

דלקים כימיים מן השמש*

ישראל דוסטרובסקי, מכון ויזמן למדע, רחובות

(תרגום ממאמר שהתפרסם ב-91 Dec Sci: Am.)

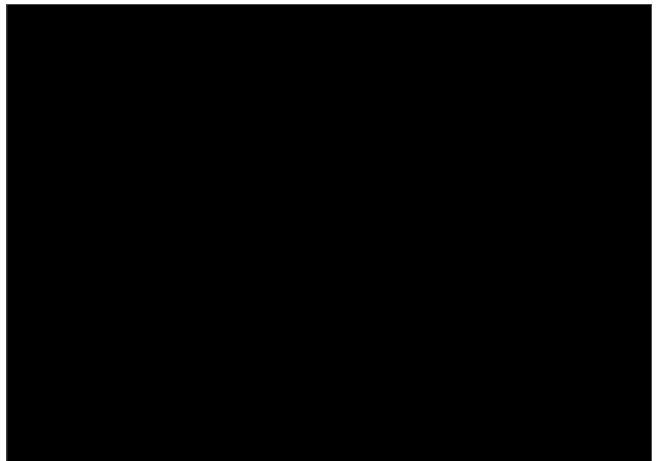
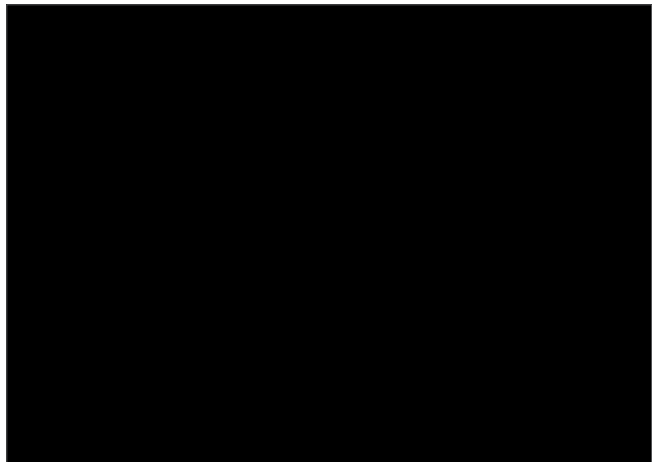
הפקת דלקים כימיים מן האנרגיה המוקרנת אלינו מן הנשמש מספקת מקור אנרגיה שאפשר להעבירו ממקום למקום ולאחסנו, ובכך להתגבר על המגבלות הכרוכות בהמרת האנרגיה מן השמש ישירות לאנרגיה חשמלית.

מסכנת את האקלים על פני כדור הארץ, היות שבזמן שריפת דלק נפלט פחמן דו-חמצני. גאז זה מצטבר באטמוספירה, ועל פי ההשערה המקובלת גורם לחימום פני כדור הארץ, אפקט המכונה *אפקט החממה*. מקור האנרגיה החדש חייב להיות מקור בלתי מתכלה (renewable), ולהיות מצוי בכמויות גדולות במידה שתספק את תצרוכת האנרגיה הגדלה של האנושות, וזאת מבלי לגרום לזיהום הסביבה. כיום ידוע רק מקור אחד העונה על דרישות אלה, והוא *השמש*.

במבט ראשון נראית השמש כפיתרון אידיאלי. כמות האנרגיה המגיעה לפני כדור הארץ בשנה מן השמש היא כ- $3.9 \times 10^{15} \text{ J}$ (10^9 J) היא כמות שוות ערך בקירוב לכמות החום המשתחררת בשריפתם של 22 מיליון טון נפט גולמי. מכיוון שצריכת האנרגיה השנתית הכוללת על פני כדור הארץ היא כ- $3.5 \times 10^{11} \text{ J}$, ניתן לספק את כל האנרגיה הזאת באמצעות ניצול קרינת השמש המגיעה לשטח שגודלו פחות מ-0.1% משטח פני כדור הארץ (בהנחה שניתן לנצל אנרגיה זו ביעילות של 10%). ניתוח מדויק יותר של האפשרויות לניצול האנרגיה מן השמש תוך שימוש בשטחי המדבריות על פני כדור הארץ מגלה שניתן לספק בשנה למעלה מ- $4.5 \times 10^{11} \text{ J}$, אפילו אם נשתמש לשם כך רק בחלק קטן משטחי המדבריות המקבלות את מירב הקרינה.

1. האזורים המשופעים בקרינה מן השמש אינם אלו בהם מרוכזת מרבית האוכלוסיה ושהם צריכת האנרגיה היא הגבוהה ביותר.
2. האנרגיה מן השמש אינה מגיעה אלינו באופן רציף: היא משתנה במשך היום, מיום ליום, ומשנה לשנה. פתרון לבעיות אלה מחייב פיתוח תהליכים לאיסוף האנרגיה המוקרנת מן השמש בקנה מידה גדול, והמרתה

מכיוון שכמות הדלקים המחצביים (פוסיליים) סופית, הכרחי למצוא מקורות חליפיים למקורות האנרגיה המצויים בכדור הארץ. הכרח זה הוא דחוף עוד יותר מכיוון ששריפת הדלקים



מגדל השמש במכון ויצמן למדע ברחובות.
המראות ממקדות את קרינת השמש לחדרי הניסויים
הנמצאים במגדל השמש. החום מקרינה זו משמש להפעלת
ריאקציות ליצירת דלקים כימיים.

* "Chemical Fuels from the Sun" by Israel Dostrovsky.

Translated with permission. Copyright © (1991) by Scientific American, Inc. All rights reserved.
Drawings and photographs are not the same as in the original article in Scientific American.

כמות ממוצעת של קרינת שמש (ביחידות $\frac{W}{m^2}$) הנופלת על משטח אופקי על פני כדור הארץ מתוארת לתקופה של יממה. קרינת השמש מצויה בשפע, ולפיכך בור שהיא יכולה לשמש מקור אנרגיה. כדי שהיא תהווה מקור מעשי יש להמיר את האנרגיה המופקת מקרינת השמש לצורה שניתן להעביר ולאחסן

למרות שהחשמל מהווה אמצעי עיקרי לאספקת אנרגיה, למעשה הוא מהווה כשליש מתיצרוכת האנרגיה העולמית - אין הוא מספק תשובה לכל הבעיות הכרוכות בשימוש האנרגייה מן השמש. לא ניתן לאגור אותו בנוחות, והעברתו למרחקים ארוכים מהווה בעיה בפני עצמה. לפיכך לא די בפיתוח מתקנים המפיקים אנרגייה חשמלית מן השמש, ויש צורך לחפש דרכים אחרות.

המרת האנרגייה מן השמש לאנרגייה כימית פותרת את בעיית האגירה וגם את בעיית ההובלה. ניתן לאגור ולהעביר כימיקלים בצורת גז, נוזל או מוצק, ולהשתמש בהם כדלקים, כאשר החום הנפלט בעת שריפתם ניתן לניצול להנעת מכוניות. קיימים גם כימיקלים בעזרתם אפשר להפיק חשמל ישירות. ייצור דלקים כימיים באמצעות תהליכים המנצלים את האנרגייה מן השמש יוכל לפתור את "משברי האנרגייה" הצפויים ואת בעיית זיהום הסביבה.

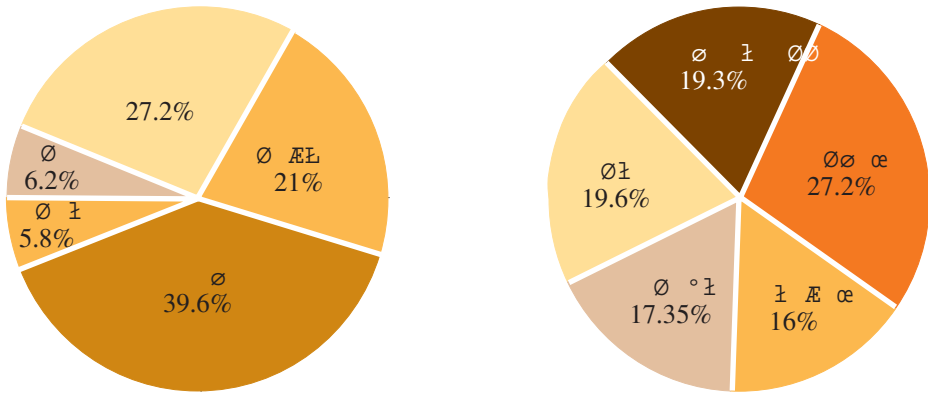
חלק ניכר מהמאמצים המושקעים בהפקת דלקים כימיים תוך ניצול תהליכים המופעלים על ידי האנרגייה מן השמש מתרכזים סביב מימן. זהו גז קל ודליק המתקבל מאלקטרוליזה של מים. ניתן לאחסנו ולהעבירו למרחקים ארוכים. בזמן בעירת המימן נוצרים מים, ולכן אינו מהווה

למקורות אנרגיה הניתנים לאגירה לפרקי זמן ממושכים, ולהעברה למרחקים ארוכים. עדיין לא קיימים פתרונות משביעי רצון מבחינה טכנולוגית וכלכלית להשגת מטרות אלה, והדבר נובע בחלקו מתקציבי המחקר המועטים המוקדשים לנושא זה. לדוגמא, סוכנות האנרגיה הבינלאומית מקדישה יותר מ-60% מתקציבי המחקר שלה לפרויקטים בהם נחקר השימוש באנרגיה גרעינית, ופחות מ-4% לחקר אפשרויות ניצול האנרגייה מן השמש.

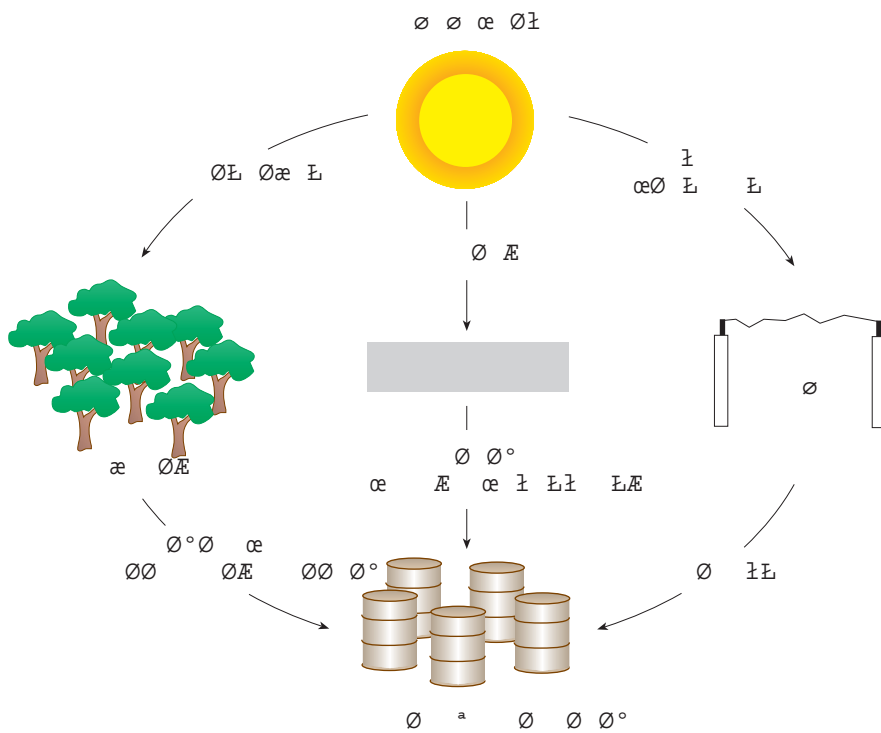
חלק הארי של תקציבי מחקר מוגבלים אלה מתמקדים בהמרת קרינת השמש לאנרגייה חשמלית, בעיקר בשיטות תרמיות ופוטו-וולטאיות. בהמרה פוטו-וולטאית, מתקן מצב מוצק ממיר ישירות את קרינת השמש לאנרגייה חשמלית (תהליך זה מנוצל, לדוגמא, כדי לספק אנרגיה ללוויינים רבים הנעים בחלל). בהמרה תרמית ממירים תחילה את קרינת השמש לחום, באמצעותו מניעים טורבינות וגנרטורים חשמליים. דוגמא טובה ליישום מסוג זה מצוייה בדגט (Daggett) קליפורניה, שם הוקמה תחנה המבוססת על תכנון של חברת "לוז" הישראלית. תחנה זו מפיקה אנרגייה חשמלית בהספק של כ-400 מגה-וואט.

הנצילות הכוללת של הפקת מימן על ידי אלקטרוליזה מחושבת על ידי צירוף הנצילות של הפקת האנרגיה החשמלית מן המקור הבלתי מתכלה הנתון ונצילות תהליך האלקטרוליזה. עבודה רבה הושקעה בשנים האחרונות בשיפור שתי הנצילות. כיום, הנצילות של הפקת אנרגיה חשמלית מסחרית ממקורות סולריים היא בסביבות 12%, וזו של אלקטרוליזה של מים היא בסביבות 70%, כלומר נצילות כוללת של כ- 8%. ככל שמיזמי המחקר יצליחו להשיג

גורם לזיהום הסביבה. אבל רק אם החשמל המשמש להפקת מימן נוצר תוך שימוש במקורות לא פוסיליים כגון קרינת השמש, מים או רוח, ניתן להתייחס למימן כאל דלק "נקי" מבחינה אקולוגית. מערכת מסוג זה מודגמת עתה בערב הסעודית: הפרויקט מכונה "HYSOLAR" ומבוצע תוך שיתוף פעולה בין גרמניה וערב הסעודית. גנרטור פוטו-וולטאי בעל הספק מותקן של 350kW מספק אנרגיה למתקן המפיק מימן על-ידי אלקטרוליזה.



משמאל: החלק היחסי של מקורות האנרגיה הראשוניים בעולם מימין: המטרות העקרויות עבורן משתמשים במקורות אלה. מן התרשים רואים שייצור חשמל מנצל רק כשליש מן המקורות הראשוניים



תרשים סכימתי המתאר את שלוש השיטות בהן ניתן להפיק כימיקלים ודלקים מקרינת השמש

2:1 ו-1:3. מגאז זה ניתן להכין (ע"י סינתזה) מספר גדול של חומרים, ביניהם דלקים נוזליים כמו מתנול או בנזין, וכן מימן נקי.

מקובל לספק את כמות החום הגדולה הדרושה להפקת הגאז על-ידי שריפת חלק ניכר של החומר האורגני עצמו. אם נשתמש בחום מן השמש, תהליך שהוא פשוט למדי, תגדל פי 2 או יותר הנצילות של הפקת הגאז הסינטיטי והחומרים הנגזרים ממנו. הפחמן הדו-חמצני הנפלט בזמן שחומר צמחי נשרף או מותסס אינו נפלט לאטמוספירה, אלא מוכנס לתהליך מחדש. התהליך מחזיר לאטמוספירה חומר שהושאל ממנה זמן קצר קודם לכן.

התהליך של הפקת הגאז ישים לכל חומר המכיל פחמן, ולאז דוקא לביומסה, ולמעשה לכל סוגי הדלקים המחצביים. בשיטות אלו, שריפת הדלקים שהופקו מהגאז הסינטיטי תורמת פחמן דו-חמצני נוסף לאטמוספירה, ועל כן גם לאפקט החממה. אולם גם כאן, אם השמש היא מקור החום לתהליך הפקת הגאז הסינטיטי ועיבודו, מתקבלת כמות יותר מכפולה של חומר גלם, וכמות הפחמן הדו-חמצני הנפלט לאטמוספירה עבור כמות דלק נתונה קטנה לפחות פי שניים.

ישנם מעניין במיוחד של טכנולוגיות דומות מתקבל בקשר לבעיות של איחסון האנרגיה לפרק זמן ארוך והעברה למרחקים של מקורת האנרגיה הנגזרים מן השמש בדרכים חדשניות. בשנות השבעים הציעו ובדקו חוקרים מהמעבדות למחקר גרעיני "K F A" ביוליך שבגרמניה (Kernforschungsanlage Juelich GmbH) שיטה חדשה לגמרי להמרת החום הנפלט מכורים גרעיניים לחומרים כימיים עתירי אנרגיה אותם ניתן לנצל לשימושים תעשייתיים ומסחריים. שיטתם לקחה בחשבון את אותם השיקולים הישימים לאנרגיה מן השמש כיום- כלומר, הצורך להעביר את החום מן המקום בו הוא מופק לצרכנים, והרצון לשרת מגזר רחב יותר של שוק האנרגיה מזה המשתמש באנרגיה חשמלית בלבד.

במקום להשתמש בדלק יחיד - מימן, אותו היו מפיקים בכור הגרעיני ומעבירים לאיזור הנדרש לצורך שריפה, הם חיפשו מערכות כימיות בעלות תגובות הפיכות. מערכת כזו משתמשת בחום רב להפקת חומרים אותם ניתן להעביר לצרכנים. במקום בו מצוי הצרכן, תתבצע התגובה ההפוכה בה נפלט החום, ונוצרים מחדש חומרי התגובה המקוריים.

נצילות גבוהה יותר, תגדל הנטיה להשתמש בשיטת האלקטרוליזה להפקת דלק סולרי. במידה שאפשר לראות אנרגיה חשמלית המופקת בתחנות כוח הידרואלקטריות כצורה (בלתי ישירה) של אנרגיה מן השמש, אפשר לראות את כמויות המימן הגדולות המופקות על-ידי אלקטרוליזה בארצות שונות (בעיקר בנורבגיה ובקנדה) כדוגמא של דלק המופק מאנרגיה הבאה מן השמש. אולם במקרים אלה משמש המימן בתעשייה הכימית כחומר גלם להפקת אמוניה, ולא להפקת אנרגיה.

הבעיות הקשורות בשיפור התהליך של הפקת מימן על-ידי אלקטרוליזה בקנה מידה גדול הביאו לחיפוש אחר דרכים אחרות להפקת מימן, ואף לחיפוש מערכות כימיות אחרות, בלתי תלויות בהפקת אנרגיה חשמלית כתהליך ביניים.

באופן תיאורטי ניתן להפיק מימן ממים פשוט על-ידי חימום המים לטמפרטורות גבוהות. בטמפרטורה שמעל 2000°C , מכילים אדי המים כמות גדולה מאד של מימן. לטמפרטורות אלו לא קשה להגיע על-ידי ריכוז קרני השמש. האתגר בתהליך זה הוא במציאת דרך שתמנע מהמימן והחמצן להתרכב חזרה למים כאשר האדים מתקררים. לכן חייבים להפריד ביניהם כל עוד הטמפרטורה גבוהה. תהליך מסוג זה הוא מסובך לביצוע בטמפרטורות מעל 2000°C , ופיתוחו נמצא עדיין בשלבי מחקר.

רוב המימן בו משתמשים בתעשייה מופק מפחמימנים (נפט, פחם או גאז טבעי), כלומר מקור האנרגיה הוא בדלקים מחצביים (פוסיליים). בתהליכים כאלה אין כמובן עניין רב בהקשר לדייון המובא כאן, כיוון שהם מנצלים מקורות פוסיליים. אולם התמונה משתנה כאשר מביאים בחשבון את הביומסה - שהיא הכינוי הכולל לחומר צמחי, כתחליף לפחמימנים בחלק מן התהליכים האלה. ביומסה נוצרת בעזרת קרינה מן השמש בתהליך הפוטוסינטיזה. אם משתמשים בקרינת השמש כמקור אנרגיה ובביומסה כחומר גלם, מקבלים מערכת בעלת התכונות הדרושות.

שימוש זה של אנרגיה מן השמש מבוסס על העובדה כי כאשר מחממים חומר אורגני (המכיל פחמן) לטמפרטורות של 700-900 מ"צ ללא נוכחות אוויר (חמצן) ובנוכחות קיטור, הוא מתפרק ויוצר תערובת גאזים של מימן ופחמן חד חמצני (CO). גאז זה הוא בעל חום שריפה נמוך, אך חום זה מספיק להפקת קיטור או אנרגיה חשמלית.

תכונה חשובה עוד יותר של גאז זה בהקשר לדייון הנוכחי היא שהרכבו ניתן לשליטה כך שיווצר "גז סינטיטי" (Syngas). גאז זה הוא תערובת מימן ופחמן חד-חמצני ביחסים שבין

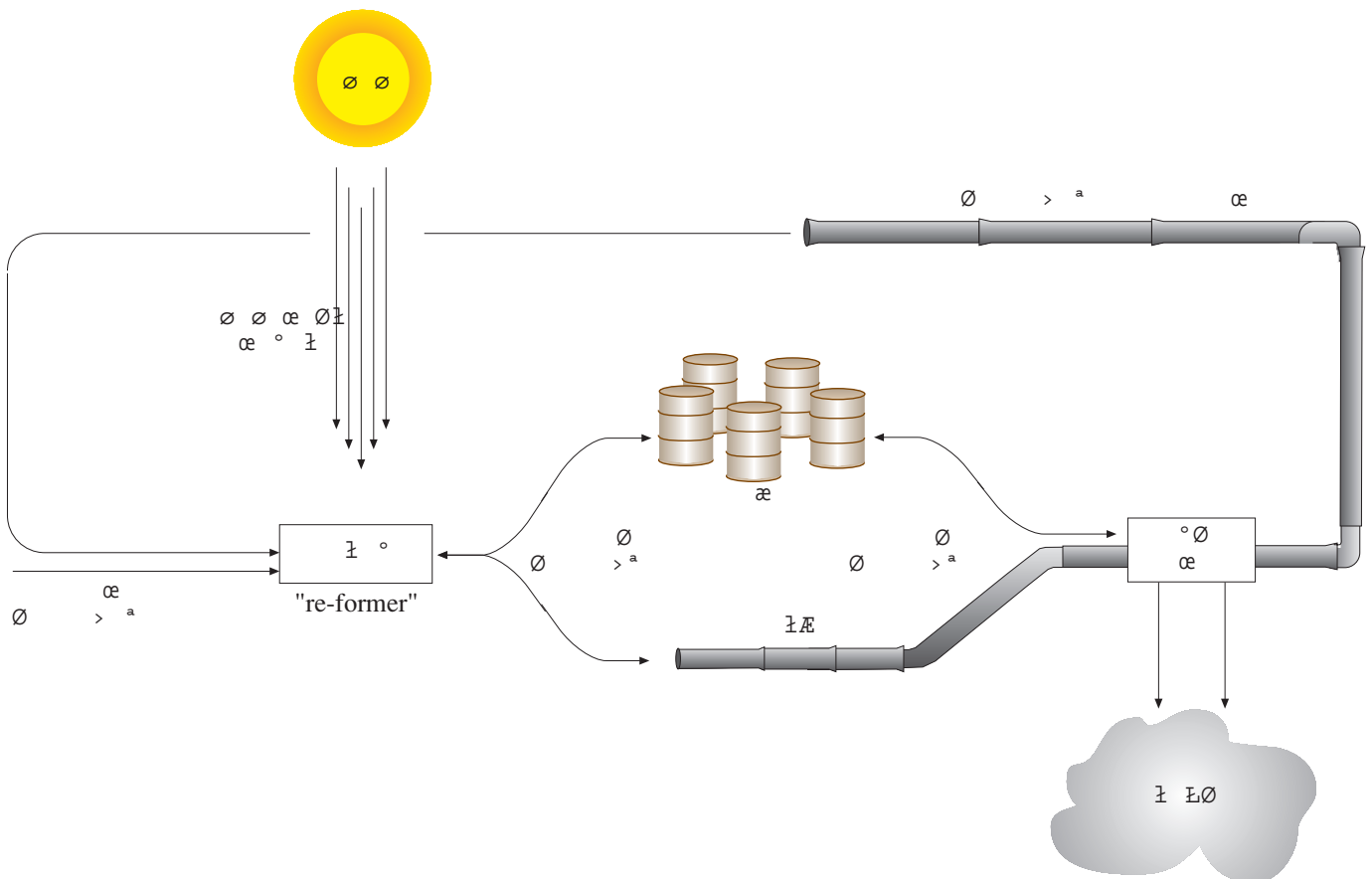
מושג הצינור התרמוכימי כשהוא מבוצע באמצעות אנרגייה הבאה מן השמש, נחקר במכון ויצמן למדע ברחובות וברשות למחקר החלל הגרמנית. משתמשים בתגובות בין מתאן לקיטור ובין מתאן לפחמן דו-חמצני. שתי התגובות מתרחשות בטמפרטורות בין $900-1000^{\circ}\text{C}$ על פני קטליזטורים מוצקים, המכילים בדרך כלל ניקל או רודיום. הטמפרטורות הגבוהות הנדרשות מתקבלות על ידי ריכוז קרני השמש. מכיוון שהתהליך הוא מחזור סגור, אין צריכת חומרים, ואין תוצרי לוואי הנפלטים לאטמוספירה. לתהליך מעלה חשובה בכך ששלושת השלבים שבו:

1. קליטת אנרגייה מן השמש והמרתה לחומרים עתירי אנרגיה המשמשים כמקור אנרגיה,
 2. איחסון מקור זה והובלתו ליעד הנדרש,
 3. השימוש במקור אנרגיה זה להפקת אנרגיה חשמלית, או לחום לתהליך תעשייתי,
- ניתנים לביצוע באתרים נפרדים, כל אחד מהם לפי הצורך. קרינת השמש המרוכזת הדרושה לתהליכים אלה ניתנת

חומרים אלו מוחזרים לכור הגרעיני וחוזר חלילה. תהליך זה כונה בפי המפתחים "צינור החום התרמוכימי".

קיימות מספר מערכות כימיות המתאימות לשמש כצינור תרמוכימי, אך לא כולן נוחות לשימוש במידה שווה. אנשי KFA בחרו בריאקציה היוצרת קיטור ומקובלת בתעשייה הפטרוכימית: מתאן מגיב עם קיטור בטמפרטורות גבוהות בנוכחות קטליזטור ליצירת תערובת של מימן ופחמן חד-חמצני- אותו גז סינטטי שתואר קודם. גז סינטטי זה ניתן לאיחסון בטמפרטורת החדר לפרק זמן בלתי מוגבל, ואפשר להעבירו לצרכן באמצעות צינור.

הצרכן גורם להתרחשות תגובה, שוב באמצעות קטליזטור. בתגובה זו נפלט חום, המשמש את הצרכן, ומתקבלים חזרה חומרי המוצא, המוחזרים לכור הגרעיני. בניסויים ראשוניים בהם השתמשו באנרגייה חשמלית (ולא באנרגיה גרעינית) כמקור החום, התקבל הספק של למעלה מ-10MW. (הצמצום הכללי בפיתוח התעשייה הגרעינית מנע את תהליך הבדיקה בכור.)



השימוש בקרינת שמש להפקת דלקים כימיים אותם ניתן לאגור ולהעביר ממקום למקום. מחממים מתאן ופחמן דו-חמצני (או אדי מים) על-ידי קרינת שמש מרוכזת באופן שנוצרים מימן ופחמן חד-חמצני (שמאל). מעבירים את הגזים שנוצרו למקום בו נדרשת אנרגיה ושם הם מתרכבים שוב תוך פליטת חום ויצירה מחדש של הגזים המקוריים: מתאן ופחמן דו-חמצני (ימין). אפשר עתה שוב להשתמש בגזים המקוריים על מנת לחזור על התהליך.

להשגה באמצעות מראות המסודרות בתצורות שונות:

1. תנור שמש
2. צלחת מרכזת.
3. מגדל שמש.

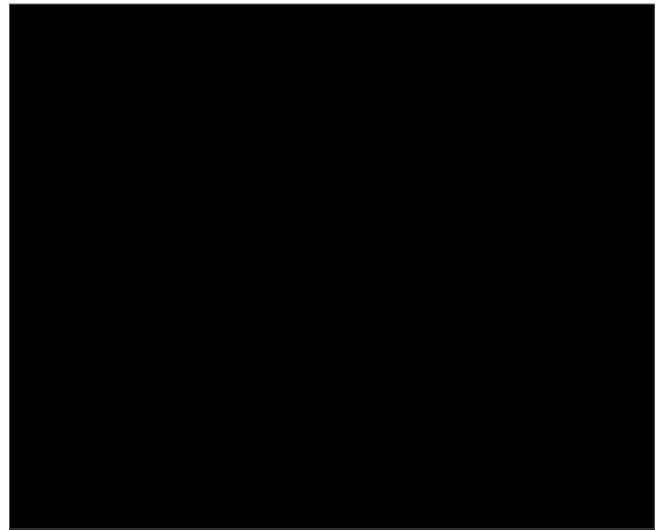
באמצעות קרינת השמש. שיטה זו הופעלה בהצלחה בתנור השמש על שם שפר במכון וייצמן למדע. בגירסה מוגדלת הנמצאת כעת בשלבי בנייה באתר מגדל השמש על שם משפחת קיי יפיקו 400kW!

על מנת להגן על הצינורות בפני חימום יתר, ולהשיג חימום אחיד ומבוקר משתמשים בחומר נוסף המשמש כמחליף חום המצמיד את קרינת השמש לתגובה הכימית. בגישה שפותחה במעבדות הלאומיות סנדיה (Sandia) בניו מקסיקו בארה"ב משתמשים באדי נתרן רותח המחומם על-ידי קרינת שמש מרוכזת. בתוך אדי הנתרן מצויים צינורות התגובה הכימית; תודות לכך נמצאים המגיבים בטמפרטורה קבועה ומבוקרת. ניסויים מוצלחים ראשונים בוצעו בשיתוף פעולה עם מכון ויצמן בתנור השמש על שם שפר.

ניתן להשתמש באוויר המקיף את הצינורות כמעביר חום, כשמזרימים אוויר בשרוולים סביב הצינורות. מתקנים אחדים של מערכת כזאת תוכננו, ונמצאים כעת בשלבי בדיקה בישראל ובספרד.

גישות נוספות לחימום אוויר לטמפרטורות גבוהות באמצעות קרינת השמש פותחו במעבדות שונות: במיוחד בישראל, גרמניה, ספרד וארצות הברית. בשיטות אלה מחממים את האוויר על-ידי הזרמתו על פני משטחים גדולים המחוממים באמצעות קרינת שמש מרוכזת. משטחים אלו יכולים להיות רשתות של חוטי מתכת, קצף קרמי, מבנים קראמיים בצורת כוורת, או תרחיף של חלקיקים. אם רוצים שהפעולה תתבצע תחת לחץ, חייבים להשתמש בחלונות בקצות המתקן. עבור אוויר בלחץ אטמוספירי אין צורך בחלונות, ואז התיכנון הרבה יותר פשוט.

הפרוייקט שתואר כאן הוא בעל חשיבות גדולה. פיתוח מוצלח של התהליכים בהם דנו כאן יביא לידי אספקה של כמות גדולה של אנרגיה נקייה, כל עוד זורחת השמש.



הבחירה בין שלושתן תלויה בכמות ההספק הנדרש: תנור שמש יכול לספק עשרות קיל-וואט חום. צלחת מרכזת יכולה לספק מאות קיל-וואט חום, ובמגדלי שמש אפשר לספק אלפי קילו-וואט חום. מגדלי שמש מסחריים עשויים להגיע להספקים בסדר גודל של מאות מגה-וואט. המגדלים הניסיוניים הפועלים כיום מפיקים בין 3 ל 5 מגה-וואט.

צורה אלגנטית של הפעלת התגובה באמצעות אנרגייה מן השמש היא על-ידי הארה ישירה של הקטליזטור על-ידי קרינת שמש מרוכזת. דרך אחת היא להעביר את האור אל תוך הכור הכימי (Re-Former) דרך חלון המונע מגע בין החומר שבתוך הכור הכימי לאטמוספירה. הבעיה העיקרית בדרך זו היא ממדי החלון שיידרש לפעולה בהיקף גדול.

גישה אחרת, הנמנעת משימוש בחלון, אך מהווה דרך פחות ישירה להעברת האנרגייה מן השמש לתערובת המגיבים, היא לסגור את התערובת בצינורות ולחמם אותם מבחוץ