

Research Article

Penilaian Model Matematik Bagi Pertumbuhan Mikroalga *Characium* sp. UKM1, *Chlorella* sp. UKM2 dan *Coelastrella* sp. UKM4 dalam Air Larut Resapan Sintetik

(Evaluation of mathematical models for the growth of microalgae *Characium* sp. UKM1, *Chlorella* sp. UKM2 and *Coelastrella* sp. UKM4 in synthetic leachate)

Mohamad Faisal Ni Aznan¹, Nazlina Haiza Mohd Yasin^{1*}, Norzila Mohd^{2,3} and Mohd Sobri Takriff^{3,4}

¹Department of Biological Sciences and Biotechnology, Faculty of Science and Technology, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

²School of Chemical Engineering, College of Engineering, Universiti Teknologi MARA, Terengganu Campus, Bukit Besi, 23000 Dungun, Terengganu, Malaysia

³Department of Chemical and Process Engineering, Faculty of Engineering and Built Environment, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

⁴Chemical and Water Desalination Engineering Program, College of Engineering, University of Sharjah, UAE

*Corresponding author: nazlinayasin@ukm.edu.my

ABSTRAK

Mikroalga berpotensi sebagai agen fikoremediasi air sisa dan metabolit yang terhasil dalam biojisim mikroalga mampu diaplikasikan dalam bidang bioteknologi. Pertumbuhan mikroalga dalam air sisa menjadi petunjuk bahawa mikroalga mampu hidup dalam persekitaran ekstrim dan menjadi agen fikoremediasi air sisa. Oleh itu, model matematik yang terbaik bagi kinetik pertumbuhan mikroalga yang dikultur dalam air sisa perlu dikaji bagi menentukan model yang tepat untuk digunakan pada masa akan datang. Dalam kajian ini, penilaian model matematik yang terbaik terhadap tiga mikroalga tempatan, *Characium* sp. UKM1, *Chlorella* sp. UKM2 dan *Coelastrella* sp. UKM4 yang dikultur dalam air larut resapan sintetik dianalisis dengan menggunakan tiga model matematik iaitu logistik, logistik terubah suai dan Gompertz terubah suai. Selain itu, analisis statistik dijalankan bagi penentuan model terbaik dengan mengambil kira nilai regresi terubah suai ($\text{adj } R^2$), ralat tambah kuasa dua (SSE), punca min ralat kuasa dua (RMSE), faktor bias (BF), faktor kejituan (AF) dan peratus ramalan ralat piawai (%SEP). Hasil menunjukkan model yang terbaik bagi ketiga-tiga mikroalga dalam air larut resapan sintetik adalah model Gompertz terubah suai. Ini disebabkan oleh beberapa ciri antaranya plot residual yang mendekati model matematik, nilai BF yang mendekati nilai satu, serta nilai terendah %SEP berbanding model matematik yang lain. Kesimpulannya, model Gompertz terubah suai adalah model penyesuaian yang terbaik terhadap pertumbuhan mikroalga dalam air larut resapan sintetik.

Kata kunci: Air larut resapan sintetik, *Characium* sp. UKM1, *Chlorella* sp. UKM2, *Coelastrella* sp. UKM4, model matematik, mikroalga

ABSTRACT

Microalgae have a potential as a phycoremediation agent for wastewater and the metabolites produced from microalgae in biomass can be applied in the field of biotechnology. The growth of microalgae in wastewater indicates the feasibility of microalgae to live in an extreme environment and acts as a phycoremediation agent. Therefore, the best mathematical model for microalgae growth kinetic grown in wastewater needs to be elucidated to determine the correct model for future use. In this study, the evaluation of the best mathematical model for three local microalgae, *Characium* sp. UKM1, *Chlorella* sp. UKM2 and *Coelastrella* sp. UKM4 cultured in synthetic leachate will be analysed by three mathematical models which is logistic, modified logistic and modified Gompertz model. Beside that, statistical analysis was conducted to determine the best model by determination of adjusted regression ($\text{adj } R^2$), sum square error (SSE), root mean square error (RMSE), bias factor (BF), accuracy factor (AF) and standard error prediction (%SEP) values. Result shows the best model for *Characium* sp. UKM1, *Chlorella* sp. UKM2 and *Coelastrella* sp. UKM4 grown in synthetic leachate is modified Gompertz model. This is due to several characteristics such as the residual plot that fitted to the mathematical model, BF values near to one, also the lowest %SEP value compared to the other mathematical models. In conclusion, the modified Gompertz model is the best fitting model for microalgae growth in synthetic leachate.

Key words: *Characium* sp. UKM1, *Chlorella* sp. UKM2, *Coelastrella* sp. UKM4, mathematical model, microalgae, synthetic leachate

Article History

Accepted: 1 December 2022

First version online: 26 December 2022

Cite This Article:

Ni Aznan, M.F., Mohd Yasin, N.H., Mohd, N. & Takriff, M.S. 2022. Penilaian model matematik bagi pertumbuhan mikroalga *Characium* sp. UKM1, *Chlorella* sp. UKM2 dan *Coelastrella* sp. UKM4 dalam air larut resapan sintetik. Malaysian Applied Biology, 51(5): 249-260. <https://doi.org/10.55230/mabjournal.v51i5.2342>

Copyright

© 2022 Malaysian Society of Applied Biology

PENGENALAN

Bahan organik dan bukan organik yang dilepaskan ke dalam persekitaran sebagai air domestik, pertanian dan industri membawa kepada pencemaran organik dan bukan organik. Proses rawatan primer dan sekunder terhadap air sisa telah diperkenalkan di kawasan yang membangun, untuk menyingkirkan bahan mendapan dan bagi mengoksidakan bahan organik yang hadir dalam air sisa. Air yang bersih adalah hasil terakhir dan akan dilepaskan ke dalam jasad air semula jadi (Abdel-Raouf et al., 2012). Walaubagaimanapun, efluen sekunder ini sarat dengan nitrogen dan fosforus bukan organik dan mengakibatkan eutrofikasi dan banyak masalah jangka masa panjang (Abdel-Raouf et al., 2012).

Selama lebih separuh abad, kajian berkenaan pertumbuhan alga dalam air sisa telah dijalankan (Randrianarison & Ashraf, 2018). Mikroalga adalah calon yang sesuai bagi bioremediasi terhadap air sisa kerana kebolehnya untuk mengasimilasi bahan pencemar dan boleh digunakan sebagai nutrien pertumbuhan (Hariz et al., 2019). Antara kelebihan lain bioremediasi menggunakan alga adalah kos operasi yang rendah, berpotensi mengitar semula nitrogen dan fosforus yang diasimilasi ke dalam biojisim alga sebagai produk bioteknologi untuk mengelak masalah pengendalian enapcemar dan pelepasan efluen beroksigen dalam jasad air (Aslan & Kapdan, 2006). Tambahan pula, proses bagi penyingkiran nitrogen dan fosforus oleh alga boleh dijalankan tanpa penggunaan sumber karbon menyebabkan kaedah ini bersesuaian bagi rawatan efluen sekunder (Aslan & Kapdan, 2006).

Mikroalga terkenal sebagai bahan mentah yang berpotensi menghasilkan tenaga yang boleh diperbaharui berasaskan biojisimnya untuk menghasilkan bioetanol, biogas dan bioproduct dengan nilai tambah (Cheah et al., 2018). Pertumbuhan mikroalga menjadi suatu parameter penting bagi mencapai peningkatan penghasilan produk. Ini dapat menjimatkan kos penggunaan bahan kimia medium pertumbuhan sekiranya air sisa digunakan sebagai medium pengkulturan (Mohd et al., 2021).

Kebiasaan lengkung pertumbuhan mikrob menunjukkan bentuk sigmoid bersama empat fasa pertumbuhan (lag, log, pegun dan kematian). Mikroorganisma akan membuat penyesuaian terhadap keadaan persekitarannya ketika fasa lag. Melalui fasa log, bilangan sel dan kadar populasi meningkat disebabkan oleh pembahagian sel yang cepat. Fasa pegun adalah keadaan dimana pertumbuhan menjadi terhad kerana nutrien yang telah habis digunakan. Dalam fasa ini, kadar pertumbuhan dan kadar kematian adalah sama yang menyebabkan bilangan sel pegun. Akhir sekali, fasa kematian sel hasil dari tekanan

persekitaran iaitu kekurangan sumber nutrien bagi pertumbuhan sel (Ortiz-Moreno et al., 2020).

Kadar pertumbuhan spesifik adalah kadar pertumbuhan sel berdasarkan kecerunan semasa fasa eksponen (Stanbury, 2017). Tambahan pula, lengkung pertumbuhan mengandungi fasa akhir dimana kadar pertumbuhan menurun dan akhir sekali mencapai sifar, supaya asimptot (A) tercapai. Kebiasaannya perubahan kadar pertumbuhan ini menghasilkan lengkung sigmoid (Halmi et al., 2014). Kaedah yang sesuai bagi menerangkan keseluruhan set data adalah dengan model pertumbuhan regresi tidak linear untuk menganggarkan nilai μ_{max} , λ dan A dari model (Johari, 2014).

Bagi mengkaji dan menganalisis pertumbuhan mikroalga pada fisiologi yang berbeza, model matematik adalah kaedah yang sesuai dan penting (Ortiz-Moreno et al., 2020). Kepentingan model matematik dalam mengkaji pertumbuhan mikroalga adalah untuk meramal nilai pertumbuhan kinetik yang betul dan membantu dalam penentuan proses aliran. Prestasi kinetik pertumbuhan mikroalga yang baik adalah penting dalam membantu menilai kecekapan penuaian biojisim mikrolaga (Ni Aznan et al., 2022). Lengkung sigmoid boleh disuaikan dengan persamaan matematik yang berbeza antaranya model Logistik, Gompertz, Richards, Schnute, Baranyi-Roberts and Von Bertalanffy serta fasa-tiga Buchanan Huang (Halmi et al., 2014). Tiada kajian yang dijalankan untuk memahami model matematik yang terbaik bagi spesies mikroalga tempatan, *Characium* sp. UKM1, *Chlorella* sp. UKM2 dan *Coelastrella* sp. UKM4 dalam air larut resapan sintetik.

Kajian lepas telah menggunakan *Characium* sp. UKM1, *Chlorella* sp. UKM2 dan *Coelastrella* sp. UKM4 dalam fikoremediasi efluen kilang kelapa sawit dan pengasingan CO₂ (Ding et al., 2020; Minhat et al., 2016). Pentingnya kajian terhadap pertumbuhan mikroalga dalam menentukan prestasinya dalam persekitaran yang ekstrim dan kandungan bahan organik yang tinggi. Walaubagaimanapun, model matematik yang sesuai untuk menggambarkan penyesuaian lengkung mikroalga ini masih belum difahami. Oleh itu, kajian ini membandingkan model matematik bagi penyesuaian setiap data eksperimen menggunakan model logistik, logistik terubah suai dan Gompertz terubah suai. Ketiga-tiga model ini dipilih kerana sering digunakan dalam kajian kinetik khususnya untuk pertumbuhan mikroalga (Mohd, Yasin & Takriff, 2021).

Model logistik kerap digunakan dalam menggambarkan pertumbuhan populasi mikrob. Perubahan bilangan organisma akan digambarkan oleh model sebagai persamaan kadar pertumbuhan (μ), biojisim awal (X_0) dan kepekatan

biojisim maksimum (X_{max}) semasa pengkulturan (Phukoetphim et al., 2017). Model logistik terubah suai diperolehi dari perbezaan persamaan logistik klasik (Windarto et al., 2018). Manakala, model Gompertz terubah suai pula adalah model yang digunakan secara meluas dalam menganalisis graf pertumbuhan mikrob berbentuk sigmoid. Semasa fasa pegun, model akan memberi masa lag, kadar pertumbuhan spesifik maksimum (μ_{max}) dan biojisim maksimum (X_{max}) (Çelekli et al., 2008).

Model matematik yang terbaik telah digunakan secara meluas untuk meramal kinetik pertumbuhan termasuk masa lag (λ), nilai potensi kepekatan sel maksimum (X_{max}) dan kadar pertumbuhan spesifik maksimum (μ_{max}) untuk mengganggu aliran pertumbuhan sel. Berdasarkan model terbaik, nilai kinetik pertumbuhan yang betul boleh ditentukan. Sebaliknya, jika menggunakan model matematik yang salah akan menghasilkan ralat data dan justifikasi proses hiran. Oleh itu, dalam kajian ini, perbandingan antara model matematik yang berbeza akan dinilai. Data eksperimen *Characium* sp. UKM1, *Chlorella* sp. UKM2 dan *Coelastrella* sp. UKM4 yang dikulturkan dalam media air larut resapan sintetik akan digunakan bagi penyesuaian model yang berbeza iaitu model logistik (Fujikawa et al., 2003), model logistik terubah suai dan model Gompertz terubah suai (Halmi et al., 2014). Tambahan pula, penyesuaian pertumbuhan yang signifikan bagi mikroalga akan ditunjukkan melalui analisis statistik.

BAHAN DAN KAEDAH

Pengkulturan dan penentuan biojisim mikroalga

Tiga mikroalga tempatan iaitu *Characium* sp. UKM1 (NCBI: KJ143753), *Chlorella* sp. UKM2 (NCBI: KP262476) dan *Coelastrella* sp. UKM4 (NCBI: KP691597) dikultur dalam media air larut resapan sintetik. Setiap kultur diinokulasi dengan 10% (i/i) inokulum dalam isipadu akhir 1000 mL bersama air larut resapan sintetik. Air larut resapan sintetik disediakan seperti yang diterangkan oleh Yusof et al. (2010). Komponen air larut resapan sintetik seperti yang dinyatakan dalam Jadual 1. Pengkulturan dijalankan dalam botol Duran pada suhu 25°C dibawah pencahayaan yang berterusan bersama aliran udara 0.5 vvm (Ding et al., 2016).

Pertumbuhan mikroalga dinilai selama dua puluh hari sehingga mencapai fasa pegun merujuk kepada kajian lepas yang dijalankan oleh Ni Aznan et al. (2022). bersama penentuan jumlah biojisimnya. Biojisim diukur menggunakan kaedah berat kering seperti yang dijelaskan oleh Hariz et al. (2018).

Model matematik dan penilaian pertumbuhan kinetik

Tiga model matematik digunakan untuk membandingkan model pertumbuhan penyesuaian terbaik bagi tiga mikroalga tempatan. Model yang digunakan adalah model logistik, logistik terubah suai dan Gompertz terubah suai. Jadual 2 menunjukkan persamaan bagi

Jadual 1. Komponen-komponen media air larut resapan sintetik

Air sisa buatan terubah suai (Yusof et al., 2010)	Kepekatan, M
NaNO ₃	2.037 × 10 ⁻⁴
CaCl ₂	2.8767 × 10 ⁻⁷
MgSO ₄ ·7H ₂ O	6.5213 × 10 ⁻⁶
K ₂ HPO ₄	2.5471 × 10 ⁻⁶
NaHCO ₃	8.5036 × 10 ⁻⁵
MgCl ₂ ·6H ₂ O	1.5635 × 10 ⁻⁵
Unsur Surih	ZnSO ₄ ·7H ₂ O; 3.07 × 10 ⁻⁵ MnCl ₂ ·4H ₂ O; 7.28 × 10 ⁻⁶ MoO ₃ ; 4.93 × 10 ⁻⁶ CuSO ₄ ·5H ₂ O; 6.29 × 10 ⁻⁶ Co(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O; 1.68 × 10 ⁻⁶

Jadual 2. Persamaan model matematik yang digunakan dalam kajian ini

Bil.	Model	Persamaan [#]
(1)	Logistik	$y = \frac{A + C}{1 + \exp^{(-B(t-M))}}$
(2)	Logistik terubah suai	$y = \frac{A}{1 + \exp\left[-\frac{\mu_{\max}}{A}(\lambda - t) + z\right]}$
(3)	Gompertz terubah suai	$y = A \exp\left\{-\exp\left[-\frac{\mu_{\max}}{A}(\lambda - t) + 1\right]\right\}$

[#]Model Logistik: A mewakili asimptot pada X_t/X_0 bersama pengurangan berterusan t, sementara C adalah asimptot pada X_t/X_0 bersama kenaikan sekata t, B adalah kadar pertumbuhan mikroalga terhadap masa M (hari⁻¹), t menunjukkan masa (hari), M adalah titik tertinggi pertumbuhan lengkap (hari), Tambahan pula, X_1 merujuk pada kepekatan biojisim mikroalga terhadap masa t (gL⁻¹), sementara X_0 adalah kepekatan biojisim mikroalga pada awal eksperimen (gL⁻¹)

[#]Model logistik terubah suai dan Gompertz terubah suai: Pada fasa lag diwakili oleh λ , sementara μ_{\max} adalah kadar pertumbuhan spesifik maksimum (hari⁻¹) dan A mewakili asimptot maksimum $\ln X_t/X_0$ pada paksi-y.

setiap model berkenaan. Setiap persamaan telah disuaikan dalam MATLAB R2020a untuk perbandingan analisis statistik dan penyesuaian kadar pertumbuhan.

Bagi mencari model terbaik diantara tiga jenis model matematik berkenaan, beberapa parameter statistik digunakan. Dalam kajian ini, parameter statistik yang digunakan adalah pekali regresi (R^2), pekali regresi terubah suai (adj R^2), faktor bias (BF), punca ralat min kuasa dua (RMSE), ralat jumlah kuasa dua (SSE), peratus ralat piawai ramalan (% SEP) dan faktor kejituan (AF) mengikut persamaan matematik dan statistik yang dijelaskan dalam Jadual 3. Data ini dijana menggunakan perisian *Microsoft Excel Analysis ToolPak*.

HASIL DAN PERBINCANGAN

Penilaian lengkung pertumbuhan bagi UKM1, UKM2 dan UKM4

Rajah 1 menunjukkan lengkung pertumbuhan *Characium* sp. UKM1, *Chlorella* sp. UKM2 dan *Coelastrella* sp. UKM4 yang dikultur didalam air larut resapan sintetik selama 20 hari. Aliran biojisim mikroalga terhasil mengikut lengkung sigmoid bersama fasa lag. Kepekatan biojisim yang terhasil bagi *Characium* sp. UKM1, *Chlorella* sp. UKM2 dan *Coelastrella* sp. UKM4 pada hari ke-20 masing-masing adalah 0.25 gL⁻¹, 0.38 gL⁻¹ dan 0.36 gL⁻¹.

Data bagi pertumbuhan mikroalga seperti dalam Rajah 1 digunakan untuk penyesuaian tiga model matematik iaitu model logistik, logistik terubah suai dan Gompertz terubah suai. Lengkung penyesuaian tiga model matematik dijana menggunakan perisian MATLAB R2020a seperti yang digambarkan dalam Rajah 2, 3 dan 4.

Secara umum, semua lengkung suaian matematik menjelaskan bahawa semua model sesuai terhadap semua profil pertumbuhan mikroalga kerana lengkung pertumbuhan mikroalga yang berbentuk sigmoid. Ini menandakan ketiga-

tiga model sesuai dalam menentukan profil kinetik terhadap mikroalga. Model matematik telah digunakan secara meluas untuk meramal aliran pertumbuhan sel dengan menganggar kadar maksimum pertumbuhan spesifik, fasa lag dan kepekatan sel maksimum (Lam *et al.*, 2017).

Rajah 2, 3 dan 4, menunjukkan model logistik tidak mengikut aliran data eksperimen. Ini kerana taburan data eksperimen menjauhi lengkung model logistik berkenaan. Manakala model logistik terubah suai dan Gompertz terubah suai hampir mendekati data sebenar.

Justeru itu, kesesuaian model dengan data seterusnya disahkan dengan analisis plot residual seperti yang dinyatakan pada Rajah 5, 6 dan 7. Plot residual adalah perbezaan antara nilai ramalan dan eksperimen. Bagi menentukan lengkung suaian matematik yang tepat untuk data eksperimen, nilai ramalan yang dijana harus mendekati paksi-x dan taburan secara rawak tidak seharusnya terhasil. Ini kerana paksi-x mewakili model matematik yang digunakan. Sekiranya nilai taburan secara rawak menghasilkan jarak yang menjauhi paksi-x, ini menunjukkan bahawa model yang digunakan tidak bersesuaian dengan data eksperimen (Lam *et al.*, 2017).

Hasil analisis plot residual terbaik dapat dilihat pada Rajah 5c), 6c) dan 7c). Plot residual yang terbaik bagi *Characium* sp. UKM1, *Chlorella* sp. UKM2 dan *Coelastrella* sp. UKM4 adalah bersesuaian dengan model Gompertz terubah suai berikutan dengan titik taburan yang mendekati penempatan bar sigmoidal di sepanjang paksi-x. Ini menunjukkan model matematik lain tidak sesuai bagi penyesuaian data eksperimen berikutan dengan titik taburan yang menjauhi plot residual sepanjang paksi-x.

Analisis statistik

Analisis statistik dijalankan bagi meramal model yang terbaik bagi setiap spesies mikroalga berkenaan. Beberapa faktor dipertimbangkan

Jadual 3. Persamaan yang digunakan terhadap analisis statistik

Bil.	Persamaan [#]
(5)	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{i_{obs}} - y_{i_{calc}})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{i_{obs}} - \bar{y})^2}$
(6)	$Adjusted (R^2) = 1 - \frac{(1 - R^2)(n-1)}{(n-p-1)}$
(7)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (obs - pred)^2}{n}}$
(8)	$SSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_{ei} - Y_{ci})^2$
(9)	$B_f = 10^{\left(\frac{\sum \log(pred/obs)}{n}\right)},$
(10)	$A_f = 10^{\left(\frac{\sum \log(pred/obs) }{n}\right)},$
(11)	$\%SEP = \frac{100}{meanobs} \sqrt{\frac{\sum (obs - pred)^2}{n}},$

[#]pred adalah nilai ramalan yang dihasilkan oleh model dan obs adalah data dari eksperimen, bilangan data eksperimen diwakili sebagai n . Sebaliknya, nilai eksperimen adalah Y_{ei} dan Y_{ci} adalah nilai ramalan bagi Y_{ei} , n dan N mewakili bilangan data eksperimen.

seperti pekali regresi (R^2), pekali regresi terubah suai (adj R^2), ralat kuasa dua min (RMSE), ralat hasil tambah kuasa dua (SSE), faktor bias (BF), faktor kejutuan (AF) dan peratus ramalan ralat piawai (%SEP).

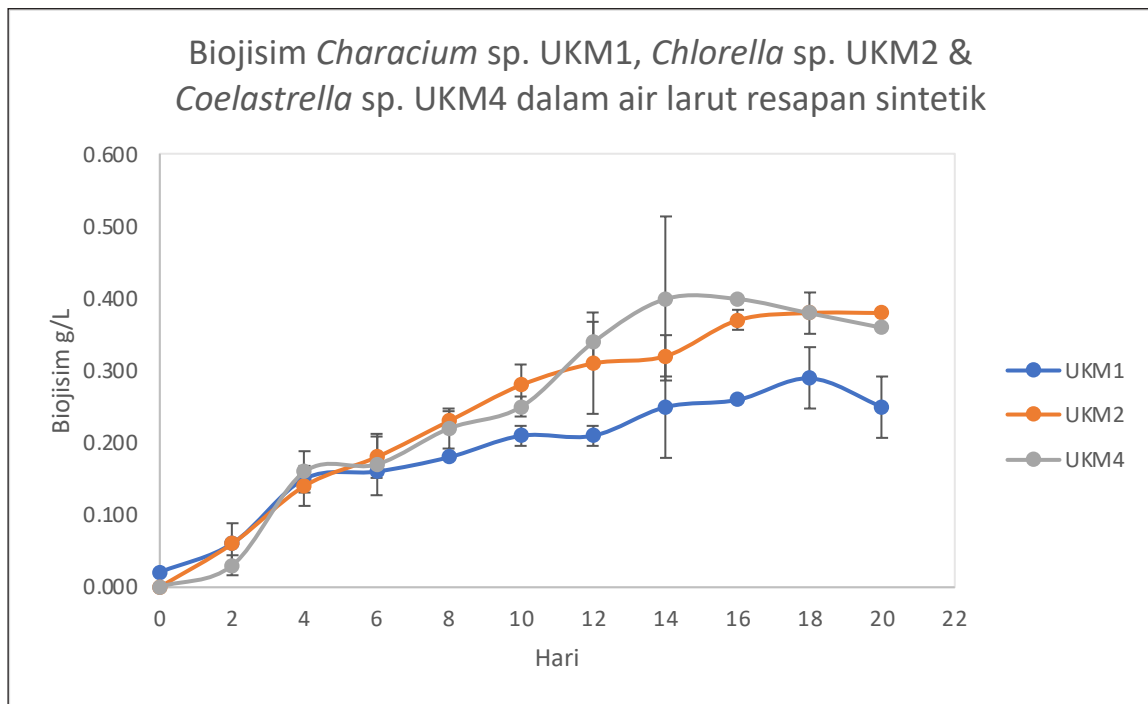
Menurut Lam *et al.* (2017), bagi setiap model, ketepatan dalam penyesuaian lengkung bagi data eksperimen dinilai oleh pekali regresi, R^2 . Pekali sentiasa digunakan sebagai petunjuk untuk mewakili ketepatan model dalam menyesuaikan data eksperimen. Pekali penentuan yang menghampiri nilai satu menunjukkan kejutuan model yang terbaik (Lam *et al.* 2017). Disamping itu, terdapat beberapa parameter yang telah digunakan dalam analisis statistik seperti yang dinyatakan dalam Jadual 4. Analisis statistik ini bertujuan sebagai justifikasi bagi penyesuaian model matematik yang terbaik.

Kejutuan bagi setiap model yang sesuai dengan data eksperimen adalah apabila nilai R^2 melebihi 0.95. *Characium* sp. UKM1 menunjukkan kejutuan

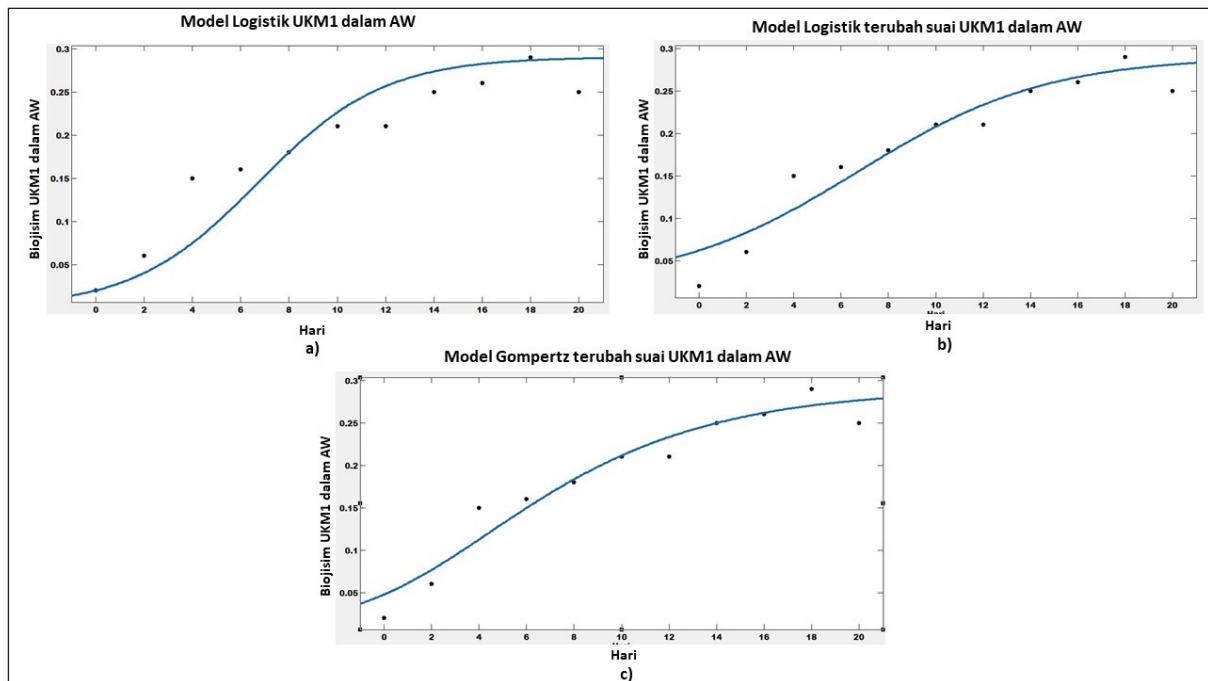
yang rendah terhadap kesemua model matematik yang digunakan seperti yang dinyatakan dalam Jadual 4. Nilai R^2 yang dihasilkan oleh ketiga-tiga model matematik terhadap *Characium* sp. UKM1 adalah kurang dari 0.95. Bagi *Chlorella* sp. UKM2 dan *Coelastrella* sp. UKM4, nilai tertinggi R^2 adalah yang dihasilkan oleh model Gompertz terubah suai dengan nilai 0.9893 dan 0.9532 masing-masing (Jadual 4).

Walaubagimapun, nilai R^2 kebiasaannya digunakan untuk regresi linear sahaja. Bagi regresi bukan linear, bilangan parameter yang dinyatakan dalam model akan berbeza dan analisis R^2 tidak memberikan analisis perbandingan yang jitu. Oleh itu, bagi penilaian kualiti terhadap model bukan linear, nilai R^2 terubah suai lebih sesuai digunakan (Johari, 2014).

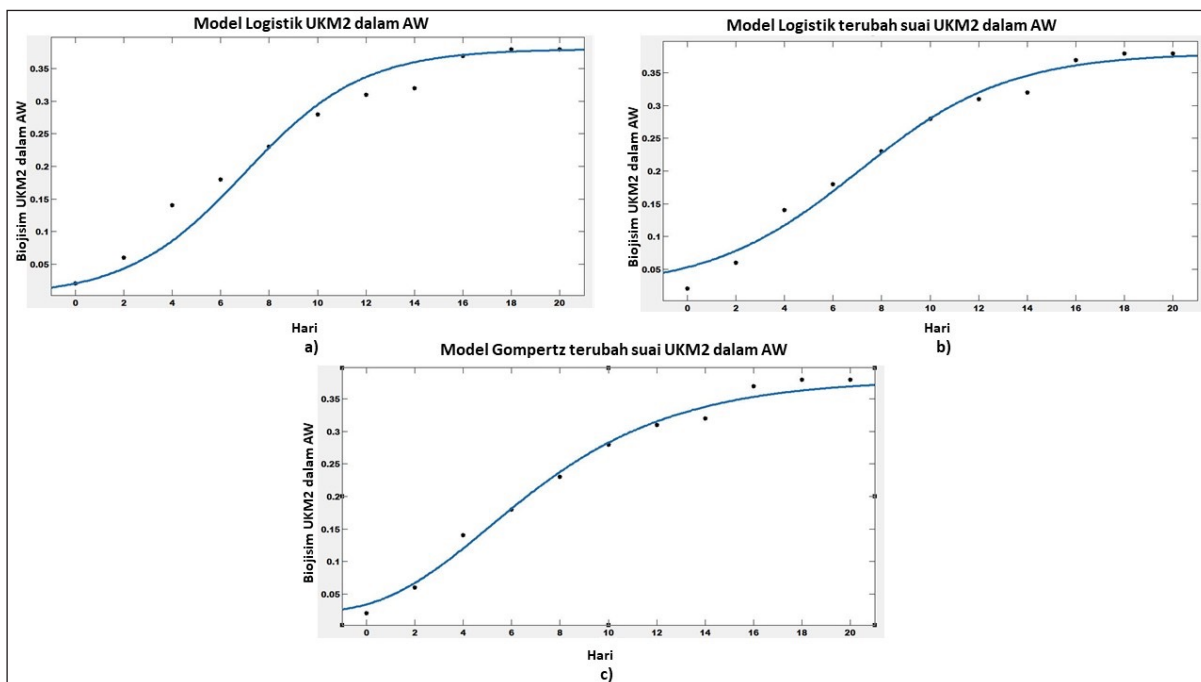
Bagi *Characium* sp. UKM1 dan *Coelastrella* sp. UKM4, nilai R^2 terubah suai tidak memuaskan. Ini kerana nilai yang terhasil kurang dari 95% dan menunjukkan kurang kejutuan dalam



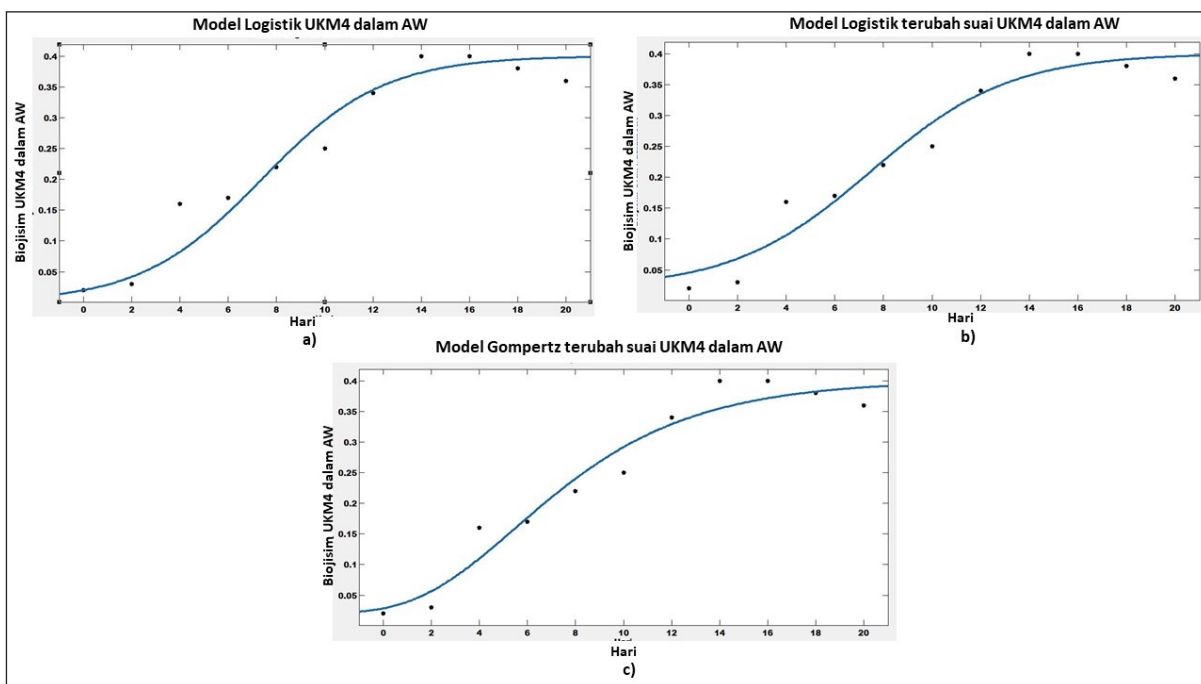
Rajah 1. Lengkuk pertumbuhan bagi *Characium* sp. UKM1, *Chlorella* sp. UKM2 dan *Coelastrella* sp. UKM4 yang dikultur dalam air larut resapan sintetik. Data tersebut menunjukkan min \pm sisihan piawai.



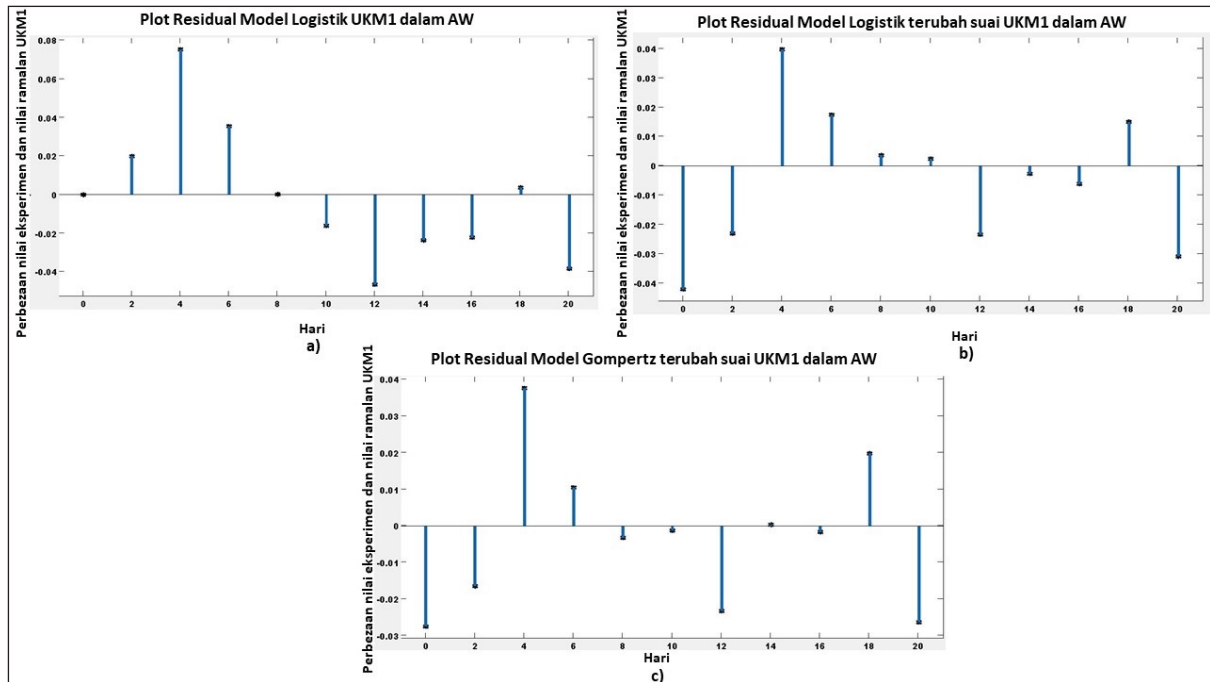
Rajah 2. Plot model matematik bagi *Characium* sp. UKM1. a) Model Logistik, b) Model Logistik terubah suai dan c) Model Gompertz terubah suai.



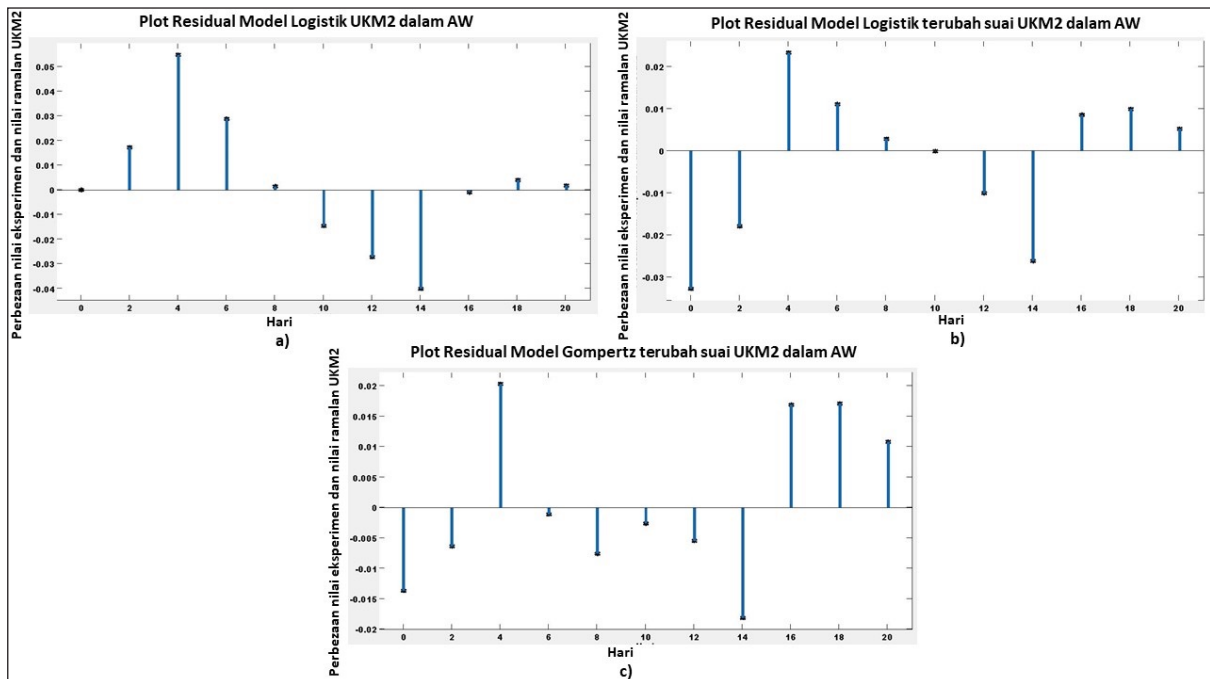
Rajah 3. Plot model matematik bagi *Chlorella* sp. UKM2 a) Model Logistik, b) Model Logistik terubah suai dan c) Model Gompertz terubah suai.



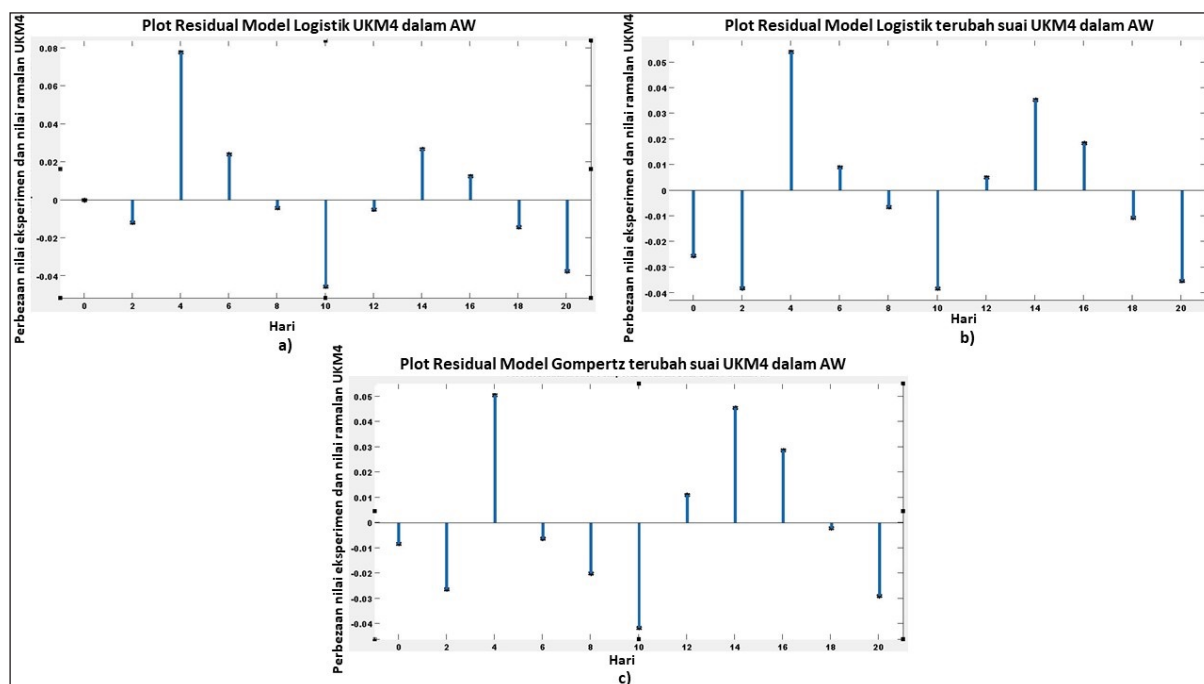
Rajah 4. Plot model matematik bagi *Coelastrella* sp. UKM4. a) Model Logistik, b) Model Logistik terubah suai dan c) Model Gompertz terubah suai.



Rajah 5. Plot residual model matematik *Characium* sp. UKM1. a) Model Logistik, b) Model Logistik terubah suai dan c) Model Gompertz terubah suai.



Rajah 6. Plot residual model matematik *Chlorella* sp. UKM2. a) Model Logistik, b) Model Logistik terubah suai dan c) Model Gompertz terubah suai.



Rajah 7. Plot residual model matematik *Coelastrella* sp. UKM4. a) Model Logistik, b) Model Logistik terubah suai dan c) Model Gompertz terubah suai.

Jadual 4. Analisis statistik bagi model matematik terhadap tiga spesies mikroalga tempatan

	λ	μ_{max}	R ²	adj R ²	SSE	RMSE	BF	AF	% SEP
<i>Characium</i> sp. UKM1									
Logistik		0.3866	0.8277	0.8277	0.01225	0.035	0.9321	1.0729	17.99
Logistik terubah suai	-1.218	0.017	0.9165	0.9072	0.00594	0.02568	1.1154	1.115	12.53
Gompertz terubah suai	-0.9187	0.01834	0.9411	0.9411	0.00419	0.02156	1.0869	1.0869	10.52
<i>Chlorella</i> sp. UKM2									
Logistik		0.4128	0.9591	0.9591	0.00668	0.02585	0.9321	1.0729	10.15
Logistik terubah suai	0.9384	0.0294	0.9815	0.9794	0.00303	0.01834	1.0969	1.0969	6.84
Gompertz terubah suai	0.7931	0.0303	0.9893	0.9881	0.00175	0.01395	1.043	1.043	5.2
<i>Coelastrella</i> sp. UKM4									
Logistik		0.3984	0.9429	0.9429	0.01135	0.03368	0.9775	1.023	12.94
Logistik terubah suai	1.802	0.0333	0.9518	0.9465	0.00958	0.03262	1.1271	1.1271	11.89
Gompertz terubah suai	1.399	0.0332	0.9532	0.948	0.0093	0.03215	1.0689	1.0689	11.72

ramalan pertumbuhan. Analisis R^2 terubah suai menunjukkan model Gompertz terubah suai memberi nilai kejituan yang tertinggi dalam ramalan pertumbuhan *Chlorella* sp. UKM2 dengan nilai 0.9881 (Jadual 4).

Seterusnya analisis bagi RMSE dan SSE, nilai yang paling rendah yang dihasil oleh RMSE dan SSE menunjukkan penyesuaian yang terbaik terhadap model tersebut (Abbaszadeh et al., 2011). Jadual 4 menunjukkan model Gompertz terubah suai yang terbaik bagi semua mikroalga berkenaan.

Kemudian, BF dikira untuk menilai perbezaan relatif antara nilai ramalan dan eksperimen. Padanan yang ideal antara data ramalan model matematik dan data eksperimen dapat dilihat apabila nilai BF adalah 1. Nilai BF 1 menunjukkan padanan yang terbaik antara data model dan eksperimen (López et al., 2004). Nilai BF yang tinggi dan rendah menunjukkan terlebih atau terkurang anggaran terhadap nilai eksperimen tersebut. Kajian ini mendapati bahawa ketiga-tiga model menghasilkan ramalan yang terbaik berdasarkan nilai BF. Padanan terbaik antara nilai ramalan dan eksperimen adalah apabila nilai BF sama dengan 1. Sekiranya nilai BF <1, model matematik yang dikaji dikira gagal tetapi masih boleh dipertimbangkan. Manakala jika nilai BF >1, model berkenaan dikira gagal dan nilai yang dihasilkan tidak jitu bagi model tersebut (Halmi et al., 2014). Nilai BF boleh diterima seandainya masih dalam julat 0.70–0.90 atau 1.06–1.15. Walaubagaimanapun, nilai BF tidak diterima seandainya nilai julat < 0.70 atau 1.15 > (Dong et al., 2007). Merujuk pada piawaian, tiada bias terhadap semua model dalam kajian ini. Kesemua nilai BF yang diperolehi dalam kajian ini adalah dalam julat yang baik

Nilai AF adalah perbezaan min antara data eksperimen dan ramalan. Kebiasaannya nilai AF adalah lebih atau sama dengan 1. Semakin tinggi nilai AF menunjukkan kecekapan yang tidak ketara terhadap data ramalan dan eksperimen (Halmi et al., 2014). Hasil nilai AF bagi kajian ini mendapati model matematik yang mendekati nilai 1 bagi *Characium* sp. UKM1 dan *Coelastrella* sp. UKM4 adalah model logistik dengan nilai 1.0729 dan 1.0230. Bagi *Chlorella* sp. UKM2 pula, model Gompertz terubah suai menghasilkan nilai AF yang menghampiri nilai 1 iaitu 1.0430.

Walaubagaimanapun, ralat paling rendah antara nilai ramalan dan eksperimen akan ditentukan dengan rendahnya nilai %SEP. Kajian ini mendapati nilai %SEP model Gompertz terubah suai menghasilkan residual paling rendah dengan perbezaan sebanyak 10.52% untuk *Characium* sp. UKM1, 5.20% untuk *Chlorella* sp. UKM2 dan 11.72% untuk *Coelastrella* sp. UKM4 antara nilai ramalan dan eksperimen.

Hasil analisis statistik mendapati bahawa model Gompertz terubah suai adalah model matematik yang ideal bagi *Characium* sp. UKM1, *Chlorella* sp. UKM2 dan *Coelastrella* sp. UKM4 dengan merujuk nilai %SEP yang paling rendah. Model Gompertz terubah suai menunjukkan nilai $\mu_{max} = 0.0184 \text{ hari}^{-1}$, 0.0303 hari^{-1} dan 0.0332 hari^{-1} masing-masing bagi *Characium* sp. UKM1, *Chlorella* sp. UKM2 dan *Coelastrella* sp. UKM4.

Semakin rendah nilai %SEP menunjukkan rendahnya ralat yang terhasil dalam model dari semua parameter analisis statistik. Demikian itu, model Gompertz terubah suai dipilih disebabkan oleh rendahnya nilai %SEP bagi kesemua mikroalga berbanding model logistik dan logistik terubah suai. Ini ditambah dengan nilai-nilai analisis RMSE, SSE dan BF yang menyokong model Gompertz terubah suai juga (Jadual 4). Nilai bagi RMSE bagi *Characium* sp. UKM1, *Chlorella* sp. UKM2 dan *Coelastrella* sp. UKM4 adalah masing-masing 0.02156, 0.01395 dan 0.03215. Seterusnya nilai SSE adalah 0.00419, 0.00175 dan 0.0093 masing-masing. Manakala, nilai BF adalah 1.0869, 1.043 dan 1.1271 masing-masing. Hasil analisis statistik ini menunjukkan nilai yang menyokong model Gompertz terubah suai sebagai model yang terbaik bagi penyesuaian pertumbuhan mikroalga.

KESIMPULAN

Tiga model matematik yang berbeza telah digunakan untuk menilai model pertumbuhan bagi *Characium* sp. UKM1, *Chlorella* sp. UKM2 dan *Coelastrella* sp. UKM4. Model matematik yang digunakan adalah model Logistik, Logistik terubah suai dan Gompertz terubah suai. Semua model sigmoid berkenaan boleh digunakan untuk penyesuaian lengkung pertumbuhan mikroalga yang jelas menunjukkan lengkung suaian yang bertepatan.

Walau bagaimanapun, berdasarkan hasil statistik yang dijalankan terhadap perbandingan tiga model berkenaan mendapati bahawa model Gompertz terubah suai menunjukkan model matematik yang terbaik berdasarkan nilai %SEP yang rendah. Ini menunjukkan bahawa model Gompertz terubah suai mempunyai ralat yang rendah berbanding model yang lain. Selain itu, analisis RMSE, SSE dan BF menunjukkan nilai yang menyokong model Gompertz terubah suai. Oleh itu, model Gompertz terubah suai adalah model terbaik untuk penyesuaian pertumbuhan mikroalga yang dikulturkan dalam air larut resapan sintetik untuk kajian kinetik lanjutan.

PENGHARGAAN

Kajian ini disokong oleh Skim Geran Penyelidikan Fundamental (FRGS/1/2018/TK10/UKM/02/6) dan Geran Ganjaran Penerbitan (GP-2021-K022077).

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis mengisytiharkan tiada konflik kepentingan

RUJUKAN

- Abbaszadeh, A., Motevali, A., Khoshtaghaza, M.H. & Kazemi, M. 2011. Evaluation of thin-layer drying models and neural network for describing drying kinetics of *Lasagnas angustifolia* L. International Food Research Journal, 18(4): 1321–1328.
- Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A.A. & Ibraheem, I.B.M. 2012. Microalgae and wastewater treatment. Saudi Journal of Biological Sciences, 19(3): 257–275. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.04.005>
- Aslan, S. & Kapdan, I.K. 2006. Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae. Ecological Engineering, 28(1): 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.04.003>
- Çelekli, A., Balci, M. & Bozkurt, H. 2008. Modelling of *Scenedesmus obliquus*; function of nutrients with modified Gompertz model. Bioresource Technology, 99(18): 8742–8747. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.04.028>
- Cheah, W.Y., Show, P.L., Juan, J.C., Chang, J.S. & Ling, T.C. 2018. Microalgae cultivation in palm oil mill effluent (POME) for lipid production and pollutants removal. Energy Conversion and Management, 174(6):430–438. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.057>
- Ding, G.T., Mohd Yasin, N.H., Takriff, M.S., Kamarudin, K.F., Salihon, J., Yaakob, Z. & Mohd Hakimi, N.I.N. 2020. Phycoremediation of palm oil mill effluent (POME) and CO₂ fixation by locally isolated microalgae: *Chlorella sorokiniana* UKM2, *Coelastrella* sp. UKM4 and *Chlorella pyrenoidosa* UKM7. Journal of Water Process Engineering, 35: 101202. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101202>
- Ding, G.T., Yaakob, Z., Takriff, M.S., Salihon, J. & Abd Rahaman, M.S. 2016. Biomass production and nutrients removal by a newly-isolated microalgal strain *Chlamydomonas* sp. in palm oil mill effluent (POME). International Journal of Hydrogen Energy, 41(8): 4888–4895. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.010>
- Dong, Q., Tu, K., Guo, L., Li, H. & Zhao, Y. 2007. Response surface model for prediction of growth parameters from spores of *Clostridium sporogenes* under different experimental conditions. Food Microbiology, 24(6): 624–632. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2006.12.003>
- Fujikawa, H., Kai, A. & Morozumi, S. 2003. A new logistic model for bacterial growth. Journal of the Food Hygienic Society of Japan, 44(3): 155–160. <https://doi.org/10.3358/shokueishi.44.155>
- Halmi, M.I.E., Shukor, Johari, W.L.W. & Shukor, M.Y. 2014. Modeling the Growth Kinetics of *Chlorella vulgaris* Cultivated in Microfluidic Devices. Asian Journal of Plant Biology, 2(1): 7–10. <https://doi.org/10.54987/ajpb.v2i1.82>
- Halmi, M.I.E., Shukor, M.S., & Shukor, M.Y.A. 2014. Evaluation of several mathematical models for fitting the growth and kinetics of the Catechol-degrading *Candida parapsilopsis*: Part 1. Journal of Environmental Bioremediation and Toxicology, 2(2): 48–52. <https://doi.org/10.54987/jebat.v2i2.217>
- Hariz, H.B., Takriff, M.S., Ba-Abbad, M.M., Mohd Yasin, N.H. & Mohd Hakim, N.I.N. 2018. CO₂ fixation capability of *Chlorella* sp. and its use in treating agricultural wastewater. Journal of Applied Phycology, 30(6): 3017–3027. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1488-0>
- Hariz, H.B., Takriff, M.S., Mohd Yasin, N.H., Ba-Abbad, M.M. & Mohd Hakimi, N.I.N. 2019. Potential of the microalgae-based integrated wastewater treatment and CO₂ fixation system to treat Palm Oil Mill Effluent (POME) by indigenous microalgae; *Scenedesmus* sp. and *Chlorella* sp. Journal of Water Process Engineering, 32: 100907. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100907>
- Johari, M.S. 2014. Evaluation of several mathematical models for fitting the growth of the algae *Dunaliella tertiolecta*. Asian, 2(1): 1–6. <https://doi.org/10.54987/ajpb.v2i1.81>
- Lam, M.K., Yusoff, M.I., Uemura, Y., Lim, J.W., Khoo, C.G., Lee, K.T. & Ong, H.C. 2017. Cultivation of *Chlorella vulgaris* using nutrients source from domestic wastewater for biodiesel production: Growth condition and kinetic studies. Renewable Energy, 103: 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.032>
- López, S., Prieto, M., Dijkstra, J., Dhanoa, M.S. & France, J. 2004. Statistical evaluation of mathematical models for microbial growth. International Journal of Food Microbiology, 96(3): 289–300. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.03.026>
- Minhat, Z.B.T., Ab Rahaman, M.S.B., Takriff, M.S. & Kofli, N.T. 2016. Differentiation of biomass composition between isolated and commercial strains of microalgae. Journal of Engineering Science and Technology, 11(5): 737–744.
- Mohd, N., Yasin, N.H.M. & Takriff, M.S. 2021. Predictive growth model of indigenous green microalgae (*Scenedesmus* sp. UKM9) in palm oil mill effluent (POME). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1051(1):012070. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1051/012070>

- Ni Aznan, M. F., Mohd Yasin, N. H., Mohd, N., & Takriff, M. S. 2022. Growth kinetics determination using different mathematical models for microalgae *Characium* sp. UKM1, *Chlorella* sp. UKM2 and *Coelastrella* sp. UKM4. *ASM Science Journal*, 17:1-12. <https://doi.org/10.32802/asmscj.2022.930>
- Ortiz-Moreno, M.L., Cárdenas-Poblador, J., Agredo, J. & Solarte-Murillo, L.V. 2020. Modeling the effects of light wavelength on the growth of *Nostoc ellipsosporum*. *Universitas Scientiarum*, 25(1):113–148. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.SC25-1.mte>
- Phukoetphim, N., Salakkam, A., Laopaiboon, P. & Laopaiboon, L. 2017. Kinetic models for batch ethanol production from sweet sorghum juice under normal and high gravity fermentations: Logistic and modified Gompertz models. *Journal of Biotechnology*, 243: 69–75. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2016.12.012>
- Randrianarison, G. & Ashraf, M.A. 2018. Microalgae Plant (*Chlorella* sp.) for Wastewater Treatment and Energy Production. *Ekoloji*, 27(106): 1455–1465.
- Stanbury, P.F., Whitaker, A., Hall, S.J. 2017. Chapter 2 - Microbial growth kinetics. In: *Principles of Fermentation Technology*. 3rd Ed. P.F. Stanbury, A. Whitaker, S.J. Hall, (Eds). Elsevier Ltd, Butterworth-Heinemann. pp. 21-74. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099953-1.00002-8>
- Windarto, W., Eridani, E. & Purwati, U.D. 2018. A new modified logistic growth model for empirical use. *Communication in Biomathematical Sciences*, 1(2): 122. <https://doi.org/10.5614/cbms.2018.1.2.5>
- Yusof, N., Hassan, M.A., Phang, L.Y., Tabatabaei, M., Othman, M.R., Mori, M., Wakisaka, M., Sakai, K., & Shirai, Y. 2010. Nitrification of ammonium-rich sanitary landfill leachate. *Waste Management*, 30(1): 100–109. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.08.018>