |

JADUAL 5. Analisis ANOVA bagi model kuadratik rangsangan permukaan

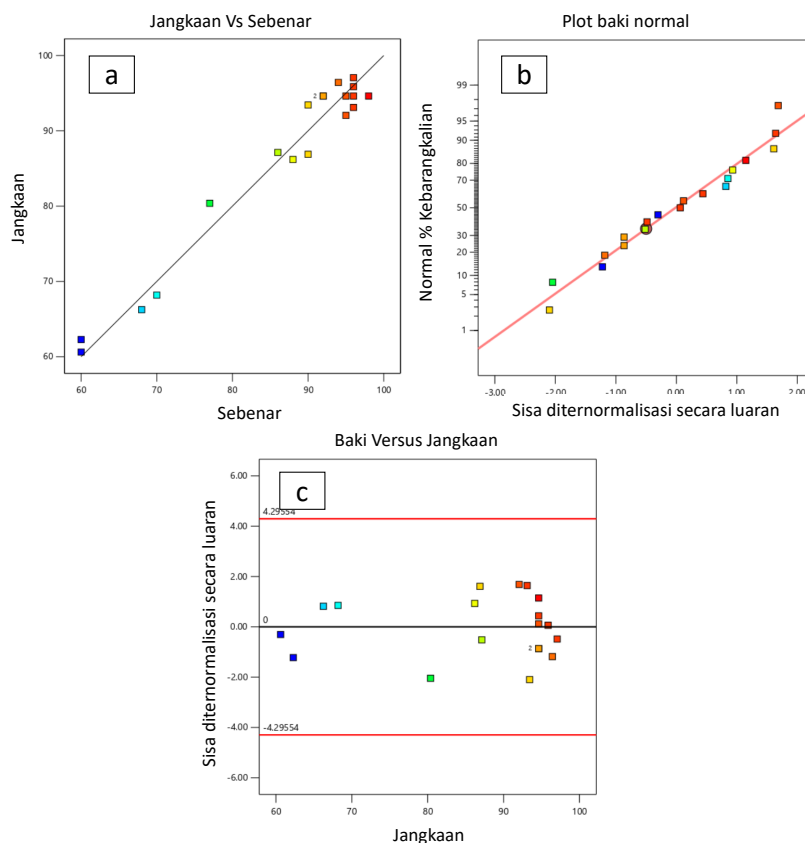
| Sumber             | Jumlah kuasa dua | Df                          | Min kuasa dua | Nilai F | Nilai P  |                  |
|--------------------|------------------|-----------------------------|---------------|---------|----------|------------------|
| Model              | 2789.01          | 9                           | 309.89        | 27.70   | < 0.0001 | Signifikan       |
| A-Jumlah Mangkin   | 109.82           | 1                           | 109.82        | 9.82    | 0.0121   |                  |
| B-Suhu             | 433.11           | 1                           | 433.11        | 38.72   | 0.0002   |                  |
| C-Masa             | 1145.77          | 1                           | 1145.77       | 102.42  | < 0.0001 |                  |
| AB                 | 50.00            | 1                           | 50.00         | 4.47    | 0.0636   |                  |
| AC                 | 2.00             | 1                           | 2.00          | 0.1788  | 0.6823   |                  |
| BC                 | 364.50           | 1                           | 364.50        | 32.58   | 0.0003   |                  |
| A <sup>2</sup>     | 15.01            | 1                           | 15.01         | 1.34    | 0.2765   |                  |
| B <sup>2</sup>     | 491.15           | 1                           | 491.15        | 43.91   | < 0.0001 |                  |
| C <sup>2</sup>     | 286.86           | 1                           | 286.86        | 25.64   | 0.0007   |                  |
| Baki               | 100.68           | 9                           | 11.19         |         |          |                  |
| Kecacatan          | 73.48            | 5                           | 14.70         | 2.16    | 0.2376   | Tidak Signifikan |
| Ralat tulen        | 27.20            | 4                           | 6.80          |         |          |                  |
| Jumlah kor         | 2889.68          | 18                          |               |         |          |                  |
| Sisihan piawai     | 3.34             | R <sup>2</sup>              |               |         | 0.9652   |                  |
| Min                | 86.26            | R <sup>2</sup> diselaraskan |               |         | 0.9303   |                  |
| Pekali Variasi (%) | 3.88             | R <sup>2</sup> ramalan      |               |         | 0.7747   |                  |
|                    |                  | Ketepatan yang mencukupi    |               |         | 15.0205  |                  |

Dalam kajian ini, kesan interaksi serentak terhadap selektiviti produk dengan memvariasikan jumlah pemangkin (A) dan masa tindak balas (C) diilustrasikan dalam Rajah 7(b1)-7(b2). Hasil menunjukkan bahawa interaksi kedua-dua parameter tindak balas memberikan respons positif terhadap aktiviti DO apabila jumlah mangkin berada dalam julat 3-6 wt.% dan masa tindak balas dalam julat (165-190) minit. Peningkatan lebih daripada jumlah pemangkin lebih besar daripada 6 wt.% bersamaan dengan masa tindak balas lebih tinggi daripada 190 minit akan menyebabkan pengurangan selektiviti produk. Walaupun peningkatan jumlah mangkin menghasilkan lebih banyak tapak aktif untuk tindak balas DO, namun lebih tapak aktif juga akan menyebabkan peningkatan terjadinya tindak balas sekunder seperti polimerisasi yang mempercepatkan pelumpuhan hayat pemangkin kerana proses polimerisasi menghasilkan kok di atas pemangkin (Kwon et al. 2011; Mortensen et al. 2011). Selain itu, dengan memanjangkan masa tindak balas menyokong berlakunya tindak balas sampingan yang tidak diinginkan (polimerisasi dan peretakan) produk cecair yang telah dideoksigenasi menjadi fraksi yang lebih ringan (produk gas) yang mengakibatkan selektiviti produk yang lebih rendah.

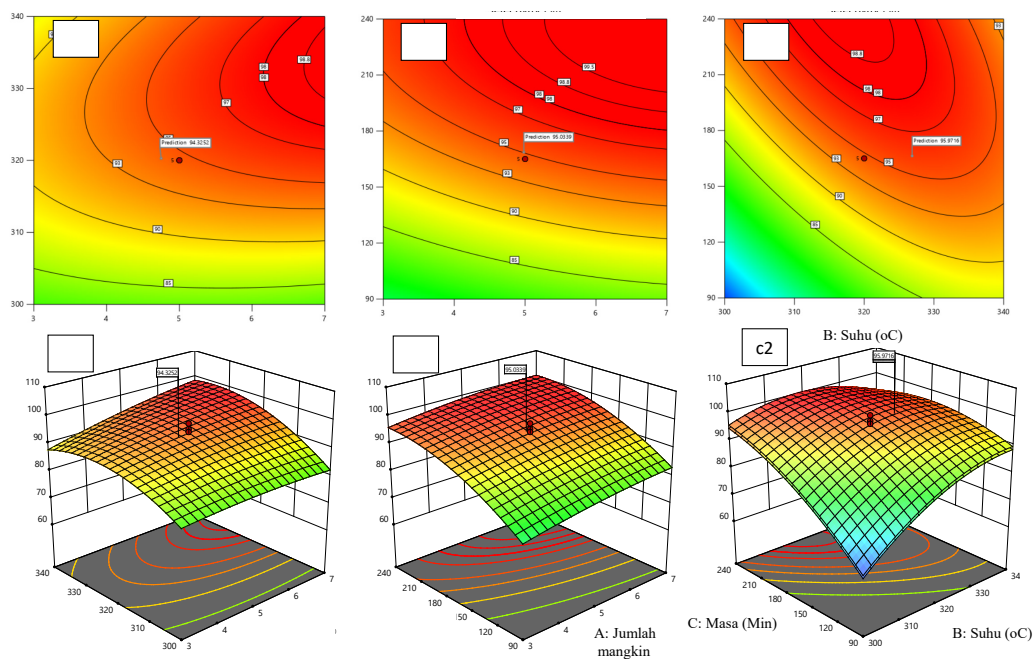
Rajah 7(c1)-7(c2) menunjukkan plot 2D kontur dan 3D plot permukaan untuk kesan interaksi antara suhu tindak balas (B) dan masa tindak balas (C) terhadap selektiviti bahan api jet dengan jumlah mangkin

(A) ditetapkan pada 5 wt%. Didapati bahawa peningkatan suhu tindak balas dari tahap rendah (300 °C) ke tahap tinggi (340 °C) menyebabkan peningkatan selektiviti produk dengan kenaikan masa tindak balas. Hasil menunjukkan bahawa lebih daripada 95% selektiviti hidrokarbon dicapai di bawah suhu tindak balas optimum 320 °C dan masa tindak balas 165 minit. Namun begitu, kesan peningkatan suhu dan masa tindak balas akan menyebabkan penurunan selektiviti terhadap produk bahan api jet. Berdasarkan Rajah 7(a)-7(c), secara keseluruhannya, tindak balas DO mencapai keadaan optimum pada suhu 326 °C, dengan masa tindak balas 166 min. Hal ini menunjukkan keputusan kajian iaitu kadar masa dan suhu tindak balas adalah signifikan.

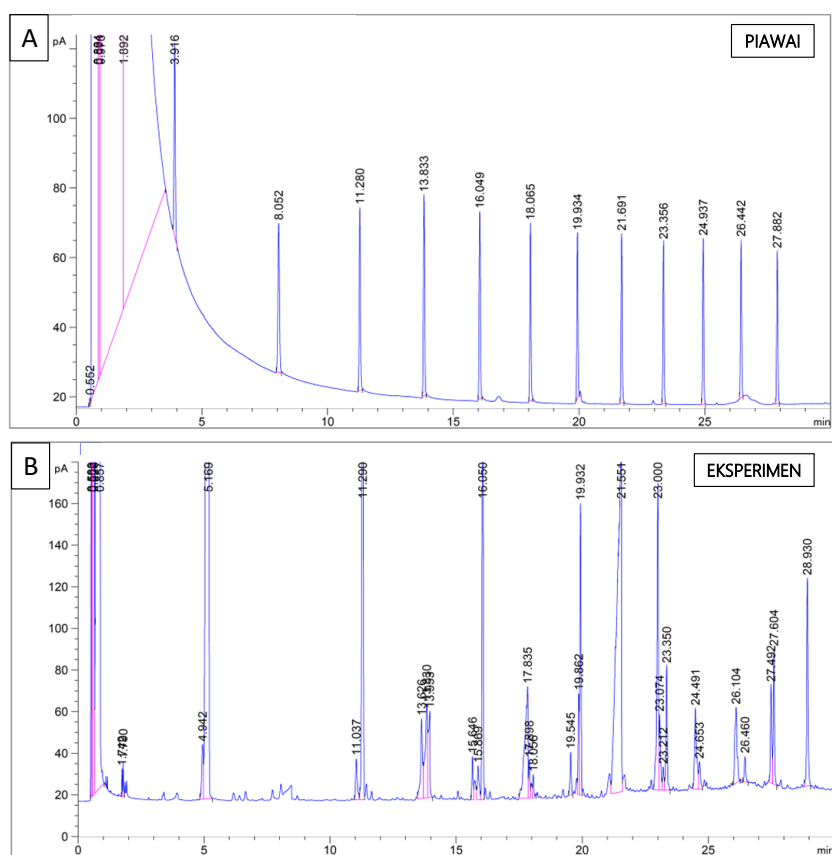
Sementara itu, Rajah 8 dan 9 menunjukkan kromatogram GCFID dan GCMS bagi produk yang dihasilkan pada keadaan tindak balas optimum dengan produk tersebut menunjukkan selektiviti hidrokarbon yang tinggi terhadap hidrokarbon bahan api jet, khususnya C11, C13, C15 dan C17. Secara khususnya, C11 merupakan komponen utama dalam produk cecair bahan api jet. Oleh kerana asid linoleik (C12:0) merupakan asid lemak dominan (Jadual 3), penghasilan selektiviti tinggi terhadap C11 menunjukkan bahawa mangkin  $\text{FeMo}/\text{AC}_B$  berkesan dalam memacu tindak balas penyahdekarboksilasi dan penyahdekarbonilasi, sekali gus menghasilkan hidrokarbon dengan satu atom karbon kurang daripada asid lemak C12.



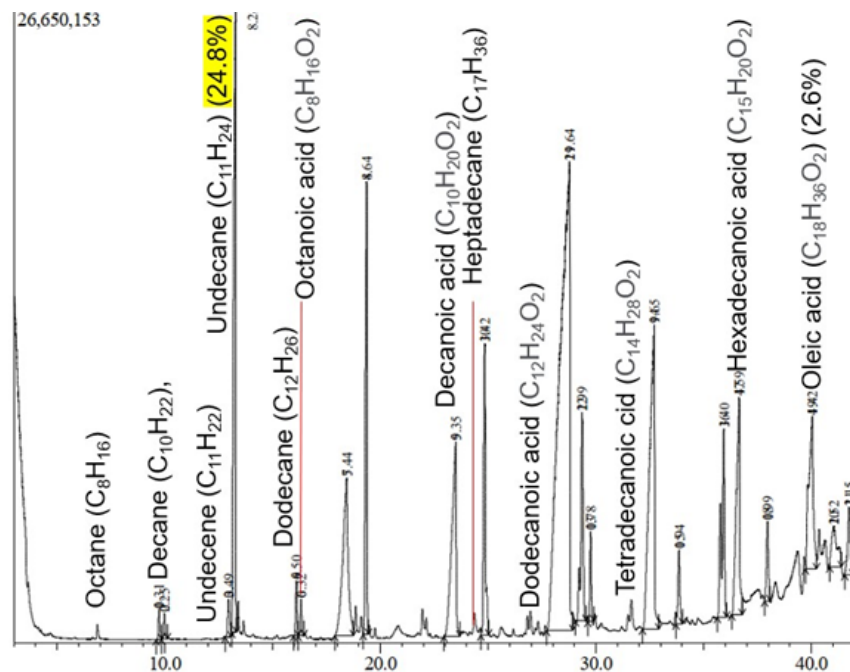
RAJAH 6. (a) Nilai yang jangkaan vs sebenar bagi selektiviti, (b) Plot baki normal, dan (c) Plot baki vs. jangkaan



RAJAH 7. Plot permukaan 3D tindak balas dan plot kontur 2D untuk  
 (a) interaksi suhu tindak balas dan jumlah mangkin (AB),  
 (b) interaksi masa tindak balas dan jumlah mangkin (AC) dan  
 (c) interaksi masa tindak balas dan suhu mangkin (BC)



RAJAH 8. Hasil analisis (A) Kromatogram piawai C8-C20 dan (B) Kromatogram uji kaji bahan api jet daripada hasil tindak balas DO pada tindak balas optimal



RAJAH 9. GCMS bahan bio-jet menunjukkan produk didominasi oleh C11H24

Hasil kajian ini telah membuktikan kestabilan dan keaktifan mangkin dalam meningkatkan deoksigenasi secara selektif, seterusnya menghasilkan pecahan hidrokarbon yang sesuai untuk aplikasi bahan api hijau. Memandangkan model yang dikaji terbukti tepat (Jadual 5), parameter optimum yang diperoleh dapat dijadikan rujukan penting dalam usaha pengoptimuman lanjut bagi penyesuaian pada skala industri.

#### KESIMPULAN

Kajian ini telah berjaya menunjukkan potensi pemangkin FeMo/AC<sub>B</sub> dalam proses DO minyak kelapa sawit untuk penghasilan bahan api biojet. Ciri fizikokimia pemangkin ini menunjukkan kehadiran logam aktif seperti Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Fe<sub>2</sub>Mo dan FeMo yang mempunyai luas permukaan tinggi (1797 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>), saiz liang yang sesuai (3.8 nm) dan diameter liang yang baik (3.75 nm), menjadikannya berkesan dalam tindak balas DO. Pemangkin ini juga memiliki sifat feromagnetik yang membolehkan pemisahan secara magnetik semasa tindak balas dan memberi kelebihan dari segi pemulihan serta penggunaan semula pemangkin. Pemangkin FeMo/AC<sub>B</sub> telah menghasilkan hidrokarbon rantai lurus (C11, C13, C15 dan C17) berselektiviti tinggi (>95%). Kajian ini juga menunjukkan bahawa pemangkin ini menghasilkan produk cecair dengan kandungan hidrokarbon yang dominan melalui laluan dekarbonilasi atau dekarboksilasi. Penggunaan kaedah RSM dan CCD membantu mengoptimumkan tindak balas DO, dengan paras optimum dicapai pada suhu 320 °C, masa tindak

balas 165 minit dan jumlah pemangkin 5 wt.%. Model linear menunjukkan R<sup>2</sup> ~ 0.9652 dengan pekali variasi 3.88 yang menunjukkan model yang dikaji terbukti tepat. Oleh hal demikian, parameter optimum yang diperoleh dapat dijadikan rujukan penting dalam usaha pengoptimuman lanjut bagi penyesuaian pada skala industri. Secara keseluruhannya, dapatan kajian ini memberikan bukti bahawa pemangkin FeMo/AC<sub>B</sub> bukan sahaja berkesan dalam tindak balas DO, tetapi juga mempunyai potensi untuk diaplikasikan dalam skala komersial untuk penghasilan bahan api biojet yang lebih bersih dan mampan.

#### PENGHARGAAN

Penghargaan terima kasih dirakamkan kepada pihak Universiti Kebangsaan Malaysia kerana telah menyediakan kemudahan penyelidikan. Terima kasih juga kepada Kementerian Pengajian Tinggi atas pemberian dana Skim Geran Penyelidikan Fundamental (FRGS/1/2023/STG04/UKM/02/6) serta kepada UKM atas pembiayaan melalui Geran Translasi UKM (UKM-TR2024-15).

#### RUJUKAN

Abu Tahari, M.N., Salleh, F., Tengku Saharuddin, T.S., Samsuri, A., Samidin, S. & Yarmo, M.A. 2020. Influence of hydrogen and carbon monoxide on reduction behavior of iron oxide at high temperature: Effect on reduction gas concentrations. *International Journal of Hydrogen Energy* 46(8): 24791-24805.

- Ammar, M., Omer, M., Aman, S., Hamed, A., Abbas, S., Shaheen, S., Abbas, A. & Shakeel, S.N. 2022. Fatty acid profiling and physiochemical characterization of *Chlorella sorokiniana* potentially used for biofuel production. *Sains Malaysiana* 51(8): 2547-2557.
- Asikin-Mijan, N., Ooi, J.M., AbdulKareem-Alsultan, G., Lee, H.V., Mastuli, M.S., Mansir, N., Alharthi, F.A., Alghamdi, A.A. & Taufiq-Yap, Y.H. 2020a. Free-H<sub>2</sub> deoxygenation of *Jatropha curcas* oil into cleaner diesel-grade biofuel over coconut residue-derived activated carbon catalyst. *Journal of Cleaner Production* 249: 119381.
- Asikin-Mijan, N., Rosman, N.A., AbdulKareem-Alsultan, G., Mastuli, M.S., Lee, H.V., Nabihah-Fauzi, N., Lokman, I.M., Alharthi, F.A., Alghamdi, A.A., Aisyahi, A.A. & Taufiq-Yap, Y.H. 2020b. Production of renewable diesel from *Jatropha curcas* oil via pyrolytic-deoxygenation over various multi-wall carbon nanotube-based catalysts. *Process Safety and Environmental Protection* 142: 336-349.
- Ayadi, M., Awad, S., Villot, A., Abderrabba, M. & Tazerout, M. 2020. Heterogeneous acid catalyst preparation from olive pomace and its use for olive pomace oil esterification. *Renewable Energy* 165(Part 2): 1-13.
- Derawi, D., Zahidi, N.H.M. & Baharudin, K.B. 2023. Reka bentuk pasir pantai mesolintang bagi penyahoksigenan bermangkin minyak masak terpakai kepada bahan api keterbaharuan. *Sains Malaysiana* 52(11): 3177-3187.
- Dodrill, B.C. 2015. *Measurements with a VSM*. Westerville: Lake Shore Cryotronics, Inc.
- Farabi, M.S.A., Ibrahim, M.L., Rashid, U. & Taufiq-Yap, Y.H. 2019. Esterification of palm fatty acid distillate using sulfonated carbon-based catalyst derived from palm kernel shell and bamboo. *Energy Conversion and Management* 181: 562-570.
- Gamal, M.S., Asikin-Mijan, N., Khalit, W.N.A.W., Arumugam, M., Izham, S.M. & Taufiq-Yap, Y.H. 2020. Effective catalytic deoxygenation of palm fatty acid distillate for green diesel production under hydrogen-free atmosphere over bimetallic catalyst CoMo supported on activated carbon. *Fuel Processing Technology* 208: 106519.
- Itthibenchapong, V., Srifa, A., Kaewmeesri, R., Kidkhunthod, P. & Faungnawakij, K. 2017. Deoxygenation of palm kernel oil to jet fuel-like hydrocarbons using Ni-MoS<sub>2</sub>/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts. *Energy Conversion and Management* 134: 188-196.
- Ong, M.Y., Nomanbhay, S., Kusumo, F., Raja Shahrizzaman, R.M.H. & Shamsuddin, A.H. 2021. Modeling and optimization of microwave-based bio-jet fuel from coconut oil: Investigation of response surface methodology (RSM) and artificial neural network methodology (ANN). *Energies* 14(2): 295.
- Ravindran, M.X.Y., Asikin-Mijan, N., Ong, H.C., Derawi, D., Yusof, M.R., Mastuli, M.S., Lee, H.V., Wan Mahmood, W.N.A.S., Razali, M.S., Abdulkareem Al-Sultan, G. & Taufiq-Yap, Y.H. 2022. Feasibility of advancing the production of bio-jet fuel via microwave reactor under low reaction temperature. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 168: 105772.
- Soltani, S., Rashid, U., Al-Resayes, S.I. & Nehdi, I.A. 2017. Chapter Sixteen - Mesoporous catalysts for biodiesel production: A new approach. In *Clean Energy for Sustainable Development*, disunting oleh Rasul, M.G., Azad, A.K. & Sharma, S.C. Academic Press. hlm. 487-506.
- Wan Khalit, W.N.A., Asikin-Mijan, N., Marliza, T.S., Safa-Gamal, M., Shamsuddin, M.R., Azreena, I.N., Saiman, M.I. & Taufiq-Yap, Y.H. 2022. One-pot decarboxylation and decarbonylation reaction of waste cooking oil over activated carbon supported nickel-zinc catalyst into diesel-like fuels. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 164: 105505.
- Why, E.S.K., Ong, H.C., Lee, H.V., Chen, W.H., Asikin-Mijan, N., Varman, M. & Loh, W.J. 2022. Single-step catalytic deoxygenation of palm feedstocks for the production of sustainable bio-jet fuel. *Energy* 239: 122017.
- Zdainal Abidin, S.N., Lee, H.V., Juan, J.C., Rahman, N.A. & Taufiq-Yap, Y.H. 2019. Production of green biofuel by using a goat manure supported Ni-Al hydrotalcite catalysed deoxygenation process. *RSC Advances* 9(3): 1642-1652.

\*Pengarang untuk surat-menyurat; email: nurul\_asikin@ukm.edu.my