

---

## Penangkapan Carbon (*Carbon Capture*) dengan Teknologi Membran untuk Industri Berkelanjutan: Literatur Review

**Septiana Ambarwati, Henny Parida Hutapea, Sri Jangkung Laksono Sukardi**

Program Studi Kimia Industri, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Duta Bangsa  
Surakarta

Jl. Ki Mangun Sarkoro No. 20 Nusukan, Kec. Banjarsari, Kota Surakarta, 57135

Telp. 0271-7470550

E-mail: Septiana\_ambarwati@udb.ac.id

### Abstrak

*Industri berkontribusi besar terhadap pembangunan ekonomi global, namun juga menjadi penyumbang utama emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), khususnya dari sektor seperti semen, baja, dan petrokimia, yang menyumbang sekitar 21% emisi global. Aktivitas lain, seperti transportasi, pengolahan gas alam, dan pertanian, turut meningkatkan kadar CO<sub>2</sub> di atmosfer, merusak kualitas lingkungan. Teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS), termasuk teknologi membran, menjadi solusi untuk mitigasi emisi CO<sub>2</sub> dengan efisiensi tinggi dan jejak lingkungan rendah. Teknologi membran menarik perhatian karena kemampuannya menangkap CO<sub>2</sub> dari gas buang industri, khususnya dalam penangkapan pasca-pembakaran. Material membran polimerik, anorganik, dan campuran (MMMs) menunjukkan potensi besar, meski tantangan seperti tekanan parsial CO<sub>2</sub> yang rendah, pembengkakan, dan plastisasi tetap menjadi hambatan. Polimer seperti poliakrilat, poliamida, poliimid, dan polyvinylamine (PVAm) menawarkan keunggulan biaya rendah, stabilitas tinggi, dan selektivitas CO<sub>2</sub> yang baik. PVAm, misalnya, mencatat selektivitas hingga 300% dalam kondisi tertentu, dengan performa yang dapat ditingkatkan melalui kombinasi dengan polimer lain. Optimalisasi material dan desain membran menjadi kunci dalam meningkatkan efisiensi, permeabilitas, dan stabilitas membran, menjadikannya solusi penting untuk mendukung keberlanjutan industri dan mengurangi emisi karbon secara signifikan.*

*Kata Kunci: CO<sub>2</sub> capture, teknologi membran, membran polimer, membran FSC*

### Abstract

*The industry plays a significant role in global economic development but is also a major contributor to carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions, particularly from sectors such as cement, steel, and petrochemicals, which account for approximately 21% of global emissions. Other activities, such as transportation, natural gas processing, and agriculture, also contribute to rising CO<sub>2</sub> levels in the atmosphere, degrading environmental quality. Carbon capture and storage (CCS) technologies, including membrane technology, offer solutions for mitigating CO<sub>2</sub> emissions with high efficiency and a low environmental footprint.*

*Membrane technology has gained attention for its ability to capture CO<sub>2</sub> from industrial flue gases, especially in post-combustion capture applications. Polymeric, inorganic, and mixed-matrix membranes (MMMs) show great potential, though challenges such as low CO<sub>2</sub> partial pressure, swelling, and plasticization remain hurdles. Polymers like polyacrylate, polyamide, polyimide, and polyvinylamine (PVAm) offer advantages of low cost, high stability, and good CO<sub>2</sub> selectivity. For instance, PVAm achieves selectivity up to 300% under specific conditions, with performance further enhanced through combinations with other polymers.*

*Optimizing membrane materials and design is crucial to improving efficiency, permeability, and stability, making membranes a key solution to support industrial sustainability and significantly reduce carbon emissions.*

*Keywords: CO<sub>2</sub> capture, membrane technology, polymeric membranes, FSC membranes*

## 1. Pendahuluan

Industri merupakan salah satu sektor yang berperan besar dalam kemajuan pembangunan. Di sisi lain, Industri menjadi penyumbang emisi gas rumah kaca, terutama gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dalam jumlah yang sangat signifikan. *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) menguraikan bahwa sektor industri menyumbang sekitar 21% dari total emisi gas rumah kaca. Hal ini menjadikan industri sebagai salah satu fokus utama dalam upaya mitigasi perubahan iklim. Beberapa subsektor, seperti industri semen, baja, dan petrokimia, diketahui menjadi kontributor utama emisi CO<sub>2</sub> karena proses produksinya yang intensif energi dan berbasis bahan bakar fosil (IPCC, 2022). Selain sektor industri, terdapat beberapa sumber emisi CO<sub>2</sub> yang disebabkan oleh gas buangan dan aktivitas manusia mencakup berbagai jenis senyawa berbahaya, seperti dari emisi gas buang kendaraan (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HCl, dan HF), dari proses pengolahan gas alam, biogas, serta gas dari tempat pembuangan sampah (H<sub>2</sub>S dan CO<sub>2</sub>), dari gas limbah (NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, dan CO<sub>2</sub>), hingga yang berasal dari aktivitas pertanian (NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, dan CH<sub>4</sub>). Semuanya berkontribusi terhadap penurunan kualitas udara, kerusakan lingkungan, serta perubahan iklim global (Pasichnyk et al., 2023).

Dengan memahami sumber dan dampak emisi CO<sub>2</sub> dari berbagai sektor, diharapkan dapat dirancang langkah strategis yang efektif untuk mengurangi dampaknya terhadap lingkungan. Hal ini penting tidak hanya untuk menjaga keberlanjutan lingkungan, tetapi juga untuk mendukung transformasi industri menuju ekonomi rendah karbon. Dalam beberapa tahun terakhir, teknologi membran untuk pemisahan gas semakin diminati karena efisiensi energinya yang tinggi serta jejak fisik dan kimianya yang minimal. Membran telah diterapkan secara komersial untuk pemurnian gas alam dan telah banyak dikaji dalam berbagai literatur.

Teknologi membran menjadi solusi menarik untuk menangkap CO<sub>2</sub> dari gas buang, dengan perkembangan mencakup desain bahan, efisiensi proses, dan analisis ekonomi. Meskipun sebagian besar penelitian terfokus pada penangkapan CO<sub>2</sub> pasca-pembakaran dari pembangkit listrik tenaga batu bara atau gas, perhatian terhadap sektor industri seperti Besi dan Baja, Semen, serta Pulp dan Kertas masih minim. Padahal, sektor ini memiliki konsentrasi CO<sub>2</sub> lebih tinggi (20–30 mol%) dibandingkan pembangkit listrik (12–15 mol%), yang menawarkan potensi efisiensi lebih besar. Konsentrasi CO<sub>2</sub> yang tinggi memberikan kekuatan pendorong parsial lebih besar, menjadikan teknologi berbasis membran lebih menarik untuk diaplikasikan di sektor-sektor tersebut (Hou, Fong, Freeman, Hill, dan Xie, 2022).

Teknologi membran menawarkan banyak keuntungan, seperti tidak memerlukan penyimpanan, penanganan, pembuangan, atau pengelolaan emisi bahan kimia berbahaya, sehingga lebih ramah lingkungan. Operasinya sederhana dan pasif, dengan toleransi tinggi terhadap kandungan SO<sub>x</sub> dan NO<sub>x</sub> dalam gas buang. Teknologi ini juga memiliki jejak lingkungan yang lebih kecil, mengurangi kebutuhan akan modifikasi besar pada siklus uap pembangkit listrik yang sudah ada. Selain itu, teknologi ini dapat menggunakan membran yang berbiaya rendah, tahan lama, dengan permeabilitas dan selektivitas yang efisien serta stabilitas termal, fisik, dan kimia yang baik (Hou et al., 2022).

Salah satu tantangan utama teknologi membran adalah tekanan parsial CO<sub>2</sub> yang relatif rendah dalam gas buang, yang dapat mengurangi efisiensi proses pemisahan. Untuk meningkatkan efektivitas, perlu pengembangan lebih lanjut pada membran agar memiliki kemampuan yang lebih optimal dalam hal permeabilitas, selektivitas, dan stabilitas di berbagai kondisi operasional (Hou et al., 2022).

## 2. Metodologi

Artikel ini merupakan kajian literatur (*literature review*) yang dilakukan untuk menganalisis teknologi membran dalam penangkapan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) berdasarkan referensi dari berbagai jurnal ilmiah. Proses penelitian dilakukan melalui tahapan berikut:

### 2.1 Pengumpulan Data

Data dikumpulkan dari jurnal-jurnal ilmiah terindeks, seperti Scopus, Web of Science, dan Google Scholar, yang relevan dengan topik penangkapan CO<sub>2</sub> menggunakan membran. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian adalah *CO<sub>2</sub> capture*, *membrane technology*, *polymeric membranes*, *FSC membranes*, dan istilah lain yang relevan. Seleksi literatur dibatasi pada publikasi dalam 15 tahun terakhir (2008–2023) untuk memastikan informasi terkini.

## 2.2 Kriteria Seleksi Jurnal

Jurnal yang dipilih memenuhi kriteria berikut:

- 1) Memiliki fokus utama pada teknologi membran dalam penangkapan CO<sub>2</sub>.
- 2) Menyajikan data kuantitatif, seperti selektivitas, permeabilitas, dan kondisi operasi.
- 3) Membahas berbagai jenis material membran, termasuk membran organik, anorganik, dan campuran (*mixed-matrix membranes*).
- 4) Dipublikasikan dalam jurnal bereputasi dan memiliki impact factor.

## 2.3 Analisis Data

Data dari jurnal-jurnal terpilih dianalisis secara kualitatif dan kuantitatif. Analisis meliputi perbandingan parameter kinerja membran, seperti selektivitas, permeabilitas, stabilitas termal, dan ketahanan terhadap pengotor. Data tersebut kemudian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan pembahasan.

## 2.4 Sintesis Informasi

Hasil analisis digunakan untuk mengidentifikasi tren, kelebihan, dan kekurangan setiap teknologi membran. Informasi yang disintesis meliputi potensi aplikasi di berbagai industri, tantangan dalam pengembangan teknologi, dan peluang penelitian di masa depan.

## 3. Hasil dan Pembahasan

Emisi CO<sub>2</sub> dari sebuah pabrik sering kali tersebar di beberapa sumber, sehingga terdapat banyak pilihan dalam jalur pengolahan untuk mengimplementasikan teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS). Penangkapan pasca-pembakaran (*post-combustion capture*) sering digunakan karena dapat dipasang pada pabrik yang sudah ada (*retrofit*) atau dirancang sebagai teknologi penangkapan akhir untuk pabrik baru. Retrofit biasanya bersifat spesifik untuk lokasi dan membutuhkan integrasi serta optimalisasi sesuai kondisi lokal. Tantangan utama bagi setiap sektor adalah menjaga daya saing setelah penerapan CCS. Setiap sektor industri memiliki proses unik dan praktik CCS terkini, terutama terkait dengan penangkapan pasca-pembakaran, yang diulas secara singkat dalam bagian berikutnya.

Proses industri seperti produksi hidrogen, sintesis amonia, dan pembuatan metanol menghasilkan gas buang dengan konsentrasi CO<sub>2</sub> tinggi yang dapat ditangkap dan langsung digunakan atau disimpan setelah pemurnian. Berbeda dengan proses oksikombustion dan CLC, unit penangkapan CO<sub>2</sub> terpisah biasanya tidak diperlukan untuk proses ini. Hanya teknologi penangkapan pasca-pembakaran, prapembakaran, dan penangkapan udara yang membutuhkan sistem penangkapan CO<sub>2</sub>. Berbagai teknologi penangkapan karbon, seperti absorpsi, adsorpsi, membran, penangkapan biologis, dan kriogenik, telah diteliti dalam beberapa dekade terakhir, dengan absorpsi, adsorpsi, dan membran menjadi metode yang paling banyak dipelajari. Pemilihan teknologi penangkapan bergantung pada sumber dan proses pembangkitan CO<sub>2</sub>, yang memengaruhi efisiensi energi (Wang & Song, 2020).

Setiap jenis material membran memiliki kelebihan dan kekurangan yang berkaitan dengan kinerja pemisahan, biaya material, umur pakai, serta karakteristik lain seperti stabilitas kimia dan termal, serta kekuatan mekanik. Membran organik (polimerik), membran anorganik, dan membran campuran (*mixed-matrix membranes*, MMMs) merupakan jenis utama yang digunakan untuk penangkapan CO<sub>2</sub> pasca-pembakaran.

Material membran polimerik memiliki keunggulan seperti biaya rendah, variasi jenis, dan kemudahan proses produksi. Berbagai polimer, seperti poliakrilat, polianilin, poliamida, poliimid, polisulfon, dan selulosa asetat, telah diteliti untuk penangkapan CO<sub>2</sub> pasca-pembakaran. Mekanisme transportasi larutan-difusi dan transportasi terfasilitasi sering digunakan dalam desain

membran polimer. Membran berbasis polimer menunjukkan stabilitas termal, kekuatan mekanik, dan ketahanan kimia yang baik, serta permeabilitas dan selektivitasnya dapat diatur melalui kontrol proses produksi. Membran polimer juga diterapkan secara luas dalam industri, seperti pemurnian biogas dan petrokimia. Namun, penyerapan CO<sub>2</sub> pada membran ini dapat menyebabkan masalah pembengkakan dan plastisasi.

Tabel 1. Perbandingan teknologi untuk penangkapan CO<sub>2</sub> (CCS) (Hou et al., 2022)

Teknologi	Prinsip Kerja	Kelebihan	Kekurangan
<b>Absorpsi</b>	Penyerapan kimia atau fisik CO <sub>2</sub> dari gas buang ke dalam cairan pembawa; regenerasi dilakukan dengan peningkatan suhu atau pengurangan tekanan.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efisiensi penangkapan tinggi (&gt;90%).</li> <li>• Teknologi standar saat ini menggunakan <i>aqueous amine scrubbing</i> (MEA).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Penalti energi besar (20–30% dari keluaran pembangkit listrik).</li> <li>- Regenerasi pelarut dan pemulihan CO<sub>2</sub> memakan biaya hingga ~50%.</li> <li>• Masalah korosi peralatan serta penghilangan dan pembuangan pelarut.</li> </ul>
<b>Adsorpsi</b>	Penyerapan kimia atau fisik CO <sub>2</sub> menggunakan sorben padat; regenerasi dilakukan dengan peningkatan suhu atau pengurangan tekanan.	Energi regenerasi lebih rendah dibandingkan pelarut karena kapasitas panas lebih rendah.	Tantangan dalam transfer panas, stabilitas, dan ausnya sorben.
<b>Membran</b>	Pemisahan selektif CO <sub>2</sub> melalui membran dari gas buang dengan perbedaan tekanan sebagai gaya penggerak.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tidak ada masalah penyimpanan, penanganan, pembuangan, atau emisi bahan kimia berbahaya.</li> <li>• Operasi pasif yang sederhana.</li> <li>• Toleransi tinggi terhadap kandungan SO<sub>x</sub> dan NO<sub>x</sub>.</li> <li>• Jejak tanaman lebih kecil dan kebutuhan modifikasi siklus uap pembangkit lebih sedikit.</li> </ul>	Tekanan parsial CO <sub>2</sub> yang relatif rendah pada gas buang dan perlu pengembangan membran yang murah, tahan lama, efisien dalam permeabilitas dan selektivitas, serta stabil secara termal, fisik, dan kimia.

Berbagai material membran menunjukkan selektivitas yang beragam dalam menangkap CO<sub>2</sub>. Membran berbasis selulosa asetat memiliki selektivitas 40,17%, sementara membran berbasis poliaktif 85 dan *poly(N-methyl-N-vinylamine)* masing-masing mencapai selektivitas 55%. Beberapa material menunjukkan kinerja yang menjanjikan dalam kondisi operasi tertentu, seperti BPM-50 yang memiliki selektivitas 43% pada suhu 35°C dan tekanan 350 kPa, serta PTCNSi(OMe)<sub>3</sub> dengan selektivitas 35,7% pada suhu 20–22°C dan tekanan 100 kPa.

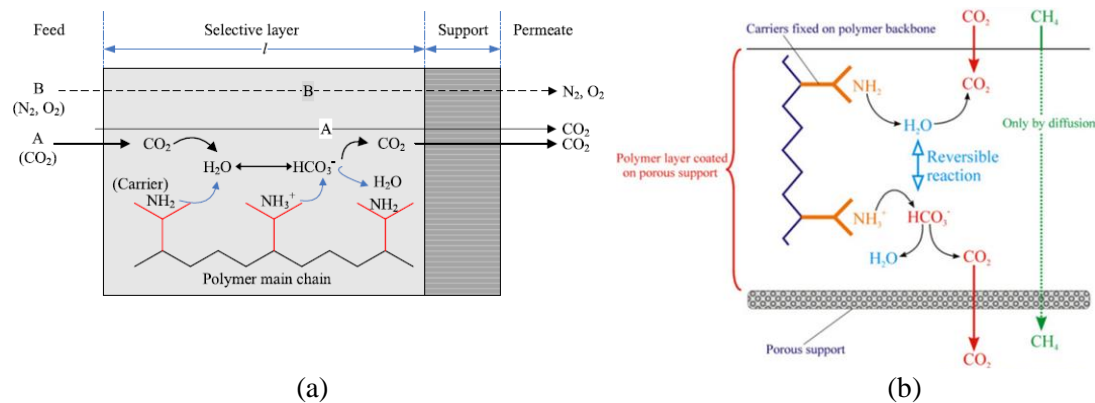
Penambahan pelarut seperti metanol atau etanol juga meningkatkan performa material seperti AO-PIM-1 dan Thioamide-PIM-1.

Material berbasis poli(vinilamin) menunjukkan selektivitas yang jauh lebih tinggi, seperti PVAm dengan selektivitas 140% pada rasio CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> sebesar 20/80 dan 17% uap air. Campuran PVAm dengan PVA atau PEI juga memberikan hasil selektivitas tinggi, yaitu masing-masing hingga 174% dan 130–230%. Membran berbasis PNVF-co-VAm memiliki selektivitas tertinggi hingga 162% pada kondisi tekanan vakum 0,2 bar dan suhu 57°C. Polyvinylamine memiliki kinerja paling unggul dengan selektivitas 300% pada kondisi operasi atmosferis dan konsentrasi CO<sub>2</sub> 12% volume, menjadikannya salah satu pilihan terbaik untuk aplikasi penangkapan karbon.

Tabel 2. Selektivitas dari berbagai material membran

Material Membran	Selektifitas (%)	Kondisi Operasi	Referensi
Selulosa asetat	40,17	-	(Gkotsis, Peleka, & Zouboulis, 2023)
Polikarbonat-FBPC	25,5	-	
Polisulfon-TMPSF-HBTMS	21,4	-	
Poliaktif 85	55	-	(Ignatusha et al., 2024)
BPM-50	43	Suhu 35°C, tekanan 350 kPa	
Thioamide-PIM-1 + Ethanol	30,3	Suhu 25°C, tekanan 100 kPa	
AO-PIM-1 + Methanol	35	Suhu 35°C, tekanan 200 kPa	
PTCNSi(OMe) <sub>3</sub>	35,7	Suhu 20-22°C, tekanan 100 kPa	
poly(N-methyl-N-vinylamine)	55	Suhu 57°C, rasio CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> = 20/80 gas kering	(Hou et al., 2022)
PVAm	140	CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> =20/80 %, suhu 57°C, 17% uap air	
cmNFC-PVAm	128-131	RH=95%, suhu 40°C	
PNVF-co-VAm	162	CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> =20/80%, udara kering, tekanana vakum 0,2 bar, suhu 57°C	
PVAm/PVA blend	174	10% volum, tekanan 2-15 bar	
PEI/PVA blend	130-230	Tekanan umpan gas 0,066 bar, CO <sub>2</sub> 5,8-34 % volum	
Polyvinylamine	300	Kondisi operasi atmosferis, luas 1,5 m <sup>2</sup> , CO <sub>2</sub> 12 % volum	

Transport gas melalui membran transportasi terfasilitasi dijelaskan pada Gambar 1, di mana molekul CO<sub>2</sub> bereaksi dengan gugus fungsional amina saat air tersedia dan melewati membran FSC berdasarkan kombinasi mekanisme larutan-difusi (S-D) dan transportasi terfasilitasi (FT). Sementara itu, molekul gas non-reaktif seperti N<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> hanya dapat melewati mekanisme S-D. Fluks gas permeat dari komponen reaktif seperti CO<sub>2</sub> merupakan gabungan dari difusi larutan-difusi dan difusi yang dimediasi oleh pembawa (transportasi terfasilitasi).



Gambar 1. a) Ilustrasi transport gas melalui membran FSC berbasis PVAm, b). Mekanisme transport dalam membran FSC (He, 2018)(Hou et al., 2022)

#### 4. Kesimpulan dan Saran

teknologi membran untuk penangkapan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) telah dianalisis, menunjukkan bahwa membran polimerik, terutama yang berbasis poli(vinilamin) dan campurannya, menawarkan selektivitas tinggi dan stabilitas yang baik dalam kondisi operasi yang beragam. Pengembangan membran hibrida dan berbasis pembawa tetap (FSC) dengan tambahan pembawa seperti air asam Lewis dan amina menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan efisiensi penangkapan CO<sub>2</sub>. Meskipun teknologi membran menjanjikan untuk mitigasi emisi karbon, tantangan terkait plastisasi, kestabilan termal, dan biaya material yang tinggi masih perlu diatasi. Ke depan, optimasi material dan desain sistem, bersama dengan kolaborasi antara akademisi, industri, dan pemerintah, sangat penting untuk mencapai implementasi yang lebih luas dan efisien dalam aplikasi industri.

#### Daftar Pustaka

- Gkotsis, Petros, Peleka, Efrosini, & Zouboulis, Anastasios. (2023). Membrane-Based Technologies for Post-Combustion CO<sub>2</sub> Capture from Flue Gases: Recent Progress in Commonly Employed Membrane Materials. *Membranes*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/membranes13120898>
- He, Xuezhong. (2018). A review of material development in the field of carbon capture and the application of membrane-based processes in power plants and energy-intensive industries. *Energy, Sustainability and Society*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s13705-018-0177-9>
- Hou, Rujing, Fong, Celesta, Freeman, Benny D., Hill, Matthew R., & Xie, Zongli. (2022). Current status and advances in membrane technology for carbon capture. *Separation and Purification Technology*, 300(August), 121863. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121863>
- Ignatusha, Pavlo, Lin, Haiqing, Kapuscinsky, Noe, Scoles, Ludmila, Ma, Weiguo, Patarachao, Bussaraporn, & Du, Naiying. (2024). Membrane Separation Technology in Direct Air Capture. *Membranes*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/membranes14020030>
- IPCC. (2022). Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. In *Global Warming of 1.5°C*. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.005>
- Pasichnyk, Mariia, Stanovsky, Petr, Polezhaev, Petr, Zach, Boleslav, Šyc, Michal, Bobák, Marek, Jansen, Johannes C., Příbyl, Michal, Bara, Jason E., Friess, Karel, Havlica, Jaromír, Gin, Douglas L., Noble, Richard D., & Izák, Pavel. (2023). Membrane technology for challenging separations: Removal of CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> from flue and waste gases. *Separation and Purification Technology*, 323(June), 124436. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124436>

Wang, Xiaoxing, & Song, Chunshan. (2020). Carbon Capture From Flue Gas and the Atmosphere: A Perspective. *Frontiers in Energy Research*, 8(December 2019). <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.560849>