

DARI ENERGI MENJADI LISTRIK, DARI LISTRIK MENJADI PIKIRAN

Mitokondria, Ion, Neuron, dan Pertanyaan tentang Kesadaran

Umar Abdul Aziz, C.HTE

Holistic Wellness Therapist

Abstrak

Tubuh manusia merupakan sistem biologis yang secara terus-menerus mengubah energi kimia menjadi bentuk energi yang dapat digunakan untuk mempertahankan kehidupan. Salah satu bentuk energi utama tersebut adalah adenosine triphosphate (ATP). Dalam sistem saraf, kebutuhan energi sangat tinggi karena neuron harus mempertahankan gradien elektrokimia, menjalankan transmisi sinaptik, mempertahankan homeostasis ion, serta mendukung berbagai proses metabolik. Mitokondria merupakan organel penting dalam penyediaan energi tersebut, terutama melalui proses fosforilasi oksidatif.

Gradien ion, terutama Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , dan Cl^- , pada membran neuron memungkinkan terbentuknya potensial membran dan perubahan listrik yang mendasari potensial aksi. Na^+/K^+ -ATPase menggunakan energi dari ATP untuk mempertahankan distribusi ion, sedangkan pembukaan kanal ion memungkinkan pergerakan ion yang secara langsung mengubah potensial membran dan menghasilkan sinyal listrik.

Rangkaian proses tersebut membawa pembahasan dari tingkat metabolisme seluler menuju pertanyaan mengenai pikiran dan kesadaran. Aktivitas mental diketahui sangat berkaitan dengan fungsi jaringan saraf dan membutuhkan metabolisme energi. Namun, hubungan antara aktivitas neural dan pengalaman subjektif belum sepenuhnya dipahami. Demikian pula, pertanyaan apakah kesadaran dapat direduksi sepenuhnya menjadi proses fisik, apakah sistem nonbiologis yang mereplikasi fungsi otak dapat memiliki kesadaran, serta bagaimana kehendak bebas berhubungan dengan aktivitas neural masih menjadi perdebatan dalam ilmu saraf dan filsafat pikiran.

Dengan demikian, artikel ini membedakan tiga tingkatan pembahasan: mekanisme biologis yang relatif mapan, hubungan antara aktivitas otak dan kesadaran yang masih menjadi objek penelitian, serta pertanyaan filosofis yang belum memiliki jawaban ilmiah final.

Kata kunci: *ATP, mitokondria, ion, potensial membran, potensial aksi, neuron, listrik biologis, kesadaran, pikiran, kehendak bebas, filsafat pikiran.*

1. Pendahuluan

Ketika manusia berpikir, mengingat, merasakan sakit, melihat warna, atau mengambil keputusan, otak bekerja melalui jaringan sel yang sangat kompleks. Aktivitas tersebut tidak berlangsung tanpa energi.

Otak memerlukan pasokan energi yang terus-menerus untuk mempertahankan aktivitas neuron. Energi digunakan untuk berbagai proses, termasuk mempertahankan gradien ion, menjalankan transmisi sinaptik, mensintesis dan mendaur ulang neurotransmitter, serta mempertahankan struktur dan homeostasis seluler.

Dengan demikian, apa yang sering disebut sebagai "listrik tubuh" pada tingkat neuron sebenarnya merupakan fenomena elektrokimia. Listrik biologis tidak muncul sebagai listrik bebas yang mengalir seperti arus dalam kabel logam, tetapi berasal dari perbedaan distribusi ion, permeabilitas membran, dan pergerakan ion melalui kanal membran.

Secara konseptual, hubungan tersebut dapat digambarkan sebagai:

Makanan → metabolisme → ATP → pemeliharaan gradien ion → potensial membran → potensial aksi → transmisi sinaptik → aktivitas jaringan saraf → kognisi dan perilaku.

Rangkaian tersebut dapat dijelaskan secara biologis hingga tingkat tertentu. Namun, terdapat lompatan konseptual yang jauh lebih besar antara menjelaskan aktivitas neuron dan menjelaskan pengalaman sadar.

Artikel ini mengikuti rangkaian tersebut dari tingkat molekuler hingga tingkat jaringan saraf, kemudian membahas beberapa pertanyaan filosofis yang muncul ketika proses biologis tersebut dikaitkan dengan pikiran, identitas diri, kehendak bebas, dan kesadaran.

2. Energi dari Makanan dan Produksi ATP

Sel memperoleh energi melalui metabolisme berbagai substrat, termasuk glukosa dan, dalam kondisi tertentu, laktat serta badan keton. Otak memiliki kebutuhan energi yang tinggi, dan sebagian besar penggunaan energi neuron berkaitan dengan aktivitas listrik serta proses sinaptik.

Mitokondria merupakan organel penting dalam produksi energi seluler. Melalui rantai transpor elektron dan fosforilasi oksidatif, energi yang diperoleh dari oksidasi substrat digunakan untuk menghasilkan ATP.

Namun, terdapat satu perbedaan konseptual yang penting:

ATP bukanlah listrik tubuh.

ATP merupakan molekul yang menyimpan dan menyediakan energi kimia untuk menjalankan berbagai proses biologis.

Dengan demikian, hubungan yang lebih tepat adalah:

ATP menyediakan energi yang diperlukan untuk mempertahankan sistem listrik biologis, tetapi ATP itu sendiri bukan merupakan sinyal listrik neuron.

Hubungan antara metabolisme dan aktivitas neuron juga bersifat dua arah. Aktivitas neuron meningkatkan kebutuhan energi, sementara ketersediaan energi diperlukan agar neuron dapat mempertahankan aktivitasnya. Mitokondria juga berperan dalam menyediakan energi secara lokal pada bagian-bagian neuron yang memiliki kebutuhan metabolik tinggi.

3. ATP dan Na^+/K^+ -ATPase

Salah satu konsumen ATP yang sangat penting dalam neuron adalah Na^+/K^+ -ATPase.

Pompa membran ini menggunakan energi yang diperoleh dari hidrolisis ATP untuk mempertahankan gradien konsentrasi ion natrium dan kalium pada membran sel.

Dalam gambaran klasik, setiap siklus pompa memindahkan:

- 3 Na^+ keluar sel
- 2 K^+ masuk ke dalam sel

Proses tersebut membantu mempertahankan distribusi ion yang berada jauh dari keadaan keseimbangan elektrokimia.

Gradien tersebut sangat penting bagi eksitabilitas neuron karena menyediakan kondisi yang memungkinkan perubahan potensial membran ketika kanal ion terbuka.

Secara sederhana, hubungan tersebut dapat dituliskan:

ATP → kerja pompa ion → gradien elektrokimia → kemampuan neuron menghasilkan sinyal.

Namun, pompa Na^+/K^+ -ATPase tidak dapat dipahami sebagai satu-satunya mekanisme yang "menciptakan listrik". Perubahan potensial membran terutama terjadi ketika ion bergerak melalui kanal membran mengikuti gaya elektrokimia yang bekerja pada ion tersebut.

4. Dari Gradien Ion Menjadi Potensial Membran

Membran neuron memisahkan lingkungan intraseluler dan ekstraseluler. Konsentrasi ion di kedua sisi membran berbeda, sementara membran memiliki permeabilitas yang selektif terhadap berbagai jenis ion.

Perbedaan distribusi ion dan permeabilitas selektif membran menghasilkan potensial membran.

Dalam keadaan istirahat, bagian dalam neuron secara relatif lebih negatif dibandingkan bagian luar. Nilai potensial istirahat berbeda antarjenis neuron dan bergantung pada kondisi fisiologis, tetapi umumnya berada pada kisaran puluhan milivolt negatif.

Ketika kanal ion terbuka, ion bergerak mengikuti gradien elektrokimia.

Sebagai contoh, pembukaan kanal Na^+ tertentu dapat menyebabkan Na^+ memasuki neuron sehingga membran menjadi kurang negatif. Jika perubahan potensial mencapai ambang tertentu, rangkaian pembukaan kanal berpintu tegangan dapat menghasilkan potensial aksi.

5. Potensial Aksi sebagai Dasar Sinyal Listrik Neuron

Potensial aksi merupakan perubahan cepat pada potensial membran yang memungkinkan informasi ditransmisikan sepanjang akson.

Pada banyak neuron, fase depolarisasi terutama melibatkan masuknya Na^+ melalui kanal natrium berpintu tegangan, kemudian diikuti proses repolarisasi yang melibatkan arus K^+ .

Meskipun demikian, dinamika potensial aksi pada neuron mamalia jauh lebih kompleks daripada model sederhana " Na^+ masuk dan K^+ keluar". Neuron memiliki berbagai jenis kanal ion dengan karakteristik dan distribusi yang berbeda.

Ketika potensial aksi mencapai terminal akson, perubahan potensial membran menyebabkan terbukanya kanal Ca^{2+} tertentu. Masuknya Ca^{2+} kemudian memicu mekanisme pelepasan neurotransmitter.

Dengan demikian, komunikasi neuron bukan hanya merupakan fenomena listrik. Ia merupakan interaksi antara:

ion → perubahan listrik → Ca^{2+} → neurotransmitter → neuron berikutnya.

Sistem saraf pada dasarnya merupakan jaringan elektrokimia yang sangat kompleks.

6. Sinaps: Ketika Listrik Bertemu Kimia

Ketika potensial aksi mencapai terminal presinaptik, kanal Ca^{2+} berpintu tegangan dapat terbuka. Masuknya Ca^{2+} kemudian memicu mekanisme pelepasan neurotransmitter ke celah sinaptik.

Neurotransmitter tersebut dapat berikatan dengan reseptor pada neuron berikutnya dan mengubah keadaan listrik sel penerima.

Dengan demikian, informasi dapat berpindah melalui jaringan neuron melalui kombinasi mekanisme listrik dan kimia.

Secara sederhana:

Potensial aksi → Ca^{2+} → pelepasan neurotransmitter → reseptor → perubahan potensial membran → aktivitas neuron berikutnya.

Rangkaian ini terjadi secara berulang dan terorganisasi di dalam jaringan saraf.

7. Dari Neuron Tunggal ke Otak

Satu neuron tidak cukup untuk menjelaskan kompleksitas pikiran manusia.

Pikiran, persepsi, memori, bahasa, emosi, dan pengambilan keputusan berkaitan dengan aktivitas jaringan saraf yang sangat kompleks.

Dalam ilmu saraf modern, kesadaran tidak dipahami hanya sebagai aktivitas sebuah "pusat listrik" tunggal di otak. Berbagai teori mencoba menjelaskan bagaimana aktivitas jaringan saraf yang terdistribusi dapat menghasilkan keadaan sadar.

Salah satu pendekatan adalah Global Neuronal Workspace Theory, yang mengusulkan bahwa suatu informasi menjadi sadar ketika representasi neural tertentu memperoleh akses luas melalui jaringan otak dan dipertahankan melalui aktivitas berulang.

Pendekatan lain, seperti Integrated Information Theory, menekankan integrasi informasi dalam suatu sistem.

Selain itu terdapat berbagai pendekatan lain, termasuk teori higher-order, recurrent processing, dan predictive processing.

Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa ilmu kesadaran belum mencapai satu teori tunggal yang diterima secara universal. Teori-teori tersebut masih berbeda dalam menjelaskan mekanisme fundamental kesadaran dan bagaimana mekanisme tersebut seharusnya diuji secara empiris.

8. Dari Aktivitas Otak Menuju Pengalaman Subjektif

Pada titik ini muncul persoalan yang lebih mendalam.

Ilmu saraf dapat mempelajari aktivitas otak yang berkaitan dengan keadaan sadar. Penelitian mengenai neural correlates of consciousness (NCC) berusaha mengidentifikasi mekanisme neural yang berkaitan dengan pengalaman sadar tertentu.

Namun, terdapat perbedaan penting antara:

*menemukan korelasi neural
dan
menjelaskan mengapa korelasi tersebut disertai pengalaman subjektif.*

Sebagai contoh, ketika seseorang melihat warna merah, aktivitas pada sistem visual otak dapat dipelajari secara eksperimental.

Akan tetapi, terdapat pertanyaan lain:

Mengapa aktivitas neural tersebut disertai pengalaman subjektif berupa "melihat merah"?

Pertanyaan semacam ini merupakan bagian dari apa yang dalam filsafat pikiran sering disebut sebagai *hard problem of consciousness*.

9. Apakah Pikiran Hanya Elektrokimia?

Jika ATP memungkinkan neuron mempertahankan gradien ion yang kemudian memungkinkan munculnya sinyal listrik, apakah pikiran pada dasarnya hanyalah konsekuensi dari proses elektrokimia?

Secara ilmiah, pikiran sangat erat berkaitan dengan fungsi otak. Namun, mengatakan bahwa pikiran "hanya elektrokimia" merupakan klaim filosofis yang lebih kuat daripada mengatakan bahwa pikiran bergantung pada aktivitas otak.

Neurosains dapat menunjukkan hubungan antara aktivitas neural dan berbagai fungsi mental. Namun, apakah seluruh sifat mental dapat direduksi menjadi sifat fisik merupakan pertanyaan yang berkaitan dengan reduksionisme, fisikalisme, emergentisme, dan berbagai posisi dalam filsafat pikiran.

Dengan demikian, ilmu pengetahuan menyediakan data empiris mengenai hubungan antara otak dan fungsi mental, tetapi interpretasi metafisik mengenai hakikat pikiran masih terbuka.

10. Apakah Pikiran Memiliki Asal-Usul Material?

Jika setiap pikiran bergantung pada energi yang berasal dari metabolisme, apakah sesuatu yang kita anggap sebagai "pikiran murni" sebenarnya selalu memiliki asal-usul material?

Manusia dapat memikirkan sesuatu yang sangat abstrak, seperti:

- tak hingga;
- keadilan;

- cinta;
- masa depan; dan
- alam semesta.

Isi pikiran tersebut dapat bersifat abstrak, tetapi proses berpikir berlangsung dalam organisme biologis yang membutuhkan energi.

Otak membutuhkan ATP untuk mempertahankan fungsi neuralnya, dan gangguan terhadap metabolisme energi dapat mengganggu fungsi otak.

Namun, perlu dibedakan antara asal-usul fisik suatu proses dan makna yang dimiliki oleh proses tersebut.

Sebuah pikiran mengenai keadilan mungkin memiliki dasar biologis dalam proses neural, tetapi apakah konsep "keadilan" dapat direduksi sepenuhnya menjadi biokimia merupakan pertanyaan yang jauh lebih kompleks.

11. Apa yang Membuat "Aku" Tetap Menjadi Aku?

Jika identitas kita bergantung pada jutaan proses ionik yang terus berubah, apa yang membuat seseorang tetap menjadi dirinya sendiri?

Tidak ada satu keadaan ionik yang bertahan selamanya.

Ion bergerak. Neurotransmitter dilepaskan. Protein mengalami perubahan. Aktivitas jaringan berubah. Tubuh berubah. Pengalaman berubah.

Namun manusia memiliki pengalaman subjektif mengenai kontinuitas diri.

Kita merasa bahwa:

"Aku yang sekarang adalah aku yang kemarin."

Pertanyaan berikutnya adalah apakah identitas tersebut bergantung pada materi yang sama atau pada pola organisasi dan informasi yang relatif dipertahankan meskipun materi penyusunnya terus berubah.

Pertanyaan tersebut berhubungan dengan persoalan filosofis klasik mengenai identitas personal.

Dalam konteks ilmu saraf, pengalaman mengenai "diri" diketahui berkaitan dengan jaringan dan proses otak tertentu. Namun, temuan tersebut belum menyelesaikan persoalan filosofis mengenai apa sebenarnya yang dimaksud dengan "aku".

12. Dari Ion Menjadi Kesadaran

Apakah kesadaran merupakan sesuatu yang muncul dari kompleksitas aktivitas listrik neuron, atau terdapat aspek kesadaran yang tidak dapat dijelaskan hanya melalui ion, ATP, dan reaksi kimia?

Pertanyaan ini merupakan salah satu persoalan mendasar dalam ilmu kesadaran.

Salah satu pendekatan bersifat fisikalis, yaitu memandang kesadaran sebagai sesuatu yang pada akhirnya dapat dijelaskan melalui keadaan dan dinamika sistem fisik.

Pendekatan emergentis memandang kesadaran sebagai sesuatu yang muncul ketika suatu sistem mencapai bentuk organisasi dan kompleksitas tertentu.

Sementara itu, pendekatan filosofis lainnya mempertanyakan apakah pengalaman sadar dapat direduksi secara sederhana menjadi deskripsi fisik.

Sampai saat ini belum terdapat konsensus mengenai satu teori kesadaran yang dapat menjelaskan seluruh fenomena secara final.

Oleh karena itu, dua pernyataan ekstrem berikut sama-sama terlalu sederhana:

"Kesadaran adalah listrik."

dan

"Kesadaran tidak berhubungan dengan proses fisik."

Posisi yang lebih hati-hati adalah bahwa kesadaran sangat erat berkaitan dengan fungsi otak, sedangkan hakikat hubungan antara proses fisik dan pengalaman subjektif masih menjadi persoalan terbuka.

13. Seberapa Bebas Kehendak Kita?

Jika perubahan pada distribusi ion dapat mengubah aktivitas saraf, seberapa bebas sebenarnya kehendak manusia?

Pertanyaan tersebut membawa pembahasan dari neurofisiologi menuju filsafat kehendak bebas.

Aktivitas neural dapat mendahului dan menyertai keputusan. Eksperimen klasik Libet dan penelitian setelahnya menunjukkan bahwa beberapa tanda aktivitas otak dapat muncul sebelum seseorang melaporkan kesadaran mengenai keputusan.

Namun, temuan tersebut tidak secara otomatis membuktikan bahwa kehendak bebas tidak ada.

Interpretasi eksperimen semacam itu masih diperdebatkan. Aktivitas otak sebelum keputusan dapat merepresentasikan proses pengambilan keputusan yang sedang berlangsung dan tidak harus berarti bahwa keputusan tersebut telah sepenuhnya ditentukan sebelum kesadaran terlibat.

Dengan demikian, bukti neuroscience mengenai aktivitas neural sebelum keputusan belum cukup untuk menyelesaikan persoalan kehendak bebas secara umum.

14. Apakah Keputusan Kita Sudah Ditentukan?

Jika otak menggunakan hukum fisika dan kimia untuk menghasilkan pikiran dan tindakan, apakah keputusan manusia pada akhirnya merupakan proses yang sepenuhnya ditentukan oleh keadaan fisik otak?

Pertanyaan tersebut berkaitan dengan determinisme.

Jika setiap keadaan otak memiliki sebab fisik sebelumnya, muncul pertanyaan apakah keputusan manusia benar-benar bebas.

Namun terdapat persoalan konseptual penting: kehendak bebas tidak harus berarti bahwa suatu keputusan "tidak mempunyai sebab".

Salah satu posisi filosofis, yaitu kompatibilisme, berpendapat bahwa kebebasan tetap dapat bermakna meskipun tindakan memiliki sebab.

Dalam perspektif tersebut, seseorang dapat dianggap bebas ketika tindakan muncul dari proses internalnya—seperti alasan, nilai, tujuan, dan pertimbangannya—bukan karena paksaan eksternal.

Neuroscience dapat membantu menjelaskan mekanisme pengambilan keputusan, tetapi belum menentukan secara final definisi filosofis mengenai "bebas".

15. Di Mana Materi Menjadi Pengalaman?

Mitokondria mengubah energi dari makanan menjadi ATP. ATP digunakan untuk mempertahankan gradien ion. Gradien ion memungkinkan perubahan potensial membran. Potensial membran memungkinkan potensial aksi. Potensial aksi memungkinkan transmisi sinaptik.

Jika rangkaian tersebut terus berlanjut hingga menghasilkan proses kognitif, maka muncul pertanyaan:

Pada titik mana "materi" menjadi "pengalaman"?

Rangkaian biologis tersebut dapat digambarkan sebagai:

substrat metabolik ↓ ATP ↓ gradien ion ↓ potensial membran ↓ potensial aksi ↓ transmisi sinaptik ↓ aktivitas jaringan ↓ proses kognitif

Namun, belum terdapat satu titik yang secara eksperimental dapat ditunjuk sebagai:

"Di sinilah pengalaman subjektif muncul."

Ada kemungkinan bahwa tidak terdapat satu titik tunggal semacam itu.

Kesadaran mungkin merupakan sifat dari dinamika jaringan secara keseluruhan, bukan hasil dari satu molekul atau satu neuron.

Berbagai teori, termasuk Global Neuronal Workspace, Integrated Information Theory, recurrent processing, dan higher-order theories, menawarkan penjelasan yang berbeda mengenai persoalan tersebut. Sampai saat ini, perdebatan masih berlangsung.

16. Jika Otak Direplikasi, Apakah Kesadaran Akan Muncul?

Jika suatu hari seluruh proses elektrokimia otak dapat direplikasi secara sempurna, apakah sistem tersebut juga akan memiliki kesadaran, atau hanya meniru perilaku orang yang sadar?

Bayangkan sebuah sistem buatan yang memiliki:

- neuron buatan;
- gradien ion;
- potensial membran;
- sinyal listrik;
- neurotransmisi;
- dinamika jaringan; dan
- pola aktivitas yang identik dengan otak manusia.

Sistem tersebut kemudian mengatakan:

"Saya sadar."

Apa yang harus kita simpulkan?

Setidaknya terdapat dua kemungkinan filosofis.

16.1 Kesadaran Bergantung pada Fungsi

Jika organisasi dan proses kausal yang tepat merupakan faktor yang menentukan kesadaran, sistem yang mereplikasi proses tersebut secara tepat mungkin juga memiliki kesadaran.

16.2 Simulasi Belum Tentu Merupakan Pengalaman

Kemungkinan lainnya adalah bahwa suatu sistem dapat menghasilkan perilaku yang identik dengan manusia tanpa benar-benar memiliki pengalaman subjektif.

Persoalan tersebut berkaitan dengan perdebatan mengenai functionalism, substrate dependence, serta hubungan antara simulasi dan realisasi fisik.

Sampai saat ini, neuroscience belum memiliki eksperimen yang dapat menyelesaikan persoalan tersebut secara definitif.

17. Apa yang Sebenarnya Kita Ketahui?

Untuk menghindari pencampuran antara fakta ilmiah dan spekulasi filosofis, pembahasan dapat dibagi menjadi tiga tingkat.

17.1 Tingkat Pertama: Relatif Mapan Secara Biologis

Terdapat dasar ilmiah yang kuat bahwa:

- neuron menggunakan gradien ion;
- ATP diperlukan untuk berbagai proses yang mempertahankan fungsi neuron;
- mitokondria merupakan sumber energi penting bagi neuron;
- kanal ion menghasilkan perubahan potensial membran;
- potensial aksi merupakan mekanisme utama komunikasi listrik neuron;
- sinaps menggunakan mekanisme kimia dan listrik; dan
- fungsi otak bergantung pada metabolisme energi.

17.2 Tingkat Kedua: Didukung Bukti tetapi Masih Diteliti

Terdapat bukti kuat bahwa berbagai aspek kesadaran berkaitan dengan aktivitas jaringan otak tertentu.

Namun, mekanisme neural yang tepat dan teori mana yang paling baik menjelaskan kesadaran masih menjadi objek penelitian dan perdebatan.

17.3 Tingkat Ketiga: Pertanyaan Filosofis Terbuka

Sains belum memiliki jawaban final terhadap pertanyaan seperti:

- mengapa proses fisik menghasilkan pengalaman subjektif;
- apakah kesadaran sepenuhnya dapat direduksi menjadi proses fisik;
- apakah kehendak bebas kompatibel dengan determinisme;
- apa hakikat identitas personal; dan
- apakah sistem nonbiologis yang secara fungsional identik dengan otak akan memiliki pengalaman sadar.

Pertanyaan-pertanyaan tersebut tidak seharusnya dipresentasikan sebagai fakta ilmiah yang telah terbukti.

18. Diskusi: Dari Energi ke "Aku"

Jika seluruh pembahasan disusun menjadi satu rangkaian konseptual, kita memperoleh hubungan sebagai berikut:

Makanan ↓ Energi kimia ↓ Mitokondria ↓ ATP ↓ Pompa ion ↓ Gradien elektrokimia ↓ Potensial membran ↓ Potensial aksi ↓ Sinaps ↓ Jaringan neuron ↓ Pemrosesan informasi ↓ Persepsi dan kognisi ↓ Pengalaman subjektif ↓ Kesadaran ↓ Pertanyaan tentang "aku"

Rangkaian tersebut tidak berarti bahwa ilmu pengetahuan telah membuktikan setiap panah sebagai hubungan satu-ke-satu yang sederhana.

Sebaliknya, rangkaian tersebut menggambarkan bagaimana suatu proses yang bermula dari metabolisme dapat berhubungan dengan fungsi pada tingkat yang lebih tinggi, yang kemudian kita kenali sebagai pikiran, persepsi, dan kesadaran.

Hal yang menarik adalah bahwa sistem biologis tidak sekadar menggunakan energi.

Sistem tersebut menggunakan energi untuk mempertahankan keteraturan.

Gradien ion harus dipertahankan. Jaringan saraf harus mempertahankan konektivitasnya. Informasi harus diproses. Homeostasis harus dipertahankan.

Dari keseluruhan organisasi tersebut muncul organisme yang tidak hanya mampu merespons lingkungan, tetapi juga membentuk representasi mengenai lingkungan dan dirinya sendiri.

Dengan demikian, hubungan antara metabolisme dan kesadaran tidak dapat disederhanakan menjadi:

ATP = pikiran
atau:
listrik = kesadaran.

Hubungannya jauh lebih kompleks dan melibatkan organisasi bertingkat mulai dari molekul, organel, membran, neuron, sinaps, hingga jaringan otak.

19. Kesimpulan

Listrik biologis pada manusia tidak muncul secara misterius dan tidak identik dengan listrik yang mengalir melalui kabel logam. Pada tingkat neuron, fenomena tersebut merupakan konsekuensi dari gradien elektrokimia ion pada membran sel.

Gradien tersebut dipertahankan melalui berbagai mekanisme yang membutuhkan energi, termasuk kerja Na^+/K^+ -ATPase. ATP sendiri terutama dihasilkan melalui metabolisme seluler yang melibatkan mitokondria. Ketika kanal ion terbuka, pergerakan ion mengubah potensial membran dan memungkinkan terbentuknya potensial aksi. Potensial aksi kemudian memungkinkan komunikasi antarneuron melalui mekanisme listrik dan kimia.

Pada tingkat biologis, mekanisme tersebut telah dapat dipelajari secara eksperimental dengan sangat rinci.

Namun, ketika pembahasan bergerak dari aktivitas neuron menuju pengalaman subjektif, muncul pertanyaan yang belum terselesaikan.

Kita dapat menjelaskan bagaimana ion bergerak.

Kita dapat menjelaskan bagaimana ATP digunakan.

Kita dapat menjelaskan bagaimana neuron menghasilkan potensial aksi.

Kita dapat mempelajari jaringan otak yang aktif ketika seseorang berada dalam keadaan sadar.

Namun masih terdapat pertanyaan mendasar:

Mengapa proses-proses tersebut disertai pengalaman?

Mengapa aktivitas fisik tertentu tidak hanya terjadi, tetapi juga terasa sebagai sesuatu?

Dan mungkin pertanyaan yang paling mendasar:

Jika tubuh merupakan sistem elektrokimia yang terus berubah, sementara pikiran bergantung pada energi, ion, dan aktivitas jaringan saraf, lalu apa sebenarnya yang membuat seseorang menjadi "aku"?

Ilmu pengetahuan mungkin akan terus memperluas pemahaman mengenai mekanisme yang menghubungkan otak dan kesadaran. Namun, semakin jauh mekanisme tersebut dipahami, pertanyaan filosofis mengenai pengalaman subjektif mungkin justru menjadi semakin dalam.

Misteri terbesar bukanlah bahwa manusia memiliki listrik biologis.

Misteri yang lebih besar adalah bahwa materi yang tersusun dari atom, molekul, ion, dan energi dapat membentuk suatu sistem yang mampu memproses informasi, mengalami dunia, merefleksikan dirinya sendiri, dan bahkan mempertanyakan keberadaannya sendiri.

Daftar Pustaka

- Bean, B. P. (2007). The action potential in mammalian central neurons. *Nature Reviews Neuroscience*, 8, 451–465. <https://doi.org/10.1038/nrn2148>
- Koch, C., Massimini, M., Boly, M., & Tononi, G. (2016). Neural correlates of consciousness: Progress and problems. *Nature Reviews Neuroscience*, 17, 307–321. <https://doi.org/10.1038/nrn.2016.22>
- Dehaene, S., Lau, H., & Kouider, S. (2017). What is consciousness, and could machines have it? *Science*, 358, 486–492.
- Mashour, G. A., Roelfsema, P., Changeux, J.-P., & Dehaene, S. (2020). Conscious processing and the global neuronal workspace hypothesis. *Neuron*, 105, 776–798.
- Northoff, G., & Lamme, V. (2020). Neural signs and mechanisms of consciousness: Is there a potential convergence of theories of consciousness in sight? *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 118, 568–587. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.07.019>
- Seth, A. K., & Bayne, T. (2022). Theories of consciousness. *Nature Reviews Neuroscience*, 23, 439–452.
- Schurr, A. (2019). The energetic brain: A review from students to students. *Journal of Neurochemistry*. <https://doi.org/10.1111/jnc.14829>
- López-Doménech, G., & Kittler, J. T. (2023). Mitochondrial regulation of local supply of energy in neurons. *Current Opinion in Neurobiology*, 81, 102747. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2023.102747>
- Delnatte, C., Roze, E., Pouget, P., Galléa, C., & Welniarz, Q. (2023). Can neuroscience enlighten the philosophical debate about free will? *Neuropsychologia*, 188, 108632. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2023.108632>
- Luppi, A. I., et al. (2024). A synergistic workspace for human consciousness revealed by Integrated Information Decomposition. *Nature Communications*.
- Grimm, A., Lang, U., & Eckert, A. (2026). Mitochondria and brain aging: From cell-specific dysfunction to intercellular cooperation. *Neuron*. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2026.04.048>
- Pang, Y., et al. (2026). Metabolic interactions in the brain: The crucial roles of neurons, astrocytes, and microglia in health and disease. *Frontiers in Neuroscience*. <https://doi.org/10.3389/fnins.2026.1731771>