

Penguraian Sisa Pepejal dengan menggunakan Kulat *Aspergillus fumigatus* Terpegun

(Decomposition of Solid Waste using Immobilised Fungi *Aspergillus fumigatus*)

YAVINASH MURALEE THARAN¹, AHMAD RAZI OTHMAN¹, NUR NADHIRAH RAMLI^{1*}, SITI ROZAIMAH
SHEIKH ABDULLAH¹, HASSIMI ABU HASAN^{1,2} & NUR 'IZZATI ISMAIL¹

¹Jabatan Kejuruteraan Kimia dan Proses, Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia,
43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

²Research Centre for Sustainable Process Technology (CESPRO), Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti
Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

Diserahkan: 30 September 2024/Diterima: 29 Julai 2025

ABSTRAK

Sisa enap cemar kumbahan bandaran yang dihasilkan di kawasan persekitaran menjadi isu yang penting kerana pengumpulannya dan sukar untuk terurai, sekali gus menjejaskan ekosistem. Mikroorganisma, terutamanya kulat, mampu melaksanakan aktiviti metabolik secara cekap dan berkesan dalam pelbagai keadaan berikutan tindak balas enzim. *Aspergillus fumigatus* ialah kulat yang mempunyai keupayaan yang kuat untuk menghasilkan enzim secara ekstrasel. Oleh itu, objektif kajian ini adalah untuk mengkultur dan mengkaji morfologi kulat *A. fumigatus*, menentukan kadar penguraian sisa pepejal oleh kulat terpegun *A. fumigatus* dan menentukan kadar pertumbuhan kulat terpegun *A. fumigatus*. Dalam kajian ini, *A. fumigatus* mengalami proses pemegunan untuk mengurai enap cemar kumbahan dengan lebih cekap dan berkesan. Teknik pengkapsulan digunakan dengan menggunakan bekas Polivinil Klorida (PVC) untuk memerangkap kulat *A. fumigatus* dan dieramkan selama 30 hari. Pemencilan *A. fumigatus* dilakukan menggunakan media agar Czapek-Dox (CDA) dan kaldu dekstroza kentang (PDB) serta dikulturkan selama 2 minggu. Dalam kajian ini, analisis jumlah pepejal terampai (TSS) menunjukkan peratus penurunan sebanyak 13.07% untuk kawalan dan 24.02% untuk rawatan selama 4 minggu. Selain itu, kadar pertumbuhan kulat *A. fumigatus* adalah sebanyak 0.0033 μ /hari selama 4 minggu. Bagi morfologi kulat pula, perkembangan koloni pada CDA ditunjukkan oleh pertumbuhan padat, berfilamen serta berwarna kelabu dan kehijauan. Berdasarkan keputusan mikroskop elektron pengimbas (SEM), tiada kehadiran kulat *A. fumigatus* dalam kedua-dua air sisa awal dan akhir. Kajian ini menyokong kaedah rawatan biologi sebagai pendekatan praktikal dan alternatif untuk rawatan enap cemar kumbahan. Pemegunan kulat menggunakan PVC adalah penting untuk rawatan ini kerana ia mudah bertindak balas dengan kumpulan berfungsi semasa pengkapsulan, murah dan tidak toksik. Mekanisme dalam mempercepatkan penguraian rawatan dan menilai keberkesanannya terhadap pelbagai jenis sisa yang lain perlu dikaji pada masa hadapan.

Kata kunci: *Aspergillus fumigatus*; kulat; pemegunan; penguraian; sisa pepejal bandaran

ABSTRACT

Municipal sewage sludge generated in the environment has become an issue due to its abundance in surrounding area and difficulty in decomposing it, adversely impacting the ecosystem. Microorganisms, particularly fungi, is able to accomplish metabolic activities efficiently and precisely under a variety of environmental circumstances, owing to enzymatic responses. *Aspergillus fumigatus* is a fungus with a strong ability to produce extracellular enzymes. Thus, objective of this study was to culture and examine the morphology of *A. fumigatus*, assess the solid waste degradation rate using immobilized *A. fumigatus* and determine the growth rate of immobilized *A. fumigatus*. In this study, the fungus undergo immobilization to enhance the efficient and effective degradation of sewage sludge. The encapsulation technique using custom-made Polyvinyl Chloride (PVC) to trap *A. fumigatus* and incubated for 30 days. The isolation of *A. fumigatus* was carried out using Czapek-Dox Agar (CDA) and Potato Dextrose Broth (PDB) media and cultured for 2 weeks. The total suspended solids (TSS) analysis showed a reduction of 13.07% for the control and 24.02% for the treatment over 4 weeks. Additionally, the growth rate of *A. fumigatus* was 0.0033 μ /day during the same period. Morphologically, dense, filamentous colonies with gray and green hues were observed on CDA. Based on SEM (scanning electron microscopy) results, there is no presence of *A. fumigatus* fungus in both initial and final wastewater. This study supports the practical and alternative approach of this biological treatment method for wastewater management. The immobilisation of fungi with PVC is essential for this approach because it quickly interacts with functional groups during encapsulation and is a low-cost, non-toxic substance

that is efficient in biological treatment. Moving forward, researchers should examine mechanisms by which this treatment promotes decomposition and assess its efficacy on different waste form.

Keywords: *Aspergillus fumigatus*; degradation; fungi; immobilization; municipal sewage sludge

PENDAHULUAN

Sisa kumbahan bandaran yang terdiri daripada kumbahan sanitari dan sisa cecair industri (Iftikhar et al. 2023) dari institusi dan komersial sektor kediaman yang dihasilkan setiap hari telah memberi kesan kepada alam sekitar, seterusnya mendatangkan cabaran kepada pihak berkuasa alam sekitar dalam menangani isu ini (Li, Zhou & Wang 2017). Hal ini kerana data statistik menunjukkan bahawa 80% air sisa industri dan kumbahan yang dihasilkan di seluruh dunia tidak dirawat telah dilepaskan ke persekitaran, menyebabkan pemanasan global dan menyumbang kepada pelepasan gas rumah hijau (Kuok et al. 2022). Menurut laporan Jabatan Perangkaan Malaysia (2022), sebanyak 3,114,758 tan metrik sisa pepejal telah dihasilkan, merangkumi sisa domestik dan industri. Oleh itu, pengurusan pelupusan sisa yang betul adalah penting untuk mengurangkan jumlah sisa yang dihasilkan (Ahmad et al. 2024; Yusof & Saad 2022).

Rawatan bahan buangan boleh dikelaskan kepada tiga jenis iaitu fizikal, kimia dan biologi (Kamaruzzaman et al. 2018). Rawatan fizikal merujuk kepada pemisahan bahan tidak berbahaya daripada bahan berbahaya oleh proses fizikal. Antara jenis rawatan fizikal ialah pemisahan cecair-pepejal seperti pengempuran, penjernihan, penggumpalan dan penurasan (Gautam et al. 2012). Seterusnya, rawatan kimia merujuk kepada pengurangan sifat berbahaya sisa dengan menggunakan beberapa bahan kimia seperti asid, bes dan oksida. Antara kaedah yang digunakan dalam rawatan kimia ialah penyerapan, pengoksidaan kimia, pemendakan kimia dan peneutralan (Yadav & Ahmaruzzaman 2023). Walaupun kaedah fizikal dan kimia sering digunakan untuk rawatan air sisa kerana boleh mencapai kadar penyingkiran yang tinggi, namun terdapat beberapa had untuk aplikasi praktikalnya. Kelemahan yang dikaitkan dengan kaedah konvensional ini termasuklah penyingkiran lengkap bahan pencemar, penggunaan masa yang banyak, penjanaan enap cemar dan keperluan tenaga yang tinggi. Oleh itu, penyelesaian alternatif yang mudah dan kos efektif perlu dicari untuk menangani masalah ini seperti rawatan yang berteraskan biologi.

Rawatan biologi adalah rawatan yang kerap digunakan dalam industri kimia untuk merawat air sisa efluen yang mempunyai bahan pencemar organik. Antara proses rawatan biologi ialah sistem aerobik, sistem anaerobik dan enap cemar diaktifkan (Singh & Yadav 2022). Sisa organik boleh dicerna dengan menggunakan enzim atau mikroorganisma tertentu seperti kulat yang mempunyai keupayaan yang tinggi untuk mengurai sisa

pepejal (Sayeda et al. 2024). Beberapa penyelidikan mencadangkan bahawa pemencilan kulat sangat berkesan kerana ia menunjukkan keupayaan tinggi dalam keadaan persekitaran yang negatif dengan merembeskan pelbagai jenis enzim selulase sepanjang proses ekstrasel dan pembebasan enzim serta pengeluaran enzim sekunder yang banyak penting untuk pecahan polisakarida (Syifaa et al. 2023). Beberapa kajian telah dijalankan untuk menghasilkan enzim selulase dalam proses penguraian sisa organik oleh beberapa jenis kulat seperti *Trichoderma* sp., *Penicillium* sp. dan *Aspergillus* sp. (Nathan et al. 2014). Terdapat banyak kulat yang mampu merendahkan selulosa dengan mensintesis sejumlah selulase yang banyak dan lebih cekap dalam menyahpolimerkan substrat selulosa. Organisma selulolisis yang paling banyak dikaji termasuk spesies kulat ialah *Trichoderma* sp., *Humicola* sp., *Penicillium* sp. dan *Aspergillus* sp. (Gautam et al. 2012).

Salah satu kaedah alternatif yang boleh digunakan untuk penguraian sisa pepejal adalah dengan menggunakan kulat terpegun yang merupakan kaedah alternatif terbaik untuk menyelesaikan isu ini. Oleh kerana ia adalah kaedah biologi, ia dianggap berkos rendah dan mesra alam berbanding dengan kaedah fizikal atau kimia (Abdel-Shafy & Mansour 2018). Kulat terpegun dengan polivil klorida (PVC) amat sesuai sebagai bahan bagi enzim mikroorganisma kerana sifatnya yang tahan hakisan, stabil dan mudah diperolehi (Pundir, Chauhan & Bhambi 2008). Kulat terpegun dengan PVC juga dapat meningkatkan kecekapan dan kestabilan dalam proses rawatan kerana pemegungan membantu membentuk daya tahan tinggi pada sel kulat. Ini membolehkan kulat bertahan lebih lama dalam persekitaran tertentu dan berfungsi dengan baik, malah boleh digunakan berulang kali dalam bioremediasi berbanding kaedah rawatan lain (Armanu et al. 2025). Selain itu, sifat bahan sisa pepejal dan pelbagai faktor berkaitan mempengaruhi kepelbagaian kulat serta tindakan mereka. Strain kulat bertindak sebagai agen dan secara aktif mengambil bahagian dalam proses kesuburan tanah, mampu mengurangkan kesan negatif dan menguraikan bahan kompleks. Ini menunjukkan bahawa kulat boleh digunakan untuk mengurangkan selulase daripada sisa organik (Jain et al. 2017). Namun, kajian mengenai penggunaan *A. fumigatus* terpegun dengan PVC sebagai matriks dalam rawatan bioremediasi masih belum dijalankan. Oleh itu, kajian ini dijalankan bertujuan untuk mengkultur dan mengkaji morfologi kulat terpegun *A. fumigatus* dan menentukan kadar penguraian sisa pepejal dan kadar pertumbuhan kulat tersebut dalam rawatan biologi.

KAEDAH

PENGKULTURAN KULAT *A. fumigatus* KE ATAS CDA

Sebanyak 24.5 g serbuk CDA dibancuh dalam 500 mL air suling dan dipanaskan untuk melarutkan medium. Selepas itu, kelalang kon ditutup dengan kerajang aluminium dan disteril menggunakan autoklaf (TOMY SX-700, Jepun) pada suhu 121 °C selama 20 minit. Selepas diautoklaf, media dituang ke dalam piring petri dan disimpan di dalam peti sejuk selepas mengeras (Jabari, Yuan & Oleszkiewicz 2018). Kabinet aliran laminar disemur dengan alkohol 75% dan segala peralatan disterilkan untuk mengurangkan kontaminasi semasa proses pengkulturan. Seterusnya, kulat diambil menggunakan penyepit lalu diletakkan pada piring petri yang mempunyai agar. Prosedur ini diulang untuk 4 piring petri yang lain. Selepas itu, agar tersebut dieram pada suhu bilik selama 1 minggu.

PRA KULTUR KULAT *A. fumigatus* DALAM PDB

Sebanyak 6 g dan 120 g kaldu dekstrosa kentang ditimbang dan dicampurkan masing-masing dengan 250 mL dan 5 L air suling. Selepas itu, campuran tersebut dipanaskan untuk melarutkan medium. Seterusnya, pH awal medium ditentukan dengan menggunakan meter pH dan dilaraskan pada 5.6. Selepas itu, medium tersebut dituang dalam botol Duran 500 mL dan 5 L untuk diautoklaf selama 20 minit pada suhu 121 °C (Ikram et al. 2022). Kabinet aliran laminar disemur dengan alkohol 75% dan segala peralatan disterilkan untuk mengurangkan kontaminasi semasa proses pengkulturan. Kulat diambil menggunakan penyepit lalu diletakkan ke dalam media PDB. Seterusnya, kulat dieramkan selama 5 hari dengan kaedah pengudaraan menggunakan pam udara untuk mengalirkan oksigen ke dalam kultur cecair dalam bilik suhu malar pada 37 °C mengikut protokol Ashton dan Dyer (2019). Selepas itu, larutan kulat yang dikulturkan dipindahkan ke dalam botol Duran 5 L. Kulat tersebut dieramkan selama 2 minggu dengan kaedah pengudaraan pada suhu 37 °C (Ashton & Dyer 2019).

PEMEGUNAN KULAT *A. fumigatus*

Selepas 1 minggu, biojisim kulat diasingkan daripada 5 L larutan kulat dengan menggunakan corong penapis. Setelah diasingkan, biojisim kulat diletakkan dan dipegunkan dalam PVC (Sigma-Aldrich) mengikut kaedah Marycz, Brillowska-Dabrowska dan Gebicki (2020) yang telah diubah suai. Penggunaan bekas PVC untuk proses pemegungan biojisim kulat adalah kaedah pemegungan fizikal yang dikenali sebagai kaedah pengkapsulan untuk menghalang pergerakan biojisim kulat. Selepas kulat dipegunkan dengan bekas PVC, bekas direndam dalam bikar yang diisi dengan 1 L sampel sisa enap cemar dan dieramkan selama 30 hari dengan menggunakan kaedah pengudaraan menggunakan pam udara untuk mengalirkan oksigen dalam larutan pada suhu 37 °C. Setiap rawatan

diulang sebanyak tiga kali bersama kawalan (tanpa pemegungan kulat *A. fumigatus*) bagi memastikan hasil yang signifikan.

PROSEDUR JUMLAH PEPEJAL TERAMPAI (TSS)

Sebelum memulakan uji kaji, jisim kertas turas dan jisim awal pepejal terampai dalam enap cemar kumbahan ditimbang terlebih dahulu, yang mana 50 mL enap cemar awal ditapis dengan menggunakan corong penapis dan dikeringkan dalam ketuhar pada suhu 50 °C selama 1-2 hari (Ismail, Khulbe & Matsuura 2019). Proses ini diulangi untuk pengiraan setiap minggu (sebanyak 4 kali) selama 30 hari pemeraman untuk memperoleh jisim akhir pepejal terampai dalam enap cemar kumbahan. Pengiraan TSS dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Wiyantoko et al. 2020):

$$TSS \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(A - B)}{V}$$

dengan A ialah jisim kertas turas + sisa kering (mg); B ialah jisim kertas turas (mg); dan V ialah isi padu sampel (L).

ANALISIS MIKROSKOP ELEKTRON PENGIMBAS (SEM)

Kehadiran kulat *A. fumigatus* dalam enap cemar selepas pemeraman selama 30 hari ditentukan menggunakan mikroskop elektron pengimbas (SEM) (Supra 55VP Zeiss, Jerman). Sebanyak 100 mL enap cemar kumbahan ditapis menggunakan corong penapis untuk memisahkan zarah pepejal dan kemudian diletakkan dalam tiub emparan 50 mL yang diisi dengan larutan penetap iaitu larutan Karnovsky yang terdiri daripada 5 mL (2.5% glutaraldehid), 15 mL paraformaldehid dan 20 mL (0.05 M penimbal natrium kakodilat, pH 7.2) disimpan dalam peti sejuk selama 24 jam. Selepas 24 jam, sampel dicuci dengan penimbal kakodilat selama 10 minit sebanyak tiga kali. Kemudian, sampel direndam dalam larutan penetap kedua iaitu larutan osmium tetroksida (Ural 2021). Larutan ini dibancuh dengan menggunakan 40 g osmium tetroksida dan 800 mL air suling. Sampel direndam dalam larutan pada suhu bilik selama 1-4 jam. Selepas itu, sampel dicuci dengan air suling sebanyak tiga kali. Seterusnya, sampel dinyahhidratkan menggunakan siri larutan aseton dengan kepekatan yang berbeza pada 25, 50, 75, 90 dan 100% selama 10 minit. Selepas itu, sampel diletakkan dalam pengering titik kritikal untuk proses pengeringan dengan menggunakan karbon dioksida sebagai bendalir peralihan. Selepas pengeringan, sampel diletakkan pada puntung aluminium, dilapisi dengan emas dan diperhatikan menggunakan SEM. Imej yang dihasilkan akan menentukan kehadiran kulat *A. fumigatus* di dalam sampel (Alves et al. 2013).

BIOJISIM KULAT *A. fumigatus*

Selepas pengkulturan kulat *A. fumigatus*, biojisim kulat ditapis dan diasingkan daripada 1 L larutan kulat dalam

kelalang volumetrik menggunakan corong penapis. Proses ini diulangi untuk 4 kelalang volumetrik yang lain. Selepas 30 hari pengeraman, biojisim kulat dikeluarkan dari kanister PVC melalui penapisan untuk memisahkan kulat dan air sisa. Biojisim awal dan akhir dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Kalyani et al. 2023):

$$\text{Berat biojisim (g)} = \frac{(M_x - M_y)}{V}$$

dengan M_x ialah berat kertas turas + biojisim (g); M_y ialah berat kertas turas (g); dan V ialah isi padu sampel (L).

Kadar pertumbuhan kulat *A. fumigatus* ditentukan berdasarkan Soni, Sudhakar dan Rana (2017):

$$\mu = \frac{(\ln x_2 - \ln x_1)}{t_2 - t_1}$$

dengan x_2 ialah kepekatan biojisim pada selang masa, t_2 (g/L); x_1 ialah kepekatan biojisim pada selang masa, t_1 (g/L); t_2 ialah selang masa kedua (hari) dan t_1 ialah selang masa pertama (hari).

HASIL DAN PERBINCANGAN

MORFOLOGI KULAT *A. fumigatus*

Dalam kajian ini, CDA telah digunakan untuk memeriksa dan mengkaji morfologi *A. fumigatus*. Hasil kajian menunjukkan bahawa CDA merupakan medium yang baik untuk pertumbuhan spora *A. fumigatus*. Pemerhatian awal (Jadual 1) dalam 2 hari pertama menunjukkan bahawa tapak inokulasi mempunyai miselium putih yang lembut. Koloni mula mengembang dan menunjukkan warna hijau halus pada hari keempat yang menandakan tanda awal pensporaan. Pada hari ketujuh, pertumbuhan koloni sepenuhnya diperhatikan dan mempunyai struktur yang tebal, berfilamen dan campuran warna kelabu dan hijau. Selain itu, koloni menunjukkan corak yang jelas dan tekstur yang kasar. Kedua-dua ciri pertumbuhan ini menandakan tanda perkembangan kulat yang kuat dan sihat.

A. fumigatus dalam kajian Al-abedi (2021) menunjukkan ciri khas kulat iaitu koloni baldi dan variasi warna dari hijau gelap hingga putih. Imej daripada kajian tersebut kelihatan berada pada tahap pertumbuhan yang lebih awal atau lebih seragam yang menunjukkan corak sepusat yang jelas manakala imej daripada kajian ini menunjukkan ciri morfologi yang lebih kompleks yang mungkin disebabkan oleh perbezaan keadaan persekitaran atau tempoh pertumbuhan yang lebih panjang. Kawasan putih di tengah imej daripada kajian ini menunjukkan titik permulaan perkembangan miselium yang kurang jelas pada imej berbanding kajian Al-abedi (2021). Secara keseluruhan, analisis morfologi ini menunjukkan kemampuan organisma untuk tumbuh dan menghasilkan

spora. Keputusan ini menunjukkan bahawa CDA boleh menyokong pertumbuhan *A. fumigatus* sepanjang kitaran hayatnya daripada perkembangan vegetatif hingga pensporaan.

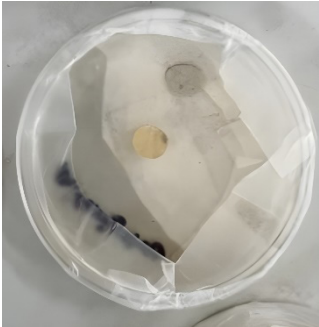
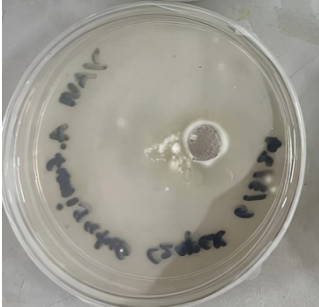
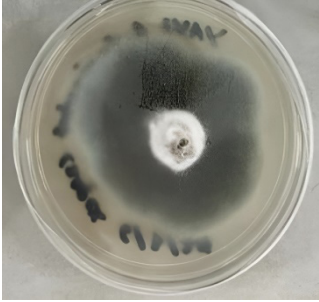
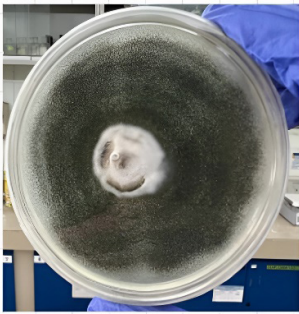
KADAR PENGURAIAAN SISA PEPEJAL MENGGUNAKAN KULAT TERPEGUN *A. fumigatus*

Rajah 1 menunjukkan perubahan dalam kepekatan Jumlah Pepejal Terampai (TSS) (mg/L) selama 1 bulan dan dibandingkan antara kumpulan kawalan dan rawatan. Kepekatan awal TSS (Minggu 0) untuk rawatan dan kawalan adalah kira-kira 26,677.33 mg/L. Pada akhir minggu pertama, kedua-dua kawalan dan rawatan menunjukkan penurunan tahap TSS. Kumpulan rawatan mengalami penurunan kepada kira-kira 22,308 mg/L, manakala kumpulan kawalan menunjukkan penurunan kepada kira-kira 25,050.67 mg/L. Kumpulan rawatan menunjukkan penurunan yang lebih ketara berbanding dengan kumpulan kawalan. Dari minggu kedua hingga keempat, kepekatan TSS bagi kawalan dan rawatan terus menurun secara beransur-ansur.

Kepekatan TSS dalam kumpulan kawalan menunjukkan penurunan yang berterusan setiap minggu (Minggu 1: 6.17%, Minggu 2: 9.07%, Minggu 3: 11.36%, Minggu 4: 13.08%) dan mencapai kira-kira 23,188.67 mg/L menjelang minggu ke-4. Menjelang akhir minggu ke-4, kepekatan TSS dalam rawatan telah menurun kepada kira-kira 20,270.67 ± 1.45 mg/L yang menunjukkan penurunan lebih ketara berbanding dengan kumpulan kawalan. Kumpulan rawatan secara berterusan menunjukkan penurunan TSS yang lebih banyak berbanding dengan kumpulan kawalan semasa uji kaji. Rawatan ini turut mempunyai kesan dan berpotensi dalam mempercepatkan pecahan sisa pepejal dalam 16-24% seperti yang ditunjukkan pada penurunan TSS antara minggu 0 hingga minggu ke-4. Kumpulan rawatan mempunyai jumlah penurunan TSS kira-kira 6,406.66 mg/L sepanjang kajian daripada tempoh empat minggu manakala kumpulan kawalan hanya mempunyai penurunan kira-kira 3,488.66 mg/L. Kepekatan TSS yang mengalami rawatan didapati berkurangan dengan ketara ($p < 0.05$) sepanjang 4 minggu tempoh rawatan dan menunjukkan perbezaan yang ketara ($p < 0.05$) apabila dibandingkan dengan kawalan (Rajah 1). Secara keseluruhan, Rajah 1 menekankan keberkesanan rawatan bergantung kepada masa kulat terpegun dalam mengurangkan TSS dan menunjukkan penurunan yang berterusan.

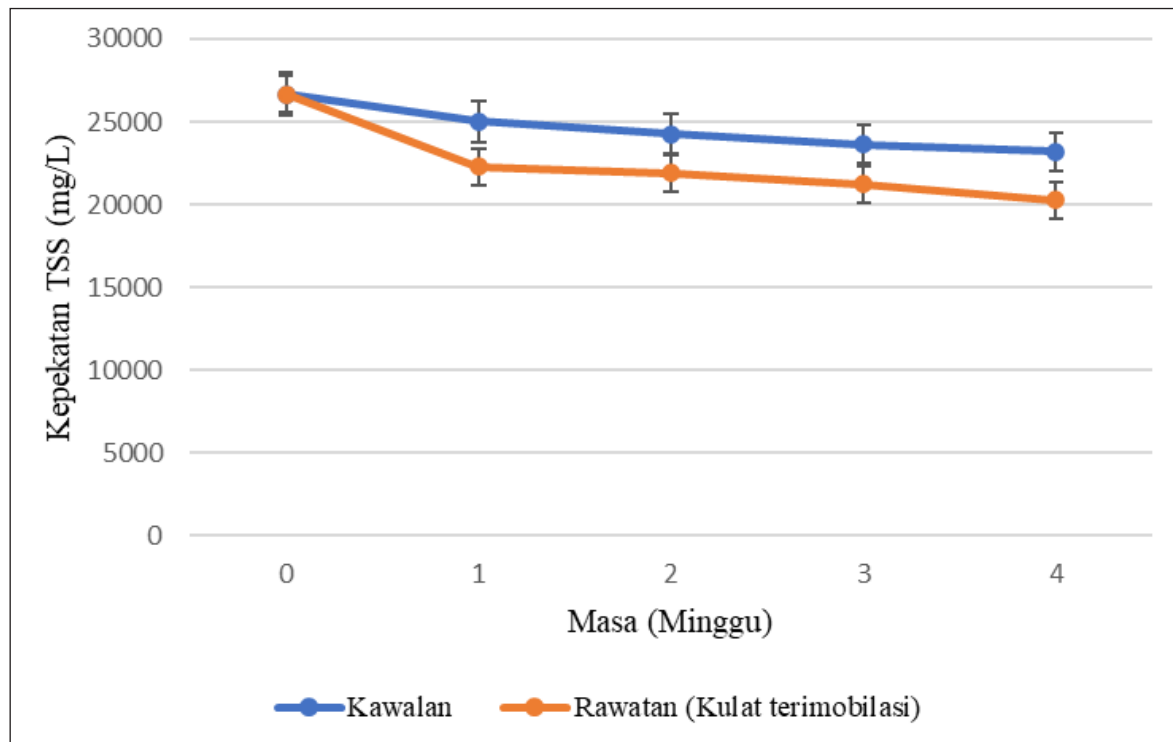
Rajah 2 menunjukkan peratus penyingkiran sisa enap cemar kumbahan dari minggu 1 hingga minggu ke-4. Hasil analisis ini menunjukkan bahawa rawatan kumbahan secara berkesan meningkatkan kadar penguraian sisa pepejal. Hal ini menunjukkan bahawa kepekatan TSS dalam kedua-dua rawatan dan kawalan kekal berbeza sepanjang uji kaji mencadangkan bahawa rawatan tersebut mempunyai kesan jangka panjang. Malah, kulat daripada genus *Aspergillus* yang digunakan dalam kajian ini mengandungi enzim

JADUAL 1. Morfologi kulat *A. fumigatus*

Masa (Hari)	Pemerhatian morfologi
Hari 1	
Hari ke-2	
Hari ke-4	
Hari ke-7	

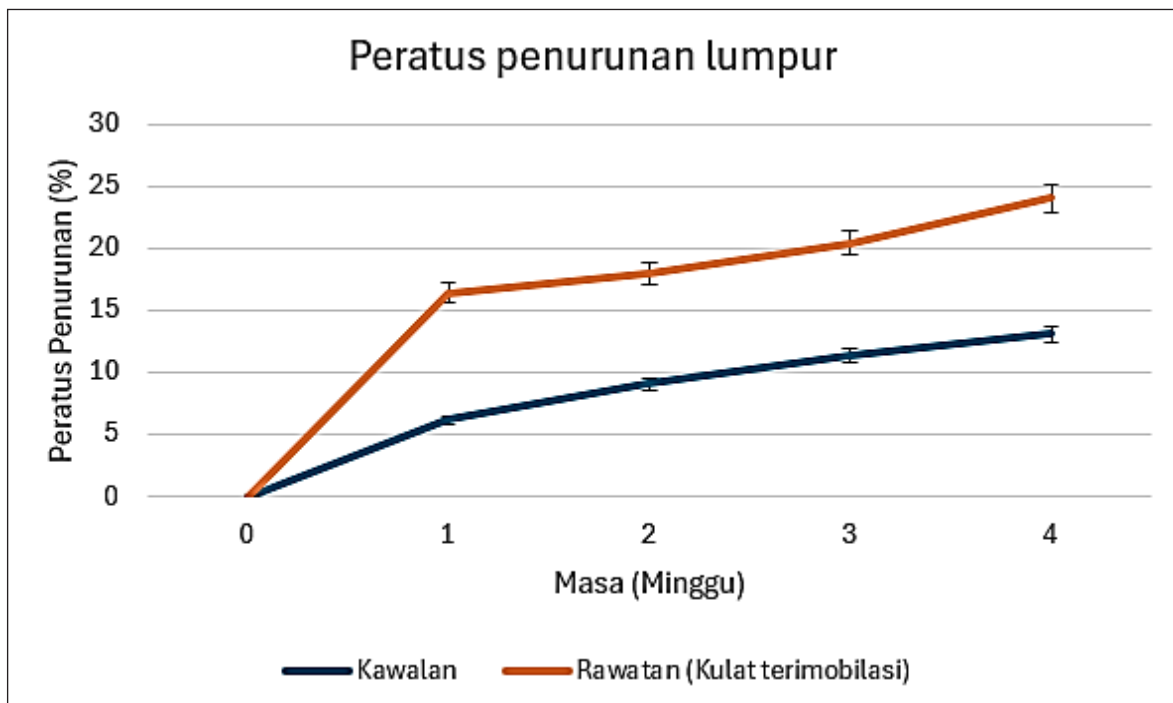
selulase yang dapat menguraikan selulosa dalam sisa pepejal bandaran (Gautam et al. 2012). Penemuan ini turut diperkuat oleh kajian lain yang menunjukkan bahawa genus *Aspergillus* berupaya menguraikan bahan organik dengan kadar degradasi yang tinggi (Rastogi, Nandal & Khosla 2020). Teknik pemegunan kulat yang digunakan dalam kajian ini turut membuktikan keberkesanannya dalam menguraikan sisa pepejal, kerana kaedah ini membantu

mengekalkan kestabilan enzim yang dihasilkan oleh kulat berbanding enzim bebas, seterusnya meningkatkan keupayaannya dalam proses rawatan (Ahmed, El Shamy & Awad 2020). Selain itu, PVC yang digunakan sebagai matriks untuk pemegunan *A. fumigatus* dalam kaedah ini dapat meningkatkan keberkesanan rawatan dengan lebih cepat kerana ia boleh disesuaikan mengikut kumpulan berfungsi dan membantu dalam pengkapsulan enzim (Edo et al. 2024).



Tanda '*' menunjukkan terdapat perbezaan ketara antara kawalan dan rawatan (ujian Dunnet; $p < 0.05$)

RAJAH 1. Kepekatan jumlah pepejal terampai (TSS) yang dirawat dengan kulat terpegun *A. fumigatus*



RAJAH 2. Peratus penyingkiran sisa enap cemar kumbahan bagi kawalan dan rawatan

KADAR PERTUMBUHAN KULAT *A. fumigatus*

Rajah 3 menunjukkan berat awal dan berat akhir kulat *A. fumigatus*, iaitu sebanyak 92.26 g/L dan 104.87 g/L. Rajah 4 menunjukkan bahawa kadar pertumbuhan kulat *A. fumigatus* meningkat secara tekak dari minggu 0 hingga minggu ke-4 sebanyak 0.0033 μ /hari selama tempoh 4 minggu. Ini menunjukkan pertumbuhan kulat yang stabil di bawah keadaan terkawal. Data yang lebih terperinci dan dinamik mengenai kadar pertumbuhan dalam jangka masa yang lebih pendek ditunjukkan dalam kajian Subrahmanyam et al. (2001) yang mana pertumbuhan kulat berbeza secara ketara kerana bergantung kepada keadaan kumbahan atau air sisa. Kulat yang diletakkan dalam kepekatan kumbahan yang lebih tinggi (50% dan 75%) menunjukkan peningkatan dalam kadar pertumbuhan sekitar 10-12 hari yang mencapai nilai kira-kira 0.06-0.07 μ /hari setiap hari pada hari ke-16. Ini menunjukkan bahawa ketersediaan nutrien yang lebih tinggi dalam kumbahan menggalakkan pertumbuhan yang cepat selepas fasa penyesuaian awal. Sebaliknya, kadar pertumbuhan dalam medium 'Bristol' dan air sisa sintetik kekal rendah dan tekak sepanjang tempoh yang menunjukkan nutrien yang terhad atau faktor-faktor lain yang menjejaskan pertumbuhan.

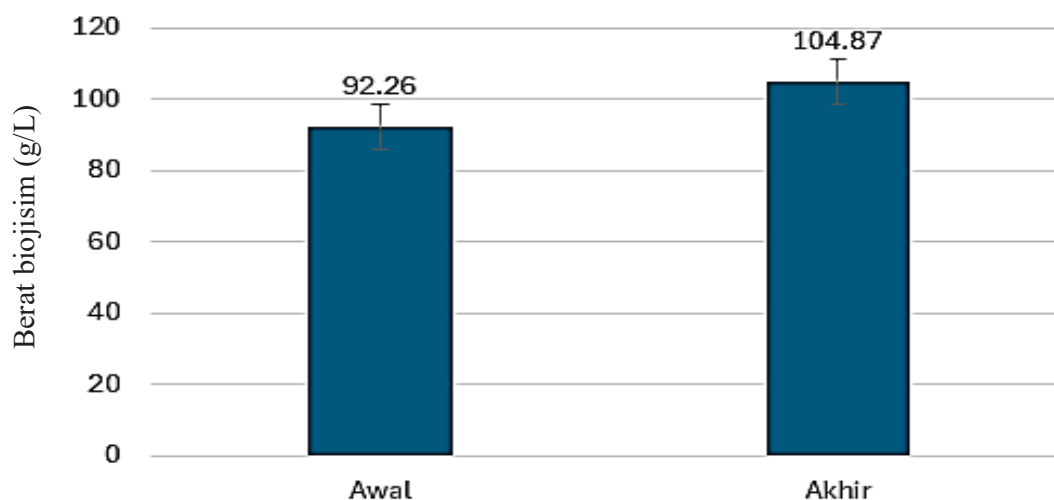
Walaupun kajian ini (Rajah 4) menunjukkan kadar pertumbuhan kulat *A. fumigatus* yang stabil dan sederhana yang sesuai untuk analisis pola asas dalam tempoh yang lebih panjang, kajian daripada Subrahmanyam et al. (2001) menunjukkan kepentingan bagaimana pelbagai keadaan alam sekitar mempengaruhi pertumbuhan mikrob. Ia menekankan kepentingan ketersediaan nutrien dan fasa penyesuaian dalam dinamik pertumbuhan. Perbandingan

ini menegaskan kajian terperinci perlu dijalankan untuk memahami sepenuhnya pola pertumbuhan kulat dalam pelbagai keadaan.

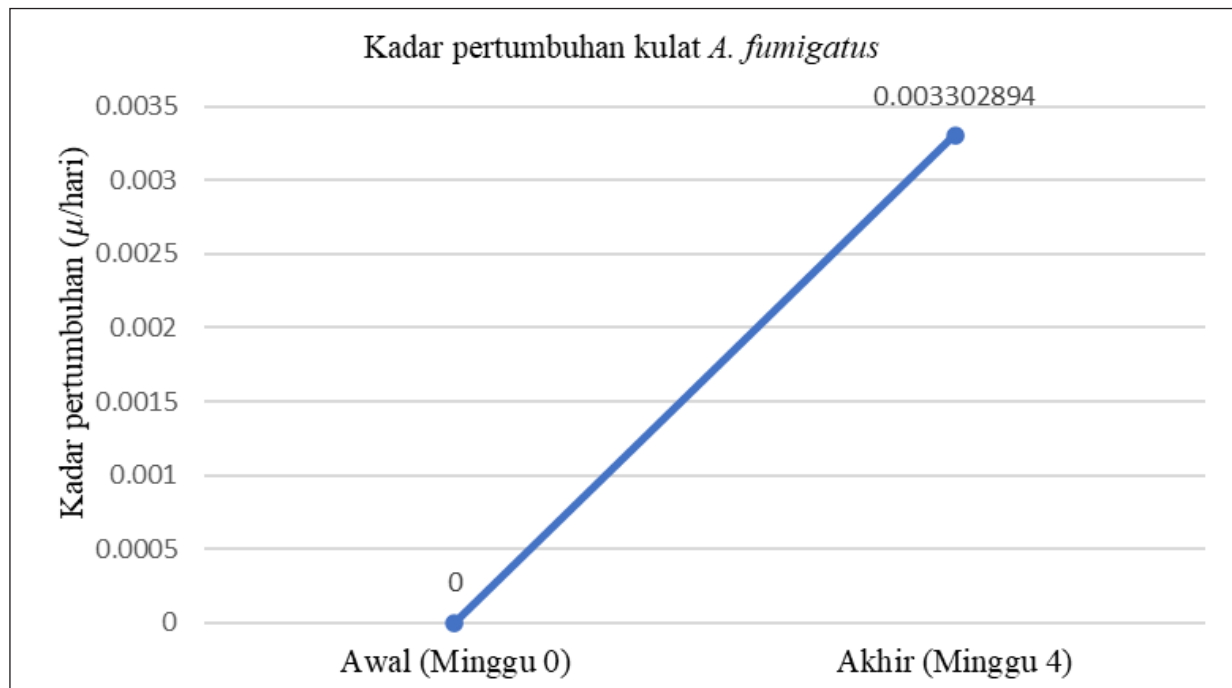
KEHADIRAN KULAT *A. fumigatus* DALAM AIR SISA

Pada pembesaran 5000 $\times$, morfologi permukaan air sisa yang rumit telah diperhatikan (Rajah 5(a)). Struktur ini terdiri daripada agregat berlapis dan bersisik yang menunjukkan permukaan yang kompleks dan heterogen. Tekstur tersebut menggambarkan keporosan yang ketara dan kepelbagaian mikrostruktur. Rajah 5(b) pula menunjukkan permukaan yang lebih licin dan seragam serta kurang terperinci pada morfologi air sisa enap cemar kumbahan. Kehadiran kawasan yang lebih besar dan tidak jelas menunjukkan tahap rawatan yang berbeza atau komposisi enap cemar kumbahan yang berbeza berbanding dengan Rajah 5(a). Pemerhatian pada imej SEM menunjukkan ciri morfologi kulat *A. fumigatus* adalah tidak jelas yang biasanya menunjukkan kepala konid, fialid dan konidia semasa peringkat pembiakannya dan sepatutnya boleh dilihat sebagai struktur yang mengandungi spora. Walau bagaimanapun, pada Rajah 5(a) dan 5(b), tiada petunjuk jelas tentang struktur kulat tersebut. Hal ini juga menunjukkan bahawa teknik pemegunan yang digunakan berjaya disebabkan oleh tiada kehadiran kulat dalam sampel. Ini mungkin disebabkan oleh proses pemegunan menggunakan teknik pengkapsulan dengan kulat terperangkap dalam matriks atau bahan yang digunakan, iaitu PVC (Perullini et al. 2010). Akibatnya, kulat sukar dilihat pada permukaan air sisa. Namun, jika analisis SEM dilakukan melalui keratan rentas, kemungkinan kehadiran kulat dalam air sisa dapat diperlihatkan.

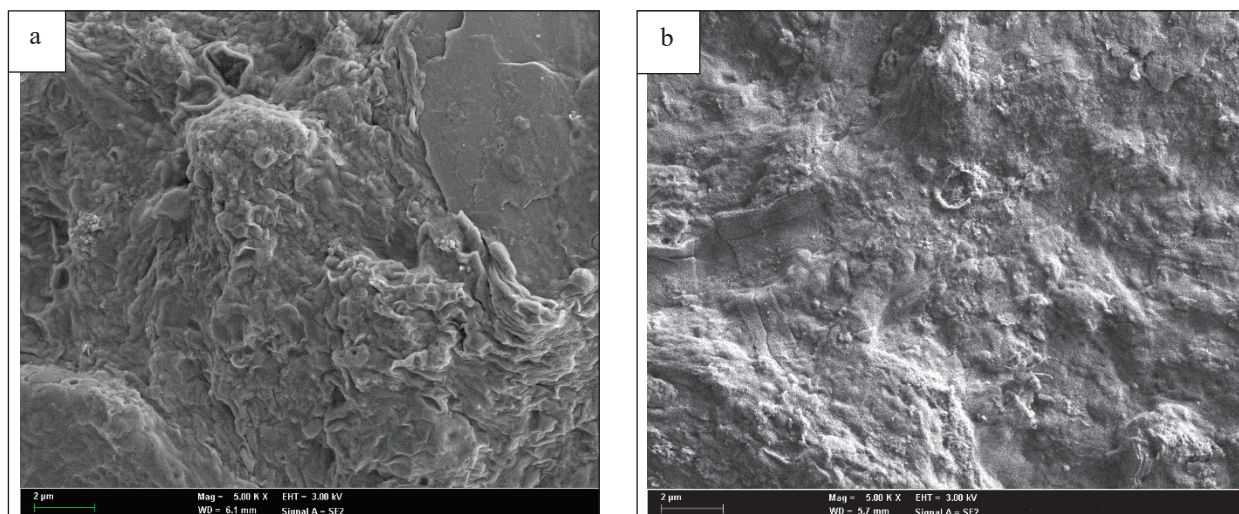
Berat awal dan akhir kulat *A. fumigatus*



RAJAH 3. Berat awal dan berat akhir kulat *A. fumigatus*



RAJAH 4. Kadar pertumbuhan kulat *A. fumigatus*



RAJAH 5. Morfologi kulat SEM awal (a) dan akhir (b) dalam air sisa.
Pembesaran: 5000×

KESIMPULAN

Secara keseluruhan, morfologi kulat *A. fumigatus* telah dikaji dan penguraian sisa pepejal dapat ditentukan melalui kulat terpegun. *A. fumigatus* menghasilkan koloni yang mempunyai tekstur berbutir dan berwarna kelabu kehijauan apabila sporulasi berlaku. Kadar penguraian sisa pepejal menggunakan kulat terpegun *A. fumigatus* telah menunjukkan peratus penurunan yang ketara dan disokong

oleh analisis TSS yang menunjukkan dengan jelas bahawa rawatan kumbahan mempercepatkan kadar penguraian sisa pepejal. Kulat *A. fumigatus* dapat meningkatkan beratnya dengan ketara dalam jangka masa yang singkat dan menjadikannya sangat sesuai untuk aplikasi dalam rawatan air sisa. Hasil daripada SEM pada air sisa juga menunjukkan tiada kehadiran kulat *A. fumigatus* dan ini membuktikan bahawa teknik pemegunan yang digunakan

adalah berkesan. Kajian masa hadapan harus meneliti proses rawatan bagi mempercepatkan penguraian dan menilai sejauh mana ia berkesan dengan pelbagai jenis bahan kumbahan dan keadaan persekitaran.

PENGHARGAAN

Kajian ini telah mendapat sumbangan dana penyelidikan daripada Indah Water Konsortium Sdn Bhd (KK-2022-014).

RUJUKAN

- Abdel-Shafy, H.I. & Mansour, M.S.M. 2018. Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egyptian Petroleum Research Institute* 27(4): 1275-1290.
- Ahmad, A.F., Mohd Affandi, H., Sohim, N.E. & Nur Yunus, F.A. 2024. Analysis on the understanding of environmental management practices among contractors in Malaysia using Rasch Measurement Model. *Jurnal Kejuruteraan* 36(2): 689-699.
- Ahmed, N.E., El Shamy, A.R. & Awad, H.M. 2020. Optimization and immobilization of amylase produced by *Aspergillus terreus* using pomegranate peel waste. *Bulletin of the National Research Centre* 44(1): 109.
- Al-abedi, H.F.H. 2021. Aspergillosis in sheep. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science* 14(2): 47-52.
- Alves, E., Lucas, G.C., Pozza, E.A. & de Carvalho Alves, M. 2013. Scanning electron microscopy for fungal sample examination. In *Laboratory Protocols in Fungal Biology*, disunting oleh Gupta, V., Tuohy, M., Ayyachamy, M., Turner, K., O'Donovan, A. New York: Springer. hlm. 133-150.
- Armanu, E.G., Bertoldi, S., Chrzanowski, Ł., Volf, I., Heipieper, H.J. & Eberlein, C. 2025. Benefits of immobilized bacteria in bioremediation of sites contaminated with toxic organic compounds. *Microorganisms* 13(1): 155.
- Ashton, G.D. & Dyer, P.S. 2019. Culturing and mating of *Aspergillus fumigatus*. *Current Protocols in Microbiology* 54(1): e87.
- Edo, G.I., Ndudi, W., Ali, A.B.M., Yousif, E., Zainulabdeen, K., Onyibe, P.N., Ekokotu, H.A., Isoje, E.F., Igbuku, U.A., Essaghah, A.E.A., Ahmed, D.S., Umar, H. & Ozsahin, D.U. 2024. Polyvinyl chloride (PVC): An updated review of its properties, polymerization, modification, recycling, and applications. *Journal of Materials Science* 59(47): 21605-21648.
- Gautam, S.P., Bundela, P.S., Pandey, A.K., Jamaluddin, Awasthi, M.K. & Sarsaiya, S. 2012. Diversity of cellulolytic microbes and the biodegradation of municipal solid waste by a potential strain. *International Journal of Microbiology* 2012: 325907.
- Iftikhar, A., Hayat, M.T., Bibi Saima Zeb, B.S.Z., Siddique, M., Ahmed Bhatti, Z., Abbasi, U. & Mahmood, Q. 2023. Anaerobic biological treatment of wastewater from paper recycling industry by UASB reactor. *Sains Malaysiana* 52(4): 1087-1099.
- Ikram, M., Naeem, M., Zahoor, M., Hanafiah, M.M., Oyekanmi, A.A., Ullah, R., Farraj, D.A.A., Elshikh, M.S., Zekker, I. & Gulfam, N. 2022. Biological degradation of the azo dye basic orange 2 by *Escherichia coli*: A sustainable and ecofriendly approach for the treatment of textile wastewater. *Water* 14(19): 2969.
- Ismail, A.F., Khulbe, K.C. & Matsuura, T. 2019. RO membrane fouling. *Reverse Osmosis*. Netherlands: Elsevier. hlm. 189-220.
- Jabari, P., Yuan, Q. & Oleszkiewicz, J.A. 2018. Overall effect of carbon production and nutrient release in sludge holding tank on mainstream biological nutrient removal efficiency. *Environmental Technology* 39(18): 2390-2410.
- Jabatan Perangkaan Malaysia 2022. Perbadanan Pengurusan Sisa Pepejal dan Pembersihan Awam (SWCorp). *Statistik Kementerian Pembangunan Kerajaan Tempatan*.
- Jain, A., Yadav, S., Nigam, V.K. & Sharma, S.R. 2017. Fungal-mediated solid waste management: A review. *Mycoremediation and Environmental Sustainability* 1: 153-170.
- Kamaruzzaman, F., Md Zain, S., Mat Saad, N.F., Basri, H. & Ahmad Basri, N.E. 2018. Effective use of Indigenous Microorganism (IMO) in composting a mixture of food and yard wastes on an industrial scale. *Jurnal Kejuruteraan* 5: 53-58.
- Kalyani, P., Botsa, S.M., Divya Laxmi, K.V. & Anil, S. 2023. Optimization of cultural conditions for biomass and antibacterial metabolite production by *Aspergillus fumigatus* strain MF1. *Hybrid Advances* 2: 100016.
- Kuok, K.K., Chiu, P.C., Rahman, M.R., Bakri, M.K. & Chin, M.Y. 2022. Effectiveness of centralized wastewater treatment plant in removing emerging contaminants: A case study at Kuching, Malaysia. *Journal of Water Resource and Protection* 14(09): 650-663.
- Li, Y., Zhou, L.W. & Wang, R.Z. 2017. Urban biomass and methods of estimating municipal biomass resources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80: 1017-1030.
- Marycz, M., Brillowska-Dabrowska, A. & Gebicki, J. 2020. Evaluation of immobilization of selected peat-isolated yeast strains of the species *Candida albicans* and *Candida subhashii* on the surface of artificial support materials used for biotrickling filtration. *Processes* 8(7): 801.

- Nathan, V.K., Rani, M.E., Rathinasamy, G., Dhiraviam, K.N. & Jayavel, S. 2014. Process optimization and production kinetics for cellulase production by *Trichoderma viride* VKF3. *SpringerPlus* 3: 92.
- Perullini, M., Jobbágy, M., Mouso, N., Forchiassin, F. & Bilmes, S.A. 2010. Silica-alginate-fungi biocomposites for remediation of polluted water. *Journal of Materials Chemistry* 20(31): 6479.
- Pundir, C.S., Chauhan, N.S. & Bhambi, M. 2008. Activation of polyvinyl chloride sheet surface for covalent immobilization of oxalate oxidase and its evaluation as inert support in urinary oxalate determination. *Analytical Biochemistry* 374(2): 272-277.
- Rastogi, M., Nandal, M. & Khosla, B. 2020. Microbes as vital additives for solid waste composting. *Heliyon* 6(2): e03343.
- Sayed, K., Wan Mohtar, W.H.M., Mohd Hanafiah, Z., Sultana Bithi, A. & Wan-Mohtar, W.A.A.Q.I. 2024. Removal of pharmaceuticals from municipal wastewater using Malaysian *Ganoderma lucidum* fungal strain. *Jurnal Kejuruteraan* 36(4): 1467-1476.
- Singh, G. & Yadav, P.K.S. 2022. Chapter 6 - Hazardous waste characteristics and standard management approaches. In *Hazardous Waste Management*, disunting oleh Yadav, D., Kumar, P., Singh, P. & Vallero, D.A. Elsevier. hlm. 145-164.
- Soni, R.A., Sudhakar, K. & Rana, R.S. 2017. Spirulina - From growth to nutritional product: A review. *Trends in Food Science and Technology* 69: 157-171.
- Subrahmanyam, S., Kodandapani, N., Shanmugam, K., Moovarkumuthalvan, K., Jeyakumar, D. & Subramanian, T.V. 2001. Cyclic voltammetric measurements of growth of *Aspergillus terreus*. *Analytical Sciences* 17(4): 481-484.
- Syifaa, N., Shakil, M., Zahida, A., Azhar, M. & Othman, N. 2023. Solid waste management in Malaysia: An overview. *Information Management and Business Review* 15(1): 86-93.
- Ural, N. 2021. The significance of scanning electron microscopy (SEM) analysis on the microstructure of improved clay: An overview. *Open Geosciences* 13(1): 197-218.
- Wiyantoko, B., Rahmadani, N., Kurniawati, P. & Purbaningtias, T.E. 2020. Method verification of chemical oxygen demand (COD) and total suspended solid (TSS) analysis from Mentaya River. *AIP Conference Proceedings* 2229: 030026.
- Yadav, G. & Ahmaruzzaman, M. 2023. Recent development of novel nanocomposites for photocatalysis mediated remediation of phenolic derivatives: A comprehensive review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 127: 18-35.
- Yusof, Z. & Saad, N.A. 2022. Successful approaches to integrated water resources management: A mini review. *Jurnal Kejuruteraan* 34(2): 181-190.

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