

## KAJIAN KEBERKESANAN RAWATAN TERAPUNG PADA AIR KOLAM MENGGUNAKAN LIMNOCHARIS FLAVA

Auni Sharmiza binti Rosli<sup>1</sup>, Nurdinie Lenani Binti Md. Kamal<sup>2</sup>, Rosnani binti Alkarimiah<sup>2\*</sup>  
Pusat Pengajian Kejuruteraan Awam, Kampus Kejuruteraan, Universiti Sains Malaysia, MALAYSIA.

\*Pengarang koresponden: cerosnani@usm.my

### Abstrak

Tujuan kajian ini adalah untuk menilai keberkesanan rawatan terapung untuk air kolam. Kajian ini bertujuan untuk menilai keberkesanan pendekatan rawatan terapung, khususnya menggunakan *Limnocharis flava*, dalam meningkatkan kualiti air. Seterusnya, untuk mengkaji dan mengukur kadar penyingkiran bahan pencemar yang dipermudahkan oleh kaedah rawatan terapung, dengan memberi tumpuan kepada parameter seperti BOD, COD, TSS, TAN, pH, serta tahap makronutrien dan mikronutrien. Penilaian ini merangkumi lima parameter utama: Permintaan Oksigen Biokimia (BOD), Permintaan Oksigen Kimia (COD), Jumlah Nitrogen Ammonia (TAN), Jumlah Pepejal Terampai (TSS), dan pH, yang semuanya diukur mengikut piawai Persatuan Kesihatan Awam Amerika (APHA). Ujian prestasi dijalankan pada selang 7 hari dalam tempoh 30 hari. Keputusan menunjukkan bahawa kepekatan BOD, COD, TAN, TSS, dan pH berkurangan dari semasa ke semasa. Menurut NWQS dan WQI, kolam tercemar sebelum rawatan dan bertambah baik selepas rawatan. Selain itu, menggunakan Spektrometri Pelepasan Optik Plasma Gandingan Induktif (ICP-OES) untuk menganalisis kandungan logam berat, sistem akar telah dicerna secara asid untuk mengesan unsur surih. Sampel air kolam mentah dan sampel air yang mengandungi *Limnocharis flava* telah dianalisis.

**Kata kunci:** Fitoremediasi, *Limnocharis Flava*, Kualiti Air, Pencemaran Air, Pengurusan Alam Sekitar, Penyingkiran Nutrien, Rawatan Kolam, Tanah Lembap Rawatan Terapung

### Article history:

Submitted: 02/02/2026; Revised: 12/05/2026; Accepted: 30/06/2026; Online: 30/06/2026

### PENGENALAN

Pencemaran air merupakan cabaran alam sekitar yang kritikal di Malaysia, yang memberi kesan ketara kepada kemampuan bekalan air, kesihatan awam dan kesihatan keseluruhan ekosistem akuatik. Air yang tercemar boleh menyebabkan pelbagai masalah kesihatan, termasuk jangkitan bakteria dan virus, manakala pemuatan nutrien yang berlebihan boleh mengakibatkan ledakan alga yang mengurangkan tahap oksigen dalam badan air (Arif *et al.*, 2020; Uddin *et al.*, 2021). Kolam takungan di Kampus Kejuruteraan Universiti Sains Malaysia (USM), yang direka untuk menampung air hujan sementara dan membolehkan bahan pencemar mendap, memberikan peluang unik untuk penyelidikan mengenai penyelesaian rawatan air yang berkesan. Walau bagaimanapun, kolam-kolam ini belum menjalani sebarang rawatan, yang membawa kepada kualiti air yang buruk dan pengumpulan bahan pencemar. Teknologi rawatan air tradisional sering gagal dalam menyingkirkan bahan pencemar daripada persekitaran sedemikian dengan berkesan, yang memerlukan penerokaan kaedah alternatif. Tanah Lembap Rawatan Terapung (FTW) telah muncul sebagai penyelesaian yang menjanjikan, menggunakan tumbuhan akuatik untuk meningkatkan kualiti air dengan menyerap nutrien dan bahan pencemar yang berlebihan. *Limnocharis Flava*, tumbuhan yang dikenali dengan pertumbuhan pesat dan keupayaan penyerapan nutrien, amat sesuai untuk tujuan ini.

Tanah Lembap Rawatan Terapung (Floating Treatment Wetlands, FTW) telah digunakan secara meluas sebagai teknologi fitoremediasi untuk meningkatkan kualiti air melalui gabungan proses penyerapan oleh tumbuhan, degradasi mikrob dan pemendapan zarah terampai. Keberkesanan sistem ini telah dibuktikan dalam pelbagai kajian terdahulu, termasuk penyingkiran bahan organik, nutrien dan logam berat daripada air tercemar (Cule N. *et al.*, 2022). Sebagai contoh, FTW dilaporkan mampu mencapai penyingkiran Permintaan Oksigen Biokimia (BOD) dalam julat yang tinggi bergantung kepada reka bentuk sistem dan spesies tumbuhan yang digunakan, di samping menunjukkan pengurangan ketara bagi parameter Permintaan Oksigen Kimia (COD) dan pepejal terampai dalam aplikasi rawatan air permukaan dan air sisa (Colares *et al.*, 2020).

Di samping itu, keberkesanan FTW banyak dipengaruhi oleh jenis tumbuhan yang digunakan kerana sistem akar berfungsi sebagai medium penyerapan nutrien dan habitat kepada komuniti mikroorganisma yang membantu proses biodegradasi (Bi *et al.*, 2019). Beberapa kajian telah menunjukkan bahawa tumbuhan akuatik yang mempunyai sistem akar yang padat dan kadar

pertumbuhan yang tinggi mampu meningkatkan prestasi penyingkiran pencemar serta memperbaiki kualiti air secara berterusan (Arslan *et al.*, 2023).

*Limnocharis Flava* mempunyai ciri-ciri yang sesuai untuk aplikasi tersebut kerana kadar pertumbuhannya yang cepat, toleransi terhadap persekitaran akuatik dan keupayaan menyesuaikan diri dalam habitat tropika. Walaupun tumbuhan ini telah dikenal pasti mempunyai potensi dalam aplikasi fitoremediasi dan pengurusan alam sekitar, kajian yang menilai keberkesannya secara khusus dalam sistem rawatan terapung bagi meningkatkan kualiti air kolam masih terhad, khususnya di Malaysia (Jamila *et al.*, 2021).

Kajian ini bertujuan untuk menilai keberkesanan kaedah rawatan terapung menggunakan *Limnocharis Flava* dalam meningkatkan kualiti air kolam. Secara khususnya, kajian ini akan menilai kecekapan penyingkiran parameter kualiti air utama, termasuk Permintaan Oksigen Biokimia (BOD), Permintaan Oksigen Kimia (COD), Jumlah Pepejal Terampai (TSS), Jumlah Nitrogen Ammonia (TAN), dan pH. Di samping itu, kajian ini akan menganalisis Indeks Kualiti Air (WQI) sampel air kolam sebelum dan selepas rawatan, mengkategorikan kualiti air mengikut Piawai Kualiti Air Kebangsaan (NWQS). Penemuan kajian ini dapat memberikan pandangan berharga tentang amalan pengurusan air yang mampan dan menggalakkan penggunaan FTW sebagai penyelesaian yang berdaya maju untuk meningkatkan kualiti air di kolam yang tercemar. Kertas kerja ini distrukturkan seperti berikut: tinjauan literatur akan membincangkan penyelidikan sedia ada mengenai FTW dan keberkesannya, diikuti dengan metodologi yang digunakan dalam kajian ini, keputusan dan perbincangan, dan akhirnya, kesimpulan dan cadangan.

## METODOLOGI

### Huraian Tapak Kajian

Kajian ini dijalankan di sebuah kolam takungan di dalam Kampus Kejuruteraan USM, yang dipilih kerana kesesuaiannya untuk penyelidikan tanah lembap rawatan terapung seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2.1. Kolam ini berfungsi sebagai kawasan takungan untuk larian air hujan, membolehkan sedimen dan bahan pencemar mendap sebelum air dilepaskan. Ciri-ciri unik tapak ini menyediakan persekitaran yang ideal untuk menilai potensi *Limnocharis flava* dalam meningkatkan kualiti air. Keadaan awal kolam telah dinilai sebelum eksperimen, mendedahkan tahap pencemar yang tinggi dan oksigen terlarut yang rendah, yang memerlukan pelaksanaan sistem rawatan. Pendekatan rawatan terapung bertujuan untuk menggunakan keupayaan penapisan semula jadi *Limnocharis flava* untuk meningkatkan kualiti air keseluruhan.

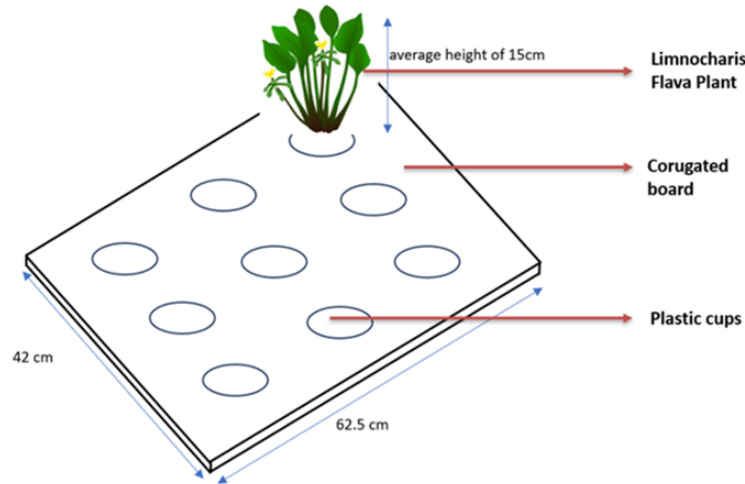


Rajah 2.1: Air Kolam dari Universiti Sains Malaysia, Kampus Kejuruteraan

### Persediaan dan Reka Bentuk

Persediaan dan reka bentuk eksperimen untuk loji rawatan terapung melibatkan penciptaan persekitaran terkawal di Makmal Alam Sekitar. Sebuah tangki dibina untuk meniru keadaan kolam semula jadi, memudahkan aliran air dan pendedahan biojisim tumbuhan. Tangki ini dibina untuk menampung 105-liter air dan diperbuat daripada bahan bukan reaktif untuk mencegah interaksi kimia. Persediaan ini dioptimumkan untuk memastikan keadaan kolam yang realistik dan pertumbuhan tumbuhan yang betul.

Tangki yang dipasang di Makmal Alam Sekitar di Kampus Kejuruteraan, USM, direka bentuk untuk menerima cahaya matahari sambil dilindungi oleh bumbung. Ia dibina untuk meniru keadaan kolam sebenar dengan kedalaman air yang mencukupi untuk *Limnocharis flava*. Pemilihan bahan tangki memastikan ketahanan dan bukan kereaktifan, menyumbang kepada simulasi persekitaran akuatik yang berkesan. Tikar terapung digunakan untuk menyokong tumbuhan, dengan tikar diperbuat daripada papan beralun untuk memberikan daya apungan. Setiap tikar mempunyai sembilan lubang untuk menampung tumbuhan individu. Susun atur ini menyediakan ruang yang mencukupi untuk tumbuhan berkembang dan merebak seperti yang dapat dilihat dalam Rajah 2.2.



Rajah 2.2 Reka bentuk rakit terapung

Cawan plastik diletakkan di dalam lubang untuk mengamankan tumbuhan dan memudahkan interaksi akar dengan turus air. Persediaan ini juga menggunakan bahan kitar semula, seperti papan beralun, untuk mengurangkan impak alam sekitar. Pokok *Limnocharis flava* telah dipilih dan disediakan dengan teliti sebelum diletakkan di dalam tangki. Kayu digunakan untuk menyokong pokok, memastikan ia tegak dan memastikan pertumbuhan lurus. Sokongan ini diikat dengan ikatan kabel, membolehkan pokok terapung dan mensimulasikan keadaan semula jadi. Reka bentuk ini memastikan perkembangan tumbuhan yang optimum dan pengambilan nutrien sambil menampung paras air yang berbeza-beza, menunjukkan kebolehsuaian pokok terhadap persekitaran akuatik yang berbeza.



Rajah 2.3 Persediaan *Limnocharis flava*

*Limnocharis flava* dipilih untuk kajian ini kerana ketersediaan dan kesesuaiannya untuk keadaan eksperimen. Tumbuhan ini tumbuh subur di persekitaran yang basah, berpayau dan kawasan air tawar yang cetek dan bertakung, sering tumbuh di sawah padi dan kadangkala menjadi rumpai. Berasal dari kawasan tropika Amerika Tengah dan Selatan, *Limnocharis flava* ialah tumbuhan akuatik saka yang baru muncul. Tumbuhan ini dijarakkan 15 cm antara satu sama lain dan mempunyai ketinggian purata 30 cm, membolehkannya menyesuaikan diri selama tujuh hari sebelum kajian bermula. Sistem akarnya meningkatkan pengambilan nutrien dan menyokong penulenan air di tanah lembap rawatan terapung (FTW) dengan memupuk pertumbuhan mikrob dan kitaran nutrien. Pemilihan *Limnocharis flava* selanjutnya dibenarkan oleh keupayaannya yang terbukti untuk menyerap logam berat dalam tahap yang ketara, seperti kadmium, seperti yang ditunjukkan dalam penyelidikan terdahulu (Lam et al., 2022). Kebolehsuaiannya terhadap pelbagai habitat akuatik dan daya tahannya di bawah keadaan yang melampau menjadikannya calon yang ideal untuk menilai keberkesanan FTW dalam merawat badan air yang tercemar. Rajah 2.4 menggambarkan habitat semula jadi *Limnocharis flava*.



Rajah 2.4 Habitat semula jadi *Limnocharis flava*

**Ujian Prestasi** Prestasi kaedah rawatan terapung dinilai melalui pengukuran kualiti air yang meluas dalam tempoh 30 hari. Pensampelan dan analisis dijalankan pada setiap tujuh hari sepanjang tempoh kajian bagi parameter Permintaan Oksigen Biokimia (BOD), Permintaan Oksigen Kimia (COD), Jumlah Pepejal Terampai (TSS), tahap Jumlah Nitrogen Ammonia (TAN) dan pengukuran pH dijalankan menggunakan kaedah analisis dan piawai yang diringkaskan dalam Jadual 2.1. Selain itu, kepekatan logam berat dalam sampel air turut dianalisis menggunakan teknik Inductively Coupled Plasma–Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES).

Jadual 2.1 Ringkasan parameter kualiti air, kaedah analisis dan piawaian rujukan yang digunakan dalam kajian

Parameter	Kaedah Analisis	Piawaian
BOD	Biochemical Oxygen Demand Test	APHA 5210 B
COD	Closed Reflux Method	APHA 5220 D
TSS	Gravimetric Method	APHA 2540 D
TAN	Distillation and Titration	APHA
pH	pH Meter	APHA 4500-H <sup>+</sup>

#### **Keperluan Oksigen Biokimia (BOD)**

Analisis Permintaan Oksigen Biokimia (BOD) dijalankan menggunakan kaedah BOD<sub>5</sub> mengikut APHA 5210 B, dengan nilai BOD ditentukan berdasarkan perbezaan bacaan oksigen terlarut (DO) sebelum dan selepas inkubasi selama lima hari pada suhu 20°C. Kajian ini menggunakan BOD tanpa biji untuk menumpukan pada aktiviti mikrob asli dan bahan pencemar organik dalam air kolam, memberikan penilaian semula jadi terhadap keberkesanan *Limnocharis flava* dalam meningkatkan kualiti air.



Rajah 2.5: Meter oksigen terlarut digunakan untuk mengambil bacaan

Nilai BOD<sub>5</sub> boleh diperolehi menggunakan persamaan seperti yang ditunjukkan di bawah.

$$BOD_5 \left( \frac{mg}{L} \right) = \frac{DO \text{ initial} - DO \text{ final}}{P(1ml / 300 ml)} \quad (2.1)$$

Di mana;

DO awal = Sampel awal oksigen terlarut (DO)

DO akhir = Sampel DO selepas 7 hari

P = Pecahan isipadu perpuluhan sampel yang digunakan (1ml/300ml)

### **Permintaan Oksigen Kimia (COD)**

Analisis Permintaan Oksigen Kimia (COD) dijalankan menggunakan kaedah Closed Reflux Method mengikut APHA 5220 D, dengan proses pengoksidaan dijalankan menggunakan reaktor COD sebelum bacaan diambil mengikut prosedur piawai..



Rajah 2.6 Botol-botol diletakkan di dalam reaktor COD

Tahap COD kemudiannya ditentukan menggunakan spektrofotometer DR2010.

### **Jumlah Nitrogen Ammonia (TAN)**

Analisis Jumlah Nitrogen Ammonia (TAN) dijalankan untuk menentukan kepekatan ammonia dalam sampel air, merangkumi ammonia tak terion ( $NH_3$ ) dan ion ammonium ( $NH_4^+$ ). Analisis dilakukan menggunakan kaedah penyulingan dan pentitratan mengikut piawaian APHA seperti yang diringkaskan dalam Jadual 2.1. Sampel disuling bagi mengekstrak ammonia sebelum dititrat menggunakan larutan piawai untuk menentukan kepekatan TAN.

$$NH_3 - N \left( \frac{mg}{L} \right) = \frac{(A - B) \times 0.02 \times 14 \times 1000}{mL \text{ sample}} \quad (2.2)$$

Di mana;

A= isipadu H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> yang dititrasikan untuk sampel

B= isipadu H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> yang dititrasikan untuk sampel kosong

14= berat atom N

0.02= N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>



Rajah 2.7 Penyulingan sampel dengan radas Buchi

### Jumlah Pepejal Terampai (TSS)

Analisis Jumlah Pepejal Terampai (TSS) dijalankan untuk menentukan kandungan pepejal terampai dalam sampel air menggunakan kaedah gravimetrik mengikut APHA 2540 D seperti yang diringkaskan dalam Jadual 2.1. Sampel air dituras menggunakan penapis gentian kaca (GF/A), diikuti proses pengeringan dan penimbangan sebelum serta selepas penurasan. Nilai TSS ditentukan berdasarkan perubahan berat penapis akibat pemendapan pepejal terampai.



Rajah 2.8 Penapis gentian kaca (GF/A) dikeringkan terlebih dahulu dalam ketuhar yang ditetapkan pada suhu 104°C selama 15 minit



Rajah 2.9 Radas untuk penapisan vakum

Jumlah TSS dalam sampel air dikira menggunakan formula berikut:

$$TSS \left( \frac{mg}{L} \right) = \frac{(Y - X) \times 1000}{\text{volume of sample (mL)}} \quad (2.3)$$

Di mana;

Y = Kertas turas + mangkuk pijar + baki

X = Kertas turas + mangkuk pijar

### **pH**

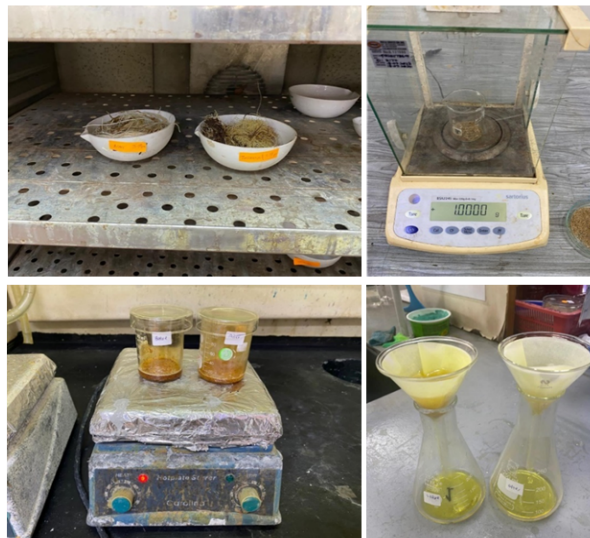
Nilai pH sampel air diukur menggunakan meter pH yang telah dikalibrasi mengikut prosedur piawai sebelum analisis dijalankan. Bacaan pH diperoleh secara terus selepas prob direndam ke dalam sampel air seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2.10.



Rajah 2.10 Meter pH

### **Menilai Pencemaran Logam Berat dalam Sampel Air Menggunakan Teknik ICP-OES**

Analisis logam berat dalam sampel air dijalankan menggunakan teknik Spektroskopi Pelepasan Optik Plasma Gandingan Aruhan (Inductively Coupled Plasma–Optical Emission Spectroscopy, ICP-OES). Sebelum analisis, sampel disediakan melalui proses pencernaan asid bagi melarutkan unsur logam yang terkandung di dalamnya. Kepekatan logam berat kemudiannya ditentukan menggunakan ICP-OES mengikut prosedur analisis piawai bagi menilai tahap pencemaran dan keberkesanan kaedah rawatan terapung dalam mengurangkan kandungan logam berat.



Rajah 2.11 Penyediaan sampel untuk Ujian ICP-OES

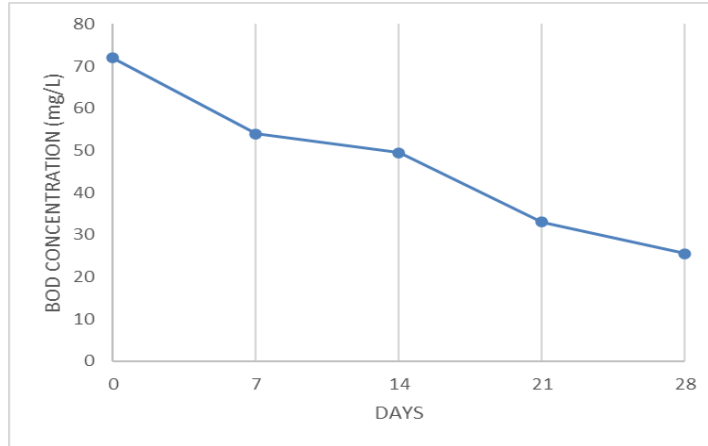
## **KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN**

### **Parameter Kualiti Air terhadap Prestasi Kaedah Rawatan Terapung**

Keberkesanan kaedah rawatan terapung telah dinilai menggunakan lima parameter kualiti air utama: Permintaan Oksigen Biokimia (BOD), Permintaan Oksigen Kimia (COD), pH, Jumlah Pepejal Terampai (TSS), dan Jumlah Nitrogen Ammonia (TAN). Penilaian ini dijalankan mengikut keperluan Jabatan Alam Sekitar (JAS). Parameter tersebut telah dibandingkan dengan Piawaian Kualiti Air Kebangsaan (NWQS) dan nilai sub-indeks untuk menentukan Indeks Kualiti Air (WQI).

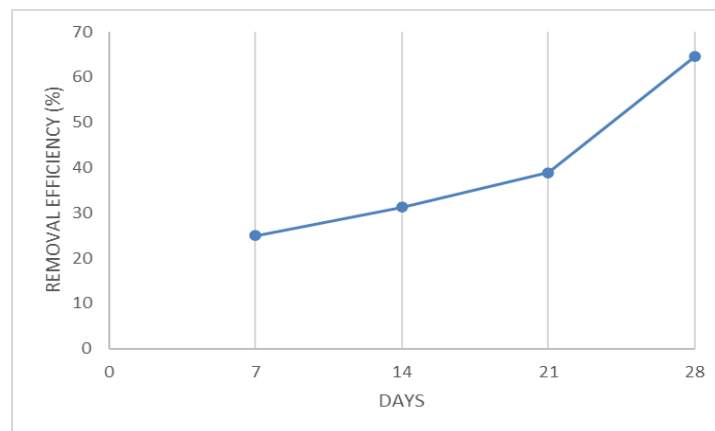
### **Keperluan Oksigen Biokimia (BOD)**

*Limnocharis flava* terbukti berkesan mengurangkan kepekatan BOD dalam tempoh rawatan 30 hari, seperti yang digambarkan dalam Rajah 3.1. Penurunan linear BOD disebabkan oleh keupayaan tumbuhan untuk menyerap bahan organik dan nutrien, dibantu oleh mikroorganisma yang memecahkan bahan organik kepada nutrien yang lebih ringkas untuk penyerapan tumbuhan. Pertumbuhan sistem akar tumbuhan membentuk rangkaian akar bersalut biofilm, yang meningkatkan pengambilan nutrien dan degradasi mikrob bahan pencemar organik, seterusnya mengurangkan tahap BOD (Shahid et al., 2018; Shen, Li, dan Lu, 2021).



Rajah 3.1 Kepekatan Permintaan Oksigen Biokimia

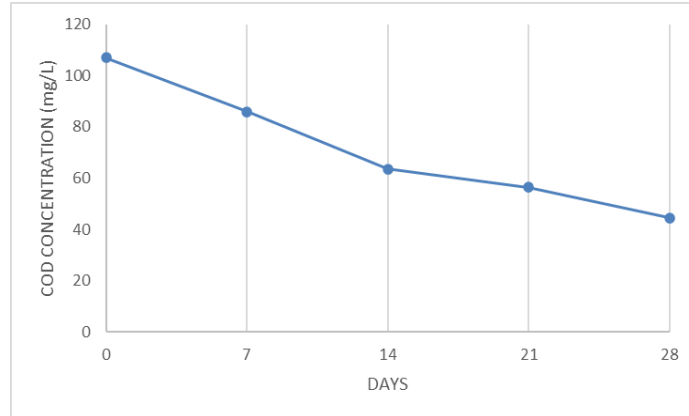
Rajah 3.2 menggambarkan kecekapan penyingkiran BOD, menunjukkan peningkatan linear dengan kecekapan penyingkiran maksimum sebanyak 64.58%. Prestasi ini sejajar dengan julat pengurangan BOD yang dijangkakan sebanyak 36% hingga 90% untuk tanah lembap rawatan terapung (Čule et al., 2022), yang menonjolkan potensi *Limnocharis flava* dalam meningkatkan kualiti air di badan air yang tercemar.



Rajah 3.2 Kecekapan Penyingkiran Permintaan Oksigen Biokimia

### **Permintaan Oksigen Kimia (COD)**

Kepekatan COD untuk *Limnocharis flava* ditunjukkan dalam Rajah 3.3, menunjukkan penurunan dari semasa ke semasa. Nilai COD adalah lebih tinggi daripada BOD kerana COD mengukur jumlah oksigen yang diperlukan untuk menguraikan komponen organik dan bukan organik, manakala BOD memberi tumpuan kepada oksigen yang diperlukan untuk penguraian mikrob bahan organik (Prihatini et al., 2019). Dalam tanah lembap rawatan terapung, pengurangan COD dan BOD menunjukkan keberkesanan tumbuhan dalam mengurangkan pencemaran air. *Limnocharis flava* menyerap mineral dan bahan organik, mengurangkan BOD, manakala sistem akarnya dan biofilm yang berkaitan membantu dalam pengoksidaan dan penyingkiran sebatian lain, sekali gus menurunkan COD.

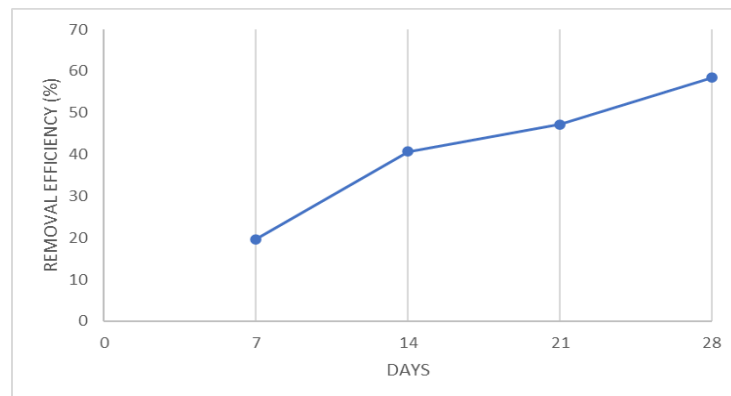


Rajah 3.3 Kepekatan Permintaan Oksigen Kimia

Tahap COD awal yang tinggi, kemungkinan besar disebabkan oleh larian air hujan di kawasan bandar, menurun dengan ketara sepanjang tempoh kajian, menunjukkan keberkesanan *Limnocharis flava*. Sistem akar tumbuhan yang luas, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3.4, menyediakan luas permukaan yang besar untuk lekatan mikroorganisma, yang penting untuk penguraian metabolik bahan organik. Rangkaian biofilm pada akar menyokong pelbagai bakteria yang menguraikan bahan cemar dan menyediakan oksigen untuk proses aerobik (Shen, Li, dan Lu, 2021; Islam, Saeed, dan Majed, 2022). Rajah 3.5 menggambarkan peningkatan kecekapan penyingkiran COD, mencapai maksimum 58.41%, menunjukkan kejayaan tumbuhan dalam meningkatkan kualiti air melalui kaedah rawatan terapung.



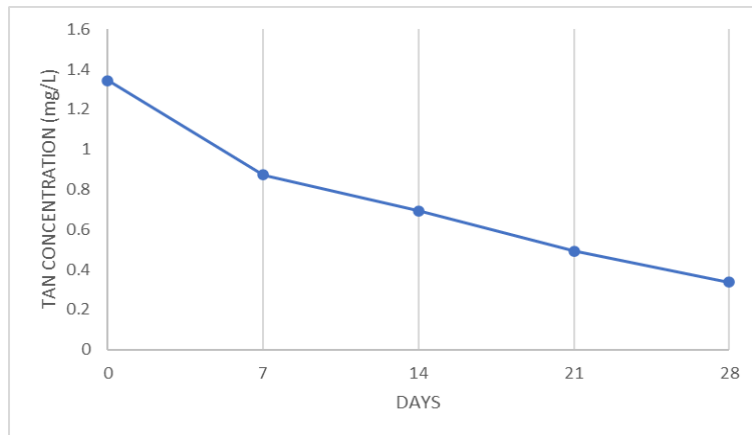
Rajah 3.4 Sistem akar Limnocharis flava



Rajah 3.5 Kecekapan Penyingkiran Permintaan Oksigen Kimia

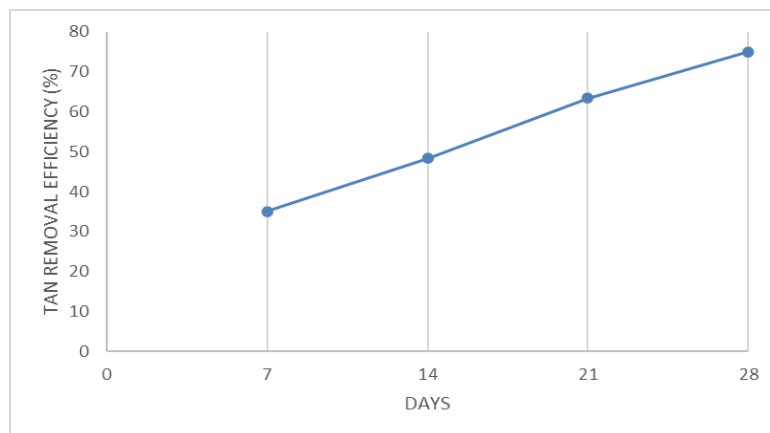
### Jumlah Nitrogen Ammonia (TAN)

Rajah 3.6 menunjukkan kepekatan Jumlah Nitrogen Ammonia (TAN) untuk *Limnocharis flava*, yang berkurangan secara linear dari semasa ke semasa. Pengurangan ini terutamanya disebabkan oleh aktiviti mikrob dalam rizosfera, yang meningkatkan penyingkiran nitrogen dengan mempercepatkan penguraian nitrogen dan menjadikannya lebih mudah untuk penyerapan tumbuhan (Ting et al., 2018). Pada mulanya, air kolam mempunyai tahap pencemaran nitrogen yang tinggi, seperti yang dibuktikan oleh kepekatan TAN yang tinggi pada hari ke-0. Penurunan tahap TAN secara beransur-ansur menunjukkan keberkesanan *Limnocharis flava* dalam penyingkiran nitrogen daripada air.



Rajah 3.6 Kepekatan Jumlah Nitrogen Ammonia

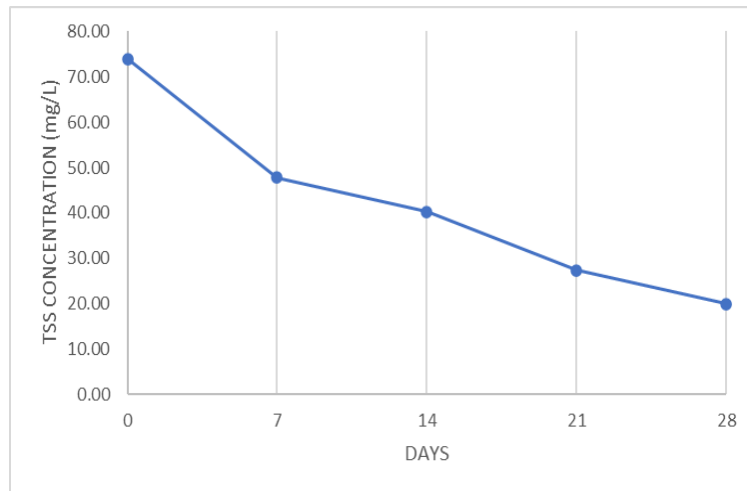
Proses ini melibatkan bakteria nitrifikasi yang menukarkan ion ammonium menjadi nitrat dengan kehadiran oksigen, dan bakteria denitrifikasi yang menukarkan nitrat menjadi gas nitrogen secara anaerobik. Tumbuhan juga menyerap nitrogen secara langsung, dan biofilm pada akar menyumbang kepada pengurangan TAN, sekali gus meningkatkan kualiti air. Rajah 3.7 menunjukkan kecekapan penyingkiran TAN, yang meningkat secara berterusan dalam tempoh 30 hari, mencapai maksimum 75%. Kadar penyingkiran yang tinggi ini menonjolkan kebolehsuaian dan kecekapan tumbuhan dalam meningkatkan kualiti air. *Limnocharis flava* boleh tumbuh subur dalam persekitaran tercemar dan menahan cabaran seperti banjir dan kemasinan, menjadikannya tumbuhan yang berkesan untuk merawat badan air yang tercemar (Putra, Santosa, Dan Salsinha, 2023).



Rajah 3.7 Kecekapan Penyingkiran Jumlah Nitrogen Ammonia

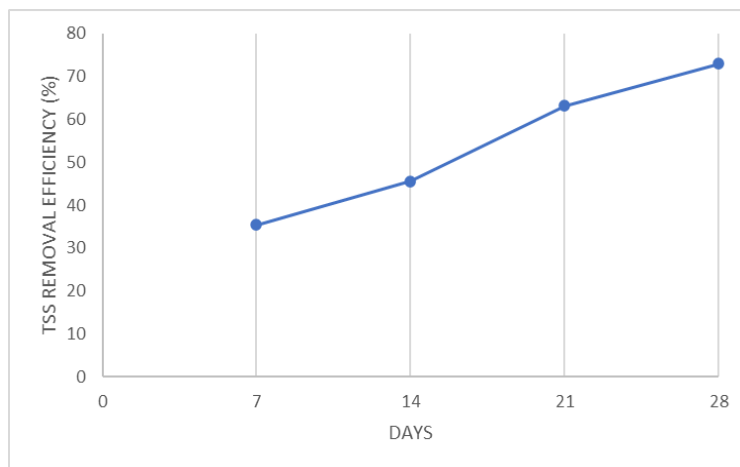
### Jumlah Pepejal Terampai (TSS)

Rajah 3.8 menunjukkan penurunan berterusan dalam kepekatan Jumlah Pepejal Terampai (TSS) sepanjang tempoh kajian 30 hari, menunjukkan bahawa tanah lembap rawatan terapung dengan *Limnocharis flava* berkesan menyingkirkan zarah terampai daripada air. Pengurangan ini terutamanya disebabkan oleh pengendapan dan penapisan fizikal, dengan rangkaian akar tumbuhan yang padat menyediakan luas permukaan yang besar untuk lekatan zarah dan sedimen, sekali gus menurunkan tahap TSS.



Rajah 3.8 Kepekatan Jumlah Pepejal Terapai

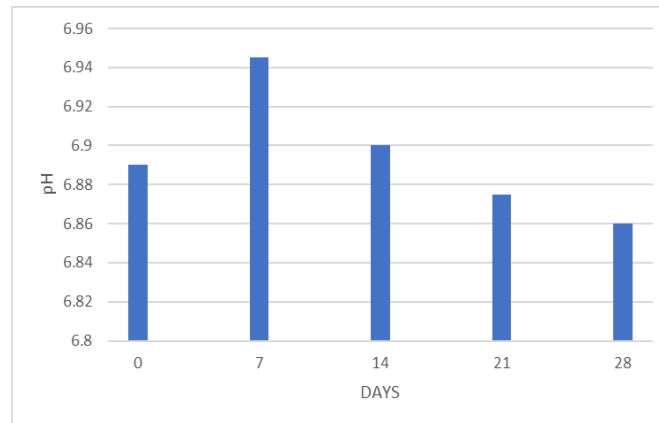
Keberkesanan *Limnocharis flava* dalam penyingkiran TSS digambarkan dalam Rajah 3.9. Kecekapan penyingkiran secara konsisten meningkat sepanjang kajian, mencapai puncak 73%. Kecekapan penyingkiran yang tinggi ini menunjukkan keupayaan tumbuhan yang ketara untuk mengurangkan tahap TSS dalam air. Faktor-faktor yang mempengaruhi kecekapan penyingkiran termasuk jenis tumbuhan, kepadatan akar dan keadaan persekitaran. Prestasi loji rawatan ini sejajar dengan kadar penyingkiran yang dilaporkan untuk tanah lembap rawatan terapung, yang berkisar antara 49% hingga 99.4% (Ali et al., 2020b), yang mengesahkan kecekapannya dalam mengekalkan kualiti air.



Rajah 3.9 Kecekapan Penyingkiran Jumlah Pepejal Terapai

### **pH**

Rajah 3.10 menunjukkan nilai pH sepanjang tempoh 30 hari penggunaan *Limnocharis flava* dalam rawatan terapung, yang menunjukkan corak yang kecil tetapi ketara. Tahap pH adalah penting kerana ia boleh mempengaruhi pertumbuhan tumbuhan dan penyerapan nutrien bergantung pada pilihan spesies tumbuhan. Bacaan pH dalam Rajah 4.10 menunjukkan perubahan kecil, antara 6.89 hingga 6.95. Secara amnya, kebanyakan tumbuhan akuatik memerlukan keadaan pH yang sedikit berasid hingga neutral untuk menggalakkan pertumbuhan dan pengambilan nutrien. Ia menunjukkan julat yang sedikit berasid hingga neutral. Walau bagaimanapun, terdapat penurunan pH yang sederhana antara hari ke-7 hingga hari ke-28, yang mungkin disebabkan oleh proses penyingkiran nutrien. Menurut (Alam et al., 2021), tumbuhan dan bakteria mengambil nutrien, seperti semasa nitrifikasi dan denitrifikasi, yang melepaskan ion hidrogen dan menyebabkan tahap pH menurun. Ini disebabkan oleh aktiviti mikrob yang berkaitan dengan kitaran nutrien boleh mengubah dinamik pH dalam persekitaran akuatik yang menjalani proses rawatan. Selain itu, dengan menghapuskan nutrien daripada turus air, pengambilan nitrogen dan fosfat tumbuhan juga boleh membantu menurunkan pH.

Rajah 3.10 pH untuk *Limnocharis flava*

### Indeks Kualiti Air (WQI)

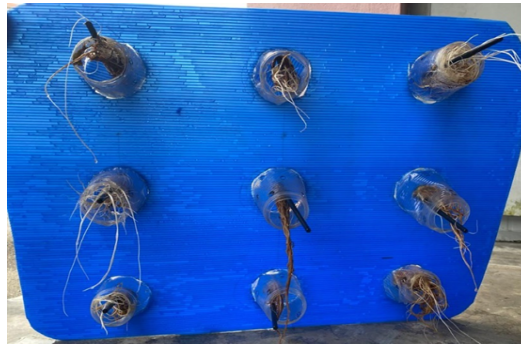
Indeks Kualiti Air (WQI) ialah ukuran komprehensif kualiti air berdasarkan pelbagai parameter. Jadual 3.1 menunjukkan nilai WQI untuk *Limnocharis flava* dalam tempoh 30 hari pada selang 7 hari. Pada mulanya, WQI ialah 29.0 pada hari ke-0, menunjukkan air 'tercemar' (Kelas V) mengikut Piawaian Kualiti Air Antarabangsa (INWQS). Air Kelas V tidak sesuai untuk pengairan, bekalan air, perikanan atau pemuliharaan alam sekitar semula jadi. Semasa tempoh rawatan, WQI semakin meningkat, mencapai 36.7 pada hari ke-7, 40.7 pada hari ke-14, 46.0 pada hari ke-21, dan 51.1 pada hari ke-28. Walaupun kualiti air kekal dalam julat 'tercemar', ia bertambah baik dari Kelas V kepada Kelas IV, yang sesuai untuk tujuan pengairan. Peningkatan WQI yang stabil ini menunjukkan kesan positif *Limnocharis flava* terhadap kualiti air, menunjukkan bahawa rawatan berterusan dapat meningkatkan lagi kualiti air ke tahap yang boleh diterima.

Jadual 3.1 Indeks kualiti air untuk *Limnocharis flava*

Sampel	Hari	Indeks Kualiti Air (WQI)
<i>Limnocharis flava</i>	0	29.0
	7	36.7
	14	40.7
	21	46.0
	28	51.1

### Sistem Akar

Sistem akar *Limnocharis flava* menunjukkan perkembangan yang ketara sepanjang tempoh kajian 28 hari. Pada mulanya, pada Hari 1, akarnya pendek dan terhad. Menjelang Hari 7, akar telah memanjang, dan akar baru yang lebih kecil mula muncul. Pada Hari 14, sistem akar menunjukkan pertumbuhan yang ketara dengan lebih banyak akar sekunder dan bulu akar halus, meningkatkan penyerapan nutrien dan mengembang ke dalam turus air. Menjelang Hari 21, rangkaian akar telah meningkat dari segi saiz dan kerumitan, dengan akar primer yang lebih panjang, lebih tebal dan lapisan akar sekunder yang padat. Menjelang 28 hari tamat, sistem akar telah tumbuh sepenuhnya dan mengembang panjang. Rangkaian akar yang tebal dan kuat dengan banyak akar baru telah tumbuh, memberikan tumbuhan lebih kestabilan dan meningkatkan keupayaannya untuk menyerap nutrien dan menyingkirkan bahan pencemar seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 4.12. Lapisan biofilm yang besar, yang diperlukan untuk penguraian bahan pencemar organik dan penyerapan nutrien, juga digalakkan oleh luas permukaan akar yang lebih besar.

Rajah 3.11 Sistem akar *Limnocharis flava* pada hari ke-1Rajah 3.12 Sistem akar *Limnocharis flava* pada hari ke-28

### Analisis Logam Berat

Jadual 3.2 membentangkan data yang menunjukkan kepekatan pelbagai unsur dalam sistem akar mentah loji rawatan dan selepas 30 hari menjalankan rawatan terapung.

Jadual 3.2 Kepekatan Pelbagai Unsur dalam Sistem Akar Mentah *Limnocharis flava* dan Sistem Akar Selepas 30 Hari Menjalankan Rawatan Terapung

Nota: <LOD menunjukkan kepekatan unsur berada di bawah had pengesanan (Limit of Detection) instrumen ICP-OES dan tidak mewakili nilai kepekatan sebenar.

Unsur	Sistem Akar Sebelum Rawatan (ppm)	Sistem Akar Selepas 30 Hari Menjalankan Loji Rawatan Terapung (ppm)
Ag	0.355212	0.224005
Al	16.1885	30.1659
Ba	0.171577	0.079417
Bi	0.315507	0.330612
Cd	<LOD	<LOD
Co	<LOD	<LOD
Cr	0.068517	0.098693
Cu	0.183035	0.2174
Fe	63.9727	105.477
Ga	0.018279	0.010104
In	0.084486	0.037231
Li	<LOD	<LOD
Mn	0.853747	1.37127
Ni	<LOD	0.020980uv
Pb	0.115301	0.270954
Tl	0.023613uv	<LOD

Zn	1.35488	1.58804
----	---------	---------

Kepekatan perak (Ag) meningkat sebanyak 58.52%, menunjukkan bahawa *Limnocharis flava* berkesan menyerap perak daripada air. Kandungan aluminium (Al) meningkat sebanyak 86.25%, menunjukkan keberkesanan yang tinggi dalam penyerapan aluminium. Kepekatan barium (Ba) dan kromium (Cr) masing-masing meningkat sebanyak 116.16% dan 44.11%, manakala kepekatan bismut (Bi) menunjukkan sedikit peningkatan sebanyak 4.79%, menunjukkan penyerapan yang terhad. Kepekatan kadmium (Cd) awal meningkat selepas rawatan, manakala kobalt (Co) menurun sedikit. Penyerapan kuprum (Cu) meningkat sebanyak 18.79%, dan besi (Fe) menunjukkan peningkatan yang ketara sebanyak 64.89%, yang tertinggi antara unsur-unsur yang diuji. Kepekatan galium (Ga), indium (In), dan mangan (Mn) juga menyaksikan peningkatan yang ketara. Kandungan nikel (Ni) meningkat walaupun kepekatannya pada mulanya rendah, menunjukkan penyerapan yang berkesan. Kepekatan plumbum (Pb) meningkat sebanyak 135.07%, manakala talium (Tl) menurun. Penyerapan zink (Zn) meningkat sebanyak 17.19%. Secara keseluruhan, dapatan ujian ICP-OES menunjukkan bahawa *Limnocharis flava* berjaya menyerap banyak logam berat daripada air, dengan peningkatan tertinggi diperhatikan untuk besi (Fe).

Jadual 3.3 Kepekatan Pelbagai Unsur dalam Air Kolam Mentah dan Air Selepas 30 Hari Menggunakan *Limnocharis flava*

Unsur	Air Kolam Mentah (ppm)	Siram selepas 30 hari menggunakan <i>Limnocharis Flava</i> (ppm)
Ag	0.170361	0.118814
Al	0.77893	0.090161
Ba	0.032154uv	0.021193
Bi	0.052677uv	0.004459uv
Cd	<LOD	<LOD
Co	<LOD	<LOD
Cr	<LOD	<LOD
Cu	0.043493	0.043017
Fe	0.568221	0.025361
Ga	0.0689	0.040565
In	0.086284	0.083818
Li	<LOD	<LOD
Mn	<LOD	<LOD
Ni	0.048854uv	<LOD
Pb	0.105468	0.049818uv
Tl	<LOD	0.150441
Zn	<LOD	<LOD

Jadual 3.3 menunjukkan kepekatan unsur dalam air kolam mentah dan selepas 30 hari rawatan dengan *Limnocharis flava*. Kepekatan perak (Ag) menurun sebanyak 30.23%, manakala aluminium (Al) mengalami pengurangan ketara sebanyak 88.56%, menunjukkan keberkesanan yang tinggi dalam penyingkiran aluminium. Barium (Ba) berkurangan sebanyak 34.32%, dan bismut (Bi) mengalami penurunan yang ketara sebanyak 91.48%. Bagi beberapa unsur seperti Cd, Co, Li dan unsur lain yang dilaporkan sebagai <LOD, kepekatannya berada di bawah had pengesanan instrumen ICP-OES. Oleh itu, nilai tersebut tidak boleh ditafsirkan sebagai kepekatan negatif sebenar dan tidak sesuai digunakan untuk membuat inferens kuantitatif mengenai perubahan kepekatan selepas rawatan. Kuprum (Cu) hanya menurun sebanyak 1.09%, menunjukkan keberkesanan yang rendah. Besi (Fe) menurun dengan ketara sebanyak 95.68%, menunjukkan keberkesanan yang tinggi. Galium (Ga) menurun sebanyak 41.29%, manakala indium (In) menunjukkan pengurangan kecil sebanyak 2.85%. Litium (Li), mangan (Mn), dan nikel (Ni) dilaporkan sebagai <LOD, kepekatannya berada di bawah had pengesanan instrumen ICP-OES, dengan nikel menurun lagi, menunjukkan kemungkinan ralat pengukuran. Plumbum (Pb) berkurangan sebanyak 52.76%, dan talium (Tl) meningkat dengan ketara, menunjukkan anomali pengukuran. Peningkatan kepekatan talium (Tl) selepas rawatan mungkin dipengaruhi oleh variasi analisis, had pengesanan instrumen atau faktor lain yang tidak dapat dikenal

pasti dalam kajian ini. Oleh itu, dapatan ini perlu ditafsirkan dengan berhati-hati dan memerlukan pengesahan lanjut melalui kajian tambahan atau eksperimen dengan replikasi yang mencukupi. Zink (Zn) mengalami pengurangan kecil. Secara keseluruhan, *Limnocharis flava* menunjukkan keberkesanan yang pelbagai dalam menyingkirkan logam berat, dengan aluminium menunjukkan pengurangan tertinggi iaitu 88.56%, menunjukkan potensi tumbuhan sebagai agen fitoremediasi untuk air yang tercemar.

## KESIMPULAN

Kajian ini mengesahkan keberkesanan kaedah rawatan terapung menggunakan *Limnocharis flava* dalam mengurangkan pencemaran air. Parameter kualiti air utama, termasuk Permintaan Oksigen Biokimia (BOD), Permintaan Oksigen Kimia (COD), Jumlah Pepejal Terampai (TSS), Jumlah Nitrogen Ammonia (TAN), dan pH, menunjukkan peningkatan ketara dalam sampel air kolam yang dirawat dengan *Limnocharis flava*. Keputusan ini menggariskan keupayaan sistem rawatan terapung untuk menangkap dan merawat bahan pencemar seperti nutrien dan zarah terampai. Indeks Kualiti Air (WQI) sampel air kolam dianalisis, dengan pengukuran awal mengklasifikasikan air kolam mentah sebagai tercemar (Kelas V) berdasarkan Piawai Kualiti Air Kebangsaan (NWQS). Selepas rawatan, nilai WQI bertambah baik, mengklasifikasikan semula air kepada Kelas IV, yang, walaupun masih tercemar, menunjukkan peningkatan ketara dalam kualiti air.

Analisis logam berat menggunakan Spektroskopi Pelepasan Optik Plasma Gandingan Induktif (ICP-OES) mengesahkan lagi keberkesanan sistem. Kepekatan logam berat dalam sistem akar dan sampel air kolam menunjukkan pengurangan yang ketara, menunjukkan keupayaan tumbuhan untuk menyerap dan menyingkirkan bahan cemar ini. Secara keseluruhan, sistem rawatan terapung yang menggunakan *Limnocharis flava* berkesan mengurangkan pelbagai bahan cemar dalam air kolam, menonjolkan potensi tumbuhan sebagai agen fitoremediasi untuk meningkatkan kualiti air. Walaupun air kekal dalam klasifikasi tercemar, penambahbaikan ketara yang diperhatikan menekankan potensi sistem untuk penyelesaian rawatan air jangka panjang.

## Penghargaan

Setinggi-tinggi penghargaan diberikan kepada Pusat Pengajian Kejuruteraan Awam, Kampus Kejuruteraan, Universiti Sains Malaysia atas penyediaan kemudahan dan sokongan yang telah membantu pelaksanaan kajian ini

## Rujukan

- Arif, A. (2020) 'Water pollution and industries', *Pure and Applied Biology*, 9(4). Available at: <https://doi.org/10.19045/bspab.2020.90237>.
- Arslan, M. et al. (2023) 'A protocol to establish low-cost floating treatment wetlands for large-scale wastewater reclamation', *STAR Protocols*, 4(4), p. 102671. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.xpro.2023.102671>.
- Bi, R. et al. (2019) 'Giving waterbodies the treatment they need: A critical review of the application of constructed floating wetlands', *Journal of Environmental Management*, 238, pp. 484–498. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.064>.
- Borne, K.E., Fassman, E.A. and Tanner, C.C. (2013) 'Floating treatment wetland retrofit to improve stormwater pond performance for suspended solids, copper and zinc', *Ecological Engineering*, 54, pp. 173–182. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.01.031>.
- Colares, G.S. et al. (2020) 'Floating treatment wetlands: A review and bibliometric analysis', *Science of The Total Environment*, 714, p. 136776. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136776>.
- Čule, N. et al. (2022) 'Removal of organic matter in floating treatment wetland', *Sustainable Forestry: Collection*, (85–86), pp. 65–74. Available at: <https://doi.org/10.5937/SustFor2285065C>.
- Dotto, G.L. and McKay, G. (2020) 'Current scenario and challenges in adsorption for water treatment', *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4), p. 103988. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103988>.
- Dunca, A.-M. (2018) 'Water Pollution and Water Quality Assessment of Major Transboundary Rivers from Banat (Romania)', *Journal of Chemistry*, 2018, pp. 1–8. Available at: <https://doi.org/10.1155/2018/9073763>.
- Fan, J. et al. (2016) 'Improving low-temperature performance of surface flow constructed wetlands using *Potamogeton crispus* L. plant', *Bioresource Technology*, 218, pp. 1257–1260. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.110>.
- Henry-Silva, G.G., Camargo, A.F.M. and Pezzato, M.M. (2008) 'Growth of free-floating aquatic macrophytes in different concentrations of nutrients', *Hydrobiologia*, 610(1), pp. 153–160. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10750-008-9430-0>.
- Herath, I. and Vithanage, M. (2015) 'Phytoremediation in Constructed Wetlands', in *Phytoremediation*. Cham: Springer International Publishing, pp. 243–263. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-10969-5\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-319-10969-5_21).
- Hilt, S. et al. (2018) 'Response of Submerged Macrophyte Communities to External and Internal Restoration Measures in North Temperate Shallow Lakes', *Frontiers in Plant Science*, 9. Available at: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00194>.
- Islam, Md.A.S., Saeed, T. and Majed, N. (2022) 'Role of constructed wetlands in mitigating the challenges of industrial growth and climate change impacts in the context of developing countries', *Frontiers in Environmental Science*, 10. Available at: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1065555>.
- Jamila, C.N.S.U. et al. (2021) 'The Ethnopharmacology, Phytochemistry, Pharmacology Activities of Yellow Velvetleaf Plant (*Limnocharis flava*): A Review', *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Medicine*, 6(5), pp. 12–20. Available at: <https://doi.org/10.47760/ijpsm.2021.v06i05.002>.

- Latif, U. and Dickert, F.L. (2015) 'Biochemical Oxygen Demand (BOD)', in, pp. 729–734. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1301-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1301-5_2).
- Lesiv, M.S., Polishchuk, A.I. and Antonyak, H.L. (2020) 'Aquatic macrophytes: ecological features and functions', *Studia Biologica*, 14(2), pp. 79–94. Available at: <https://doi.org/10.30970/sbi.1402.619>.
- M, D. and Y, Y. (2016) 'Assessment of Biochemical Oxygen Demand as Indicator of Organic Load in Wastewaters of Morris County, New Jersey, USA', *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 06(03). Available at: <https://doi.org/10.4172/2161-0525.1000378>.
- Nuruzzaman, M., Anwar, A.H.M.F. and Sarukkalige, R. (2022) 'Metal Removal Kinetics, Bio-Accumulation and Plant Response to Nutrient Availability in Floating Treatment Wetland for Stormwater Treatment', *Water*, 14(11), p. 1683. Available at: <https://doi.org/10.3390/w14111683>.
- Obotey Ezugbe, E. and Rathilal, S. (2020) 'Membrane Technologies in Wastewater Treatment: A Review', *Membranes*, 10(5), p. 89. Available at: <https://doi.org/10.3390/membranes10050089>.
- Prihatini, N.S. et al. (2019) 'Performance of Floating wetland to reduce the organic matter in river water', *MATEC Web of Conferences*, 280, p. 05013. Available at: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928005013>.
- Putra, R.S., Cahyana, F. and Novarita, D. (2015) 'Removal of Lead and Copper from Contaminated Water Using EAPR System and Uptake by Water Lettuce (*Pistia Stratiotes* L.)', *Procedia Chemistry*, 14, pp. 381–386. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proche.2015.03.052>.
- Queiroz, R. de C.S. de et al. (2020) 'Assessment of autochthonous aquatic macrophytes with phytoremediation potential for dairy wastewater treatment in floating constructed wetlands', *International Journal of Phytoremediation*, 22(5), pp. 518–528. Available at: <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1686603>.
- Ranawakage, V.P., Ellawala, K.C. and Chaminda, G.G.T. (2013) 'Preliminary study on the influence of water level on the growth and morphology of *Limnocharis flava* (L.) Buchenau', *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology*, 49(4), pp. 249–254. Available at: <https://doi.org/10.1051/limn/2013058>.
- Solanki, P. et al. (2017) 'Floating Raft Wastewater Treatment System: A Review', *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 11(2), pp. 1113–1116. Available at: <https://doi.org/10.22207/JPAM.11.2.55>.
- Spangler, J.T. et al. (2019) 'Assessing nitrogen and phosphorus removal potential of five plant species in floating treatment wetlands receiving simulated nursery runoff', *Environmental Science and Pollution Research*, 26(6), pp. 5751–5768. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3964-0>.
- Ting, W.H.T. et al. (2018) 'Application of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for phytoremediation of ammoniacal nitrogen: A review', *Journal of Water Process Engineering*, 22, pp. 239–249. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.02.011>.
- Uddin, Md.G., Nash, S. and Olbert, A.I. (2021) 'A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality', *Ecological Indicators*, 122, p. 107218. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218>.
- Vymazal, J. (2022) 'The Historical Development of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment', *Land*, 11(2), p. 174. Available at: <https://doi.org/10.3390/land11020174>.
- Wu, H. et al. (2015) 'A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation', *Bioresource Technology*, 175, pp. 594–601. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.068>.