

## Sifat Kinetik dan Isotherma Penjerapan Formaldehid ke atas Komposit Serbuk Serat Kelapa Sawit-TiO<sub>2</sub>

(Kinetic and Isotherm Properties of Formaldehyde Adsorption on Oil Palm Fibre-TiO<sub>2</sub> Composite Powder)

NOR RAHAFAZA ABDUL MANAP, ROSLINDA SHAMSUDIN\*, MOHD NORHAFSAM MAGHPOR,  
MUHAMMAD AZMI ABDUL HAMID & AZMAN JALAR

### ABSTRAK

*Sifat isoterma dan kinetik penjerapan formaldehid ke atas komposit serbuk serat kelapa sawit-TiO<sub>2</sub> yang melibatkan sistem gas-pepejal adalah dikaji. Komposit serbuk serat kelapa sawit-TiO<sub>2</sub> dihasilkan dengan mencampurkan serbuk kelapa sawit dan serbuk TiO<sub>2</sub> dengan nisbah 8:2 menggunakan teknik pengisaran mekanik. Pengujian dijalankan di dalam kebuk ujian dengan komposit serbuk kelapa sawit-TiO<sub>2</sub> dibiarkan untuk menyerap dan mengurangkan nilai kepekatan formaldehid secara pasif. Didapati nilai penjerapan maksima dan sifat kinetik penjerapan bergantung kepada kepekatan awal formaldehid. Kepekatan awal, C<sub>i</sub>, 2.1 ppm dan 0.5 ppm masing-masing diwakili oleh pseudo-tertib pertama dan pseudo tertib kedua, manakala C<sub>i</sub> = 0.75 dan 0.9 ppm diwakili oleh model Elovich. Isotherma penjerapan formaldehid diwakili oleh isoterma Freundlich dengan nilai korelasi tertinggi R<sup>2</sup> = 0.9397 berbanding nilai korelasi isoterma Langmuir (R<sup>2</sup> = 0.8692) dan isoterma Temkin (R<sup>2</sup> = 0.8756). Parameter keseimbangan, 0 < R<sub>L</sub> < 1 bagi setiap kepekatan pemula menunjukkan penjerapan formaldehid ke atas serbuk komposit serat kelapa sawit-TiO<sub>2</sub> cenderung untuk berlaku.*

*Kata kunci: Isotherma; kinetik; komposit; penjerapan; serat kelapa sawit*

### ABSTRACT

*Isotherm and kinetic properties of formaldehyde adsorption on oil palm fibre-TiO<sub>2</sub> composite powder; a gas-solid system was studied. Oil palm fibre-TiO<sub>2</sub> composite powder was prepared by mixing oil palm fibre with TiO<sub>2</sub> powder with ratio of 4:1 using a mechanical milling technique. The test was done in a test chamber where oil palm fibre-TiO<sub>2</sub> composite powder was left to passively adsorb the formaldehyde. The maximum adsorption capacity value and kinetic properties depends on initial concentration of formaldehyde. Formaldehyde initial concentration of 2.1 and 0.5 ppm was best presented by pseudo-first order and pseudo-second order, respectively, while for initial concentration of 0.75 and 0.9 ppm, both were well presented by Elovich model. The adsorption isotherm of formaldehyde was best described by Freundlich isotherm which showed the highest correlation coefficient, R<sup>2</sup> = 0.9397 compared to Langmuir's (R<sup>2</sup> = 0.8692) and Temkin's (R<sup>2</sup> = 0.8756) correlation coefficients. Equilibrium parameter of 0 < R<sub>L</sub> < 1 which showed the formaldehyde adsorption onto oil palm fibre-TiO<sub>2</sub> composite was favorable to happen.*

*Keywords: Adsorption; composite; isotherm; kinetic; oil palm fibre*

### PENDAHULUAN

Kualiti udara dalam bangunan memainkan peranan yang penting bagi kesihatan manusia. Secara fizikalnya, keadaan sesuatu tempat kelihatan sihat dan selamat, namun realitinya, kewujudan sebatian-sebatian berbahaya yang dikategorikan sebagai karsinogen boleh menyumbang kepada permasalahan kesihatan yang serius. Wang et al. (2007) dalam kajian mereka mendapati, tahap pencemaran di dalam bangunan adalah lebih tinggi berbanding pencemaran diluar bangunan. Tambahan pula, manusia memperuntukkan masa sekitar 80 % di dalam bangunan berbanding berada persekitaran luar (Kim et al. 2011). Keadaan ini menyebabkan seseorang itu akan lebih terdedah kepada kualiti udara yang tidak sihat ketika berada di dalam bangunan yang tercemar berbanding di luar bangunan. Sumber utama pencemaran udara dalam bangunan boleh berpunca daripada penggunaan

cat, perabot, bahan bangunan, alatan pejabat dan gas ekzos garaj (Wang et al. 2007). Bahan-bahan pencemar udara yang terdiri daripada sebatian-sebatian organik meruap seperti benzena, toluena, etilbenzena, xilena dan formaldehid adalah penyumbang kepada persekitaran dalam bangunan yang tidak sihat (Gallego et al. 2013, 2008). Pencemar utama dikalangan sebatian organik meruap ini adalah formaldehid.

Formaldehid merupakan bahan karsinogen yang boleh menyebabkan kanser. Antara kesan sampingan yang dirasai oleh seseorang yang terdedah kepada sebatian formaldehid adalah seperti pedih mata dan ketidakselesaan hidung. Jabatan Keselamatan dan Kesihatan Pekerjaan (OSHA) telah menetapkan tahap pendedahan kepada formaldehid yang dibenarkan hanya 0.75 bahagian per juta (ppm) dan had pendedahan jangka pendek hanya 2 ppm untuk tempoh 15 min (Golden & Valentini 2014). Had pendedahan ini

membuktikan bahawa formaldehid berupaya memberi kesan yang buruk terhadap kesihatan manusia. Pelbagai kaedah telah digunakan untuk mengurangkan kepekatan formaldehid dalam udara termasuklah penggunaan kaedah penjerapan.

Penjerapan formaldehid ke atas pelbagai bahan jerap seperti silika, alumina, batu kapur telah dijalankan oleh penyelidik terdahulu (Carter et al. 2011; Halim & Ahmad 2013; Kumagai et al. 2008). Sifat-sifat bahan penjerap bukan sahaja bergantung kepada keadaan pemrosesannya. Bahan yang melalui proses penkarbonan biasanya akan menghasilkan bahan penjerap yang mempunyai kandungan karbon, luas permukaan dan isi padu liang yang tinggi. Proses penkarbonan juga didapati dapat meningkatkan keupayaan menjerap hasil daripada proses pengasingan bahan meruap daripada struktur biojisim dengan menyediakan lebih banyak ruang kosong untuk proses penjerapan berlaku (Aber et al. 2009). Bahan penjerap yang diperbuat daripada hasil sisa industri semakin mendapat tempat di negara ini (Abnisa et al. 2013; Foo & Hameed 2011; Rafatullah et al. 2010; Tan et al. 2009). Industri kelapa sawit negara telah menyumbang kepada sisa buangan pertanian yang boleh mengakibatkan pencemaran alam sekitar jika tidak diurus dengan baik. Sisa-sisa yang terhasil seperti tandan buah kosong, pelepah, tempurung dan serat mesokap kelapa sawit (Singh et al. 2011) berpotensi tinggi untuk digunakan sebagai bahan penjerap pencemar.

Sehubungan itu, kajian ini telah menggunakan serat mesokap kelapa sawit untuk dijadikan bahan penjerap formaldehid. Serat mesokap kelapa sawit digabungkan bersama serbuk  $\text{TiO}_2$  yang merupakan bahan fotokatalis. Bahan fotokatalis menjalani proses pengoksidaan fotokatalitik yang berupaya untuk menguraikan sebatian organik meruap kepada karbon dioksida dan air (Liu et al. 2008). Faktor-faktor keupayaan komposit ini sebagai bahan penjerap ditentukan berdasarkan analisis ciri-ciri isoterma penjerapan komposit berkenaan. Berdasarkan analisis- analisis ini, dua elemen penting iaitu mekanisme penjerapan dan kadar penjerapan komposit berkenaan dapat ditentukan. Pengurangan kepekatan formaldehid lebih tinggi dapat dijangkakan apabila proses penjerapan pada serat mesokap kelapa sawit dan penguraian sebatian organik meruap (formaldehid) oleh serbuk  $\text{TiO}_2$  digabungkan.

#### BAHAN DAN KAEDAH

Serat mesokarpa kelapa sawit yang digunakan dalam kajian ini diperolehi dari kilang Southern Acids Sdn Bhd. Ladang Gondola, Klang Selangor, Malaysia. Serat mesokarpa kelapa sawit tersebut dibasuh beberapa kali menggunakan air ternyah ion bagi menyingkirkan kekotoran. Serat kelapa sawit kemudiannya dikeringkan di dalam ketuhar pada suhu  $110^\circ\text{C}$  selama 24 jam dan dilabelkan sebagai POF. Serat kelapa sawit yang telah dikeringkan dirawat pada suhu  $500^\circ\text{C}$  dengan kadar pemanasan  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  dan dilabelkan sebagai POFN500. Komposit serat mesokarpa

kelapa sawit- $\text{TiO}_2$  (R2) kemudiannya dihasilkan dengan mengisarkan serbuk kelapa sawit terawat haba bersama serbuk  $\text{TiO}_2$  dengan nisbah 4:1 menggunakan pengisar bebola pada kelajuan 600 putaran setiap min selama 30 min. Menurut piawaian yang ditetapkan oleh Institut Kesihatan dan Keselamatan Pekerjaan Nasional (NIOSH), sesuatu bahan penjerap yang digunakan hendaklah melepasi 75% kecekapan penyahjerapan (Pendergrass 2003) dan hanya nisbah 4:1 yang melepasi tahap piawaian ini.

Peraturan karbon, hidrogen, nitrogen dan sulfur di dalam serat kelapa sawit ditentukan dengan alat penganalisis unsur (LECO-CHNS, USA, Model Siri 932) menggunakan gas helium sebagai pembawa. Morfologi dan kandungan unsur yang terdapat didalam serat mesokarpa kelapa sawit dianalisis dengan menggunakan mikroskop imbasan elektron pancaran medan (FESEM) yang digabungkan dengan EDX (FESEM/EDX, Merlin Compact Zeiss/Inca Energy). Pencirian sifat permukaan komposit seperti luas permukaan, isi padu liang, luas liang dan jumlah isi padu liang ditentukan dengan menggunakan penganalisis permukaan BET (Micromeritics, USA, 3Flex Version 3.01). Alat ini beroperasi pada suhu cecair nitrogen iaitu  $-195.8^\circ\text{C}$ . Pembuangan gas yang bertujuan untuk menyingkirkan lembapan dari permukaan sampel dan bagi memastikan permukaan sampel cukup bersih sebelum analisis dijalankan pada suhu  $120^\circ\text{C}$  pada keadaan 20 mikron vakum.

Sifat-sifat penjerapan formaldehid ke atas komposit serbuk serat mesokarpa kelapa sawit- $\text{TiO}_2$  ditentukan melalui ujian penjerapan kelompok dimana kesan kepekatan awal terhadap kapasiti jerapan dan sifat kinetik penjerapan formaldehid dikaji. Kesan kepekatan awal formaldehid dikaji dengan menyediakan kepekatan ujian yang mengandungi 10 mL larutan formaldehid yang terlebih dahulu dipanaskan pada suhu  $50^\circ\text{C}$  dan dibiarkan meruap di dalam kepekatan ujian sehingga pelbagai kepekatan pemula iaitu 0.5, 0.75, 0.9 dan 2.1 ppm dicapai. Sebanyak 0.2 g serbuk komposit serat kelapa sawit- $\text{TiO}_2$ , (R2), diletakkan dalam kepekatan ujian. Data perubahan kepekatan formaldehid di dalam kepekatan ujian direkodkan oleh alat meter formaldehid (MultiRAE Lite Versi V1.04). Nilai kapasiti jerapan dikira menggunakan persamaan (Liu et al. 2011) (1):

$$q_t = \frac{(C_i - C_t)V}{W}, \quad (1)$$

dengan  $q_t$  adalah nilai jerapan pada waktu = t,  $C_i$  adalah nilai kepekatan awal (ppm),  $C_t$  adalah nilai kepekatan formaldehid pada waktu = t (ppm), V adalah isi padu kepekatan (liter) dan W adalah berat bahan penjerap (g). Kesemua data dinilai menggunakan tiga model kinetik iaitu, pseudo-tertib pertama, pseudo-tertib kedua dan model Elovich. Ujian isoterma berkelompok dijalankan menggunakan 4 kepekatan pemula formaldehid yang berbeza iaitu 0.5, 0.75, 0.9 dan 2.1 ppm dengan mengekalkan parameter lain seperti suhu ujian, kelembapan relatif, dos bahan penjerap dan isi padu kepekatan ujian. Kesemua data isoterma

dinilai menggunakan tiga model isoterma iaitu isoterma Langmuir, isoterma Freundlich dan isoterma Temkin.

#### HASIL DAN PERBINCANGAN

Serat mesokarpa kelapa sawit adalah salah satu bahan buangan biojisim (Pua et al. 2013) yang mengandungi bahan lignoselulosa. Jadual 1 menunjukkan komposisi unsur yang terdapat di dalam serat mesokarpa kelapa sawit. Serat mesokarpa kelapa sawit mengandungi 72.3% karbon, 5.1% hidrogen, 2.0% nitrogen, 0.2% sulfur dan 20.4% oksigen. Walau bagaimanapun, peratusan kandungan unsur serat mesokarpa kelapa sawit berbeza dari serat mesokarpa kelapa sawit yang lain berdasarkan kepada keadaan geografi, penggunaan baja, variasi cuaca, amalan pertanian dan juga keadaan tanah sesuatu ladang tanaman (Foo & Hameed 2009). Perbezaan sebanyak 20-36% komposisi unsur karbon, 0.8-1.5% unsur nitrogen, 0.6-5.5% unsur hidrogen, 0.4% unsur sulfur dan 15-28% oksigen (oleh perbezaan) serat mesokarpa yang digunakan dalam kajian ini dan serat mesokarpa kelapa sawit yang pernah diguna oleh penyelidik terdahulu. Nilai terperinci setiap peratus unsur ini dinyatakan dalam Jadual 1.

Peratusan kandungan karbon didapati lebih tinggi berbanding biojisim lignoselulosa yang lain seperti tempurung kelapa (48.6%), tempurung kacang walnut (45.1%) dan jerami gandum (45.6%) (Mohamad Nor et al. 2013; Suhas et al. 2007). Peratusan karbon yang tinggi di dalam serat mesokarpa kelapa sawit memberi kelebihan kepada serat mesokarpa kelapa sawit untuk dijadikan bahan penyerap yang baik.

Jadual 2 menunjukkan ciri struktur liang serat mesokarpa kelapa sawit yang dikeringkan pada 110°C, serat mesokarpa kelapa sawit terawat haba pada suhu 500°C dan komposit serat mesokarpa kelapa sawit-

TiO<sub>2</sub> masing-masing dilabel sebagai POF, POFN500 dan R2. Serat mesokarpa kelapa sawit yang dikeringkan pada suhu 110°C di dalam ketuuh hanya mempunyai luas permukaan sebanyak 0.79 m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup>. Namun, setelah penkarbonan, luas permukaannya bertambah menjadi 19.8 m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup>. Isi padu liang, isi padu liang mikro dan luas dalam liang juga didapati bertambah setelah proses penkarbonan. Ini kerana semasa proses penkarbonan, pembebasan bahan meruap dan penguraian bahan organik berlaku (Liou 2004). Ini menghasilkan lebih banyak liang mikro (Li et al. 2008) yang menyumbang kepada pertambahan luas permukaan, isi padu liang, isi padu liang mikro dan luas dalam liang serat mesokarpa kelapa sawit.

Rajah 1 menunjukkan nilai penyerapan dan penyahjerapan N<sub>2</sub> ke atas bahan jerap. Penyerapan berlaku secara perlahan pada tekanan relatif yang rendah dan nilai penyerapan semakin meningkat bermula pada tekanan relatif, P/P<sub>0</sub> = 0.85. Penyahjerapan berlaku pada tekanan relatif yang sedikit rendah iaitu P/P<sub>0</sub> = 0.6 hingga 0.9, berbanding ketika penyerapan berlaku iaitu P/P<sub>0</sub> = 0.85 hingga 1.0. Ini menghasilkan gegelung histeresis kecil yang mempamerkan isoterma Jenis II yang menunjukkan kehadiran liang mikro di dalam bahan jerap (Chin et al. 2011). Penambahan serbuk TiO<sub>2</sub> kepada serat mesokarpa kelapa sawit didapati telah menutup liang-liang mikro ini dan menyebabkan bacaan luas permukaan komposit serat mesokarpa-TiO<sub>2</sub> telah berkurang daripada 19.8 kepada 9.55 m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup> (Jadual 2). Gegelung histeresis yang sempit ini jugak menandakan penyempitan liang dan pengurangan luas permukaan berlaku dengan penambahan TiO<sub>2</sub>. Situasi yang sama dapat diperhatikan oleh Tasbihi et al. (2010) dan Simate et al. (2016) masing-masing telah menambahkan TiO<sub>2</sub> kepada serbuk silika yang bersaiz meso dan kitosan kepada arang.

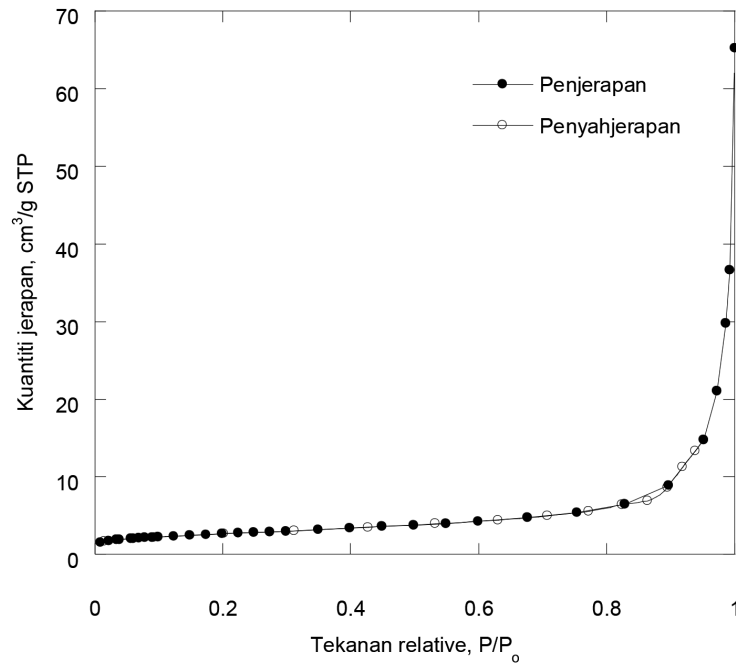
JADUAL 1. Komposisi unsur dalam serat mesokarp kelapa sawit

Unsur (%)	Kajian ini	(Abnisa et al. 2013)	(Hoseinzadeh Hesas et al. 2013)	(Azali et al. 2005)	(Lahijani & Zainal 2011)
C	72.3	45.03	52.05	36.27	43.52
H	5.1	6.15	5.37	7.67	5.72
N	2.0	0.94	0.49	0.42	1.20
S	0.2	-	-	0.63	0.66
O (oleh perbezaan)	20.4	47.89	42.10	36.28	48.90

JADUAL 2. Ciri-ciri struktur liang serat mesokarp kelapa sawit yang dikeringkan pada 110°C, serat mesokarp kelapa sawit terawat haba pada suhu 500°C dan komposit serat mesokarp kelapa sawit-TiO<sub>2</sub>

Sampel	Luas permukaan BET (m <sup>2</sup> /g)	Isi padu liang (cm <sup>3</sup> /g)	Isi padu dalam liang (cm <sup>3</sup> /g)	Jumlah isi padu dalam liang (cm <sup>3</sup> /g)	Luas dalam liang (m <sup>2</sup> /g)
POF	0.79	0.0015	1.1 10 <sup>-4</sup>	1.6 10 <sup>-3</sup>	0.002
POFN500	19.80	0.0321	7.8 10 <sup>-3</sup>	1.9 10 <sup>-5</sup>	0.065
R2	9.55	0.017	1.4 10 <sup>-3</sup>	2.3 10 <sup>-2</sup>	0.322

Nota: POF=Serat mesokarp (110°C), POFN500=Serat mesokarp terawat haba (500°C), R2=Komposit serat kelapa sawit-TiO<sub>2</sub>



RAJAH 1. Graf menunjukkan penjerapan dan penyahjerapan  $\text{N}_2$  ke atas komposit serat mesokarpa kelapa sawit- $\text{TiO}_2$

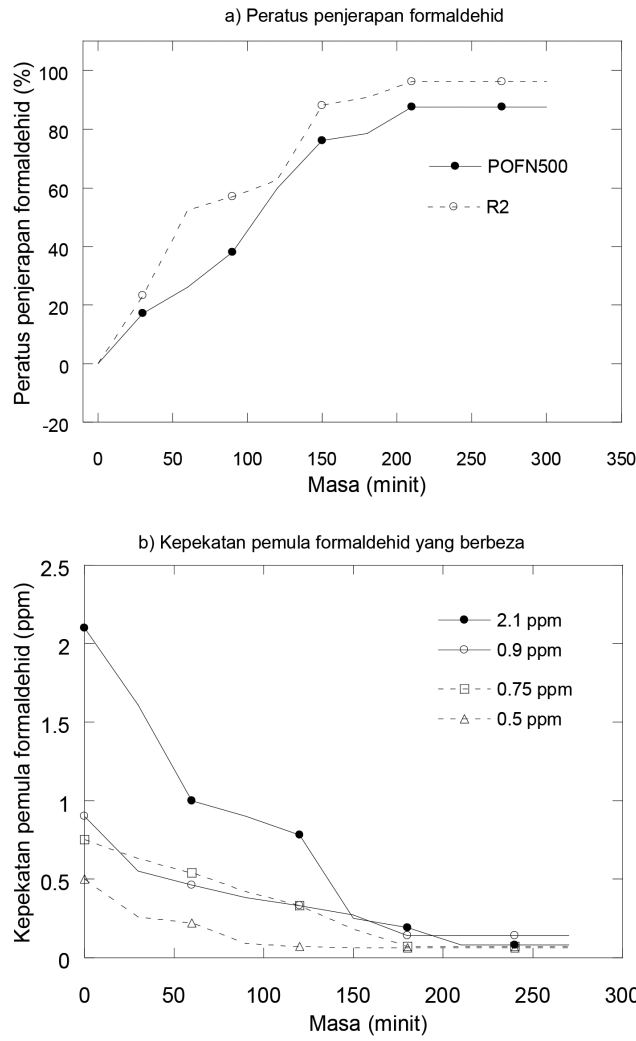
Walau bagaimanapun, pengurangan luas permukaan tidak menjejaskan prestasi bahan penjerap hasil dari gabungan kelebihan sifat yang dimiliki oleh serat kelapa sawit dan  $\text{TiO}_2$ . Ini kerana peratus penjerapan formaldehid bertambah dari 88% kepada 96% apabila menggunakan komposit serat mesokarpa kelapa sawit- $\text{TiO}_2$  berbanding menggunakan serat mesokarpa kelapa sawit sahaja (Rajah 2(a)). Serat kelapa sawit menyediakan tempat penjerapan untuk berlaku manakala  $\text{TiO}_2$  merupakan bahan yang boleh menguraikan formaldehid kepada gas karbon dioksida dan air melalui proses pemangkinan cahaya (Liu et al. 2012; Nie et al. 2013; Rask et al. 2004; Yu et al. 2007).

Rajah 2(b) menunjukkan graf masa melawan kepekatan awal formaldehid. Sebanyak 96% daripada 2.1 ppm, 84% daripada 0.9 ppm, 91% daripada 0.75 ppm dan 88% daripada 0.5 ppm berjaya diturunkan oleh bahan penjerap yang dihasilkan. Peratus penurunan nilai kepekatan formaldehid ini dikira dalam tempoh 270 min ujian dijalankan. Kepekatan formaldehid berkurang daripada 2.1 kepada 0.08 ppm, 0.9 kepada 0.14 ppm, 0.75 kepada 0.07 ppm dan 0.5 kepada 0.06 ppm. Kesan penjerapan pada serat mesokarpa kelapa sawit dan kesan penguraian  $\text{TiO}_2$  dapat dikenal pasti dengan merujuk kepada Rajah 2(a). Seperti yang telah diterangkan pada Rajah 2(a), penambahan penurunan bacaan kepekatan formaldehid sebanyak 8% telah disumbangkan oleh  $\text{TiO}_2$ . Gabungan dua sifat dan kelebihan setiap bahan yang dikomposit ini mematuhi prinsip gabungan tindakan dan didapati telah berjaya menurunkan nilai kepekatan formaldehid dalam udara.

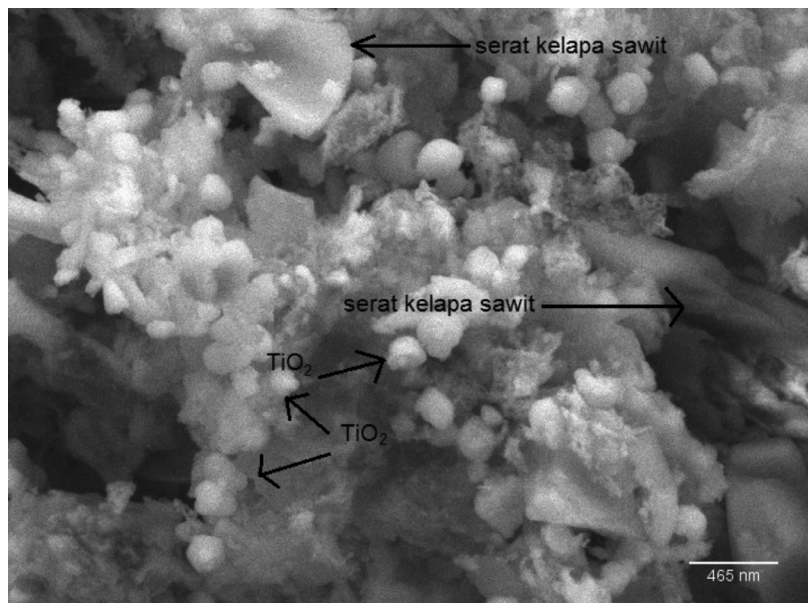
Rajah 3 pula menunjukkan morfologi bahan penjerap komposit serat kelapa sawit dan  $\text{TiO}_2$ . Komposit bahan penjerap ini merupakan sejenis komposit zarah diperkuat

yang terdiri dari kelapa sawit sebagai fasa matriks dan serbuk  $\text{TiO}_2$  sebagai fasa tersebar.  $\text{TiO}_2$  dengan bentuk yang tidak sekata kelihatan tersebar diantara serat kelapa sawit dan didapati menutup liang-liang yang terdapat pada serat mesokarpa kelapa sawit yang telah menyebabkan penurunan nilai luas permukaan dan isi padu liang mikro (Jadual 2).

Rajah 4 menunjukkan kapasiti penjerapan formaldehid pada kepekatan pemula yang berbeza iaitu 0.5, 0.75, 0.9 dan 2.1 ppm. Ujian berkelompok terhadap bahan jerap telah dijalankan bagi menunjukkan kesan kepekatan pemula formaldehid terhadap kapasiti penjerapan dan sifat kinetik bahan jerapan. Sebanyak 0.2 g bahan jerap dibiarkan menjerap formaldehid secara pasif di dalam kebuk ujian selama 270 min. Pada kepekatan pemula formaldehid 0.5 ppm, bahan penjerap mempunyai nilai kapasiti  $83.9 \text{ mgg}^{-1}$  selepas 30 min ujian dijalankan. Nilai ini bertambah sehingga ke satu tahap keseimbangan dicapai iaitu  $94.6 \text{ mgg}^{-1}$  selepas 1 jam. Pada kepekatan pemula 0.75 dan 0.9 ppm, nilai kapasiti penjerapan meningkat masing-masing kepada 45.2 dan  $94.6 \text{ mgg}^{-1}$  selepas 1 jam. Nilai ini bertambah dengan pertambahan masa sehingga keseimbangan dicapai selepas 3 jam, masing-masing dengan nilai 146.2 dan  $163.40 \text{ mgg}^{-1}$ . Pada kepekatan pemula formaldehid 2.1 ppm pula, nilai penjerapan didapati mencapai  $236.5 \text{ mgg}^{-1}$  pada jam yang pertama dan semakin bertambah dengan pertambahan masa jerapan. Kapasiti penjerapan formaldehid mencapai keseimbangan selepas 4 jam dengan bacaan  $434.30 \text{ mgg}^{-1}$ . Nilai kapasiti penjerapan formaldehid didapati semakin meningkat dengan peningkatan kepekatan pemula formaldehid yang digunakan. Masa yang diambil oleh sesuatu sistem untuk mencapai keseimbangan juga dipengaruhi oleh kepekatan pemula formaldehid yang digunakan. Beberapa penyelidik



RAJAH 2. Graf menunjukkan (a) peratus penjerapan formaldehid oleh POFN 500 dan R2, dan (b) kepekatan pemula formaldehid yang berbeza dengan masa



RAJAH 3. Morfologi komposit serbuk serat kelapa sawit-TiO<sub>2</sub>

terdahulu turut memerhatikan hubung-kait antara kepekatan pemula dengan kapasiti penyerapan dan masa yang diperlukan untuk mencapai keseimbangan; sebagai contoh, penyerapan 22 ppm formaldehid ke atas nanoserat karbon teraktifan mengambil masa dua kali ganda untuk mencapai keseimbangan berbanding menggunakan 11 ppm formaldehid sebagai kepekatan pemula (Lee et al. 2010). Ewlad-Ahmed et al. (2012) turut berkongsi pemerhatian yang sama semasa menjalankan penyerapan formaldehid ke atas silika terfungsi.

Kajian kinetik penyerapan formaldehid ke atas komposit serat kelapa sawit-TiO<sub>2</sub> dilakukan untuk mengetahui kadar masa penyerapan itu berlaku. Selain dari menunjukkan nilai kapasiti penyerapan formaldehid ke atas komposit serat kelapa sawit-TiO<sub>2</sub>, Rajah 4 juga menunjukkan bahawa penyerapan formaldehid ke atas bahan penyerap berlaku pada dua fasa iaitu fasa pantas dan fasa perlahan. Ini dapat ditunjukkan dengan memerhatikan bentuk graf yang cerun di bahagian permulaan (0 - 120 min) dan landai selepas beberapa jam (120 - 300 min). Pada permulaan proses penyerapan yang dirujuk sebagai fasa pertama iaitu 0 - 120 min, komposit serat kelapa sawit-TiO<sub>2</sub> yang mempunyai luas permukaan 9.55 m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup> menyerap formaldehid dengan pantas dan terdapat banyak tapak untuk penyerapan berlaku. Tapak penyerapan semakin berkurang dengan pertambahan masa kerana molekul-molekul formaldehid semakin memenuhi komposit serat kelapa sawit-TiO<sub>2</sub> seterusnya menyebabkan penyerapan berlaku dengan perlahan pada fasa kedua ini. Suatu lapisan formaldehid tepu terbentuk apabila jumlah formaldehid yang hadir melebihi jumlah tapak penyerapan yang sedia ada. Tindak balas kinetik dapat diterangkan dengan menggunakan Hukum Kadar yang biasanya diekspresikan seperti Persamaan (2) (Halim & Ahmad 2013).

$$\text{Kadar tindak balas} = k [\text{komposit serat kelapa sawit-TiO}_2]^n, \tag{2}$$

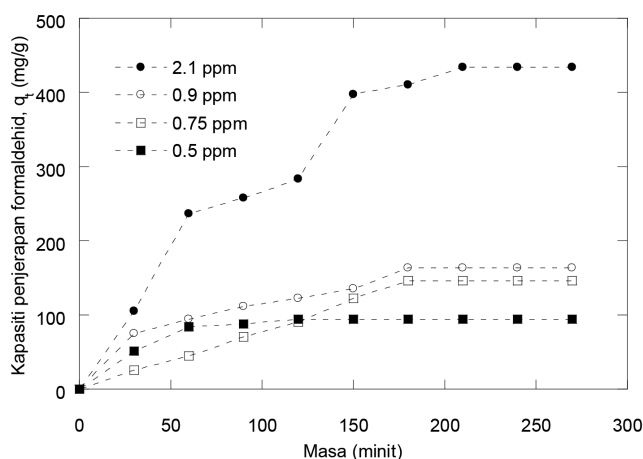
dengan  $k$  adalah pemalar tindak balas dan  $n$  adalah peringkat tindak balas. Persamaan Hukum Kadar bagi penyerapan formaldehid ke atas komposit ini diekspresikan dalam (3) (Halim & Ahmad 2013) kerana ia melibatkan dua bahan yang saling bertindak balas dalam menentukan peringkat kadar. Dua bahan yang saling bertindak balas dalam menentukan peringkat kadar itu adalah komposit serat kelapa sawit-TiO<sub>2</sub> dan formaldehid.

$$\text{Kadar tindak balas} = k [\text{komposit serat kelapa sawit-TiO}_2]^m [\text{formaldehid}]^n, \tag{3}$$

$k$  adalah pemalar tindak balas manakala  $m$  dan  $n$  merupakan peringkat tindak balas. Persamaan (3) menjelaskan kadar permulaan tindak balas dengan formaldehid bertindak balas dengan komposit seterusnya menyebabkan perubahan kepekatan kedua-dua bahan tersebut; dengan kepekatan formaldehid berkurang, komposit serat kelapa sawit-TiO<sub>2</sub> menjadi tepu dengan formaldehid yang terjerap ke permukaan.

Tiga jenis model kinetik iaitu pseudo-tertib pertama, pseudo-tertib kedua dan model Elovich telah diuji kesesuaiannya untuk mewakili data penyerapan formaldehid ke atas komposit yang digunakan. Model kinetik ini amat berguna untuk menerangkan dengan lebih lanjut mekanisme penyerapan yang berlaku sama ada proses penyerapan itu melibatkan penyerapan secara fizikal atau pun penyerapan secara kimia (Ho 2004; Qiu et al. 2009; Yakout & Daifullah 2014). Penilaian kesesuaian model kinetik ini dilakukan dengan membandingkan nilai korelasi, R<sup>2</sup> yang diperoleh daripada setiap graf model kinetik (Rajah 5, Rajah 6 & Rajah 7). Nilai R<sup>2</sup> yang tertinggi di setiap kelompok ujian dipilih sebagai model yang sesuai untuk menerangkan proses penyerapan yang sedang berlaku (Cao et al. 2014; El-maaty & Awad 2014).

Rajah 5 menunjukkan graf log(q<sub>e</sub> - q<sub>t</sub>) melawan masa yang mewakili pseudo-tertib pertama. Graf ini diperoleh



RAJAH 4. Kapasiti penyerapan formaldehid pada kepekatan pemula yang berbeza dengan masa

dengan memasukkan nilai penjerapan pada tahap keseimbangan,  $q_e$  dan kapasiti penjerapan pada masa,  $t$  iaitu  $q_t$  ke dalam  $\log (q_e - q_t)$ . Berdasarkan persamaan linear pseudo-tertib pertama (Persamaan 4), nilai pemalar pseudo-tertib pertama,  $k_1$  dan nilai korelasi,  $R^2$  dapat diketahui daripada nilai keceruan graf iaitu nilai pemalar pseudo-tertib pertama (Metwally & Rizk 2014; Qiu et al. 2009).

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t. \quad (4)$$

Pseudo-tertib pertama merupakan satu model yang mudah untuk menganalisis sesuatu kinetik penjerapan dan penyahjerapan (Tseng et al. 2009). Biasanya pseudo-tertib pertama diaplikasikan untuk menerangkan kinetik penjerapan yang melibatkan pelbagai kepekatan pemula. Ciri-ciri utama data yang menepati model kinetik pseudo-tertib pertama adalah nilai pemalar berkadar langsung dengan nilai kepekatan pemula (Azizian 2004). Penyataan ini disokong dengan keputusan kajian yang diperoleh dimana nilai pemalar bertambah dengan pertambahan kepekatan pemula formaldehid seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 3.

Penjerapan formaldehid ke atas komposit pada kepekatan pemula formaldehid 2.1 ppm sesuai dijelaskan dengan menggunakan pseudo-tertib pertama. Ini kerana nilai korelasi,  $R^2$  pseudo-tertib pertama bagi kepekatan pemula 2.1 ppm adalah yang tertinggi iaitu 0.9484 berbanding nilai korelasi,  $R^2$  pseudo-tertib kedua 0.8586 dan nilai korelasi,  $R^2$  model Elovich 0.9017.

Rajah 6 menunjukkan graf yang mewakili pseudo-tertib kedua yang diplot berdasarkan persamaan pseudo-tertib kedua (Azizian 2004) iaitu:

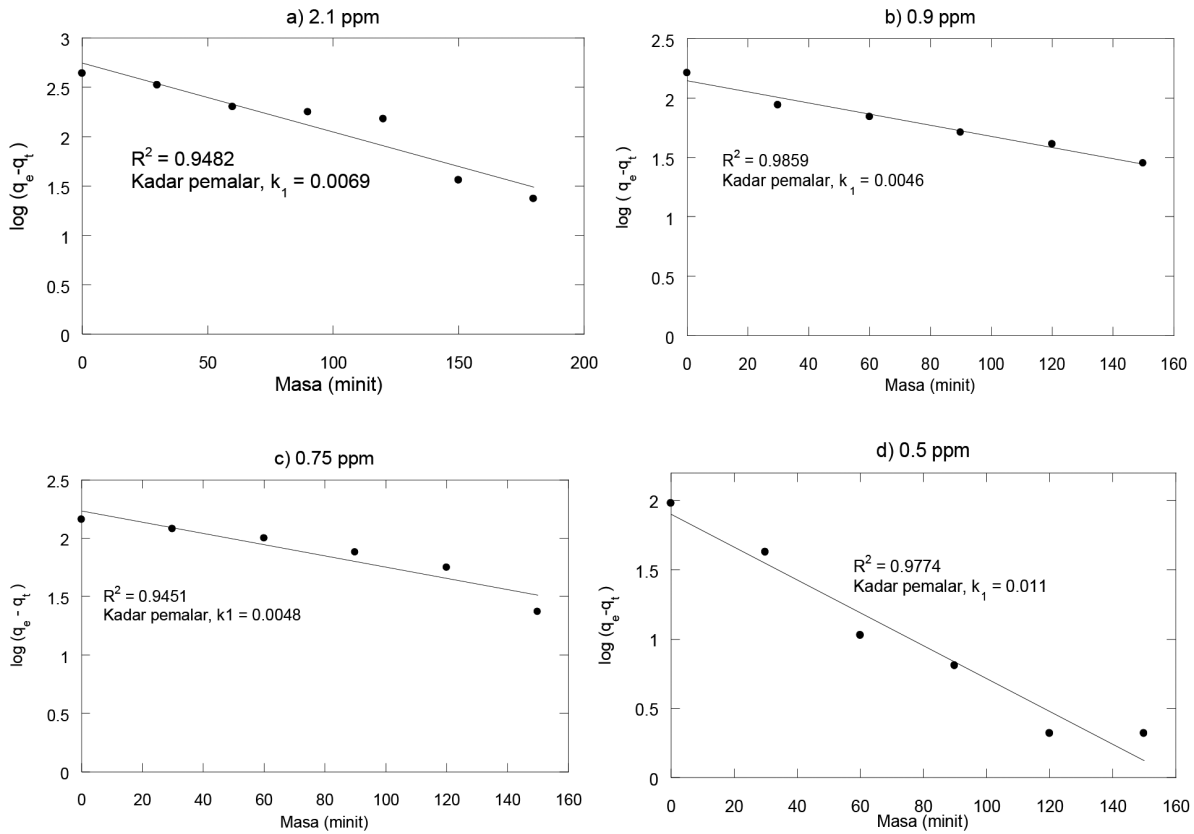
$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t, \quad (5)$$

yang mana  $k_2$  adalah nilai pemalar pseudo-tertib kedua yang diwakili oleh nilai pintasan graf. Kepekatan pemula sesuatu sistem turut mempengaruhi jenis model kinetik yang diwakili oleh sesebuah sistem penjerapan. Menurut Azizian (2004), kepekatan pemula yang rendah sesuai diwakili oleh model pseudo-tertib kedua, manakala pada kepekatan pemula yang lebih tinggi, model kinetik didapati berubah kepada pseudo-tertib pertama (Azizian 2004). Hasil kajian penjerapan formaldehid ke atas komposit serat kelapa sawit-TiO<sub>2</sub> ini menyokong penuh kenyataan tersebut. Kepekatan pemula formaldehid 0.5 ppm diwakili oleh model kinetik pseudo-tertib kedua dan kepekatan pemula formaldehid 2.1 ppm diwakili oleh model kinetik pseudo-tertib pertama. Ini dapat dilihat apabila kepekatan pemula formaldehid ditambah 4.2 kali ganda (daripada 0.5 kepada 2.1 ppm), nilai korelasi,  $R^2$  pepadanan model pseudo-tertib kedua berkurangan daripada 0.9484 kepada 0.8586, manakala nilai korelasi,  $R^2$  pepadanan model pseudo-tertib kedua bertambah daripada 0.8586 kepada 0.9484. Pemerhatian ini jelas dengan pertambahan kepekatan pemula formaldehid, korelasi data eksperimen kepada model kinetik pseudo-tertib kedua berkurangan, sementara korelasi data eksperimen kepada model kinetik pseudo-tertib pertama bertambah. Kepekatan pemula formaldehid pertengahan (0.75 dan 0.9 ppm) sesuai diwakili oleh model kinetik Elovich dengan nilai korelasi,  $R^2$  masing-masing memberikan nilai 0.9764 dan 0.9892. Nilai-nilai pemalar kinetik dan nilai korelasi pada setiap kepekatan pemula formaldehid yang digunakan ditunjukkan di dalam Jadual 3.

Perubahan model kinetik dari pseudo-tertib pertama kepada pseudo-tertib kedua menjelaskan bahawa berlaku perubahan penjerapan secara fizikal kepada penjerapan secara kimia. Pengoksidaan formaldehid kepada karbon dioksida dan air berlaku pada permukaan TiO<sub>2</sub>. Ini kerana TiO<sub>2</sub> mempunyai aktiviti pemangkin yang kuat dan kestabilan kimia yang tinggi dan juga merupakan

JADUAL 3. Nilai pemalar kinetik pseudo-tertib pertama, pseudo-tertib kedua dan model Elovich

Persamaan kinetik	Kepekatan awal formaldehid (ppm)	Pemalar	Pekali regresi, $R^2$
Pseudo-tertib pertama		$K_1$ (min <sup>-1</sup> )	$q_e$ (mg/g)
	0.5	0.0011	1.90
	0.75	0.0048	2.23
	0.9	0.0046	2.14
	2.1	0.0069	2.74
Pseudo-tertib kedua		$K_2$ (g/mg min)	$q_e$ (mg/g)
	0.5	0.0012	1.90
	0.75	0.0048	2.23
	0.9	0.0046	2.14
	2.1	0.0069	2.74
Elovich		$\alpha$ (mg/g min)	$\beta$ (g/mg)
	0.5	2.22	19.36
	0.75	13.6	20.02
	0.9	4.06	25.88
	2.1	44.02	79.08



RAJAH 5. Pseudo-tertib pertama penjerapan formaldehid ke atas komposit serat kelapa sawit-TiO<sub>2</sub> pada kepekatan pemula (a) 2.1 ppm, (b) 0.9 ppm, (c) 0.75 ppm dan (d) 0.5 ppm

pemangkin foto yang boleh mengoksidakan formaldehid kepada karbon dioksida (Liu et al. 2012b). Satu kelebihan model kinetik pseudo-tertib kedua ini adalah nilai kapasiti penjerapan, nilai pemalar dan kadar permulaan penjerapan dapat diketahui secara langsung dari persamaan pseudo-tertib kedua Persamaan (5) (Ho 2006).

Rajah 7 menunjukkan graf yang dihasilkan daripada persamaan linear model Elovich (Persamaan 6) (Seyahmazegi et al. 2016):

$$q = \frac{1}{\beta} \ln \alpha\beta + \left(\frac{1}{\beta}\right) \ln t, \tag{6}$$

dengan  $\alpha$  dan  $\beta$  adalah pemalar Elovich. Persamaan linear ini dikenali sebagai plot pengamiran Elovich iaitu plot yang dihasilkan daripada tafsiran data kinetik isoterma yang diperolehi. Persamaan kinetik model Elovich telah digunakan secara meluas untuk menerangkan penjerapan yang melibatkan sistem penjerapan gas ke atas pepejal (Rudzinski & Panczyk 2000). Model ini mengandaikan bahawa permukaan bahan penjerap adalah heterogen daripada segi tenaganya (Halim & Ahmad 2013) dan tindak balas kimia yang mengawal kadar penjerapan (Aparecida et al. 2012).

Pemalar  $\alpha$  dikira sebagai kadar pemula eksperimen kerana menurut Low (1960), penjerapan yang pantas tidak mematuhi prinsip eksponen. Penjerapan formaldehid ke

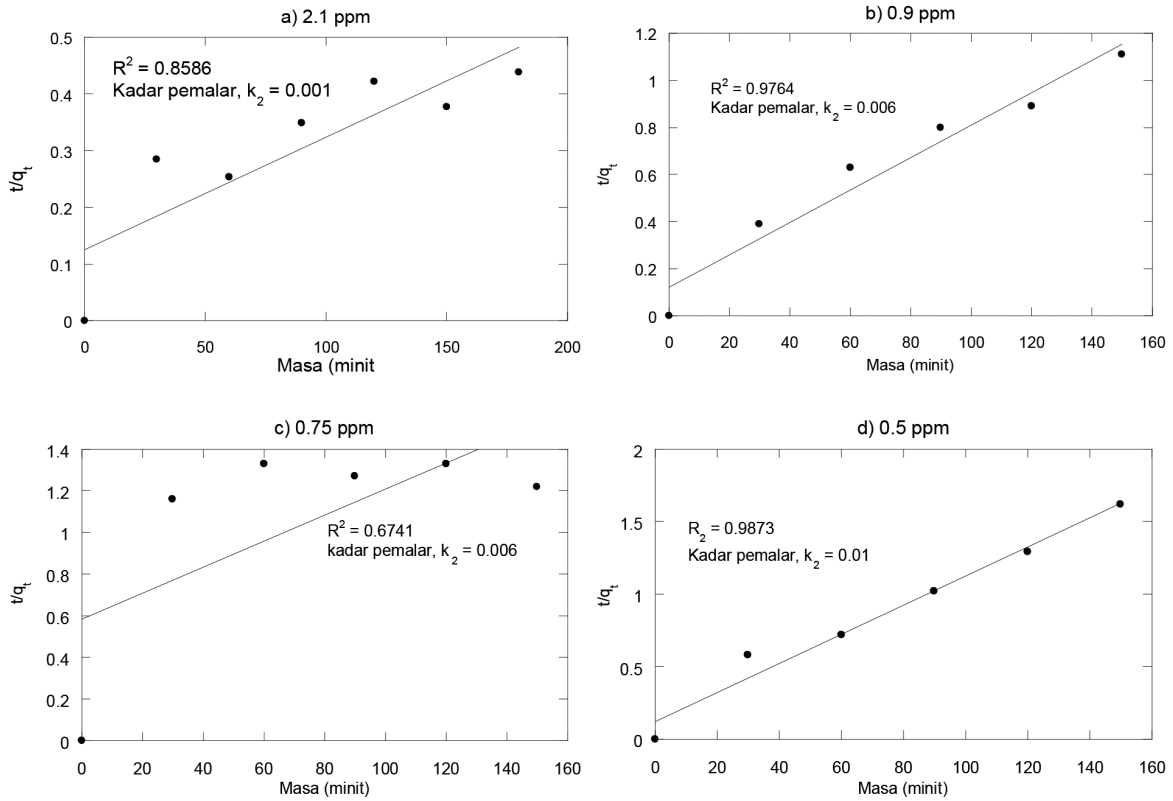
atas komposit pada kepekatan pemula formaldehid 0.75 dan 0.9 ppm mematuhi model kinetik Elovich dengan nilai korelasi 0.9764 dan 0.9892. Nilai pemalar bagi kesemua model kinetik bagi penjerapan formaldehid ke atas komposit yang dilakukan menggunakan kepekatan pemula formaldehid 2.1 - 0.5 ppm, pada suhu 25°C, menggunakan 0.2 g komposit pada tekanan atmosfera, 1 atm ditunjukkan dalam Jadual 3. Nilai pemalar ini (Jadual 3) adalah nilai penghad pindahan jisim formaldehid di dalam komposit.

Isoterma Langmuir, isoterma Freundlich dan isoterma Temkin telah digunakan dalam kajian ini bagi mencari korelasi yang paling sesuai untuk lengkung keseimbangan penjerapan formaldehid ke atas komposit. Kesesuaian model isoterma-isoterma ini turut dipilih melalui perbandingan nilai korelasi, R<sup>2</sup> komposit. Rajah 8(a) menunjukkan graf isoterma Freundlich yang telah diplot berdasarkan persamaan (7) (Tan et al. 2009b).

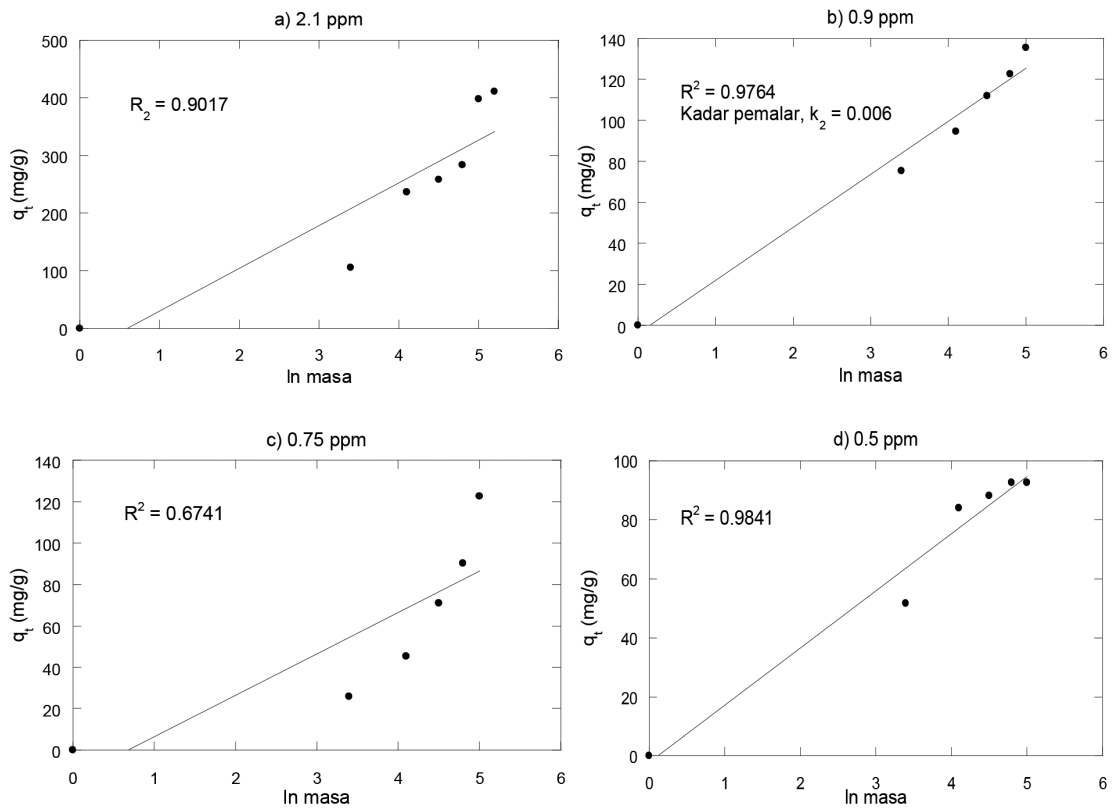
$$\log q_e = \log K_F + \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e, \tag{7}$$

dengan  $n$  dan  $K_F$  adalah pemalar Freundlich.  $K_F$  mewakili kuantiti formaldehid yang terjerap ke atas komposit serat kelapa sawit-TiO<sub>2</sub> untuk satu unit kepekatan seimbang. Manakala  $C_e$  mewakili kepekatan pada keseimbangan. Nilai  $1/n$  diambil daripada nilai kecerunan graf dan nilai  $K_F$  diambil daripada nilai pintasan graf. Persamaan (7)





RAJAH 6. Pseudo-tertib kedua penjerapan formaldehid ke atas komposit serat kelapa sawit-TiO<sub>2</sub> pada kepekatan pemula (a) 2.1 ppm, (b) 0.9 ppm, (c) 0.75 ppm dan (d) 0.5 ppm



RAJAH 7. Model Elovich penjerapan formaldehid ke atas komposit serat kelapa sawit-TiO<sub>2</sub> pada kepekatan pemula (a) 2.1 ppm, (b) 0.9 ppm, (c) 0.75 ppm dan (d) 0.5 ppm

merupakan sebuah persamaan emperikal berdasarkan serapan dan penjerapan pelbagai lapisan ke atas permukaan heterogen. Isoterma Freundlich menerangkan bahawa penjerapan berbalik boleh berlaku dan tidak terhad kepada penjerapan satu lapisan sahaja (Tan et al. 2009a). Data penjerapan formaldehid diwakili oleh isoterma Freundlich kerana nilai korelasi yang lebih tinggi ( $R^2 = 0.9397$ ) berbanding dengan dengan nilai korelasi yang dimiliki oleh isoterma Langmuir ( $R^2=0.8692$ ) dan isoterma Temkin ( $R^2 = 0.8756$ ).

Rajah 8(b) menunjukkan graf bagi isoterma Langmuir. Graf ini diplot menggunakan persamaan Langmuir (8) (Halim & Ahmad 2013).

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{k_L q_m} \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_m}, \tag{8}$$

dengan  $q_e$  adalah nilai kapasiti penjerapan pada tahap keseimbangan,  $k_L$  adalah pemalar Langmuir,  $q_m$  adalah kapasiti penjerapan maksima dan  $C_e$  adalah kepekatan formaldehid pada tahap keseimbangan. Cerun graf mewakili nilai penjerapan maksima manakala pintasan graf memberikan nilai pemalar Langmuir. Model ini dihasilkan berdasarkan hipotesis tindak balas, dengan komposit dianggap mempunyai kapasiti penjerapan yang terhad,

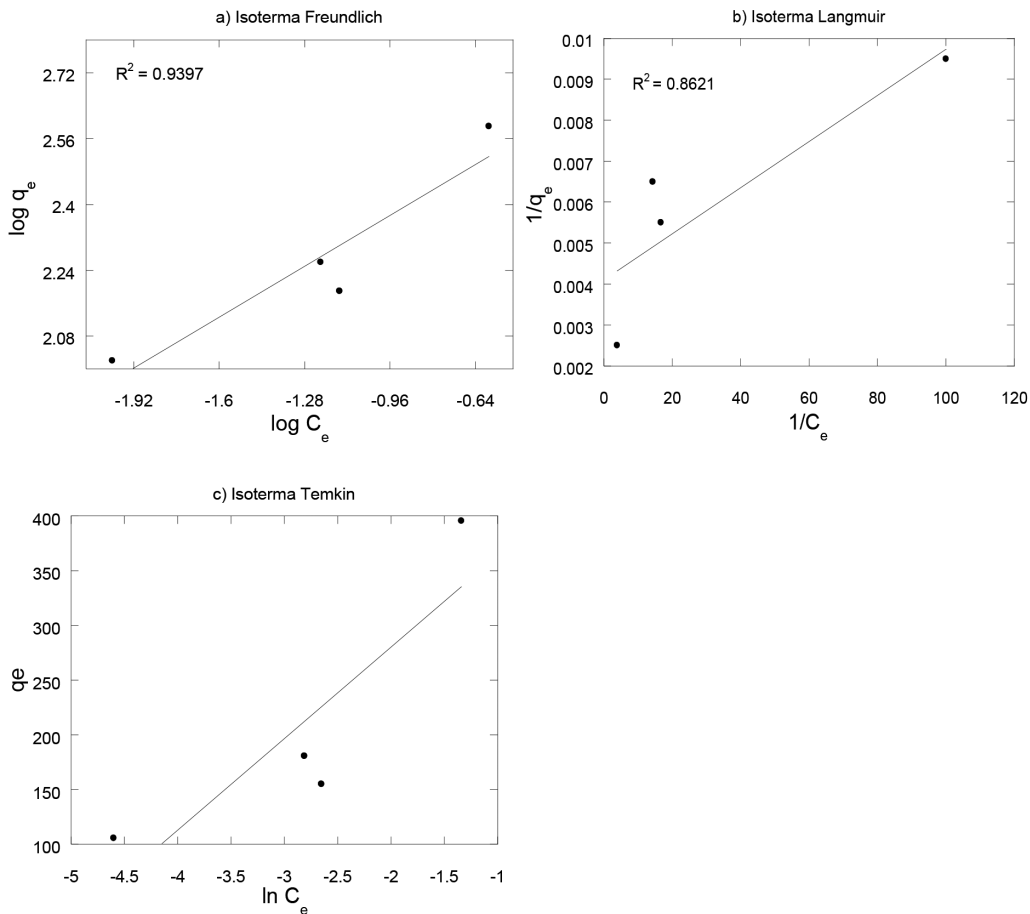
$q_m$ . Kesemua tapak penjerapan dianggap seiras, setiap tapak menahan satu molekul formaldehid dan semua tapak penjerapan sangat bergantung kepada kuantiti penjerapan secara bertenaga (Langmuir 1918).

Pemalar faktor pemisah,  $R_L$  ialah ciri-ciri penting isoterma Langmuir dan merupakan pemalar yang menunjukkan jenis penjerapan sama ada sesuatu penjerapan itu boleh berlaku ( $0 < R_L < 1$ ), penjerapan tidak berbalik ( $R_L = 0$ ), penjerapan linear ( $R_L = 1$ ) atau penjerapan tidak boleh berlaku ( $R_L > 1$ ). Nilai  $R_L$  dikira menggunakan persamaan (9):

$$R_L = \frac{1}{1 + k_L C_i}, \tag{9}$$

dengan  $k_L$  ialah pemalar Langmuir dan  $C_i$  ialah kepekatan pemula formaldehid. Didapati, nilai  $R_L$  penjerapan formaldehid ini adalah 0.76 ( $C_i = 0.5$  ppm), 0.91 ( $C_i = 0.75$  ppm), 0.60 ( $C_i = 0.9$  ppm) dan 0.98 ( $C_i = 2.1$  ppm). Ini bermakna, penjerapan formaldehid ke atas komposit serat kelapa sawit-TiO<sub>2</sub> boleh berlaku.

Isoterma Temkin mengambil kira interaksi antara komposit serat kelapa sawit-TiO<sub>2</sub> dan formaldehid yang akan dijerap berdasarkan anggapan bahawa tenaga bebas serapan adalah fungsi kepada litupan permukaan.



RAJAH 8. Isoterma penjerapan formaldehid ke atas komposit serat kelapa sawit-TiO<sub>2</sub> (a) Isoterma Langmuir, (b) Isoterma Freundlich dan (c) Isoterma Temkin

JADUAL 4. Nilai pemalar isoterma Freundlich, isoterma Langmuir dan isoterma Temkin

Isoterma	Kepekatan awal (ppm)	Pemalar	Pekali regresi, R <sup>2</sup>	
Freundlich		$K_F$ 2.74	1/n 0.387	0.9397
Temkin		$b_T$ 447.87	$A_T$ 83.78	0.8756
Langmuir	0.5	$K_L$ 0.25	$R_L$ 0.655	0.8692
	0.75	0.50	0.689	
	0.9	0.36	0.787	
	2.1	2.0	0.5	

$R_L > 1$  tidak cenderung berlaku

$0 < R_L < 1$  cenderung berlaku

$R_L = 1$  linear

$R_L = 0$  tidak berbalik

Persamaan linear Temkin yang digunakan untuk mencari nilai pemalar Temkin adalah seperti yang ditunjukkan dalam (10) (Gupta et al. 2010).

$$q_e = \frac{RT}{b_T} \ln A_T + \frac{RT}{b_T} \ln C_e, \quad (10)$$

dengan R ialah pemalar gas (8.315 J/mol/K); T ialah suhu (K);  $A_T$  ialah pemalar ikatan keseimbangan; dan  $b_T$  ialah pemalar Temkin. Nilai pemalar diambil daripada nilai kecerunan dan pintasan graf (Rajah 8(c)). Data uji kaji isoterma penjerapan formaldehid ke atas komposit serat kelapa sawit-TiO<sub>2</sub> tidak menepati isoterma Temkin kerana nilai korelasi yang rendah ( $R^2 = 0.8756$ ) berbanding dengan nilai korelasi isoterma Langmuir dan isoterma Freundlich. Nilai kesemua pemalar isoterma ini ditunjukkan dalam Jadual 4.

#### KESIMPULAN

Hasil kajian berjaya menunjukkan bahawa komposit yang diperbuat daripada serat kelapa sawit dan TiO<sub>2</sub> menggunakan kaedah pengisaran mekanikal berjaya menjerap formaldehid dalam udara dengan simulasi keadaan dalam kebuk ujian. Ini dibuktikan dengan nilai pemalar faktor pemisah,  $R_L$  ( $0 < R_L < 1$ ) bagi kesemua kepekatan pemula formaldehid menunjukkan penjerapan formaldehid ke atas komposit boleh berlaku dan diberkenankan. Kepekatan formaldehid berjaya dikurangkan sebanyak 88% oleh serat mesokarpa kelapa sawit, manakala bertambah kepada 96% apabila TiO<sub>2</sub> ditambah kepada serat mesokarpa kelapa sawit. Faktor kepekatan pemula formaldehid telah memberi kesan kepada model kinetik yang diwakili. Pada kepekatan 0.5 ppm, penjerapan diwakili oleh model kinetik pseudo-tertib kedua. Pertambahan kepekatan pemula formaldehid sebanyak 4.2 kali ganda menyebabkan model kinetik berubah kepada pseudo-tertib pertama. Penjerapan yang diwakili oleh isoterma Freundlich menerangkan bahawa penjerapan yang berlaku tidak terhad kepada penjerapan satu lapisan sahaja.

#### PENGHARGAAN

Terima kasih kepada Kementerian Sains, Teknologi & Inovasi (MOSTI) yang membiayai penyelidikan ini melalui peruntukan geran ERGS/1/2013/STG05/UKM/02/2. Terima kasih juga kepada Institut Kesihatan dan Keselamatan Pekerjaan Nasional (NIOSH) kerana sudi berkolaborasi menjayakan penyelidikan ini.

#### RUJUKAN

- Aber, S., Khataee, A. & Sheydaei, M. 2009. Optimization of activated carbon fiber preparation from kenaf using K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> as chemical activator for adsorption of phenolic compounds. *Bioresource Technology* 100(24): 6586-6591.
- Abnisa, F., Arami-Niya, A., Wan Daud, W.M.A., Sahu, J.N. & Noor, I.M. 2013. Utilization of oil palm tree residues to produce bio-oil and bio-char via pyrolysis. *Energy Conversion and Management* 76: 1073-1082.
- Aparecida, K., Gusmão, G., Vinícius, L., Gurgel, A., Márcia, T., Melo, S. & Frédéric, L. 2012. Dyes and pigments application of succinylated sugarcane bagasse as adsorbent to remove methylene blue and gentian violet from aqueous solutions: Kinetic and equilibrium studies. *Dyes and Pigments* 92(3): 967-974.
- Azali, A.B., Nasrin, Y.M., Choo, N.M.A. & S.M.S. 2005. Development of gasification system fuelled with oil palm fibres and shells. *American Journal of Applied Sciences (Special Issue)* 3: 72-75.
- Azizian, S. 2004. Kinetic models of sorption: A theoretical analysis. *Journal of Colloid and Interface Science* 276(1): 47-52.
- Cao, J.S., Lin, J.X., Fang, F., Zhang, M.T. & Hu, Z.R. 2014. A new adsorbent by modifying walnut shell for the removal of anionic dye: Kinetic and thermodynamic studies. *Bioresource Technology* 163: 199-205.
- Carter, E.M., Katz, L.E., Speitel, G.E. & Ramirez, D. 2011. Gas-phase formaldehyde adsorption isotherm studies on activated carbon: Correlations of adsorption capacity to surface functional group density. *Environmental Science and Technology* 45: 6498-6503.
- Chin, S., Park, E., Kim, M., Jeong, J., Bae, G.N. & Jurng, J. 2011. Preparation of TiO<sub>2</sub> ultrafine nanopowder with large surface area and its photocatalytic activity for gaseous nitrogen oxides. *Powder Technology* 206(3): 306-311.

- El-Maaty, W.M.A. & Awad, F.S. 2014. Studies on biosorption of mercury (II) from aqueous solution on nitric acid modified activated carbon prepared from water. *ABC Journal of Advanced Research* 3(1): 50-73.
- Ewlad-Ahmed, A.M., Morris, M.A., Patwardhan, S.V. & Gibson, L.T. 2012. Removal of formaldehyde from air using functionalized silica supports. *Environmental Science and Technology* 46: 13354-13360.
- Foo, K.Y. & Hameed, B.H. 2009. Value-added utilization of oil palm ash: A superior recycling of the industrial agricultural waste. *Journal of Hazardous Materials* 172(2-3): 523-531.
- Foo, K.Y. & Hameed, B.H. 2011. Preparation of oil palm (Elaeis) empty fruit bunch activated carbon by microwave-assisted KOH activation for the adsorption of methylene blue. *DES* 275(1-3): 302-305.
- Gallego, E., Roca, F.J., Perales, J.F. & Guardino, X. 2013. Experimental evaluation of VOC removal efficiency of a coconut shell activated carbon filter for indoor air quality enhancement. *Building and Environment* 67: 14-25.
- Gallego, E., Roca, F.X., Guardino, X. & Rosell, M.G. 2008. Indoor and outdoor BTX levels in Barcelona City metropolitan area and Catalan rural areas. *Journal of Environmental Sciences China* 20(9): 1063-1069.
- Golden, R. & Valentini, M. 2014. Formaldehyde and methylene glycol equivalence: Critical assessment of chemical and toxicological aspects. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 69(2): 178-186.
- Gupta, V.K., Rastogi, A. & Nayak, A. 2010. Biosorption of nickel onto treated alga (*Oedogonium hatei*): Application of isotherm and kinetic models. *Journal of Colloid and Interface Science* 342(2): 533-539.
- Halim, A.A. & Ahmad, M.F. 2013. Isoterma dan kinetik penyerapan boron oleh batu kapur sebagai penyerap berkos rendah. *Sains Malaysiana* 42(12): 1689-1696.
- Ho, Y. 2006. Review of second-order models for adsorption systems. *Journal of Hazardous Materials* 136(3): 681-689.
- Ho, Y.S. 2004. Citation review of Lagergren kinetic rate equation on adsorption reactions. *Scientometrics* 59(1): 171-177.
- Hoseinzadeh Hesas, R., Arami-Niya, A., Wan Daud, W.M.A. & Sahu, J.N. 2013. Preparation of granular activated carbon from oil palm shell by microwave-induced chemical activation: Optimisation using surface response methodology. *Chemical Engineering Research and Design* 91(12): 2447-2456.
- Kim, D.I., Park, J.H., Kim, S.D., Lee, J.Y., Yim, J.H., Jeon, J.K., Park, S.H. & Park, Y.K. 2011. Comparison of removal ability of indoor formaldehyde over different materials functionalized with various amine groups. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 17(1): 1-5.
- Kumagai, S., Sasaki, K., Shimizu, Y. & Takeda, K. 2008. Formaldehyde and acetaldehyde adsorption properties of heat-treated rice husks. *Separation and Purification Technology* 61(3): 398-403.
- Lahijani, P. & Zainal, Z.A. 2011. Bioresource technology gasification of palm empty fruit bunch in a bubbling fluidized bed: A performance and agglomeration study. *Bioresource Technology* 102(2): 2068-2076.
- Langmuir, I. 1918. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society* 40(9): 1361-1403.
- Lee, K.J., Shiratori, N., Lee, G.H., Miyawaki, J., Mochida, I., Yoon, S.H. & Jang, J. 2010. Activated carbon nanofiber produced from electrospun polyacrylonitrile nanofiber as a highly efficient formaldehyde adsorbent. *Carbon* 48(15): 4248-4255.
- Li, W., Yang, K., Peng, J., Zhang, L., Guo, S. & Xia, H. 2008. Effects of carbonization temperatures on characteristics of porosity in coconut shell chars and activated carbons derived from carbonized coconut shell chars. *Industrial Crops and Products* 28(2): 190-198.
- Liou, T.H. 2004. Evolution of chemistry and morphology during the carbonization and combustion of rice husk. *Carbon* 42(4): 785-794.
- Liu, H., Wang, X., Pan, C. & Liew, K.M. 2012. First-principles study of formaldehyde adsorption on TiO<sub>2</sub> rutile (110) and anatase (001) surfaces. *Journal of Physical Chemistry C* 116(14): 8044-8053.
- Liu, H., Zhao, M., Lei, Y., Pan, C. & Xiao, W. 2012. Formaldehyde on TiO<sub>2</sub> anatase (101): ADFT study. *Computational Materials Science* 51(1): 389-395.
- Liu, T., Li, F. & Li, X. 2008. TiO<sub>2</sub> hydrosols with high activity for photocatalytic degradation of formaldehyde in a gaseous phase. *Journal of Hazardous Materials* 152(1): 347-355.
- Liu, W.J., Zeng, F.X., Jiang, H. & Zhang, X.S. 2011. Preparation of high adsorption capacity bio-chars from waste biomass. *Bioresource Technology* 102(17): 8247-8252.
- Metwally, S.S. & Rizk, H.E. 2014. Preparation and characterization of nano-sized iron-titanium mixed oxide for removal of some lanthanides from aqueous solution. *Separation Science and Technology* 49(15): 2426-2436.
- Mohamad Nor, N., Lau, L.C., Lee, K.T. & Mohamed, A.R. 2013. Synthesis of activated carbon from lignocellulosic biomass and its applications in air pollution control - A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 1(4): 658-666.
- Nie, L., Yu, J., Li, X., Cheng, B., Liu, G. & Jaroniec, M. 2013. Enhanced performance of NaOH-modified Pt/TiO<sub>2</sub> toward room temperature selective oxidation of formaldehyde. *Journal of Environmental Science & Technology* 47(6): 2777-2783.
- Pendergrass, S.M. 2003. Hydrocarbons, Aromatic. *NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM)*, 4th ed. 127: 1-7.
- Pua, F.L., Zakaria, S., Chia, C.H., Fan, S.P., Rosenau, T., Potthast, A. & Liebner, F. 2013. Solvolytic liquefaction of oil palm empty fruit bunch (EFB) fibres: Analysis of product fractions using FTIR and pyrolysis-GCMS. *Sains Malaysiana* 42(6): 793-799.
- Qiu, H., Lv, L., Pan, B., Zhang, Q., Zhang, W. & Zhang, Q. 2009. Critical review in adsorption kinetic models. *Journal of Zhejiang University Science A* 10(5): 716-724.
- Rafatullah, M., Sulaiman, O., Hashim, R. & Ahmad, A. 2010. Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: A review. *Journal of Hazardous Materials* 177(1-3): 70-80.
- Rask, J., Kecskes, T. & Kiss, J. 2004. Adsorption and reaction of formaldehyde on TiO<sub>2</sub>-supported Rh catalysts studied by FTIR and mass spectrometry. *Journal of Catalysis* 226(1): 183-191.
- Rudzinski, W. & Panczyk, T. 2000. Kinetics of isothermal adsorption on energetically heterogeneous solid surfaces: A new theoretical description based on the statistical rate theory of interfacial transport. *The Journal of Physical Chemistry B* 104(39): 9149-9162.
- Seyahmazegi, E.N., Mohammad-Rezaei, R. & Razmi, H. 2016. Multiwalled carbon nanotubes decorated on calcined eggshell waste as a novel nano-sorbent: Application for anionic dye Congo red removal. *Chemical Engineering Research and Design* 109: 824-834.

- Simate, G.S., Maledi, N., Ochieng, A., Ndlovu, S., Zhang, J. & Walubita, L.F. 2016. Coal-based adsorbents for water and wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 4(2): 2291-2312.
- Singh, R.P., Embrandiri, A., Ibrahim, M.H. & Esa, N. 2011. Management of biomass residues generated from palm oil mill: Vermicomposting a sustainable option. *Resources, Conservation and Recycling* 55(4): 423-434.
- Suhas, Carrott, P.J.M. & Ribeiro Carrott, M.M.L. 2007. Lignin - From natural adsorbent to activated carbon: A review. *Bioresource Technology* 98: 2301-2312.
- Tan, I.A.W., Ahmad, A.L. & Hameed, B.H. 2009. Fixed-bed adsorption performance of oil palm shell-based activated carbon for removal of 2,4,6-trichlorophenol. *Bioresource Technology* 100(3): 1494-1506.
- Tan, I., Ahmad, A. & Hameed, B. 2009. Adsorption isotherms, kinetics, thermodynamics and desorption studies of 2, 4, 6-trichlorophenol on oil palm empty fruit bunch-based activated carbon. *Journal of Hazardous Materials* 164: 473-482.
- Tasbihi, M., Štangar, U.L., Škapin, A.S., Ristić, A., Kaučič, V. & Tušar, N.N. 2010. Titania-containing mesoporous silica powders: Structural properties and photocatalytic activity towards isopropanol degradation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 216(2-3): 167-178.
- Yakout, S.M. & Daifullah, A.A.M. 2014. Adsorption/desorption of BTEX on activated carbon prepared from rice husk. *Desalination and Water Treatment* 52(22-24): 4485-4491.
- Tseng, J.Y., Chang, C.Y., Chang, C.F., Chen, Y.H., Chang, C.C., Ji, D.R., Chiu, C.Y. & Chiang, P.C. 2009. Kinetics and equilibrium of desorption removal of copper from magnetic polymer adsorbent. *Journal of Hazardous Materials* 171(1-3): 370-377.
- Wang, S., Ang, H.M. & Tade, M.O. 2007. Volatile organic compounds in indoor environment and photocatalytic oxidation: State of the art. *Environment International* 33(5): 694-705.
- Yu, H., Zhang, K. & Rossi, C. 2007. Theoretical study on photocatalytic oxidation of VOCs using nano-TiO<sub>2</sub> photocatalyst. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 188(1): 65-73.

Nor Rahafza Abdul Manap, Roslinda Shamsudin\*,  
 Muhammad Azmi Abdul Hamid & Azman Jalar  
 Pusat Pengajian Fizik Gunaan  
 Fakulti Sains & Teknologi  
 Universiti Kebangsaan Malaysia  
 43600 Bangi, Selangor Darul Ehsan  
 Malaysia

Mohd Norhafsam Maghpor  
 Bahagian Pembangunan Penyelidikan dan Konsultansi  
 Institut Kesihatan dan Keselamatan Pekerjaan Nasional (NIOSH)  
 Lot 1, Jalan 15/1, Seksyen 15  
 43650 Bandar Baru Bangi, Selangor Darul Ehsan  
 Malaysia

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

Diserahkan: 24 Mei 2016

Diterima: 20 Disember 2016