دوازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران
12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran
senaconf.ir

فناوری‌های جذب کربن: مروری بر ادبیات پژوهش

فرهاد فراهانی

کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران Farhadfarahani2@gmail.com

چکیده

پژوهش حاضر با روش مطالعات کتابخانه‌ای به بررسی ادبیات پژوهش در خصوص فناوری‌های جذب کربن می‌پردازد. نظر به اهمیت کاهش گازهای گلخانه‌ای، فناوری‌های جذب کربن از جمله جدیدترین رویکردها برای جذب و کاهش دی‌اکسیدکربن محسوب می‌شوند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که چهار نوع فناوری جذب کربن مؤثر وجود دارد که عبارتند از جذب مستقیم کربن از هوا، جذب کربن از طریق جلبک، جذب پس‌سوز کربن و جذب سطحی کربن. یافته‌های پژوهش حاکی از آن است که گرچه فناوری‌های جذب کربن از دستاوردهای پژوهشی تاکنون موجود برای ارائه‌ی راه‌حل‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای استفاده کرده‌اند، هنوز عمدتاً نوپا و نیازمند پژوهش‌های بیشتر برای ارزیابی کارآمدی، بهینه‌سازی و پیامدهای زیست‌محیطی هستند. تا جایی که به منابع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای نظیر کارخانه‌ها یا نیروگاه‌های بزرگ تولید برق مربوط است، شیوه‌های جذب پس از احتراق، جذب پس‌سوز و جذب سطحی، از اولویت بیشتر برخوردارند.

واژه‌های کلیدی

جذب کربن، جذب مستقیم از هوا، جذب از طریق جلبک، جذب پس‌سوز، جذب سطحی

۱. مقدمه

تغییرات اقلیمی بزرگ‌ترین تهدید بالقوه‌ی سلامت جهانی در سده‌ی بیست‌ویکم تلقی می‌شود که به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر زندگی اجتماعی و رفاه اقتصادی اثرگذار است. طبق گزارش هیأت بین دولتی تغییرات اقلیم، افزایش دمای هوا به‌نحوی فزاینده موجب تغییر دمای اقیانوس‌ها، ذوب یخچال‌های طبیعی و افزایش سطح دریاها، افزایش رخدادهای طبیعی نظیر طوفان و سیل، گرمای شدید، خشکسالی و آتش‌سوزی شده است [۱]. کاهش کیفیت غذا و آب آشامیدنی، دامنه‌ی جدید بیماری‌های عفونی که توسط حشرات، کنه‌ها و جوندگان منتقل می‌شوند، افزایش اشعه‌ی ماوراء بنفش، و آسیب‌های جسمانی، طیفی گسترده از بیماری‌ها و مرگ زودهنگام ناشی از آن‌ها از جمله اثرات چنین تغییراتی بر زیست طبیعی انسان‌ها است [۲]. برخی پژوهش‌ها در خصوص آسیب‌های جدی تغییرات اقلیمی بر منابع طبیعی، صنعت و زیرساخت‌ها، تنوع زیستی، اشتغال و فرسایش نیروی کار، کاهش بهره‌وری به‌ویژه در مورد جمعیت‌های آسیب‌پذیر، افزایش مهاجرت و فقر، و سایر مسائل مربوط به امنیت انسانی هشدار داده‌اند [۳].

مسئله‌ی تغییرات اقلیمی عمدتاً ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای و حاصل فعالیت‌های انسانی است. انتشار گازهای گلخانه‌ای از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ به بیشترین حد خود، یعنی ۴۹ (±۴.۵) گیگاتون در سال ۲۰۱۰ رسید که در صورت عدم‌مداخله و ارائه‌ی راه‌حل‌های بسنده تا سال ۲۰۵۰ از مرز ۶۲ گیگاتون در سال خواهد گذشت [۴]. از جمله راه‌حل‌های دسترس‌پذیر برای کاهش اثرات بالقوه‌ی گازهای گلخانه‌ای، پروژه‌های جذب کربن است. نظر به اهمیت کاهش میزان گازهای گلخانه‌ای در کنوانسیون سازمان ملل درخصوص تغییرات اقلیمی، پژوهش حاضر با رویکرد مطالعات کتابخانه‌ای می‌کوشد انواع شیوه‌های مؤثر در جذب کربن را مبتنی بر پژوهش‌های تاکنون موجود معرفی و بررسی کند.

۲. روش انجام پژوهش

پژوهش حاضر با استفاده از پایگاه داده‌های علمی و پژوهشی گوگل اسکالر انجام شد. مقالات و پژوهش‌های مورد نظر با کلیدواژه‌های زیر، در مواردی به‌تفکیک و در مواردی تلفیقی، در موتور جستجوی گوگل اسکالر بررسی شدند:

۱. جذب کربن (Carbon capture)؛
۲. جذب مستقیم از هوا (Direct air capture)؛
۳. جذب از طریق جلبک (Algae based carbon capture)؛
۴. جذب پس‌سوز (Absorption)؛
۵. جذب سطحی (Adsorption).

برای بررسی جدیدترین مطالعات در ادبیات پژوهش پیرامون فناوری‌های جذب کربن عمدتاً بازه‌ی زمانی ۲۰۱۶ الی ۲۰۲۲ در نظر گرفته شد. بیش از ۴۰ منبع مرتبط با موضوع مقاله‌ی مروری حاضر شناسایی شدند که در مجموع ۲۷ عنوان اثر پژوهشی با کلیدواژه‌های مذکور متناسب بودند و در این پژوهش به‌کار رفته‌اند.

۳. یافته‌های پژوهش

جذب کربن اساساً فرآیندی فناورانه است که در آن جریان خالص دی‌اکسیدکربن از منابع صنعتی و منابع مرتبط با انرژی جدا (جذب) و فشرده می‌شود. فناوری جذب کربن یکی از روش‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای و انتشار گاز دی‌اکسیدکربن است. غالب سایت‌های تولیدکننده‌ی این گاز شامل صنایع تولید برق از زغال‌سنگ و گاز طبیعی، صنایع سیمان، فولاد، کود شیمیایی و سایت‌های صنعتی پیشرفته‌ی نفتی است [۵-۶]. پروژه‌های جذب کربن معمولاً متشکل از فعالیت‌های متعدد در طول زنجیره‌ی ارزش است: جذب و فشرده‌سازی دی‌اکسیدکربن در دما و فشار فوق‌بحرانی، انتقال دی‌اکسیدکربن با استفاده از خطوط لوله، تزریق زیرزمینی عمیق در سرچاه نفت و ذخیره‌سازی در روزن بار بیش از ۸۰۰ متر زیر سطح زمین. چنین فرایندی در ادبیات پژوهش به‌اصطلاح پروژه‌ی جذب، انتقال و ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن خوانده می‌شود (در مقیاس سالانه دست‌کم ۸۰۰ هزار تن برای نیروگاه برق زغال‌سنگی و ۴۰۰ هزار تن برای سایر تجهیزات صنعتی که از گاز طبیعی استفاده می‌کنند). برآوردها حاکی از آن است که برای کاهش ۱۳ درصدی انتشار دی‌اکسیدکربن

تا سال ۲۰۵۰، بیش از ۳ هزار پروژه‌ی جذب، انتقال و ذخیره‌سازی اختصاصی در سراسر جهان مورد نیاز خواهد بود که هنوز در مراحل ابتدایی قرار دارند [۷-۸].

۱.۳. جذب مستقیم از هوا

جذب مستقیم کربن از هوا یکی از فناوری‌های جذب دی‌اکسیدکربن است. این فناوری کمابیش مشابه عملکرد جذب دی‌اکسیدکربن توسط گیاهان است و از طریق محلول آبی (*aqueous solution*) یا جاذب‌های جامد (*solid sorbents*) عمل می‌کند. در شیوه‌ی نخست، محیط جذب اساساً مایع است: هوا در تماس‌دهنده (*contactor*) از محلول‌های شیمیایی با غلظت یونی (مثلاً محلول هیدروکسید) عبور می‌کند، دی‌اکسیدکربن جذب و باقی هوا آزاد می‌شود. دی‌اکسیدکربن موجود در هوا با یون‌های پتاسیم واکنش نشان می‌دهد و کربنات پتاسیم ایجاد می‌شود. کربنات پتاسیم بعداً توسط یون‌های کلسیم در رآکتور سختی‌گیر (*pellet reactor*) رسوب می‌کند و کلسیم کربونات تولید می‌شود [۹-۱۰]. سپس کربنات کلسیم برای آزادسازی دی‌اکسیدکربن حرارت داده می‌شود. در شیوه‌ی دوم، فیلترهای جاذب جامد ذرات دی‌اکسیدکربن را از هوا جدا می‌کنند. وقتی این فیلترها حرارت داده شوند، دی‌اکسیدکربن جذب‌شده آزاد می‌شود. نتایج پژوهش‌های اخیر حاکی از آن است که فناوری جذب مستقیم دی‌اکسیدکربن از هوا کاربردی است و می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی نقشی مهم در مبارزه با بحران تغییرات اقلیمی ایفا کند [۱۱-۱۲].

۲.۳. جذب از طریق جلبک

به‌کارگیری جلبک‌ها اغلب به‌عنوان یکی از ابزارهای کارآمد برای جذب و جداسازی کربن شناخته می‌شود؛ تا جایی که در مقایسه با درختان ۴۰۰ برابر موثرتر است. جلبک گیاهی است که به طور معمول در مناطق آبی رشد کرده و مشابه درختان از فتوسنتز برای جذب کربن استفاده می‌کند. این روش به‌طور بالقوه بسیاری از چالش‌های مرتبط با روش‌های دیگر جذب کربن را از بین می‌برد [۱۳-۱۴]. ریزجلبک‌ها (*microalgae*) به‌دلیل توانایی زیست در محیط‌های سخت نسبت به سایر مواد خام برتری دارند. وانگهی، ریزجلبک‌ها به زمین قابل کشت نیاز ندارند و در جایی که سایر گیاهان نمی‌توانند زندگی کنند، نظیر آب قلیایی و پساب، زنده می‌مانند. برخی پژوهش‌ها تأکید می‌کنند که تولید زیست‌سوخت (*biofuel*) از ریزجلبک‌ها در مقایسه با زیست‌سوخت‌های تولیدشده از سایر مواد خام بهینه‌تر است]۱۵-۱۶[. علاوه بر این، ریزجلبک‌ها به‌آسانی رشد می‌کنند و از نرخ رشد بالا برخوردارند. برای حذف کربن از طریق جلبک‌ها از رآکتورهای زیستی (*bioreactor*) استفاده می‌شود. رآکتور زیستی متشکل از مخازنی بسته و به‌هم‌متصل است که آب را نگه می‌دارند و از آنجا که چنین رآکتوری سیستمی بسته است، مانع از ورود آلاینده‌ها می‌شود [۱۷-۱۸].

رآکتور زیستی دو خروجی دارد: ۱. روغن جلبک که برای تولید سوخت‌های زیستی و پلاستیک به‌کار می‌رود، و ۲. خود جلبک‌ها که خشک شده و به‌شکل پودر برای مواد مغذی یا فیبرها استفاده می‌شوند. جلبک مانند هر گیاه دیگر به دی‌اکسیدکرین، نور و آب نیاز دارد. دی‌اکسیدکربن از هوا جذب می‌شود و منبع دریافت نور می‌تواند خورشید یا منابع مصنوعی باشد. جلبک‌ها و آب از طریق لوله‌هایی منتقل می‌شوند تا سطح مورد نیاز برای پروش جلبک فراهم شود و قرارگیری در معرض منبع نور افزایش یابد. جلبک‌ها دی‌اکسیدکربن مصرف می‌کنند و زیست‌توده (*biomass*) تولید می‌کنند. این زیست‌توده در صنایع دیگر برای تولید زیست‌سوخت، خوراک دام، کودهای شیمیایی و غیره به‌کار می‌رود. رآکتورهای زیستی عظیم که با هوش مصنوعی کنترل می‌شوند می‌توانند جذب دی‌اکسیدکربن را بیشینه کنند. رآکتور زیستی ۶۰ تا ۹۰ درصد دی‌اکسید کربن را جذب و در نهایت هوای پاک را آزاد می‌کند [۱۹-۲۰].

۳.۳. جذب پس‌سوز

جذب کربن پس‌سوز نوعی فناوری جذب انتخابی است. واحدهای جذب می‌توانند با افزودن تأسیسات جداسازی دی‌اکسیدکربن به نیروگاه‌های موجود برای حذف دی‌اکسید کربن از جریان گاز دودکش خروجی فعال شوند؛ این واحدها حداقل تغییرات را در محفظه‌ی احتراق ایجاد می‌کنند [۲۱]. جذب پس‌سوز اساساً فرایندی است که در آن گاز جذب‌شده در برج جذب با حلال فیزیکی یا شیمیایی برخورد می‌کند. حلال از ویژگی‌هایی خاص برخوردار است که تنها دی‌اکسیدکربن را جذب می‌کند و اجازه می‌دهد که گازهای دیگر عبور کنند. محلول غنی از دی‌اکسیدکربن بعداً به برج دیگری منتقل می‌شود که در آن دی‌اکسیدکربن حذف و حلال برای استفاده مجدد

بازیافت می‌شود. یکی از پیشرفته‌ترین فرآیندها برای جذب پس‌سوز دی‌اکسیدکربن، پاکسازی مرطوب حلال است. در فرآیند جذب پس‌سوز اغلب از حلال‌های آبی آمین‌پایه (*amine-based aqueous solvent*) استفاده می‌شود. این فرآیند مبتنی بر نوسان دما است و طی آن دی‌اکسیدکربن توسط حلال در دمای پایین جذب و در دمای بالا واجذب می‌شود. برج‌های جذب و واجذب (*desorber column*)، ریبویلر (مبدل حرارتی) (*reboiler*)، چگالنده (*condenser*)، خنک‌کننده‌ها و پمپ‌ها از اجزای ضروری سیستم جذب پس‌سوز هستند [۲۲-۲۴].

در فرآیند جذب پس‌سوز، حلال به‌طور انتخابی دی‌اکسیدکربن را از گاز دودکش جذب می‌کند. سپس حلال غنی از دی‌اکسیدکربن به واجاذب وارد می‌شود. گاز سیال پس از ترک جاذب برای حذف قطرات حلال با آب شستشو می‌شود. حلال در واجاذب توسط ریبویلر حرارت داده می‌شود تا دی‌اکسیدکربن جذب‌شده آزاد شود. پس از جداسازی دی‌اکسیدکربن، حلال ضعیف (*lean solvent*) از طریق مبدل متقابل متقاطع (*cross-exchanger*) برای بازیابی گرما پمپاژ می‌شود و سپس برای ادامه‌ی چرخه به جاذب باز می‌گردد. جریان دی‌اکسیدکربن با خلوص بالا در چگالنده سرد می‌شود تا هرگونه آب و حلال را حذف کند. در نهایت، جریان چگالیده‌ی مایع به واجاذب بازگردانده می‌شود [۲۳-۲۴]. در این فرآیند، گاز دودکش که حاصل احتراق زیست‌توده است احتمالاً نیاز به پاک‌سازی دارد. هرگونه فلز سنگین موجود در گاز دودکش می‌تواند توسط حلال جذب شود، اما افزایش این فلزها در بلندمدت منجر به تخریب حلال می‌شود. همچنین، جذب چرخه‌ای و فرایندهای جداسازی، حلال را در معرض گرمایش و خنک‌سازی دوره‌ای قرار می‌دهد و در نهایت حلال را تخریب می‌کند. برای حفظ عملکرد جذب، حلال تخریب‌شده باید به‌صورت دوره‌ای جایگزین شود. برخی از کارخانه‌های جدید از احیاکننده‌ها برای بازیابی حلال‌های فعال استفاده می‌کنند. حلال‌های معمولی آمین‌هایی مانند اتانول‌آمین (*ethanolamine*) هستند. گزینه‌های جایگزین، نمک‌های قلیایی آبی آمینواسید هستند که سازگار با محیط‌زیست، کم‌تر فرار و دارای مقاومتی به‌مراتب بیشتر در برابر تخریب اکسیداتیو (*oxidative*) هستند [۲۴].

مایعات یونی نیز به‌دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی استثنایی خود در برخی پژوهش‌ها پیشنهاد شده‌اند [۲۴]، اما دارای معایبی از جمله گِران‌رَوی (*viscosity*) و هزینه‌های زیاد هستند؛ گرچه ترکیبی از مایعات یونی و آمین‌ها می‌تواند خواص مفید هر دو را داشته باشد [۲۴]. در عین حال، تشدید فرآیند به‌طور قابل‌توجهی هزینه‌ها را کاهش دهد. برای کاهش اندازه‌ی جاذب و واجاذب از بستر آکنده‌ی دوار (*rotating packed bed*) نیز استفاده می‌شود؛ بستر آکنده‌ی دوار از نیروی گریز از مرکز برای بهبود انتقال توده استفاده می‌کند. حجم مورد نیاز برای جاذب بستر آکنده‌ی دوار که روزانه ۱۰۰ تن دی‌اکسیدکربن را جذب می‌کند، شش برابر کم‌تر از مقدار مورد نیاز برای جاذب‌های معمولی است [۲۳-۲۴].

۳.۳. جذب سطحی

جذب سطحی یا برجذبش یکی دیگر از روش‌های جذب کربن پس از احتراق و نوعی جداسازی ترکیبی است. این روش بر مبنای تفاوت در خواص جذب و واجذب اجزای تشکیل‌دهنده‌ی گاز دودکش طراحی شده است و از ویژگی‌های آن کمینه‌ی نیاز به تغییرات در تنظیمات کارخانه‌های موجود است. اصطلاح جذب سطحی به چسبندگیِ (*adhesion*) یون‌ها، اتم‌ها یا مولکول‌های مایع، گاز یا جامد سطح اشاره دارد. جذب سطحی اساساً با جذب پس‌سوز که پیش از این به آن اشاره کردیم متفاوت است. در جذب پس‌سوز، کل حجم ماده‌ی شاره توسط جاذب جامد یا مایع حل می‌شود، اما در جذب سطحی، چنانچه از عنوان آن پیداست، فرآیند جذب اساساً بر سطح متمرکز است [۲۵]. فرآیند جذب سطحی اساساً شامل دو نوع «جذب با تناوب فشار» و «جذب با تناوب دما» در چند مرحله است. نخست گاز دودکش به بستر جاذب جامد وارد می‌شود تا دی‌اکسیدکربن به‌صورت انتخابی به تعادل برسد. سپس واجذب سطحی (*desorption*) دی‌اکسیدکربن در فرآیند جذب سطحی با تناوب فشار (*pressure swing adsorption*) انجام می‌شود. در فرآیند اخیر، جذب سطحی در فشار بالا و تناوب فشار پایین (فشار اتمسفری) است. در فرآیند جذب با تناوب دما (*temperature swing adsorption*)، دی‌اکسیدکربن با افزایش دمای سیستم از طریق هوای داغ یا تزریق بخار از جاذب جامد جدا می‌شود [۲۶-۲۷].

نکته این‌که، برای کاهش هزینه‌ها، جاذب‌ها باید قابل بازسازی باشند که به‌کارگیری مجدد آن‌ها برای چرخه‌های بعدی امکان‌پذیر باشد. جذب سطحی با تناوب فشار از ویژگی‌هایی نظیر عمکرد ساده‌تر، مصرف برق کمتر و امکان بازسازی سریع‌تر برخوردار است. اما، وجود آب در فرآیند جذب سطحی با تناوب فشار ممکن است پتانسیل بازیابی را کاهش دهد. گرچه جذب سطحی با تناوب دما نیاز به صرف زمانی

به‌مراتب بیشتر نسبت به جذب سطحی با تناوب فشار دارد، به‌طور کلی خلوص بازیابی آن بیشتر است و نیاز به انرژی برای تحت فشارقراردادن دی‌اکسیدکربن ندارد. در انتخاب جاذب‌ها باید سطوح، انتخاب‌پذیری و توانایی احیای هر یک در نظر گرفته شود. جاذب‌های معمول در این شیوه زئولیت‌ها (*zeolite*) و کربن فعال هستند. جذب سطحی نسبت به فرآیند جذب پس‌سوز از مزایای متعدد برخوردار است؛ از جمله این‌که نگرانی زیست‌محیطی پسماندهای جامد در مقایسه با پسماندهای مایع کمتر است، جذب سطحی در برابر خوردگی (*corrosion*) بیشتر مقاوم است و دمای عملیاتی گسترده‌تری دارد. پژوهش‌های اخیر معتقدند که جذب سطحی یکی از اقتصادی‌ترین روش‌های جذب است [۲۵ و ۲۷].

۴. نتیجه‌گیری

افزایش فزاینده‌ی گازهای گلخانه‌ای و به‌تبع گرمایش کره‌ی زمین و مسئله‌ی تغییرات اقلیمی نیازمند ارائه‌ی راه‌حل‌های علمی و فناورانه‌ی بیشتر و دقیق‌تر برای کاهش دی‌اکسیدکربن است. بررسی ادبیات پژوهش حاکی از آن است که گرچه فناوری‌های جذب کربن از دستاوردهای پژوهشی تاکنون موجود برای ارائه‌ی راه‌حل‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای استفاده کرده‌اند، هنوز عمدتاً نوپا و نیازمند پژوهش‌های بیشتر برای ارزیابی کارآمدی، بهینه‌سازی و پیامدهای زیست‌محیطی هستند. شیوه‌های جذب کربن که در گفتار حاضر بررسی شدند هر یک دارای مزایا و دشواری‌های عملیاتی خاص خود است که مقایسه‌ی آن‌ها را دشوار می‌سازد. به‌عنوان مثال، جذب پس‌سوز با جذب بیش از ۹۰ درصد به‌لحاظ کارکردی بهینه است، اما به‌لحاظ پسماندهای مایع در فرآیند جذب نگران‌کننده به‌نظر می‌رسد. جذب سطحی کربن با تناوب دما گرچه نیازمند دمای بالا است از چرخه‌ی بازیابی بهتر برخوردار است. فرآیند جذب از طریق جلبک‌ها از نظر غلظت دی‌اکسیدکربن، تولید زیست‌گاز و محصولات جانبی کارآمد است، اما نسبت به سایر شیوه‌ها پیچیده‌تر است. این شرایط برای جذب مستقیم کربن از هوا نیز صادق است که به‌نوبه‌ی خود نیازمند فضای باز و دوری از سکونتگاه‌های محلی است. در نهایت، تا جایی که به منابع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای نظیر کارخانه‌ها یا نیروگاه‌های بزرگ مربوط است، شیوه‌های جذب پس از احتراق، جذب پس‌سوز و جذب سطحی، از اولویت بیشتر برخوردارند.

منابع

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). "Impacts, adaptation, and vulnerability." Part A: global and sectoral aspects. *Contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental Panel on Climate Change 1132*, 2014.

[2] P. Berry, K. Clarke, M. D. Fleury, and S. Parker. "Human Health." In *Canada in a changing climate: Sector perspectives on impacts and adaptation*, Ottawa: Natural Resources Canada, 2014.

[3] F. J. Warren and D. S. Lemmen. *Canada in a changing climate: Sector perspectives on impacts and adaptation*. Ottawa: Natural Resources Canada, 2014.

[4] S. Budinis, S. Krevor, N. Mac Dowell, N Brandon and A. Hawkes. “An assessment of CCS costs, barriers and potential.” *Energy strategy reviews*, vol. 22, pp.61-81, 2018.

[5] J. Fan, M. Xu, F. Li, L. Yang and X. Zhang. "Carbon capture and storage (CCS) retrofit potential of coal-fired power plants in China: the technology lock-in and cost optimization perspective." *Applied energy*, vol. 229, pp. 326-334, 2018.

[6] E. Martin-Roberts, V. Scott, S. Flude, G. Johnson, R. S. Haszeldine and S. Gilfillan. "Carbon capture and storage at the end of a lost decade." *One Earth*, vol. 4, pp. 1569-1584, 2021.

[7] K. Yanagi and A. Nakamura. "Towards a low/zero carbon society for the Asia-Pacific Region: Policy and legal development for carbon capture and storage (CCS) in Japan." In *Sustainability and Law*, pp. 585-605. Springer, Cham, 2020.

[8] R. Arshad, R. Gholami, V. Rasouli, R. Rezaee, C. H. Bing and R. Nagarajan. "An Introduction to Carbon Capture and Storage Technology." In *Membrane Technology for CO2 Sequestration and Separation*, pp. 1-13. CRC Press, 2019.

[9] T. Daniel, A. Masini, C. Milne, N. Nourshagh, C. Iranpour and J. Xuan. "Techno-economic analysis of direct air carbon capture with CO2 utilisation." *Carbon Capture Science & Technology*, vol. 2 100025, 2022.
[10] M. Marchese, G. Buffo, M. Santarelli and A. Lanzini. "CO2 from direct air capture as carbon feedstock for Fischer-Tropsch chemicals and fuels: Energy and economic analysis." *Journal of CO2 Utilization*, vol. 46, 101487, 2021.
[11] C. Larrea, D. Torres, J. R. Avilés-Moreno and P. Ocón. "Multi-parameter study of CO2 electrochemical reduction from concentrated bicarbonate feed." *Journal of CO2 Utilization*, vol. 57, 101878, 2022.
[12] W. D. Keith, G. Holmes, D. St Angelo and K. Heidel. "A process for capturing CO2 from the atmosphere." *Joule*, vol. 2, pp. 1573-1594, 2018.
[13] J. Singh and D. W. Dhar. "Overview of carbon capture technology: microalgal biorefinery concept and state-of-the-art." *Frontiers in Marine Science*, vol. 6, p. 29, 2019.
[14] S. Paul, S. Bera, R. Dasgupta, S. Mondal and S. Roy. "Review on the recent structural advances in open and closed systems for carbon capture through algae." *Energy Nexus*, vol. 4, 100032, 2021.
[15] R. Kholssi, P. V. Ramos, E. A. Marks, O. Montero and C. Rad. "2Biotechnological uses of microalgae: a review on the state of the art and challenges for the circular economy." *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, vol. 36, 102114, 2021.
[16] S. Li, X. Li and S. Ho. "How to enhance carbon capture by evolution of microalgal photosynthesis?" *Separation and Purification Technology*, vol. 291, 120951, 2022.
[17] H. Onyeaka, T. Miri, K. Obileke, A. Hart, C. Anumudu and Z. T. Al-Sharify. "Minimizing carbon footprint via microalgae as a biological capture." *Carbon Capture Science & Technology*. vol. 1, 100007, 2021.
[18] Z. Xiao, Y. Zheng, C. R. Gudi, Y. Liu, W. Liao and Y. J. Tang. "Development of a kinetic model to describe six types of symbiotic interactions in a formate utilizing microalgae-bacteria cultivation system." *Algal Research*, vol. 58, 102372, 2021.
[19] R. K. Goswami, K. Agrawal, S. Mehariya, A. Molino, D. Musmarra and P. Verma. "Microalgae-based biorefinery for utilization of carbon dioxide for production of valuable bioproducts." In *Chemo-biological systems for CO2 utilization*, pp. 203-228. CRC Press, 2020.
[20] D. Moreira and J. C. Pires. "Atmospheric CO2 capture by algae: negative carbon dioxide emission path." *Bioresource technology*, vol. 215, pp. 371-379, 2016.
[21] K. N. Finney, M. Akram, M. E. Diego, X. Yang and M. Pourkashanian. "Carbon capture technologies." In Bioenergy with carbon capture and storage, pp. 15-45. *Academic Press*, 2019.
[22] B. A. Belmonte, K. B. Aviso, M. F. D. Benjamin and R. R. Tan. "Mixed-Integer Linear Programming Model for the Synthesis of Negative-Emission Biochar Systems." In *Optimization for Energy Systems and Supply Chains*, pp. 51-72. CRC Press, 2022.
[23] A. Golmakani, S. A. Nabavi and V. Manović. "Production of negative-emission biomethane by twin double-bed pressure swing adsorption with tail gas sequestration." *Chemical Engineering Journal*, vol. 408, 127312, 2021.
[24] F. M. Santos, A. L. Gonçalves and J. C. Pires. "Negative emission technologies." In *Bioenergy with Carbon Capture and Storage*, pp. 1-13. Academic Press, 2019.
[25] R. Ben-Mansour, M. A. Habib, O. E. Bamidele, M. Basha, N. A. A. Qasem, A. Peedikakkal, T. Laoui and M. J. A. E. Ali. "Carbon capture by physical adsorption: materials, experimental investigations and numerical modeling and simulations–a review." *Applied Energy*, vol. 161, pp. 225-255, 2016.
[26] R. Gonzalez-Olmos, A. Gutierrez-Ortega, J. Sempere and R. Nomen. "Zeolite versus carbon adsorbents in carbon capture: A comparison from an operational and life cycle perspective." *Journal of CO2 Utilization*, vol. 55, 101791, 2022.

[27] T. E. Akinola, P. L. B. Prado and M. Wang. "Experimental studies, molecular simulation and process modelling\simulation of adsorption-based post-combustion carbon capture for power plants: A state-of-the-art review." *Applied Energy*, vol. 317, 119156, 2022.