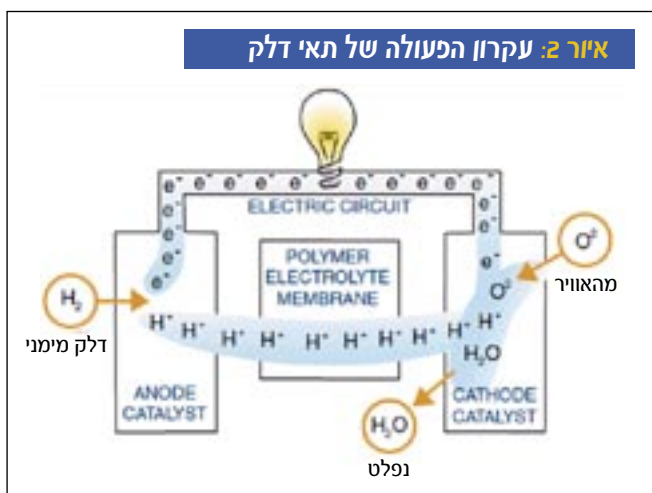


# תאי דלק כמקור אנרגיה מתחדשת - סופו של עידן הפחמן?

חוסר הוודאות ביחס לבטחון אספקת אנרגיה ושינויים אקלימיים הם סוגיות שאיתן מתמודד העולם המערבי בשנים האחרונות. לכן גוברים הן הדאגה הגוברת לאיכות הסביבה והן החיפוש המתמיד אחר טכנולוגיות חדישות לשם הפחתת התלות בדלקים מחצביים והפחתת הפליטות של גזי חממה ומזהמים. מאמר זה יסקור את טכנולוגיית תאי הדלק, אשר עשויה לשמש בעתיד הלא-רחוק כמקור אנרגיה מתחדשת וכחלק בלתי-מבוטל מתמהיל מקורות האנרגיה העולמיים.



(מקור: DOE-Office of Energy Efficiency and Renewable Energy)

הפרוטונים נעים דרך האלקטרוליט אל הקתודה, ושם הם מתאחדים עם האלקטרונים ועם החמצן ויוצרים מים וחום (ראו איור 2). היות שאין בתא דלק תהליכי שריפה, תא דלק פולט רק מעט פחמן דו-חמצני כתוצאה מהתגובה הכימית, ללא פליטה של מזהמים. יתרה מזאת, כיוון שאין בו חלקים סובבים, הוא די שקט ומהימן.

## סוגים של תאי דלק

קיימים שישה סוגים עיקריים של תאי דלק, הנבדלים זה מזה בחומרים ובמבנה, ביעילות ושימושים הסופיים. נציין, שמרבית הטכנולוגיות מצויות בתהליכים של מחקר ופיתוח, על מנת לשפר את המרכיבים השונים, את היעילות האנרגטית של התא, ואת הכדאיות הכלכלית של הפעלתו. בטבלה 1 מוצג ריכוז המאפיינים העיקריים של תאי הדלק שנסקרו להלן.

### תאי דלק מסוג Proton Exchange Membrane (PEM)

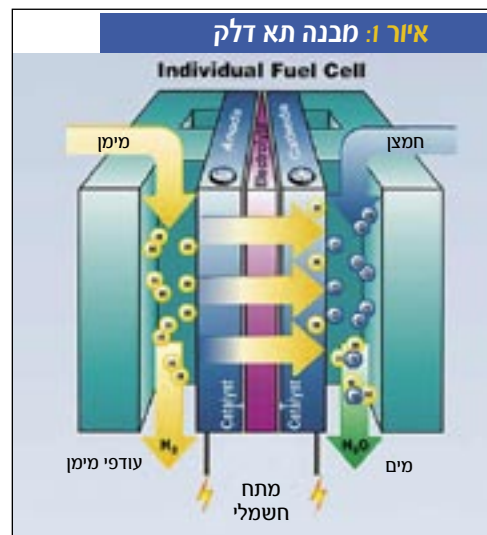
תאי דלק מסוג זה קרויים גם Polymer Electrolyte Fuel Cells (PEFC). בתא זה האלקטרוליט עשוי חומר פולימרי מוצק ואלקטרודות פחמניות נקבוביות בעלות זרז מפלטינה. תא זה מתאפיין במשקל ובנפח נמוכים בהשוואה לתאי דלק אחרים, בצפיפות אנרגיה גבוהה ליחידת משקל, ובזמן תגובה מהיר.

טמפרטורת העבודה של תא זה היא נמוכה יחסית (כ-80 מעלות צלסיוס), ויתרונה כתוצאה מכך הוא שהשחיקה של רכיבי המערכת מועטה יותר. אולם, היא מצריכה זרז עשוי ממתכות אצילות (למשל, פלטינה), אשר מייקר את העלויות של המערכת. חשוב לציין שהפלטינה רגישה מאוד להרעלת CO, ולכן תאים מסוג זה רגישים לסוג הדלק המזין אותם.

תא דלק הוא התקן שבו משתמשים במימן או בדלק מימני ובחמצן על מנת ליצור חשמל באמצעות תהליך אלקטרו-כימי. תא דלק מייצר מתח ישר (DC), וניתן להשתמש בו ליישומים כגון ייצור חשמל, חימום מבנים, גיבוי חשמלי למערכת חשמלית, וכן להנעת כלי רכב. תוצרי התגובה האלקטרו-כימית, פרט לייצור חשמל, הם מים, חום, ומעט פחמן דו-חמצני.

## מבנה תא דלק

לתא הדלק ארבעה מרכיבים עיקריים: 2 אלקטרודות (שלילית וחיובית), אלקטרוליט וזרז - כמתואר באיור 1.



(מקור: KEMA-Low Carbon Electricity Systems, 2009)

### אלקטרודה שלילית

**אנודה:** אליה מוזרם מימן, ותפקידה (בסיוע של זרז) הוא להפריד את אטומי המימן לאלקטרונים ופרוטונים.

### אלקטרודה חיובית

**קתודה:** אליה מוזרם חמצן, ותפקידה הוא לאחד מחדש את הפרוטונים של המימן עם האלקטרונים ועם החמצן שמוזרם לתהליך, לשם יצירת מים וחום.

### אלקטרוליט

האלקטרוליט יושב בין שתי האלקטרודות, והוא משמש למעשה

כממבראנה אשר מעבירה דרכה את הפרוטונים (הממבראנה מעבירה רק מטענים חיוביים), וחוסמת את מעבר האלקטרונים החופשיים. סיווג תאי הדלק נקבע לרוב על-פי סוג האלקטרוליט של התא.

**זרז (catalyst)** - הזרז מצפה את האלקטרודות, ומסייע לביצוע הריאקציה הכימית בין המימן לחמצן. הזרז עשוי לרוב מנייר פחמני או מבד מחוספס ונקבובי שעליו בדרך כלל יש שכבה דקה של מתכות אצילות (כגון פלטינה). נציין, כי למתכות שונות יש רגישות שונה לטמפרטורה של התהליך, וכן לחשיפתן לפחמן דו-חמצני ולפחמן חד-חמצני, דבר אשר משפיע על תכונות תא הדלק, כפי שיתואר בהמשך.

## עקרון הפעולה

מימן וחמצן מוזרמים לאנודה ולקתודה בהתאמה. כאשר מולקולת מימן (**H<sub>2</sub>**) באה במגע עם הזרז, היא מתפצלת לשני אלקטרונים ולשני יוני **H<sup>+</sup>** (פרוטונים), אשר נעים במסלולים שונים אל הקתודה. האלקטרונים נעים דרך מעגל חיצוני אל הקתודה, ולמעשה יוצרים זרם חשמלי, ואילו

ומשך החיים. הטמפרטורות הגבוהות של התהליך והפעולה עם זרז קורוזיבי (לא ממתכות אצילות) מאיצים את כשל החלקים ואת השיתוך (קורוזיה), ומקטינים למעשה את משך החיים של רכיבי המערכת.

### תאי דלק מסוג תחמוצת אלקטרוליט מוצק Solid Oxide (SOFC)

שימוש באלקטרוליט מוצק העשוי מחומר קרמי קשיח ולא נקבובי מקנה לתא אמינות גבוהה יותר בהשוואה לאלקטרוליט נוזלי. לכן פשוט יותר לתכנן ולבנות תאי דלק אלו, ומשקלם קטן יותר. תאי דלק אלו עובדים בטמפרטורה גבוהה מאד (כ-1,000 מעלות צלסיוס), ואפשר להזינם בדלק שאינו מימן נקי ולבצע "המרה פנימית", כפי שתואר לעיל בתא דלק מסוג MCFC. הנצילות של תאי דלק אלו היא בתחום של 35%-70%. עם ניצול משולב של כוח וחום, עשויה הנצילות להגיע אף ל-85%.

תאי דלק אלו אינם ניזוקים מפחמן חד-חמצני. לכן ניתן להשתמש בגזי פליטה של פחם כדלק ההזנה עבורם. כאמור, טמפרטורות גבוהות עלולות לגרום לכשל מהיר יותר של הרכיבים במערכת, ולהתנעה איטית יותר של המערכת.

משום כך, לרוב הם מוזנים בדלק מסוג מימן נקי. צפיפות אנרגיה גבוהה ליחידת משקל, המשקל הנמוך ומהירות התגובה הגבוהה של התא, כל אלה הופכים אותו לאידיאלי לשימוש ביישומים תחבורתיים, אך גם ליישומים נייחים.

### תאי דלק מסוג חומצה זרחתית Phosphoric Acid (PAFC)

תא זה נחשב לדור הראשון של תאי הדלק המודרניים, והוא הראשון שנעשה בו שימוש מסחרי. לרוב הוא משמש כמתקן נייח לגנרציה חשמלית, אך גם לכלי תחבורה גדולים כגון אוטובוסים ורכבות. האלקטרוליט בתא מבוסס על חומצה זרחתית נוזלית, והזרז שבאלקטרודות עשוי מפלטינה (לכן, גם בתא זה הדלק הוא מימן נקי). תא זה מתאפיין ביעילות לא גבוהה (37%-42%), הוא בדרך כלל גדול ויקר, ומשמש בעיקר ליישומים מיוחדים, כגון למטרות צבאיות. שימוש נוסף בתוצרי התהליך הוא באמצעות קוגנרציה; כלומר, ניצול משולב גם של המים החמים (קיסור) הנפלטים מהתא עשוי להגדיל את נצילות המערכת עד כ-85%.

### תאי דלק מסוג Direct Methanol (DMFC)

תא זה מוצע באמצעות מתאנול טהור. מתאנול נוזלי מתחמצן בנוכחות של מים, ומייצר פחמן דו-חמצני ופרוטונים ואלקטרונים של מימן. היעילות של תא זה עדיין נמוכה (15%-20%) עקב זליגות של מתאנול מהאנודה אל הקתודה, המתבטאת בהפסדים וכן בפגיעה בזרז. טכנולוגיה זו נחשבת עדיין לחדשנית וניסיונית, והמחקר לגביה מפגר בכ-3 עד 4 שנים אחרי הטכנולוגיות האחרות של תאי דלק. עם זאת, היא נראית מבטיחה ומתאימה ביותר להחליף את הסוללות שמשמשות ציוד נייד, כגון מחשבים נישאים, טלפונים ניידים וכדומה.

### תאי דלק מסוג אשלגן Alkaline Fuel Cells (AFC)

טכנולוגיה זו היא מהראשונות שפותחו בתחום זה ונעשה בהם שימוש בתוכנית החלל האמריקאית. תמיסת אשלגן בתוך מים מהווה את האלקטרוליט, וכזרז יכולות לשמש גם מתכות לא אצילות. תאי דלק אלו הם בעלי טמפרטורת עבודה נמוכה יחסית (23-100 מעלות צלסיוס), ולהם ביצועים מעולים כתוצאה משיעור התגובה הכימית בתהליך. צפיפות האנרגיה שלהם ליחידת משקל גבוהה יחסית, והם מגיעים ליעילות של כ-60%.

חסרונם הגדול הוא ברגישות הגבוהה לפחמן דו-חמצני. למעשה, כמות קטנה מאוד של פחמן דו-חמצני באוויר יכולה להשפיע על פעולתם, מה שמחייב שימוש בחמצן טהור. כמו כן, נדרש שהדלק המזין אותם יהיה מימן טהור. הצורך באספקת מימן טהור וחמצן טהור מעלה את מחירם, ומקטין את כדאיותם הטכנו-כלכלית.

### תאי דלק מסוג קרבונט מותך Molten Carbonate (MCFC)

תאי דלק מסוג זה מתוכננים לשימוש בתחנות כוח לייצור חשמל המבוססות על גז טבעי ופחם, וכן ליישומים תעשייתיים וצבאיים. האלקטרוליט בתא זה מורכב מתערובת של קרבונט ומלח בתוך תחמוצת של ליתיום ואלומיניום. תאים אלו פועלים בטמפרטורות גבוהות (650 מעלות צלסיוס ומעלה), והזרזים להזינם בדלק שאינו מימן נקי. כתוצאה מהטמפרטורה הגבוהה מומר הדלק למימן בתוך תא הדלק, בתהליך שנקרא "המרה פנימית" (Internal Reforming). כמו כן, הטכנולוגיה מאפשרת שימוש במתכות לא אצילות כזרז, דבר המפחית את העלויות של המערכת.

תאי דלק אלו מגיעים ליעילות של 60% בהפקת חשמל, אולם טמפרטורת העבודה הגבוהה מאפשרת להשתמש בהם כמיתקן משולב להפקת כוח וחום (קוגנרציה) ולהגדלת היעילות ל-85%. יתרון נוסף של תאים אלו הוא עמידותם הגבוהה יותר בפני זיהומים כגון פחמן דו-חמצני ופחמן חד-חמצני. החיסרון הבולט שלהם הוא העמידות

### טבלה 1: ריכוז מאפיינים של תאי דלק מסוגים שונים

סוג התא	אלקטרוליט	טמפרטורת תהליך (מעלות צלסיוס)	סוג ההמרה של הדלק	יעילות חשמלית של מחזור יחיד (%)	הספק מותקן (קו"ט)	תוצר לוואי
PEM	ממברנה פולימרית	50-150	חיצונית	53-58 (נייד) 35-40 (נייח)	1-250	מים חמים
PAFC	חומצה זרחתית	150-200	חיצונית	37-42	50-1,000 (250 אופייני)	מים חמים
AFC	תמיסת אשלגן	25-100	חיצונית	עד 60	5-100	מים חמים
MCFC	ליתיום קרבונט	600-700	פנימית	45-60	1-2,000 (250 אופייני)	קיסור בלחץ גבוה
SOFC	חומר קרמי קשיח	600-1,000	פנימית	35-70	1-3,000	קיסור בלחץ גבוה

מקורות: IEA Energy Technology Essentials, 2007 - Fuel Cells - <http://www.iea.org/techno/essentials6.pdf> ("Stationary Fuel Cells"; Cogeneration and On-site Power Production, 2005 - <http://www.powergenworldwide.com/index/cospphome.html>); (DOE, 2008 - Hydrogen fuel cell)

### שימושים של תאי דלק

#### מקורות כוח נייחים

אלו הם תאי דלק המפיקים אנרגיה בעוצמה של ואטים בודדים, והם מיועדים לשימושים כגון מקור כוח למחנאות או לכלי רכב, וכן מקור כוח למוצרי חשמל ניידים כגון מחשבים ניידים וטלפונים ניידים. הם חלק בלתי-נפרד מהמכשיר האלקטרוני, אך בעלי מיכל דלק שניתן להחלפה.

תאי דלק המבוססים על טכנולוגיית DMFC או טכנולוגית PEM מתאימים למרבית השימושים הללו.

#### מקורות כוח נייחים

יישומים של תאי דלק במבנים נוחים יותר מאשר שימוש בתאי דלק בתחבורה. הם יכולים לשמש גם כמקור אספקה וגם כמקור גיבוי חשמלי. מערכות תאי הדלק יכולות להיות אטרקטיביות כאשר הן מייצרות כוח וחום יחדיו. לדוגמה, תא דלק יכול לספק חשמל לתאורה, למכשירי חשמל ולמיזוג אוויר, תוך אספקת אנרגיה תרמית לחימום מים. הטכנולוגיות MCFC, PEMFC, ו-SOFC צפויות להיות מיושמות בבניינים, לרבות שילוב של יישומי קוגנרציה.

המחצבי והובלתו. ניתן לייעל את התהליך באמצעות ניצול של החום הנפלט ושימוש בו לתהליכים אחרים.

### גזיפיקציה של פחם

זו שיטה ישנה יותר להפקת מימן. התהליך מבוסס על חימום של הפחם ל-900 מעלות צלסיוס, עד להפיכתו לגז, וערבובו עם קיטור בנוכחות של קטליזטור להפרדת המימן. בנוסף משוחררים מהתהליך חנקן וגופרית שיש לטפל בהם.

### מימן ממקורות אנרגיה מתחדשים (עבור תהליך האלקטרוליזה)

שילוב מקורות אנרגיה מתחדשים לתהליך ייצור של מימן חשוב מאוד הן בהיבט הסביבתי והן בהיבט של בטחון אספקת אנרגיה. על פי ארגון האנרגיה העולמי, IEA, טכנולוגיית האלקטרוליזה להפקת מימן היא הטובה ביותר, מאחר שהיא הכדאית ביותר כאשר משתמשים במקורות אנרגיה מתחדשים.

### ייצור מימן מביומסה

פסולת חקלאית יכולה לשמש כביומסה להפקת מימן. באמצעות פירוליזה (פירוק כימי של חומר באמצעות חום), וכן באמצעות גזיפיקציה, נוצר גז סינתטי עשיר שניתן להפריד ממנו את המימן באמצעות תהליכים ושיטות תרמיות, הדומות לשיטות פיצול של דלקים מחצביים.

### ייצור מימן באמצעות אנרגיה גרעינית

ייצור מימן באמצעות שימוש באנרגיה גרעינית יבטיח ייצור ללא פליטות, יקטין את התלות בדלקים מחצביים, ויפתח תחום חדש של יישומי אנרגיה גרעינית. ניתן להיעזר באנרגיה הגרעינית לייצור חשמל לתהליכי אלקטרוליזה, ובחום הנפלט בתהליך הגרעיני - כסיוע לתהליך ה-*Steam Reforming* והפרדת מימן מגז טבעי או מדלקים מחצביים אחרים. נוסף על כך קיימות שיטות תרמו-כימיות להפקת מימן ממים באמצעות שימוש בטמפרטורות גבוהות מאוד של התהליך, שאותן ניתן להשיג באמצעות האנרגיה הגרעינית.

### ייצור מימן באמצעות תהליך פוטו-אלקטרוכימי

- ניתן לבצע פיצול של מים באמצעות הארה של מוליך למחצה אשר טבול במים. לשיטה זו 2 סוגי תהליכים:
- שימוש באנרגיה סולארית ליצירת מטען חשמלי אשר גורם לתגובה של פיצול המים.
  - שימוש באלקטרודות עשויות מוליכים למחצה בתוך תא פוטוכימי, להמרה של אור לאנרגיה כימית.

### ייצור מימן באמצעות תהליך ביולוגי ופוטוליטי

ניתן לבצע פיצול של מים באמצעות תהליכים ביולוגיים ופוטוליטיים (פוטוליזה היא התפרקות כימית של חומר בהשפעת אור או קרינה). כמו כן ניתן לייצר מימן בכלים ביולוגיים באמצעות פוטוסינתזה של מיקרו אצה, כלומר, הפקת מימן באמצעות חומר אורגני ומים.

### יתרונות סביבתיים של תאי הדלק

הדאגה הגוברת נוכח השינויים האקלימיים מתבטאת בהגברת הפעולות לצמצום פליטות גזי החממה באמצעות התייעלות אנרגטית והפחתת השימוש בדלקים מחצביים. לפיכך, תאי הדלק הפוכים למבטיחים בשל יעילותם הגבוהה והשפעתם הנמוכה על הסביבה, וימחישו זאת הנתונים הבאים. בעת ייצור של 1 קוט"ש באמצעים קונובציונליים נפלטים כ-700 גרם פחמן דו-חמצני, ואילו באמצעות תאי דלק נפלטים רק כ-190 גרם פחמן דו-חמצני (הפחתה של כ-70% בפליטת  $CO_2$ ). תא דלק בהספק 50 קו"ט המייצר חשמל לבניין פולט - במשך שנה אחת - כ-408,000 ק"ג פחמן דו חמצני פחות מאשר היו נפלטים בתהליך מקביל לייצור חשמל באמצעות פחם.

נוסף על הפחתת הפליטות של גזי חממה יכולים ניצול החום השיויר

תאי דלק נייחים לא בהכרח זקוקים למימן כדלק להזנה, וניתן להשתמש בדלק פחמימיני או בגז טבעי בהמרה פנימית בתא הדלק, כפי שצוין לעיל. לכן, SOFC ו-MCFC מתאימים יותר ליישומים של מבני מגורים המשלבים קוגנרציה, מכיוון שבתאי דלק מסוג זה מתבצעת המרה פנימית של הדלק, במונחים של יעילות חשמלית כמעט ואין הבדלים בין MCFC ל-SOFC.

**איור 3: תא דלק נייח בהספק 250 קו"ט המספק חשמל בסיסי ו-25% מצריכת המים של חלוץ בן 300 חדרים**



מקור: "Stationary Fuel Cells". Cogeneration and On-site Power Production, January-february 2005 - <http://www.powergenworldwide.com/index/cospphome.html>

### ייצור מימן

בשעה שהטכנולוגיות של תאי הדלק מתקדמות והופכות לכדאיות, הן בהיבט הטכני והן בהיבט הכלכלי, קיימת משוכה קריטית אשר מהווה מכשול, והיא היעילות מול הכדאיות הכלכלית והייצור הנקי של המימן. מימן הוא האלמנט הנפוץ ביותר ביקום. אולם מימן טהור ( $H_2$ ), המהווה דלק לתאי הדלק, לא קיים באופן טבעי, וחייבים לחלץ אותו מחומרים עשירים במימן כגון גז טבעי, פחם ומים. לכן, האתגר בנושא זה הוא השימוש באנרגיה לצורכי הפקת מימן. הדרך המקובלת והפשוטה להפקת מימן היא תהליך האלקטרוליזה - העברת זרם חשמלי במים. קיימות טכנולוגיות שונות נוספות להפקת מימן, כגון הפקתו מדלקים מחצביים, ביומסה ועוד, כפי שיתואר להלן.

### הפקת מימן ממים - אלקטרוליזה

תהליך האלקטרוליזה הוא למעשה תהליך של העברת זרם חשמלי במים ופירוקם למימן וחמצן. לשם כך נדרש להשקיע אנרגיה. מערכות אלקטרוליזה תעשייתיות מפיקות 5 טונות מימן בשעה, ויעילותן עומדת על כ-70%-75%. לשם הפקת קילוגרם אחד של מימן צורכת המערכת כ-40-45 קוט"ש.

### מימן מדלקים מחצביים

ניתן להפיק מימן מדלקים מחצביים באמצעות מספר תהליכים. נכון להיום, התהליך הנפוץ ביותר והזול ביותר הוא חילוץ המימן מגז טבעי בתהליך שנקרא *Steam Reformation*. כמו כן, ניתן להפיק מימן גם באמצעות גזיפיקציה של פחם (הפיכת פחם לגז).

### הגבת דלק מימני עם קיטור (Steam Reformation)

תהליך זה מבוסס על שימוש באנרגיה תרמית להפרדת מימן מדלקים עשירים במימן, באמצעות הגבתם עם קיטור בטמפרטורות של 750-850 מעלות צלסיוס על גבי משטח קטליטי. התהליך יעיל יחסית ולא יקר, אך מחירו תלוי מאוד בתנודות של מחיר הגז הטבעי. תהליך זה מייצר פחמן דו-חמצני, הן כתוצר של תהליך ה-*Reforming* והן בעת הפקת הדלק

## סיכום

קיים קושי רב להפוך את תאי הדלק למוצר מסחרי. המכשול העיקרי הוא המחיר, בייחוד מאחר שטכנולוגיות הייצור עדיין אינן בנויות כך שתאפשרנה ייצור המוני של תאי דלק, שכן תאי הדלק מכילים רכיבים יקרים, כגון זרזים ממתכות אצילות. כמו כן, ייצור מימן באמצעות מקורות אנרגיה קונבנציונליים גורע רבים מהיתרונות של תאי הדלק, והוא עדיין מהווה מכשול מרכזי בפני שימוש נרחב בהם. מנגד, לטכנולוגיה של תאי דלק יש פוטנציאל גבוה, וניתן לשער שהם יהוו בעתיד תוספת למערכות החשמל הקונבנציונליות, בייחוד ביישומים של נקודות קצה אצל הצרכן הסופי המשלבות כוח וחום, כגון בבנייני מגורים, בבתי חולים, בבתי אבות, בדיור ציבורי וכדומה, תוך ניצול חום ומים שיוריים לשימושים השונים.

(Heat Recovery) והמים שנפליטים בתהליך האלקטרו-כימי של תאי הדלק לענות על הדרישות התרמיות של המבנה (למשל, ניתן להשתמש בהם כאמצעי חימום של מי צריכה למגורים). שימוש כזה יכול להפחית עוד יותר את כמות גזי החממה הנפליטים, מאחר שתצומצם פעולת חימום של המים באמצעים קונבנציונליים. אולם, מה שעלול להעיב על הנתונים המרשימים הללו הוא פליטות גזי החממה הנוצרים בתהליכי ההפקה של המימן (שתוארו לעיל), עוד לפני הגעתו לתא הדלק. שילוב מקורות מתחדשים (רוח, שמש ואף גרעין) לייצור חשמל לצורכי תהליך האלקטרוליזה יוביל בהכרח להפחתה בפליטות גזי החממה, ובכך יממש את היתרונות הגלומים בשימוש בתאי הדלק.