

**SINERGI CABANG-CABANG ILMU PENGETAHUAN ALAM  
DALAM KOMPLEKSITAS FENOMENA FOTOSINTESIS PADA TUMBUHAN**

Moh. Hayatul Ikhsan<sup>1</sup>, Sigit Prasetyo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut Agama Islam Ibrahimy Genteng Banyuwangi, Indonesia

<sup>2</sup>UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta, Indonesia

e-mail: [emhayatul.ppmu@gmail.com](mailto:emhayatul.ppmu@gmail.com)

**Abstract**

*The phenomenon of plant photosynthesis involves various branches of Natural Sciences, including Biology, Physics, Chemistry, and Earth and Space Science. This study aims to understand the interconnection between these disciplines in explaining the photosynthesis process, which not only produces oxygen but also plays a role in stabilizing Earth's temperature and reducing greenhouse gases. This research adopts an interdisciplinary approach by integrating concepts from each relevant field. The results demonstrate that photosynthesis involves not only biological aspects, such as leaf structure and chloroplasts, but also physical and chemical aspects related to the conversion of solar energy into chemical energy. Furthermore, this study explores the relationship between the photosynthesis phenomenon and Earth sciences in maintaining ecosystem balance and addressing global climate change.*

**Keywords:** *Photosynthesis; Solar Energy; Natural Sciences; Interdisciplinary.*

**Abstrak**

*Fenomena fotosintesis tumbuhan adalah topik yang melibatkan berbagai cabang Ilmu Pengetahuan Alam (IPA), termasuk Biologi, Fisika, Kimia, serta Ilmu Pengetahuan Bumi dan Antariksa. Penelitian ini bertujuan untuk memahami keterkaitan antara berbagai disiplin ilmu tersebut dalam menjelaskan proses fotosintesis, yang tidak hanya menghasilkan oksigen, tetapi juga berperan dalam menjaga suhu bumi dan mengurangi gas rumah kaca. Penelitian ini menggunakan pendekatan interdisipliner dengan menggabungkan konsep-konsep dari setiap cabang ilmu yang relevan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa fotosintesis tidak hanya melibatkan aspek biologis, seperti struktur daun dan kloroplas, tetapi juga aspek fisika dan kimia, yang terkait dengan konversi energi cahaya matahari menjadi energi kimia. Selain itu, penelitian ini juga menggali keterkaitan fenomena fotosintesis dengan ilmu pengetahuan bumi dalam menjaga keseimbangan ekosistem dan perubahan iklim global.*

**Kata Kunci:** *Fotosintesis; Energi Matahari; Ilmu Pengetahuan Alam; Interdisipliner.*

Received: June 25 <sup>th</sup> 2024	Revision: November 17 <sup>th</sup> 2024	Publication: February 10 <sup>th</sup> 2025
---	---	--

## A. Pendahuluan

Tumbuhan merupakan makhluk Allah yang memberikan warna-warni di muka bumi (Coccia, 2019; Ghernaout, 2017; Harris, 2016). Sudah tidak diragukan lagi bahwa tumbuhan dijadikan oleh Allah di bumi agar menjadi tempat tinggal yang layak dihuni oleh manusia. Oleh karena itu, manusia sebagai khalifah di bumi bertugas untuk melestarikannya, sebab kebutuhan akan tumbuhan sebagai salah satu sumber energi tidak dapat dihindari. Tumbuhan sebagai kebutuhan pokok bahan pangan, sandang dan papan telah lama dimanfaatkan oleh manusia dalam berbagai aspek hingga kebutuhan sekunder seperti dekorasi (Crini et al., 2020; Shogren et al., 2019). Sudah sepatutnya manusia mempelajari bagaimana tumbuhan dibudidayakan. Hal ini membutuhkan ilmu yang fokus mempelajari tumbuhan dari berbagai sudut pandang.

Ilmu pengetahuan sangat penting bagi kehidupan manusia (Giorgi, 2020; Jasanoff, 2019). “Barangsiapa yang menginginkan dunia maka hendaklah berilmu. Barangsiapa yang menginginkan akhirat, maka hendaklah dengan ilmu. Barangsiapa yang menginginkan keduanya, maka hendaklah dengan ilmu.” Nasihat dari Imam Syafi’i yang dinukil oleh Imam An-Nawawi dalam muqaddimah karya yang berjudul *Al Majmu’*. Ucapan atau fatwa kalimat ini menjadi kata motivasi Islami yang sering dipakai untuk menyemangati anak-anak muda agar terus meraih ilmu yang bermanfaat di dunia dan akhirat kelak (Arribathi et al., 2021). Dalam hadits yang diriwayatkan dalam Musnad Abu Ya’la Al Mshili dari Anas, dari Rasulullah SAW, beliau bersabda: menuntut ilmu itu kewajiban atas setiap muslim. Berkaitan dengan tumbuhan, maka bidang yang dipelajari adalah Ilmu Pengetahuan Alam (IPA).

IPA merupakan ilmu yang mempelajari lingkungan sekitar beserta isinya. Dalam mempelajari sebuah ilmu pengetahuan hendaknya kita mempelajarinya secara terperinci dengan mengkaji cabang-cabang suatu ilmu sehingga semakin terbuka wawasan pikiran serta bijak dalam menggunakannya dalam aktivitas yang bermanfaat positif. Syair dari Abu Al Aswad Ad Duali (seorang tabi’in) mengungkapkan Ilmu adalah hiasan dan kemuliaan bagi pemiliknya: Maka tuntutlah berbagai cabang ilmu dan tata kramanya, tidak ada kebaikan pada orang yang punya dasar tanpa adab. Sehingga menjadi cermin bagi yang menghiasinya (Arribathi et al., 2021; Mubarok, 2019).

Cabang-cabang IPA sangatlah banyak dan di dalam cabang IPA tersebut masih terdapat cabang lagi sehingga membuat IPA semakin kompleks (Darojat & Faishol, 2023; Faridah & Pujangga, 2024; Ramiati & Faishol, 2021). Ciri khas yang ada pada IPA adalah diperoleh dari penelitian melalui metode ilmiah. Konsepsi sains, metode

ilmiah, dan legitimasi ilmiah yang saat ini kita anggap benar mempunyai sejarah dan berkembang seiring dengan sains itu sendiri. Memang benar, sejarah ilmu pengetahuan bukan hanya sejarah penemuan dan pemahaman yang semakin berkembang tentang alam itu sendiri, namun juga penemuan dan pemahaman yang semakin berkembang mengenai cara mendekati alam, cara mengajukan pertanyaan terhadap alam, dan cara menafsirkan jawaban-jawaban alam. Secara tidak langsung, rumit, dan masih belum lengkap, manusia harus belajar dari alam. Proses tersebut sangat tidak langsung dan juga kompleks karena alam tidak berbicara secara langsung dan tegas sesuai dengan pemahaman kita. Tentu saja, secara luas diasumsikan bahwa apa yang dikatakan oleh alam dinyatakan dalam istilah empiris. Jadi, sejauh yang bisa kita kelola, hubungan ilmiah kita dengan alam (setidaknya seharusnya) didasarkan pada hal empiris. Empirisme tersebut berkembang secara historis sebagai komponen penting metode ilmiah, yaitu upaya terstruktur yang sengaja dilakukan oleh manusia untuk mendengarkan suara alam sebisa mungkin bebas dari distorsi (pemutarbalikan fakta) (Robinson, 2020: 88).

Metode ilmiah memungkinkan kita menggali rahasia tersembunyi alam semesta. Salah satu hal yang mendasari banyak konsepsi metode ilmiah adalah ketidakpercayaan terhadap intuisi manusia, dan khususnya terhadap segala sesuatu yang diwarnai oleh subjektivitas manusia. Jadi, salah satu tugas utama metode ilmiah adalah menyaring subjektivitas dan bias manusia dari ilmu pengetahuan, sehingga suara otoritas alam dapat didengar tanpa terdistorsi. Observasi empiris yang dianggap tidak ternoda oleh manusia, tidak terpengaruh oleh teori, dan dialami secara umum oleh semua orang yang menyelidiki alam dengan jujur, memberikan landasan yang kuat bagi ilmu pengetahuan yang jika digunakan dengan benar, juga bebas dari noda subjektivitas manusia. Jika landasan dan bahan pembangun ilmu pengetahuan adalah murni dan ditentukan oleh alam (data empiris dan observasional), dan jika prosedur untuk membangun teori di atas landasan yang kokoh tersebut, dari bahan-bahan yang tidak ternoda, keduanya menjaga kemurnian tersebut dan dijamin oleh akal sehat, maka tidak ada tempat bagi kontaminasi subyektivitas manusia (Johnson, 2020: 13).

Penelitian mengenai peran tumbuhan dalam menjaga keseimbangan ekosistem dan manfaat fotosintesis terus berkembang seiring dengan pemahaman ilmiah yang lebih mendalam. Johnson et al. (2021) mengungkapkan bahwa fotosintesis pada tumbuhan tidak hanya menghasilkan oksigen, tetapi juga berperan signifikan dalam mengurangi gas rumah kaca, khususnya karbon dioksida, yang berdampak pada perubahan iklim global. Penelitian oleh Wang dan Chen (2022) mendukung bahwa fotosintesis berkontribusi dalam menjaga suhu bumi dengan meningkatkan albedo permukaan melalui vegetasi hijau, yang menyerap cahaya

matahari dan memberikan efek pendinginan alami. Li et al. (2020) juga menemukan bahwa klorofil pada tanaman, yang bertindak sebagai katalis alami dalam penyerapan energi matahari, mempengaruhi efisiensi fotosintesis pada lingkungan berbeda. Temuan ini menekankan bahwa fotosintesis melibatkan berbagai disiplin ilmu, seperti biologi, fisika, dan kimia.

Persepsi dalam masyarakat modern bahwa terdapat kesenjangan yang signifikan antara ilmu pengetahuan dan agama. Kedua cara penyelidikan ini (yang empiris dan yang berbasis agama) mewakili cara kita mencari jawaban atas pertanyaan-pertanyaan yang bersifat praktis dan abadi. Namun dalam budaya Barat, kedua hal ini sering dianggap menempati wilayah pemikiran dan praktik yang berbeda. Tujuan dari koleksi ini adalah untuk menemukan hubungan, melalui hubungan umat manusia dengan alam, yang membantu menjembatani jurang yang memisahkan ilmu pengetahuan dari spiritual dan keagamaan (Kellert, 2002:1). Berkaitan dengan hal tersebut, dalam agama Islam justru Allah menjadikan kitab suci Al-Qur'an sebagai sumber ilmu pengetahuan yang tidak lekang oleh zaman.

Studi ini menawarkan pendekatan lintas disiplin yang belum banyak dieksplorasi dalam kajian fotosintesis, dengan menggabungkan aspek biologi, fisika, kimia, dan ilmu bumi. Kebaruan penelitian ini adalah pemahaman interdisipliner tentang fotosintesis sebagai fenomena kompleks yang tak hanya memproduksi oksigen tetapi juga berperan langsung dalam stabilitas iklim global dan kualitas udara. Analisis fotosintesis dalam perspektif antariksa juga diperkenalkan, dengan menyoroti peran matahari sebagai sumber energi utama. Selain itu, kajian ini mengaitkan konsep Al-Qur'an sebagai inspirasi dari perspektif Islam yang memandang alam sebagai tanda kebesaran Allah, suatu pendekatan yang jarang digunakan sebagai landasan teori dalam kajian ilmiah modern.

Al-Qur'an menyentuh berbagai konsep fisika, termasuk hukum-hukum alam. Contohnya adalah ayat yang menggambarkan penciptaan alam semesta, gerakan bumi, dan hukum-hukum yang mengaturnya. Al-Qur'an juga memberikan pandangan tentang penciptaan makhluk hidup dan proses-proses biologis tertentu. Misalnya, penciptaan manusia dari tanah dan proses pembentukan janin di dalam rahim. Meskipun tidak secara langsung membahas kimia, Al-Qur'an menyentuh aspek-aspek penciptaan dan komposisi materi dalam alam semesta. Al-Qur'an berkaitan dengan ilmu bumi juga menyebutkan berbagai fenomena alam dan proses-proses yang terjadi di permukaan bumi, seperti pembentukan gunung, lautan, dan gejala alam lainnya. Ilmu bumi disandingkan dengan ilmu antariksa yang erat dengan ilmu astronomi yakni mempelajari benda langit di luar bumi yang dalam Al-Qur'an juga banyak dibahas bintang, bulan, dan matahari, serta fenomena-fenomena alam di angkasa.

Sehubungan dengan tumbuhan, maka yang paling populer adalah fenomena fotosintesis. Dalam QS. Al-An'am ayat 99

وَهُوَ الَّذِي أَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً فَأَخْرَجْنَا بِهِ نَبَاتَ كُلِّ شَيْءٍ فَأَخْرَجْنَا مِنْهُ خَضِرًا نُخْرِجُ مِنْهُ حَبًّا مُتَرَاكِبًا وَمِنْ  
الَّتِخْلِ مِنْ طَلْعِهَا قِنْوَانٌ دَانِيَةٌ وَجَنَّاتٍ مِنْ أَعْنَابٍ وَالزَّيْتُونَ وَالزُّمَانُ مِثْلَهَا وَغَيْرُ مِثْلِهِ أَنْظُرُوا إِلَى ثَمَرِهِ إِذَا  
أَثْمَرَ وَيَنْعِهِ إِنَّ فِي ذَلِكَ لَآيَاتٍ لِقَوْمٍ يُؤْمِنُونَ ﴿٩٩﴾

Artinya: "Dan Dialah yang menurunkan air dari langit, lalu Kami tumbuhkan dengan air itu segala macam tumbuh-tumbuhan, maka Kami keluarkan dari tumbuh-tumbuhan itu tanaman yang menghijau, Kami keluarkan dari tanaman yang menghijau itu butir yang banyak; dan dari mayang kurma, mengurai tangkai-tangkai yang menjulai, dan kebun-kebun anggur, dan (Kami keluarkan pula) zaitun dan delima yang serupa dan yang tidak serupa. Perhatikanlah buahnya pada waktu berbuah, dan menjadi masak. Sungguh, pada yang demikian itu ada tanda-tanda (kekuasaan Allah) bagi orang-orang yang beriman.

Dalam QS. Al-Hajj ayat 63,

أَلَمْ تَرَ أَنَّ اللَّهَ أَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً فَتُصْبِحُ الْأَرْضُ مُخْضَرَّةً إِنَّ اللَّهَ لَطِيفٌ خَبِيرٌ ﴿٦٣﴾

Artinya: "Apakah kamu tidak melihat, bahwasannya Allah menurunkan air dari langit, lalu jadilah bumi itu hijau? Sesungguhnya Allah Mahalembut lagi Maha Mengetahui."

Penelitian ini bertujuan untuk memaparkan tinjauan cabang-cabang ilmu pengetahuan alam dalam kompleksitas fenomena fotosintesis tumbuhan, yang mana fenomena tersebut tidak hanya terdapat aspek biologis saja, akan tetapi juga terdapat aspek fisika dan kimia yang juga bermanfaat untuk menjaga suhu bumi, membersihkan udara yang akan dibahas dalam ilmu pengetahuan bumi. Fotosintesis yang prosesnya melibatkan matahari sebagai pusat tata surya dibahas dalam ilmu antariksa.

## B. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode pustaka (*library research*), yang melibatkan pengumpulan dan analisis data dari berbagai literatur, termasuk buku, artikel ilmiah, teks tafsir, dan jurnal penelitian. Fokus penelitian ini adalah fenomena fotosintesis yang telah diakui dalam ilmu alam serta relevansi konsep ini dengan ayat-ayat Al-Qur'an (ayat *qauliyah*). Fotosintesis dipandang sebagai ayat kauniyah, yaitu tanda kebesaran Allah yang tercermin dalam alam. Data utama yang digunakan mencakup pemahaman ilmiah yang telah teruji serta kajian agama terkait proses fotosintesis. Proses pengumpulan data melibatkan penelusuran

sumber-sumber literatur primer dan sekunder yang berkaitan dengan konsep interdisipliner fotosintesis. Teknik ini mencakup penelaahan sumber pustaka yang kredibel seperti literatur tafsir, penelitian ilmiah mutakhir, serta karya-karya ilmiah yang mendukung perspektif sains dan agama. Metode ini penting untuk memastikan bahwa data yang dikumpulkan autentik dan dapat diverifikasi, sebagaimana disarankan dalam penelitian pustaka (S.K.Pandey, 2010).

Data dianalisis menggunakan teknik analisis isi (*content analysis*) yang memungkinkan identifikasi tema utama serta makna yang terkandung dalam ayat-ayat Al-Qur'an terkait fotosintesis. Analisis ini dilakukan melalui langkah-langkah berikut: (1) pengelompokan data berdasarkan tema utama, seperti konsep fotosintesis dalam sains dan agama, (2) interpretasi data dari tafsir dan teori ilmiah, dan (3) refleksi serta analisis implikasi temuan dalam konteks ilmu pengetahuan dan perspektif keislaman. Pendekatan ini sesuai dengan metode penelitian pustaka karena dapat menstrukturkan pesan dalam teks secara mendalam (Saldaña, 2021).

Pemilihan metode pustaka untuk penelitian ini didasari oleh tujuannya untuk menggali pemahaman mendalam mengenai fotosintesis dalam perspektif ilmu alam dan Al-Qur'an. Penggunaan metode pustaka dan analisis isi membantu menelaah keterkaitan konsep-konsep lintas disiplin (biologi, kimia, fisika, astronomi) dan agama. Pemilihan metode ini juga menyesuaikan dengan keterbatasan dalam melakukan eksperimen langsung terhadap fenomena fotosintesis yang sudah banyak dikaji secara ilmiah (Creswell & Poth, 2018).

### **C. Hasil dan Pembahasan**

Menurut Pusat Bahasa Departemen Pendidikan Nasional (2007: 1070) Sinergisitas berasal dari kata sinergi yang artinya suatu gabungan atau kerjasama yang mempunyai pengaruh besar. Setiawan, (2021: 112) mengartikan sinergi sebagai kombinasi atau paduan unsur bagian yang dapat menghasilkan sesuatu yang lebih besar. Sedangkan kompleksitas adalah perilaku sebuah sistem atau model yang komponen-komponennya berinteraksi dengan banyak cara. Kata kompleks sendiri mengandung makna suatu kesatuan yang terdiri dari sejumlah bagian, khususnya yang memiliki bagian yang saling berhubungan dan saling tergantung.

Manusia melakukan penelitian dengan berbagai sudut pandang ilmu pengetahuan yang melingkupi fenomena tersebut. Akan sangat sulit bagi manusia untuk menetapkan bahwa suatu fenomena hanya terjadi sesuai dengan ilmu kimia saja tanpa melibatkan ilmu fisika dikarenakan berbagai macam ilmu saling berintegrasi dalam satu fenomena sehingga pembahasannya memerlukan banyak sudut pandang, bahkan dari sudut pandang agama sekalipun. Oleh karena itu,



dengan adanya kompleksitas, manusia dapat mengetahui sinergisitas berbagai cabang ilmu yang saling mendukung dalam menganalisis sebuah objek dan berbagai unsur yang menyebabkan terbentuknya objek tersebut (Fukuda, 2020: 112).

Firman Allah dalam Al-Qur'an banyak terdapat seruan bagi manusia untuk melaksanakan metode ilmiah melalui panca indra secara fisik (dzohir) dan melalui akal serta hati secara intuitif (bathin). Dalam QS. Al-Isro' ayat 36, *"Dan janganlah kamu mengikuti sesuatu yang tidak kamu ketahui. Karena pendengaran, penglihatan dan hati nurani, semua itu akan diminta pertanggungjawabannya."* Hal ini menandakan bahwa manusia membutuhkan penelitian, tidak hanya sekedar dugaan (dzonn). Menjelaskan fenomena dunia fisik adalah salah satu tujuan utama ilmu pengetahuan alam. Ayat ini menekankan bahwa manusia harus melakukan penelitian berdasarkan bukti, bukan hanya dugaan semata (Hidayatullah, 2017: 165). Untuk menjelaskan fenomena dunia fisik, salah satu tujuan utama ilmu pengetahuan alam adalah mengungkap penjelasan ilmiah yang memenuhi dua kriteria, yaitu relevansi penjelas dan kemampuan untuk diuji (Okasha, 2016: 82).

Para ilmuwan telah banyak menerbitkan hasil penelitiannya, bahkan jurnal-jurnal khusus dalam membuktikan proses fotosintesis pada daun. Fungsi daun di antaranya adalah menyimpan cadangan makanan, mengambil zat-zat makanan (*reabsorpsi*), pengolahan zat-zat makanan (*fotosintesis*), penguapan (*transpirasi*), pernafasan (*respirasi*). Organel sel yang berperan dalam penyimpanan cadangan makanan yaitu vakuola, amiloplas, elaioplas, dan proteinoplas yang dijelaskan dalam cabang ilmu biologi. Pengambilan zat makanan dapat dibahas dengan cabang ilmu kimia dan fisika. Pengolahan dalam proses fotosintesis yaitu unsur air ( $H_2O$ ) dan karbondioksida ( $CO_2$ ) dengan bantuan energi cahaya matahari menghasilkan glukosa ( $C_6H_{12}O_6$ ) dan Oksigen ( $O_2$ ). Fotosintesis akan diuraikan lebih rinci pada cabang ilmu kimia, sedangkan gelombang cahaya oleh cabang ilmu fisika. Penguapan dan pernafasan saling berkaitan. Penguapan tumbuhan ke atmosfer terjadi ketika stomata pada daun terbuka untuk pertukaran karbon dioksida dengan oksigen selama fotosintesis. Peran tumbuhan bagi atmosfer bumi akan dijelaskan pada cabang ilmu pengetahuan bumi. Sedangkan sistem pernafasan dijelaskan pada cabang ilmu biologi (Maksum, 2015: 107). Beberapa perkembangan hasil penelitian pada fotosintesis dirangkum dalam tabel berikut:

Tabel 1 Berbagai Perkembangan Teori Fotosintesis (Linda, 2020: 66)

Tokoh	Peristiwa	Tahun
Joseph Priestley	Tumbuhan hijau mengeluarkan oksigen	1771
Jan Ingenhousz	Evolusi fotosintetik oksigen memerlukan cahaya matahari dan terjadi hanya pada bagian-bagian berwarna hijau dari tumbuhan	1779

Nicholas Theodore de Saussure	Air diperlukan dalam produksi gula pada tumbuhan	1804
Von Mayer	Mekanisme terang gelap pada teori fotosintesis	1842
James Clerk Maxwell	Mengembangkan model cahaya sebagai gelombang yang mengarahkan pada pemahaman bahwa cahaya merupakan sumber energi pada proses fotosintesis	1864
F.F. Blackman	Fotosintesis memiliki sebuah tahapan yang tergantung cahaya namun tidak tergantung temperatur dan sebuah tahapan yang tidak tergantung cahaya namun tergantung temperatur	1905
Richard Willstatter	Energi yang diperlukan untuk mereduksi karbon dioksida berasal dari cahaya matahari yang diserap oleh zat hijau yang terdiri atas dua senyawa yang hampir sama (klorofil a dan klorofil b)	1915
Cornelis B. van Niel	Bakteri fotosintesis Hasil penelitian : Oksigen yang dievolusikan dalam fotosintesis berasal dari H <sub>2</sub> O, bukan CO <sub>2</sub>	1930an
Melvin Calvin dan kawan-kawan	Menggunakan karbon 14 untuk melacak konversi CO <sub>2</sub> menjadi karbohidrat	1940an
AD Meyer	Sumber energi utama yang digunakan tumbuhan adalah sinar matahari yang diserap oleh tumbuhan dan diubahnya menjadi energi kimia	1942
AD Glass	Bagian yang paling bertanggung jawab dalam proses fotosintesis adalah kloroplas	1961

### 1. Fotosintesis Ditinjau dari Biologi

Cabang biologi yang berperan dalam mengkaji tumbuhan antara lain botani (dunia tumbuhan), sitologi (fungsi sel), histologi (jaringan), morfologi (bentuk tubuh), anatomi (struktur organ), dan fisiologi (cara kerja organ). Fokus ilmu botani mempelajari segala aspek yang berkaitan dengan tumbuhan. Ilmu ini meliputi penelitian tentang struktur, fungsi, evolusi, klasifikasi, distribusi, serta interaksi tumbuhan dengan lingkungannya. Botani mempelajari berbagai jenis tumbuhan, mulai dari tumbuhan mikroskopis seperti alga hingga tumbuhan berbunga yang kompleks (Ardiansyah, 2023: 2). Tumbuhan sebagai makhluk yang dapat membuat cadangan makanan secara mandiri (autotrof) tidak lepas dari peran organ berupa daun (*Folium*).

Secara morfologi, batasan secara menyeluruh dari semua tipe daun yang terlihat pada tumbuhan disebut *phyllom* (film). Berdasarkan variasi tersebut, folium dapat digolongkan ke dalam: daun lebar, profil, katafil, hipsofil, kotiledon, dan lain-lain. Daun lebar (daun hijau) berfungsi khusus untuk melakukan fotosintesis, biasanya berbentuk pipih mendatar sehingga mudah memperoleh

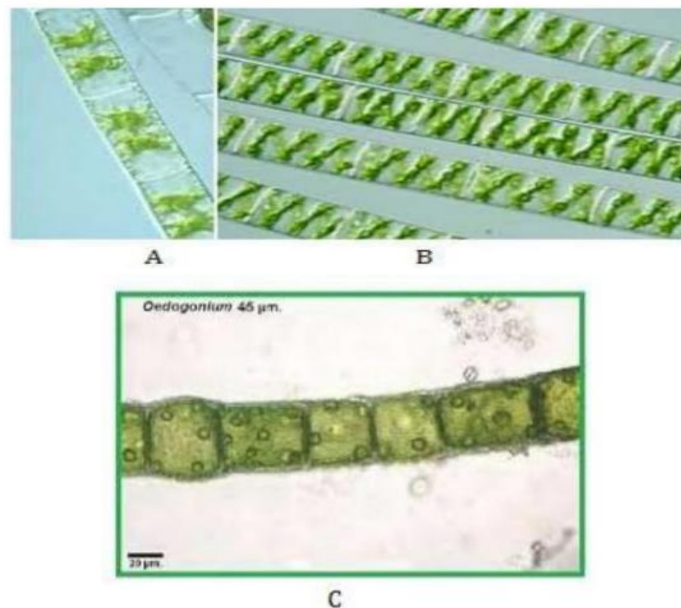


sinar matahari. Katafil adalah sisik pada tunas atau batang di bawah tanah, berfungsi sebagai pelindung atau tempat menyimpan cadangan makanan. Profil merupakan daun pertama yang tumbuh paling bawah di cabang lateral, pada monokotil hanya ada satu helai profil, sedang pada dikotil dijumpai dua helai profil. Hipsofil merupakan tipe-tipe braktea yang bergabung dengan bunga dan berfungsi sebagai pelindung, kadang-kadang hypsofil berwarna cerah dan menyerupai mahkota bunga. Kotiledon merupakan daun pertama pada tumbuhan (Ramdhini, 2021: 142).

Daun merupakan organ yang pertumbuhannya terbatas, dan pada umumnya simetris dorsiventral. Simetris artinya pencerminan, maksudnya jika daun dilipat di tengah akan membentuk ukuran yang sama, sedangkan dorsiventral yaitu memiliki permukaan atas (*adaxial*) dan bawah (*abaxial*) yang berbeda secara morfologis, yang memang secara nyata permukaan atas berwarna lebih gelap. Pada umumnya daun dorsiventral dimiliki oleh tumbuhan dikotil. Sedangkan pada tumbuhan monokotil rata-rata memiliki daun isobilateral yang secara morfologi sama di kedua sisinya, posisinya tegak, struktur internal hampir sama pada kedua permukaan daun sehingga cahaya masuk secara merata.

Pipihnya daun berkaitan dengan fungsinya dalam fotosintesis, karena dengan bentuk daun demikian maka luas daun yang terekspos sinar matahari bisa lebih luas. Daun ditutupi kedua permukaannya masing-masing oleh selapis epidermis. Dinding luar epidermis biasanya tebal dan dilapisi substansi berlilin yang disebut kutin. Permukaan luar epidermis seringkali dilapisi kutikula yang tebal maupun tipis. Lapisan kutikula ini dibentuk dari kutin. Stomata terdapat pada kedua sisi. Jaringan mesofil tidak mengalami diferensiasi menjadi jaringan tiang dan jaringan sponge, tetapi terdiri atas sel-sel parenkim dengan kloroplas dan ruang antar sel di antaranya (Sharma, 2019: 80).

Kloroplas yang fungsinya diperankan oleh leukoplas seperti amiloplas untuk penyimpanan amilum, sedikit kromoplas, dan elaioplas untuk lipid atau lemak, dan proteinoplas untuk protein. Hal ini dikarenakan kloroplas tidak lepas dari fungsinya sebagai organel yang berkaitan dengan penggabungan dan jumlah makanan. Kloroplas yang berubah menjadi kromoplas (mengandung karotin, berwarna orange, kuning emas, atau merah) menimbulkan peningkatan potensi sel dan jaringan untuk menyerap material yang larut dalam air seperti karbohidrat. Leukoplas (mengandung amilum disebut amiloplas, mengandung minyak disebut elaeoplas) berperan dalam membentuk asam amino, yakni pecahan protein yang terlibat dalam metabolisme (Hasanuddin, 2017: 17).



Gambar 1 Kloroplas Bentuk Bintang, Kloroplas Bentuk Spiral, Kloroplas Bentuk Jala (Sri Wahyuni, 2019: 21).

Kloroplas melakukan asimilasi  $\text{CO}_2$  dengan adanya cahaya matahari. Fungsi lain kloroplas adalah pengendapan glukosa (hasil asimilasi) menjadi amilum dan pelarutan kembali amilum menjadi glukosa. Disebut pula sebagai tepung asimilasi. Sedangkan kloroplasnya disebut kloroamiloplas. Butiran amilum di dalam kloroplas terbukti pada sel penutup mulut kulit (stomata) dengan pembubuhan karbohidrat. Zat hijau terlarut oleh karbohidrat, kloroplas membengkak dan amilumnya dengan J-klorohidrat akan berwarna biru atau ungu. Pada ultrastruktur kloroplas terlihat adanya amilum di beberapa tempat, di antaranya pada lamela (Sri Wahyuni, 2019: 22). Kloroplas juga berfungsi untuk memproduksi NADPH (Nicotinamide Adenine Dinucleotide Phosphate Hydrogen) yang dapat mensintesis glukosa di saat fotosintesis, melepaskan molekul-molekul oksigen ( $\text{O}_2$ ) melalui proses fotolisis air, memproduksi asam amino dan lipid guna memproduksi membran kloroplas, melindungi tanaman terhadap patogen, dan melakukan reproduksi bagian sel lainnya secara independen dan mandiri karena memiliki DNA sendiri yang berfungsi sebagai bahan genetik.

Dalam bahasa Yunani, *chroma* berarti “warna”. Dari segi bahasa, dapat kita pahami bahwa kromoplas merupakan plastida yang memiliki pigmen, sehingga dapat memberikan warna. Jika kalian melihat adanya warna selain hijau pada tumbuhan seperti merah, kuning, hingga jingga, maka warna tersebut ada karena peran dari kromoplas ini.

Adanya kandungan beta karoten pada kromoplas berfungsi untuk melakukan sintesis pigmen warna. Perlu diketahui pigmen sendiri merupakan zat warna yang diproduksi di dalam tubuh makhluk hidup. Pada tanaman berbunga dan memiliki buah, fungsi kromoplas dapat kita lihat secara kasat mata. Apalagi jika buah tersebut sudah matang dan tua, warnanya seringkali berubah dari warna mentahnya. Misalkan saja jeruk yang menguning, tomat yang menjadi kuning dan merah, pisang yang menguning, wortel yang menjadi orange, dan sebagainya. Warna yang dihasilkan oleh kromoplas ini juga dapat menarik perhatian polinator. Jika ada polinator yang tertarik, dia akan hinggap di tanaman tersebut. Hal ini akan menguntungkan tanaman karena polinator tersebut akan membantu proses penyerbukan tanpa ia sadari. Tidak seperti kloroplas, kromoplas tidak terlibat dalam proses fotosintesis. Karena tidak terlibat dalam fotosintesis, kromoplas tidak terlibat dalam produksi makanan nabati. Karotenoid pada kromoplas juga dapat berfungsi sebagai antikosidan pada tumbuhan (Nasution, 2016: 79).

Jika diamati dengan seksama menggunakan mikroskop elektron, kromoplas diklasifikasikan menjadi lima jenis, yaitu globular (biasanya ditemukan pada buah-buahan sitrus seperti jeruk, lemon, dan sebangsanya), membran konsentris (ditemukan pada bunga tulip dan *daffodil*), *tubular* (ditemukan pada *hypanthium*, mawar, dan *capsicum* atau cabai merah), *fribillar* (ditemukan pada lada), dan kristal (ditemukan akar wortel dan tomat). Secara ringkas, perbedaan antara kloroplas dan kromoplas terdapat pada enam hal, yakni tampilan warna, nama pigmen, letak, fungsi utama, sistem lamelar, dan ribosomnya. Dari warna, kloroplas berwarna hijau, sedangkan kromoplas berwarna kuning, merah, dan orange. Pigmen pada kloroplas mengandung klorofil, sedangkan kromoplas mengandung karotenoid (Utami, 2017: 45).

Letak klorofil berada di bagian tumbuhan yang berwarna hijau, sedangkan kromoplas dapat ditemukan di pada bagian tumbuhan yang tidak berwarna hijau, seperti buah matang, daun yang sudah tua, serta mahkota dan kelopak bunga. Fungsi utama kloroplas adalah sebagai tempat berlangsungnya fotosintesis, sementara kromoplas berfungsi untuk menarik perhatian pollinator. Kloroplas memiliki sistem lamelar, sementara kromoplas tidak memilikinya. Dan terakhir, dari segi ribosom, kloroplas memilikinya, sedangkan kromoplas tidak memiliki ribosom. Pada saat tertentu, kromoplas dapat berubah menjadi kloroplas kembali. Proses ini disebut dengan penghijauan ulang. Hal ini dapat terjadi pada beberapa bagian tanaman dan karena ada beberapa faktor penyebabnya. Fenomena ini ditandai dengan adanya peningkatan kadar klorofil dan

pengurangan karotenoid. Proses redifferensiasi ini terjadinya karena adanya bantuan hormon nitrat dan giberelin (Hermawan, 2018: 110).

Leukoplas merupakan salah satu jenis kloroplas yang secara eksklusif ditemukan dalam tumbuhan. Berbeda dengan jenis plastida lainnya, leukoplas tidak berwarna karena tidak memiliki pigmen apapun. Oleh karena itu, plastida jenis ini dinamakan leukoplas, yang dalam bahasa Yunani, leuco artinya putih dan plastos artinya dibentuk. Biasanya leukoplas dapat ditemukan pada jaringan-jaringan nonfotosintetik seperti endosperma, akar, umbi, dan biji. Semuanya merupakan tempat untuk menyimpan protein, pati, dan lipid di dalam tumbuhan. Leukoplas dapat melaksanakan fungsi biosintetik seperti mensintesis asam amino, asam lemak, dan senyawa-senyawa lainnya.

## **2. *Fotosintesis Ditinjau dari Ilmu Fisika***

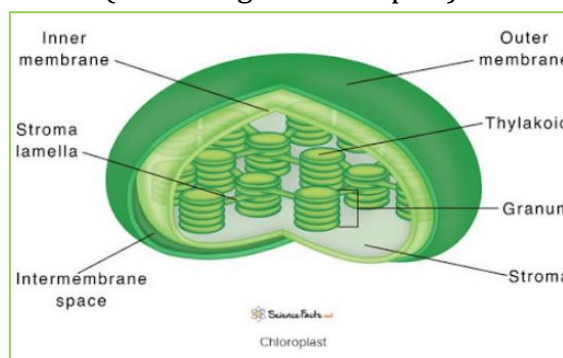
Fisika adalah ilmu alam dengan ruang lingkup makhluk hidup dan tak hidup. Orang menyebut hukum fisika sama dengan hukum alam. Seiring perkembangan zaman kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi serta keterbatasan manusia dalam menguasainya, hal ini menjadikan fisika mempunyai makna yang lebih sempit. Fisika dimaknai sebagai ilmu yang mendeskripsikan alam (tak hidup) secara kuantitatif. Adapun ilmu yang mempelajari makhluk tak hidup (abiotik) secara kualitatif bukan bagian dari fisika (Jati, 2013: 3).

Pertanyaan yang sesuai dengan sifat kuantitatif adalah 'berapa' dengan bantuan angka yang artinya terdapat pembandingan sehingga bebas dari perasaan seseorang (objektif) dan jauh dari kesalahpahaman. Sedangkan kualitatif sifatnya memberikan jawaban dari pertanyaan 'bagaimana' dan menggunakan prasangka atau perasaan seseorang (subjektif) dan lebih dekat dengan kesalahpahaman. Contoh pernyataan kuantitatif yaitu tinggi tumbuhan 1 meter, sedangkan pernyataan kualitatif yakni 'tumbuhan sudah tumbuh tinggi'. Ukuran tinggi menurut seseorang dengan orang lain relatif berbeda. Ada yang berpendapat tumbuhan yang dikatakan tinggi seperti tiang listrik. Berdasarkan dari karakteristiknya, maka dapat disimpulkan bahwa ilmu fisika adalah ilmu yang membahas kondisi fisik suatu benda atau fenomena alam yang dijabarkan dalam besaran-besaran dengan ukuran-ukuran tertentu (Jati, 2013: 2).

Pada tumbuhan, organ utama tempat berlangsungnya fotosintesis adalah daun. Namun secara umum, semua sel yang memiliki kloroplas berpotensi untuk melangsungkan fotosintesis. Di organel inilah tempat berlangsungnya fotosintesis, tepatnya pada bagian stroma. Hasil fotosintesis disebut fotosintat,

biasanya dikirim ke jaringan-jaringan terdekat terlebih dahulu (Zulkarnain, 2022: 101).

Jika diperhatikan dengan seksama gambar bagian-bagian kloroplas, ada dua membran, yakni membran dalam dan membran luar. Di antara dua membran tersebut terdapat ruang sebesar 10-20 nanometer (ukuran nanometer (nm) setara dengan  $10^{-9}$  meter atau  $1/1.000.000.000$ ). Di dalamnya terdapat sistem membran lain yang bentuknya menyerupai kantong-kantong pipih yang dinamakan tilakoid yang susunannya bertumpuk dan membentuk struktur unik jamak granum (grana). Setiap grana mengandung 10-20 tilakoid. Ruangan di antara grana disebut dengan stroma. Di dalam tilakoid inilah terdapat pigmen fotosintesis, yakni klorofil (dalam organel kloroplas) dan karoten.



Gambar 2 Struktur Anatomi Kloroplas

Dalam istilah sehari-hari sering dijelaskan beta karoten yang merupakan senyawa penting dalam menjaga kesehatan kulit dan mata. Kekurangan beta karoten dapat menimbulkan rambut rontok, iritasi kulit, dan mata kering atau mengalami peradangan. Beta karoten merupakan pro-vitamin A yang diubah oleh tubuh menjadi vitamin A, berwarna kuning pekat yang banyak terdapat dalam sayuran hijau dan buah-buahan berwarna kuning dan merah kebiruan seperti tomat dan wortel (Siregar, 2021: 98).

Karotenoid dalam kromoplas merupakan komponen integral fotosistem tumbuhan tingkat tinggi. Fungsi yang dijalankan sangat penting termasuk bertindak sebagai komponen struktural LHC (Light-Harvesting Complex/Kompleks Pemanen Cahaya), pigmen aksesori untuk pemanenan cahaya, substrat untuk sistesis asam absisat dan komponen fotoproteksi yang terlibat dalam pembuangan energi berlebih (Prasetyo, 2022: 56). Dibandingkan dengan kloroplas, ukuran kromoplas relatif lebih kecil, meskipun besarnya bervariasi. Di bagian dalamnya, terdapat molekul besar yang disebut fibril. Di dalam fibril terdapat tetesan lipid.

Pada tumbuhan yang termasuk tingkat tinggi, kloroplas umumnya memiliki bentuk bikonveks (cembung rangkap) dan plankonveks (cembung datar). Sedangkan pada tanaman lainnya bervariasi mulai dari berserabut, bulat, bulat telur, hingga diskoid (cakram). Ukuran kloroplas rata memiliki diameter 4  $\mu\text{m}$ -6  $\mu\text{m}$  dan ketebalan 1  $\mu\text{m}$ -3  $\mu\text{m}$  (ukuran mikrometer setara dengan  $10^{-6}$  meter atau 1/1.000.000).

Pada respirasi (pernapasan) tumbuhan, energi dilepaskan ketika molekul-molekul seperti glukosa ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ) dioksidasi menjadi karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) dan uap air ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Energi yang dilepaskan disimpan sebagai ATP (Adenosine Triphosphate). Sebagian besar ATP dibentuk ketika respirasi yang berasal dari reaksi di dalam mitokondria. Energi cahaya diserap oleh sistem pigmen di dalam kloroplas, dan energi tersebut digunakan untuk membentuk ATP pada awalnya, kemudian membentuk molekul gula dan gas oksigen dilepaskan (Kurniawati, 2021: 121).

Dari semua radiasi matahari yang dipancarkan, hanya panjang gelombang tertentu yang dimanfaatkan tumbuhan untuk proses fotosintesis, yaitu panjang gelombang yang berada pada kisaran cahaya tampak (380-700 nm). Cahaya tampak terbagi atas cahaya merah (610 - 700 nm), hijau kuning (510 - 600 nm), biru (410 - 500 nm) dan violet (< 400 nm) (Lajnah Pentashihan Mushaf Al-Qur'an, 2010: 130). Masing-masing jenis cahaya berbeda pengaruhnya terhadap fotosintesis. Hal ini terkait pada sifat pigmen penangkap cahaya yang bekerja dalam fotosintesis. Pigmen yang terdapat pada membran grana menyerap cahaya yang memiliki panjang gelombang tertentu. Pigmen yang berbeda menyerap cahaya pada panjang gelombang yang berbeda. Kloroplas mengandung beberapa pigmen (Lakitan, 1993; 155).

Sinar matahari yang terdiri dari spektrum warna dapat menembus air. Dalam air laut sebagian cahaya dipantulkan, sebagian yang lain seperti warna merah dan jingga dapat mencapai kedalaman puluhan meter, kuning mencapai 50-100 m, hijau dan biru mencapai 100-200 m, dan violet lebih dari 200 m. Sinar ungu (violet) dan ultraviolet berperan penting dalam proses asimilasi pada ganggang laut yang termasuk dalam rantai makanan hewan laut seperti ikan, yang selanjutnya menjadi makanan bagi manusia (Lakitan, 1993: 134).

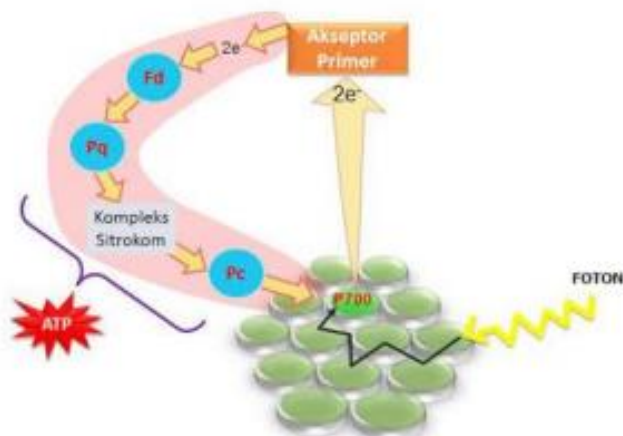
Proses absorpsi energi cahaya menimbulkan lepasnya elektron berenergi tinggi dari 'klorofil a' yang selanjutnya disalurkan dan ditangkap oleh akseptor elektron. Selanjutnya, elektron ini memasuki sistem siklus elektron. Elektron yang lepas oleh 'klorofil a' mempunyai energi tinggi sebab memperoleh energi dari cahaya yang berasal dari molekul perangkat pigmen yang disebut kompleks antena (*antenna complexes*). Tidak semua panjang gelombang yang tiba di



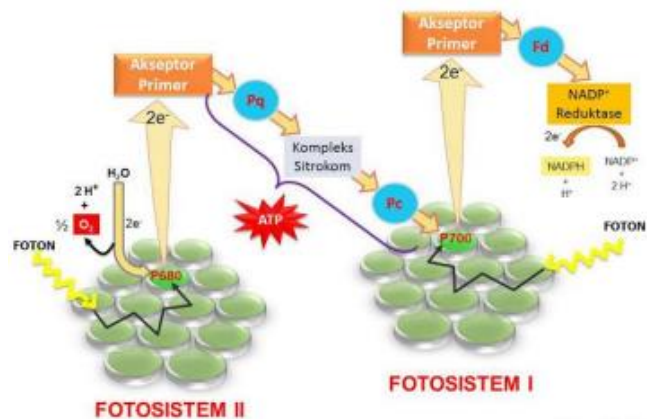
permukaan bumi diserap saat proses fotosintesis. Misalnya warna hijau yang menjadi warna dominan dari tumbuhan sebenarnya adalah sinar yang dipantulkan dan tertangkap oleh mata manusia. Semua kompleks antena mampu mentransfer energi sinar matahari untuk dua tipe pusat reaksi fotokimia yaitu 'Fotosistem I' dan 'Fotosistem II' yang lokasinya pada membran tilakoid.

Tabel 2. Perbedaan Reaksi Terang pada Fotosistem I dan Fotosistem II

Fotosistem I	Fotosistem II
Penyerapan energi cahaya dilakukan oleh 'klorofil a' yang sensitif terhadap cahaya dengan panjang gelombang 700 nanometer, sehingga 'klorofil a' disebut juga P <sub>700</sub> . Energi yang diperoleh P <sub>700</sub> ditransfer dari kompleks antena.	Penyerapan energi cahaya dilakukan oleh 'klorofil a' lainnya yang sensitif terhadap panjang gelombang 680 nanometer sehingga disebut P <sub>680</sub> yang teroksidasi merupakan pengoksidasi yang lebih kuat daripada P <sub>700</sub> .



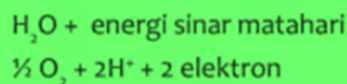
Gambar 3 Aliran Fotofosforilasi Siklik (Fotosistem I)



Gambar 4 Aliran Fotofosforilasi Non Siklik (Fotosistem II) (Sumber: Tamam, 2017)

Fotosistem II adalah satu-satunya enzim biologi yang diketahui melaksanakan oksidasi air. Ion Hidrogen berkontribusi terhadap potensi kemiosmosis transmembran yang berujung pada sintesis ATP. Oksigen adalah

produk ampas dari reaksi terang, namun sebagian besar organisme di bumi memanfaatkan oksigen untuk respirasi sel, termasuk organisme fotosintesis.



Klorofil bereaksi sangat cepat apabila terkena sinar matahari. Kecepatan reaksinya terhadap sinar matahari mendekati 1 milisekon (1/1000 detik atau  $10^{-3}$  detik). Kecepatan yang begitu dahsyat membuat banyak mekanisme dalam proses fotosintesis masih belum sepenuhnya dapat diamati para peneliti. Dalam skala waktu, urutan dan kinetika proses fotosintesis terbagi dalam empat tahap sebagai berikut:

Tabel 3 Proses Fotosintesis (Lakitan, 1993: 132)

No.	Proses	Skala Waktu
1.	Perpindahan energi pada klorofil antena (membran tilakoid)	Femtodetik ( $10^{-15}$ ) sampai dengan pikodetik ( $10^{-12}$ )
2.	Perpindahan elektron pada reaksi fotokimia (membran tilakoid)	Pikodetik sampai nanodetik ( $10^{-9}$ )
3.	Rantai perpindahan elektron dan sintesis ATP (membran tilakoid)	Mikrodetik ( $10^{-6}$ ) sampai mlidetik ( $10^{-3}$ )
4.	Fiksasi karbon dan ekspor produk stabil	Milidetik sampai detik

Dari spektrum total radiasi elektromagnetik, fotosintesis menggunakan panjang gelombang cahaya hanya sebuah fraksi kecil. Warna-warna dari spektrum cahaya memiliki panjang gelombang sekitar antara 380 sampai 750 nanometer secara berturut-turut. Kemampuan cahaya untuk melepas elektron (eksitasi) berhubungan dengan panjang gelombangnya, bukan dengan kecerahan (intensitas) berkas cahaya. Hanya sebagian kecil cahaya yang mencapai tumbuhan yang benar-benar diserap. Sebagian besar cahaya hanya melewati tumbuhan (ditransmisikan) atau dipantulkan dari permukaan tumbuhan (Lakitan, 1993: 68). Energi cahaya diserap oleh pigmen klorofil dan digunakan untuk mengubah molekul air menjadi oksigen dan proton ( $\text{H}^+$ ) dalam proses yang disebut fotolisis air. Energi cahaya yang diserap juga digunakan untuk menghasilkan energi kimia dalam bentuk ATP dan NADPH.

Reaksi terang terjadi pada grana (tunggal:granum), sedangkan reaksi gelap terjadi di dalam stroma. Dalam reaksi terang, terjadi konversi energi cahaya menjadi energi kimia dan menghasilkan oksigen ( $\text{O}_2$ ). Sedangkan dalam reaksi gelap terjadi reaksi siklik yang membentuk glukosa dari bahan dasar  $\text{CO}_2$  dan energi ATP dan NADPH. Energi yang digunakan dalam reaksi gelap ini diperoleh dari reaksi terang. Pada proses reaksi gelap tidak dibutuhkan cahaya matahari.

Reaksi gelap bertujuan untuk mengubah senyawa yang mengandung atom karbon menjadi molekul glukosa (Lakitan, 1993: 69).

Perpindahan molekul zat pada tumbuhan ada dua macam yaitu difusi dan osmosis. Difusi merupakan terjadinya pergerakan molekul atau ion dari daerah yang konsentrasinya tinggi (pekat) ke daerah yang konsentrasinya rendah yang disebabkan energi kinetik dari molekul, ion, atau atom-atom. Selain karena perbedaan konsentrasi, perbedaan dalam sifat juga dapat menyebabkan difusi (Saputra, 2020: 29). Contoh difusi pada tumbuhan pada proses pertukaran gas di daun. Gas CO<sub>2</sub> dari atmosfer masuk ke rongga antar sel pada mesofil daun, yang selanjutnya digunakan untuk proses fotosintesis. Kadar CO<sub>2</sub> dalam rongga antar sel selalu lebih rendah dari CO<sub>2</sub> atmosfer karena aktif digunakan untuk fotosintesis. Akibatnya terjadi difusi CO<sub>2</sub> dari atmosfer ke daun. Terjadi pula difusi O<sub>2</sub> dari rongga antar sel menuju atmosfer, karena O<sub>2</sub> di dalam daun terakumulasi melebihi kadar O<sub>2</sub> di atmosfer sehingga oksigen berdifusi dari daun ke atmosfer. Sedangkan pada reaksi gelap terjadi respirasi tidak terjadi fotosintesis sehingga. Kandungan CO<sub>2</sub> dalam rongga antar sel meningkat. Laju difusi tergantung pada suhu dan densitas (kepadatan/ kepekatan) medium (Rahmawati, 2022: 63; Suryadi, 2021: 51). Gas berdifusi lebih cepat daripada zat cair. Zat padat berdifusi lebih lambat daripada zat cair. Molekul yang lebih besar lebih lambat pergerakannya dibanding dengan molekul yang lebih kecil.

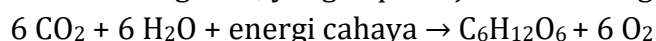
Osmosis adalah perpindahan molekul atau ion tertentu dari konsentrasi rendah (encer/ hipotonis) ke konsentrasi tinggi (pekat/ hipertonis) melalui selaput/membran semipermeabel. Proses osmosis akan berhenti jika konsentrasi zat di kedua sisi membran telah mencapai keseimbangan (Suhartono. et al., 2008). Contoh osmosis pada tumbuhan yaitu penyerapan melalui rambut akar, air diserap dan disebarkan ke seluruh jaringan yang hidup dari sel ke sel, cahaya merangsang peningkatan osmosis pada sel penjaga sehingga menyebabkan pengambilan air ketika stomata membuka, dan pertumbuhan sel yang muda sampai pemanjangan sel disempurnakan oleh tekanan osmotik dan tekanan turgor dari sel (Rahmawati, 2022: 54).

### **3. *Fotosintesis Ditinjau dari Ilmu Kimia***

Fotosintesis merupakan proses pembentukan molekul-molekul yang kompleks dan berenergi tinggi dari komponen-komponen sederhana oleh tumbuhan hijau dan organisme autotrofik lainnya dengan keberadaan energi cahaya. Foton (paket satuan) cahaya ditangkap oleh molekul-molekul pigmen yang spesifik. Elektron-elektron di dalam molekul-molekul pigmen tersebut dieksitasi oleh foton-foton yang diserap, dan elektron-elektron yang tereksitasi

(terlepas) pada akhirnya akan membebaskan energi ke dalam sel saat elektron-elektron itu kembali ke keadaan tidak tereksitasi. Banyak sel menggunakan energi ini untuk mereduksi karbon dioksida menjadi karbohidrat. Fotosintesis adalah reaksi endergonik utama dalam kehidupan (sebuah proses menaiki bukit di mana molekul-molekul berenergi rendah seperti karbon dioksida dan air berinteraksi untuk membentuk karbohidrat berenergi tinggi dan pada akhirnya lipid/lemak dan protein). Reaksi fotosintetik pada dasarnya merupakan pembalikan dari respirasi selular yang merupakan proses eksergonik (Rahmawati, 2022:68).

Proses fotosintesis tersusun atas serangkaian jalur metabolik rumit yang dapat dirangkum menjadi dua yaitu “reaksi terang” yang tergantung cahaya menghasilkan NADPH dan ATP, yang kemudian akan digunakan untuk mereduksi CO<sub>2</sub> menjadi karbohidrat melalui “reaksi gelap”. Reaksi kimia utama dalam fotosintesis adalah fotosintesis global, yang dapat dijelaskan sebagai berikut:



Proses ini melibatkan serangkaian reaksi redoks kompleks yang terdiri dari reaksi tereduksi (pengurangan) dan teroksidasi (oksigenasi). Sedangkan proses reaksi gelap tidak memerlukan cahaya tetapi memerlukan karbon dioksida yaitu serangkaian reaksi yang terjadi dalam siklus Calvin, di mana CO<sub>2</sub> dikonversi menjadi glukosa menggunakan ATP dan NADPH yang dihasilkan selama tahap terang (Stitt, 1996; 151).

Tabel 4 Perbedaan Proses Kimiawi Fotosistem I dan Fotosistem II

Fotosistem I	Fotosistem II
Elektron klorofil yang terenergisasi pada akhirnya menyelesaikan satu sirkuit, sehingga jalur itu dikenal sebagai fotofosforilasi siklik.	Keseluruhan jalur perpindahan elektron dari air menuju fotosistem II, terus ke fotosistem I, lalu ke NADP <sup>+</sup> disebut fosforilasi nonsiklik. Penyerapan energi cahaya, dengan menggunakan molekul-molekul pigmen yang elektronnya mengalami peningkatan tingkat energi, dan meneruskan energi tersebut secara tidak langsung ke jalur-jalur lain dalam sel.
Sebuah foton dengan panjang gelombang yang sesuai diserap oleh berbagai molekul pigmen (klorofil a dan b, karotenoid) dari Fotosistem I dan energinya ditransfer ke sebuah molekul klorofil a tertentu pada situs reaktif. Sebuah elektron dari klorofil a tersebut terdorong naik ke	Terjadi pada elektron tereksitasi yang dihasilkan oleh penyerapan cahaya pada fotosistem I. Elektron-elektron tersebut bisa berkombinasi dengan sebuah molekul reseptor, tapi kemudian bukannya kembali ke titik awal, malah bergerak sepanjang sebuah rantai yang berakhir di koenzim NADP <sup>+</sup> dan mengkonversinya menjadi NADPH. Dalam perjalanan menuju NADP <sup>+</sup> , seperti juga pada kemungkinan pertama, elektron bergerak menuruni gradien energi dan terlibat dalam pembentukan ATP. Baik ATP maupun NADPH akan

tingkat energi yang lebih tinggi, berkombinasi dengan sebuah molekul reseptor, bergerak menuruni gradien energi bebas, dan pada akhirnya kembali ke titik awalnya. Dalam proses ini, dihasilkan ATP dalam jumlah kecil; seperti juga di mitokondria, pembentukan ATP dipercaya terjadi secara kemiosmotik melalui penciptaan gradien H. Karena ATP dibentuk seiring dengan penyerapan cahaya, reaksi tersebut diberi nama fotofosforilasi.	<p>digunakan dalam reaksi gelap untuk mereduksi CO<sub>2</sub> menjadi karbohidrat.</p> <p>Elektron yang terlepas dari klorofil dan diterima oleh NADP<sup>+</sup> pada akhirnya akan dikembalikan melalui intervensi peristiwa terang kedua yang melibatkan sistem pigmen yang berbeda dari yang digunakan dalam Fotosistem I. Molekul-molekul klorofil fotosistem II menyerap cahaya dan mentransfer elektron-elektron tereksitasi ke penerima yang mengawali perjalanan elektron-elektron itu sepanjang gradien energi menuju fotosistem I. Hal itu mengisi "kekosongan" elektron di fotosistem I tetapi meninggalkan kekosongan di fotosistem II. Kekosongan di fotosistem II itu diisi melalui reaksi di mana air dipecah oleh energi yang diserap foton menjadi elektron, H<sup>+</sup>, dan O<sub>2</sub>. Elektron-elektron yang diterima oleh molekul-molekul klorofil fotosistem II mengembalikan molekul-molekul itu ke kondisi awal. H<sup>+</sup> akan bergerak bersama elektron-elektron yang ditangkap oleh NADP<sup>+</sup> dan memengaruhi reduksi CO<sub>2</sub> dalam reaksi gelap yang membebaskan O<sub>2</sub> selama berlangsungnya proses tersebut.</p>
--	---

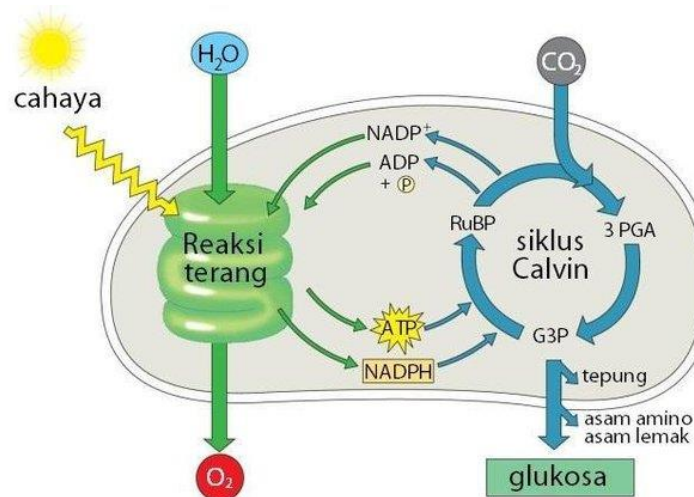
Reaksi gelap (siklus Calvin-Benson) adalah jalur di mana terjadi reduksi CO<sub>2</sub> menjadi gula. Komponen-komponen reaksi tersebut ditemukan di stroma kloroplas. Reaksi gelap sesungguhnya tidak benar-benar harus terjadi dalam kondisi gelap; hanya saja reaksi itu tidak tergantung pada cahaya. Karena CO<sub>2</sub> merupakan senyawa yang miskin energi, konversinya menjadi karbohidrat yang kaya energi melibatkan loncatan ke atas yang luar biasa pada tangga energi. Hal tersebut bisa dilakukan melalui serangkaian langkah rumit yang melibatkan energi dalam jumlah kecil.

Reaksi awal melibatkan penyatuan CO<sub>2</sub> dengan sebuah senyawa 5-karbon yang disebut ribulosa bifosfat (ribulose biphosphate/RuBP). Sebuah senyawa 6-karbon yang masih belum diketahui mungkin terbentuk dan pecah menjadi dua molekul senyawa 3-karbon asam fosfoglisarat (PGA), yang ditemui dalam proses glikolisis. Setiap molekul PGA kemudian direduksi menjadi fosfogliseraldehida (PGAL) yang mengandung sangat banyak energi. PGAL adalah gula yang sesungguhnya, yang merupakan produk stabil pertama dari fotosintesis.

Dalam glikolisis, langkah yang amat penting adalah oksidasi PGAL menjadi asam difosfoglisarat, dengan NAD<sup>+</sup> sebagai penerima elektron. Dalam fotosintesis, yang pada dasarnya merupakan pembalikan degradasi karbohidrat yang dilakukan oleh glikolisis, PGA direduksi menjadi PGAL, dengan NADPH yang menjadi donor elektron. Dalam banyak sintesis reduktif, NADPH adalah koenzim yang terlibat, sementara dalam reaksi-reaksi degradasi untuk pembebasan

energi, koenzim aktifnya biasanya adalah  $\text{NAD}^+$ . Rasio antara PGAL dan PGA bisa jadi merupakan ukuran penting dari keseimbangan antara reaksi-reaksi sintesis dan pemecahan molekul di dalam sel.

Untuk setiap 6 molekul PGAL yang dihasilkan, 5 molekul akan digunakan untuk membentuk RuBP baru sehingga  $\text{CO}_2$  dapat terus-menerus diikat dan dikonversi secara tak langsung menjadi PGAL. Walaupun molekul PGAL yang tersisa dapat dikonversi menjadi glukosa melalui pembalikan jalur glikolitik yang biasa, PGAL tidak disimpan seperti itu dalam sel. Akan tetapi, terbentuk disakarida seperti sukrosa atau, yang lebih sering akan terakumulasi menjadi pati di tempat berlangsungnya aktivitas fotosintesis. Sel tumbuhan juga bisa mengkonversi PGAL menjadi lipid (lemak) dan protein yang diperlukannya.



Gambar 4 Proses Reaksi Terang dan Reaksi Gelap  
(sumber: Hendrik, 2021)

Senyawa karbohidrat yang terbentuk merupakan makanan bagi hewan dan manusia sekaligus sebagai cadangan energi. Karbohidrat sederhana seperti glukosa dan fruktosa dapat terbentuk pada batang tebu dan buah-buahan yang lezat yang menjadi sumber makanan yang mudah dicerna menjadi energi untuk aktivitas manusia. Senyawa karbohidrat yang lebih besar molekulnya dapat ditemukan dalam bentuk pati yang terdapat pada jagung, padi, tela, singkong. Pati dalam tubuh dapat diubah menjadi glukosa. Karbohidrat yang senyawanya lebih besar lagi berbentuk selulosa, pembentuk jaringan tanaman atau berupa kayu. Selulosa sebagai makanan binatang. Dalam pencernaan binatang terdapat enzim yang mampu mengurai selulosa menjadi energi (Lajnah Pentashihan Mushaf Al-Qur'an, 2010: 132).



#### **4. Fotosintesis Ditinjau dari Ilmu Pengetahuan Bumi**

Fotosintesis merupakan salah satu komponen utama dalam siklus karbon, di mana karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) dari atmosfer diambil oleh tumbuhan dan digunakan untuk membuat glukosa selama proses fotosintesis. Karbon yang terperangkap dalam glukosa kemudian bisa beredar melalui rantai makanan atau disimpan dalam bentuk biomassa. Ketika tumbuhan atau organisme yang melakukan fotosintesis mati atau didekomposisi, karbon tersebut bisa dilepaskan kembali ke atmosfer sebagai  $\text{CO}_2$  melalui proses dekomposisi atau pembakaran.

Selama fotosintesis, oksigen juga dihasilkan sebagai produk sampingan ketika air dipecah menjadi oksigen dan proton. Oksigen yang dihasilkan oleh fotosintesis sangat penting bagi semua bentuk kehidupan di Bumi karena digunakan dalam respirasi aerob untuk menghasilkan energi. Siklus oksigen menggambarkan pergerakan oksigen antara atmosfer, litosfer, dan biosfer, di mana fotosintesis merupakan sumber utama oksigen atmosfer.

Matahari adalah sumber energi utama bagi bumi. Pemanasan matahari pada siang hari dan pendinginan pada malam hari dalam skala harian, atau musim panas dan musim dingin dalam skala tahunan, berperan besar pada gerakan massa udara dalam bentuk angin, baik dalam skala lokal maupun global. Demikian juga penguapan air di permukaan bumi oleh matahari sehingga menjadi awan, dan dari awan itu turun hujan, kemudian airnya mengalir ke tempat yang rendah, tampak jelas peranan matahari dalam siklus hidrologi yang merupakan gerakan massa air. Angin atau yang secara umum kita kenal sebagai dinamika atmosfer berperan besar dalam distribusi energi di bumi. Dalam QS. An Naml ayat 60 *"Bukankah Dia (Allah) yang menciptakan langit dan bumi dan yang menurunkan air dari langit untukmu, lalu Kami tumbuhkan dengan air itu kebun-kebun yang berpemandangan indah? Kamu tidak akan mampu menumbuhkan pohon-pohonnya. Apakah di samping Allah ada tuhan (yang lain)? Sebenarnya mereka adalah orang-orang yang menyimpang (dari kebenaran)."*

Fotosintesis juga memengaruhi ekosistem bumi melalui interaksi dengan organisme lain dan faktor abiotik seperti suhu, cahaya, dan ketersediaan air. Tingkat fotosintesis dalam suatu daerah dapat mempengaruhi ketersediaan sumber daya bagi organisme lain dalam rantai makanan dan jaringan trofik.

Fotosintesis juga memainkan peran penting dalam mengatur konsentrasi  $\text{CO}_2$  atmosfer karena tumbuhan mengambil  $\text{CO}_2$  dari udara selama proses fotosintesis. Penurunan konsentrasi  $\text{CO}_2$  atmosfer yang disebabkan oleh fotosintesis dapat mempengaruhi efek rumah kaca dan iklim global. Ditinjau dari keikliman, unsur-unsur iklim seperti suhu udara, curah hujan, dan kecepatan

angin dikendalikan oleh keseimbangan energi antara bumi dan atmosfer. Rata-rata energi yang diserap dari sinar matahari seimbang dengan energi yang dipancarkan kembali oleh bumi berupa sinar inframerah yang bersifat panas. Gas rumah kaca (GRK) seperti karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ), metana ( $\text{CH}_4$ ), nitrogen dioksida ( $\text{NO}_2$ ) dan uap air ( $\text{H}_2\text{O}$ ) di lapisan bawah atmosfer menyerap sinar inframerah tersebut sehingga memberikan pengaruh hangat di atmosfer. Efek ini dikenal sebagai efek gas rumah kaca (GRK). Jadi, GRK dalam jumlah tertentu sangat dibutuhkan. Sebab, tanpa GRK, bumi akan sangat dingin. Semua ini terjadi dalam keseimbangan (Lajnah Pentashihan Mushaf Al-Qur'an, 2010: 42).

Minyak bumi terbentuk dari sisa tumbuhan, binatang, dan plankton. Setelah bangkai, sisa tumbuhan, dan plankton membusuk dan tersimpan selama jutaan tahun di bawah timbunan tanah dan batuan, maka yang tersisa adalah minyak bumi dan gas. Terjadinya gerakan-gerakan pada kerak bumi memungkinkan batuan yang mengandung minyak tertimbun pada kedalaman ratusan ribu meter di bawah permukaan. Minyak yang terbentuk kadang masuk ke rekahan kerak bumi dan naik ke atas permukaan. Sesampai di permukaan, minyak akan menguap sebagai gas dan menyisakan batuan batubara muda di dalam tanah (Lajnah Pentashihan Mushaf Al-Qur'an, 2010: 31).

Bahan bakar fosil dibentuk oleh pembusukan atau dekomposisi secara anaerobik (tanpa bantuan oksigen) dari sumber daya alam (sisa tumbuhan dan binatang, termasuk zooplankton dan fitoplankton yang mengendap dalam jumlah besar di dasar laut) pada jutaan tahun yang lalu. Skala waktunya kadangkala melebihi 650 juta tahun. Dalam jangka waktu geologi yang lama ini material organik akan bercampur dengan lumpur, dan tertimbun di bawah lapisan sedimen yang sangat tebal dan berat. Tekanan dan suhu yang tinggi mengubah bahan organik tersebut secara kimiawi menjadi cairan (minyak), bahan keras (batubara), dan gas. Bahan bakar yang dihasilkannya terutama mengandung bahan karbon dan hidrokarbon yang tinggi. Konsumsi bahan bakar fosil pada tahun 2007 diperkirakan mencapai 86,4% dari total konsumsi bahan bakar secara umum. Jumlah itu terdiri dari minyak bumi (36%), batubara (27,4%), dan gas bumi (23%). Sisanya yang 13,6% disumbangkan oleh bahan bakar nonfosil, seperti listrik tenaga air, nuklir, geotermal, tenaga matahari, gelombang, angin, kayu, dan lainnya. Pada umumnya, peningkatan keperluan energi dari tahun ke tahun naik sebesar 2,3% (Lajnah Pentashihan Mushaf Al-Qur'an, 2010: 42).

## **5. *Fotosintesis Ditinjau dari Ilmu Antariksa***

Dalam konteks ilmu antariksa, matahari merupakan sumber energi utama bagi fotosintesis di Bumi. pemahaman tentang matahari dan interaksi

sinar matahari dengan atmosfer bumi sangat penting. Ilmu antariksa mempelajari berbagai aspek radiasi matahari, termasuk spektrum elektromagnetiknya dan bagaimana radiasi ini berinteraksi dengan atmosfer bumi (Arno Smets. et.al, 2016; 3). Pemahaman ini penting untuk mengetahui bagaimana energi matahari diserap oleh tumbuhan di bumi untuk melakukan fotosintesis. Matahari juga memiliki pengaruh besar terhadap iklim bumi melalui variasi dalam aktivitasnya. Studi ilmu antariksa memperluas pemahaman tentang bagaimana aktivitas matahari, seperti *siklus sunspot* dan variasi dalam output energinya, dapat mempengaruhi iklim bumi (S.K.Pandey, 2010).

Satelit dan pesawat ruang angkasa memungkinkan pengamatan matahari dan bumi dari luar angkasa. Data yang dikumpulkan dari pengamatan tersebut membantu ilmuwan memahami lebih dalam tentang radiasi matahari dan bagaimana energi tersebut mempengaruhi biosfer bumi.

Fotosintesis juga menjadi subjek penting dalam studi ilmu antariksa, terutama dalam konteks eksplorasi luar angkasa dan kolonisasi planet lain. Studi tentang fotosintesis dilakukan di luar angkasa untuk memahami bagaimana lingkungan antariksa mempengaruhi proses ini. Misalnya, eksperimen dilakukan di stasiun luar angkasa seperti International Space Station (ISS) untuk mempelajari respons tumbuhan terhadap gravitasi rendah, radiasi, dan perubahan lingkungan lainnya (National Research Council, 1998: ix). Fotosintesis juga menjadi pertimbangan penting dalam perencanaan misi antariksa jangka panjang, terutama jika manusia berencana untuk melakukan perjalanan ke planet lain atau membangun koloni luar angkasa. Pertimbangan ini termasuk bagaimana menyediakan sumber daya makanan dan oksigen bagi para astronot atau kolonis.

Konsep pertanian antariksa, seperti hydroponik atau aeroponik, melibatkan penggunaan teknologi untuk tumbuh tanaman di luar angkasa. Fotosintesis adalah proses utama yang memungkinkan tanaman tumbuh dan menghasilkan oksigen di lingkungan luar angkasa yang terisolasi.

Memahami fotosintesis juga relevan dalam upaya pencarian kehidupan di luar Bumi. Misalnya, jika ada kehidupan di planet lain, kemungkinan besar proses fotosintesis akan menjadi komponen penting dalam siklus energi dan biosfer mereka.

Dalam konsep-konsep seperti biosfera tertutup atau habitat manusia berkelanjutan di luar angkasa, tanaman yang melakukan fotosintesis dapat digunakan untuk menyediakan oksigen, menghasilkan makanan, dan bahkan membersihkan air dan udara.

#### D. Simpulan

Fenomena fotosintesis tumbuhan melibatkan sinergisitas antara berbagai cabang Ilmu Pengetahuan Alam, yaitu Biologi, Fisika, Kimia, serta Ilmu Pengetahuan Bumi dan Antariksa. Aspek biologis terkait dengan struktur tumbuhan, terutama daun dan organel kloroplas yang berperan dalam produksi cadangan makanan. Aspek fisika melibatkan energi cahaya matahari dan perubahannya menjadi energi kimia, serta proses perpindahan zat melalui difusi dan osmosis. Sedangkan aspek kimia berkaitan dengan reaksi antara karbondioksida dan air dalam menghasilkan glukosa dan oksigen. Proses fotosintesis juga berperan penting dalam menjaga kestabilan suhu bumi, siklus hidrologi, dan siklus karbon yang dibahas dalam ilmu pengetahuan bumi. Pemahaman tentang keterkaitan antar bidang-bidang ilmu ini memungkinkan siswa memperoleh pemahaman yang lebih holistik dan aplikatif mengenai alam semesta serta relevansinya dalam kehidupan sehari-hari.

#### Daftar Rujukan

- Aqil, F. (2013). *Pengelolaan Air Tanaman Jagung (Zea mays)*. Balai Penelitian Tanaman Serealia.
- Ardiansyah, R. (2023). *Botani*. Widina Media Utama.
- Arno Smets. et.al. (2016). *The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and System*. Bloomsbury Publishing.
- Arribathi, A. H., Supriyanti, D., Astriyani, E., & Rizky, A. (2021). Peran Teknologi Informasi Dalam Pendidikan Agama Islam Untuk Menghadapi Tantangan Di Era Global Dan Generasi Z. *Alfabet Jurnal Wawasan Agama Risalah Islamiah, Teknologi Dan Sosial*, 1(1), 55–64.
- Coccia, E. (2019). *The life of plants: A metaphysics of mixture*. John Wiley & Sons.
- Covey, S. R. (2013). *The 7 Habits of Highly Effective People*. Free Press.
- Crini, G., Lichtfouse, E., Chanet, G., & Morin-Crini, N. (2020). Applications of hemp in textiles, paper industry, insulation and building materials, horticulture, animal nutrition, food and beverages, nutraceuticals, cosmetics and hygiene, medicine, agrochemistry, energy production and environment: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(5), 1451–1476.
- Darojat, A., & Faishol, R. (2023). Literature Study: Learning Media To Improve The Understanding Of High School Students on Elemental Chemistry. *International Conference on Humanity Education and Society (ICHES)*, 2(1). <https://proceedingsiches.com/index.php/ojs/article/view/68>

- Del Ratzsch, N. (2001). *Design, and Science*. SUNY series in philosophy and biology.
- Faridah, E. Z., & Pujangga, A. (2024). MODEL DISCOVERY LEARNING PADA PEMBELAJARAN IPA DALAM MENINGKATKAN BERPIKIR KRITIS SISWA. *INCARE, International Journal of Educational Resources*, 4(6), 554–566.
- Ghernaout, D. (2017). Environmental principles in the Holy Koran and the Sayings of the Prophet Muhammad. *American Journal of Environmental Protection*, 6(3), 75–79.
- Giorgi, A. (2020). *Psychology as a human science: A phenomenologically based approach*. University Professors Press.
- Hademenos, G. H. F. dan G. J. (2006). *Schaum's Outlines: Biologi* (D. Tyas (trans.); 2nd ed.). Erlangga.
- Harris, M. L. (2016). Ecowomanism: Black women, religion, and the environment. *The Black Scholar*, 46(3), 27–39.
- Hasanuddin, E. a. (2017). *Anatomi Tumbuhan*. Syiah Kuala University Press.
- Heddy, S. (1990). *Biologi Pertanian: Tinjauan Singkat Tentang Anatomi, Fisiologi, Sistematika, dan Genetika Dasar Tumbuh-Tumbuhan*. Rajawali Press.
- Hempel, C. G. (1966). *Philosophy of Natural Science: Foundations of Philosophy Series*. Prentice-Hal.
- Hendrik, D. (2021). *Berapa banyak CO<sub>2</sub>, ATP, dan NADPH untuk menghasilkan 1 glukosa?* Quora.
- Jasanoff, S. (2019). *Can science make sense of life?* John Wiley & Sons.
- Jati, B. M. E. (2013). *Pengantar Fisika* (1st ed.). Gadjahmada University Press.
- Kellert, T. J. F. dan S. R. (2002). *The Good in Conecting Science, Nature and Religion, and Spirituality Humanity with The Natural World*. Island Press.
- Lajnah Pentashihan Mushaf Al-Qur'an. (2010). *Tafsir ilmi: Cahaya dalam Perspektif Al-Qur'an dan Sains*. Badan Litbang dan Diklat Kementerian RI dengan Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI).
- Lakitan, B. (1993). *Dasar-Dasar Fisiologi Tumbuhan*. Raja Grafindo Persada.
- Linda Sekar Utami, et. a. (2020). *Sejarah Fisika*. Ahli media press.
- Mubarok, A. H. (2019). *Adab Menuntut Ilmu*. Cirebon: CV. Elsi Pro.
- Nasional, D. P. (2008). *Kamus besar bahasa Indonesia*.

- National Research Council. (1998). *A Strategy for Research in Space Biology and Medicine in the New Century*. The National Academies Press.
- Ramdhini, R. N. (2021). *Anatomi Tumbuhan*. Yayasan Kita Menulis.
- Ramiati, E., & Faishol, R. (2021). PENINGKATAN HASIL BELAJAR SISWA KELAS III PADA MATA PELAJARAN IPA MELALUI METODE DEMONSTRASI DI MI TARBIYATUL ATHFAL 1 SUMBERSARI, SRONO, BANYUWANGI. *INCARE, International Journal of Educational Resources*, 2(4), 355–369.
- S.K.Pandey, et. a. (2010). Study of Sunspot and Sunspot Cycles. *Current Science*, 98(11), 1496–1499.
- Shogren, R., Wood, D., Orts, W., & Glenn, G. (2019). Plant-based materials and transitioning to a circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, 19, 194–215.
- Sri Wahyuni, E. a. (2019). *Anatomi Fisiologi Tumbuhan*. UMM Press.
- Stitt, M. (1996). *Advances In Photosynthesis Volume 5: Regulatory Properties of Calvin Cycle Enzymes*. Kluwer Academic Publisher.
- Suhartono., ZM., R. A. S. Z., & Khoiruddin, A. (2008). Pengaruh Interval Pemberian Air Terhadap Pertumbuhan Dan Hasil Tanaman Kedelai (Glicine Max (L) Merril) Pada Berbagai Jenis Tanah. *Jurnal Embryo*, 5(1), 98–112.
- Tamam, M. B. (2017). *Proses Fotosintesis dan Cara Mudah Menghafalkannya*. Generasi Biologi.
- Tjitrosoepomo, G. (2005). *Morfologi Tumbuhan*. Gadjah Mada University Press.