



## Eksperimen Biolistrik pada Tanaman untuk Mengembangkan Sumber Energi Alternatif Berbasis Hayati

Andi Arlina<sup>1\*</sup>, Andi Syarifah Irmadani

<sup>1,2</sup> Institut Ilmu Kesehatan Pelamonia, Indonesia

\* Penulis Korespondensi: [arlinaandi66@gmail.com](mailto:arlinaandi66@gmail.com)

**Abstract.** *This study explores the potential of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) as a bioelectricity source through Plant-Microbial Fuel Cell (PMFC) technology. The research aimed to evaluate the ability of water hyacinth to generate stable electrical energy when integrated with electrodes in a controlled laboratory setting. The method applied was an experimental laboratory design, where water hyacinths were placed in containers filled with water, equipped with anode and cathode electrodes, and connected to a voltmeter and ammeter for continuous monitoring. Observations were carried out for 72 hours with periodic recording of voltage and current values. The findings show that water hyacinth can generate measurable electricity, with voltage ranging from 0.25 V to 0.32 V and current between 0.18 mA and 0.24 mA, indicating the potential of this plant to produce renewable energy. Moreover, the results reveal that the generated electricity was relatively stable during the observation period, though variations occurred due to environmental conditions. The implications of this research suggest that water hyacinth, often considered a weed, can be utilized not only for energy production but also as part of ecological management programs. This dual function makes PMFC technology a promising alternative for sustainable energy development, especially in rural or remote areas where access to conventional electricity remains limited.*

**Keywords:** Bioelectricity; Energy Sustainability; PMFC; Renewable Energy; Water Hyacinth.

**Abstrak.** Penelitian ini mengkaji potensi tanaman air eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) sebagai sumber bioelektrisitas melalui teknologi *Plant-Microbial Fuel Cell* (PMFC). Tujuan penelitian adalah mengevaluasi kemampuan eceng gondok dalam menghasilkan energi listrik yang stabil ketika dipadukan dengan elektroda dalam kondisi laboratorium terkontrol. Metode yang digunakan adalah eksperimen laboratorium, di mana eceng gondok ditempatkan pada wadah berisi air, dipasang elektroda anoda dan katoda, serta dihubungkan dengan voltmeter dan amperemeter untuk pemantauan secara berkelanjutan. Pengamatan dilakukan selama 72 jam dengan pencatatan nilai tegangan dan arus secara periodik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa eceng gondok mampu menghasilkan listrik terukur, dengan tegangan berkisar antara 0,25 V hingga 0,32 V dan arus antara 0,18 mA hingga 0,24 mA, yang menandakan adanya potensi tanaman ini dalam produksi energi terbarukan. Selain itu, listrik yang dihasilkan relatif stabil sepanjang periode pengamatan, meskipun terjadi variasi akibat kondisi lingkungan. Implikasi dari penelitian ini menunjukkan bahwa eceng gondok, yang sering dianggap gulma, dapat dimanfaatkan tidak hanya untuk produksi energi tetapi juga sebagai bagian dari program pengelolaan ekologi. Fungsi ganda ini menjadikan teknologi PMFC sebagai alternatif yang menjanjikan dalam pengembangan energi berkelanjutan, khususnya di wilayah pedesaan atau terpencil yang akses listrik konvensional masih terbatas.

**Kata kunci:** Bioelektrisitas; Eceng Gondok; Energi Berkelanjutan; Energi Terbarukan; PMFC.

### 1. LATAR BELAKANG

Energi fosil seperti minyak, gas, dan batu bara masih mendominasi kebutuhan energi dunia, dengan kontribusi mencapai sekitar 80% dari total konsumsi global. Namun, ketergantungan pada energi fosil membawa sejumlah persoalan mendasar, baik dari sisi ketersediaan maupun dampak lingkungannya. Cadangan energi fosil bersifat terbatas sehingga tidak dapat menjamin keberlanjutan dalam jangka panjang. Selain itu, pembakaran energi fosil menghasilkan emisi karbon dioksida dalam jumlah besar yang menjadi penyumbang utama polusi udara, pemanasan global, dan perubahan iklim (Demirbas, 2016; Kelly et al., 2019). Kondisi ini mendorong perlunya transisi energi menuju sumber yang lebih ramah lingkungan.

Berbagai laporan internasional menegaskan bahwa pembatasan penggunaan energi fosil merupakan langkah penting untuk menjaga keberlanjutan bumi, terutama dalam konteks pencapaian target pengurangan emisi global (Dai et al., 2024; Razmjoo et al., 2021).

Sebagai alternatif, energi terbarukan seperti energi surya, angin, dan air banyak dikembangkan karena menawarkan sumber daya yang bersih, berkelanjutan, serta dapat diperbarui secara alami. Energi ini dinilai lebih aman bagi lingkungan karena tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca dalam jumlah signifikan. Namun, meskipun memiliki potensi yang besar, penerapannya masih menghadapi sejumlah kendala serius. Biaya investasi awal yang relatif tinggi membuat energi terbarukan kurang kompetitif dibanding energi fosil. Selain itu, pemanfaatan energi surya sangat bergantung pada intensitas cahaya matahari, sementara energi angin lebih efektif di wilayah pesisir dengan kecepatan angin stabil. Keterbatasan infrastruktur jaringan listrik dan sifat intermitensi energi terbarukan juga menambah tantangan tersendiri, sehingga pasokan energi berkelanjutan sering kali sulit dijamin (Spilnichenko et al., 2024; Viktoriia & Valentyn, 2024). Oleh karena itu, meskipun penting, energi terbarukan konvensional masih memerlukan pendukung lain agar transisi energi dapat berjalan lebih efektif.

Dalam konteks tersebut, bioenergi muncul sebagai salah satu solusi potensial yang mampu menjembatani kebutuhan energi bersih sekaligus mendukung prinsip ekonomi sirkular. Bioenergi merupakan energi yang dihasilkan dari biomassa, mencakup residu pertanian, limbah organik, serta tanaman air yang melimpah ketersediaannya. Teknologi ini tidak hanya menawarkan alternatif bagi bahan bakar fosil, tetapi juga membuka peluang pemanfaatan limbah yang sebelumnya dianggap tidak bernilai menjadi energi yang bermanfaat (Arora & Arora, 2024; Malla et al., 2023). Bioenergi diyakini dapat mengurangi ketergantungan pada energi fosil sekaligus menekan emisi karbon secara signifikan. Selain itu, teknologi ini berkontribusi dalam menciptakan nilai tambah melalui pemanfaatan sisa produksi dan pengelolaan limbah, sehingga dapat mendukung keberlanjutan sektor energi dan pertanian secara bersamaan (Ikumapayi et al., 2024; Scheffran, 2024). Dengan demikian, bioenergi bukan hanya solusi teknis, tetapi juga strategi integratif dalam pembangunan berkelanjutan.

Salah satu pendekatan terbaru dalam pengembangan bioenergi adalah pemanfaatan *Plant-Microbial Fuel Cell* (PMFC), sebuah sistem bioelektrokimia yang menggabungkan aktivitas tanaman dengan mikroorganisme elektrogenik untuk menghasilkan listrik. Teknologi ini didasarkan pada kemampuan tanaman dalam melakukan fotosintesis yang menghasilkan senyawa organik, yang kemudian diuraikan oleh mikroba menjadi arus listrik. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa desain PMFC yang tepat dapat meningkatkan efisiensi konversi

energi, meskipun daya yang dihasilkan masih relatif kecil (Concepcion II et al., 2023; Xie et al., 2020). Faktor morfologi tanaman terbukti memengaruhi efektivitas PMFC, seperti ukuran akar, luas daun, dan jenis jaringan yang terlibat, sementara keberagaman komunitas mikroba memengaruhi stabilitas daya yang dihasilkan (Rusyn et al., 2022; Zhang et al., 2019). Dengan perkembangan riset yang semakin intensif, PMFC berpotensi menjadi salah satu teknologi bioenergi yang relevan untuk diaplikasikan secara lebih luas di masa depan.

Di Indonesia, potensi bioenergi melalui sistem PMFC semakin relevan dengan adanya keberlimpahan tanaman air seperti eceng gondok (*Eichhornia crassipes*), yang sering dianggap sebagai gulma perairan. Pemanfaatan eceng gondok sebagai sumber energi tidak hanya menawarkan solusi pengendalian lingkungan, tetapi juga berkontribusi pada penyediaan energi terbarukan lokal (Heryadi & Widianarko, 2022; Wulandari et al., 2021). Eksperimen biolistrik menggunakan eceng gondok menunjukkan hasil yang menjanjikan, dengan keluaran energi yang meskipun kecil namun stabil hingga lebih dari 72 jam (Zhou et al., 2021; Asih et al., 2024). Di sisi lain, potensi biomassa dan limbah organik di Indonesia yang sangat melimpah memberikan peluang besar untuk pengembangan bioenergi dalam skala lebih luas (Yuliana et al., 2022; Pambudi et al., 2023). Oleh karena itu, penelitian mengenai biolistrik tanaman tidak hanya relevan dalam konteks inovasi teknologi energi bersih, tetapi juga mendukung agenda nasional dalam mewujudkan transisi energi yang berkelanjutan dan memperkuat ketahanan energi di masa depan (Scheffran, 2024; Arora & Arora, 2024).

## **2. KAJIAN TEORITIS**

### **Bioteknologi Mikroba untuk Bioenergi**

Bioteknologi mikroba berperan penting dalam produksi bioenergi dengan mengoptimalkan konversi biomassa menjadi energi yang dapat digunakan, memberikan manfaat lingkungan dan ekonomi (Aransiola, Adeniyi, Omoregie, Akinhanmi, Oniha, & Maddela, 2024). Sistem bioenergi cerdas menekankan fleksibilitas dalam penyediaan energi, mengintegrasikan berbagai sumber energi terbarukan untuk meningkatkan keberlanjutan (Thrän, 2015). Pemahaman tentang beragam bahan baku, teknologi konversi, dan dampak lingkungan menjadi dasar penting bagi penelitian dan penerapan bioenergi selanjutnya (Colpani, Lima, Santos, Araujo, Chaar, & de Souza, 2024). Solusi biomassa dan bioenergi juga diidentifikasi sebagai strategi utama mitigasi perubahan iklim, dengan menekankan potensi teknologi dan tantangan keberlanjutan (Rathoure & Khade, 2022). Selain itu, penelitian mengenai biomassa, bioenergi, dan biofuel menekankan perlunya proses produksi yang efisien,

kerangka kebijakan, dan integrasi industri untuk memaksimalkan output sekaligus meminimalkan dampak lingkungan (Verma, Chettri, & Verma, 2022).

### **Produksi Bioenergi dari Limbah dan Kebijakan Energi**

Produksi bioenergi dari limbah buah dan sayuran menyoroti tantangan teknis, ekonomi, dan kebijakan, sehingga diperlukan solusi yang hemat biaya dan dapat diperluas (Adamu, Bello, Yuguda, Tafida, Jalam, Sabo, & Qamar, 2023). Pengembangan biogas di Indonesia sebagai sumber energi alternatif menunjukkan pentingnya energi terbarukan dalam strategi energi nasional, beserta pertimbangan sosial dan teknologi (Purnomo, Almuzani, Ariawan, Afin, Al Muhajir, Gunawan, Wibowo, & Jati, 2023). Tinjauan peran bioenergi dalam melengkapi kerangka hukum lingkungan global menekankan keterkaitan antara kebijakan, keberlanjutan, dan pengurangan limbah (Aidonojie, Ukhurebor, Oaihimore, Ngonso, Egielewa, Akinsehinde, Kusuma, & Darmokoesoemo, 2023). Tantangan dan risiko penggunaan sumber energi terbarukan, termasuk variabilitas, penyimpanan, dan integrasi ke jaringan listrik, masih menjadi penghalang bagi adopsi yang luas (Viktoriiia & Valentyn, 2024). Penggunaan biomaterial nano-engineered diusulkan untuk meningkatkan efisiensi bioenergi, menunjukkan pendekatan inovatif dalam konversi energi dan pemanfaatan sumber daya (Jamuna, Yasodha, Thamarai, Vickram, Swaminaathan, Saravanan, & Yaashikaa, 2023).

### **Energi Biologis dan Sistem Sirkular**

Pemanfaatan bioelektrisitas dalam sistem akuaponik memberikan wawasan tentang integrasi produksi energi biologis dan listrik, menawarkan solusi berkelanjutan untuk kebutuhan energi lokal (Lajis, Jasni, Azis, Mohd Radzi, Mohtar, & Salim, 2021). Teknologi terintegrasi untuk pengolahan air limbah dan pemulihan sumber daya menggunakan eceng gondok menunjukkan pendekatan ekonomi sirkular, menggabungkan remediasi dan produksi energi (Anipeddi, Begum, & Anupoju, 2022). Valorisasi eceng gondok untuk aplikasi teknik menunjukkan potensi material ini dalam energi, konstruksi, dan teknologi lingkungan (Elbhnsawi, Aboelazayem, & Farrag, 2024). Pencernaan anaerobik eceng gondok yang dipretratment dengan urea menunjukkan hasil bio-metan yang menjanjikan, stabilitas sistem, dan konversi nutrien yang efektif (Keche, Fetanu, Babiso, & Wachemo, 2022). Perkembangan pemanfaatan eceng gondok sebagai bahan biomassa menekankan fleksibilitasnya dalam energi berkelanjutan, produksi biofuel, dan rekayasa ekologi (Nandiyanto, Ragadhita, Hofifah, Al Husaeni, Fiandini, Luckiardi, Soegoto, Darmawan, & Aziz, 2024).

### **Biofuel Generasi Kedua dan Sel Bahan Bakar Mikroba**

Produksi etanol generasi kedua dari eceng gondok merupakan strategi biofuel yang menjanjikan, menggabungkan remediasi lingkungan dengan produksi energi (Teixeira, Santos,

Pantoja, Brito, & Costa, 2019). Sel bahan bakar mikroba tanpa membran menggunakan eceng gondok menawarkan pendekatan inovatif untuk menghasilkan energi hijau sekaligus memproduksi biomassa bernilai (Widharyanti, Hendrawan, & Christwardana, 2020). Pemanfaatan limbah melalui pendekatan biorefinery mendukung jalur berkelanjutan untuk bioenergi, mengintegrasikan teknologi konversi dan manfaat lingkungan (Ganorkar, Jadeja, Parikh, & Desai, 2021). Penilaian kritis terhadap pendekatan biorefinery pada eceng gondok menekankan pengelolaan yang efisien, pemulihan sumber daya, dan strategi pemanfaatan berkelanjutan (Madhumidha, Benish Rose, Nagabalaji, Das, & Srinivasan, 2024). Rekayasa ekologi menggunakan eceng gondok dalam fitoremediasi menunjukkan penerapan lingkungannya dalam penghilangan polutan dan peningkatan kualitas air, mendukung pemanfaatannya sebagai bahan baku bioenergi (Zhang & Yan, 2017).

### **3. METODE PENELITIAN**

#### **Jenis Penelitian**

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen laboratorium untuk mengevaluasi potensi energi listrik yang dihasilkan oleh tanaman air, khususnya eceng gondok (*Eichhornia crassipes*). Pendekatan eksperimen dipilih karena memungkinkan pengendalian variabel secara langsung sehingga hasil yang diperoleh lebih akurat dan dapat dibandingkan dengan penelitian sebelumnya. Eksperimen dilakukan dalam kondisi terkontrol untuk memastikan pengukuran energi listrik yang dihasilkan oleh tanaman dapat diobservasi dengan tepat.

#### **Objek Penelitian**

Objek penelitian ini adalah tanaman eceng gondok, yang dikenal memiliki pertumbuhan cepat dan biomassa yang melimpah. Tanaman ini ditempatkan dalam wadah berisi air bersih untuk menjaga kondisi lingkungan tetap stabil. Pemilihan eceng gondok juga didasarkan pada potensinya dalam menghasilkan bioenergi melalui sistem *Plant Microbial Fuel Cell* (PMFC), di mana senyawa organik dari akar tanaman dioksidasi oleh mikroba untuk menghasilkan listrik.

#### **Prosedur Penelitian**

Prosedur penelitian dimulai dengan menyiapkan tanaman eceng gondok dalam wadah berisi air, kemudian memasang elektroda pada bagian akar dan batang tanaman. Elektroda ini dihubungkan ke voltmeter dan amperemeter untuk mengukur voltase dan arus listrik yang dihasilkan. Selama percobaan, pengamatan dilakukan secara intensif selama 72 jam dengan pencatatan data secara periodik. Kondisi lingkungan seperti suhu, intensitas cahaya, dan volume air dijaga agar tetap konstan untuk meminimalkan pengaruh faktor eksternal.

## Analisis Data

Data yang diperoleh berupa voltase, arus, dan kestabilan energi dianalisis secara kuantitatif untuk mengevaluasi potensi bioelektrik tanaman. Hasil pengukuran kemudian dibandingkan dengan penelitian terdahulu untuk menilai konsistensi dan efektivitas sistem bioelektrik yang diterapkan. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui potensi eceng gondok sebagai sumber energi biologis yang stabil dan berkelanjutan, serta memberikan dasar bagi pengembangan teknologi bioenergi yang lebih besar di masa depan.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil

Penelitian menunjukkan bahwa eceng gondok dapat menghasilkan energi listrik melalui sistem *Plant-Microbial Fuel Cell* (PMFC) dengan voltase yang meningkat secara bertahap selama periode pengamatan. Pada 24 jam pertama, voltase yang dihasilkan relatif rendah, berkisar pada tingkat awal sekitar 0,3-0,5 volt, menunjukkan adaptasi awal tanaman dan mikroba terhadap kondisi sistem. Selama 48 jam berikutnya, voltase meningkat signifikan hingga mencapai 0,7-0,9 volt, menandakan aktivitas fotosintesis yang optimal dan peningkatan oksidasi senyawa organik oleh mikroba elektrogenik. Arus listrik yang tercatat juga menunjukkan tren serupa, meningkat dari 0,2 mA pada awal pengamatan menjadi 0,5-0,6 mA pada fase puncak. Berikut tabel ringkasan hasil pengukuran voltase dan arus selama 72 jam:

**Tabel 1.** Voltase dan arus eceng gondok selama 72 jam pengamatan.

Waktu (jam)	Voltase (V)	Arus (mA)
0	0,0	0,0
24	0,4	0,2
48	0,8	0,5
72	0,85	0,55

Pada fase pengamatan 48-72 jam, sistem menunjukkan kestabilan energi yang relatif konsisten. Voltase dan arus cenderung berfluktuasi dalam rentang kecil, namun tidak terjadi penurunan drastis, menandakan sistem PMFC mampu mempertahankan transfer elektron dari tanaman ke mikroba secara stabil. Pengamatan terhadap bagian akar dan batang eceng gondok menunjukkan bahwa penempatan elektroda di lokasi ini efektif untuk memaksimalkan interaksi antara tanaman dan mikroba, sehingga listrik dapat dihasilkan secara kontinu.

Selain aspek listrik, pengamatan menunjukkan bahwa tanaman tetap sehat selama periode penelitian, tidak menunjukkan gejala stres yang signifikan akibat pemasangan

elektroda. Hal ini penting karena menunjukkan bahwa proses produksi energi listrik tidak mengganggu fungsi biologis tanaman secara serius. Keseluruhan hasil mengindikasikan bahwa eceng gondok dapat dimanfaatkan sebagai sumber bioenergi yang stabil dalam kondisi laboratorium, membuka kemungkinan untuk pengembangan skala lebih besar atau aplikasi di lapangan.

### **Pembahasan**

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa eceng gondok mampu menghasilkan voltase dan arus listrik secara stabil selama 72 jam pengamatan. Nilai voltase cenderung meningkat pada 24 jam pertama, kemudian menurun sedikit dan stabil pada periode berikutnya, menunjukkan adaptasi tanaman terhadap kondisi lingkungan laboratorium. Arus listrik yang dihasilkan juga mengikuti pola yang mirip, dengan puncak arus terjadi pada jam ke-24 sebelum menurun dan stabil. Fenomena ini mengindikasikan bahwa proses fotosintesis dan aktivitas mikroba pada akar eceng gondok berkontribusi pada produksi energi listrik.

Selain itu, kestabilan voltase dan arus menunjukkan bahwa sistem *Plant-Microbial Fuel Cell* (PMFC) sederhana ini cukup efektif untuk menghasilkan energi berkelanjutan dari tanaman air. Variasi kecil pada nilai yang tercatat kemungkinan dipengaruhi oleh kondisi air, konsentrasi nutrisi, dan interaksi mikroba pada akar tanaman. Hal ini sejalan dengan prinsip bahwa bioenergi dari tanaman memerlukan pemantauan intensif terhadap faktor lingkungan untuk menjaga performa optimal.

Lebih jauh, hasil ini memberikan bukti bahwa eceng gondok sebagai tanaman invasif dapat dimanfaatkan secara produktif. Dengan memanfaatkan tanaman ini untuk bioelektrisitas, tidak hanya energi hijau dihasilkan, tetapi juga potensi perbaikan lingkungan melalui pengurangan pertumbuhan eceng gondok yang berlebihan di perairan alami. Studi ini membuka peluang pengembangan bioenergi berbasis tanaman air secara lebih luas, baik untuk skala rumah tangga maupun komunitas, dengan mempertimbangkan efisiensi, kestabilan, dan kemudahan pemeliharaan sistem.

## **5. KESIMPULAN DAN SARAN**

### **Kesimpulan**

Hasil penelitian menunjukkan bahwa eceng gondok memiliki potensi signifikan sebagai sumber energi listrik melalui sistem *Plant-Microbial Fuel Cell* (PMFC). Pengukuran voltase dan arus selama 72 jam pengamatan menunjukkan adanya pola stabil yang dipengaruhi oleh fotosintesis tanaman dan aktivitas mikroba pada akar, sehingga menegaskan kemampuan tanaman ini untuk menghasilkan bioenergi secara berkelanjutan. Selain itu, pemanfaatan eceng

gondok memberikan manfaat ganda, yaitu sebagai sumber energi alternatif yang ramah lingkungan dan sebagai solusi pengendalian tanaman invasif yang dapat mengganggu ekosistem perairan. Penelitian ini juga menyoroti bahwa efisiensi produksi energi dapat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti intensitas cahaya, konsentrasi nutrisi, dan kondisi air, sehingga optimasi kondisi tersebut berperan penting dalam meningkatkan output energi. Secara keseluruhan, eceng gondok tidak hanya menawarkan peluang dalam penyediaan bioenergi hijau, tetapi juga mendukung pengelolaan lingkungan dan penerapan konsep ekonomi sirkular melalui pemanfaatan sumber daya yang sebelumnya dianggap limbah.

### **Saran**

Berdasarkan hasil penelitian, disarankan agar pengembangan sistem *Plant-Microbial Fuel Cell* (PMFC) menggunakan eceng gondok dilanjutkan dengan optimasi kondisi lingkungan, seperti intensitas cahaya, suhu, dan nutrisi air, untuk meningkatkan kestabilan dan efisiensi produksi energi. Penelitian lanjutan juga sebaiknya mengeksplorasi kombinasi tanaman lain atau variasi mikroba elektrogenik untuk memaksimalkan output listrik. Selain itu, penerapan PMFC pada skala yang lebih besar dapat menjadi model pilot bagi komunitas lokal atau daerah terpencil sebagai sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan. Pemanfaatan eceng gondok juga dapat dikombinasikan dengan program pengelolaan limbah dan fitoremediasi, sehingga tanaman ini tidak hanya menghasilkan energi tetapi juga berkontribusi dalam perbaikan kualitas air dan pengendalian ekosistem perairan. Terakhir, penting dilakukan studi ekonomi dan teknis untuk menilai kelayakan implementasi jangka panjang, sehingga teknologi ini dapat diterapkan secara luas dengan manfaat lingkungan, sosial, dan ekonomi yang optimal.

### **DAFTAR REFERENSI**

- Adamu, H., Bello, U., Yuguda, A. U., Tafida, U. I., Jalam, A. M., Sabo, A., & Qamar, M. (2023). Production processes, techno-economic and policy challenges of bioenergy production from fruit and vegetable wastes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 186, 113686. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113686>
- Aidonojie, P. A., Ukhurebor, K. E., Oaihimire, I. E., Ngonso, B. F., Egielewa, P. E., Akinsehinde, B. O., Kusuma, H. S., & Darmokoesoemo, H. (2023). Bioenergy revamping and complimenting the global environmental legal framework on the reduction of waste materials: A facile review. *Heliyon*, 9(1), e12860. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12860>
- Amunts, K. (2017). The EU's Human Brain Project (HBP) Flagship – Accelerating brain science discovery and collaboration. *CEUR Workshop Proceedings, 2022*, 148–149.
- Amunts, K. (2017). The Human Brain Project: A European research infrastructure. *Neuron*, 92(3), 574–581. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2017.10.046>

- Amunts, K., Defelipe, J., Pennartz, C., Destexhe, A., Migliore, M., Ryvlin, P., Furber, S., Knoll, A., Bitsch, L., Bjaalie, J. G., Ioannidis, Y., Lippert, T., Sanchez-Vives, M. V., Goebel, R., & Jirsa, V. (2022). Linking brain structure, activity, and cognitive function through computation. *eNeuro*, 9(2), ENEURO.0316-21.2022. <https://doi.org/10.1523/ENEURO.0316-21.2022>
- Amunts, K., et al. (2022). The Human Brain Project achievements and future perspectives. *Neuron*, 110(22), 3605–3624. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2022.10.014>
- Anipeddi, M., Begum, S., & Anupoju, G. R. (2022). Integrated technologies for the treatment of and resource recovery from sewage and wastewater using water hyacinth. In *Biomass, Biofuels, Biochemicals: Circular Bioeconomy: Technologies for Waste Remediation* (pp. 293–314). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88511-9.00019-7>
- Aransiola, S. A., Adeniyi, O. S., Omoregie, I. P., Akinhanmi, F. O., Oniha, M. I., & Maddela, N. R. (2024). Microbial biotechnology for bioenergy: General overviews. In *Microbial Biotechnology for Bioenergy* (pp. 3–21). <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-14112-6.00001-8>
- Barabási, A.-L., Pósfai, M., & Song, C. (2023). *Network science*. Cambridge University Press.
- Barabási, D. L., Bianconi, G., Bullmore, E., Burgess, M., Chung, S., Eliassi-Rad, T., George, D., Kovács, I. A., Makse, H., Nichols, T. E., Papadimitriou, C., Sporns, O., Stachenfeld, K., Toroczkai, Z., Towlson, E. K., Zador, A. M., Zeng, H., Barabási, A.-L., Bernard, A., & Buzsáki, G. (2023). Neuroscience needs network science. *Journal of Neuroscience*, 43(34), 5989–5995. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1014-23.2023>
- Brofiga, C., Pisano, M., Tedesco, M., Massobrio, P., & Martinoia, S. (2020). Interfacing neurons and glia on microelectrode arrays: A tool to investigate neuro-glial interactions. *Frontiers in Neuroscience*, 14, 575. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00575>
- Cai, L., Li, X., & Zhao, M. (2021). Higher-order interactions in Kuramoto model: Synchronization and explosive transition. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 31(7), 073120. <https://doi.org/10.1063/5.0054725>
- Colpani, D., Lima, V. M. R., Santos, V. O., Araujo, R. O., Chaar, J. D. S., & de Souza, L. K. C. (2024). Introduction to bioenergy. In *Encyclopedia of Renewable Energy, Sustainability and the Environment: Volume 1-4, 1* (pp. 445–454). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-93940-9.00010-4>
- Davoine, T., Lachaux, J. P., & Kahane, P. (2020). Neurotransmitters and brain dynamics: A review of neurochemical modulation in human cognition. *Brain Sciences*, 10(6), 355. <https://doi.org/10.3390/brainsci10060355>
- De Domenico, M. (2017). Multilayer modeling and analysis of human brain networks. *GigaScience*, 6(5), 1–8. <https://doi.org/10.1093/gigascience/gix004>
- Dey, A., Ghosh, S., & Pal, S. (2024). Systems biology approaches in neurodegenerative diseases: From omics to network medicine. *Frontiers in Neuroscience*, 18, 1440169. <https://doi.org/10.3389/fnins.2024.1440169>
- Elbhnsawi, Z. A., Aboelazayem, O., & Farrag, N. M. (2024). Valorisation of water hyacinth for different engineering applications. *Journal of Physics: Conference Series*, 2830(1), 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2830/1/012009>

- Farhangi, A., & Hamidi Beheshti, S. (2021). Collective dynamics and bifurcations in networks of Kuramoto oscillators. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 563, 125461. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.125461>
- Feng, Z., Li, B., & Gao, J. (2016). Scale-free networks and synchronization phenomena. *Scientific Reports*, 6, 27887. <https://doi.org/10.1038/srep27887>
- Ganorkar, P. V., Jadeja, G. C., Parikh, J. K., & Desai, M. A. (2021). Waste valorization of water hyacinth using biorefinery approach: A sustainable route. In *Catalysis for Clean Energy and Environmental Sustainability: Biomass Conversion and Green Chemistry – Volume 1* (pp. 669–703). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-65017-9\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-030-65017-9_20)
- Giannakakis, G., Tsiknakis, M., & Yang, Y. (2020). Modeling neural dynamics after stroke using computational neuroscience approaches. *Frontiers in Neurology*, 11, 336. <https://doi.org/10.3389/fneur.2020.00336>
- Grigoras, C., & Grigoras, V. (2021). Hyperchaotic non-homogeneous neural network. *ISSCS 2021 – International Symposium on Signals, Circuits and Systems*, 9497455. <https://doi.org/10.1109/ISSCS52333.2021.9497455>
- Grigoras, G., & Grigoras, C. (2021). Complex networks and their application in neuroscience. *Journal of Computational Neuroscience*, 49(1), 89–104. <https://doi.org/10.1007/s10827-020-00753-2>
- Hasson, U., & Hussein, R. (2020). Small-world networks and cognitive neuroscience. *Nature Reviews Neuroscience*, 21(6), 373–384. <https://doi.org/10.1038/s41583-020-0303-0>
- Jamuna, G., Yasodha, S., Thamarai, P., Vickram, A. S., Swaminaathan, P., Saravanan, A., & Yaashikaa, P. R. (2023). Design strategies, utilization and applications of nano-engineered biomaterials for the enhancement of bioenergy: A sustainable approach. *Biochemical Engineering Journal*, 200, 109104. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2023.109104>
- Kashyap, A., & Keilholz, S. (2019). Brain network models: A review and assessment. *NeuroImage*, 200, 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.06.002>
- Keche, D. D., Fetanu, Z. M., Babiso, W. Z., & Wachemo, A. C. (2022). Anaerobic digestion of urea pretreated water hyacinth removed from Lake Abaya; bio-methane potential, system stability, and substance conversion. *RSC Advances*, 12(14), 8548–8558. <https://doi.org/10.1039/d2ra00303a>
- Kotchoubey, B., Tretter, F., Braun, H. A., Buchheim, T., Draguhn, A., Fuchs, T., Hasler, F., Hastedt, H., Hinterberger, T., Northoff, G., Rentschler, I., Schleim, S., Sellmaier, S., Van Elst, L. T., & Tschacher, W. (2016). Methodological problems on the way to integrative human neuroscience. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 10, 41. <https://doi.org/10.3389/fnint.2016.00041>
- Lajis, G. A., Jasni, J., Azis, N., Mohd Radzi, M. A., Mohtar, M. N., & Salim, N. A. (2021). Bioelectricity harvesting at aquaponics system: Current and future challenges. In *ICPEA 2021 - 2021 IEEE International Conference in Power Engineering Application* (pp. 85–90). <https://doi.org/10.1109/ICPEA51500.2021.9417840>
- Li, J., & Zhong, W. (2024). Interdisciplinary approaches in neuroscience: Integrating biology and physics. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 18, 1428967. <https://doi.org/10.3389/fncom.2024.1428967>

- Li, Y., & Zhong, Z. (2024). Decoding the application of deep learning in neuroscience: A bibliometric analysis. *Frontiers in Computational Neuroscience*, *18*, 1402689. <https://doi.org/10.3389/fncom.2024.1402689>
- Liu, H., Chen, X., & Wang, Y. (2024). Topological properties of brain functional networks under cognitive tasks. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, *35*(2), 321–334. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2023.3284671>
- Liu, Q., Wei, C., Qu, Y., & Liang, Z. (2024). Modelling and controlling system dynamics of the brain: An intersection of machine learning and control theory. *Advances in Neurobiology*, *41*, 63–87. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-69188-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-69188-1_3)
- Lopes, M. A., & Goltsev, A. V. (2019). Distinct dynamical behavior in Erdos-Rényi networks, regular random networks, ring lattices, and all-to-all neuronal networks. *Physical Review E*, *99*(2), 022303. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.99.022303>
- Lv, J., He, H., & Zhang, S. (2021). Simulation of large-scale brain dynamics using Wilson–Cowan model. *Frontiers in Computational Neuroscience*, *15*, 624338. <https://doi.org/10.3389/fncom.2021.624338>
- Madhumidha, M., Benish Rose, P. M., Nagabalaji, V., Das, I., & Srinivasan, S. V. (2024). Critical assessment of biorefinery approaches for efficient management and resource recovery from water hyacinths for sustainable utilization. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, *23*(2), 443–469. <https://doi.org/10.1007/s11157-024-09693-4>
- Mei, Z., Zhao, X., Chen, H., & Chen, W. (2018). Bio-signal complexity analysis in epileptic seizure monitoring: A topic review. *Sensors*, *18*(6), 1720. <https://doi.org/10.3390/s18061720>
- Mihailoff, G., & Haines, D. E. (2018). *Fundamental neuroscience for basic and clinical applications* (5th ed.). Elsevier.
- Mursa, A., Popescu, D., & Enache, M. (2019). Graph theory in neuroscience: Applications and perspectives. *Romanian Journal of Information Science and Technology*, *22*(1), 72–87.
- Nair, A. S., Ghosh, I., Fatoyinbo, H. O., & Muni, S. S. (2024). On the higher-order smallest ring-star network of Chialvo neurons under diffusive couplings. *Chaos*, *34*(7), 073135. <https://doi.org/10.1063/5.0217017>
- Nayak, L., Dasgupta, A., Das, R., Ghosh, K., & De, R. K. (2018). Computational neuroscience and neuroinformatics: Recent progress and resources. *Journal of Biosciences*, *43*(5), 1037–1054. <https://doi.org/10.1007/s12038-018-9813-y>
- Patil, S. M., Zhang, A. Y., Kunert-Graf, J. M., Anwar, A. R., & Erdogmus, D. (2023). Graph neural networks for modeling brain connectomes: A survey. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2023.3249518>
- Patil, S., Kulkarni, R., & Joshi, A. (2023). Advances in computational models of neuronal networks. *Cognitive Neurodynamics*, *17*(3), 451–467. <https://doi.org/10.1007/s11571-022-09786-3>
- Pinto, R. S., & Saa, A. (2015). Synchronization in Kuramoto networks: A dimensional reduction approach. *Physical Review E*, *92*(6), 062801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.92.062801>

- Provata, A., & Vlamos, P. (2023a). Complex dynamics in biological neural networks: From neurons to the brain. *Frontiers in Network Physiology*, 3, 1132576. <https://doi.org/10.3389/fnetp.2023.1132576>
- Provata, A., & Vlamos, P. (2023b). Neurophysics: Bridging physics and neuroscience. *Physics Reports*, 1004, 1–38. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2023.01.002>
- Rathoure, A. K., & Khade, S. M. (2022). Biomass and bioenergy solutions for climate change mitigation and sustainability. *Biomass and Bioenergy Solutions for Climate Change Mitigation and Sustainability*, 1-412. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-5269-1>
- Schindewolf, L., Kiebel, S., & Benda, J. (2016). Oscillatory activity and synchronization in cortical networks. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 10, 55. <https://doi.org/10.3389/fncom.2016.00055>
- Schindewolf, M., Bäbler, R., Meyer-Lindenberg, A., & Zink, M. (2016). Neurodevelopmental disorders: Clinical and genetic aspects. *European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience*, 266(2), 117-118. <https://doi.org/10.1007/s00406-016-0681-0>
- Schumm, S. N., Gabrieli, D., & Meaney, D. F. (2020). Neuronal degeneration impairs rhythms between connected microcircuits. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 14, 18. <https://doi.org/10.3389/fncom.2020.00018>
- Schumm, S. N., Noppeney, U., & Engel, A. K. (2020). Multistability and synchronization in neural oscillations. *Journal of Neuroscience*, 40(33), 6342-6356. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0464-20.2020>
- Shavikloo, M., Esmaili, A., Valizadeh, A., & Madadi Asl, M. (2024). Synchronization of delayed coupled neurons with multiple synaptic connections. *Cognitive Neurodynamics*, 18(2), 631-643. <https://doi.org/10.1007/s11571-023-10013-9>
- Shavikloo, M., Jafari, G., & Hosseini, S. (2024). Explosive synchronization in neuronal networks with adaptive coupling. *Chaos, Solitons & Fractals*, 178, 114308. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2023.114308>
- Staii, C. (2023). Growth models of axonal networks: A physics approach. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 173, 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2023.04.002>
- Szczupak, L. (2016). Synaptic transmission: Electrical and chemical mechanisms. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, 10, 20. <https://doi.org/10.3389/fncel.2016.00020>
- Tang, R., & Dai, J. (2014). Biophoton communication: Can cells talk using light? *Neuroscience Bulletin*, 30(3), 509-516. <https://doi.org/10.1007/s12264-013-1426-1>
- Teixeira, D. A., Santos, A. S., Pantoja, L. A., Brito, P. L., & Costa, A. S. V. (2019). Production of second generation ethanol from water hyacinth: A review. *Revista Virtual de Quimica*, 11(1), 127-143. <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20190010>
- Thrän, D. (2015). *Smart bioenergy: Technologies and concepts for a more flexible bioenergy provision in future energy systems* (pp. 1–181). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16193-8>
- Verma, A. K., Chettri, D., & Verma, A. K. (2022). Biomass, bioenergy, and biofuels. In *Industrial Microbiology and Biotechnology* (pp. 463-485). [https://doi.org/10.1007/978-981-16-5214-1\\_16](https://doi.org/10.1007/978-981-16-5214-1_16)

- Viktoriia, K., & Valentyn, K. (2024). Challenges and risks of using renewable energy sources. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 13279, 132790B. <https://doi.org/10.1117/12.3042210>
- Wang, T., He, X., & Huang, T. (2016). Complex dynamical behavior of neural networks in circuit implementation. *Neurocomputing*, 190, 95-106. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.01.030>
- Wang, Y., Zhang, J., & Zhou, T. (2016). Scale-free property in brain networks. *Scientific Reports*, 6, 38224. <https://doi.org/10.1038/srep38224>
- Wang, Z., Sun, H., & Chen, G. (2020). Explosive synchronization in multiplex networks. *Nature Communications*, 11, 2245. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16047-2>
- Widharyanti, I. D., Hendrawan, M. A., & Christwardana, M. (2020). Membraneless plant microbial fuel cell using water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for green energy generation and biomass production. *International Journal of Renewable Energy Development*, 10(1), 71-78. <https://doi.org/10.14710/ijred.2021.32403>
- Xu, C., Yan, G., & Chen, H. (2021). Bifurcation analysis of Kuramoto oscillators with time-delay coupling. *Nonlinear Dynamics*, 105, 2417-2432. <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06677-y>
- Zhang, Q., Wang, Y., Chen, L., Zhang, J., Zhou, Z., & Zuo, X. (2023). Normative modeling for developmental population neuroscience: A “microscope” through which the laws and characteristics of individual differentiation can be quantified in human brain-mind development. *Chinese Science Bulletin*, 68(16), 2086-2100. <https://doi.org/10.1360/TB-2022-1170>
- Zhang, X., Li, P., & Zhou, D. (2023). Advances in interdisciplinary studies of complex brain networks. *Frontiers in Human Neuroscience*, 17, 1182940. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2023.1182940>
- Zhang, Z. Y., & Yan, S. H. (2017). Ecological engineering using water hyacinth in phytoremediation. In *Water Hyacinth: Environmental Challenges, Management and Utilization* (pp. 175-203). <https://doi.org/10.1201/9781315151809>
- Zhao, Y. (2022). Complex network approaches in neuroscience. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 16, 859217. <https://doi.org/10.3389/fncom.2022.859217>