

CO₂

CO₂

CO₂

CO₂

CO₂

הכימיה מתגייסת למציאת פתרונות במסגרת המאבק בשינוי האקלים

נעמה גלוז*

Repair Carbon Capture

שנת הקמה: 2020

מספר עובדים: 15

מנהל: אמיר שיינר

מיקום: פארק מדע ותעשייה מבוא כרמל יקנעם, ישראל



חלק מצוות RepAir. מימין לשמאל: ולדימיר בראילוב, עילי דייכס, ד"ר שקד רוזן, עמיחי קרונמן, אסף אשרוב, הדס ברבי, ד"ר נעמה גלוז, יעל פרקש, אושר שמואלי, נעמה לניבצב, ד"ר בן אחראי (CTO), אמיר שיינר (מנכ"ל).

ככל שריכוז גזי החממה עולה, יותר חום נכלא בכדור הארץ, והטמפרטורה עולה. מאז המהפכה התעשייתית עלתה רמת הפחמן הדו-חמצני באוויר מ-280 חלקים למיליון (ppm) ל-421 חלקים למיליון, והטמפרטורה העולמית הממוצעת עלתה בכ-1.1°C.

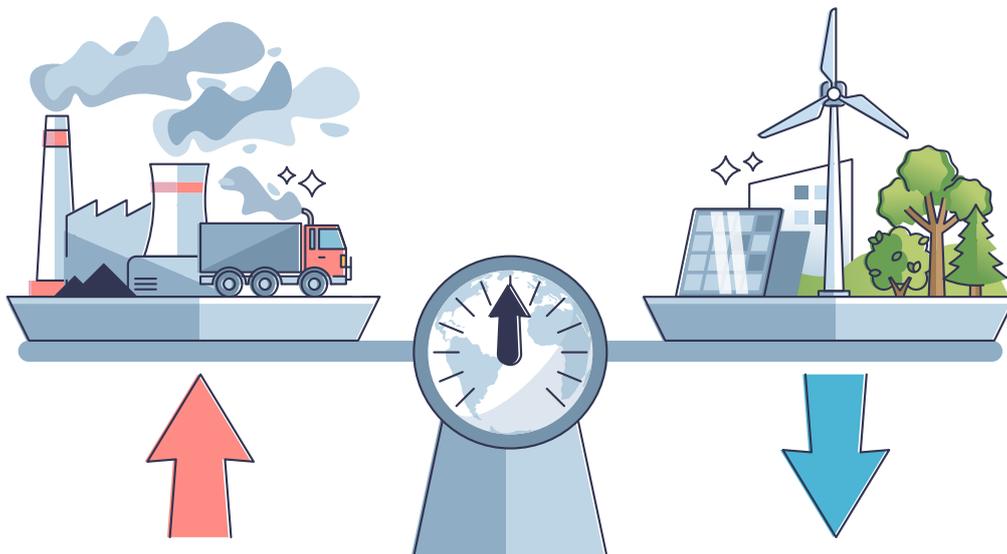
הפאנל הבין ממשלתי של האו"ם לשינויי אקלים, ה-IPCC, (Intergovernmental Panel on Climate Change) פרסם את דוחו באוגוסט 2021, ומסקנותיו הוצגו גם בוועידת האקלים ה-26 של האו"ם (COP26) שנערכה בגלזגו בנובמבר באותה שנה. הדו"ח קובע שיש להימנע מחציית גבול התחממות של 1.5°C. לשם כך יש לעשות שינוי מידי ומהותי באורחות החיים, ולצמצם את פליטת גזי החממה בחצי עד 2030, ועד להפסקה מלאה של פליטת גזים אלו ב-2050. מדינת ישראל התחייבה לצמצום פליטת גזי חממה ב-27%, לכל הפחות, עד 2030 וב-85%, לכל הפחות, עד 2050. יש לציין שגם אם ישראל תוריד את פליטת ה- CO_2 שלה ל-0 תוך שנה, האפקט על משק ה- CO_2 בעולם יהיה אפסי.

דלקים מאובנים כדוגמת פחם ונפט הם מבוססי פחמן, והשימוש

לתופעת ההתחממות הגלובלית המוכרת לנו בפשטות כ"עליית טמפרטורת פני שטח כדור הארץ" ישנם ביטויים רבים והרי גורל: חשש להמסת קרחונים, עליית גובה פני הים, שינוי מהותי במשטר האקלים - הופעת גלי חום, מדבור, סופות, שטפונות ועוד. מצב זה, הידוע גם בשם "שינוי האקלים" ("Change Climate"), עלול להוביל לנזק קריטי ובלתי הפיך לאנושות ולמערכת האקולוגית כולה: מינים בסכנת הכחדה עלולים להיכחד מהעולם, מיליוני אנשים עלולים להישאר ללא בית, וכן צפויה ירידה משמעותית בתנובה החקלאית, שעלולה לגרום לרעב המוני ולפגיעה בביטחון התזונתי.

מקור תופעת ההתחממות הגלובלית במהפכה התעשייתית (שאמנם יצרה איכות חיים חדשה, גבוהה יותר ממה שהיה לפני כן), ובחיי היום-יום המזהמים, אשר תרמו רבות לעלייה בפליטת גזי חממה, ובראשם הפחמן הדו-חמצני (CO_2). גזי החממה שבאטמוספירה כולאים את קרינת השמש וגורמים להחזר של קרינה אינפרא-אדומה (IR) מחממת אל פני שטח האדמה. כתוצאה מכך פני השטח של כדור הארץ מתחממים.

* ד"ר נעמה גלוז, חוקרת מחקר ופיתוח בחברת RepAir. בעלת תואר ראשון בכימיה וביולוגיה מאוניברסיטת בר-אילן, ותארים שני ושלישי מהפקולטה לכימיה ע"ש שוליק, טכניון



איור 1: "מאזן פליטה אפס" - מצב אידיאלי שבו גורמי הזיהום (משמאל) אשר תורמים להגדלת כמות הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה מאוזנים ע"י הגורמים המפחיתים את רמת הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה (מימין)

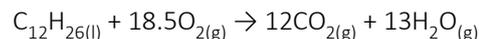
לענות על הדרישה. גם מפאת כמות נמוכה של עצים שזמינים לנטיעה וגם עקב מחסור בקרקעות לנטיעה. לפיכך עולה צורך ליישם גישות אקטיביות להסרת הפחמן הדו-חמצני.

בעקבות שינוי האקלים והדרישה לצמצום גזי חממה, התפתח תחום עיסוק חדש בהייטק שנקרא "אקלים-טק" (טכנולוגיות אקלים, Climate Tech), ועיקרו פיתוח חדשנות טכנולוגית בתחומי האקלים. טכנולוגיות אקלים מתמקדות בשני מסלולים: (1) מיטיגציה: הפחתת מקורות לפליטות פחמן דו-חמצני בסקטורים השונים. למשל, בתעשייה, בחברות וכו', לצד סילוק פחמן מהאטמוספירה. (2) אדפטציה: הגברת החוסן לסיכוני האקלים והסתגלות למצבים אקלימיים קיצוניים, במטרה למזער את השפעתם השלילית על האוכלוסייה. נכון לשנת 2021, בישראל בלבד ישנן 637 חברות הזנק (סטארטאפים) וחברות צמיחה שעוסקות בתחום האקלים-טק². המחקר והפיתוח שמתבצעים בחברות אלו הם מולטי דיסציפלינריים, והחוקרים מגיעים מרקעים מדעיים שונים.

לכידה, ניצול ואחסון פחמן (Carbon Capture, Utilization, CCUS and Storage) היא נושא חשוב ומאתגר בתחום האקלים-טק העוסק בלכידת פחמן דו-חמצני, אחסונו וניצולו. CCUS כולל את פיתוח הטכנולוגיות והאמצעים להקטנת ריכוז הפחמן הדו-חמצני באוויר ויישומן בהיקף רחב במטרה להגיע למאזן פחמן אפס ואף שלילי (Net negative emission)².

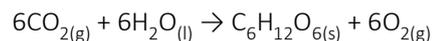
לכימיה תפקיד חשוב מאוד בתחום לכידת הפחמן. התגובות הכימיות הייחודיות מאפשרות להפריד את הפחמן הדו-חמצני משאר הגזים באטמוספירה, לאגור אותו בצורות שונות ואף להשתמש בו כחומר גלם לצרכים מגוונים.

בהם מחמיר את פליטת גזי החממה. כך למשל, בתגובת שריפת סולר (דלק פחמימני בעל נוסחה כימית ממוצעת של $C_{12}H_{26}$) עבור כל מולקולה אחת של סולר שנשרפת, נפלטות לאטמוספירה 12 מולקולות של פחמן דו-חמצני. מבחינה כמותית כל 1 ק"ג סולר שנשרף משחרר לאטמוספירה 3.105 ק"ג פחמן דו-חמצני.



על פי דו"ח המומחים, יש להסיר 10 מיליארד טון פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה עד 2050 על מנת למנוע התחממות נוספת והשלכות סביבתיות קטסטרופליות. לפיכך מעבר לשימוש במקורות של אנרגיה ירוקה ומתחדשת במקום שימוש בדלקים פחמימניים, יעזור לצמצם פליטה נוספת של פחמן דו-חמצני לאטמוספירה ויקל על ההגעה למצב של "מאזן פליטת פחמן אפס" (Net zero emission), כלומר, מצב שבו ישנו אפס פליטות נטו של פחמן דו-חמצני^{**}, ולא נוסף עוד פחמן דו-חמצני לאטמוספירה.

בנוסף, על מנת לטפל בנזקים הסביבתיים שנגרמו עד כה, יש צורך לטפל בפחמן הדו-חמצני שכבר נפלט לסביבה. אחת האפשרויות לטיפול היא ע"י נטיעת יערות, שכן כחלק מתהליך הפוטוסינתזה עצים צורכים פחמן דו-חמצני ומייצרים ממנו את הגלוקוז, שמהווה אבן בניין להתפתחותם:

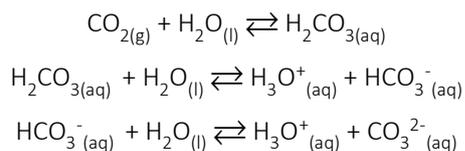


אך כיוון שיש צורך להסיר כמות עצומה של פחמן דו-חמצני בזמן קצר יחסית, נטיעת עצים היא מוגבלת ואינה מספיקה

* מדענים וכל העוסקים בתחום האקלים נוהגים לדבר על פליטות פחמן, אך הכוונה היא לפליטות פחמן דו-חמצני ותרכובות אחרות המכילות פחמן.
** ניתן להגיע למאזן פליטה אפס על ידי הפסקת פליטות קיימות או על ידי איזון בין פליטת פחמן דו-חמצני לבין סילוקו.



שנמצא בשיווי משקל עם הפחמן דו-חמצני באוויר. כאשר פחמן דו-חמצני מתמוסס במים, נוצרת חומצה פחמתית, H_2CO_3 . החומצה יכולה להמשיך להגיב ליצירת יוני קרבונט וביקרבונט (CO_3^{2-} , HCO_3^-):



כדי להוריד את כמות הפחמן הדו-חמצני באוויר ניתן להסיט את שיווי המשקל של הפחמן דו-חמצני המומס באוקיינוסים: אם כמות ה- CO_2 , שנמצאת באוקיינוסים בצורת חומצה, תקטן (למשל, ע"י הוספת חומר בסיסי כלשהו), הדבר יסיט את שיווי המשקל ימינה לכיוון יצירת החומצה, שיווי המשקל המוסט יגרום לאוקיינוסים לספוח לתוכם עוד CO_2 מהאוויר, וכך כמות ה- CO_2 שבאטמוספירה תקטן. בנוסף לכך יוני קרבונט יכולים

לכימיה תפקיד חשוב מאוד בתחום לכידת הפחמן. התגובות הכימיות הייחודיות מאפשרות להפריד את הפחמן הדו-חמצני משאר הגזים באטמוספירה, לאגור אותו בצורות שונות ואף להשתמש בו כחומר גלם לצרכים מגוונים.

כחומר גלם הפחמן הדו-חמצני דרוש לשימושים שונים: לחברות משקאות, לייצור משקאות מוגזים, לגידולי ירקות בחממות חקלאיות ולתעשייה, למשל, תעשיית הפולימרים ותעשיית הבטון. אחת מחברות האקלים-טק הידועה בעשייה בתחום הבטון היא חברה קנדית אשר צורכת CO_2 שנלכד מהאוויר ומזריקה אותו לבטון. ה- CO_2 מגיב עם יוני סידן והופך לסידן פחמתי, הנקרא גם ליימסטון. זהו מינרל יציב המאפשר לקבל בטון חזק עם פחות צמנט בתערובת הבטון. הפחמן הדו-חמצני שהופרד ונאסף יכול לשמש לצורך הגדלת יכולת ההפקה של נפט מהאדמה. ה- CO_2 שהופרד מוזרק לתוך בארות הנפט. כך נוצר לחץ גבוה אשר מפצה על הלחצים שמשחררים עם שאיבת הנפט. פיצוי זה מאפשר המשך שאיבת הנפט בקצב גבוה. יש לציין ששימוש זה אינו מסייע להפחתת רמת ה- CO_2 באוויר, כיוון שבסופו של דבר הנפט שיופק ישמש שוב להגדלת הפחמן דו-חמצני באוויר.

דלק מאובן המכיל פחמן נמצא באופן טבעי במעבה האדמה. לצורך ניצול האנרגיה האגורה בו, נשאב הדלק מהאדמה ונשרף (תגובה עם החמצן באוויר). בעת שרפתו נפלט פחמן דו-חמצני, שמתווסף לשאר הגזים באטמוספירה ומפר את שיווי המשקל הקיים. ניתן לפצות על הפרת האיזון ע"י אגירת הפחמן דו-חמצני שנפלט, דחיסתו והטמנתו בקרקע בשכבות גיאולוגיות עמוקות, בתהליך שנקרא "הטמנה גיאולוגית עמוקה". הגז המוטמן נלכד כך בין חלקיקי הקרקע, מומס במי התהום ולעיתים הופך למאובן. כך נסגר המעגל, והפחמן חוזר למקומו המקורי³.

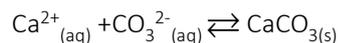
ניתן להסיר פחמן דו-חמצני מהסביבה בשיטות רבות, למשל, על ידי לכידתו באוקיינוס. מי האוקיינוס מסוגלים לקלוט כמות עצומה של פחמן דו-חמצני עד פי 50 מכמותו באוויר⁴, בתהליך

נכון לשנת 2021, בישראל בלבד ישנן 637 חברות הזנק וחברות צמיחה שעוסקות בתחום האקלים-טק. המחקר והפיתוח שמתבצעים בחברות אלו הם מולטי דיסציפלינריים

פני פילטרים המצופים בחומרים סופחי פחמן דו-חמצני. לאחר מכן, האוויר שנמצא בחלל הפילטר נשאב החוצה ע"י הפעלת ואקום. בשלב ההפרדה האחרון, בכדי לשחרר את הפחמן דו-חמצני הספוח, מחממים את הפילטרים לטמפרטורה של כ-100-120 מעלות צלסיוס, תוך כדי הפעלת לחץ (חיובי או שלילי) ו/או בתוספת לחות. לבסוף מתמקבל גז פחמן דו-חמצני נקי שניתן לאחסון או לשימוש מיד. כיום קיימים ברחבי העולם כ-18 מפעלי "לכידת אוויר ישירה"⁶ בלבד. לכידת אוויר ישירה (DAC) היא טכניקה מבטיחה להפחתת רמות הפחמן הדו-חמצני, אך האתגר הוא הפיכת תהליך לכידת ה-CO₂ ליעיל ומשתלם מבחינה כלכלית.

העלות הכלכלית של תהליך ה-DAC, מבוססת בדולרים לטון פחמן דו-חמצני שנלכד. עבור הטכנולוגיות שכבר קיימות כיום העלות מוערכת בכ- 1000 דולר לטון פחמן דו-חמצני, ועלות המטרה היא פחות מ-100 דולר לטון פחמן דו-חמצני, וזאת עבור ייצור בסקאלות הגדולות של מגהטון לשנה והלאה. העלות הכלכלית תלויה בגורמים רבים, למשל: סוג תהליך ה-DAC שממנו נגזרת עלות הציוד והתפעול. תהליך ספיחה על גבי ממסים נוזליים צורך יותר אנרגיה מתהליך של ספיחה על מוצק, כיון שהסרת CO₂ מאשלגן וסידן פחמתי (CaCO₃-1 K₂CO₃) דורשת טמפרטורות

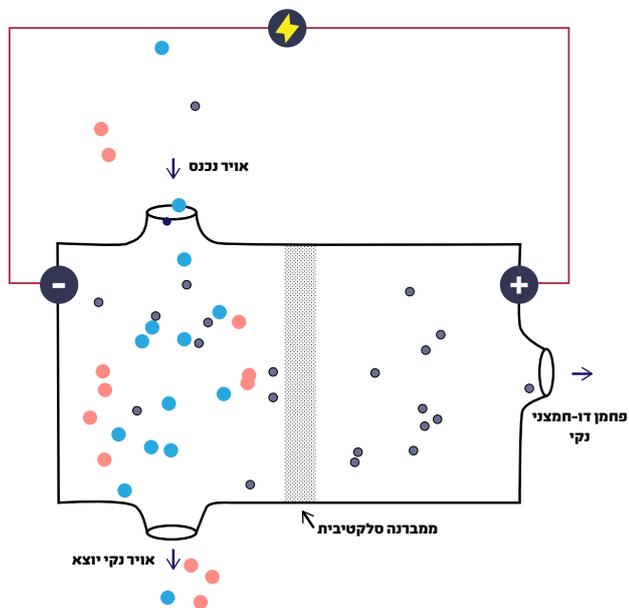
להגיב עם יוני סידן מהים, שנמצאים בכמות עודפת, ליצירת גבישים מינרליים:



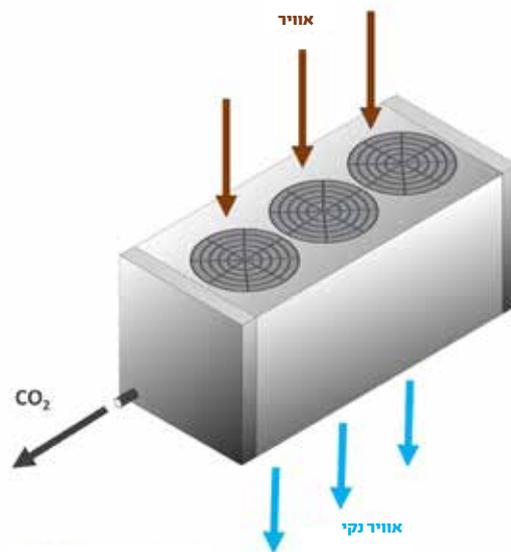
תהליך זה תורם גם הוא להסטה ימינה של שיווי המשקל של הפחמן דו-חמצני. החיסרון בשיטה זו הוא החמצת מי הים, ה-pH יורד בעקבות נוכחות החומצה הפחמתית שמתפרקת, והדבר עלול לגרום לנזק לאוכלוסיית הים.

ניתן להסיר פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה באופן פעיל בשיטה ישירה שנקראת DAC – Direct Air Capture. עקרון הפעולה של תהליך ה-DAC מבוסס על מאווררים ענקיים שמזרימים את האוויר לתוך מערכת ההפרדה, שם האוויר פוגש פילטרים מיוחדים שעליהם נמצא חומר פעיל. תהליך כימי מתרחש, והפחמן דו-חמצני מופרד ומועבר לצוברים ומשם ליעדם לשימושים השונים. ניתן לבצע לכידת אוויר ישירה בסביבה רגילה וכן מארובות מפעלים מזהמים. לחברות שונות שיטה כימית שונה להפרדת הפחמן דו-חמצני.⁵

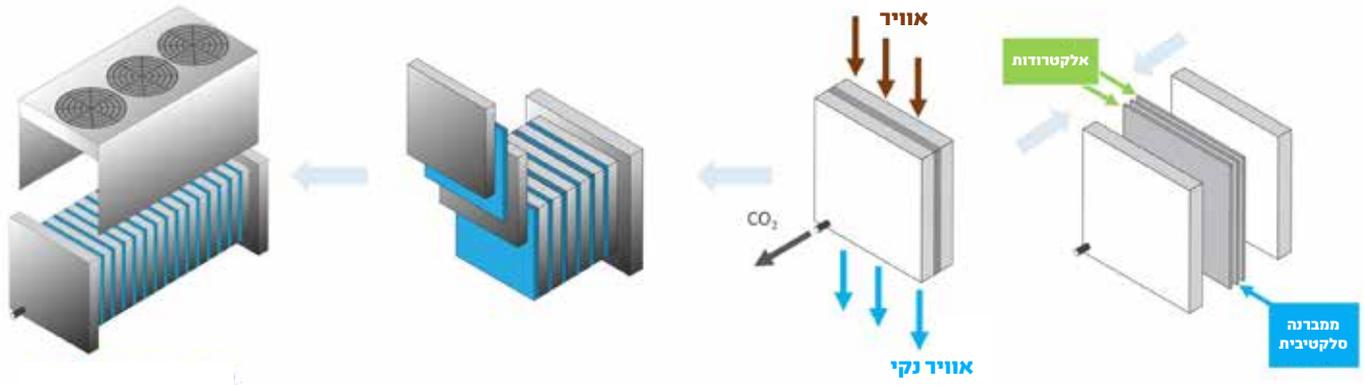
בהסרת פחמן מבוססת ממס נוזלי (capture solvent Liquid agent), האוויר המכיל פחמן דו-חמצני עובר מעל ממס נוזלי כמו אשלגן הידרוקסיד, KOH, ומגיב עמו. הפחמן דו-חמצני מוסר מהאוויר ונוצר אשלגן פחמתי (K₂CO₃). על מנת שיהיה ניתן יהיה להשתמש שוב בממס הנוזלי ללכידת פחמן דו-חמצני נוסף, יש להפריד את הפחמן דו-חמצני מתרכובת האשלגן ע"י תגובה עם סיד - Ca(OH)₂, תוך יצירת סידן פחמתי CaCO₃ (אבן גיר, ליימסטון). לאחר מכן ניתן לפרק את אבן הגיר ליצירת זרם של CO₂ טהור לאחסון או להשתמש בה ישירות כחומר גלם. בהסרת פחמן מבוססת סופחים מוצקים (absorbent Solid agent capture), האוויר (המכיל פחמן דו-חמצני) מוזרם על



איור 3: תיאור סכמטי של עקרון הפעולה של מערכת RepAir: הפרדה אלקטרוכימית של פחמן דו-חמצני מהאוויר



איור 2: תהליך ה-DAC - לכידת אוויר ישירה: אוויר עם פחמן דו-חמצני נכנס למערכת, הפחמן דו-חמצני מופרד ממנו בתהליך כימי ומועבר לאגירה בצוברים, האוויר היוצא מהמערכת נקי מפחמן דו-חמצני



איור 4: מערכת ההפרדה המודולרית של RepAir מאפשרת חיבור של מספר יחידות עובדות על מנת להגיע לרמת ההפרדה הדרושה

בנוסף המערכת היא מודולרית - כך שניתן לחבר מספר יחידות עובדות (זוגות אלקטרודות וביניהן ממברנה) יחדיו על מנת להגיע לרמת ההפרדה הדרושה.

לאחר שהפחמן הדו-חמצני הופרד ונאסף, יש להשמינו בקרקע בצורה כזו שתמנע ממנו מלחזור לאטמוספירה. ישנן מספר חברות סטרטאפ וחברות צמיחה שעוסקות בנושא ההטמנה. אחת מהחברות העוסקות בהטמנה של פחמן דו-חמצני עושה זאת ע"י כליאתו בסלעים. ה- CO_2 שמופרד מהאוויר מומס במים ומזורק לסלעי בזלת נקבוביים בעומק האדמה. המים שהוזרק אליהם פחמן דו-חמצני בעלי צפיפות גבוהה יותר ממים רגילים, ולכן נוטים לשקוע לאחר ההזרקה. כשהפחמן דו-חמצני נמצא מתחת לפני האדמה, הוא מגיב עם יוני מתכות כמו סידן, מגנזיום וברזל ליצירת מינרלים מוצקים בדמות אבן בתהליך איטי, הלוך בממוצע כשנתיים (תגובה כימית דומה לזו שמתרחשת באופן טבעי באוקיינוסים).

הפחמן הדו-חמצני כגז חממה נחשב לאחד הגורמים המשמעותיים בשינוי האקלים הגלובלי. לכן תהליכי לכידת פחמן דו-חמצני והטמתו מהווים צעדים קריטיים במאמצים לצמצום הפליטות. הכימיה היא זו שמאפשרת את התרחשות התהליכים הללו, ולכן ניתן לומר שלכימיה תפקיד חשוב בדרך למציאת פתרונות לשינוי האקלים.

הפניות

- 1 [הולך ומתחמם - דו"ח המומחים הבין-ממשלתי על שינויי אקלים](#)
- 2 [אקלים-טק בישראל - תמונת מצב 2021 - דוח רשות החדשנות PLANETech-1](#)
- 3 [מהי לכידת פחמן דו-חמצני, ואיך תוכל לבלום את ההתחממות הגלובלית? - אנציקלופדיה אאוריקה](#)
- 4 [לכידה ואחסון של פחמן](#)
- 5 [לכידת פחמן דו-חמצני ואחסונו - האם זו הטכנולוגיה של העתיד?](#)
- 6 <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture>
- 7 <https://repair-carbon.com/>

גבוהות, בעוד שעבור סופחים מוצקים הקשירה של הפחמן דו-חמצני למוצק חלשה יותר ולכן שחרורו דורש פחות אנרגיה.

העלויות עבור ממסים נוזליים צפויות להיות בממוצע בין 94 ל-232 דולר לטון CO_2 שנלכד. עלות הסרת פחמן מבוססת סופחים מוצקים מוערכת מעט נמוך יותר ועומדת על 86 עד 221\$ לטון CO_2 .

חברת RepAir carbon capture שהוקמה בשנת 2020, היא סטרטאפ ישראלי להפרדת פחמן דו-חמצני מהאוויר בשיטת DAC⁷. טכנולוגיית ההפרדה מבוססת על תהליך אלקטרוכימי, בהשראת עקרונות מעולם הסוללות ותאי הדלק. המערכת האלקטרוכימית החדשנית של החברה שלנו משתמשת בחשמל להפרדת ה- CO_2 מהאוויר, וההפרדה עצמה נעשית בטמפרטורת החדר בלחץ אטמוספרי.

תהליך ההפרדה מבוסס על שתי אלקטרודות: האחת טעונה במטען שלילי ומשמשת כקתודה, שם מתבצע תהליך חיזור (כלומר מסירת אלקטרונים), והשנייה טעונה במטען חיובי ומשמשת כאנודה (תהליך חמצון, קבלת אלקטרונים). בין שתי האלקטרודות ישנה ממברנה סלקטיבית. אוויר עם פחמן דו-חמצני נכנס למערכת, הפחמן דו-חמצני מגיב בקתודה, עובר באופן סלקטיבי דרך הממברנה לצד השני, שם הוא מגיב עם האנודה ומופרד החוצה מהמערכת. כיון שהתהליך מתבצע ללא צורך בטמפרטורות גבוהות או לחץ גבוה, הוא מאפשר הסרת CO_2 חסכונית ובקנה מידה גדול. עלות מטרה עבור הטכנולוגיה שאנו מפתחים בריפאייר היא כ-50-75 דולר לטון פחמן דו-חמצני (לעומת מאות דולרים לטון בשיטות הקיימות).

התהליכים המתרחשים ע"י האלקטרודות. האלקטרודות עצמן והזרזים בהם משתמשים, כולם עדין אסורים לפרסום.

המערכת האלקטרוכימית החדשנית של RepAir משתמשת בחשמל להפרדת ה- CO_2 מהאוויר וההפרדה עצמה נעשית בטמפרטורת החדר בלחץ אטמוספרי.