



משרד האנרגיה והמים

שילוב תחליפי נפט מבוססי פסולת במערך

התחבורה בישראל

שלב א': סקר ספרות



מוגש למשרד האנרגיה והמים, מנהלת תחליפי נפט

מכרז 53/12

ספטמבר 2013

כתבו וערכו¹:

פרופ' אופירה אילון

יערה גרינברג

עידן ליבס

גדי רוזנטל

דנה גבאי

מוסד שמואל נאמן
למחקר מתקדם במדע וטכנולוגיה



יועץ לענייני תחבורה - ד"ר ליאוניד טרטקובסקי - טכניון

¹ תודות לרונית גולובטי - חברת צנובר, פרופ' יורם אבנימלך - טכניון, אילן פרוינד - קבוצת וואוליה, ולירון דן.

תוכן עניינים

6	מבוא	1.1
7	תחליפי דלקים לתחבורה שמקורם מפסולות - תקציר מנהלים	1.2
7	רקע	2.1
9	תיאור טכנולוגי	2.2
10	מפת דרכים- הפקת תחליפי דלקים מפסולות	2.2.1
11	טכנולוגיות ביוכימיות	2.2.2
13	טכנולוגיות המרה תרמו-כימיות (פירוק גזי)	2.2.3
19	ניתוח היצע הפסולות בישראל ופוטנציאל הפקת דלקים	2.3
19	היצע הפסולות בישראל ותרחישי הכמויות	2.3.1
20	מקדמי תפוקה ותרחישי הקצאה	2.4
22	פוטנציאל הפקת הדלקים	2.5
27	הגדרות	2.6
28	תחליפי דלקים מפסולת לשימוש בתחבורה	3
28	רקע	3.1
33	ביו-אתנול	3.2
34	ביודיזל	3.3
35	ביוגז (CNG)	3.4
35	ביו-מתנול	3.5
36	דוגמאות לפעילות עולמית היום	3.5.1
37	תקינה	3.5.2
38	מחיר	3.5.3
38	דימתיל אתר (DME)	3.6
39	דוגמאות לפעילות עולמית היום	3.6.1
40	תקינה	3.6.2
40	מחיר	3.6.3
40	מיסוי ורגולציה	3.7
43	טכנולוגיות הפקת דלקים מפסולות	4
43	טכנולוגיות ביוכימיות	4.1
43	עיכול אנאירובי	4.1.1
52	הידרוליזה	4.1.2
60	ייצור ביודיזל מפסולת שמנים ושומנים	4.2
60	רקע	4.2.1
61	היצע פסולת השמנים בישראל	4.2.2
61	טראנסאסטרפיקציה	4.2.3
64	הידרוגנציה	4.2.4
67	עיכול אנאירובי של פסולת שמנים ושומנים	4.2.5
68	רגולציה	4.2.6
70	שימושים בפסולת שמנים משומשים בעולם	4.2.7
71	שימושים בפסולת שמנים משומשים בישראל	4.2.8
71	פוטנציאל, חסמים ואתגרים בשוק הביודיזל מפסולת שמנים בישראל	4.2.9
73	טכנולוגיות המרה תרמו-כימיות (פירוק גזי)	4.3
73	רקע	4.3.1
73	גזיפיקציה	4.3.2
88	פירוליזה	4.3.3
95	פלסמה	4.3.4
98	מדיניות לקידום הטכנולוגיות התרמו-כימיות	4.3.5
99	ניתוח השוואתי בין הטכנולוגיות הפיסיקאליות וניתוח SWOT	4.3.6
102	היצע הפסולות בישראל ופוטנציאל הפקת הדלק מהן	5

102	מבוא	5.1
102	רקע ומטרות	5.1.1
102	מקורות	5.1.2
103	מתודולוגיה והגדרות יסוד	5.2
105	היצע הפסולת בישראל	5.3
105	גבולות הניתוח	5.3.1
106	התפלגות הפסולת	5.3.2
107	ההיצע הכולל של הפסולת	5.3.3
108	פסולת יבשה	5.3.4
109	פסולת רטובה	5.3.5
110	פסולת צמחית	5.3.6
110	זמינות הפסולת לצורך יצור אנרגיה (כולל מדיניות המשרד להגנת הסביבה)	5.3.7
112	הקצאת זרמי הפסולת לטכנולוגיות הנבחרות	5.4
118	מקדמי תפוקה	5.5
119	פוטנציאל הפקת הדלק	5.6
123	ביבליוגרפיה	6
128	נספחים	7
128	נספח א - הפקת ביו-גז מפסולת ועיכול אנאירובי	7.1
129	נספח ב - רשימה של מתקני טכנולוגיות פירוק גזי שפועלים כיום	7.2

רשימת תרשימים

7	תרשים I - חומרי הגלם, הדלקים, התשתיות ומערכות ההנעה האפשריות בעתיד
8	תרשים II - היצע ביו-דלקים בתחבורה על פי חלוקה לדלקים
9	תרשים III - תחזיות ביקוש לביו-דלקים במפת הדרכים של ה-IEA
10	תרשים IV - הפקת דלקים מפסולות: מפת דרכים
14	תרשים V - רכיבי תהליך הגזיפיקציה לדלק
17	תרשים VI - ייצור FAME ו-HDRD: תהליכים ותוצרי לוואי
19	תרשים VII - שלבי הצגת פוטנציאל הפקת ביו-דלקים בישראל
24	תרשים VIII - כמויות מקסימליות של דלקים שניתן להפיק בתרחישים השונים
25	תרשים IX - פוטנציאל הפקת דלקים מפסולות בישראל (אלפי שעט"ן)
28	תרשים 1 - חומרי הגלם, הדלקים, התשתיות ומערכות ההנעה האפשריות בעתיד
29	תרשים 2 - היצע ביו-דלקים בתחבורה על פי חלוקה לדלקים
30	תרשים 3 - תחזיות ביקוש לביו-דלקים במפת הדרכים של ה-IEA
31	תרשים 4 - סטטוס המסחור של טכנולוגיות מרכזיות לייצור ביו-דלקים
32	תרשים 5 - הפקת דלקים מפסולות: מפת דרכים
35	תרשים 6 - הביקוש לגז טבעי מתוך סך הביקושים לאנרגיה לתחבורה
36	תרשים 7 - דרכי ייצור של מתנול
40	תרשים 8 - תהליך הייצור של DME של חברת אוברון
44	תרשים 9 - שלבי העיכול האנאירובי
45	תרשים 10 - מאפייני חומרי הגלם לתהליך העיכול האנאירובי
47	תרשים 11 - ספיגה כימית של CO ₂
48	תרשים 12 - ספיגה כימית של H ₂ S
49	תרשים 13 - קרצוף על ידי מים בלחץ גבוה
50	תרשים 14 - ספיגה באמצעות לחץ
51	תרשים 15 - הפרדה באמצעות ממברנה
54	תרשים 16 - תהליך ייצור אתנול מביומסה של תאית (הידרוליזה כימית)
57	תרשים 17 - סיכום כלכלי של ייצור אתנול מפסולת חקלאית (שאריות תירס) בתהליך הידרוליזה

58	תרשים 18 - אתרי מתקנים לייצור אתנול מתאית
60	תרשים 19 - ייצור FAME ו-HDRD, תהליכים ותוצרי לוואי
62	תרשים 20 - תהליך הטרנסאסטרופיקציה של שמנים ושומנים
64	תרשים 21 - תהליך ההידרוגנציה
74	תרשים 22 - רכיבי תהליך הגזיפיקציה לדלק
76	תרשים 23 - תהליכי שדרוג סינגז לדלקים פחמימניים
77	תרשים 24 - שלוש המשפחות הטכנולוגיות של פישר-טרופס
81	תרשים 25 - מרכיבים של סינגז המיוצר מגזיפיקציה של פחם
90	תרשים 26 - תהליך הפירוליזה המהירה לייצור דלקים פחמימניים
91	תרשים 27 - שדרוג שמן הפירוליזה לתוצרי בנזין ודיזל
94	תרשים 28 - עלויות הקמת מתקן פירוליזה
94	תרשים 29 - עלויות שלב התפעול של מתקן פירוליזה
96	תרשים 30 - תהליך הייצור במתקן פלסמה
103	תרשים 31 - שלבי הצגת פוטנציאל הפקת ביו-דלקים בישראל
106	תרשים 32 - זרמי הפסולת הרלוונטיים לניתוח היצע הפסולת בישראל
107	תרשים 33 - התפלגות הפסולת שיוצרה בישראל לפי סקטורים, שנת 2012, אלפי טון בשנה
107	תרשים 34 - פילוח היצע הפסולת לפי זרמים ראשיים
108	תרשים 35 - התפלגות ההיצע הכולל של זרמי הפסולת היבשים שניתן להפיק מהם דלקים
116	תרשים 36 - תרחיש הקצאה משולב (עיכול אנאירובי, גזיפיקציה וטיפול בשמנים)
117	תרשים 37 - תרחיש גזיפיקציה (גזיפיקציה וטיפול בשמנים)
122	תרשים 38 - פוטנציאל הפקת דלקים מפסולת בישראל - אלפי שעט"ן

רשימת טבלאות

11	טבלה I - טכנולוגיות ניקוי ביוגז מעיכול אנאירובי
18	טבלה II - השוואה בין הטכנולוגיות השונות לייצור דלקים מפסולות
20	טבלה III - מקורות הפסולת (אלפי טון בשנה, 2012)
20	טבלה IV - ריכוז היצע הפסולת הפוטנציאלי לייצור דלק (אלפי טון בשנה)
21	טבלה V - תרחישי הקצאת הפסולת לטכנולוגיות הפקת הדלקים
22	טבלה VI - מקדמי תפוקה
22	טבלה VII - כמות הביודלקים שניתן להפיק בשנה מהפסולת בישראל - ללא מגבלת המשרד
23	טבלה VIII - כמות הביודלקים שניתן להפיק בשנה מהפסולת בישראל - לאחר הטמעת מדיניות מחזור
24	טבלה IX - פוטנציאל השבת הפסולת לדלקים במונחי כמויות דלק ואלפי שעט"ן בשנה
25	טבלה X - השוואה בין הדלקים השונים שניתן לייצר (מבחינת ישימות בישראל) מפסולות
27	טבלה XI - הגדרות ומושגים
34	טבלה 1 - ניתוח SWOT ביו-אתנול וביו-דיזל
37	טבלה 2 - סקירה של מתקנים (קיימים או בהקמה/מוצעים) לייצור ביו-מתנול
39	טבלה 3 - השוואה בין DME לבין דלקים אחרים
41	טבלה 4 - מיסים אפקטיביים ממוצעים על אנרגיה על פי סוג הדלק ושימוש ומיסים אפקטיביים ממוצעים על פחמן דו-חמצני על פי סוג הדלק ושימוש
46	טבלה 5 - הרכב ממוצע של ביוגז
52	טבלה 6 - סיכום חמשת הטכנולוגיות לשדרוג ביוגז ל-CNG
53	טבלה 7 - כמויות תאית, ליגנין ו-hemicellulose בפסולת חקלאית נפוצה
55	טבלה 8 - השוואת החסרונות והיתרונות של הידרוליזה של חומצה מרוכזת והידרוליזה של חומצה מדוללת
56	טבלה 9 - הערכות של תשואות תיאורטיות של חומרי גלם נבחרים
65	טבלה 10 - השוואה בין תכונות ביודיזל, HDRD ו-FAME
66	טבלה 11 - עלויות בניית מפעל / יחידה לייצור HDRD

טבלה 12 - עמדות כמה מיצרני המכונות והמונעים לשימוש בביודיזל 70

טבלה 13 - השוואה בין שתי הטכנולוגיות לייצור ביודיזל משמנים ושומנים 72

טבלה 14 - השוואה בין טיפול תרמי בפסולת עירונית מוצקה לבין טיפול בביומסה ממקור צמחי 79

טבלה 15 - מרכיבים כימיים של חומרי גלם שונים 80

טבלה 16 - סיכום של המזהמים השונים בסינגו מביומסה / פסולת שיש להסיר 81

טבלה 17 - דרישות סינגו עבור ארבעת התהליכים להמרת הגז לדלקים נוזליים 82

טבלה 18 - השוואה בין סוגי מתקני הגזיפיקציה השונים להפקת דלקים נוזליים 83

טבלה 19 - תשומות תעשיית הגזיפיקציה העולמית (מגה-וואט לייצור חשמל או חום) 87

טבלה 20 - עלויות הון לייצור אתנול מפסולת עירונית מוצקה וביומסה 88

טבלה 21 - תוצרים (Yield) מתהליך פירוליזה ו-Hydrotreating/Hydrocracking של תאית (יחידות: אחוז משקל) 92

טבלה 22 - תרכובת טיפוסית של הגז הסינטטי הנוצר בתהליך פלסמה (תלוי בסוג הפסולת הנכנסת לתהליך) 97

טבלה 23 - השוואה בין שלושת הטכנולוגיות לטיפול תרמי בפסולת 100

טבלה 24 - מקורות המידע לכמויות הפסולת בישראל בשנת 2012 102

טבלה 25 - מקורות הפסולת (אלפי טון בשנה, 2012) 107

טבלה 26 - התפלגות הפסולת היבשה לפי מקורות ותתי זרמים (אלפי טון, כולל פסולת צמחית) 108

טבלה 27 - כמות והתפלגות הפסולת הרטובה המיוצרת בישראל, 2012, אלפי טון בשנה 109

טבלה 28 - כמות והתפלגות הפסולת הרטובה הזמינה להפקת דלקים 110

טבלה 29 - פסולת יבשה ממנה ניתן להפיק דלק (אלפי טון בשנה) 110

טבלה 30 - פסולת רטובה (אלפי טון בשנה) 111

טבלה 31 - פסולת צמחית (אלפי טון בשנה) 111

טבלה 32 - ריכוז היצע הפסולת הפוטנציאלי ליצור דלק (אלפי טון בשנה) 111

טבלה 33 - טבלה מסכמת- הפקת דלקים מפסולת - חומרי גלם, טכנולוגיות, תהליכי שדרוג ותוצרים סופיים 113

טבלה 34 - מקדמי תפוקה 118

טבלה 35 - שיעור החומר היבש בזרמי פסולת שונים 118

טבלה 36 - היצע הפסולות לדלקים בשני תרחישי כמויות של פסולת מוצקה יבשה 119

טבלה 37 - היצע פסולות רטובות לדלקים בשני תרחישי הכמויות 119

טבלה 38 - כמות הדלקים שניתן להפיק בשנה מהפסולות בישראל, ללא מגבלת המשרד 120

טבלה 39 - כמות הביודלקים שניתן להפיק בשנה מהפסולות בישראל - לאחר הטמעת מדיניות מחזור 121

טבלה 40 - פוטנציאל השבת הפסולות לדלקים במונחי כמויות דלק ושעט"ן בשנה 121

1. מבוא

מערכת התחבורה העולמית מושתתת כיום רובה ככולה, על דלקים מבוססי נפט המוזנים למערכות הנעה המונעות בלעדית ע"י מנוע בעירה פנימית. על רקע הדאגה העולמית מההשפעות הסביבתיות המחרפות של השימוש בדלקים פוסיליים (על בריאות הציבור והסביבה) והצורך להיגמל מהתלות האנרגטית בהם (בעיקר בסקטור התחבורה), מושקעים מאמצעי מחקר על מנת לתת מענה, בין היתר, לשני הכיוונים המשלימים הבאים:

- העמקת המחקר והפיתוח בניהול מערכות תחליפי דלקים ביולוגים או סינטטיים לשימוש בתחבורה
- פיתוח ופריסה מערכות הנעה אלטרנטיביות, יעילות ונקיות יותר (במונחי צריכת דלק ופליטת מזהמים)

במסגרת החלטת ממשלה משנת 2011² בדבר הפעלת תכנית לאומית להפחתת התלות העולמית בנפט, ובהמשך להחלטת ממשלה נוספת משנת 2013³ בנושא הפחתת התלות הישראלית בנפט לתחבורה, מקדמת יחידת המדען הראשי, מחקר מעמיק בשני הכיוונים לעיל.

מסמך זה הינו חלק ממערך דוחות שנועדו לתת מענה לצרכי המחקר הללו והוא מוגש למנהלת תחליפי נפט במשרד האנרגיה, במסגרת מכרז 53/12. על פיו, תעסוק העבודה בשני הנושאים הבאים:

1. טכנולוגיות להפקת דלקים מפסולות
2. מערכות הנעה חשמליות והיברידיות לרכבים

כל נושא נחקר בשני שלבים (להלן שלב א' ו'ב'). הראשון נועד לספק סקירה ספרותית מקיפה על ישימותם של הטכנולוגיות לייצור הדלק ומערכות ההנעה שנבחנו. השלב השני מספק ניתוח כלכלי ראשוני וניתוח מחזור חיים של שימוש בטכנולוגיות ובמערכות ההנעה השונות. נדגיש כי על אף נקודות ההשקה בין שני כיווני המחקר, הנושאים נותחו והוצגו בנפרד.

מסמך זה הינו שלב א' עבור הפרק הראשון הן בטכנולוגיות להפקת דלקים מפסולות.

² מספר 2790 מיום 30.1.2011

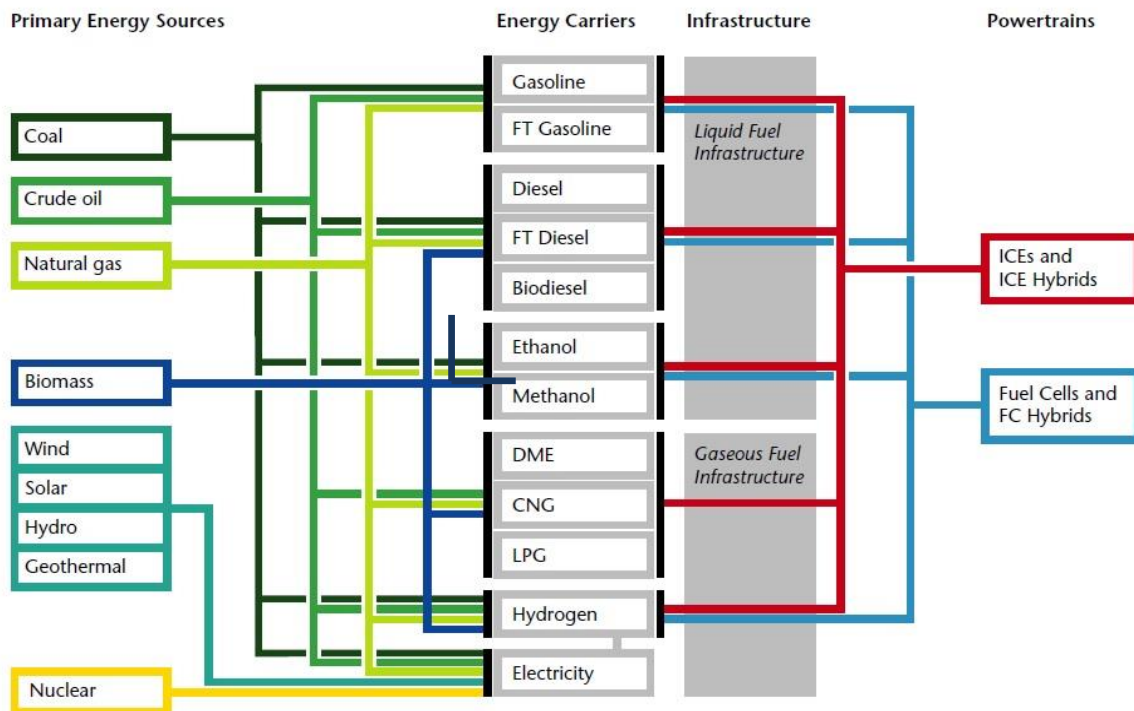
³ מספר 5327 מיום 13.1.2013

2. תחליפי דלקים לתחבורה שמקורם מפסולות - תקציר מנהלים

2.1. רקע

תחליפי הדלקים לתחבורה (בשונה מסקטורי אנרגיה אחרים) מוגבלים, בטווח הבינוני, לדלקים נוזליים או גזיים. בעוד שלמוצרי אנרגיה אחרים (כגון חום או חשמל) יש מקורות מתחדשים חלופיים כגון אנרגיה סולארית, רוח הידרו וכו', לסקטור התחבורה לא צפויות חלופות מתחדשות ליישום בטווח הקצר-בינוני, מלבד טכנולוגיות להמרת ביומסה לדלקים (ראה תרשים I).

תרשים I - חומרי הגלם, הדלקים, התשתיות ומערכות ההנעה האפשריות בעתיד



מקור: SMP (2004)

נזכיר כי ההגדרה אנרגיה מתחדשת בעצמה אינה מובנת מאליה והיא נידונה בקרב קובעי מדיניות בארץ ובעולם. עם זאת נראה כי ישנה הסכמה להפחית את השימוש בביומסה שמגודלת לצורך הפקת דלקים עושה שימוש יקר במים וקרקע (ובכך מתחרה עם ייצור המזון) כחומר גלם להפקת תחליפי דלקים, ולהגדיל את החדרת תחליפי הדלקים מהביומסה הקיימת בשווקים.

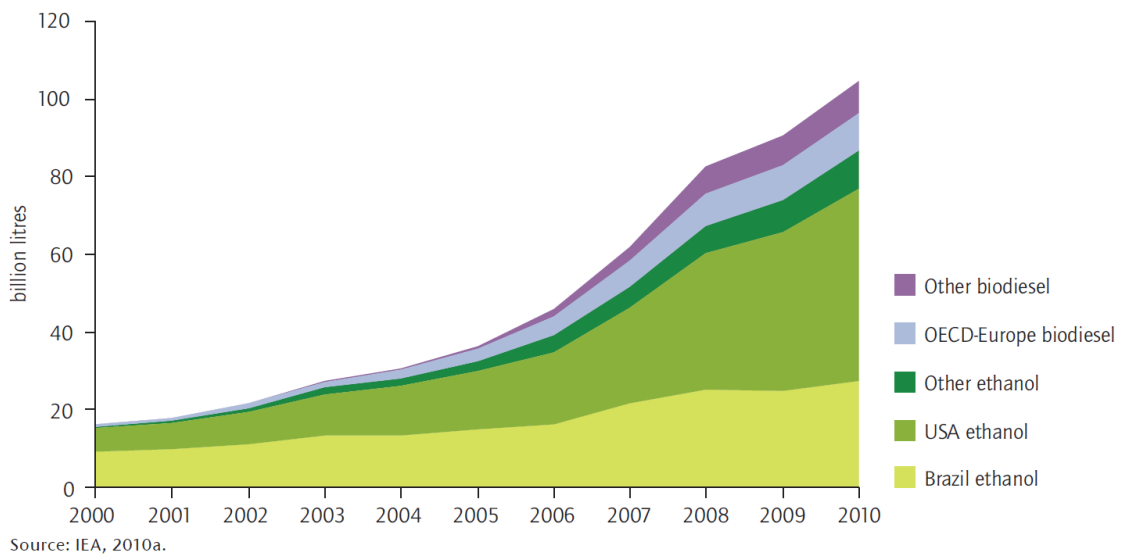
המושג ביומסה מתייחס לקשת רחבה מאוד של חומרים ואיכויות שכן כל חומר אורגני, פריק ביולוגית, שמקורו מהחי או מהצומח נכלל בהגדרה. חומרי הגלם להפקת הדלק נעים מחומר אורגני נקי שהרכבו ידוע (כמו במקרה של גידולים חקלאיים ייעודיים או שאריות פסולת חקלאית נקייה) לבין פסולות ביומסה עירוניות ותעשייתיות שהרכבן אינו ידוע והן מכילות מזהמים וחומרים נוספים (כגון: פסולת תאית של נייר וקרטון מלוכלך, שאריות מזון, פרש בע"ח וכו'). בספרות נהוג לחלק את שתי המשפחות הללו לתחליפי דלקים מסוג ראשון ושני.

ביו-דלקים "דור 1" - הביו-דלקים הקונבנציונאליים נמצאים בשימוש כבר מספר עשורים ומהווים כיום

כ-3% מסך ביקוש הדלקים העולמי (IRENA 2013). הנפוצים הינם האתנול והביודיזל המהווים 80% ו-20% משוק הדלקים הביולוגים, בהתאמה. רובם ככולם של הביו-דלקים המיוצרים והנצרכים כיום, משתייכים לדור 1 כאשר תהליך יצורם עושה שימוש בלא פחות מ-2-3% מהקרקע החקלאית העולמית. הפקת אנרגיה מפסולת מיוצרת כיום בעיקר מפסולת חקלאית - קש, שבבי עץ, שארי עץ ועוד.

כתוצאה מתמריצי מדיניות ברחבי העולם, עלו כמויות הייצור של ביו-דלקים מ-16 מיליארד למעל 100 מיליארד ליטר בין השנים 2000-2010, כאשר ביו-אתנול היווה כ-80% מסך הייצור והיתר ביו-דיזל (IEA 2011). התרשים הבא מציג את ההיצע העולמי (מיליארדי ליטרים) של ביו-דלקים (דור 1 ודור 2) על פי חלוקה לאזורים: ארה"ב, מדינות ה-OECD, ברזיל ושאר העולם.

תרשים II - היצע ביו-דלקים בתחבורה על פי חלוקה לדלקים



מקור: IEA Technology Roadmap Biofuels for Transport (2011)
http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/biofuels_roadmap.pdf

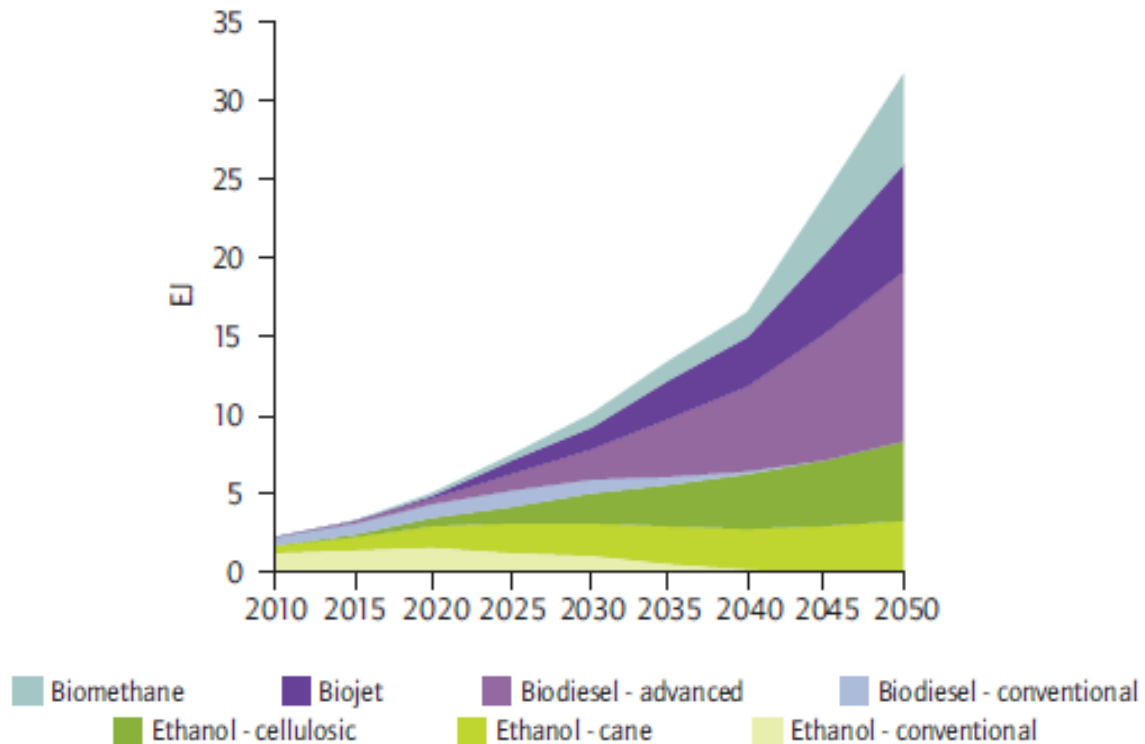
כפי שניתן לראות בתרשים II, לארה"ב נתח שוק מאוד גדול וזאת בעיקר בגלל ייצור האתנול (בעיקר דור 1) בשטחה, גם לברזיל נתח שוק משמעותי וזאת בשל ייצור אתנול מקנה סוכר במדינה (גם כאן מדובר בדור 1). נחזור כי עבודה זו אינה עוסקת בתחליפי דלקים לתחבורה המשתייכים למשפחה זו.

ביו-דלקים "דור 2", לעומת זאת, כוללים דלקים המופקים מפסולות של ביומסה והם יהוו את מוקד הדיון בפרקים הבאים. הם נתפסים ע"י גופי המחקר השונים כיותר "מתחדשים" במובן הזה שהביומסה קיימת בשווקים ולא נדרש להשקיע דשן, מים וקרקע על מנת לגדלם. עם זאת ישנם קשיים אחרים שצריך להתמודד איתם. בעיקר בשווקים בהם הפסולת אינה מופרדת בצורה המאפשרת לשמר את איכותו המקורית של החומר.

ב-2011, רשות האנרגיה העולמית (IEA) הוציאה מפת דרכים לשילוב ביו-דלקים בשוק התחבורה. מטרת המסמך הייתה לזהות טכנולוגיות פוטנציאליות וכן פעולות מרכזיות שעל מקבלי החלטות לבצע על מנת לקדם את חדירת הביו-דלקים לשוק. הדו"ח מציג יעדים מומלצים שיש לעמוד בהם, ומציג את תחזיות

הביקוש העולמי לביו-דלקים (דור 1 ו-2) (ביחידות של Exajoules) עד שנת 2050 אם יעדי מפת הדרכים יאומצו. כפי שניתן לראות בתרשים 10, ההערכות הן כי עד 2050 נתח השוק של ביודיזל (דור 2) יגדל באופן משמעותי. ייצור של אתנול (דור 1) ייפסק לאחר 2040 ותהיה עליה של ייצור אתנול מתאית (cellulosic). כמו כן, התרשים מצביע על כך שאם יילקחו פעולות מרכזיות לקידום חדירת הביו-דלקים, הביו-דלקים המתקדמים (דור 2 והלאה) יתחילו לחדור לשוק בסביבות 2025-2030.

תרשים III - תחזיות ביקוש לביו-דלקים במפת הדרכים של ה- IEA



מקור: IEA Technology Roadmap Biofuels for Transport, 2011, http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/biofuels_roadmap.pdf

ביו-דלקים מתקדמים, כגון אתנול מתאית ודיזל (המיוצר מביומסה, דור שני), נמצאים בשלבים ראשוניים של פיתוח, חלקם בשלב של פיתוח ומחקר וכמה מהם בשלבי הדגמה. כפי שניתן לראות מתרשים III, נכון להיום ולטווח הקצר ביו-דלקים מתקדמים אינם מיוצרים ברמות מסחריות.

2.2 תיאור טכנולוגי

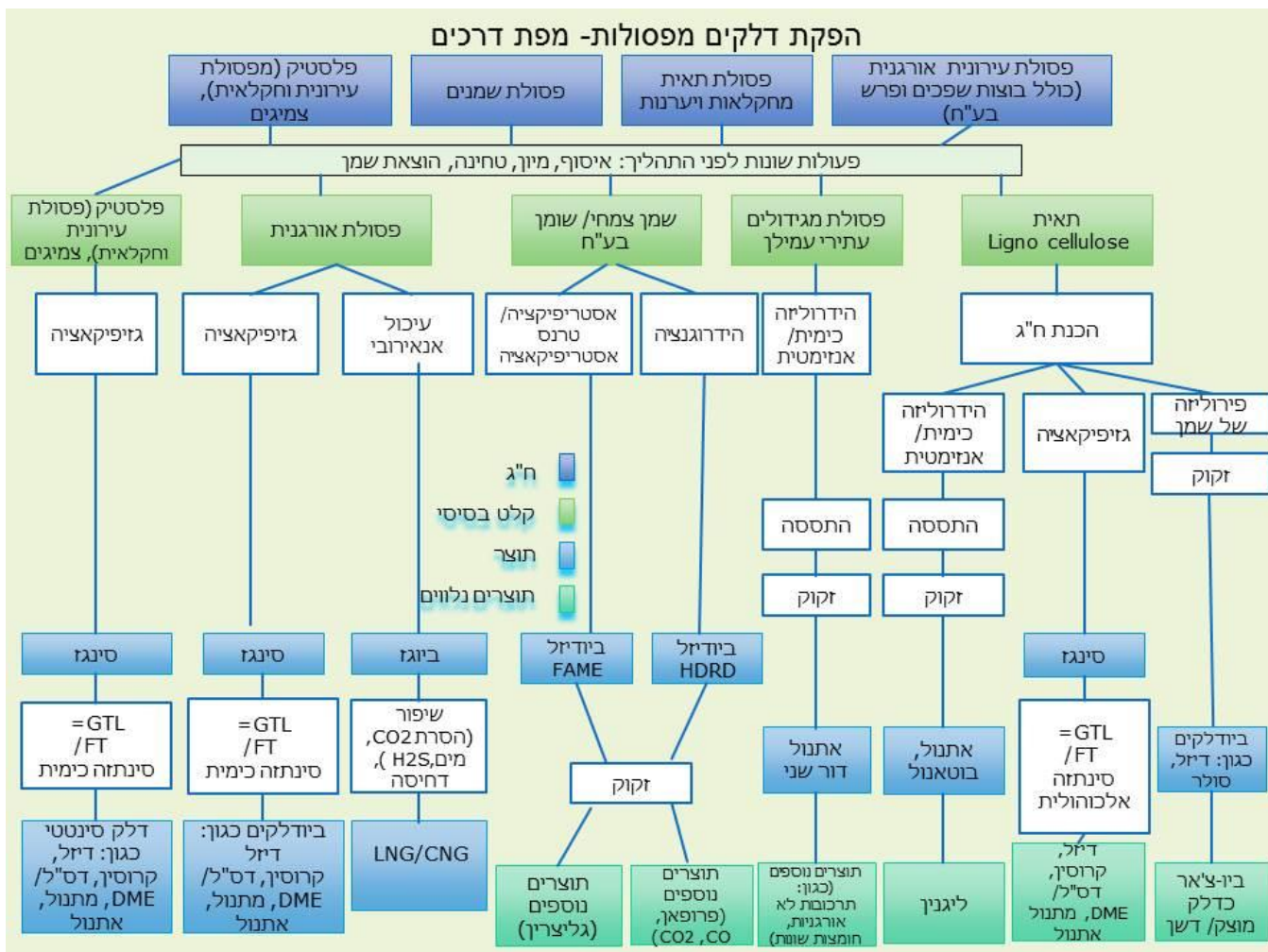
הטכנולוגיות שנסקרו בהרחבה במסמך זה, מחולקות לשלוש משפחות עיקריות:

- משפחת הטכנולוגיות הביו-כימיות: עיכול אנאירובי והידרוליזה
- משפחת הטכנולוגיות התרמו-כימיות: גזיפיקציה, פירוליזה ופלסמה
- משפחת הטכנולוגיות הביו-כימיות המיועדות לטיפול בשמנים: ההידרוגנציה ואסטרטיפיקציה

2.2.1. מפת דרכים - הפקת דלקים מפסולות

ישנם "מסלולים" רבים המשקפים את תהליך ייצור הדלק החל מתת הזרם הקיים (החומר ממנו מפיקים את הדלק, לדוג: קרטון, שמן, פרש בע"ח), הטכנולוגיה אליו הוא מוקצה, תהליך שדרוג תוצר הביניים וכלה בייצור וניקוי הדלק לשימוש בתחבורה. התרשים הבא מציג את מפת הדרכים להפקת דלקים מפסולות:

תרשים IV - הפקת דלקים מפסולות: מפת דרכים



2.2.2. טכנולוגיות ביוכימיות

עיכול אנאירובי

עיכול אנאירובי הוא פירוק ביולוגי של ביומסה ע"י מיקרואורגניזמים, בסביבה נעדרת חמצן שתוצרו ביוגז (50-75% מתאן). התהליך יכול לקרות באופן טבעי במטמנות, ביצות, ובמתקנים ייעודיים, כפתרון לטיפול בפסולת אורגנית רקבובית המשיב אנרגיה. הביוגז שמוצר יכול לשמש ישירות להפקת חשמל/ חום או לעבור תהליכי שדרוג לאיכות של גז טבעי (98% מתאן) באמצעות טכנולוגיות ניקוי, וניתן אח"כ להזינו לתשתית הגז הקיימת, לדחוס אותו ולהשמישו לתחבורה (כדלק CNG). טכנולוגיות הניקוי שנסקרו מתוארות להלן:

טבלה I - טכנולוגיות ניקוי ביוגז מעיכול אנאירובי

טכנולוגיה	עלות שדרוג (€/מ"ק ביוגז)*	שיעור הגז המופק	ריכוז המתאן בגז	יתרונות	חסרונות
ספיגה כימית	0.28	90%	98%	הסרה כמעט מוחלטת של H ₂ S	זרז יקר
קיצוץ ע"י מים בלחץ גבוה	0.15	94%	98%	<ul style="list-style-type: none"> מסיר גזים וחלקיקים שיעורי הפקה ומתאן גבוהים טכניקה יחסית פשוטה נטרול של גזים קורוזיביים 	<ul style="list-style-type: none"> אין ספיגה מוחלטת של המימן הגופריתי בגלל רמת החומציות המשתנה המימן הגופריתי פוגע במתקנים תהליך הדורש הרבה מים
ספיגה באמצעות לחץ	0.26	91%	98%	<ul style="list-style-type: none"> צריכת אנרגיה נמוכה מעט פליטות ספיגה של חנקן וחמצן 	יש צורך בשלב נוסף להסרת המימן הגופריתי
הפרדה קריוגנית	0.40	98%	91%	<ul style="list-style-type: none"> ניתן להפיק כמויות גדולות עם רמת נקיון גבוהה אין שימוש בכימיקלים בתהליך 	דורש הרבה ציוד
הפרדה באמצעות ממברנה	0.22	78%	90%	<ul style="list-style-type: none"> הממברנה קומפקטית ובעלת משקל קל דורש מעט תחזוקה תהליך פשוט 	<ul style="list-style-type: none"> תפוקה נמוכה של מתאן יש צורך בשלב נוסף להסרת המימן הגופריתי הממברנה יקרה

* העלויות כוללות הסרה של מימן גופריתי

ניתן להיווכח מהטבלה כי טכנולוגיית הקיצוץ ע"י מים בלחץ גבוה מועדפת על פני השאר, ביחסי העלות למ"ק ביוגז נכנס לתהליך, ושיעורי הגז והמתאן שהיא מייצרת. הנחת הניתוח (בעת בחינת היעילות האנרגטית והכלכלית של התהליך) היא כי זו תהיה שיטת השדרוג.

השמת הביוגז לתחבורה מייקרת משמעותית את תהליך השבת הביומסה לאנרגיה בתהליך העיכול האנאירובי. זאת משום שהשמתו ל-CNG מצריכה תהליך ניקוי הגז מפד"ח ומזהמים אחרים, שמטרתו לרכז את המתאן לשיעור של כ-98% (רמת גז טבעי). זהו תהליך יקר ומורכב. לפיכך, במרבית מתקני העיכול האנאירובי הפועלים כיום בעולם, מושב הביוגז לאנרגיה בתצורת חשמל ו/או חום.

הזרמים שיוקצו לטכנולוגיה זו, תחת תרחישי ההקצאה שנבחנו, הם: הפסולת האורגנית הרקבובית (מעורבת ומופרדת במקור), פרש בעלי חיים ובוצות שפכים. באופן כללי, ככל שרמת המוצקים יותר גבוהה והימצאות של אלמנטים שאינם פריקים ביולוגית, התהליך יותר מורכב ונדרשת טכנולוגית עיכול יותר מורכבת. חומר גלם נוזלי והומוגני ללא אלמנטים זרים, כגון שפכים ופרש בע"ח, ידרוש טיפול יעיל ופשוט יותר. מלבד הביגוז תוצרי התהליך הינם: בוצה להמשך ייצוב ע"י קומפוסטציה (80%, מתוכם 33% צפויים להיטמן בתהליך הקומפוסטציה) ואיבוד משקל (נידוף וביגוז, 20%).

נכון להיום קיימים כמה מאות מתקני עיכול ברחבי העולם (~260) (IEA,2011), רובם מייצרים חשמל וחום, ורק בודדים מייצרים דלקים לתחבורה.

הידרוליזה

הידרוליזה היא תהליך ביו-כימי שבו מולקולה מתחלקת לשני יונים כשהיא מגיבה עם מולקולת מים. בדרך כלל היא שלב ראשון בתהליך רב-שלבים אשר כולל גם התססה וזיקוק וקיימים שני סיווגים עיקריים שלה: האנזימטית והכימית. תהליכים אלו ידועים כיום ונמצאים בשימוש להפקת אתנול מגידולים ייעודיים כמו תירס (ביודלק דור ראשון). נזכיר כי מסמך זה לא דן במשפחת דלקים אלו.

הידרוליזה של תאית מבוצעת בדרך כלל על ידי אנזימים והתססה מתבצעת על ידי שמרים או חיידקים. התהליך מצריך טיפול מקדים במטרה להסיר את הליגנין ואת ה-hemicellulose, להפחית את הגבישות של התאית ולהגדיל את הנקבוביות של החומר. תהליך הייצור של אתנול מביומסה של תאית כולל טחינה של הביומסה לגודל של מספר מילימטרים, ומעבר לתהליך הידרוליזה במטרה להוציא את הסוכרים להתססה. בשלב זה יכולים להיווצר הידרוליזטים (תוצרי פירוק רעילים), שאם אכן הם נוצרים, יש צורך בשלב נוסף של סילוקם. לאחר מכן ההידרוליזטים עוברים תהליך התססה לאתנול.

להידרוליזה שני חומרי גלם עיקריים לענייננו: פסולות גידולים עתירי עמילן (זרם שכמעט ולא קיים בישראל) ופסולות ביומסה של תאית (lignocellulose). משניהם ניתן להפיק אתנול לשימוש בתחבורה (בעיקר למיחול עם בנזין). ניתן להפיק אתנול גם ע"י גזיפיקציה, וע"י ריאקציה קטליטית של הסינגז המתקבל. האתנול עובר תהליך זיקוק ל-90-95%, ואם מדובר באתנול כדלק לתחבורה, יש צורך לייבש אותו באמצעות מסננות מולקולריות ללפחות 99% על מנת לאפשר את הערבוב שלו עם דלק.

כיום, ברחבי העולם, יש 14 פיילוטס להידרוליזה אנזימטית, תשעה מפעלי הדגמה ו-10 מפעלים מסחריים למחצה שנמצאים בשלבי תכנון או שאמורים להיפתח בקרוב. חמישה מהמפעלים המסחריים למחצה נמצאים בארה"ב ומפעלים נוספים צפויים להיפתח בברזיל, המובילה בעולם את ייצור האתנול מקנה סוכר (דור ראשון). חשוב לציין, כי על פי מדיניות משרד האנרגיה האמריקאי (ה-DOE), לטכנולוגיה זו צפויה התפתחות ניכרת בשוק האמריקאי

2.2.3. טכנולוגיות המרה תרמו-כימיות (פירוק גזי)

הפירוק הגזי הינו הליך תעשייתי של פירוק חומרי דלק ועץ לרכיביהם, על ידי שילוב של חשיפה לטמפרטורה גבוהה, לחץ ושליטה בכמות החמצן או האדים בתהליך. תשומתה של הטכנולוגיה היא דלקים פוסיליים (גז, נפט, פחם), פט-קוק ודלקים נוספים כגון ביומסה ופסולת.

התהליך מתרחש בתנאי היעדר חמצן או חמצן חסר (באמצעות בקרה וצמצום האוויר), בטמפרטורות של כ-1500-400 מעלות צלסיוס (מ"צ). במהלך התהליך מתפרקים הקשרים הכימיים של חומרי הגלם הפחמימניים ומתקבל גז דלקי הנקרא סינגז (SYNGAS). הסינגז הוא תערובת של מימן, פחמן חד חמצני ומעט פחמן דו-חמצני, העשירה באנרגיה זמינה. הערך הקלורי של תוצר הגז הסינטטי שווה לכ-25-40% מזה של גז טבעי. ניתן להשיבו לאנרגיה במגוון אופנים, שהנפוצים מביניהם הם ייצור חשמל וחום. בנוסף, ניתן להשתמש בסינגז כחומר מוצא בריאקציות קטליטיות ולהפיק ממנו אלכוהולים שונים. כבר במהלך מלחמת העולם השנייה נעשה בו שימוש, ע"י הגרמנים, כחומר ביניים בייצור מתנול ודלקים סינתטיים מפחם באמצעות תהליכים הכוללים שילוב של חום ולחץ בנוכחות קטליזטורים בתהליך פישר-טרופס (בכך הופך הסינגז לדלק נוזלי-GTL).

את טכנולוגיות הפירוק הגזי ניתן לסווג על פי דרישות החמצן של התהליכים כאשר הגזיפיקציה והפלסמה מתרחשות בתנאי חמצן חסר והפירוליזה בתנאי היעדר חמצן. להבדיל מעיכול אנאירובי, אין בתהליכי הפירוק הגזי עירוב של חיידקים ומיקרואורגניזמים מפרקים.

מנקודת מבט שוק הפסולת, טכנולוגיות ההמרה התרמית עדיפות על פני שיטות תרמיות אחרות (כגון שריפה ישירה של הפסולת) להשבת פסולת לאנרגיה, הן בשל "ניקיון" היחסי של הטכנולוגיות הללו (בעיקר זיהום אוויר) והן בשל תוצריו המגוונים.

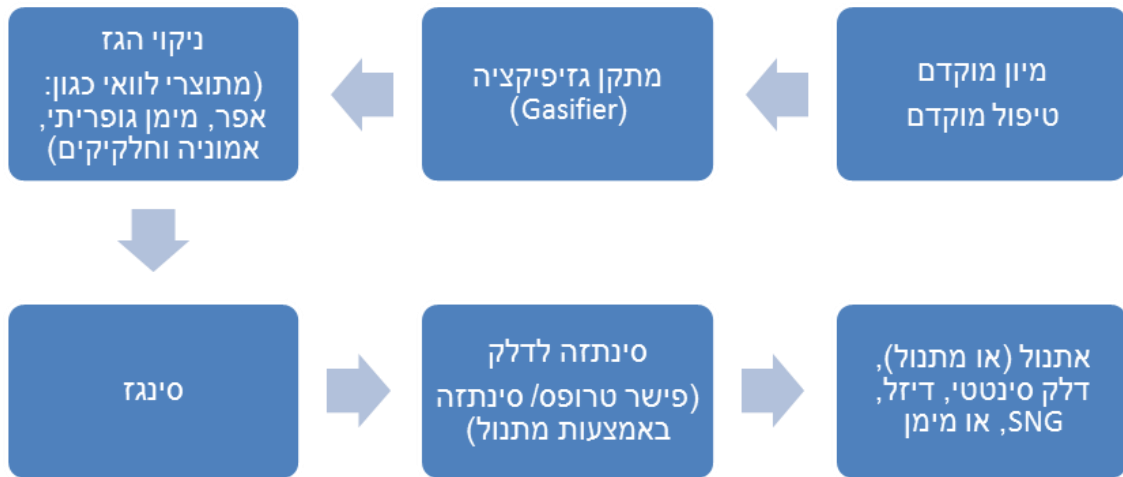
גזיפיקציה

תהליך הגזיפיקציה הוא בעיקרו פירוק תרמי של חומרים אורגניים, בתנאי חמצן חסר וחשיפה לטמפרטורות גבוהות (בין 600-1400 מ"צ), שתוצרו סינגז. התהליך הוא אנדותרמי ומרבית מתקני הגזיפיקציה מספקים לעצמם את האנרגיה הנדרשת בתהליך (בדרי"כ כ-10% מהאנרגיה המיוצרת).

תהליך הגזיפיקציה מסוגל לטפל במגוון רחב של חומרים אך הוא רגיש מאוד להומוגניות של חומר הגלם ולכן מצריך הליך מיון וטיפול מקדים. התשומות האפשריות לתהליך הגזיפיקציה כוללות בין היתר:

- פסולת עירונית מוצקה (MSW) לרבות נייר קרטון, עץ, גומי (כולל צמיגים), וכל סוגי הפלסטיק
- פסולת חקלאית
- פסולת תעשייתית וכאלו מתהליכי זיקוק

תרשים V - רכיבי תהליך הגזיפיקציה לדלק



הסינגז הנוצר מגזיפיקציה של ביומסה ו/או פסולת מכיל מזהמים כמו אבק, זפת (Tar), גופרית, חנקן, תרכובות כלור, שאריות בסיסיות (אלקלי), ומתכות כבדות. למרות שהריכוזים של המזהמים השונים יכולים להיות נמוכים (דבר התלוי בחומר הגלם בו משתמשים), יש להשמיד ולהסיר אותם לפני שמשמשים בסינגז למטרתו הסופית, בין אם מדובר למטרת חשמל או לדלק לתחבורה. הצורך בניקוי גז, ובמיוחד בטכנולוגיה להסרת זפת, ליצור חשמל וחום (combined heat and power – CHP) או למטרת סינתזה, נחשב ל"עקב אכילס" של גזיפיקציה של ביומסה או פסולת⁴. ישנן מספר דרכי שדרוג של סינגז לדלקים פחמימניים לשימוש בתחבורה. נכון להיום ההתמקדות היא בעיקר בשני תהליכים ספציפיים שהם הסינתזה למתנול והפישר-טרופס.

הפקת אנרגיה מדלקים פוסיליים ע"י טכנולוגיית הגזיפיקציה, הינה תהליך מוכר הנמצא בשימוש ברחבי העולם עשרות שנים. עם זאת, יישומה של הטכנולוגיה לטיפול בפסולת עירונית נמצא בראשית הדרך ומתמזה בעיקר ביפן ובגרמניה. השימוש בטכנולוגיה לטובת ייצור דלקים מפסולת, נמצא בראשית דרכו ונכון להיום אין מתקן גזיפיקציה מסחרי בעולם המייצר דלקים פחמימניים. עם זאת, ממחקרים שנעשים בארה"ב יש נתונים ראשוניים על תשומות אפשריות בתהליך הגזיפיקציה. מאפייני הפסולת המוזנת לתהליך, איכותה וסוג הטיפול המקדים (במידה והפסולת מעורבת) הינם מהותיים ליעילות הטכנולוגיה-הן אנרגטית והן סביבתית.

במחקר של המעבדה הלאומית הצפון-מערבית של ארה"ב (Pacific Northwest National Lab, PNNL) משנת 2009, התוצאות הראו כי יכולת ייצור אתנול מביומסה של שבבי עץ היא 50 גלון לטון ח"ג, ומפסולת עירונית מוצקה 28 גלון לטון ח"ג יבש.

Zwart, R. (2009, September 6). Gas cleaning downstream biomass gasification – status report 2009. ECN .⁴
Retrieved June 30, 2013, from www.ecn.nl/docs/library/report/2008/e08078.pdf

פירוליזה

הפירוליזה, המכונה גם תרמוליזה, היא תהליך פירוק תרמי של חומרים בהעדר חמצן (ובטמפרטורות שונות, כפי שיוסבר להלן) לייצור של דלקים דחוסים ולא דחוסים. בתהליך זה מחממים בטמפרטורות גבוהות את הביומסה המתפרקת לגורמים, לאחר מכן עוברים החומרים קירור מיידי (quenching), נוצרים אדים, החומר ממוצה והתוצר הסופי הוא יחסית הומוגני. תהליך זה נחקר בעשורים האחרונים על מנת להבין את התהליך הפיסיקאלי ואת התכונות הכימיות של תוצרי התהליך (דלקים) בו זמנית. התהליך הטכנולוגי עצמו דורש כ-15% מהאנרגיה המופקת לצורך קיומו.

שלושת התוצרים העיקריים של הטכנולוגיה (לפני תהליך השדרוג) הינם:

- זרם גז – 10%-20% (על פי חברת Dynamotive⁵) - מכיל בעיקר מימן, מתאן, פחמן חד חמצני, פחמן דו חמצני וגזים אחרים התלויים בחומר האורגני המוזן למערכת.
- זרם נוזלי – 60%-75% שמן - זרם שומני המורכב מחומצה אצטית, אצטון, מתנול ותרבות פחמניות מחומצנות. באמצעות עיבוד נוסף ניתן לייצר דלק סינתטי שומני. לאחר שמתקבל שמן יציב, הוא עובר תהליך של הפרדה ופיצוח באמצעות מימן (Hydrocracking) כדי לקבל תוצרי בנזין ודיזל.
- זרם מוצק – 15%-20% אפר (Char) - סוג פחם, המכיל פחמן כמעט טהור יחד עם חומרים אינרטיים אשר היו במקור בפסולת המוצקה.

ניתן לסווג את הטכנולוגיה לשלוש תת-טכנולוגיות:

1. פירוליזה איטית - בטמפרטורות נמוכות (כ-300 מ"צ), המיועדת בעיקר לחומרים אורגנים שאינם צורכים חום גבוה. טכנולוגיה המשמשת בעיקר לייצור פחם (Char) וגז.
2. פירוליזה בינונית - בטמפ' בינונית (בין 300 ל-500 מ"צ)
3. פירוליזה מהירה - בטמפ' גבוהות של 500 מ"צ.

סוגי הפסולת אותם מסוגלת הטכנולוגיה להשיב הם:

- ביומסה שמקורה בחומרים מתאית דוגמת שבבי עץ, שאריות חקלאיות (קליפות אורז, קש וכו') ושאריות עצים מיערות – זו התשומה המרכזית בה נעשה שימוש כיום.
- פסולת עירונית שעברה טיפול מקדים של מיון, טחינה וייבוש. נכון להיום, אין ניסיון בקנה מידה גדול וכמעט ואין ספרות על השבת שמן מפסולת מעורבת בתהליך פירוליזה מהירה (Brown et al., 2013).

טכנולוגית הפירוליזה המהירה לדלקים לתחבורה נוסחה בקנה מידה קטן עד כה, ולא באופן מסחרי, והיא נמצאת בשלביה הראשונים. ההתמקדות בפיתוח טכנולוגיה זו באה לידי ביטוי בתנאי התהליך (הזנה, טיפול מקדים, התמודדות עם תוצרי האפר) ופחות בפיתוח תהליך הפירוליזה עצמו.

אחד האתגרים הטכנולוגיים של הפירוליזה טמון בהפרדת המוצקים (האפר) מהנוזל. על מנת לשמור על יציבות השמן ידוע כי יש להפריד את המתכות האלקליות מהאפר מאחר ואלו מהוות קטליזטור

⁵ www.dynamotive.com

לפולימריזציה בין תרכובות המצויות בשמן. נושא זה מהווה אתגר משמעותי ועדיין תרים אחר פתרון להפרדת האפר באופן אפקטיבי שאינו מייקר את תהליך הזיקוק. מאחר והאפר מורכב חלקיקים הקטנים ממיקרון, ניתן להוסיף לתערובת אלכוהול או ממיסים לשיפור יציבות האחסון. חשוב לציין כי התהליך עדיין לא נוסה באופן מסחרי וישנו חשש לגבי הטמפרטורות הגבוהות במיכל. הצורך בתהליך זה הוא מיצוי דלק בעל זמן מדף הדומה לדלקים ואחוזי אפר אפסיים. כמו כן, תוצרי התהליך הינם קורוזיביים (ערך הגבה נמוך, 2-3), בעלי צמיגות גבוהה, נדיפות נמוכה ועדיין אינם יציבים מבחינה תרמית וכימית (Miguel et al., 2012).

על אף שטכנולוגית הפירוליזה ידועה ומוכרת מזה 25 שנה, יישומה מוגבל מאוד וישנו מספר זניח של מתקנים ברחבי העולם (בעיקר באירופה וביפן). הסיבה לכך טמונה במורכבות ועלות התפעול של הטכנולוגיה.

פלסמה

פלסמה ידועה כמצב הצבירה הרביעי, בה גז מיונן הנוצר מפריקה אלקטרונית בטמפרטורות גבוהות במיוחד מוליך זרם חשמלי (ברק הינו דוגמה טובה לתופעה זו בטבע). בתהליך זה חושפים גז דרך קשת חשמלית (שקף של אלקטרונים) אשר מייננים את הגז ומשחררים את האנרגיה שקושרת את האטומים יחד בצורת חום. טמפרטורת הפלסמה מגיעה ל-6,000 מ"צ ביציאתו של הגז מלפיד הפלסמה ויורדת בריבוע עם המרחק, כך שטמפי' התהליך נעה בין 1,500-1,300 מ"צ. טכנולוגיית פלסמה נמצאת ביישומים תעשייתיים שונים דוגמת חיתוך, ריתוך, התזה, מטלורגיה ועוד (בנוסף על ניסיונות הטיפול בפסולות שונות). מאחר ותהליך זה קשור בטמפרטורות גבוהות מאוד, היישום העיקרי בפסולות בא לידי ביטוי בטיפול בפסולת המכילה חומרים רעילים (דוגמת תוצרי לוואי ממערכות לטיהור אוויר - APC), חומרים רדיואקטיביים, פסולת רפואית ועוד). בשנים האחרונות, עקב העלייה במודעות לטיפול בפסולת עירונית מוצקה וחיפוש אחר אלטרנטיבות שונות להטמנה, יחד עם הפוטנציאל האנרגטי של המרכיב האורגני (להבדיל מהערך הקלורי הנמוך של פסולות אנאורגניות), ישנם ניסיונות שונים לפיתוח טכנולוגיית פלסמה לטיפול בפסולת עירונית, כאשר במרבית המקרים מדובר בהפקת חשמל ולא דלק לתחבורה.

טכנולוגיית הפלסמה הינה טכנולוגיה יקרה, אשר משמשת, בעיקר, לטיפול בפסולות מסוכנות ורעילות. כאשר נעשה שימוש בטכנולוגיה זו, ברובם ככולם של המקרים הפסולת מושבת לחשמל.

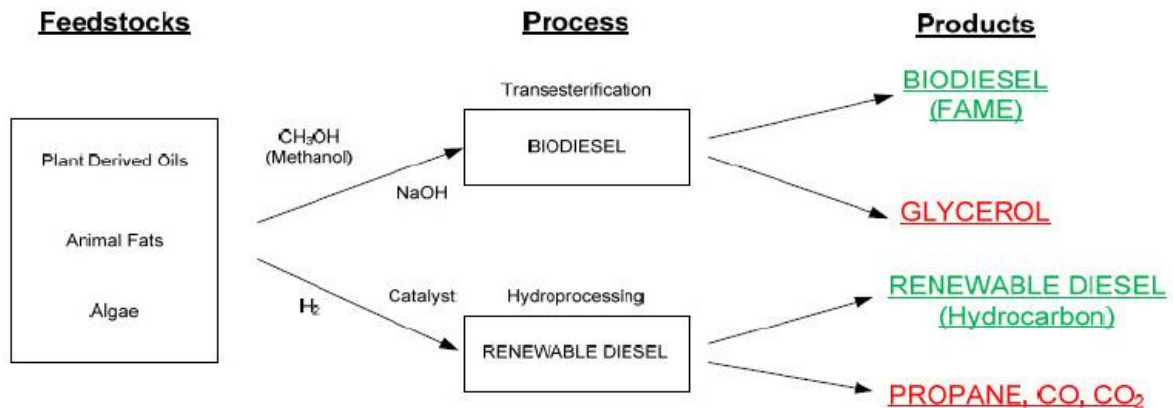
טכנולוגיות להשבת פסולת שמנים לדלקים

קיימים שני תהליכים, שיפורטו בפרק זה להפקת ביודיזל מפסולות שמנים ושומנים. התהליך הנפוץ ביותר לייצור ביודיזל הוא תהליך הטרנסאסטרופיקציה, המתבצע בטמפי' של כ-70-50 מ"צ, ונוצרים בו מתיל אסטרים הידועים בעולם בשם FAME (Fatty Acid Methyl Esters) והוא הביודיזל הנפוץ לשימוש כיום. התהליך השני שיתואר הינו הידרוגנציה שתוצרו ביודיזל HDRD (Hydrogenation-Derived Renewable Diesel).

תוצרי ה-FAME וה-HDRD יכולים להיות מיוצרים מאותם חומרי גלם, כאשר השכיחים ביניהם הם שומן בע"ח ושמנים צמחיים המורכבים מטריגליצרידים. עם זאת, ההרכב הכימי והתכונות הפיזיקאליות של

שני התוצרים שונים, מפאת ההבדלים בתהליכי הייצור. התרשים הבא מציג את שני התהליכים ותוצרי הלוואי. ביודיזל מיוצר ע"י טראנסאסטרופיקציה. בתהליך נוצר גם גליצרול כתוצר לוואי, ו-HDRD מיוצר ע"י הידרוגנציה עם פרופאן, פחמן חד-חמצני, ופחמן דו-חמצני כתוצרי לוואי.

תרשים VI - ייצור FAME ו-HDRD: תהליכים ותוצרי לוואי



מקור: Munoz et al. (2012)

מקורות לייצור ביודיזל מפסולות שומנים מהחי והצומח:

- **שמן בישול משומש - Yellow Grease**
- **שמן ממפרידי שומן - Brown Grease** (היכול להגיע ממספר מקורות – לדוגמה, בורות איסוף במסעדות בבתי מלון – כ-50% שמן, השאר זה מים ומוצקים)
- **בוצה אורגנית - שומנים ושמינים ממתקני טיפול שפכים (כ-30% שמן, 20% מוצקים, 50% מים)**
- **שמן משומן בעלי חיים**

מנתוני מפעלים בקליפורניה (BioCycle, 2009), מ-40,000 גלון של שמן ניתן לייצר 34,000 גלון של ביודיזל (כ-85%) בשיטת הטרנסאסטרופיקציה עם הקטליזטור הבסיסי, כאשר השמנים (חומרי הגלם) מכילים 2-7% חומצות שומן חופשיות ועד 10% מים ומוצקים. איכות הביודיזל המופק מתהליכים אלו נקבע עפ"י איכות חומרי הגלם. ישנן חברות ישראליות המתמחות בפעילות זו.

נכון ל-2012 יש בעולם 6 מתקנים מסחריים לייצור HDRD בהידרוגנציה, עם קיבולת כוללת של 2.5 מיליארד ליטר/שנה. אחד הוא בארה"ב (כאשר בסוף 2012 היה אמור להיכנס לפעולה אחד נוסף), ארבעה באירופה ואחד בדרי' מז' אסיה.

להלן טבלה מסכמת המציגה בתמציתיות את עיקר התהליכים שנסקרו ותוצריהם.

שילוב תחליפי נפט מבוססי פסולת במערך התחבורה בישראל
 עבור המנהלת לקידום תחליפי נפט במשרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים
 שלב א': סקר ספרות

טבלה II - השוואה בין הטכנולוגיות השונות לייצור דלקים מפסולות

טכנולוגיה	גזיפיקציה	פירוליזה	פלסמה	עיכול אנארובי	הידרוליזה (כימית/אנוימטית)	טרנס-אסטריפיקציה	הידרוגנציה
תהליך ייצור	פירוק תרמי המלווה בראקציה כימית של חומרים בסביבה מוגבלת בחמצן בטמפי של כ-800 מ"צ	פירוק תרמו כימי של חומרים בהעדר חמצן בטמפי של כ-350-500 מ"צ	פירוק תרמי ע"י מבער פלסמה בטמפי של כ-1,300-1500 מ"צ (לפיד הפלסמה מגיע עד 8,000 מ"צ)	פירוק ביולוגי של ביומסה ע"י מיקרואורגניזמים, בסביבה נעדרת חמצן	תהליך כימי או ביו-כימי בו מים גורמים לבקוע תרכובת מסוימת בכדי ליצור תרכובות חדשות	תהליך בו קטליזטור בסיסי מאפשר ריאקציה של הוספת אלכוהול לחומצות השומן שבקצה הטריגליצרידים	תהליך חיזור של תרכובות אורגניות לא רווי, ע"י מימן
תשומות	ח"ג מרכזי: תאית (חומר צמחי) או חומרים מבוססי תאית (נייר וקרטון) וכן חומרים סינטטיים בעלי ערך קלורי גבוה (פלסטיק וצמיגים)	ח"ג מרכזי: תאית (חומר צמחי) או חומרים מבוססי תאית (נייר וקרטון) וכן חומרים סינטטיים בעלי ערך קלורי גבוה (פלסטיק וצמיגים)	כמעט כל סוגי הפסולות, לרבות פסולת מסוכנת. הערך האנרגטי הגבוה ביותר מצוי בחומרים האורגניים.	פסולת אורגנית רקבובית, פרש בעלי חיים, בוצות שפכים, פסולת חקלאית וזרמי נייר וקרטון	ח"ג מרכזי: תאית	ח"ג מרכזי: שמנים משומשים ושומנים	ח"ג מרכזי: שמנים משומשים ושומנים
תוצרי התהליך	סינגז (85%). עבור דלקים לתחבורה עובר תהליך הנזלה (פישר-טרופס או תהליכים אחרים הנבחנים כיום)	סינגז (60%-55% משקלית מח"ג יבש של שמן מיוצב. עבור דלקים לתחבורה עובר תהליך שדרוג בסופו מתקבלים 12% משקלית של דלק.	סינגז (60%-70%) ומוצקים אינרטיים (15-20%)	ביוגז (50-75% מתאן). עבור דלקים לתחבורה עובר תהליך שדרוג וניקוי (98% מתאן) להפיכה ל-CNG, כיום מיושם בעיקר בפקיסטן, בוליביה, ארמניה ובנגלדש	אתנול (90-95%). עבור דלקים לתחבורה עובר תהליך שדרוג וייבוש (99% אתנול)	ביודיזל (FAME)	ביודיזל (HDDR)
תוצרי לוואי	מתכות כבדות, גזים חומציים, חומרים אורגניים רעילים, פחמן חד חמצני, דיאוקסין ועוד. להפחתת תוצרי הלוואי ישנן דרכים לאופטימיזציה של תהליך הייצור. בתוצר האפר הנותר (10-20% משקלית) ניתן להשתמש בתעשיות שונות כדשן, תשתיות, ייצור מלט וכ" (הדעות חלוקות לגבי רעילות התוצר).	מתכות כבדות, גזים חומציים, חומרים אורגניים רעילים, פחמן חד חמצני, דיאוקסין ועוד. להפחתת תוצרי הלוואי ישנן דרכים לאופטימיזציה של תהליך הייצור. בתוצר האפר הנותר (כ-25% משקלית) ניתן להשתמש לקיום התהליך.	תוצרי לוואי מעטים. תוצר נקי באופן יחסי.	פד"ח, מימן, מימן גופרתי, אמוניה, סילוקסנים וחומרים נוספים התלויים בתשומות התהליך (פתוגנים וכ"ו). תהליכי הניקוי כוללים תוצרי לוואי נוספים כגון תרכובות מתכתיות (תלוי בסוג טכנולוגית השדרוג).	(הידרוליזה כימית) תרכובות לא אורגניות, חומצות שונות, תרכובות פנוליות ועוד.	גליצרין	גליצרין
יישומים עיקריים	הפקת חשמל	הפקת דלקים לתעשייה במבערים, מנועים, טורבינות	הפקת חשמל	הפקת חשמל וחום	הפקת אתנול לתחבורה	הפקת ביודיזל לחשמל וחום ולתחבורה	הפקת ביודיזל לתחבורה
% אנרגיה הדרושה בתהליך מסך האנרגיה המיוצרת	10%	15%	40% ויותר	תלוי בסוג טכנולוגית השדרוג	-	-	-
יעילות אנרגטית (דוגמאות מספריות משלבי מ"פ)	על כל טון פסולת עירונית מוצקה מתקבל 28 גלון של אתנול. הערך הקלורי של תוצר הסינגז שווה ל-25-40% מזה של הגז הטבעי.	על כל טון ביומסה מיובשת מתקבל 0.12 טון שמן מיוצב	על כל טון חומר גלם, ניתן לקבל 0.3-0.6 טון דלק	תלוי בסוג טכנולוגית השדרוג	הערכה של ה-DOE: מטון פסולת מיערות מתקבל 81.5 גלון של אתנול	על כל גלון חומר גלם, ניתן לקבל כ-0.8 גלון דלק ויותר, בהתאם לאיכות ח"ג	על כל גלון חומר גלם, ניתן לקבל 0.8 גלון דלק

2.3. ניתוח היצע הפסולות בישראל ופוטנציאל הפקת דלקים

הניתוח יתייחס לשלושה צירים שמחד אינם קשורים זה לזה ומאידך אינם יכולים להתקיים בנפרד בכל הקשור להפקת דלקים מפסולות. הראשון, **ציר חומרי הגלם** המפרט למעשה את היצע הפסולת בישראל לפי חתכי מקור, זרמים ראשיים ותתי זרמים. הציר השני, **הטכנולוגי**, מגדיר את התהליכים שפורטו לעיל, והשלישי הוא תוצר **הדלק** האפשרי ו/או המבוקש, תחת תרחישי הכמויות וההקצאות שנבחנו.

2.3.1. היצע הפסולות בישראל ותרחישי הכמויות

פוטנציאל ייצור הדלק מפסולות, יתייחס לזרמי הפסולת המוניציפאלית (ביתית ומסחרית), הפסולת התעשייתית, ופסולת אחרת הכוללת בעיקר צמיגים ובוצות שפכים. פסולות השמנים ינותחו בנפרד.

הצגת הפוטנציאל הישראלי להפקת ביו-דלקים מפסולות תיערך בארבעת השלבים הבאים:

תרשים VII - שלבי הצגת פוטנציאל הפקת ביו-דלקים בישראל



בשלב א', ההיצע יוצג תחת שני תרחישי כמויות פסולת זמינות:

1. מלוא הכמות של הפסולת הזמינה ללא הפנמת מדיניות המשרד להגנת הסביבה בכל הנוגע למחזור והשבה.
2. היצע הפסולות לאחר הפנמת מדיניות של המשרד להגנת הסביבה ביחס לייעודי זרמי הפסולת למחזור. תחת הנחה זו הפסולת הזמינה לייצור דלק היא רק זו שנותרת לאחר שתיושם מדיניות המשרד.

חשוב להעיר כי העבודה לא בוחנת חלופות אנרגטיות אחרות לשימוש בפסולת (חשמל, חום) אלא מתייחסת בהגדרת הפוטנציאל לשני מצבים (עם ובלי מדיניות המיחזור של המשרד להגנת הסביבה) בהם כל הכמות הזמינה של הפסולת מופנית לייצור דלק לתחבורה.

2.3.1.1. היצע הפסולות שנסקרו (גולמי)

טבלה III - מקורות הפסולת (אלפי טון בשנה, 2012)

סה"כ	בוצות שפכים	שמנים צמחיים	צמיגים	חקלאית	תעשייתית	עירונית	יבש
4,125			50	15	1,400	2,660	
960				720		240	
7,030	330	80		4,700		1,920	
12,115	330	80	50	5,435	1,400	4,820	

2.3.1.2. היצע הפסולות הזמינות להפקת דלקים לאחר הטמעת מדיניות המשרד להגנת

הסביבה

טבלה IV - ריכוז היצע הפסולת הפוטנציאלי ליצור דלק (אלפי טון בשנה)

%	עם מגבלות שימוש חלופי	ללא מגבלה	פסולת יבשה
34%	949	2,733	
75%	720	960	פסולת צמחית
50%	3,030	6,070	פסולת רטובה
48%	4,699	9,763	סה"כ

מתוך 12.1 מיליון טון פסולת בשנה בישראל ב-2012, כ-9.8 מיליון טון (81%) יכולים להיות זמינים לשימוש של הפקת אנרגיה לרבות דלק. לאחר מגבלות מחזור ושימוש חלופי נותר היצע של 4.7 מיליון טון בשנה, שהם כמחצית מהפוטנציאל ללא מגבלה.

2.4. מקדמי תפוקה ותרחישי הקצאה

נדגיש כי בשל ראשוניות התהליכים שנסקרו בעבודה זו לעיבוד פסולות כחומרי גלם לדלקים, נמצא קושי לאתר מקדמי תפוקה (פסולת/דלק) לכל תתי הזרמים, בכל אחת מהקומבינציות האפשריות. בנוסף נדגיש כי החלק הארי של המקדמים שכן אותרו בספרות המקצועית, מקורם ביישומי פיילוט ובתנאי מעבדה ולא בהיקף שימוש מסחרי.

טכנולוגיות שונות מסוגלות לטפל בחומרים זהים ולהיפך. מכיוון שכמות הפסולת מוגבלת, נדרש לקבוע מהי הקצאת החומרים המושכלת לבחינת פוטנציאל הטמעת תהליכי ההשבה לדלק. לצורך כך נקבעו תרחישי הקצאה שהוגדרו על פי מסקנותינו מפרקי סקרי הספרות, הניסיון הבינלאומי של הטכנולוגיות, מהימנות המקדמים שנמצאו, וכמות הפסולת הרלוונטית בישראל.

מתוך משפחת הטכנולוגיות הביוכימיות התמקדנו בטכנולוגיית העיכול האנאירובי ומבין המשפחה התרמית, בגזיפיקציה. הסיבות לכך הן:

- CNG, מתנול ו-GTL (תוצר אפשרי של גזיפיקציה של פסולת) נבחרים במסגרת משרד האנרגיה כתחליף דלק לתחבורה (ממקור גז טבעי) ותיתכן השתלבות יעילה של תוצרי הדלק המיוצר מפסולות בתשתיות שיוקמו.
- טכנולוגיית העיכול האנאירובי היא מהמיושמות ביותר מבין הטכנולוגיות שנסקרו (אם כי להשבה לחשמל ו/חום). כך גם טכנולוגיית הגזיפיקציה שהיא בעלת היישום הנרחב ביותר מבין משפחת הטכנולוגיות התרמו-כימיות לטיפול בפסולות (נדגיש כי טיפול בפסולות על ידן, נמצא בצעדיו הראשוניים ומתמקד גם הוא בייצור חשמל ו/או חום).

- לעומת הידרוליזה לאתנול צלולוזי, העיכול האנאירובי והגזיפיקציה מסוגלות לטפל בזרמי פסולת הטרוגניים המכילים שיעור גבוה של מזהמים וחומרים אחרים⁶.

תרחישי ההקצאה:

- **הקצאה משולבת (תרחיש א')** - מניחה התפלגות הפסולת בין טכנולוגיות ביוכימיות לתרמוכימיות: פסולת רטובה תיועד לתהליך עיכול אנאירובי ויתר הזרמים לטכנולוגית גזיפיקציה (ש"יודעת" לטפל בכלל זרמי הפסולת שנבחנו). שילוב זה יאפשר הפקה מקסימאלית של דלק (במונחי שווה ערך טון נפט- שעט"ף), כפי שיוצג בפרק התוצאות.
- **תרחיש גזיפיקציה (תרחיש ב')** - בתרחיש זה כל זרמי הפסולת יופנו לתהליך הגזיפיקציה ממנה מופקים אתנול, מתנול ו-BTL.

בשני התרחישים פסולת השמנים יופנו לטכנולוגיות המיועדות להן: הידרוגנציה ואסטרפיקציה.

טבלה V - תרחישי הקצאת הפסולת לטכנולוגיות הפקת הדלקים

טראנס- אסטרפיקציה	הידרוגנציה	פלסמה	פירוליזה	גזיפיקציה	הידוליזה אנזימטית	עיכול אנאירובי	
שמן צמחי / שומן בע"ח	שמן צמחי / שומן בע"ח	כל תתי הזרמים (להוציא שמנים)	פסולת חקלאית / עירונית	כל תתי הזרמים (להוציא שמנים)	פסולת חקלאית / עירונית	פסולת רטובה אורגנית (עירונית, בוצות ופרש), גזם, קרטון ונייר	אפשרויות הקצאה
	שמן צמחי / שומן בע"ח			יתר תתי הזרמים		פסולת רטובה אורגנית (מכל הסקטורים)	תרחיש א'
				סינגז		ביוגז	תוצר ביניים
	דיזל			אתנול / מתנול / BTL		ביומתאן (באיכות גז טבעי, 98% מתאן)	תוצר סופי
	דיזל			מיהול עם בנזין		גז טבעי	תחליף לפוסילי

⁶ מצבו של שוק הפסולת כיום (לרבות פסולת צמחית) אינו מאפשר כיום מצאי סדיר של ביומסה מעובדת נקייה

2.5. פוטנציאל הפקת הדלקים

להלן טבלת מקדמי התפוקה שישמשו את תחשיב ההיצע תחת תרחישי הכמויות וההקצאה שפורט עליהן. התפוקות מגזיפיקציה הן ליטר אתנול לטון פסולת יבשה⁷ (שיעור החומר היבש משתנה מזרם לזרם), עבור עיכול אנאירובי התפוקות הן במונחי מ"ק ביומתאן (98%) לטון פסולת ועבור השמנים הן גלון ביודיזל לטון שמן.

טבלה VI - מקדמי תפוקה

הזרם	תת זרם	עיכול אנאירובי (מ"ק ביומתאן /98% טון פסולת)	גזיפיקציה (גלון אתנול/טון פסולת יבשה)	הידרוגנציה / טראנאסטרופיקציה (גלון ביודיזל / טון שמן)
יבש	נייר וקרטון	129.62	50	
	פלסטיק		28	
	צמיגים		28	
	חיתולים חד פעמיים		28	
צמחי	גזם עירוני	79.20	50	
	גזם מטעים	79.20	50	
	פסולת חממות	79.20	50	
רטוב	פסולת עירונית רטובה	135	14	
	פרש בקר יבש / פרש לולים	112.48	14	
	טון פרש בקר רטוב	17.50	14	
	בוצות שפכים	12.59	14	
שמנים	שמן צמחי/שומן בע"ח			264

הכפלת כמויות הפסולת שהוצגו לעיל במקדמים תניב את כמויות תחליפי הדלקים המקסימאליות שניתן יהיה להפיק מזרמי הפסולת בישראל תחת שני תרחישי ההקצאה. להלן התוצאה:

טבלה VII - כמות הביודלקים שניתן להפיק בשנה מהפסולות בישראל - ללא מגבלת המשרד

תרחיש גזיפיקציה		תרחיש משולב		תתי זרמים
ביודיזל משמנים (אלפי גלון בשנה)*	אתנול מגזיפיקציה (אלפי גלון בשנה)	ביודיזל משמנים (אלפי גלון בשנה)*	ביומתאן (98% מתאן) (אלפי מ"ק בשנה)	
	1,400			צמיגים
	47,900			נייר
	25,900			קרטון
	28,196			פלסטיק
	6,720			חיתולים חד פעמיים
	12,000			גזם עירוני
	30,000			גזם מטעים
	6,000			גזם אחר
	13,440		129,600	פסולת עירונית רטובה
	26,600		213,712	פרש בקר יבש / לולים
	39,200		49,000	פרש בקר רטוב
	4,620		4,155	בוצות שפכים
21,120		21,120		שמן צמחי / שומן בע"ח
21,120	241,976	21,120	396,467	סה"כ

מהפסולות שנבחנו ניתן לייצר, תחת תרחישי ההקצאה:

⁷ אתנול הוא התוצר היחיד שנמצא עבורו מקדמים להפקת דלקים מפסולות בטכנולוגיות הגזיפיקציה.

- בתרחיש המשולב (עיכול אנאירובי וגזיפיקציה) ניתן להפיק כ-400 מיליון מ"ק ביומתאן (98%), כ-150 מיליון גלון אתנול וכ-21 מיליון גלון ביודיזל (מהשמנים)
- בתרחיש הגזיפיקציה של כלל הפסולות ניתן להפיק למעלה מ-240 מיליון גלון אתנול. בנוסף להפקת אתנול בתהליך גזיפיקציה, ניתן גם להפיק מתנול ודלקים פחמימניים (BTL). הרחבה לגבי תהליכים ותוצרים אלה מופיעה בשלב ב' של עבודה זו, תחת פרק 4 הפקת מתנול, דלקים פחמימניים ואתנול מגזיפיקציה - ניתוח כלכלי. בנוסף, בתרחיש זה ניתן להפיק כ-21 מיליון גלון ביודיזל (מהשמנים).

תחת מגבלת מדיניות המשרד להגנת הסביבה, הכמויות קטנות ומוצגות להלן:

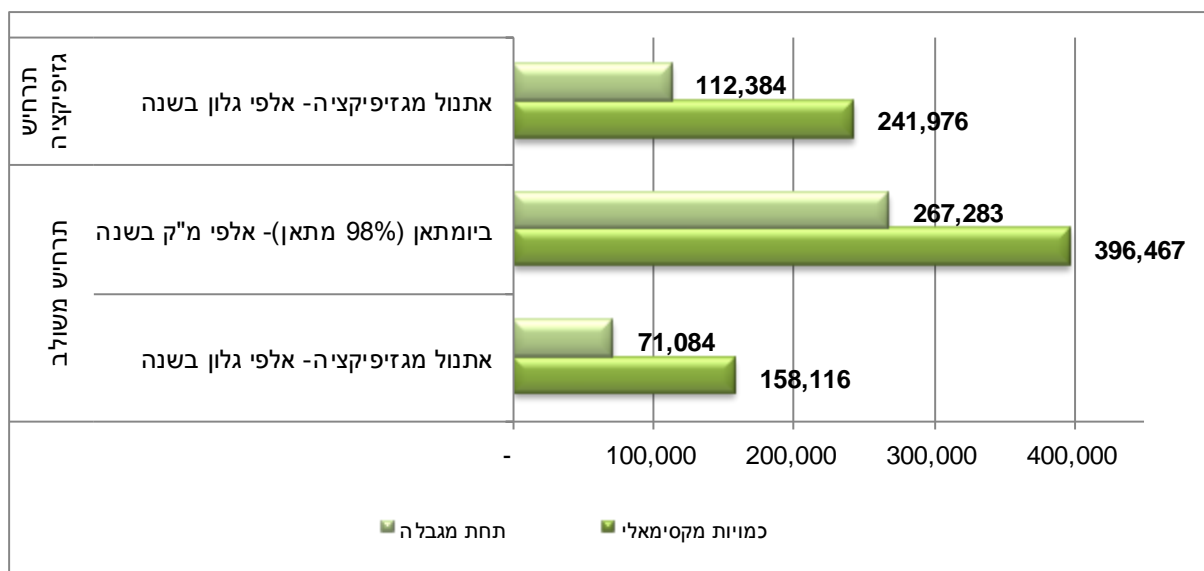
טבלה VIII - כמות הביודלקים שניתן להפיק בשנה מהפסולות בישראל- לאחר הטמעת מדיניות מחזור

תרחיש גזיפיקציה		תרחיש משולב		תרחישי כמויות:	
ביודיזל משמנים (אלפי גלון בשנה)*	אתנול מגזיפיקציה (אלפי גלון בשנה)	ביודיזל משמנים (אלפי גלון בשנה)*	ביומתאן (98% מתאן) (אלפי מ"ק בשנה)	אתנול מגזיפיקציה (אלפי גלון בשנה)	תתי זרמים
	280			280	צמיגים
	9,600			9,600	נייר
	5,200			5,200	קרטון
	11,284			11,284	פלסטיק
	6,720			6,720	חיתולים חד פעמיים
	12,000			12,000	גזם עירוני
	20,000			20,000	גזם מטעים
	6,000			6,000	גזם אחר
	13,440		129,600		פסולת עירונית רטובה
	15,400		12,3728		פרש בקר יבש / פרש לולים
	7,840		9,800		פרש בקר רטוב
	4,620		4,155		בוצות שפכים
21,120		21,120			שמן צמחי / שומן בע"ח
21,120	112,384	21,120	267,283	71,084	סה"כ

- הן בתרחיש המשולב והן בתרחיש הגזיפיקציה- כמות האתנול המקסימאלית המיוצרת בתהליך הגזיפיקציה קטנה לפחות ממחצית הכמות הניתנת לייצור ללא מגבלת מדיניות המחזור. הסתת הזרמים הרטובים לתהליך העיכול יתרום כ-267 מיליון מ"ק ביומתאן להיקפי הייצור, ויפחית בכ-40 מיליון טון את תפוקת האתנול השנתית. בנוסף להפקת אתנול בתהליך גזיפיקציה, ניתן גם להפיק מתנול ודלקים פחמימניים (BTL). הרחבה לגבי תהליכים ותוצרים אלה מופיעה בשלב ב' של עבודה זו, תחת פרק 4 הפקת מתנול, דלקים פחמימניים ואתנול מגזיפיקציה - ניתוח כלכלי.
- כמות הביודיזל המיוצרת משמנים נותרת ללא שינוי.

לסיכום, הכמויות המקסימליות של דלקים שניתן להפיק בתרחישים השונים מוצגים בתרשים להלן:

תרשים VIII - כמויות מקסימליות של דלקים שניתן להפיק בתרחישים השונים



בשני התרחישים מיוצרים כעשרים ואחת מיליון גלון ביודיזל מפסולות השמנים.

הטבלה הבאה מציגה את פוטנציאל השבת הפסולות לדלקים במונחי אלפי שווה ערך טון נפט (שעט"ן):

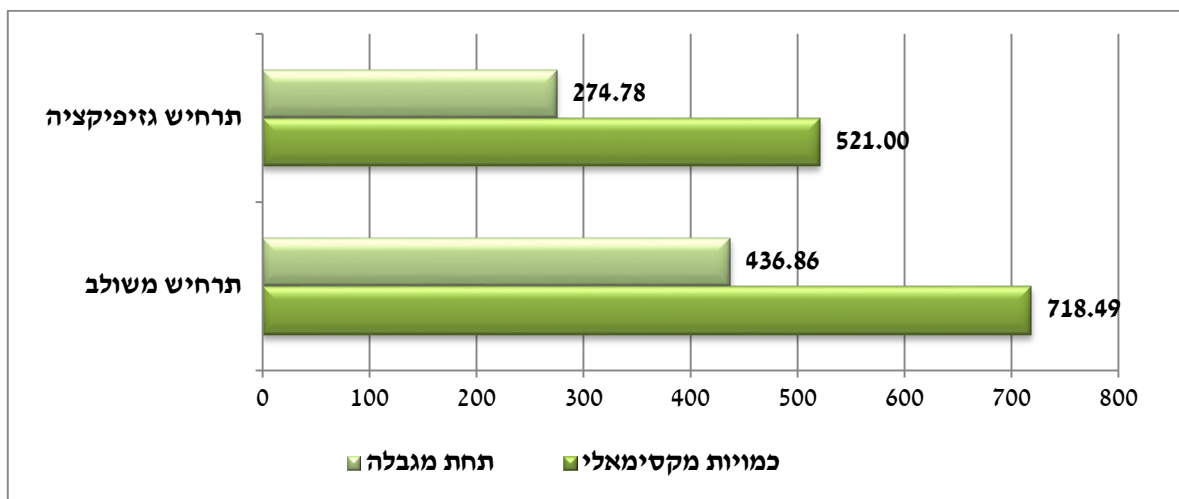
טבלה IX - פוטנציאל השבת הפסולות לדלקים במונחי כמויות דלק ואלפי שעט"ן בשנה

תרחיש גזיפיקציה		תרחיש משולב			כמות מיוצרת	תרחיש כמויות מקסימאלי
ביודיזל	אתנול	ביודיזל	ביומתאן (98%)	אתנול		
21,120	241,976	21,120		158,116	אלפי גלון אתנול בשנה	
			396,467		אלפי מ"ק ביומתאן (98%)	
61	460	61	356	300	אלפי שעט"ן	
521		718			סה"כ אלפי שעט"ן לתחבורה	
21,120	112,384	21,120		71,084	אלפי גלון אתנול בשנה	תרחיש מדיניות המשרד להגנ"ס
			267,283		אלפי מ"ק ביומתאן (98%)	
61	213.5	61	240.6	135	אלפי שעט"ן	
274		437			סה"כ אלפי שעט"ן לתחבורה	
0.0029	0.0019	0.0029	0.0009	0.0019	מקדם שעט"ן לגלון/למ"ק	

כלומר, ללא הגבלות מדיניות טיפול בפסולת בישראל ניתן להפיק 718,000 שעט"ן כדלק לתחבורה מפסולות בתרחיש המשולב ו-521,000 שעט"ן בתרחיש הגזיפיקציה, וזאת מתוך צריכה שנתית של דלק לתחבורה העומדת על כ-5.5 מיליון שעט"ן.

תחת התרחיש בו לא קיימות מגבלות מדיניות טיפול בפסולת ניתן יהיה לייצר כ-13% מהביקושים לדלק לתחבורה כיום. הכמות המקסימאלית מתאפשרת באופן טבעי תחת תרחיש כמויות מקסימאלי ותחת תרחיש ההקצאה המשולב, המיעד לכל טכנולוגיה (מכל אחת מהמשפחות) את זרמי הפסולת האופטימאליים לה (במונחי יעילות אנרגטית). תחת מגבלת מדיניות המחזור פוחתת כמות זו לפחות מחצי מיליון שעט"ן המספקים כ-8% מהביקושים.

תרשים IX - פוטנציאל הפקת דלקים מפסולות בישראל (אלפי שע"ן)



טבלה X - השוואה בין הדלקים השונים שניתן לייצר (מבחינת ישימות בישראל) מפסולות

CNG	אתנול (דור שני)	דיזל (ביודיזל ודיזל סינטטי)	חומרי גלם
פסולת אורגנית רקבובית, פרש בעלי חיים, בוצות שפכים, פסולת חקלאית וזרמי נייר וקרטון, שמנים ושומנים	ח"ג מרכזי: תאית פסולת עירונית וחקלאית	ח"ג מרכזי: שמנים ושומנים משומשים	
עיכול אנארובי	תרמו-כימיות (כגון, גזיפיקציה), הידרוליזה	טרנסאסטרפיקציה, הידרוגנציה	טכנולוגיות / תהליכי המרה
כיום יש מאות מתקנים של עיכול אנארובי ברחבי העולם. מרבית מהמתקנים הם בקנה מידה קטן (ברמת החווה) ומספקים חשמל וחום במתחם עצמו. נכון להיום אין שימוש מסחרי בטכנולוגיה לטובת ייצור CNG למערך התחבורה.	השימוש בטכנולוגית הגזיפיקציה לשם ייצור דלקים, נמצא בראשית דרכו ונכון להיום אין מתקן גזיפיקציה מסחרי בעולם המייצר דלקים מחמימיים. עם זאת, קיימת מדיניות (בעיקר בארה"ב) לעידוד פיתוח הטכנולוגיה לטובת ייצור דלקים. כיום, ברחבי העולם, יש 14 פיילטים להידרוליזה אנזימטית, תשעה מפעלי הדגמה ו-10 מפעלים מסחריים למחצה שנמצאים בשלבי תכנון או שאמורים להיפתח בקרוב.	תהליך הטרנסאסטרפיקציה הוא תהליך ותיק ומקובל בעולם. כיום היישומים העיקריים שלו הם להפקת ביודיזל לחשמל וחום, ולתחבורה. נכון ל-2012 יש בעולם 6 מתקנים מסחריים לייצור ביודיזל בתהליך ההידרוגנציה עם קיבולת משותפת של 2.5 מיליארד ליטר/שנה.	ישימות בעולם
פסולת ירוקה (גזם) - 79.2 מ"ק/טון פסולת פסולת מזון - 135 מ"ק/טון פסולת בוצות מט"ש - 12.59 מ"ק/טון פסולת פרש פרות (יבש) - 112.48 מ"ק/טון פסולת פרש פרות (רטוב) - 17.5 מ"ק/טון פסולת פסולת נייר - 129.62 מ"ק/טון פסולת	דוגמאות: גזיפיקציה - על כל טון פסולת עירונית מוצקה מתקבל 28 גלון של אתנול. הידרוליזה (הערכה תיאורטית) - על כל טון פסולת מיערות מתקבל 81.5 גלון של אתנול.	על כל טון שמן, מתקבל כ-0.85 טון דלק	מדדי תשומה / תפוקה
תרחיש משולב: 396,467 אלפי מ"ק בשנה	תרחיש משולב: 158,116 אלפי גלון בשנה תרחיש גזיפיקציה: 241,976 אלפי גלון בשנה	21,120 אלפי גלון בשנה	היצע הפסולות - מקסימום יכולת הייצור בישראל

כמובן שאין בתחשיבים שנעשו די על מנת לעודד את ישומן של הטכנולוגיות הללו בארץ (לצורך הפקת דלקים מפסולות). טרם הטמעתן (אם בכלל) נדרשת בחינה מעמיקה של הכדאיות הכלכלית והסביבתית של הטמעת תהליכים אלו בישראל.

חשוב לזכור כי בחינת היצע הביו-דלקים מהדור השני אינו אלא אומדן ראשוני. אי הוודאות בשוק הפסולת הינה בשיאה. שינויי רגולציה אינטנסיביים שינו את מערך היתרונות והחסרונות היחסיים של הפתרונות לטיפול בפסולת ומכוונים ליעדים אחרים. זאת בנוסף לאי הוודאות על הצלחתם של התהליכים והעלויות הכרוכות בכך ברחבי העולם.

תחזיות ה-IEA לא מנבאות לתחום קידום משמעותי בעשרות השנים הקרובות. מחקריהם מבחינים בין שלוש קבוצות של טכנולוגיות אנרגיה המתחדשת:

1. טכנולוגיות בוגרות אשר מיושמות בעולם ביניהן: PV, רוח, הידרו, ביומסה (לחום ו/או חשמל) וצפויה התקדמות בישומן וביעילותן בשוקים בשנים הקרובות.
2. טכנולוגיות שנדרש עוד מאמץ לקידומן. ביניהן: מכונות חשמליות, FUEL ECONOMY
3. טכנולוגיות שאינן במסלול המועיד אותן ליישום משמעותי בשוקים. ביניהן: **ביודלקים לתחבורה**, אנרגיה גרעינית, מגדלי שמש, לכידת פחמן ובנייה.

2.6. הגדרות

תחום האנרגיות המתחדשות בכלל ותחליפי דלקים לתחבורה בפרט, מהווים כיום מוקדי תשומת לב ופעילות מחקרית וחיקיקתית שוטפת. הגופים שמובילים את המחקר העולמי בתחום, הן באקדמיה והן בגופים ממשלתיים יצרו מערכת מינוחים והגדרות הנובעת מתפיסת עולמם והדירקטיבה המוצעת. ולכן, לא פעם נמצאו בספרות הגדרות ומינוחים זהים/שונים עם משמעויות שונות/זהות בין הגופים השונים. ההגדרות שיוצגו להלן מקורם במסמכי מדיניות של האיחוד האירופי⁸ וארגון האנרגיה העולמי (IEA)⁹. אם כי נדגיש כי גם בין גופים אלו נמצא שוני דווקא בהגדרה הבסיסית של המושג ביומסה ואנרגיות מתחדשות. על מנת לייצר מסגרת ניתוח ודיון אחידה, נאמץ במסגרת העבודה את ההגדרות הבאות:

טבלה XI - הגדרות ומושגים

דלקים לתחבורה שמקורם מביומסה.	ביו-דלק	Biofuels
תוצר גזי של תהליך עיכול אנאירובי של חומרים פריקים ביולוגית. הגז מכיל בעיקר מתאן ופחמן דו חמצני, בשיעורים המשתנים בהתאם לתשומת התהליך.	ביוגז	Biogas
דלק נוזלי, שמקורו בביומסה, המשמש למטרה אחרת מלבד תחבורה (חשמל, חימום, קירור).		Bioliquid
חומר אורגני, פריק ביולוגית, שמקורו מהחי או מהצומח. (לרבות פסולת עירונית אורגנית, פסולת צמחית, בוצת ביוב, פרש בע"ח, פגרי בע"ח וכד').	ביומסה	Biomass
המונח BTL מתייחס לדלקים נוזליים המיוצרים מביומסה.		BTL- Biomass to Liquid
גז טבעי לשימוש בתחבורה מוכר בצורתו הדחוסה כ-CNG. לענייננו דחיסת ביוגז שעבר מתאניזציה הוא CNG.	גז טבעי דחוס	CNG- Compressed Natural Gas
"דור 1" יתייחס לשימוש בגידולי-מאכל חקלאיים להפקת ביו-דיזל משמן צמחי ו/או אתנול מסוכרים או עמילנים, (דוגמאות: תירס, קנולה, קנה סוכר). "דור 1.5" יתייחס להפקת ביו-דיזל משמן צמחי של גידולים לא-אכילים (דוגמאות: קיקיון, ג'טרופה), דלקים אלה אינם נסקרים במסגרת עבודה זו. שם כולל למגוון טכנולוגיות אשר במהלכן מומרים גזים פחמימניים לדלק סינטטי נוזלי.	תחליפי דלקים דור ראשון	First Generation Fuels
		GTL- Gas to Liquid
גז טבעי לשימוש בתחבורה שעבר הנזלה.	גז טבעי מונזל	LNG-Liquid natural gas
פסולת מוניציפאלית, בד"כ מעורבת במקור וניתנת למיון והפרדה במתקנים ייעודיים ע"מ להפריד את הפסולת המוצקה למחזור, הפקת אנרגיה או הטמנה.	פסולת עירונית מוצקה	MSW - Municipal Solid Waste
"דור 2" יתייחס להפקת אתנול וביודיזל ודלקים פוטנציאליים אחרים, מפסולת צללוזה צמחית (המופקת מפסולת חקלאית, עירונית ותעשייתית) ופסולות שמנים.	תחליפי דלקים דור שני	Second Generation
ביומסה שעברה עיבוד (כימי ו/או פיסיקלי) אך טרם הפכה לפסולת, כגון: גזם, פסולת חקלאית קרטון, נייר וכו'.	ביומסה מעובדת	Secondary biomass
פסולת שהופרדה לזרם "רטוב" ו"יבש", עפ"י מדיניות המשרד להגנת הסביבה.	פסולת מופרדת במקור	Source Separated MSW
תערובת של מימן, פחמן חד חמצני ומעט פחמן דו-חמצני המיוצר מחומרי גלם פחמימניים לרבות ביומסה. הסינגז מהווה תוצר ביניים בייצור תחליפי דלקים ביולוגי ו/או סינטטי (כמו גם תחליפי דלקים מדלקים פוסילים כגון גז טבעי ופחם). כמו כן, ניתן להשתמש בסינגז כחומר מוצא בריאקציות קטליטיות ולהפיק ממנו אלכוהולים שונים.	סינגז	Syngas
הערה: נדגיש כי סינגז יכול להיווצר בתהליך הגזיפיקציה גם מפסולת ביומסה רקבובית ולא רק מפסולת סינטטית כפי שחלק מהמקורות והמומחים מגדירים.		
דלק שמקורו בחומר סינטטי שאינו פריק ביולוגית (לענייננו: צמיגים ופלסטיק) או מגז טבעי.	דלק סינטטי	Synthetic Fuel

⁸ <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:EN:PDF>

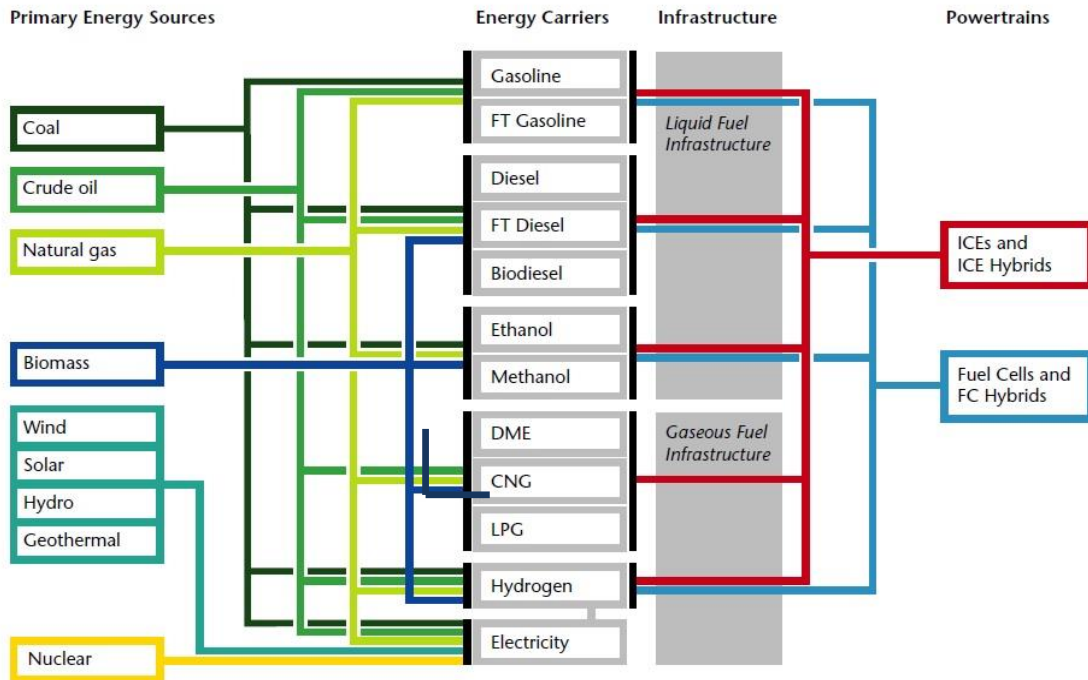
⁹ http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/biofuels_roadmap.pdf,
<http://www.iea.org/stats/defs/sources/renew.asp>

3. תחליפי דלקים מפסולת לשימוש בתחבורה

3.1. רקע

תחליפי הדלקים לתחבורה (בשונה מסקטורי אנרגיה אחרים) מוגבלים, בטווח הבינוני, לדלקים נוזליים או גזיים, כמופיע בתרשים הבא.

תרשים 1 - חומרי הגלם, הדלקים, התשתיות ומערכות ההנעה האפשריות בעתיד



מקור: SMP (2004)

עוד עולה מהתרשים כי בעוד שלמוצרי אנרגיה אחרים (כגון חום או חשמל) יש מקורות מתחדשים חלופיים כגון אנרגיה סולארית, רוח הידרו וכו'. לסקטור התחבורה אין חלופות מתחדשות ליישום בטווח הקצר/בינוני, מלבד טכנולוגיות להמרת ביומסה לדלקים. ההגדרה אנרגיה מתחדשת בעצמה אינה מובנת מאליה אך ניכר כי גוברת ההתנגדות לשימוש בביומסה שגודלה לצורך הפקת דלקים (ועושה שימוש יקר במים וקרקע) וכי ישנה מגמה לקדם את ייצור הביודלקים מחומרים הקיימים בפסולת או בביומסה שטרם הפיכה לפסולת.

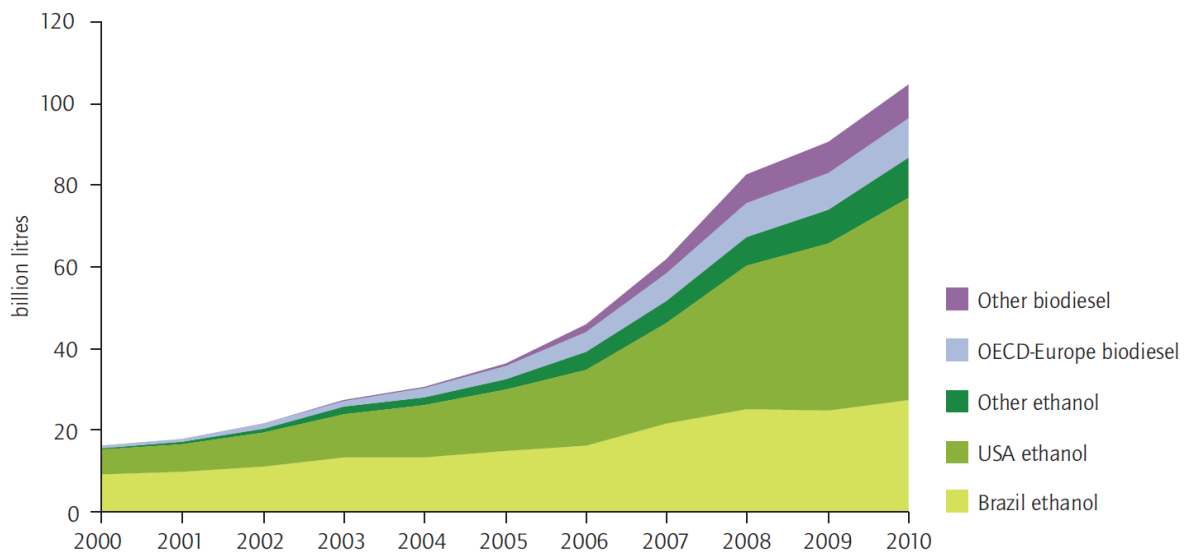
המושג ביומסה מתייחס לקשת רחבה מאוד של חומרים ואיכויות שכן כל חומר אורגני, פריק ביולוגית, שמקורו מהחי או מהצומח נכלל בהגדרה. חומרי הגלם להפקת הדלק נעים מחומר אורגני נקי שהרכבו ידוע (כמו במקרה של גידולים חקלאיים ייעודיים או שאריות פסולת חקלאית נקייה) לבין פסולות ביומסה עירוניות ותעשייתיות שהרכבן אינו ידוע והן מכילות מזהמים וחומרים נוספים (כגון: פסולת תאית של נייר וקרטון מלוכלך, שאריות מזון, פרש בע"ח וכו'). בספרות נהוג לחלק את שתי המשפחות הללו לתחליפי דלקים מסוג ראשון ושני.

ביו-דלקים "דור 1" - הביו-דלקים הקובננצינאליים נמצאים בשימוש כבר מספר עשורים ומהווים כיום

כ-3% מסך ביקוש הדלקים העולמי (IRENA 2013). הנפוצים הינם האתנול והביודיזל המהווים 80% ו-20% משוק הדלקים הביולוגים, בהתאמה. רובם ככולם של הביו-דלקים המיוצרים והנצרכים כיום, משתייכים לדור 1 כאשר תהליך יצורם עושה שימוש בלא פחות מ-2-3% מהקרקע החקלאית העולמית. הפקת אנרגיה מפסולת מיוצרת כיום בעיקר מפסולת חקלאית - קש, שבבי עץ, שארי עץ ועוד.

כתוצאה מתמריצי מדיניות ברחבי העולם, עלו כמויות הייצור של ביו-דלקים מ-16 מיליארד למעל 100 מיליארד ליטר בין השנים 2000-2010, כאשר ביו-אתנול היווה כ-80% מסך הייצור והיתר ביו-דיזל (IEA 2011). התרשים הבא מציג את ההיצע העולמי (מיליארדי ליטרים) של ביו-דלקים (דור 1 ודור 2) על פי חלוקה לאזורים: ארה"ב, מדינות ה-OECD, ברזיל ושאר העולם.

תרשים 2 - היצע ביו-דלקים בתחבורה על פי חלוקה לדלקים



Source: IEA, 2010a.

מקור: IEA Technology Roadmap Biofuels for Transport (2011)

http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/biofuels_roadmap.pdf

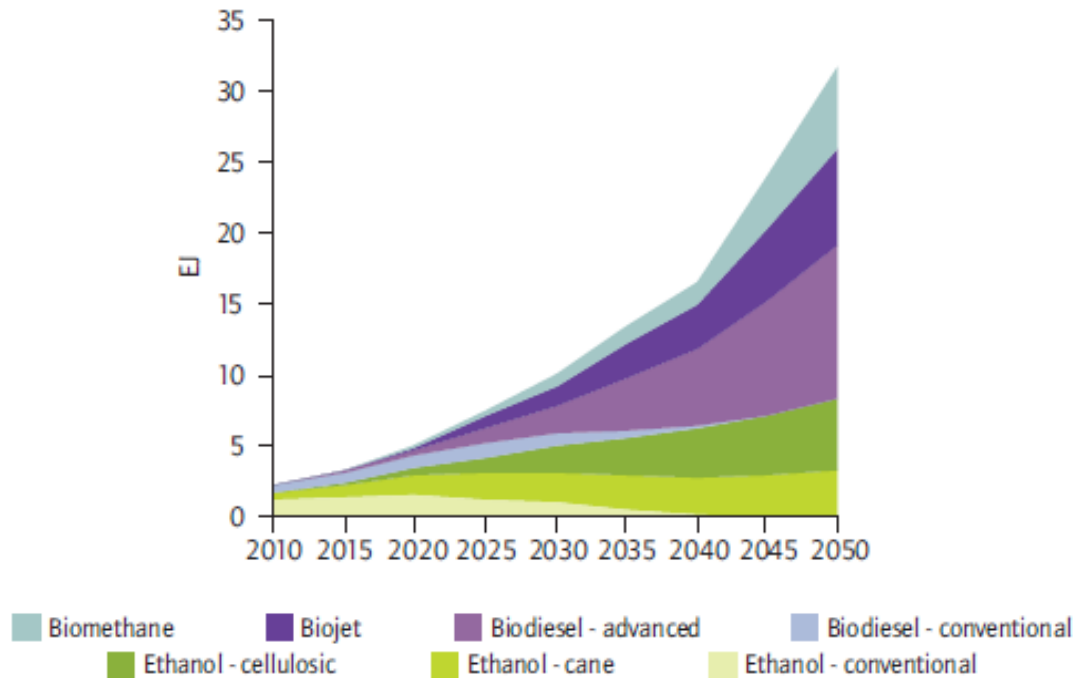
כפי שניתן לראות, לארה"ב נתח שוק מאוד גדול וזאת בעיקר בגלל ייצור האתנול (בעיקר דור 1) בשטחה, גם לברזיל נתח שוק משמעותי וזאת בשל ייצור אתנול מקנה סוכר במדינה (גם כאן מדובר בדור 1). נחזור כי עבודה זו אינה עוסקת בתחליפי דלקים לתחבורה המשתייכים למשפחה זו.

ביו-דלקים "דור 2", לעומת זאת, כוללים דלקים המופקים מפסולות של ביומסה והם יהוו את מוקד הדיון בפרקים הבאים. הם נתפסים ע"י גופי המחקר השונים כיותר "מתחדשים" במובן הזה שהביומסה קיימת בשווקים ולא נדרש להשקיע דשן, מים וקרקע על מנת לגדלם. עם זאת ישנם קשיים אחרים שצריך להתמודד איתם. בעיקר בשווקים בהם הפסולת אינה מופרדת בצורה המאפשרת לשמר את איכותו המקורית של החומר.

ב-2011, רשות האנרגיה העולמית (IEA) הוציאה מפת דרכים לשילוב ביו-דלקים בשוק התחבורה. המטרה של המסמך היתה לזהות טכנולוגיות פוטנציאליות וכן פעולות מרכזיות שעל מקבלי ההחלטות לבצע על מנת לקדם את חדירת הביו-דלקים לשוק. הדו"ח מציג יעדים מומלצים שיש לעמוד בהם, ומציג את

תחזיות הביקוש העולמי לביו-דלקים (דור 1 ו-2) (ביחידות של Exajoules) עד שנת 2050 אם יעדי מפת הדרכים יאומצו. כפי שניתן לראות בתרשים 10, ההערכות הן כי עד 2050 נתח השוק של ביו-דלקים (דור 2) יגדל באופן משמעותי. ייצור של אתנול (דור 1) ייפסק לאחר 2040 ותהיה עליה של ייצור אתנול מתאית (cellulosic). כמו כן, התרשים מצביע על כך שאם יילקחו פעולות מרכזיות לקידום חדירת הביו-דלקים, הביו-דלקים המתקדמים (דור 2 והלאה) יתחילו לחדור לשוק בסביבות 2025-2030.

תרשים 3 - תחזיות ביקוש לביו-דלקים במפת הדרכים של ה-IEA



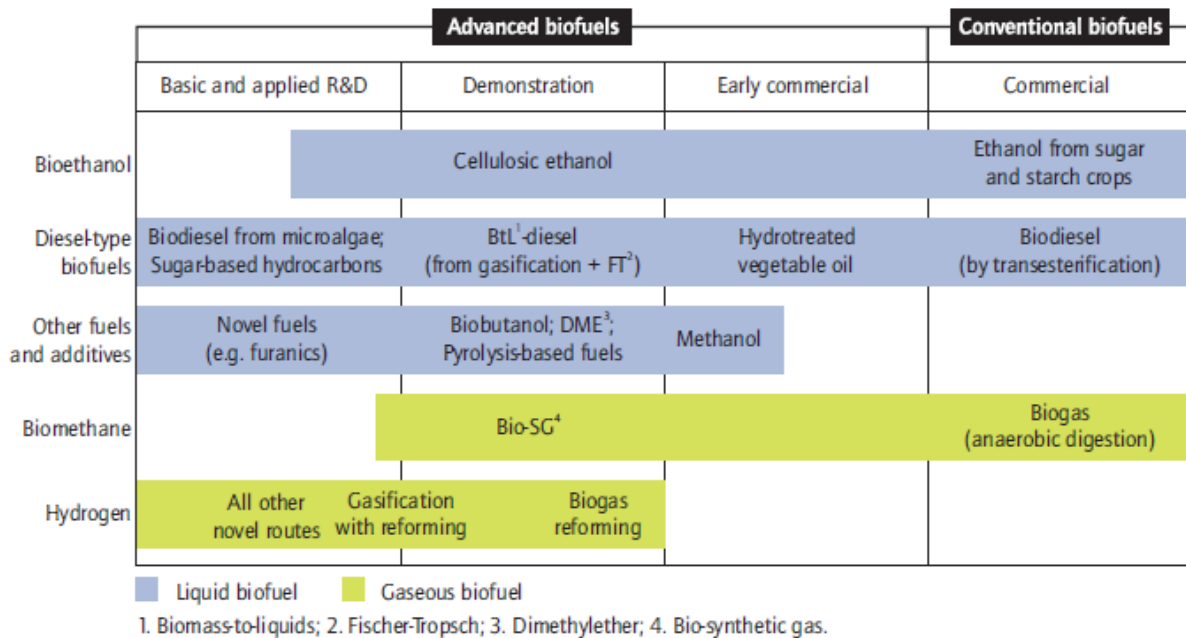
מקור: IEA Technology Roadmap Biofuels for Transport, 2011,

http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/biofuels_roadmap.pdf

ביו-דלקים מתקדמים, כגון אתנול מתאית ודיזל (המיוצר מביומסה, דור שני), נמצאים בשלבים ראשוניים של פיתוח, חלקם בשלב של פיתוח ומחקר וכמה מהם בשלבי הדגמה. כפי שניתן לראות מתרשים 11, נכון להיום ולטווח הקצר ביו-דלקים מתקדמים אינם מיוצרים ברמות מסחריות.

ארה"ב אימצה את תקן הדלקים המתחדש (Renewable Fuel Standard - RFS) הקובע כי עד שנת 2022 יהיו 36 מיליארד גלון של ביו-דלקים. באירופה, הדירקטיבה לאנרגיות מתחדשות (EC/2009/28) קבעה יעד של 10% חדירת ביו-דלקים לשוק הדלקים עד 2020 (כיום היעד עומד על 5.75% ויתכן שהאיחוד לא יגדיל אותו בשל מחסור בטכנולוגיות בשלות לייצור ביו-דלקים מדור 2).

תרשים 4 - סטטוס המסחור של טכנולוגיות מרכזיות לייצור ביו-דלקים



מקור: IEA Technology Roadmap Biofuels for Transport, 2011
http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/biofuels_roadmap.pdf

הביקוש לדלקים בישראל צפוי לעלות, ודלקים מתחדשים מהווים אלטרנטיבה מועדפת, (מנקודת מבט של שוק התחבורה, להבדיל מהפסולת) כתחליפים לדלקים פוסיליים. עם זאת, כפי שיוצג בעבודה זו:

- זמינותם של חומרי גלם אלו בישראל מוגבלת והמשק לא יוכל ליהנות מיתרונות משמעותיים לגודל, המאפיינים טכנולוגיות אלו.
- הטכנולוגיות היודעות לטפל בזרמי פסולת "מלוכלכים" הינן חדשות ולא מיושמות באופן מסחרי. קיימים יתרונות בהמרת הפסולת לאנרגית חום או חשמל (כדאיות שלא הוצגה במסמך) המנציחים חוסר ניסיון תפעולי בתחום, הן בארץ והן בעולם. לכך השלכות על מהימנות המידע והנתונים המוצגים.

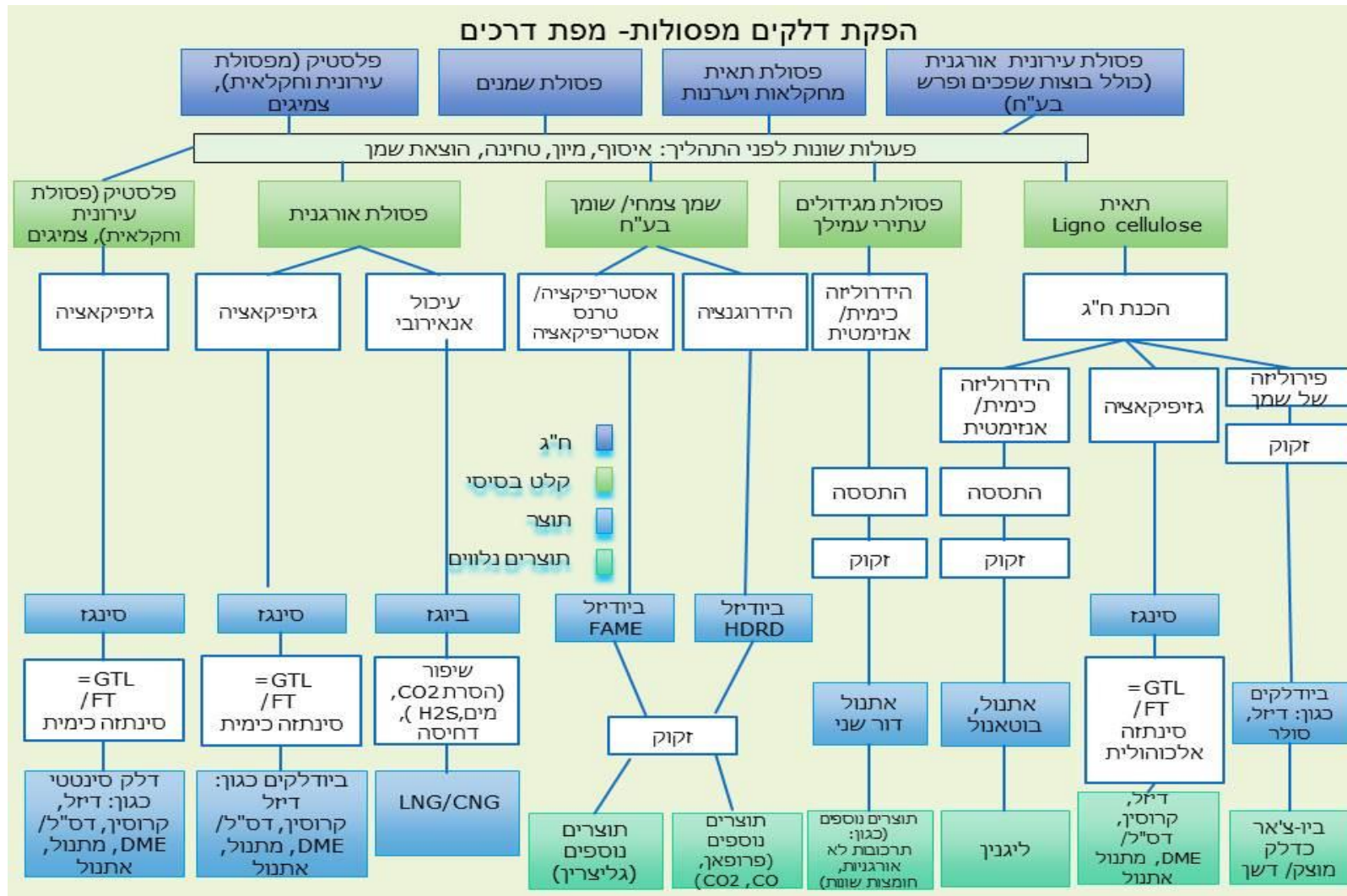
לכן בטווח הבינוני לא בטוח כלל כי לתחליפי דלקים אלו יכולת לתת מענה הולם לביקוש הדלקים לתחבורה בישראל¹⁰.

הסעיפים הבאים יתארו בקצרה את תחליפי הדלקים הנוזליים והגזיים שניתן לייצר גם מפסולות. לאחר מיכן יוצג פירוט נרחב על כל טכנולוגיה להפקת דלקים על פי מפת הדרכים הבאה:

¹⁰ על פי נתוני מנהל הדלק צריכת הדלקים לתחבורה בשנת 2012 עמדה על כ-2,712 אלפי טון בנוזל ו-2,721 אלפי טון סולר.

שילוב תחליפי נפט מבוססי פסולת במערך התחבורה בישראל
 עבור המנהלת לקידום תחליפי נפט במשרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים
 שלב א': סקר ספרות

תרשים 5 - הפקת דלקים מפסולות: מפת דרכים



ישנם "מסלולים" רבים המשקפים את תהליך ייצור הדלק החל מתת הזרם הקיים (החומר ממנו מפיקים את הדלק, לדוג: קרטון, שמן, פרש בע"ח), הטכנולוגיה אליו הוא מוקצה, תהליך שדרוג תוצר הביניים וכלה בייצור וניקוי הדלק לשימוש בתחבורה. הדלקים שיתוארו בסעיפים הבאים הינם: הביו-אתנול, ביודיזל, ביוגז (CNG), ביו-מתנול ודימתיל אתר (DME). נדגיש כי בנושא הפקה ותדלוק CNG לתחבורה הורחב ופורט במסגרת המודל הקיים בידי המשרד.

3.2. ביו-אתנול

ביו-אתנול נוצר בתהליך תסיסה כהלית של פחמימות ומולקולות סוכר מורכבות, המופקות מגידולים שאוגרים אותם בצורה של סוכר או עמילן (בעיקר גידולי תירס וקנה סוכר).

ניתן להפיק ביו-אתנול ממספר רב של מקורות: גידולים ייעודיים, פסולת אורגנית, גז טבעי ועוד. כיום יש ייצור רחב של ביו-אתנול מגידולים ייעודיים כגון קנה סוכר ותירס, סלק סוכר, מולאסה וחיטה. קנה סוכר ותירס הם הגידולים הנפוצים ביותר לייצור אתנול (דור 1), בעיקר בארה"ב וברזיל. עם זאת, נשמעת ביקורת רבה על השימוש בתירס כחומר גלם, בשל מספר סיבות: שיטת הגידול צורכת הרבה דשן, השינוע ממקום למקום צורך הרבה אנרגיה, תהליך הייצור בעייתי מבחינה אנרגטית (כאשר בוחנים את המאזן האנרגטי והסביבתי של תהליך ייצור ביו-אתנול מעמילן התירס מוצאים כי הוא עשוי לגרום לפליטה של יותר גזי חממה מאשר ביצור יעיל של בנזין בארה"ב), וכן מתקיים ויכוח ער לגבי ייעודו של התירס לטובת ייצור אנרגיה לעומת שימושו כמזון וכמזון לבעלי חיים, דבר שמביא לעליית מחירי המזון.

לכן, ישנה מגמה גם בארה"ב וגם באיחוד האירופאי להפחית את כמות הביו-אתנול המיוצרת מגידולים ייעודיים ולעודד מחקר ופיתוח טכנולוגיות מהדור השני. פיתוח וייעול הפקת צלולוז מפסולות שונות, ופירוק צלוליטי של פסולות (כגון פסולת חקלאית ופסולת אורגנית) יפורטו בפרקים הבאים העוסקים בטכנולוגיות השונות לייצור ביו-דלקים מתקדמים.

ניתן להשתמש בעד 10% אתנול בתערובת של בנזין בלי לשנות דבר במנועי הרכב (E10). אך על מנת להשתמש בתערובת של 20-85% כבר יש לעשות מודיפיקציות במנוע ועל מנת לתדלק באתנול טהור E100 צריך מנוע מיוחד שהותאם לו מראש (כיום רק ברזיל יש רכבים המיועדים לשימוש ב-E100). רכבים ייעודיים שיכולים לנסוע עם תערובות גבוהות של אתנול נקראים רכבי פלקס-פיוול (FFV) ומיוצרים בייצור סדרתי במספר מדינות בעולם.

מבחינת יעילות האתנול בשלב השימוש כדלק, מחקרים מצביעים על כך שצריכה הדלק משתפרת במועט, אך מאחר וליטר אתנול טהור מכיל רק 2/3 מתכולת האנרגיה לנפח בהשוואה לבנזין (NAP 2013), התכולה האנרגטית של E85 היא רק כ-72% מזו של בנזין ולכן טווח הנסיעה לליטר מתקצר. יעילות ניצול ליטר דלק של תערובות E20, E10 ו-E30 נמוכה בהשוואה לזו של בנזין טהור ב-1.43%, 2.15% ו-5.08% בהתאמה (American Coalition for Ethanol, 2005).

3.3. ביודיזל¹¹

ביודיזל הוא סוג של דלק ביולוגי, המבוסס על מולקולות אורגניות המכונות אלקיל – אסטרים ארוכות המורכבות ממולקולות פחמימניות כגון: מתיל או אתיל. דלק זה מיוצר משמנים צמחיים או שומן מן החי. ביודיזל יכול לשמש כתחליף חלקי ואף מלא לסולר המחצבי. הוא יכול להיות מופק משמן צמחי (כגון: סויה, קנולה, שמן דקלים, תירס, בוטנים ועוד) או להיות ממוחזר משמן טיגון ו/או שומן בעלי חיים.

נכון להיום, רובו ככולו של הביודיזל המיוצר אינו מופק מפסולות שמנים אלא משמנים של גידולים חקלאיים (דור 1).

תערובות של ביודיזל וסולר הם מוצרים נפוצים לשימוש בשוק הסולר הקמעונאי בעולם. רוב העולם משתמש במערכת הידועה כגורם "B" לציון אחוזי הביודיזל בכל תמהיל דלקים.

הביודיזל הנפוץ ביותר כיום מופק בתהליך טרנסאסטרופיקציה שבו חומרי הגלם הם שמנים צמחיים (דור 1). אך בשל הרצון להתרחק מחקלאות ייעודית להפקת שמן לביודיזל, גם בשוק זה בדומה לשוק האתנול, ישנה מגמה עולמית להפקת דלקים דור שני, מחומרי גלם אחרים כמו: פסולות שמן ושומן, חומרים מכילי תאית כגון גזם, שאריות מזון, ופסולות. על אף הפוטנציאל הסביבתי הגבוה בייצור ביודיזל דור שני, קיימת בעיית איסוף ומיון של הפסולות וכן הטכנולוגיה עדיין איננה בשלה לייצור ביודיזל מפסולות ונמצאת בשלבי מחקר ופיתוח.

כיום אתגר נוסף להחדרת ביודיזל (דור 1 ודור 2) לשוק התחבורה הוא התקנים: בהתאם לדרישות התקן¹², ניתן לערבב ביודיזל בשיעור של עד 7% (B7) עם דיזל רגיל ללא התאמות מיוחדות של המנוע. מעל לריכוז זה ועד B100 יש לדאוג להתאמות במנוע שיימנעו סתימה של המסנן, חימום יתר של המזרק, נזק לטבעת הבוכנה ופגיעה באיכות הסיכה. בטמפרטורות נמוכות יש בעיה של צמיגות יתר. תכולת האנרגיה של ביו-דיזל נמוכה בהשוואה לזו של דיזל רגיל בכ-11% ובשימוש ב-B100 ישנו איבוד של 5-7% מההספק המקסימלי (זבירין, טרטקובסקי וגוטמן 2008).

טבלה 1 - ניתוח SWOT ביו-אתנול וביו-דיזל

יתרונות	חסרונות	הזדמנויות	אימים
<ul style="list-style-type: none"> פליטות CO₂ נמוכות יותר טכנולוגיה מבוססת ומוכרת אין צורך בהשקעה גדולה בתשתיות, כל עוד מדובר על כמות קטנה יחסית של דלקים 	<ul style="list-style-type: none"> טווח נסיעה לליטר דלק נמוך בהשוואה לדלקים קונבנציונליים השפעות סביבתיות לאורך מחזור החיים שנויות במחלוקת ביו-דיזל אין עדיין תקן קבוע תערובות בשיעורים גבוהים עלולות לפגוע בביצועי מנוע במזג אוויר קר 	<ul style="list-style-type: none"> ניתן לערבב בדלקים קונבנציונליים ניתן להפיק דלקים ביולוגיים מפסולות 	<ul style="list-style-type: none"> ירידה במחירי הנפט עלייה במחירי הגידולים הייעודיים

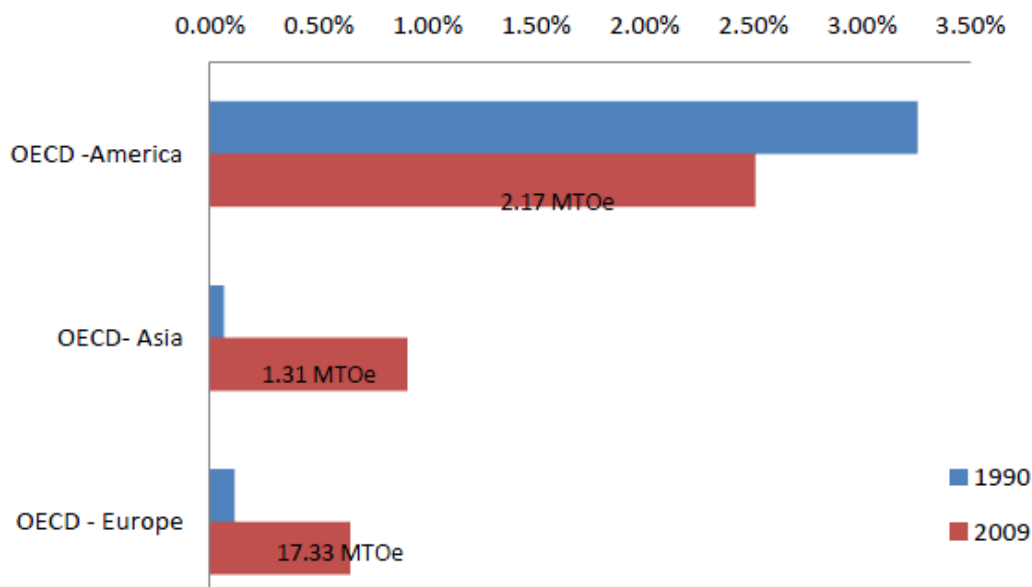
¹¹ מידע נוסף וספציפי יותר לביודיזל מפסולות שמנים (דור 2) מוצג בפרק 5.2

¹² ת"י 107 חלק 1(א)ב): סולר למנועי דיזל ות"י 5731: דלק לרכב מנועי - אסטרים מתיליים של חומצות שומניות למנועי דיזל (ביודיזל) - דרישות ושיטות בדיקה

3.4. ביוגז (CNG)

עבודה זו מתייחסת לסוג שלישי של דלק, דלק גזי המופק מהביוגז המיוצר מעיכול אנאירובי של פסולות אורגניות רקבוביות (Condensed Natural Gas (CNG). על דלק זה, לשימוש לתחבורה, הורחב ופורט במסגרת המודל הקיים בידי המשרד (להפקת תחליפי דלקים לתחבורה שמקורם מגז טבעי). מאחר ו-CNG מגז טבעי יהיה המסה העיקרית של תחליף הדלק (והוא נבחן כיום במסגרת מנהלת תחליפי נפט במשרד האנרגיה) התשתיות לא תלויות בישום טכנולוגיית העיכול האנאירובי על פסולות. כך או כך שוק ההנעה מ-CNG הינו שוק חדש עם מחסומים לא מועטים שמתפתח לאט בשנים האחרונות ועומד, נכון לשנת 2009 בכ-3% מהביקושים לאנרגיה לתחבורה.

תרשים 6 - הביקוש לגז טבעי מתוך סך הביקושים לאנרגיה לתחבורה



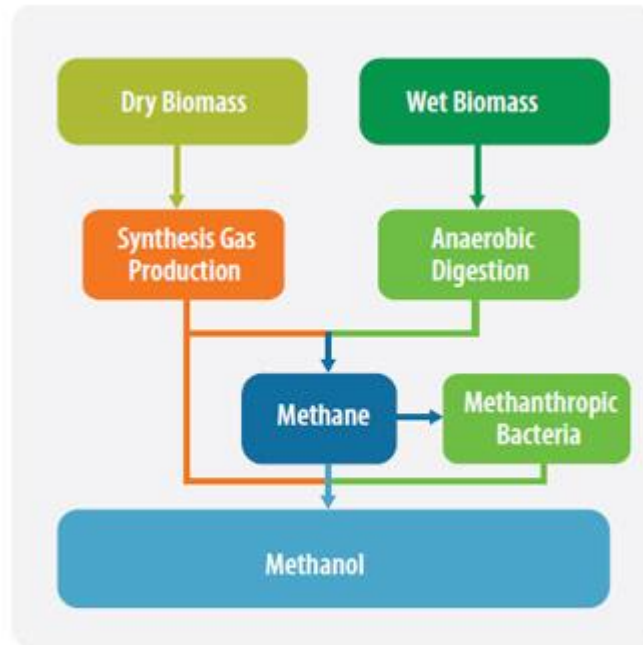
מקור: שילוב תחליפי נפט מבוססי גז טבעי במערך התחבורה בישראל, קבוצת פארטו ו-DHV, 2012

3.5. ביו-מתנול

עבודה זו מתייחסת לשני דלקים נוספים, אשר עבור פתרון לפסולות, אין בהם שימוש מסחרי נכון להיום (אך כן יש פרויקטים של הדגמה וניסוי – דימתיל-אֶתֶר (DME) ומתנול).

ב-2010, כ-70% מהמתנול יועד לתעשייה הכימית והפטרו-כימית לייצור כימיקלים. כ-23% מהמתנול שיוצר נועד לשימוש בתחבורה. ניתן להשתמש במתנול באופן ישיר ולמהול אותו עם דלקים קונבנציונליים, או שניתן להמיר אותו ל-DME. מתנול, בניגוד לביו-מתנול, מיוצר מגז טבעי (80%), או פחם (17%) או מכמויות קטנות של שמנים. ביו-מתנול ניתן לייצר ממספר מקורות (פסולות וביומסה או פד"ח או גזי פליטה אחרים) בטכנולוגיה ביו-כימית או תרמו-כימית, בתהליך הדומה לתהליך הפישר-טרופס. כלומר, חומרי גלם אלו מומרים לסינגז ולאחר מכן הסינגז עובר מספר שלבים כדי להגיע להרכב האופטימלי של סינתזת המתנול (לדוגמה, על ידי הסרת הפד"ח או הוספת מימן). הביו-מתנול דומה בהרכבו הכימי למתנול, השוני המרכזי הוא בפליטות הגז"ח הנמוכות יותר במקרה של ביו-מתנול.

תרשים 7 - דרכי ייצור של מתנול



מקור: European Biofuels Technology Platform

נכון ל-2010, ייצור המתנול העולמי עומד על כ-45 מיליון טון לשנה וייצור ביו-מתנול העולמי עומד על כ-200,000 טון (Methanol Institute, 2010).

מבחינה סביבתית, קשה להעריך את ההשפעות של ייצור ביו-מתנול מכיוון שהטכנולוגיה עדיין מתפתחת, אך מחקרים מדעיים מצביעים על כך שניתן להפחית פליטות של גזי חממה ב-25-40% ביחס לפליטות כאשר המתנול מיוצר מגז טבעי. חשוב לציין כי מתנול, כשלעצמו, הוא חומר רעיל אשר יכול לגרום לעיוורון ואף למוות, ולכן יש להקפיד בעת הייצור, האחסון והתדלוק בו. בעת שריפתו נוצר פורמאלדהיד, הנחשב לחומר מסרטן.

מבחינה טכנולוגית, הטכנולוגיה לייצור ביו-מתנול ידועה מאחר והיא דומה לטכנולוגיית הגזיפיקציה של פחם, הנמצאת בשוק כבר זמן רב. אך, הבעיה המרכזית היא הפיכת גזיפיקציה של פסולות/ ביומסה לכדאית מבחינה כלכלית. פתרון שנבחן הוא co-feeding, כלומר שימוש משולב בחומרי גלם פוסיליים ומתחדשים.

3.5.1. דוגמאות לפעילות עולמית היום

בעולם קיימים מתקני הדגמה לייצור ביו-מתנול מפסולות ותוצרי לוואי של תהליכים תעשייתיים, כגון גליצרין (תוצר לוואי מייצור ביו-דיזל), ואלכוהול שחור (black liquor) (תוצר לוואי של תעשיית הנייר):

שילוב תחליפי נפט מבוססי פסולת במערך התחבורה בישראל
 עבור המנהלת לקידום תחליפי נפט במשרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים
 שלב א': סקר ספרות

טבלה 2 - סקירה של מתקנים (קיימים או בהקמה/מוצעים) לייצור ביו-מתנול

Location	Company	Start-up year	Capacity kt/yr	Main Product	Feedstock type	Source
Operational						
Netherlands	BioMCN	2010	200 ^a	Bio-methanol	Glycerin	BioMCN, 2010
Sweden	BioDME ^e	2011	15 ^e	Bio-DME	Black liquor	BioDME, 2011
Canada	Enerkem	2011	4	Syngas, bio-methanol	Treated wood	Enerkem, 2011
Under construction/Proposed						
Iceland	Carbon Recycling International	2011	1.6	Bio-methanol	Flue gas CO ₂	CRI, 2011
Canada	Al-Pac ^d	2012	4	Paper pulp	Wood	Rabik, 2011; Al-Pac, 2011
Canada	Enerkem	2012	29 ^a	Bio-ethanol, bio-methanol	Municipal solid waste	Enerkem, 2011
Sweden	Chemrec & Dom-sjöFabriker	Late 2012	100 ^f	Bio-DME, bio-methanol	Black liquor	Chemrec, 2008
Sweden	Värmlands Metanol	2014/2015	100	Bio-methanol	Forest residue	Värmlands Metanol, 2011
Netherlands	Woodspirit ^g	2015	400-900 ^g	Bio-methanol	Wood	CHE, 2011; Bio-refining, 2011
Poland	PKE & ZAK ^h	2015	Up to 550	Heat & Power, Chemicals	Up to 10% bio-mass, coal	ZAK & PKE, 2009
Germany	DeBioM			Bio-methanol	Wood	DeBioM, 2011

מקור: IRENA, [www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA-ETSAP%20Tech%20Brief%2010%20Production of Bio-methanol.pdf](http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA-ETSAP%20Tech%20Brief%2010%20Production%20of%20Bio-methanol.pdf)

כפי שניתן לראות בטבלה לעיל, רק חלק מהמתקנים המוצעים או שנמצאים בפתוח משתמשים בפסולת כחומר מוצא לייצור ביו-מתנול.

3.5.2. תקינה

ישנן כמה פלטפורמות מיהול של המתנול עם הבנוין. בארה"ב לדוגמא, ניתן למהול את המתנול עם דלקים אחרים באחוזים נמוכים (~5%) מבלי הדרישה לעמוד בתקנים פדראליים (עם זאת, מרבית מהמדינות בארה"ב כן דורשות עמידה בתקן של ה-American Society for Testing and Materials (ASTM) (Bromberg & Cheng, 2010), תקן ASTM D4814¹³. מיהול מתנול באחוז יותר גבוה (70-85%), צריך לעמוד בדרישות של תקן ASTM D5797-13¹⁴, אך כמעט ואין כלי רכב הנוסעים על מתנול באחוזים כאלו גבוהים בארה"ב.

על מנת לקדם את הפיתוח והייצור של דלקים מתחדשים, קיימת הצעת חוק בארה"ב, Open Fuel Standard Act of 2011, אשר קובעת שאחוז (אשר יעלה עם השנים) של רכבי נוסעים שנמכרים בארה"ב יצטרכו להיות רכבים מותאמים לדלקים שונים (בנוין, אתנול, מתנול, או שילוב של דלקים אלו), או רכבים המונעים בגז טבעי, מימן, ביו-דיזל, רכבים חשמליים, או תאי דלק (Bryce, 2013).

באירופה, התקינה (EN228) מאפשרת שימוש בעד 3% מתנול במהילה עם בנוין עם חומרים מייצבים (Methanol from Biomass Face Sheet, n.d.). בסין נכנסו לאחרונה לתוקף שני תקנים הנוגעים למיהול: ב-2009: the vehicle methanol fuel standard (100% מתנול), ו-the vehicle methanol- (85% gasoline standard (M85) (Jia, 2009), בסוף 2013, צפוי להיכנס לתוקף התקן השלישי, שיאפשר

¹³ http://enterprise.astm.org/filtrexx40.cgi?+REDLINE_PAGES/D4814.htm

¹⁴ http://enterprise.astm.org/filtrexx40.cgi?+REDLINE_PAGES/D5797.htm

מהול של 15% מתנול עם בניין (Hui, 2013). יש לציין שכיום סין מייצרת את המתנול מפחם ולא ממקורות מתחדשים.

3.5.3. מחיר

עלות ייצור של ביו-מתנול (מתנול המיוצר מחומרי גלם אורגניים) מוערכת ב-1.5 עד 4 פעמים יותר גבוה מהעלות של מתנול המיוצר מגז טבעי, אשר במחירים הקיימים היום של דלקים פוסיליים, עומד על כ-100-200 אירו/טון. כאשר חומרי הגלם הם פסולות, המחירים נעים בין 200-500 אירו/טון.

3.6. דימתיל אתר (DME)

דימתיל אֶתֶר (או אתר מתילי) (DME), נחשב לאֶתֶר ה"פשוט" ביותר מבחינת תרכובתו הכימית. DME הוא גז חסר צבע, אינו רעיל, ויכול להיות מאוד דליק בתנאים מסוימים. ניתן להפוך אותו לנוזל (באמצעות לחץ) על מנת להשמיש אותו לתחבורה. המאפיינים של דימתיל אתר דומים לאלו של גז פחמימי מעובה (גפ"מ) (Dimethyl ether (DME): Biofuel Fact Sheet, n.d.).

ניתן להפיק DME מגז טבעי או לייצרו ממספר חומרי גלם, הכוללים: פסולת חקלאית ופסולת אורגנית. את הפסולת ממירים, בתהליך הגזיפיקציה, לסינגז ואת הסינגז ממירים ל-DME בסנתזה של שני שלבים: 1) ממירים את הסינגז למתנול באמצעות קטליזטור ו-2) מייבשים את המתנול באמצעות קטליזטור אחר וממירים אותו ל-DME. לחילופין, ניתן לייצר DME בתהליך סנתזה אחד באמצעות מערכת דואלית של הקטליזטור, המאפשרת לשלב את שני התהליכים שצוינו לעיל בתהליך אחד. הטענה של היזמים בתחום זה כי תהליך אחד יוריד עלויות ויהיה יותר יעיל.

כיום, שני התהליכים (הדו-שלבי והשלב האחד) ישימים באופן מסחרי (אם כי לא כאשר חומר הגלם הוא פסולת).

בשל איכות הצתה טובה, עם מספר צטאן גבוה, אפשרי להשתמש ב-DME כתחליף במנועי דיזל. עם זאת, חשוב לציין, כי בהשוואה לדיזל ל-DME יש צמיגות נמוכה יותר (אשר אינה טובה דיה מבחינת איכות הדלק הנדרשת) ושמנוניות נמוכה. לכן DME, כמו גפ"מ, מאוחסן במצב נוזלי בלחץ נמוך יחסית (0.5 MPa), מצב העוזר להגביל את מספר השינויים הנדרשים להתאמה במנוע. אך גם עם הקטנת הצורך בהתאמות, עדין יש צורך במספר שינויים קלים כגון שינוי במשאבת ההזרקה והתקנה של מיכל לחץ (דומה למיכל המותקן ברכבי גפ"מ).

DME נשרף בצורה יחסית נקיה ואיננו פולט פחם. במדינות בהן קיימת תשתית לגפ"מ ולא נדרשת התאמה נוספת.

טבלה 3 מדגימה את תכונות הדלקים השונים ומשווה בין DME לבין דלקים אחרים:

טבלה 3- השוואה בין DME לבין דלקים אחרים

	Energy content (MJ/kg)	Density (kg/m ³)	Cetane number	Octane number	C/H/O (mass %)	Boiling point (°C)
Ethanol	28.43	790		110	52/13/35	78
Methanol	19.5	790		110	38/12/50	65
Diesel	43.09	800-845	50-55		86/14/0	180-360
FTD	44.00	760-790	55-75		85/15/0	180-320
DME	28.43	668	60		52/13/35	-25
Methane	50.00	0.81		122	75/25/0	-162
Hydrogen	119.88	0.089		>125	0/100/0	-253
LPG	46.30	540		90-96	82/18/0	-30
Gasoline	42.70	715-765		90-100	86/14/0	0-210

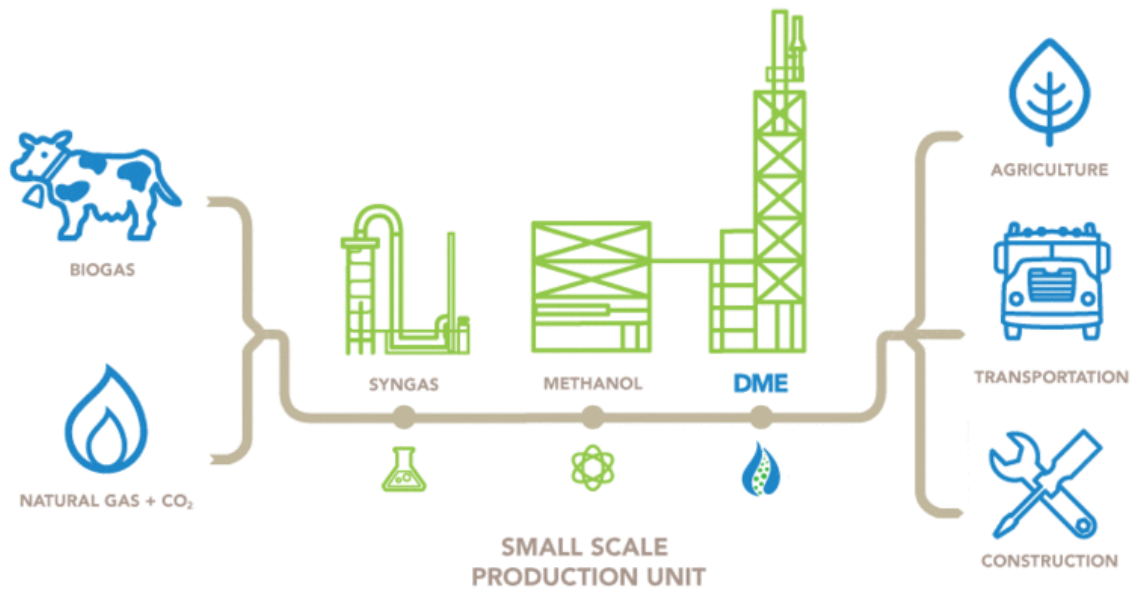
מקור: BioEME, <http://www.biodme.eu/about-dme>

3.6.1. דוגמאות לפעילות עולמית היום

רוב הייצור העולמי של DME נמצא כיום בסין (אך מרבית מייצור ה-DME נעשה מפחם וגז טבעי). מתקן ה-BioDME הראשון בעולם נמצא בשוודיה ונמצא בשלבי הדגמה.

חברת וולוו (Volvo Group) מרכזת פרויקט הנקרא BioDME, הנתמך על ידי התכנית האירופאית FP7 וסוכנות האנרגיה השוודית. מטרת הפרויקט להציג את הפוטנציאל המסחרי של DME כדלק לתחבורה. הפרויקט בוחן את כל שרשרת הטכנולוגיה: החל מבניית מתקן הייצור ועד רשת ההפצה של הדלק. ביוני 2013, הודיעה החברה על כוונתה להתחיל לייצר כמות מוגבלת של רכבים המונעים על ידי DME ב-2015 (Volvo Group, 2013). ובשנתיים הקרובות, החברה מתכננת לשתף פעולה עם שתי חברות אמריקאיות, Safeway Inc. (קמעונאית מזון ותרופות בארה"ב) ו-Oberon Fuels (חברה לייצור DME אשר נוסדה ב-2011), לבחון כלי רכב מסחריים כבדים מונעים DME. הפרויקט קיבל מענק של חצי מיליון דולר מהמחלקה לניטור זיהום אוויר של מחוז עמק סאן חואקין בקליפורניה (Green Car Congress, 2013). המפעל לייצור ה-DME של חברת אוברון יהיה ממוקם בעיירה Brawley בקליפורניה, חומר הגלם אשר ישמש לייצור ה-DME יהיה פרש פרות וההערכה היא כי הוא יוכל לייצר 4,500 גלון ליום. המפעל ייצר כמות קטנה של דלק החל מקיץ 2013 לטובת הפיילוט של וולוו, אך ייכנס לתפעול מלא רק ב-2014.

תרשים 8 - תהליך הייצור של DME של חברת אוברון



מקור: Oberon Fuels, <http://www.oberonfuels.com/technology/oberon-process/>

3.6.2. תקינה

ארגון התקינה הבינלאומי (ISO) עובד על פיתוח תקן שיפרט את דרישות האיכות של השימוש ב-DME כדלק, תקן ISO/DIS 16861 (International DME Association, 2013).

3.6.3. מחיר

מחירו של DME המופק ממתנול תלוי במחיר של מתנול וגפ"מ. הערך האנרגטי של DME הוא כ-62% מהערך האנרגטי של גפ"מ, אך מחירו בדרך כלל עומד על כ-75-90% ממחירו של הגפ"מ בגלל שיש פרמיה על שווי האנרגיה (International DME Association).

3.7. מיסוי ורגולציה¹⁵

המיסוי על אנרגיה, פחמן ודלקים משתנה מהותית בין מדינה למדינה וקיימים ההבדלים מהותיים במבנה המס וגובהו. שיעורי המס הגבוהים ביותר הן במדינות האירופאיות (בעיקר במערב) בהן מדיניות המיסוי עוצבה על פי הדירקטיבה האירופאית למיסוי אנרגיה משנת 2003 (2003/96/EC). נכון לשנת 2012 טווח המיסוי על אנרגיה נע בין 0.18 אירו לגיגה ג'אול במקסיקו ועד 6.58 אירו לגיגה ג'אול בלוקסמבורג. מיסוי הפחמן נע, באותה שנה, בטווח של 2.8 אירו לטון CO₂ במקסיקו ועד 107.28 אירו לטון CO₂ בשוויץ. נציין כי מרבית המדינות הממסות פחמן בשיעור גבוה הן אלו שהמס עליהן מוגדר בנפרד מהמס על הדלק. מדיניות המיסוי האירופית מגדירה את המס המינימאלי על כל אחד מהדלקים הפוסיליים בכל אחד מהשימושים (תחבורה, תעשייה וייצור חשמל) ומגדירה את התנאים בהם ניתן לפטור באופן חלקי או מלא

¹⁵ המידע המוצג בסעיף זה מקורו במסמך עדכני ומקיף של ה-OECD בכל הנוגע למיסוי אנרגיה על סוגיה ומקורותיה TAXING ENERGY USE, OECD 2013

את המיסוי עליהם. הטבלאות הבאות מצייגות את הממוצע הפשוט של המיסוי על דלקים ופחמן ב-34 מדינות ה-OECD, לפי סוגי הדלק והשימוש, נכון לשנת 2012:

טבלה 4 - מיסים אפקטיביים ממוצעים על אנרגיה על פי סוג הדלק ושימושו ומיסים אפקטיביים ממוצעים על פחמן דו-חמצני על פי סוג הדלק ושימושו

Table 1. OECD simple average effective tax rates on energy by fuel type and use
 EUR per GJ

	% of base	Fuels					All fuels
		Oil products	Coal and peat	Natural gas	Biofuels and waste	Renewables (and nuclear)	
		34%	21%	25%	5%	15%	100%
Transport use	24%	11.8	0.0	0.6	5.0	0.0	11.5
Heating and process use	34%	1.7	0.5	0.7	0.0	0.0	0.9
Electricity	42%	0.9	0.7	1.2	0.7	1.1	0.9
Total use	100%	7.9	0.8	0.8	0.8	1.0	3.3

Source: OECD calculations. Tax rates are as of 1 April 2012 (except 1 July 2012 for AUS); energy use data is for 2009 from IEA (2011a).



StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888932767422>

Table 2. OECD simple average effective tax rates on CO₂ from energy use by fuel type and use
 EUR per tonne CO₂

	% of base	Fuels					All fuels
		Oil products	Coal and peat	Natural gas	Biofuels and waste	Renewables (and nuclear)	
		38%	32%	22%	8%	0%	100%
Transport use	27%	164	0	11	71	0	161
Heating and process use	37%	24	5	13	0	0	12
Electricity	36%	11	14	14	13	0	13
Total use	100%	110	14	15	31	0	52

Source: OECD calculations. Tax rates are as of 1 April 2012 (except 1 July 2012 for AUS); energy use data is for 2009 from IEA (2011a). The electricity figures exclude three outliers from the calculations – Iceland, Norway and Sweden.

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888932767441>

מקור: OECD, 2013

מהטבלה עולה כי בממוצע, המיסוי על דלקים לתחבורה גבוה בהרבה מזה של שימושים אחרים, הן במיסוי על הדלק והן במס הפחמן. מיסוי על תחבורה הוא כלי אפקטיבי להשגת היקף רחב של יעדים ומטרות מעבר לאלו הקשורים לפליטות פד"ח ומזהמים (לדוגמא: הפחתת רעש, צפיפות, תאונות דרכים וכו') ולכן מופנים אליו הרבה מאמצי מיסוי ורגולציה. ההשפעות החיצוניות הנובעות מתחבורה, משתנות באופן משמעותי בין מדינה למדינה ועל פי רוב הן מגולמות כלכלית כחלק מהמיסוי על הדלק. כמו כן, ישנן מדינות רבות המשתמשות בפדיון ממיסים אלו להשקעה בתשתיות תחבורה ולכן הוא גבוה ביחס ליתר הסקטורים. כמו כן, עולה מן הטבלה כי ישנה שונות גדולה במיסוי בין הדלקים. בסקטור התחבורה, כמו באחרים, המיסוי הגבוה ביותר הוא על תוצרי זיקוק נפט והנמוך ביותר של הגז הטבעי כשבניהם, בערך באמצע, נמצא המיסוי על ביו-דלקים מביומסה ומפסולת.

חשוב להדגיש כי אילו נתונים ממוצעים וקיימת, כאמור, שונות גבוהה מאוד במדיניות המיסוי ובגובהה במקומות שונים בעולם ולכן לא נמצאה תורה סדורה של מדיניות מיסוי של ביו-דלקים מפסולות.

במדיניות המיסוי בגרמניה לדוגמא (שעוצבה גם היא על פי הדירקטיבה האירופאית למיסוי אנרגיה משנת 2003/96/EC-2003), נמצא כי המיסוי על ביודיזל וביו-דלקים אחרים, לשימוש בסקטור התחבורה, **זהה** לזה של הדלקים הפוסיליים. עד סוף 2012 ניתנו פטורים חלקיים על ביו-דלקים "טהורים" (מביומסה שאינה מעובדת- ביו-דלקים דור ראשון), ועד שנת 2015 ניתן פטור מלא על ביו-דלקים המשמשים למיהול דלקים פוסיליים (אתנול E85 זוכה לפטור מלא ממיסוי). במדינות אחרות, כמו יפן ולוקסמבורג, לא ממסים כלל ביו-דלקים המופקים מביומסה ופסולות.

4. טכנולוגיות הפקת דלקים מפסולת

השבת פסולת (להבדיל מביומסה) לאנרגיה הוא תחום שנמצא בצעדיו הראשונים. עיקר יישומיו מתמצים בהשבת החומר הביולוגי בפסולת לאנרגית חום ו/או חשמל. הטכנולוגיות נחלקות לשתי משפחות עיקריות:

- משפחת הטכנולוגיות **הביוכימיות** (שחלקן משמשות להפקת דלקים מהדור הראשון מזה שנים רבות): עיכול אנאירובי, הידרוליזה, הידרוגנציה ואסטרפיקציה.
- משפחת הטכנולוגיות **התרמו-כימיות** שייחודן בכך שהן מסוגלות לטפל במגוון רחב מאוד של חומרים וברגישות נמוכה לניקיון והומוגניות זרם הפסולת. הפרקים הבאים יתארו נרחבות את התהליכים והטכנולוגיות הבאות: גזיפיקציה, פירוליזה ופלסמה.

4.1. טכנולוגיות ביוכימיות

4.1.1. עיכול אנאירובי

עיכול אנאירובי הוא תהליך של פירוק ביולוגי של ביומסה על ידי מיקרואורגניזמים, בסביבה נעדרת חמצן. לתהליך תוצרים שונים שהעיקר בהם הוא הביוגז, תערובת של מתאן (50-75%), פחמן דו חמצני, כמויות קטנות של מים (2-7%), וכן כמויות קטנות של גזים אחרים כגון מימן גופרתי, חמצן, חנקן, אמוניה ומימן¹⁶. שיעור המתאן בגז וקצב תהליך הפירוק (שאורך ברך כלל בין 21 ל-35 ימים בטמפרטורה של 37 מע"צ - תחום המוגדר מזופילי) משתנים בהתאם לתשומת התהליך. התהליך יכול לקרות באופן טבעי במטמנות, ביצות, ובמתקנים ייעודיים כפתרון טיפול בפסולת אורגנית רקבובית המשיב אנרגיה.

הביוגז שמוצר יכול להיות משודרג לאיכות של גז טבעי, באמצעות טכנולוגיות ניקוי, וניתן להזין אותו לתשתית הגז הקיימת ולהשתמש בו כחומר דלק להפקת חשמל או חום או כדלק לתחבורה (CNG). הפרק יתחיל בתיאור סכימטי של תהליך עיכול החומר האורגני, תשומותיו, תפוקותיו ובפרט הפקת הביוגז. לאחר מכן יתוארו חמשת הטכניקות לשדרוג הביוגז לכדי 98% מתאן על מנת שניתן יהיה להחדירו לתשתית הגז (אשר העבודה מניחה את קיומה) ולהשתמש בו כדלק לתחבורה. לבסוף תיערך השוואה של טכניקות אלו ותיגזר יעילותו האנרגטית/כלכלית של התהליך (בהתאם לזרמי הפסולת הנבחנו).

4.1.1.1. תיאור התהליך

ניתן לחלק את טכניקת העיכול האנאירובי לשלושה שלבים מרכזיים:

1. **הידרוליזה (כימית או אנזימטית)** - הפרדה של קשרים כימיים באמצעות מים - לפירוט ראה פרק

4.2.

תהליך התסיסה האנאירובית מורכב משני שלבים - אצטוגנזיס ומתאנוגנזיס כלהלן,

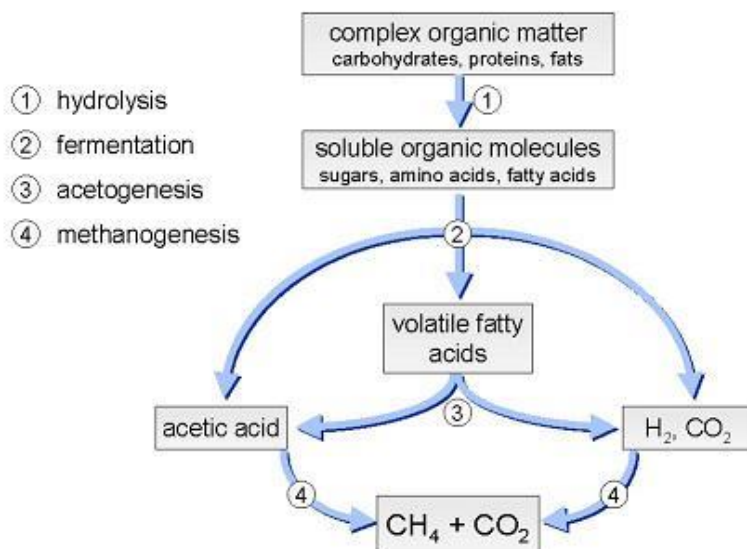
2. **התהוות חומצות שומן (Acidogenesis)** - תגובה ביולוגית שבה מונומרים פשוטים מומרים

לחומצות שומן נדיפות.

¹⁶ תהליך דומה מתרחש במטמנות בהן מוטמן חומר אורגני פריק ביולוגית. בתנאים המתקיימים במטמנה שיעור המתאן נמוך יותר ונע בשיעור 45-55%.

3. **התהוות מתאן (Methanogenesis) -** בתוך שלב זה ניתן לכלול תת-שלב, Acetogenesis, תגובה ביולוגית שבה חומצות השומן מומרות לחומצה אצטית, פד"ח ומימן. לאחר תת-שלב זה, מתקיים תהליך ביולוגי בו החומצה האצטית מומרת למתאן ופחמן דו חמצני (פד"ח) - ביוגז.

תרשים 9 - שלבי העיכול האנאירובי



מקור: Mountain Empire Community College (ENV 149)
<http://water.me.vccs.edu/courses/ENV149/lesson4b.htm>

הפעילות הביוכימית יכולה להתרחש בתנאים מזופיליים (35-37 מעלות צלסיוס), או תרמופיליים (55-60 מעלות צלסיוס). החסרונות של התססה בטמ' גבוהה הם: יציבות תהליך פחותה, התייבשות וצריכה גבוהה של אנרגיה. לעומת זאת, קיים יתרון גדול במצב תסיסה זה והוא הריגתם של חיידקים פתוגניים באמצעות החום.

ישנם שני סוגים של מתקני עיכול אנאירובי של פסולת:

- **עיכול אנאירובי רטוב -** הליך פירוק ביולוגי של חומר אורגני שהומס במים, בריכוז מוצקים של עד 10%. התהליך מבוצע ע"י אורגניזמים אנאירוביים בסביבה מימית חסרת חמצן המתקיימת בתוך מכלי עיכול סגורים. בתום זמן השהייה במכלי העיכול, מסונן החומר האורגני שנתר מתוך המים (שמורכב, למעשה, מהחיידקים אשר בצעו את הפרוק) ועובר תהליך ייבוש שבסופו הוא משמש להפקת קומפוסט. הביוגז המופק במכלי העיכול נאסף ונאגר במיכל ומשמש לייצור חשמל באמצעות גנרטורים מונעי ביוגז או לשדרוג לאיכות גז טבעי (98% מתאן). הנוזל שנתר מופנה לטיפול בשפכים (ברב המדינות). מתקן העיכול של חברת "חץ אקולוגיה" באתר חירייה הינו מתקן לעיכול אנאירובי רטוב.
- **עיכול אנאירובי יבש -** תהליך העיכול היבש מתבצע בתוך מיכלים אטומים לחלוטין, בלא נוכחות חמצן, של תערובת בריכוז מוצקים של עד-40%. במשך תקופת העיכול מתפרקת הפסולת האורגנית במיכל סגור, ע"י אורגניזמים אנאירוביים כאשר היא במצב יבש יחסית ומבלי שהומסה

במים. יתרונה של טכנולוגיה זו, שפותחה בשוויץ ובגרמניה, בפשטותה. מפשטות זו נגזרת עלות תפעולית נמוכה ביחס לעלויות תפעול מתקני עיכול אנאירובי קונבנציונאלי, עלויות אחזקה נמוכות ומשך עיכול קצר יחסית. כיום העיכול היבש מיושם מסחרית בכמות גדולה מזו של מתקני עיכול רטובים.

מדדי תהליך חשובים שמשמשים בהם בזמן התהליך הם:

- **זמן שהייה הידראולי (HRT)** - אורך הזמן שהחומר האורגני יישאר במתקן כאשר המטרה היא ייצור כמות מירבית של הביוגז. אורך הזמן ההידראולי נע בין 80-11 יום, אך הדבר תלוי בחומר הגלם והמערכת של המתקן.
- **קצב טעינה של החומר האורגני (OLR)** - כמה חומר אורגני יבש מצורף פר מטר מעוקב ליום. חשוב לא להעמיס יותר מדי על המתקן.

4.1.1.2. תשומות התהליך

ישנם שלושה פרמטרים מרכזיים לאפיון חומרי הגלם לתהליך העיכול האנאירובי:
תרשים 10 - מאפייני חומרי הגלם לתהליך העיכול האנאירובי

חומרים נדיפים פריקים ביולוגית (Biodegradable) (volatile solids)	חומרים נדיפים (Volatile Solids, VS)	מוצקים (Total solids, TS)
<ul style="list-style-type: none"> • החלקים של החומרים הנדיפים אשר מתכלים על ידי בקטריה בפרק זמן מסוים 	<ul style="list-style-type: none"> • החלקים האורגנים הכוללים פחמן (אשר לא מתכלים על ידי הבקטריה) 	<ul style="list-style-type: none"> • כמות המוצקים היבשים (אורגני ולא אורגני) בחומר הגלם

חומרי הגלם הפוטנציאליים לתהליך העיכול, נבדלים משמעותית זה מזה בשלושת הפרמטרים שהוזכרו לעיל, ולכן ההתאמה של זרמי הפסולת לטכנולוגיות השונות שנסקרות בעבודה זו בכלל, והעיכול האנאירובי בפרט, תלויה בסוג ומאפייני הפסולת הנכנסת לתהליך.

באופן כללי, ככל שרמת המוצקים יותר גבוהה והימצאות של אלמנטים שאינם מתכלים, התהליך יותר מורכב ונדרשת טכנולוגית עיכול יותר מורכבת. חומר גלם נוזלי והומוגני ללא אלמנטים זרים, כגון בוצות שפכים, בדרך כלל ידרוש טכנולוגיה יותר פשוטה [בהשוואה לפסולת עירונית, הבוצה היא הומוגנית ומורכבת מהחידקים שפרקו את החומר האורגני. הרכב הבוצה לא משתנה]. לרוב, חומרי גלם אלו לא צריכים הכנה מוקדמת ומופנים ישר למתקן העיכול. חומרי גלם אשר דורשים טכנולוגיה יותר מורכבת הם פסולת מזון מפסולת אורגנית עירונית (בייחוד שלא עברה הפרדה במקור) הדורשת מיון מוקדם, מכיוון שזרם זה כולל חומרים לא מתאימים (מתכות, פלסטיק, אבנים וכו') שיש להרחיקם לפני הכנסת החומר למתקן העיכול. מלבד זרמים אלו, מופרדים כמעט תמיד גם זרמי הקרטון, הגזם והנייר ובכלל הפסולת הניתנת למחזור. תיאורטית זרמים אלו יכולים להיכנס לתהליך עיכול אנאירובי אך התהליך יארך זמן רב, הינו לא יעיל, ומהווה בזבוז ביחס לשיטות הטיפול האלטרנטיביות בזרמי פסולת אלו.

סוג העיכול יהיה תלוי ברמת חומר הגלם היבש בתשומה. משתמשים בעיכול רטוב כאשר רמת חומר הגלם היבש עומדת על פחות מ-15% ומתאימה כאשר חומר הגלם הוא פסולת מזון או פרש בע"ח. משתמשים בעיכול חצי-יבש כאשר אחוז חומר הגלם היבש הוא בין 15% ל-20% ובדרך כלל חומר הגלם הוא פסולת

מזון או גינה. מתאים לעשות עיכול יבש כאשר חומר הגלם היבש מהווה יותר מ-20% מסך חומר הגלם, לדוגמה פסולת גינה ופסולת חקלאית.

הזרמים שיוקצו לטכנולוגיה זו הם: הפסולת האורגנית הרקבובית (מעורבת ומופרדת במקור), פרש בעלי חיים ובוצות שפכים. כמו כן, על אף שימושים אחרים שהוקצו לזרמים הללו על פי המשרד להגני"ס, תיבחן הקצאתם של זרמי הנייר הקרטון והגום גם כן.

4.1.1.3. תוצרי התהליך

מלבד הביוגז תוצרי התהליך הינם: חומר ביולוגי להמשך ייצוב ע"י קומפוסטציה קצרה (85%), שאריות להטמנה (10%) ואיבוד משקל (נידוף וביוגז, 5%). איכותו וכמותו של הביוגז והחומר המוצק המתקבלים בסופו של העיכול תלויים, בין היתר, בשיטת העיכול ואף יותר מכך, במאפייני הפסולת שהוכנסה למתקן. את הביוגז המתקבל מהתהליך ניתן להשיש להשבת אנרגיה בכלל ולשימוש בתחבורה בפרט, ע"י תהליכי ניקוי שיפורטו להלן.

בתהליך עיכול רטוב נוצרים גם עודפי נוזל עשירים במלחים, חומרי דשן וחומרים אורגניים שלא התפרקו. הביוגז מתהליך העיכול האנארובי כולל: מתאן (בשיעור 50-75%), פד"ח, מימן, מימן גופרתי, אמוניה, וחומרים נוספים התלויים בתשומות התהליך (פתוגנים וכו').

טבלה 5 - הרכב ממוצע של ביוגז

Component	Chemical symbol	Concentration
Methane	CH ₄	50 – 75%-vol.
Carbon dioxide	CO ₂	25 – 45%-vol.
Water vapour	H ₂ O	2 - 7%-vol.
Oxygen	O ₂	< 2 %-vol.
Nitrogen	N ₂	< 2 %-vol.
Ammonia	NH ₃	< 1 %-vol.
Hydrogen	H ₂	< 1%-vol.
Hydrogen sulphide	H ₂ S	20–20.000 ppm

ppm: Parts per million; %-vol.: Volumetric percentage

מקור: Sustainable Energy Authority of Ireland

www.SEAi.ie

4.1.1.4. ישימות בעולם

עיכול אנארובי מיושם בדרכים שונות ברחבי העולם. בסין ובהודו, נעשה בתהליך שימוש רב לטובת השבת אנרגיה מפסולות חקלאיות, כגון פרש בעלי חיים. מרבית מהמתקנים הם בקנה מידה המותאם לחווה חקלאית או כפר קטן וברובם ככולם של המקרים מיועדים לייצור חום ו/או חשמל. בצפון אמריקה, נעשה שימוש נרחב במתקנים לעיכול אנארובי בחוות חקלאיות וכן במתקנים לטיפול בשפכים (מטי"ש). באירופה, ישנם מתקנים מסחריים הקולטים פסולת עירונית מוצקה אשר הופרדה במקור. וכיום, יש עליה במספר המתקנים המטפלים בפסולת אורגנית בלבד (אשר הופרדה משאר הפסולות).

יש כמה מאות מתקנים היום ברחבי העולם (260~) (IEA,2011), רובם מייצרים חשמל וחום, נכון להיום אין מתקני עיכול אנארובי מסחריים המייצרים דלקים לתחבורה.

חשוב להדגיש שהשמשות הביוגז לתחבורה דווקא, מייקרת משמעותית את תהליך השבת הביומסה לאנרגיה. על מנת להפוך את הביוגז (המכיל בין 50-75% מתאן) לגז שניתן להחדיר לרשת הגז, נדרש לנקות אותו ממזהמים ומפד"ח וזאת על מנת להביא את שיעור המתאן לכזה של גז טבעי (98% מתאן). לכן, במרבית מתקני העיכול המסחריים מושב הביוגז לאנרגיה בשטח המפעל בצורת חום ו/או חשמל.

4.1.1.5. תהליך ניקוי הביוגז והשמשותו לדלק לתחבורה

כאמור, הביוגז מכיל בעיקר מתאן ופחמן דו-חמצני ומכיל מזהמים שונים כשהעיקרי בהם הוא המימן הגופריתי (H_2S). שיעור התרכובות הכימיות בביוגז תלוי מהותית בתשומת התהליך.

כפי שצוין לעיל, כדי ליצור מתאן באיכות טובה שניתן יהיה להעבירו בצנרת תשתית הגז, הביוגז חייב לעבור תהליך ניקוי בו מסירים: מים, תרכובות גופרית, מולקולות אורגניות הלוגניות, פד"ח ועוד.

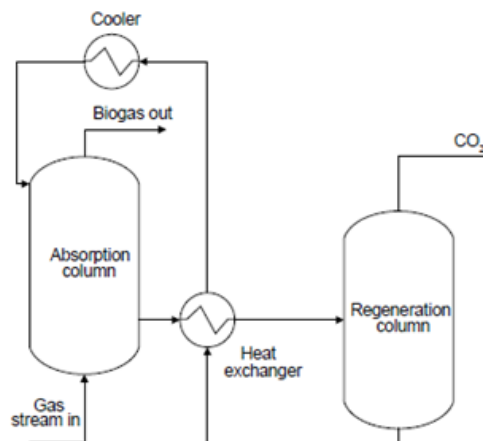
להלן תיאור חמשת הטכניקות לניקוי והשמשות הביוגז לייצור דלק לתחבורה.

1. ספיגה כימית של CO_2 ו/או H_2S (chemical absorption)

הספיגה הכימית של CO_2

בתהליך הספיגה הכימית, הביוגז מוזרם לתוך מיכל ובו תמיסת אמינים (נגזרות של אמוניה). במיכל זה, הפחמן הדו-חמצני (פד"ח) מתפצל מהביוגז, אשר יוצא ממיכל הספיגה. תמיסת האמינים והפד"ח שנתפס עוזבים את המיכל ועוברים למיכל ההפקה. הפד"ח נפלט לאטמוספירה כשארית מהתהליך. תמיסת האמינים מוחזרת למיכל הספיגה על מנת לתפוס עוד פד"ח. התמיסה מוחלפת מספר פעמים בשנה ואז היא הופכת לעוד שארית מהתהליך.

תרשים 11 - ספיגה כימית של CO_2



מקור: de Hulu, et al. (2008)

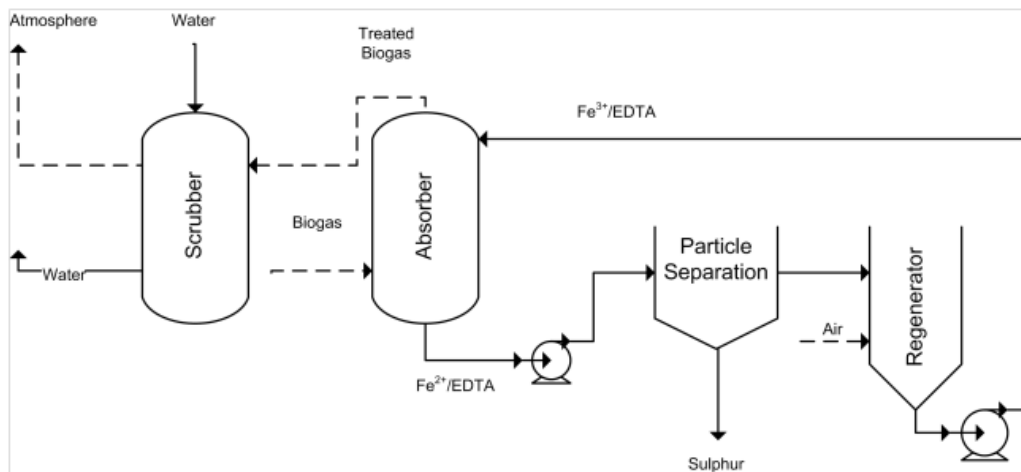
הספיגה הכימית של H_2S

ישנם מספר תהליכים להסרה של מימן גופריתי (H_2S). במרבית התהליכים, רק מסירים את ה- H_2S מהביוגז, ולא ממירים אותו לתרכובת יציבה או גופרית לטובת שימושים אחרים. היכולת להמיר H_2S לגופרית או תרכובת יציבה מהווה יתרון לתהליך הספיגה הכימית לעומת טכניקות אחרות. תהליך הספיגה

של מימן גופריתי לתוך תרכובת מתכתית הוא תהליך מאוד יעיל להסרת ה- H_2S בגלל שמדובר בהסרה סלקטיבית ובגלל שהתמיסה המתכתית משמשת כמעין זרז שניתן להשתמש בו מחדש.

בתהליך יש מיכל ספיגה, מפריד חלקיקים או מסנן, ומיכל רגנרציה. בתנאי הפעלה רציפים, הביוגז עובר למיכל הספיגה במצב של בועות קטנות הנכנסות מתחתית המיכל. הבועות עוברות בתמיסה המתכתית וזורמות למטה למפריד החלקיקים. במיכל הספיגה, המימן הגופריתי ייספג ויהפוך לגופרית. במפריד החלקיקים, החלקיקים הקטנים של הגופרית שנוצרו מופרדים מזרם המוצר. לאחר הפרדה זו, הזרם היוצא מחודש במיכל הרגנרציה. השלב האחרון של הניקוי זה שטיפת הביוגז עם מים במיכל סגור על מנת להסיר כל שאריות של ה- H_2S . כפי שצוין, היתרון המשמעותי של טכניקה זו שהמימן הגופריתי מוסר כמעט לחלוטין מהביוגז. עם זאת, חיסרון גדול שלאחר תהליך הספיגה עדיין צריך מיכל נוסף להסיר את הפחמן הדו-חמצני, כלומר בתהליך זה לא ניתן לשלב גם הסרה של פד"ח.

תרשים 12 - ספיגה כימית של H_2S



מקור: de Hulu, et al. (2008)

התהליכים הללו לא חפים מהשפעות סביבתיות והם בעלי תוצרי לוואי המצריכים טיפול וסילוק. הגופרית המיוצרת בכל פעם בתהליך של ספיגה כימית מיוצרת בכמות מועטה, וגם אם יש רצון לאסוף את הגופרית (ממספר תהליכים) לטובת מטרות אחרות (לדוגמה התעשייה הפטרו-כימית) הדבר דורש זמן רב ומשאבים ולכן לא אוגרים אותה, אלא מתייחסים אליה כאל תוצר לוואי כימי, כלומר אחד מהשאריות של התהליך. התרכובת המתכתית היא זרם פסולת נוסף שיש להחליף מספר פעמים בשנה. כאשר משתמשים בממברנה ומים לסנן את התרכובת, יש להתייחס גם אליהם כאל זרמי פסולת כימיים.

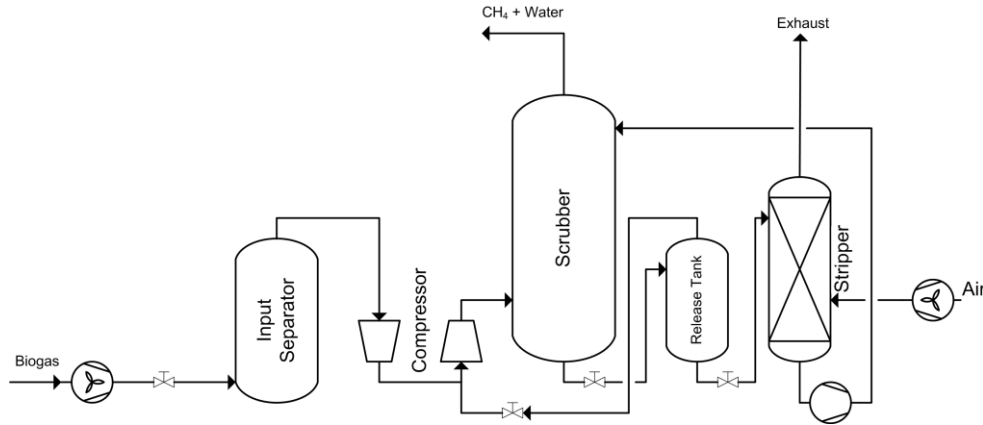
עלות ספיגה כימית של H_2S ללא הסרה מוערכת בכ-0.28 אירו למטר מעוקב (מ"ק) של ביוגז.

2. קרצוף ע"י מים בלחץ גבוה (high pressure water scrubbing)

קרצוף על ידי מים היא טכניקה המבוססת על ההשפעה הפיזיקאלית שיש על גזים המומסים בנוזלים. ניתן להשתמש בקרצוף על ידי מים להסיר פד"ח ומימן גופריתי מביוגז מאחר ומרכיבים אלו יותר מסיסים במים לעומת מתאן. בקרצוף על ידי מים בלחץ גבוה, הביוגז נכנס למיכל קרצוף (scrubber) בלחץ גבוה. לחץ גבוה זה מגדיל את המסיסות של הגזים במים. לאחר מכן, מרססים מים מהחלק העליון של המיכל,

כך שהם זורמים למטה, נגד כיוון הגז. על מנת להבטיח משטח העברה גבוה למגע של גז עם נוזל, המיכל בדרך כלל מלא עם חומר דחיסה. במיכל הבא הלחץ יורד ושאריות של מתאן יועברו לכלי התחדשות (regenerator). במיכל ההסרה (stripper) המים מועברים לכלי ההתחדשות. הפד"ח והמימן הגופרתי מוסרים על ידי האוויר בתוך הכלי. לאחר שלב של ייבוש, ניתן להגיע לאחוז מתאן של 98% והתפוקה יכולה להגיע ל-94%.

תרשים 13 - קרצוף על ידי מים בלחץ גבוה



מקור: de Hulu, et al. (2008)

ישנם שני סוגים של קרצוף מים:

- 1) **מעבר יחיד של קרצוף** - משתמשים במים רק פעם אחת. היתרון של שיטה זו שאין זיהום של המים בשיעורים גבוהים של פד"ח ומימן גפריתי. וכמובן שהחיסרון בשיטה זו שהיא דורשת כמות מאוד גדולה של מים. טכניקה זו אפשרית רק כאשר התהליך נעשה במתקן לטיפול בשפכים בו ניתן להשתמש במים ממוחזרים.
- 2) **ספיגה מתחדשת** - בשיטה זו משתמשים במים יותר מפעם אחת. היתרון המרכזי של טכניקה זו הוא שמשתמשים בכמות פחותה של מים לעומת השיטה הקודמת.

בשל העלויות הגבוהות של מים, השיטה של ספיגה מחדש מועדפת. הוספת האלמנט של לחץ גבוה לתהליך הוא מאוד חשוב. המסיסות עולה כאשר הלחץ יותר גבוה ולכן נדרשת כמות יותר קטנה של מים. כמו כן, המים מאוד רוויים ולכן תהליך ההתחדשות שלהם יהיה הרבה יותר מהיר.

לתהליך זה שני תוצרי לוואי מרכזיים. הזרם הראשון הוא של פליטות אוויר שהשתמשו בו לתהליך חידוש השימוש במים, אוויר זה כולל כמויות משמעותיות של פד"ח, שאריות של מימן גופריתי ומעט מאוד מתאן. בגלל הרעילות של מימן גופריתי יש לטפל בו כמו גם במתאן (בשל היותו גז חממה משמעותי).

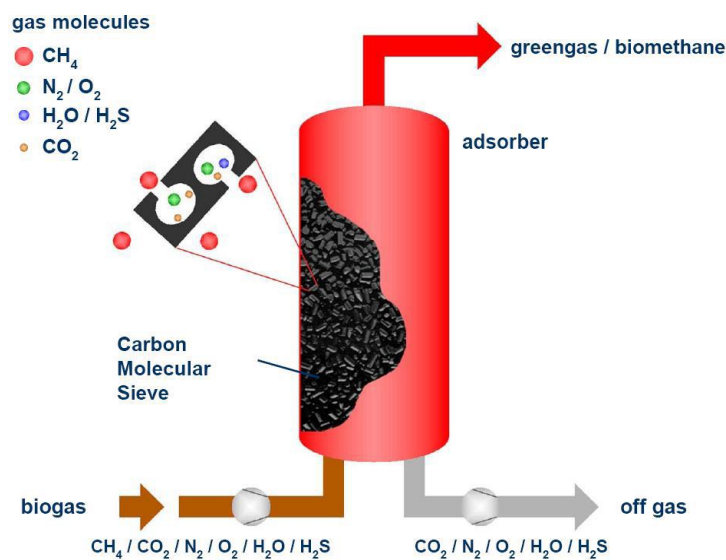
זרם הפסולת השני הוא של שפכים. כדי לשמור על רמת מסיסות גבוהה, המים השטופים מטופלים ומוחלפים במים נקיים. כך שריכוז הפד"ח והמימן הגופריתי בזרם המים העובר למיכל הקרצוף יהיה נמוך ככל האפשר. מאחר ומרבית ה-CO2 וה-H2S יספגו בשלב הגזי במיכל ההסרה, אין צורך לטפל בזרם הפסולת של המים.

עלות קרצוף על ידי מים בלחץ גבוה עומדת על 0.15 אירו למ"ק של ביוגז.

3. ספיגה באמצעות לחץ (pressure swing absorption)

טכניקה זו מפרידה רכיבים מסוימים מתערובת של גזים תחת לחץ בהתאם למאפייניהם המולקולריים וזיקתם לחומרי ספיחה מסוימים. חומר הספיחה שסופג מימן גופריתי הופך למורעל ולכן שלב נוסף להסרתו בדרך כלל משולב בטכניקה. חומרי ספיחה מיוחדים משמשים כמסננות מולקולריות בתנאי לחץ גבוהים. לבד מיכולת להבחין בין הגזים השונים, חומרי הספיחה הם חומרים מאוד נקבוביים אשר נבחרו בגלל שטח הפנים הגדול שלהם (לדוגמה, פחם פעיל, סיליקה ג'ל, אלומינה וזאוליט). התהליך אז יורד לרמות לחץ נמוכות על מנת לספוג את החומר שהוסר מהגז. תהליך ההסרה הזה מוביל לזרם פסולת, המכיל ריכוז גבוה של מזהמים שונים.

תרשים 14 - ספיגה באמצעות לחץ



מקור: de Hulu, et al. (2008)

היתרון של תהליך זה הוא הריכוז של מתאן, למעלה מ-97%, צריכת אנרגיה נמוכה ורמת נמוכה של פליטות. החיסרון המרכזי הוא הצורך בשלב נוסף להסרת H₂S.

תוצרי הלואי כוללים: חנקן (N₂), חמצן (O₂), מים (H₂O), מימן גופריתי (H₂S) ופחמן דו-חמצני (CO₂). כמו כן, ניתן למצוא שאריות משמעותיות של מתאן בזרם זה. ניתן לטפל בזרם על ידי הזרמתו למנוע גז המחובר לגנרטור.

עלות ספיגה באמצעות בלחץ עומדת על 0.26 אירו למ"ק של ביוגז (ובנוסף, נדרש תהליך סילוק מימן גופריתי).

4. הפרדה קריוגנית (cryogenic separation)

טכניקה זו עושה שימוש בטמפרטורות נמוכות, קרוב ל-90- מעלות צלסיוס ולחץ גבוה - 40 בר. בגלל שגזים שונים הופכים להיות נוזלים בטמפרטורות ולחצים שונים, ניתן להפיק מתאן מביוגז על ידי קירור ודחיסה של הביוגז כדי לנצל את הפד"ח שאז ניתן להפרידו בקלות משאר הגז. בין הטכניקות הקיימות לשדרוג הביוגז, הפרדה קריוגנית של זיהומים מהביוגז עדיין נמצאת בשלבים ראשוניים של מחקר ופיתוח.

הפרדה קריוגנית איננה עושה שימוש בחומרים כימיים ולכן איננה מייצרת פסולת כימית לעומת הטכניקות האחרות. זרם הפסולת היחידי מורכב מאחוז גבוה של CO₂ עם שאריות של מימן גופרתי ומתאן. יש צורך לטפל בזרם זה.

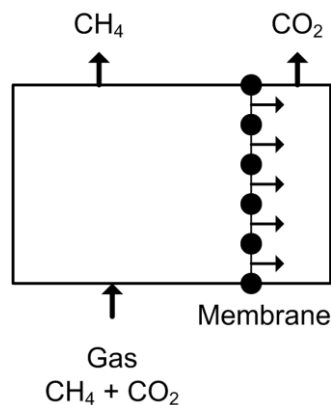
ההערכה הכלכלית של עלות הטכניקה הזו היא 0.40 אירו למ"ק של ביוגז.

5. הפרדה ממברנלית (membrane separation)

ניתן להפריד מתאן ופחמן דו-חמצני באמצעות ממברנה. בגלל ההבדלים בגודל החלקיקים או זיקתם לחומרים מסוימים, מולקולות מסוימות עוברות דרך ממברנות בעוד אחרות לא. הכוח המניע מאחורי תהליך זה הוא ההבדל בלחץ החלקי בין הגזים השונים. המאפיינים של טכניקה זו משתנים בהתאם לסוג הממברנה. אך, העיקרון הכללי הוא דומה.

לדוגמה, חברת Natcogroup¹⁷ עושה שימוש בממברנה להפרדת גז אשר פועלת בסיס של חלחול סלקטיבי. הטכנולוגיה מנצלת את העובדה שגזים מתמוססים ומתפזרים לתוך חומרים פולימריים. אם הפרש לחץ מוגדר על צדדים מנוגדים של סרט הפולימריים, הממברנה, תנועה על פני סרט (חלחול) תתרחש. קצב החלחול נקבע על פי המכפלה של מקדם המסיסות ומקדם הדיפוזיה. מולקולות קטנות מאוד ומולקולות מסיסות ביותר (כגון, הליום, מימן, פחמן דו-חמצני ומימן גופרתי) מחלחלות מהר יותר לעומת מולקולות יותר גדולות (כגון, חנקן, מתאן). כאשר ביוגז המכיל פד"ח מוזן לממברנה, הפד"ח יחדור לממברנה בקצב מהיר יותר משאר מרכיבי הגז. כך, זרם ההזנה אשר נמצא תחת לחץ מסוים, מופרד לזרם בלחץ נמוך, עשיר ב-CO₂ בצד אחד ולזרם בלחץ גבוה, עשיר במתאן בצד השני של הממברנה.

תרשים 15 - הפרדה באמצעות ממברנה



מקור: de Hulu, et al. (2008)

יעילות התהליך תלויה כמעט לחלוטין בסוג הממברנה בה משתמשים ולכן יש קושי מסוים בהערכה כלכלית של טכניקה זו. עם זאת, ניתן לקבוע כי זו טכניקה שאינה דורשת תחזוקה רבה ואינה צורכת הרבה אנרגיה. לעומת זאת, ממברנות יכולות להיות יקרות וכן מאוד שבירות. כמו כן, תפוקת המתאן, ביחס לטכניקות אחרות, היא מאוד נמוכה (בסביבות ה-78%). שאריות מהתהליך הם: גז רעיל שיש לשרוף ופחמן דו חמצני. עלות הטכניקה היא 0.22 אירו למ"ק של ביוגז.

¹⁷ חברת בת של Cameron International, <http://www.c-a-m.com/Forms/Product.aspx?prodID=F0082DA8-D130-40CF-8931-2115E7F15E80>

סיכום חמש הטכנולוגיות הללו מובא בטבלה הבאה :

טבלה 6 - סיכום חמשת הטכנולוגיות לשדרוג ביוגז ל-CNG

חיסרונות	יתרונות	ריכוז המתאן בגז	שיעור הגז המופק	עלות שדרוג (€/מ"ק ביוגז)*	טכנולוגיה
זרז יקר	הסרה כמעט מוחלטת של H ₂ S	98%	90%	0.28	ספיגה כימית
<ul style="list-style-type: none"> אין ספיגה מוחלטת של המימן הגופריתי בגלל רמת החומציות המשתנה המימן הגופריתי פוגע במתקנים תהליך הדורש הרבה מים 	<ul style="list-style-type: none"> מסיר גזים וחלקיקים שיעורי הפקה ומתאן גבוהים טכניקה יחסית פשוטה נטרול של גזים קורוזיביים 	98%	94%	0.15	קרצוף ע"י מים בלחץ גבוה
יש צורך בשלב נוסף להסרת המימן הגופריתי	<ul style="list-style-type: none"> מתאן מועשר צריכת אנרגיה נמוכה מעט פליטות ספיגה של חנקן וחמצן 	98%	91%	0.26	ספיגה באמצעות לחץ
דורש הרבה ציוד	<ul style="list-style-type: none"> ניתן להפיק כמויות גדולות עם טהורות גבוהה אין שימוש בכימיקליים בתהליך 	91%	98%	0.40	הפרדה קריוגנית
<ul style="list-style-type: none"> תפוקה נמוכה של מתאן יש צורך בשלב נוסף להסרת המימן הגופריתי הממברנה יקרה 	<ul style="list-style-type: none"> הממברנה קומפקטית ובעלת משקל קל דורש מעט תחזוקה תהליך פשוט 	90%	78%	0.22	הפרדה באמצעות ממברנה

*העלויות כוללות הסרה של מימן גופריתי

קל להיווכח מהטבלה כי טכנולוגיית הקרצוף ע"י מים בלחץ גבוה מועדפת על פני השאר, ביחסי העלות למ"ק ביוגז נכנס לתהליך, ושיעורי הגז והמתאן שהיא מייצרת. הנחת הניתוח (בעת בחינת היעילות האנרגטית והכלכלית של התהליך) היא כי זו תהיה שיטת השדרוג.

4.1.2. הידרוליזה

תהליכי הפקת האתנול מתירס ומקנה סוכר (ביו-דלק מן הדור הראשון) הינם תהליכים מוכרים וידועים בעולם זה זמן רב. בנוסף לייצור אתנול מגידולים חקלאיים עתירי עמילן, ניתן גם לייצר אותו מפסולת ביומסה של תאית (lignocellulosic). קיימים שני שלבים מרכזיים לייצור הביו-דלק: הידרוליזה והתססה (fermentation) של הסוכרים לאתנול.

הידרוליזה מבוצעת בדרך כלל על ידי אנזימים והתסיסה מתבצעת על ידי שמרים או חיידקים. הגורמים המשפיעים על יעילותה של ההידרוליזה הם: נקבוביות (שטח פנים נגישים) של חומרי הגלם (פסולת), גבישיות סיבי התאית, וכמויות הליגנין ו-hemicellulose. אחד האתגרים הגדולים בהמרת ביומסה מתאית לאתנול הוא הכמות הגבוהה של ליגנין ו-hemicellulose אשר מקשים על הגישה של האנזימים או הכימיקלים לתאית עצמה, ובכך בעצם מקטינים את היעילות של ההידרוליזה. לכן הטיפול המקדים מאוד חשוב, שכן בו תלויה רמת היעילות של ההידרוליזה וכאן טמונה הבעיה של העלות הגבוהה של הטכנולוגיה המונעת ממנה להגיע לרמה של מסחור.

4.1.2.1. טיפול מקדים

כפי שצוין לעיל, מטרתו של הטיפול המקדים היא להסיר את הליגנין ואת ה-hemicellulose, להפחית את הגבישיות של התאית ולהגדיל את הנקבוביות של החומר. הטיפול המקדים צריך לעמוד בדרישות הבאות: (1) לשפר את ההיווצרות של סוכרים או את היכולת ליצור סוכרים באמצעות ההידרוליזה, (2) להימנע מאובדן של סוכרים, (3) למנוע היווצרות של תוצרי לוואי אשר יעכבו את תהליכי ההידרוליזה וההתססה, (4) להיות יעיל וחסכוני. מאחר שהטיפול המקדים מהווה חסם ראשוני ליעילות התהליך, כיום בתחום המחקר נבחנים מספר תהליכים לטיפול מקדים, כולל: תהליך פיזיקאלי (כגון פירוליזה), פיזיקאלי-כימי (כגון פירום באמצעות קיטור – steam reforming), כימי (כגון ozonolysis תהליך בו נעשה ביקוע של אלקן או אלקין עם אוזון ליצירת תרכובת אורגנית עם קשר כפול לחמצן) וביולוגי (פירוק הליגנין על ידי שמרים).

טבלה 7 - כמויות תאית, ליגנין ו-hemicellulose בפסולת חקלאית נפוצה

Lignocellulosic materials	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (%)
Hardwoods stems	40–55	24–40	18–25
Softwood stems	45–50	25–35	25–35
Nut shells	25–30	25–30	30–40
Corn cobs	45	35	15
Grasses	25–40	35–50	10–30
Paper	85–99	0	0–15
Wheat straw	30	50	15
Sorted refuse	60	20	20
Leaves	15–20	80–85	0
Cotton seed hairs	80–95	5–20	0
Newspaper	40–55	25–40	18–30
Waste papers from chemical pulps	60–70	10–20	5–10
Primary wastewater solids	8–15	NA	24–29
Swine waste	6.0	28	NA
Solid cattle manure	1.6–4.7	1.4–3.3	2.7–5.7
Coastal Bermuda grass	25	35.7	6.4
Switch grass	45	31.4	12.0

מקור: Sun, Y., & Cheng, J. (2002)

כאמור, ככל ששיעור התאית (צלולוז) גבוה יותר- יעילות התהליך גבוהה יותר.

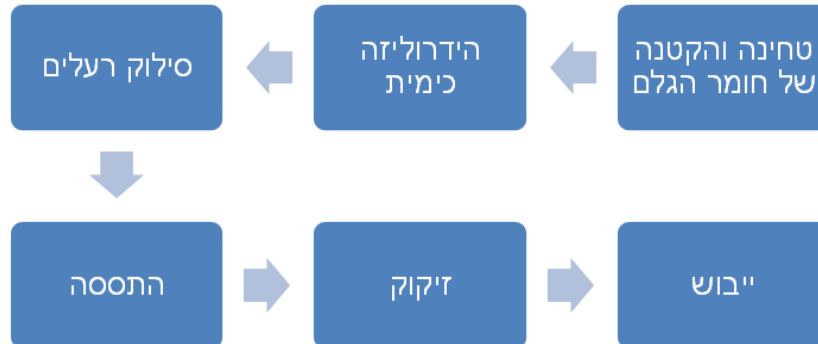
4.1.2.2. תהליך ההידרוליזה

הידרוליזה היא תהליך ביו-כימי שבו מים יוצרים ריאקציה עם חומר נוסף בכדי ליצור חומר חדש. בדרך כלל ההידרוליזה היא שלב ראשון בטכנולוגיה רבת-שלבים (אשר כוללת גם התססה וזיקוק). קיימים שני סוגים מרכזיים של הידרוליזה: הידרוליזה אנזימטית והידרוליזה כימית.

תהליך הייצור של אתנול מביומסה של תאית כולל טחינה של הביומסה לגודל של מספר מילימטרים, ואז הם עוברים תהליך של הידרוליזה כדי להוציא את הסוכרים שניתן יהיה להתסיס. אך בשלב זה יכולים להיווצר הידרוליזטים (תוצרי פירוק) רעילים, אם אכן הם נוצרים, יש צורך בשלב נוסף של סילוק רעלים. לאחר מכן ההידרוליזטים עוברים תהליך התססה לאתנול במכלי ריאקציה. האתנול עובר תהליך זיקוק ל-

90-95%, ואם מדובר באתנול כדלק לתחבורה, יש צורך לייבש אותו באמצעות מסננות מולקולריות
ללפחות 99% על מנת לאפשר את הערבוב שלו עם דלק.

תרשים 16 - תהליך ייצור אתנול מביומסה של תאית (הידרוליזה כימית)



4.1.2.3 הידרוליזה אנזימטית

הידרוליזה אנזימטית מתבצעת על ידי אנזימי תאית (cellulases / galactosidase). תוצר התהליך הוא גלוקוז שנוצר כתוצאה מפירוק הסוכרים. הידרוליזה אנזימטית היא בדרך כלל יותר זולה לעומת הידרוליזה כימית בגלל שהיא יכולה להתבצע בטמפרטורות יותר מתונות (40-50 מעלות צלזיוס), חומציות גבוהה, והתהליך אינו גורם לקורוזיה. ניתן להשתמש גם בבקטריות וגם בשמרים בתהליך לייצור האנזימים, אך הבקטריות אינן מייצרות ריכוז גבוה של אנזימים ובגלל שיש להן שיעורי צמיחה נמוכים והן דורשות תנאי גידול אנארוביים, לכן רוב המחקר לייצור מסחרי התמקד בשימוש בשמרים לתהליך ההפקה של אנזימים לצורך התהליך.

התהליך מורכב משלושה שלבים:

1. ספיחה של אנזימי תאית על פני השטח של התאית,
2. פירוק ביולוגי של התאית לסוכרי תסיסה,
3. "שחרור" התאית והפיכתה לגז או נוזל (desorption).

תהליך פירוק התאית מעוכב על ידי הדו-סוכר, cellobiose, וכן על ידי הגלוקוז. בשל סיבה זאת פותחו מספר שיטות כדי להקטין את העיכוב הזה, כולל שימוש בריכוזים גבוהים של אנזימים, הוספת β -glucosidases בזמן ההידרוליזה, וההסרה של הסוכרים בזמן ההידרוליזה באמצעות אולטראפילטראציה או פעולה סימולטנית הכוללת המרה לסוכר והתססה (simultaneous saccharification and fermentation - SSF). בתהליך ה-SSF, הסוכרים המיוצרים בתהליך ההידרוליזה ובתהליך ההמרה לסוכר (saccharification) עוברים התססה מקבילה אשר בסופה מיוצר האתנול. שילוב התהליכים אמור להפחית באופן משמעותי את עיכוב תוצרי ההידרוליזה.

4.1.2.4 הידרוליזה כימית

בהידרוליזה כימית חושפים את החומרים המרכיבים את התאית לכימיקל לפרק זמן בטמפרטורה מסוימת, כאשר התוצאה היא סוכרים מונומרים. חומצה גופרתית היא כימיקל בו נעשה שימוש במרבית

מהניסויים. ניתן לחלק את ההידרוליזה הכימית לשני סוגים מרכזיים: (1) הידרוליזה של חומצה מרוכזת, (2-1) הידרוליזה של חומצה מדוללת.

הידרוליזה של חומצה מרוכזת היא תהליך יחסית ותיק. תהליך זה נוטה לתת תפוקה יותר גדולה של סוכרים וכתוצאה מכך תפוקה יותר גדולה של אתנול לעומת הידרוליזה של חומצה מדוללת. כמו כן, תהליך זה יכול להיות מבוצע בטמפרטורה יותר נמוכה (40 מעלות צלזיוס) לעומת התהליך השני. עם זאת, לתהליך יש מספר חסרונות משמעותיים: (1) הריכוז של החומצה הוא מאוד גבוה (בין 30 ל-70 אחוז) והדילול והחימום של החומצה המרוכזת גורם לקורוזיה. לכן, התהליך דורש סגסוגת יקרה או בניה מיוחדת ללא מתכות, (2) אחזור החומצה הוא תהליך עתיר אנרגיה, (3) כאשר משתמשים בחומצה גופרתית, תהליך הנטרול מייצר כמויות גדולות של גבס (gypsum). נכון לעכשיו ההשלכות הסביבתיות של התהליך מגבילות את השימוש בו. כמו כן, העלויות הגבוהות, הן מבחינת השקעה והן מבחינת עלויות תפעול, מונעות את המסחר של התהליך.

הידרוליזה של חומצה מדוללת היא השיטה הנפוצה ביותר מבין שיטות ההידרוליזה הכימיות. היא יכולה לשמש כשיטה לטיפול מקדים לפני ההידרוליזה האנזימטית או כטכניקה בפני עצמה לפירוק הסוכרים. ההידרוליזה מבוצעת בשלב אחד למספר דקות. החיסרון המרכזי של התהליך, במיוחד כאשר מדובר בשלב אחד, זה הירידה ברמה של הסוכרים במהלך הריאקציה והיווצרות של מוצרי לוואי לא רצויים (כגון, תרכובות לא אורגניות, חומצות שונות, תרכובות פנוליות ועוד). כלומר יש תפוקה יותר נמוכה של סוכרים וחלק מתוצרי הלוואי מעכבים את היווצרות האתנול בשלב ההתססה. על מנת למנוע את המצב הזה, מבצעים את התהליך בשני שלבים או יותר.

בשלב הראשון, בתנאים מתונים, ה- hemicellulose מומר למונומרים סוכריים (זה שווה ערך לטיפול מקדים של החומר).

בשלב השני, המוצק שנותר עובר הידרוליזה בתנאים יותר מחמירים – הטמפרטורות נעות בין 140 ל-170 מעלות צלסיוס או לחילופין ניתן לבצע את שני השלבים ב-120 מעלות.

טבלה 8 - השוואת החסרונות והיתרונות של הידרוליזה של חומצה מרוכזת והידרוליזה של חומצה מדוללת

שיטת ההידרוליזה	יתרונות	חסרונות
הידרוליזה של חומצה מרוכזת	<ul style="list-style-type: none"> מתבצע בטמפי' נמוכות תפוקה סוכרים גבוהה 	<ul style="list-style-type: none"> ריכוז חומצה גבוה קורוזיה של הציוד צריכת אנרגיה גבוהה לאחזור החומצה זמן תגובה ארוך יותר (2-6 שעות)
הידרוליזה של חומצה מדוללת	<ul style="list-style-type: none"> ריכוז נמוך של החומצה זמן תגובה קצר (מספר דקות) 	<ul style="list-style-type: none"> מתבצע בטמפי' גבוהה תפוקת סוכרים נמוכה קורוזיה של הציוד תוצרי לוואי בלתי רצויים

מקור: Taherzadeh, M. J., & Karimi, K. (n.d.). Acid-based hydrolysis processes for ethanol from lingocellulosic : http://www.ncsu.edu/bioresources/BioRes_02/BioRes_02_3_472_499_Taherzadeh_K_BioEthanol_Review.pdf

4.1.2.5. נצילות

כפי שצוין, בארה"ב יש מדיניות מתקדמת לקידום הפקת דלקים מתאית. בנוסף להערכות הכלכליות, משרד האנרגיה האמריקאי (DOE) פרסם את התפוקות פוטנציאליות להפקת אתנול מתאית.

שילוב תחליפי נפט מבוססי פסולת במערך התחבורה בישראל
 עבור המנהלת לקידום תחליפי נפט במשרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים
 שלב א': סקר ספרות

טבלה 9 - הערכות של תשואות תיאורטיות של חומרי גלם נבחרים

תפוקת אתנול (גלון/טון יבש של חומר גלם)	חומר גלם
113.0	שאריות תירס (Stover)
109.9	קש מאורז (Rice Straw)
56.8	שאריות ממנפטת כותנה (Cotton Gin Trash)
81.5	שאריות מיערות (Forest Thinning)
100.8	נסורת (Hardwood Sawdust)
111.5	פסולת (Bagasse)
96.7	קליפות (Switch grass)

מקור: U.S. DOE, http://www.afdc.energy.gov/fuels/ethanol_feedstocks.html

4.1.2.6. הערכת עלויות

בסוף 2011, NREL פרסם מודל טכנו-כלכלי אשר סיפק עלות ייצור אבסולוטית עבור אתנול (כאשר חומר הגלם הוא פסולת חקלאית: שאריות תירס). הדו"ח בעצם משמש כמעין אמת מידה שנגדה אפשר להעריך את הפוטנציאל של התהליך. המטרה המרכזית שלו הייתה לסייע למשרד האנרגיה האמריקאי (DOE) לקבל החלטות מושכלות יותר לגבי הצעות מחקר הטוענות שהן יכולות לייצר אתנול במחירים יותר נמוכים. חוקרי התהליך גם כימתו את תהליכי ההמרה השונים על מנת לבחון איזה מהתהליכים הוא היקר ביותר, וכן כיצד ניתן לתעדף אותם על מנת לנסות ולהפחית עלויות. המחיר הכי נמוך אליו הגיעו הוא 2.15\$/גלון. סיכום של ההערכות הללו ניתן למצוא בתרשים הבא:

תרשים 17 - סיכום כלכלי של ייצור אתנול מפסולת חקלאית (שאריות תירס) בתהליך הידרולוגיה

Ethanol Production Process Engineering Analysis

Corn Stover Design Report Case: 2012 model DW1102A
 Dilute Acid Pretreatment with Enzymatic Hydrolysis and Co-Fermentation
 All Values in 2007\$

Minimum Ethanol Selling Price (MESP):	\$2.15 /gal
Gasoline-Equivalent MESP:	\$3.27 /gal gasoline equivalent
Contributions:	
Feedstock	\$0.74 /gal
Enzymes	\$0.34 /gal
Non-Enzyme Conversion	\$1.08 /gal
Ethanol Production	61.0 MMgal/yr (Ethanol at 68 °F)
Ethanol Yield	79.0 gal / dry U.S. ton feedstock
Feedstock + Handling Cost	\$58.50 /dry U.S. ton
Internal Rate of Return (After-Tax)	10%
Equity Percent of Total Investment	40%

Capital Costs		Manufacturing Costs (cents/gal ethanol)	
Pretreatment	\$29,900,000	Feedstock + Handling	74.1
Neutralization/Conditioning	\$3,000,000	Sulfuric Acid	2.4
Saccharification & Fermentation	\$31,200,000	Ammonia	6.5
On-site Enzyme Production	\$18,300,000	Glucose (enzyme production)	19.3
Distillation and Solids Recovery	\$22,300,000	Other Raw Materials	12.9
Wastewater Treatment	\$49,400,000	Waste Disposal	2.5
Storage	\$5,000,000	Net Electricity	-10.8
Boiler/Turbogenerator	\$66,000,000	Fixed Costs	17.5
Utilities	\$6,900,000	Capital Depreciation	22.0
Total Installed Equipment Cost	\$232,000,000	Average Income Tax	12.3
		Average Return on Investment	56.6
Added Direct + Indirect Costs	\$190,500,000		
(% of TCI)	45%	Manufacturing Costs (\$/yr)	
Total Capital Investment (TCI)	\$422,500,000	Feedstock + Handling	\$45,200,000
		Sulfuric Acid	\$1,500,000
Installed Equipment Cost/Annual Gallon	\$3.80	Ammonia	\$4,000,000
Total Capital Investment/Annual Gallon	\$6.92	Glucose (enzyme production)	\$11,800,000
		Other Raw Materials	\$7,900,000
Loan Rate	8.0%	Waste Disposal	\$1,500,000
Term (years)	10	Net Electricity	-\$6,600,000
Capital Charge Factor (Computed)	0.131	Fixed Costs	\$10,700,000
		Capital Depreciation	\$13,400,000
Denatured Fuel Production (MMgal/yr)	61.7	Average Income Tax	\$7,500,000
Denatured Fuel Min. Sales Price	\$2.18	Average Return on Investment	\$34,600,000
Denaturant Cost (\$/gal denaturant)	\$2.10		
		Specific Operating Conditions	
Maximum Yields (100% of Theoretical)		Enzyme Loading (mg/g cellulose)	20
Ethanol Production (MMgal/yr)	80.3	Saccharification Time (days)	3.5
Theoretical Yield (gal/U.S. ton)	103.9	Fermentation Time (days)	1.5
Current Yield (Actual/Theoretical)	76.0%	Ethanol titer (wt%)	5.4%
		Excess Electricity (kWh/gal)	1.8
		Plant Electricity Use (kWh/gal)	3.9
		Plant Water Usage (gal/gal)	5.4

NREL, <http://www.nrel.gov/biomass/pdfs/47764.pdf> : מקור

לעומת הערכות ה-DOE, סקר שערכה חברת Bloomberg New Energy Finance (BNEF, 2013) בקרב 11 השחקנים המובילים בתעשיית האתנול מתאית הראה כי עלות ייצור אתנול מתאית עומדת על כ-\$0.94/ליטר (כ-\$3.56/גלון), כ-40% יותר מאתנול המיוצר מתירס (כ-\$0.67/ליטר, כ-\$2.54/גלון). להערכת החברה, פער זה ייסגר לקראת 2016.

4.1.2.7. ישימות

כיום, ברחבי העולם, יש 14 פיילוטס להידרוליזה אנזימטית, תשעה מפעלי הדגמה ו-10 מפעלים מסחריים למחצה שנמצאים בשלבי תכנון או שאמורים להיפתח בקרוב. חמישה מהמפעלים המסחריים למחצה נמצאים בארה"ב ומפעלים נוספים צפויים להיפתח בברזיל. על פי Bloomberg New Energy Finance מתקן מסחרי למחצה עם תפוקה של 90 מיליון ליטר בשנה דורש השקעת הון ראשונית של כ-290 מיליון דולר.

תרשים 18 - אתרי מתקנים לייצור אתנול מתאית



Non-U.S./Canada Technological Development, by Location

Cellulosic Biofuel Production Facilities Outside of the U.S./Canada Developing Technologies for Deployment in the U.S.



KEY	★	PILOT/DEMONSTRATION FACILITY
	★	COMMERCIAL FACILITY (UNDER CONSTRUCTION/COMMISSIONING)
	★	COMMERCIAL FACILITY (ENGINEERING STAGE)

מקור: Advanced Ethanol Council, 2012, http://ethanolirfa.3cdn.net/d9d44cd750f32071c6_h2m6vaik3.pdf
 תערה: תרשים זה מציג את רוב האתרים בעולם, אך לא את כולם.

אחת מהחברות המקדמות את הנושא, היא החברה Du Pont. החברה פרסמה כי היא מעריכה שמתשומה של 375,000 טון/שנה של גבעולי תירס ניתן יהיה להפיק 30 מיליון גלון/שנה, ממוצע של 80 גלון אתנול לטון חומר גלם יבש.

4.1.2.8. מדיניות ורגולציה

נכון להיום ארה"ב מובילה בתמריצים שונים לעידוד הפיתוח של מפעלים להפקת אתנול מתאית:

- **זיכוי מס להפקת דלק מתאית** - יצרן המפיק אתנול מתאית, אשר רשום במשרד מס ההכנסה האמריקאי (IRS) זכאי לתמריץ מס בסך של עד 1.01 דולר לגלון של ביו-דלק. אם הדלק זכאי גם לזיכוי מס דלק מאלכוהול, האשראי יורד ל-0.46\$ לגלון כשמדובר באתנול ו-0.41\$ לגלון לביו-דלק שאינו אתנול.
- **ניכוי פחת מיוחד למפעל המייצר דלק מתאית** - בעל מפעל יכול לקחת ניכוי פחת על בסיס המחיר המותאם של מפעל חדש לייצור דלק מתאית. כל חלק ששולם באמצעות אגרות חוב פטור מניכוי הפחת. התמריץ ניתן רק למפעלים שנבנו מדצמבר 2006 עד ינואר 2014, למרות שנעשים מאמצים על ידי התעשייה לשנות את זה.
- **זיכוי מס על הקמת תשתיות לדלקים אלטרנטיביים** - זיכוי זה ניתן עבור ציוד חדש המותקן עבור ייצור דלקים אלטרנטיביים. הדלקים הנכללים בקטגוריה זו הם: גז טבעי, גז פחמימני מעובה, מימן, חשמל, אתנול 85%, או סולר המכיל לפחות 20% של ביודיזל. סכום האשראי הוא עד 30% מהעלות, אשר לא עולה על 30,000 דולר עבור ציוד שנקנה לפני ינואר 2009 או אחרי ינואר 2011. עבור ציוד שנקנה בין ינואר 2009 לבין דצמבר 2010, האשראי עומד על 50% והעלות לא יכולה להיות יותר גבוהה מ-50,000 דולר.

ה"מנדט" לייצור אתנול מתאית, על פי חוק הביטחון והעצמאות האנרגטית של ארה"ב משנת 2007 (the Energy Independence and Security Act (EISA), היה אמור להתחיל ב-2010 עם תפוקה של 100 מיליון גלון, ולאחר מכן עם עליה ל-250 מיליון ב-2011 ו-500 מיליון גלון ב-2012. המנדטים גדלים בצורה משמעותית לאחר 2012, כאשר הם עולים ל-16 מיליארד גלון ב-2022 – כלומר מיליארד יותר מהתפוקה המקסימאלית היום של אתנול מתירס. ההערכה היא כי יקשה מאוד לעמוד ביעדים של המנדטים הללו, מאחר שנכון להיום אין מפעל מסחרי אחד שיכול להפיק כמות כזו. לכן, המנדטים של המשרד להגנת הסביבה האמריקאי (EPA) ירדו באופן משמעותי לעומת מה שכתוב בחוק – ב-2010 המנדט להפקת אתנול מתאית ירד ל-6.5 מיליון גלון וב-2011 היעד היה 6.6 מיליון גלון.

נכון ל-2013, אין הסכמה בין התעשייה לבין המשרד להגנת הסביבה האמריקאי לגבי המנדט להפקת אתנול מתאית. ה-EPA מתכנן להוציא מנדט לייצור 14 מיליון גלון של אתנול מתאית, בעוד ההערכות של משרד האנרגיה קובע כי רק 5 מיליון גלון יהיה זמין. אם מפיקים של אתנול מתאית אינם עומדים ביעדי המנדט, הם נקנסים. לכן, הם פנו לבית משפט פדרלי, אשר ביטל את המנדט של המשרד להגנת הסביבה האמריקאי.

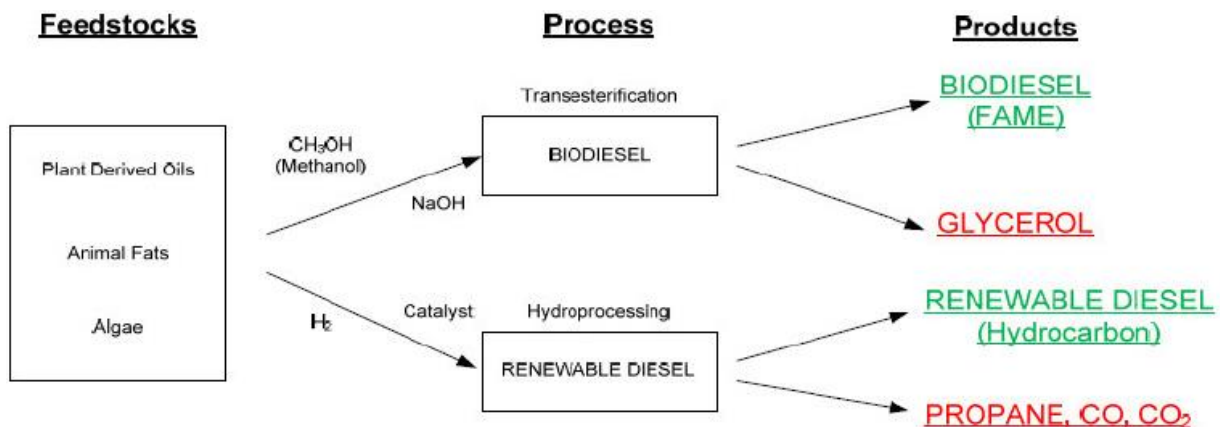
4.2. ייצור ביודיזל מפסולת שמנים ושומנים

4.2.1. רקע

קיימים שני תהליכים, שיפורטו בפרק זה להפקת ביודיזל מפסולות שמנים ושומנים. התהליך הנפוץ ביותר לייצור ביודיזל הוא תהליך הטרנסאסטרופיקציה, המתבצע בטמפי של כ-50-70 מ"צ, ונוצרים בו מתיל אסטרס הידועים בעולם בשם FAME (Fatty Acid Methyl Esters) והוא הביודיזל הנפוץ לשימוש כיום. התהליך השני שיתואר הינו הידרוגנציה שתוצרו (Hydrogenation-Derived Renewable Diesel) HDRD.

תוצרי ה-FAME וה-HDRD יכולים להיות מיוצרים מאותם חומרי גלם, כאשר השכיחים ביניהם הם שומן בע"ח ושומנים צמחיים המורכבים מטריגליצרידים. עם זאת, ההרכב הכימי והתכונות הפיזיקאליות של שני התוצרים שונים וזה מפאת ההבדלים בתהליכי הייצור. התרשים הבאה מציגה את שני התהליכים ותוצרי הלוואי. ביודיזל מיוצר ע"י טראנסאסטרופיקציה עם גליצרול כתוצר לוואי, ו-HDRD מיוצר ע"י הידרוגנציה עם פרופאן, פחמן חד-חמצני, ופחמן דו-חמצני כתוצרי לוואי.

תרשים 19 - ייצור FAME ו-HDRD, תהליכים ותוצרי לוואי



מקור: Munoz et al. (2012)

אורך השרשרת ורמת הרוויה של חומצות השומן בחומר הגלם חשובה ומשפיעה על התכונות הפיזיקליות של ה-FAME או ה-HDRD. חומרי גלם שונים יהיו בעלי אחוזים שונים של חומצות שומן וקשרים רוויים. לדוגמא: שומן בע"ח יהיה בעל יותר חומצות שומן רוויות מאשר שמנים צמחיים.

הפרק יחל בהצגת זרמי הפסולת הרלוונטיים לתהליכים הללו וניסיון לאמוד את כמות פסולת השמנים והשומנים הזמינות לתהליך. לאחר מיכן יתוארו תהליכי הטרנסאסטרופיקציה וההידרוגנציה על מגוון היבטיהם.

4.2.2. היצע פסולות השמנים בישראל

מקורות לייצור ביודיזל מפסולות שומנים מהחי והצומח (Fats, Oils and Grease - FOG):

- **שמן בישול משומש - Yellow Grease**
- **שמן ממפרידי שומן - Brown Grease** (היכול להגיע ממספר מקורות – לדוגמה, בורות איסוף במסעדות בבתי מלון – כ-50% שמן, השאר זה מים ומוצקים)
- **בוצה אורגנית - שומנים ושומנים ממתקני טיפול שפכים (כ-30% שמן, 20% מוצקים, 50% מים)**
- **שמן משומן בעלי חיים**

כמויות פסולת שמנים בישראל

נכון להיום, אין אומדן מדויק של כמויות פסולות השמנים המיוצרות בישראל. עפ"י נתוני יבוא השמנים המעובדים וגרעיני שמן מהלמ"ס, מיובאים לארץ כ-250,000 טון שמנים בשנה, כאשר בהערכה גסה 50-80% מהם הופכים לפסולת ומוצאים דרכם לביוב. אין נתונים מדויקים על פסולת השמנים הנאספת, אך ההערכה היא כי ישנו פוטנציאל מקסימלי של כ-50,000-80,000 טון היכולים להיאסף, כאשר בפועל בשל סילוק לא חוקי של הפסולות וכן בשל איסוף פיראטי הכמות המעשית לאיסוף עומדת על כ-12,000 טון בשנה¹⁸.

במדינות רבות ובעיקר באירופה ובארה"ב השמן נאסף בצורה יותר יעילה ונאסף גם ממשקים ביתיים.¹⁹

4.2.3. טראנסאסטרופיקציה

קטליזטור בסיסי מפריד טריגליצרידים לשרשראות שומן עליהן מוסף אלכוהול ליצירת ביודיזל. בסוף התהליך נותר גליצרול כמוצר לוואי.

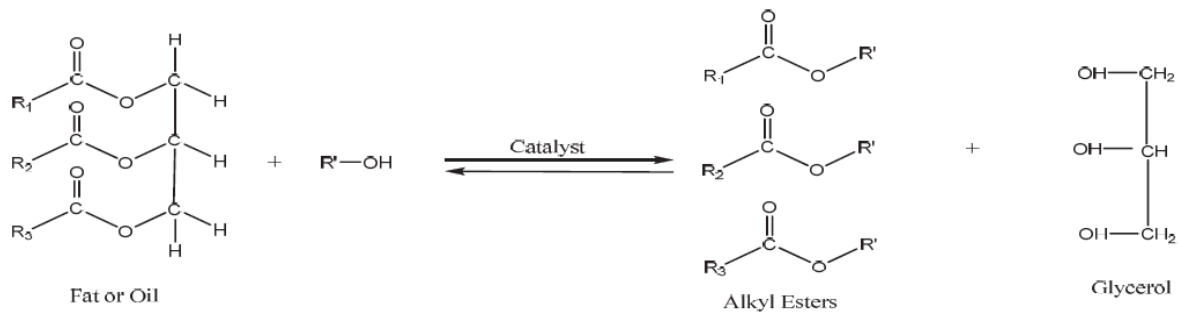
הכוהל המוסף לתהליך הוא בד"כ מתנול אשר מבחינת יעילות ומחיר עדיף על אתנול (אשר גם הוא יכול לשמש לתהליך). עם זאת, מתנול הוא דליק ורעיל ביותר ולפיכך מצריך אמצעי בטיחות ואישורים מיוחדים לשימוש. בתהליך זה, המתבצע בטמפ' של כ-50-70 מעלות צלסיוס, נוצרים מתיל אסטרים הידועים בעולם בשם FAME (Fatty Acid Methyl Esters) והוא הביודיזל הנפוץ בשימוש. הליך זה אינו מתבצע על שרשראות שומן חופשיות (FFA) מכיוון שבשמן יש חומצות שומן המחוברות לשלד גליצרול. בשמנים שטוגנו הרבה פעמים או הזדהמו יש שרשראות שומן שלא קשורות לשלד הגליצרול ועליהן תהליך הטרנסאסטרופיקציה לא עובד, הם מתרכבות עם הקטליזטורים ויוצרות סבון המעכב את התהליך ולכן יש לסלקן. ככל שיש יותר חומצות שומן חופשיות בשמן המוצא, כך יעילות התהליך יורדת ולכן בשמנים ירודים בעלי אחוז גבוה של חומצות שומן חופשיות יש צורך בטיפול מקדים של אסטרופיקציה בנוכחות חומצה כדי להוריד את רמת חומצות השומן החופשיות.

¹⁸ זאת בהתאם לראיונות עם בני קרן מחברת רפא"ל (מטעם גרין סיטי) ושי מדיוני מחברת פאנדאנגו, בהם עולה פוטנציאל של כ-1000 טון בחודש

¹⁹ מידע על האיסוף במדינות שונות באירופה בקישור הבא:

<http://www.probio-project.com/documents-probio/012%2808%29-PROBIO.Analytical%20study%20about%20waste%20oil%20collection%20networks%20%28D11%29.pdf>

תרשים 20 - תהליך הטרנסאסטרופיקציה של שמנים ושומנים



4.2.3.1 טרנסאסטרופיקציה אנזימטית

בחברת גרין סיטי הישראלית פיתחו שיטה לטרנס אסטרופיקציה בנוכחות אנזימים. יתרונות התהליך הם שבעזרת האנזימים ניתן לעשות אסטרופיקציה וטרנסאסטרופיקציה בשלב אחד ולכן יעילות התהליך אינה תלויה במספר חומצות השומן החופשיות שבשמן, לכן ניתן להשתמש גם בשמנים ירודים כחומרי גלם. זמן הריאקציה מספר דקות באופן רציף (בשונה מריאקציות אנזימטיות שדורשות תגובה "batches"), והיא מתבצעת ב-35 מעלות צלסיוס²⁰.

4.2.3.2 יעילות התהליך

מנתוני מפעלים בקליפורניה (BioCycle, 2009) מ-40,000 גלון של שמן ניתן לייצר 34,000 גלון של ביודיזל (כ-85%) בשיטת הטרנסאסטרופיקציה עם הקטליזטור הבסיסי, כאשר השמנים (חומרי הגלם) מכילים 2-7% חומצות שומן חופשיות ועד 10% מים ומוצקים. איכות הביודיזל המופק מתהליכים אלו נקבע עפ"י איכות חומרי הגלם.

בחברת גרין סיטי מסרו שבתהליך האנזימטי, מכיוון שהתהליך פועל גם על חומצות השומן החופשיות, יחסי כמויות שמני גלם/ביודיזל הם כמעט 1:1.

כלומר, בהנחה כי הפוטנציאל הכולל בישראל הוא כ-80,000 טון לשנה (שהינו כאמור ההיצע המקסימלי, שאינו ישים) - ניתן להפיק כ-70,000 טון או כ-79,500 מ"ק ביודיזל לשנה. מנתוני ועדת כלכלה שבכנסת²¹, הצריכה ב-2010 של סולר הייתה 2.79 מיליון מ"ק. כלומר, פוטנציאל הפקת ביודיזל משמנים זניח ביחס לביקושים.

4.2.3.3 תוצרי התהליך

לתהליך הטרנסאסטרופיקציה 2 תוצרים: מתיל אסטר (ביודיזל) וגליצרול (כ-10%). תוצר הלוואי גליצרול יכול לשמש את התעשייה: הוא מוצר צריכה המשמש כמרכיב בסיסי בסבונים (אם כי הוא לא מהווה חלק מהסבון עצמו אלא משמש כתוסף), משחות ומוצרי קוסמטיקה רבים, והוא שמעניק להם מרקם שמנוני. הגליצרול יכול לרכך עור מיובש. בתעשיית המזון הוא משמש כחומר הלחה וכמסמיד, ומסומן במספר E: "E422". מחיר הגליצרול תלוי בניקיון המוצר והוא בין \$500-\$1500 לטון.

²⁰ עוד מידע על התהליך בקישור הבא: <http://www.greencityltd.com/enzymescience.html>

²¹ <http://www.knesset.gov.il/mmm/data/pdf/m02780.pdf>

בחברת גרין סיטי הישראלית, נמצא שהגליצרוֹל המופק בתהליך הוא בעל ניקיון מעל 85%, אך כיום הוא אינו נמכר בגלל הכמויות הקטנות.

עלות הייצור של ביודיזל משתנה כאמור עפ"י עלות חומרי הגלם, אך בכל צורות ייצור הביודיזל נמצא כי עלות הייצור גבוהה מעלות ייצור דיזל מחצבי (OECD, 2011).

4.2.3.4. היבטים כלכליים

מסקירה של הליכי ייצור הביודיזל בעולם משמני מאכל ופסולת שמני מאכל בתהליך הטרנסאסטרופיקציה עולה כי חלק הארי מעלות התהליך (80%-60%) הוא עלות השמן הצמחי.

שמן טיגון – yellow grease או used cooking oil (UCO), הוא פסולת השמנים באיכות הטובה ביותר והינו מוצר הנסחר בבורסות העולם. מחירים נקבע על פי היצע וביקוש בעולם וניתן לראות את המחיר משתנה על בסיס יומי²². מחירים אלה מהווים אינדיקציה בשוק העולמי וכמובן מושפעים גם מהיצע וביקוש מקומיים. לפיכך, קיימים מקרים בהם השמן בארץ זול או יקר יותר (באחוז מסוים) מהמחיר בבורסת ארה"ב. נכון להיום, ההערכות של עלות ה-yellow grease נעות בין \$800-900 לטון. מחירים אלו נחשבים למאוד גבוהים – רק לשם השוואה, דיזל רגיל (לאחר הזיקוק) עולה \$900 לטון (לפני מס).

שמנים נחותים יותר, "brown grease", המגיעים ממתקני טיפול שפכים או בורות איסוף במסעדות של בתי מלון, אינם בעלי מחיר בורסאי ונסחרים עפ"י היצע וביקוש. על מנת לחשב את המחיר של brown grease, מחשבים את ה-% של השמן ומשלמים רק עליו. המחיר מגיע לכמה מאות דולרים, בסביבות ה-\$300.

בארץ, בשונה ממדינות אירופה, ארה"ב וברזיל, אין תקן לקביעת איכות פסולת השמנים לשימוש כחומר גלם בתעשיית המזון לבע"ח. לפיכך יש תחרות בין יצרני ביודיזל לתעשייה זו גם בשמנים ירודים ורמת המחירים היא יחסית גבוהה.

ממחקרים שנעשו בארה"ב (Zhang et al., 2003) לגבי הכלכליות של ייצור הביודיזל עולה כי בתהליך טרנסאסטרופיקציה עם קטליזטור בסיסי, שהוא הנפוץ ביותר בשימוש, המשפיעים העיקריים הם מחיר חומר הגלם וקיבולת המפעל (כמה המפעל יכול לייצר).

בארץ (עפ"י חב' גרין סיטי) עלות התהליך בין 3-1\$ לליטר (תלוי במחיר השמן כחומר הגלם, כאשר הוא יקר יחסית בארץ בגלל התחרות עם מכוני המזון לבע"ח). מפעל גרין סיטי הוא בעל קיבולת של כ-1,000 טון/חודש אך מייצר בפועל רק 100 טון/חודש בשל זמינות נמוכה של חומרי הגלם (קיימת תחרות עם תעשיית המזון לבעלי חיים). כמות ה-break-even- תהיה 300 טון/חודש במחיר הביודיזל הנוכחי (הנמכר בינתיים רק לתעשייה במחיר 4\$/ליטר).

²²אתר המרכז את כל מחירי השמן המשומש כמו גם מחירי שמן סויה (גולמי) בבורסות ארה"ב השונות:

<http://usda.mannlib.cornell.edu/usda/ams/LSWAGENERGY.pdf>

4.2.4. הידרוגנציה

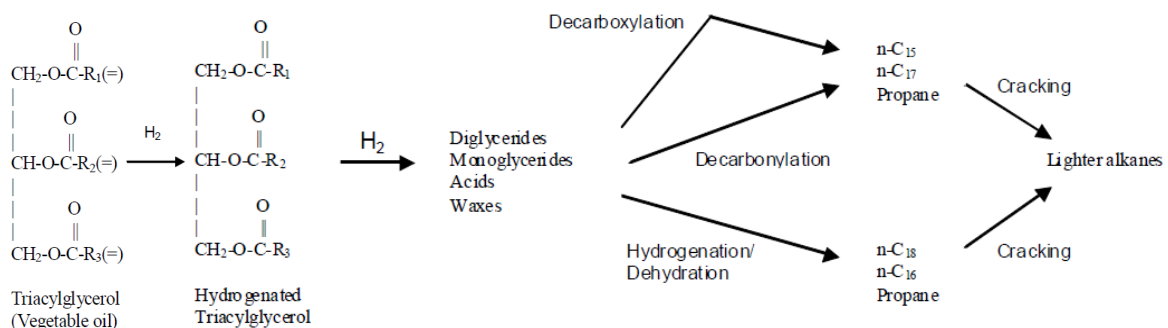
HDRD יכול להיות מיוצר מטווח רחב יותר של חומרי גלם יחסית לביודיזל המיוצר בתהליך טרנסאסטרופיקציה, וזאת מהסיבות הבאות:

- בטרנסאסטרופיקציה נוצרים מתיל אסטרים עם דרגות שונות של קשרים בלתי רוויים. תוצרים אלו רגישים לחמצון היכול להביא לחוסר יציבות של החומרים באחסון ובהובלה. תהליך ההידרוגנציה ליצירת HDRD מייצר פחמימנים פראפיניים בעלי קשרים רוויים בלבד ולכן לא נוטים לחוסר יציבות. מכאן, טווח רחב יותר של חומרי גלם יכול לשמש לייצור HDRD יחסית ל-FAME מכיוון שכמות הקשרים הלא-רוויים בחומר המקור לא משפיעה על תכונות הדלק.
- בתהליך ייצור ה-FAME בשיטת הטרנסאסטרופיקציה יש השפעה רבה לחומצות השומן החופשיות (אשר בשמנים מאיכות נמוכה נמצאות באחוז גבוה), חומצות אלו אינן הופכות למתיל אסטר ולכן יש ירידה בכמות התוצר הסופי. כמו כן, בתהליך הטרנסאסטרופיקציה חומצות השומן החופשיות מתרכבות עם הקטליזטור וגורמות להאטת התהליך וגם ליצירת סבון שיש לסלקו. בתהליך ההידרוגנציה חומצות השומן החופשיות יכולות להפוך לפאראפיניים ולכן אין חשיבות מאוד גדולה למספרן בחומר המוצא.

4.2.4.1. תיאור התהליך

המטרה העיקרית של הידרוגנציה של טריגליצרידים היא להוציא מולקולות חמצן ולפתוח קשרים כפולים בכדי לייצר n-אלקנים פאראפיניים. מימן מגיב עם טריגליצרידים בטמפרטורות ולחץ גבוהים בנוכחות קטליזטורים כדי לעשות הידרוגנציה לקשרים הכפולים בשרשראות חומצות השומן בטריוגליצריד. בהמשך, שלד הגליצרול נשבר והחמצן מוצא וכך נוצרים ה-n-אלקנים.

תרשים 21 - תהליך ההידרוגנציה



מקור: Munoz et. al (2012)

4.2.4.2. מקור המימן

המימן בד"כ נוצר מקיטור של גז טבעי או פחם בטמפ' גבוהות. בנוסף לשימוש בדלק מחצבי כחומר גלם ליצירת המימן, יצירת הקיטור מצריכה תשומות אנרגיה וטמפ' גבוהות אשר גם צורכות אנרגיה. עם זאת, יש מספר דרכים לקבל המימן בדרך ברת-קיימא ובלי שימוש באנרגיה מחצבית (אך בעלויות יותר

גבוהות): אלקטרוליזה של מים, כאשר החשמל לאלקטרוליזה מיוצר ממקורות מתחדשים, גז ממטמנות כחומר גלם ליצירת הקיטור, ביקוע מים פוטו-קטליטי בשימוש באנרגיה סולארית, ויצור מימן ע"י אנזימים.

אחד היתרונות של תהליך ייצור ה-HDRD הוא שניתן לייצר באמצעות טכנולוגיות זיקוק קיימות. יחידות הידרוגנציה נמצאות בשימוש בבתי זיקוק קונבנציונאליים ומשמשות לניקוי דיזל מגופרית וזיהומים אחרים. אותה טכנולוגיה יכולה לשמש לתהליך ההידרוגנציה של שמנים מתחדשים ליצירת HDRD. היתרון של ייצור משותף (co-processing) זה החיסכון הגדול בהשקעה ההתחלתית, כיון שחומר הגלם יכול להיות מעובד ע"י הציוד הקיים. עם זאת, כאשר שני התהליכים נעשים באותה התשתית, יש צורך בסגירת הריאקטור במעבר בין התהליכים בכדי לשנות את הקטליזטורים ואת תנאי התפעול. בנוסף, בגלל הדרישה הגבוהה של מימן לתהליך ייצור HDRD והאופי האקסותרמי של התהליך, כמויות גבוהות יכולות ליצור בעיות תפעוליות ויש צורך להתאים את הריאקטור לתהליכים אלו.

יחידות נפרדות המיועדות לעיבוד מקורות גלם מתחדשים הם בעלי היתרון שהם מוקמים עפ"י הצרכים הספציפיים של תהליך ההידרוגנציה של חומרי הגלם, הם יכולים להיות מוקמים כתוספת לבתי זיקוק קיימים וכך HDRD יכול להיות מעורבב במתקן עצמו עם דיזל מחצבי לפני הפצה. אחוז הערבוב יכול להיקבע עפ"י דרישות השוק בהתראה קצרה מבלי שינוי בתשתיות התפעול. החיסרון כאמור זו ההשקעה הכספית של ההקמה, שכדי להחזירה יש צורך לייצר HDRD בכמויות גדולות.

4.2.4.3. תכונות החומר

בגלל העובדה שדלק ה-HDRD שונה בהרכבו מביודיזל (Fatty Acid Methyl Esters) FAME, בעיקר בהעדר החמצן והקשרים הכפולים, גם תכונותיו כדלק משתנות בהתאם. בטבלה 1 ניתן לראות השוואה בין דיזל מחצבי דל-גופרית ULSD לביודיזל FAME ו-HDRD. כפי שניתן לראות מהנתונים, תכולת האנרגיה בביודיזל היא כ-39 MJ/kg כאשר עבור ULSD ו-HDRD היא בסביבות 43-44 MJ/kg.

טבלה 10 - השוואה בין תכונות ביודיזל, HDRD ו-FAME

Property	No. 2 Petroleum ULSD	Biodiesel (FAME)	Renewable Diesel
Carbon, wt%	86.8	76.2	84.9
Hydrogen, wt%	13.2	12.6	15.1
Oxygen, wt%	0.0	11.2	0.0
Specific Gravity	0.85	0.88	0.78
Cetane No.	40-45	45-55	70-90
T ₉₀ , °C	300-330	330-360	290-300
Viscosity, mm ² /sec. @ 40°C	2-3	4-5	3-4
Energy Content (LHV)			
Mass basis, MJ/kg	43	39	44
Mass basis, BTU/lb.	18,500	16,600	18,900
Vol. basis, 1000 BTU/gal	130	121	122

מקור: משרד האנרגיה האמריקאי http://www.afdc.energy.gov/fuels/emerging_green.html

HDRD הוא בעל היתרונות הבאים :

- HDRD יכול להיות מיוצר מטווח רחב של חומרי גלם
- תערובות HDRD יכולות להפחית פליטות פחמן חד חמצני ופחמימנים
- HDRD אשר עומד בתקני האיכות יכול לשמש ברוב מנועי הדיזל ולא נדרשת תשתית נפרדת להובלה ולאחסון
- יכול להיות מיוצר בבתי זיקוק קיימים
- ביצועים דומים או אף טובים יותר מדיזל רגיל הנובעים מאיכות בעירה גבוהה יותר ומספר צטאן (Cetane) גבוה יותר

4.2.4.4. מקדמי תפוקה ואספקטים כלכליים.

ההשקעה הכספית בבניית יחידת ייצור נפרדת של HDRD בבית זיקוק עדיין מאוד גבוהה (בין 130 מיליון למיליארד דולר) במיוחד גבוהה ההשקעה בבניית יחידות קטנות מאוד או גדולות מאוד כפי שמתואר בטבלה הבאה.

טבלה 11 - עלויות בניית מפעל / יחידה לייצור HDRD

Company	Location of facility	Capacity	Capital costs (USD)
Neste Oil	Porvoo, Finland	190,000 tonnes per year (tpy) 3,800 bpd	\$130 million
Neste Oil	Porvoo, Finland	190,000 tpy 3,800 bpd	\$130 million
Neste Oil	Tuas, Singapore	800,000 tpy 16,000 bpd	\$725 million
Neste Oil	Rotterdam, Netherlands	800,000 tpy 16,000 bpd	\$1 billion
Dynamic Fuels (Syntroleum and Tyson Foods joint venture)	Geismar, Louisiana	240,000 tpy 5,000 bpd	\$150 million
Valero and Darling joint venture	Norco, Louisiana	440,000 tpy 9,000 bpd	\$330 million (including \$241 million DOE loan guarantee)
Hypothetical small-scale plant		500 bpd	\$36- \$42 million
Hypothetical small-scale plant		2,500 bpd	\$75- \$85 million

מקור : (Ecoresources, 2012) ; Tpy-Tons per year, bpd-Barrels per day

עלויות התפעול לייצור HDRD עפ"י נתונים של חברת Neste Oil מ-2010 הן \$17 סנט/ליטר ללא עלות חומר הגלם. בייצור HDRD, בדומה לייצור FAME, חלק הארי בעלות התפעול הוא עלות חומרי הגלם המשתנה בהתאם לאיכויות והיצע, ומהווה כ-80% מהעלויות.

מקדמי תפוקה (יחס כמויות בין חומרי הגלם לתוצר): אין שוני גדול בין מקדמי התפוקה של HDRD מחומרי גלם שונים ונמצא כי הוא בסביבות 80 אחוזים (Ecoresources, 2012).

4.2.4.5 רגולציה

כיום אין תקינה מיוחדת ל-HDRD, HDRD מורכב מאותם סוגים של פחמימנים כמו דיזל מחצבי ולכן צריך לעמוד באותם תקנים שחלים על דיזל CGS3.517 (Ultra Low Sulfur Diesel - USLD) בקנדה, ASTM D975 בארה"ב ו-EN590 באירופה.

4.2.4.6 ישימות

נכון ל-2012 יש בעולם 6 מתקנים מסחריים לייצור HDRD עם קיבולת משותפת של 2.5 ביליון ליטר/שנה. אחד הוא בארה"ב (כאשר בסוף 2012 היה אמור להיכנס לפעולה אחד נוסף), ארבעה באירופה ואחד בדרי מז' אסיה. בארץ עדיין אין ייצור דלק בשיטה זו.

4.2.4.7 סיכום

הידרוגנציה של שמנים ושומנים הוא אחת האפשרויות ליצירת דלקים מתחדשים. HDRD בעל תכונות פיזיקאליות שמאפשרות לו להיות מעורבב עם דיזל דל גופרית (Ultra-Light Sulfur Diesel) בהשקעה פחותה לתשתיות, לאחסון וערבוב, וכן דורש פחות מיהול עם קרוסן כדי לעמוד בטמפרטורות נמוכות. ה-HDRD הוא בעל מספר אוקטן גבוה ותכולת אנרגיה גבוהה מאשר ל-FAME. הודות לפעילות הכימית של תהליך ההידרוגנציה HDRD יכול להיות מיוצר ממגוון רב יותר של חומרי גלם בהשוואה ל-FAME מבלי להוריד את איכות המוצר.

הקמת יחידת ייצור HDRD עדיין די יקרה, ייצור HDRD במשותף עם תהליכים בבתי זיקוק לדיזל מחצבי יותר זול אבל דורש התאמות תפעוליות (תהליכים וריאגנטים שונים).

הוצאות הקשורות לתהליך עצמו אינן יקרות ודומות לאלו של ייצור ביודיזל, כאשר החלק הגדול של ההוצאה הוא מחיר חומרי הגלם.

מבחינת פליטות גזי חממה, נראה עפ"י תוצאות ראשוניות כי ל-HDRD המיוצר מפסולת שומנים יש יתרון על פני דיזל מחצבי ו-FAME, אך נדרשים מחקרים נוספים בנושא בכדי לקבל תמונה מדויקת.

4.2.5 עיכול אנאירובי של פסולת שמנים ושומנים

בתהליך הטיפול בשפכים פסולת שמנים ושומנים (Fats, Oils and Grease – FOG) מהווה מטרד לא רצוי, הן בשל נטייתה להיצמד לדפנות וליצור סתימות בנקודות ניקוז ובצנרת והן בשל פגיעתה במקורות המים.

לכן נדרש שילוב של טיפול מיוחד בשלבי הראשונים של התהליך ובו נאספים השומנים ("Skimming"), אשר בהמשך מועברים לייבוש ומשם לשריפה או הטמנה.

בשל הרכבה, פסולת שמנים ושומנים היא מקור בעל פוטנציאל רב לייצור מתאן. ניסיונות שנערכו בעבר לעיכול אנאירובי של חומר זה הובילו לרוב לירידה בהיקף ייצור הביוגז וכשל של הריאקטור, ככל הנראה בין היתר בשל היווצרותן של שרשראות חומצות שומן ארוכות (Long chain fatty acids). עם זאת, מחקרים מהשנים האחרונות – לצד ניסויים של חברות מסחריות בתחום – הראו כי עיכול אנאירובי משותף (Anaerobic co-digestion) של פסולת שמנים ושומנים בשילוב עם חומרי הגלם שבשימוש סטנדרטי בעיכול אנאירובי (רפס בע"ח, פסולת עירונית, שפכי ביוב) הוא אפשרי. שילוב מבוקר והדרגתי של שמנים ושומנים עם יתר החומר האורגני מאפשר הסתגלות והתאמה של אוכלוסיית הבקטריות שבריאקטור לסביבה החדשה, ואף נצפה שיפור משמעותי ביותר בתפוקות הביוגז כתוצאה מכך (Martín-González et al., 2010; Wan et al., 2011; Lauwers et al., 2012).

יש לציין כי נושא זה עדיין נמצא במחקר וטרם הגיע לשימוש בהיקף מסחרי, אשר יאפשר ביצוע הערכה כלכלית. עם זאת, לאור ההיצע המוגבל יחסית של פסולת השמנים ושומנים – אשר מטיל ספק באשר לכדאיות הכלכלית של טיפול ייעודי בזרם זה – יש לשקול בחינה של נתיב העיכול האנאירובי כפתרון אפשרי בזרם זה.

4.2.6 רגולציה

4.2.6.1 תקנים לאיכות הביודיזל הנמכר

כל התקנים בעולם נבנו ע"ב שני סוגי התקנים ASTM/EN.

אירופה - שני סוגי תקנים לביודיזל:

- EN1421 מתאר את הדרישות לשימוש דלק בערה לחימום.
- EN14214 תקן ביודיזל לתחבורה.

ארה"ב:

- ASTM D6751. תקינת ASTM היא לביודיזל מעורב עם דיזל מחצבי בפרופורציה של 20% או פחות.

התקן האירופאי, בשונה מה-ASTM, מגדיר תקנים לביודיזל B100 כאשר הביודיזל העומד בתקנים אלו יכול לשמש כדלק במנועים המותאמים לכך, או שיהיה מעורב בדיזל מחצבי בתנאי שיעמוד בתקן EN590 המאפשר מהילה של עד 7% ללא צורך בהתאמות מיוחדות של המנוע.

4.2.6.2 חוקים ותמריצים בארה"ב (פדראלי)

חוק מדיניות האנרגיה האמריקאי משנת 2005 כולל את המחויבות של משווקי הדלקים לעמוד בתקנות של דלקים ממקורות מתחדשים. חקיקה זו מסמיכה את הסוכנות להגנת הסביבה האמריקאית לפתח ולאכוף תקנות מתאימות לכמות ואיכות הדלקים ממקורות מתחדשים.

חקיקה נוספת משנת 2007 מוסיפה לחקיקה של 2005 ובאה לקדם ביתר שאת עצמאות אנרגטית ואבטחת מקורות אספקת אנרגיה לארה"ב. החקיקה של 2007 הוסיפה פרטים נוספים על מקורות הביודיזל ברשימת הדלקים הביולוגיים שעבורם חויבה הסוכנות להגנת הסביבה לפתח תקנות מעודכנות להגברת הכמות ושיעור המהילה של דלקים אלה בשוק האמריקאי. הדגש הושם במיוחד על דלקים המיוצרים ממקור צלולוזי או מפסולות (לב-און, 2010).

4.2.6.3. תמריצים בממשל הפדראלי²³

- זיכוי במס לתשתיות תדלוק בדלק אלטרנטיבי: ציוד תדלוק של סולר מעורב בביודיזל (לפחות 20%) שהותקן בין 2006 לדצמבר 2013 זכאי לזיכוי במס של 30% מעלות הציוד (עד סכום של \$30,000).
- זיכוי במס הכנסה למשתמשים בביודיזל: המשתמש בביודיזל B100 כדלק לצרכי מסחר או עסק, זכאי להחזר ממס הכנסה של \$1 לגלון.
- בטחונות הלוואות לפיתוח טכנולוגיות אנרגיה מתקדמות: משרד האנרגיה נותן מענקים לפרויקטים המקטינים זיהום אוויר וגזי חממה, ותומך בהעברה של שימוש מסחרי בטכנולוגיות מתקדמות חדשות של דלקים חליפיים. ניתן עד 100% בטחונות מערך הלוואה.
- מענקים לייצור ביודלקים: מענקים ובטחונות הלוואה להקמת בתי זיקוק המייצרים ביו דלקים מתקדמים, כולל מענקים להדגמת הטכנולוגיות.
- הפחתת מס מוגדלת למפעלי ביודלקים חדשים לביודלקים מדור שני (שהוקמו בין 2006 - דצמבר 2013). תוספת הפחתת המס יכולה להגיע עד 50% מערך הנכס.
- בנוסף לחוקים הפדראליים, במדינות שונות בארה"ב יש תקנות נוספות המעודדות ייצור ושימוש בביודלקים מתקדמים²⁴.

4.2.6.4. בישראל

תקן ביודיזל לתחבורה IS5731 (התקן הישראלי נשען, מלבד שינויים מינוריים, על התקן האירופאי). כיום השימוש בביודיזל מותר לשימוש בהתאם לתקן 107: לתחבורה מותרת מהילה של 7% ביודיזל בדיזל. על ביודיזל המיוצר ומשמש היום לתעשייה יש 0% מס, על תערובות ביודיזל המותרות לתחבורה חל מס "בלו" בדומה לסולר רגיל בגובה 2.89\$ לליטר. נכון לקיץ 2013, יש הוראת שעה זמנית (עד 15.8.13) אשר נותנת פטור מלא מבלו לביודיזל המיוצר משמנים משומשים אשר נוצרו בישראל (שיעור הבלו על דיזל הוא כמחצית מהמחיר לצרכן). ישנם ניסיונות לקדם את הארכת הפטור.

שתי הסוגיות - אי-חובת מהילה בתקן הביודיזל והביקוש בשמנים משומשים להאבסת בע"ח (דבר המקובל בישראל, בניגוד לעולם בו שימוש זה אסור) - גורמות ללחץ על מחירי השמן המשומש. ההערכה היא כי ביטול הפטור על מס הבלו ישמוט את הקרקע מכלכליות ייצור הביו-דיזל משמנים משומשים בישראל.

²³ פרטים נוספים: <http://www.afdc.energy.gov/fuels/laws/3251/US>

²⁴ <http://www.afdc.energy.gov/laws/matrix/incentive>

4.2.7. שימושים בפסולת שמנים משומשים בעולם

החקיקה בעולם בנושא חיוב שימוש בביודיזל בתחבורה הביא לעליה בצריכה ובפיתוח התאמות כלי התחבורה והמנועים לשימושים בביודיזל ממקורות שונים.

הטבלה להלן מתארת עמדות כמה מיצרני הרכבים בעולם לגבי ישימות השימוש בביודיזל בכלי הרכב אשר מיוצרים על ידן.

טבלה 12 - עמדות כמה מיצרני המכוניות והמנועים לשימוש בביודיזל

Manufacturer	Position
Engine Manufacturers Association (EMA)	B5 is acceptable if it complies with ASTM D 6751
Caterpillar	Many engines approved for B100; for others only B5 is acceptable. It shall comply with ASTM D 6751
Cummins	All engines approved for B5. It shall comply with ASTM D 6751
DaimlerChrysler	B5 is acceptable for all vehicles but it must comply with ASTM D 6751
Detroit Diesel	B20 is approved for all engines/vehicles but it shall comply with diesel specifications.
Ford	B5 is acceptable for all vehicles but it must comply with ASTM D 6751 and EN 14214
General Motors	B5 is acceptable for all vehicles but it must comply with ASTM D 6751
International Truck and Engine	B20 is acceptable for all engines but it must comply with ASTM D 6751

מקור: (Biofuel Handbook (2009

כלומר, עמדות מרבית מיצרניות הרכב הן כי מיהול של 5% ביודיזל מקובל ואפשרי בכל סוגי כלי הרכב (התקן האירופאי מאפשר עד 7% מיהול) ומיהול של כלי רכב יותר כבדים (משאיות) יכול להגיע עד ל-20%. מיהול בשעורים גבוהים יותר דורש התאמות בכלי הרכב.

לגבי שימוש בשמני מאכל ממוחזרים ליצור ביודיזל, מתועדים כמה ניסיונות מוצלחים מהעולם:

- משטרת דובאי מתדלקת את האוטובוסים שלה בתערובת B5 המיוצר משמן משומש הנאסף ממתקניה
- ב-2007 מקדונלד'ס בבריטניה הכריזה כי תתחיל לייצר ביודיזל מפסולת השמנים שבמסעדותיה, ביודיזל זה ישמש את צי הרכבים של הרשת
- בדיסנילנד בארה"ב, החל מ-2009, כל הרכבות של הפארק מופעלות בביודיזל שמקורו בשמן מאכל ממוחזר.
- החל מ-2004 העיר הליפקס בנובה סקוטיה, קנדה, החלה מתדלקת את צי האוטובוסים בביודיזל המבוסס על שמן דגים ממוחזר. בתחילה נוצרו כמה בעיות מכניות, אך אחרי מספר שנים ושיפור ההתאמה בין הביודיזל למנועים, הצי כולו שוב פועל על ביודיזל מסוג זה.
- ביפן חברת הרכבות Hyogo Railways החלה להפעיל רכבת בביודיזל מפסולת שמני מאכל.
- תעופה: טיסות מסחריות בשימוש בתערובות ביודיזל (עד 50%) שמקורו בפסולת שמני מאכל נעשו ע"י חברות תומסון איירווייס (Boeing 757-200), פינאייר (AIRBUS A320) ו-Boeing KLM (737-800).

4.2.8. שימושים בפסולת שמנים משומשים בישראל

בישראל יש תקן העוקב לתקן האירופי ומאפשר שימוש בביודיזל B7, אך בפועל לא משתמשים כיום בכלל בביודיזל לתחבורה. רובו הגדול של השמן המשומש שנאסף משמש לחומר גלם במכוני תערובת לייצור מזון לבע"ח. עפ"י חברת גרין סיטי, יצרנית ביודיזל, הביודיזל המיוצר ע"י חברת גרין סיטי משמש ללא כל מודיפיקציות בתעשייה.

לגבי תחבורה, בגלל אחריות חברת יצרניות המנועים והתקינה לא ניתן לשווק מוצר נקי. עפ"י מנכ"ל חבי גרין סיטי, מר רובי זומר, המפעל יכול להגיע לתקן תחבורה באופן מיידי ולהוציא מוצר הניתן לערבוב עם סולר לפי התקן ללא מודיפיקציות נוספות. אך מאחר וכיום מבחינה כלכלית אין כדאיות לשיווק לתחבורה, המפעל מייצר ביודיזל בתקן "נחות" יותר המתאים לתעשייה.

4.2.9. פוטנציאל, חסמים ואתגרים בשוק הביודיזל מפסולת שמנים

בישראל

- כיום חוקי איסוף שמנים אינם נאכפים כראוי, וחלק גדול מהשמנים מושלכים ומזהמים מקורות מים וקרקע, וגורמים לנזקים במערכות השפכים העירוניות
- בהיעדר אכיפה ותשתיות לאיסוף שמנים ממשקים ביתיים, כמויות השמן הנאסף הם קטנות ביותר ומסתכמות בכ-20,000 טון/שנה מול ההערכה של כ-50,000-80,000 טון/שנה שניתן היה לאסוף
- רוב השמנים הנאספים משמשים כחומר גלם לתעשיית המזון לבע"ח. בארץ, בהיעדר תקנים לאיכויות השמן המשומש בתעשייה זו (בניגוד למדינות המפותחות בהן קיימים תקנים מחמירים לשימוש בשמן ממוחזר למזון בע"ח), קיימת תחרות גם על שמנים ירודים עם תעשיית הביודיזל המביאה גם לעליית מחירי השמן והשומן
- כמות הביודיזל המיוצרת היום היא קטנה ולא משמעותית (כ-5,000 טון/שנה או 5,681 מ"ק/שנה) ביחס לצריכת הסולר בישראל, שהיא כ-2.8 מיליון מ"ק לסולר/שנה וסה"כ 6.1 מיליון מ"ק דלק/שנה
- עלות ייצור הביודיזל משתנה עפ"י מחיר חומרי הגלם וקיבולת המפעל, אך נמצא שתמיד היא יותר יקרה מייצור דיזל רגיל. לפיכך, במדינות מפותחות ניתנים תמריצים והקלות במס ליצרנים ומשתמשים בביודיזל. בארץ ביודיזל 100% המשמש לתעשייה פטור ממס, אך תערובת ביודיזל המותרת לשימוש בתחבורה חייבת במס בלו בדומה לסולר רגיל. לכן תחרותיות הביודיזל בשימוש בתחבורה יורדת.
- יש צורך בתמריצים נוספים להשקעה בפיתוח להעלאת איכויות הקיימות של ביודיזל וכן בבדיקות למציאת ההתאמות הנדרשות בביודיזל ובמנועים בכדי להתאימם ליעילות מקסימאלית ולתנאים של ישראל (נקי קפיאה, עמידה באחסון בתנאים המקומיים וכד').

יתרונות ייצור ביודיזל מפסולת שמנים:

- עלות יחסית נמוכה של חומר הגלם (לעומת שמנים שהם לא פסולת)
- אין צורך בשינוע והובלה מרחוק
- אינו מתחרה עם ייצור מזון על משאבי טבע (קרקע, מים)

- קל לייצור
- פתרון למחזור פסולת
- ביודיזל המיוצר מפסולת שומן ושמנים הביא ל-86% ירידה במחזור החיים של גזי חממה בהשוואה לדיזל רגיל
- הפחתה בפליטת גופרית
- ייצור דלקים מפסולות שמנים ושומנים עדיף מבחינת פליטות גזים והשקעת אנרגיה על שמנים המיוצרים מגידולים וזאת מכיוון שאין השקעת אנרגיה נוספת בתהליך הייצור של חומרי הגלם

חסרונות הביודיזל:

- צמיגות גבוהה (תלוי בחומר הגלם) והתמצקות בטמפ' נמוכות
- פליטה גבוהה של NO_x
- זמן אחסון קצר - FAME (מתיל אסטר) מכיל חמצן וקשרים לא רוויים ולכן החומר אינו יציב ויכול לשנות את הרכבו בזמן אחסון ארוך (בנוסף הוא בעל תכונות היגרוסקופיות ובגלל החמצן יש סכנה לספיחת מים לדלק בשינוי טמפרטורה).
- התאמות המנועים הנדרשות ותשתיות האחסון (עם זאת, עפ"י נתונים מאוני' קאסל בגרמניה עד 10% של דיזל מעורב בביודיזל לא מצריך התאמות מיוחדות וכן גם זמן האחסון לא נפגע)
- בשימוש במתנול וקטליזטורים חזקים בתהליך האסטרופיקציה יש סכנת רעילות ליצרנים ולסביבה
- לביודיזל תכונות היגרוסקופיות (יכולת ספיחת מולקולות מים, היכולות ליצור בעיות מכניות, פליטת עשן, והתפתחות מושבות חיידקים)

טבלה 13 - השוואה בין שתי הטכנולוגיות לייצור ביודיזל משמנים ושומנים

טכנולוגיה	הידרוגנציה	טרנסאסטרופיקציה
תהליך ייצור	תהליך חיזור של תרכובות אורגניות לא רוויות המיועד לפתיחת קשרים כפולים בכדי לייצר n-אלקנים פאראפיניים	תהליך שבו קטליזטור בסיסי מאפשר ריאקציה של הוספת אלכוהול לחומצות השומן שבקצה הטריגליצרידים ליצירת ביודיזל
תשומות	ח"ג מרכזי: שמנים משומשים	ח"ג מרכזי: שמנים משומשים
תוצרי התהליך	ביודיזל (HDRD)	ביודיזל (FAME)
תוצרי לוואי	גליצרין	גליצרין
יישומים עיקריים	הפקת ביודיזל לתחבורה	הפקת ביודיזל לחשמל וחום ולתחבורה.
אספקת אנרגיה לקיום התהליך (% מסך האנרגיה המיוצרת)	-	-
יעילות אנרגטית	על כל גלון חומר גלם, ניתן לקבל 0.8 גלון דלק.	על כל גלון חומר גלם, ניתן לקבל כ-0.8 גלון דלק ויותר, בהתאם לאיכות ח"ג

4.3. טכנולוגיות המרה תרמו-כימיות (פירוק גזי)

4.3.1. רקע

הפירוק הגזי הינו הליך תעשייתי של פירוק חומרי דלק ועץ לרכיביהם, על ידי שילוב של חשיפה לטמפרטורה גבוהה, ושליטה בכמות החמצן או האדים בתהליך. תשומתה של הטכנולוגיה היא דלקים פוסיליים (גז, נפט, פחם), פט-קוק ודלקים נוספים כגון ביומסה ופסולת.

התהליך מתרחש בתנאי היעדר חמצן או חמצן חסר (באמצעות בקרה וצמצום האוויר), בטמפרטורות של כ-1500-400 מעלות צלסיוס. במהלך התהליך מתפרקים הקשרים הכימיים של דלקים מוצקים ומתקבל גז דלקי הנקרא סינגז (SYNGAS). הסינגז הוא תערובת של מימן, פחמן חד חמצני ומעט פחמן דו-חמצני, העשירה באנרגיה זמינה, המיוצר מחומרי גלם פחמימניים לרבות ביומסה. הערך הקלורי של תוצר הגז הסינטטי שווה לכ-25-40% מזה של גז טבעי. ניתן להשיבו לאנרגיה במגוון אופנים שהנפוצים מביניהם הם ייצור חשמל וחום. בנוסף, ניתן להשתמש בסינגז כחומר מוצא בריאקציות קטליטיות ולהפיק ממנו אלכוהולים שונים וכבר במהלך מלחמת העולם השנייה נעשה בו שימוש, ע"י הגרמנים, כחומר ביניים בייצור מתנול ודלקים סינתטיים מפחם באמצעות תהליכים הכוללים שילוב של חום ולחץ בנוכחות קטליזאטורים (GTL).

את טכנולוגיות הפירוק הגזי ניתן לסווג על פי דרישות החמצן של התהליכים כאשר הגזיפיקציה והפלסמה מתרחשות בתנאי חמצן חסר והפירוליזה בתנאי היעדר חמצן. להבדיל מעיכול אנאירובי, אין בתהליכי הפירוק הגזי עירוב של חיידקים ומיקרואורגניזמים מפרקים.

מנקודת מבט שוק הפסולת, טכנולוגיות ההמרה התרמית עדיפות על פני שיטות תרמיות אחרות להשבת פסולת לאנרגיה, הן בשל "ניקיון" היחסי של הטכנולוגיות הללו (בעיקר זיהום אוויר) והן בשל תוצרי המגוונים של הסינגז הנוצר בתהליך. כמו כן לשיטות אלו עדיפות על פני מתקני שריפה בכל הקשור למטרדי ריח. עם זאת, יש לזכור כי תהליכים אלו אינם חפים מהשפעות שליליות על הסביבה. הפירוק הגזי מפחית את נפחה של הפסולת בכ-90% בממוצע, וכתוצר לוואי מייצר: גזי פליטה, תשטיפים (המים המשמשים לטיפול בגזי הפליטה), ואפר המצריך טיפול וסילוק.

הטכנולוגיות הפיזיקאליות להפקת דלקים מפסולת, אשר יתוארו בחלק זה, הינן: גזיפיקציה, פירוליזה ופלסמה.

4.3.2. גזיפיקציה

4.3.2.1. כללי

תהליך הגזיפיקציה הוא בעיקרו פירוק תרמי של חומרים אורגניים, בתנאי חמצן חסר וחשיפה לטמפרטורות גבוהות (בין 600-1400 מ"צ), שתוצרו סינגז. התהליך הוא אנדותרמי ומרבית מתקני הגזיפיקציה מספקים לעצמם את האנרגיה הנדרשת בתהליך (בדר"כ כ-10% מהאנרגיה המיוצרת).

תהליך הגזיפיקציה מסוגל לטפל במגוון רחב של חומרים אך הוא רגיש מאוד להומוגניות של חומר הגלם ולכן מצריך הליך מיון וטיפול מקדים. הן מסקירת הספרות והן מביקורים של כותבי המסמך במתקנים

פועלים, עולה כי ההומוגניות של הפסולת היא דרישה הכרחית ליעילותו והצלחתו של התהליך. התשומות האפשריות לתהליך הגזיפיקציה כוללות בין היתר:

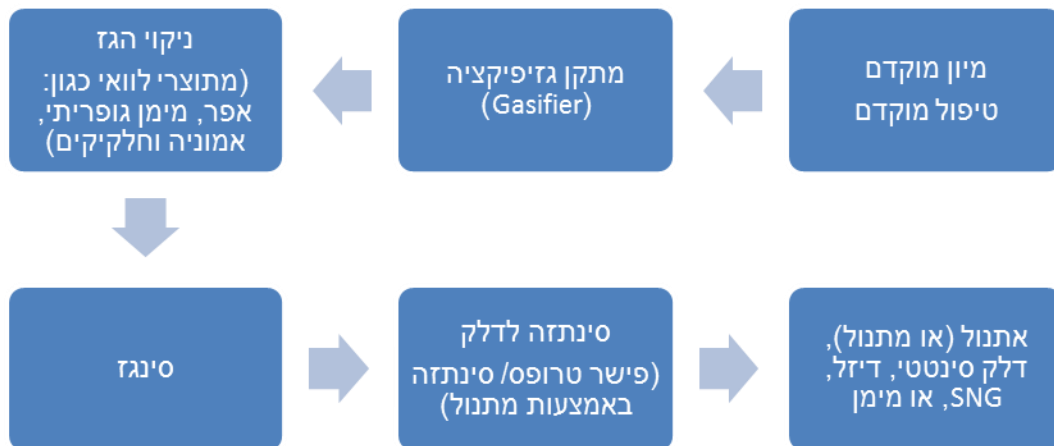
- פסולת עירונית מוצקה (MSW) לרבות נייר קרטון, עץ, גומי (כולל צמיגים), וכל סוגי הפלסטיק
- פסולת חקלאית
- פסולות תעשייתיות וכאלו מתהליכי זיקוק

4.3.2.2 תיאור התהליך

טיפול מוקדם: לתהליך הגזיפיקציה נדרשת תשומה הומוגנית ולכן כשמדובר בפסולות, צריך להקדים לתהליך פעולות מיון, הפרדה פיזיקאלית בעיקר של זכוכיות ומתכות, ייבוש וגריסה של הפסולת לפתיתים הומוגניים.

- טיפול תרמי במיכל Gasifier מסוג: fixed bed /fluidized bed/indirect bed
- מערכות טיפול וניקוי: תוצרי התהליך, הסינגז וגזי הפליטה, מועברים לתהליכי סילוק תרכובות מזיקות. יתר תוצרי הלוואי מטופלים ומסולקים גם הם.
- מערכת השבת האנרגיה (הפקת חשמל / קיטור / דלקים סינתטיים)

תרשים 22 - רכיבי תהליך הגזיפיקציה לדלק



שלבי תהליך הגזיפיקציה והמרת הגז הסינטטי לנוזל²⁵:

- **שלב 1: טיפול מוקדם וייבוש** - הפסולת מוזנת למיכל אגירה ומועברת מבעד למכונת גריסה המעבדת את הקלט לפתיתים הומוגניים קטנים המועברים לתהליך ייבוש שאורכו ומורכבותו תלויה ישירות בסוג הפסולת המטופלת. רמת הלחות האופטימאלית ליעילות התהליך היא עד 12%.
- **שלב 2: גזיפיקציה** - הכנסת החומר ההומוגני לחימום עקיף בתוך מיכל המכונה gasifier, בו נשלטת הכמות של החמצן. בתוך המיכל מספר נקבים אליהם מוחדר קיטור הגורם לפירוק יסודי של הפתיתים תוך ניתוק קשריהם המולקולאריים ושחרור מולקולות הפחמן הדו-חמצני והמימן

²⁵ http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/pnll-18482.pdf

(סינגז). תהליך זה הוא אנדותרמי (תהליך הדורש אספקה של חום על מנת שיתרחש), ולכן יש צורך באספקת אנרגיה לקיום התהליך עצמו (כ-10% מהאנרגיה המיוצרת).

- **שלב 3: יצירת זפת (Tar) וקרצוף הגז** - בתהליך הגזיפיקציה חלק מן החומרים מכילים פחמימנים ארומטיים (תרכובות מעגליות ולא שרשראות). הגז הגולמי והזפת מועברים לעיבוד נוסף ומומרים לחומרים שונים בטמפ' של כ-750 מ"צ. הסינגז שנוצר מועבר לקירור ב-150 מ"צ ונשלח לקרצוף רטוב להסרת מזהמים דוגמת חלקיקים, שאריות זפת ועוד. בניגוד לשריפה קונבנציונאלית תהליך ניקוי הגז מתרחש טרם שריפתו במרבית מתקני הגזיפיקציה. הסינגז שנוצר מכיל בעיקר פחמן חד-חמצני ומימן (כ-85%), נוזלים - שמנים פחמימניים (כ-5%) ואפר (כ-10-15%). תוצרי הלוואי של התהליך כוללים: תחמוצות חנקן, תחמוצות גופרית, חלקיקים, מימן כלורי, אמוניה, מתכות כבדות, עופרת, קדמיום, כספית, תרכובות אורגניות ועוד (מקור: NETL, "Gasification in Detail").

בהתאם ליעודו של הסינגז (ליצור חשמל, תחבורה וכד'), משתנה תהליך הטיפול בו. למטרת עבודה זו מצוינים רק התהליכים להפיכת הסינגז לדלק נוזלי.

- **שלב 4: מיצוי הגז** - הסינגז נדחס ל-450 Pounds per square inch - absolute-psia (כ-30 בר). הגז עובר תהליכים נוספים להסרת כספית וגופרית - זיהומים שחייב להסיר טרם יצירת האדים. לפני הכנסת הסינגז למחולל האדים הוא מעורבב בטמפ' גבוהות של 800-900 מ"צ יחד עם פחמן חד חמצני דחוס. לאחר מכן הסינגז מקורר ע"י אוויר ומים, מוסר ממנו פחמן דו חמצני. הסינגז הנקי נדחס ל-2000 psi ונשלח לסינתיזה יחד עם תערובת אלכוהול.
- **שלב 5: סינתיזה עם תערובת אלכוהול** - בתהליך זה מתבצעות ריאקציות במספר נתיבים לייצור מספר סוגי אלכוהול והידרוקרבוניים. הסינגז הנקי מחומם לטמפרטורה של כ-300 מ"צ בלחץ גבוה (2000 psi). הגז מקורר חלקית כנגד הסינגז המוכנס, ועובר מספר קירורים לדחיסת האלכוהול והנוזלים.

נכון להיום, אין ייצור מסחרי של דלקים ע"י שימוש בתהליך הגזיפיקציה כאשר חומרי הדלק הם ביומסה ופסולות. עם זאת, משרד האנרגיה האמריקאי בחר לאחרונה 8 תהליכים שיש למקד בהם מו"פ כדי לקדם. בין הטכנולוגיות כלול תהליך שדרוג הסינגז לדלקים²⁶.

4.3.2.3. תהליכי סינתיזה של סינגז לדלקים - סינתיזה למתנול

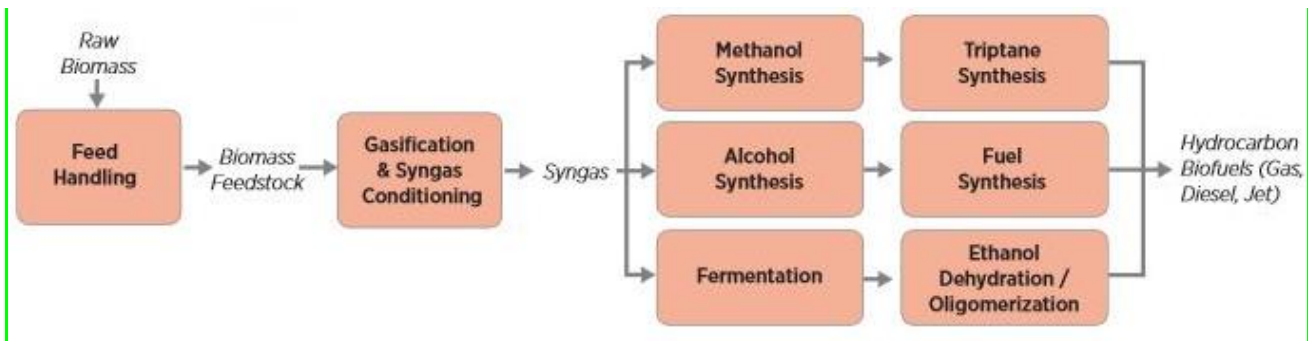
כפי שיוצג בהמשך (פרק 5.3.2.6) ישנן מספר דרכי שדרוג של סינגז לדלקים פחמימניים, אך נכון להיום ההתמקדות היא בעיקר בשני תהליכים ספציפיים – סינתיזה למתנול ופישר טרופס. בארה"ב, ההתמקדות כרגע היא בסינתיזה למתנול ("מתאניזציה") וזאת בגלל חומר הגלם הרב שיש מתאית (בעיקר משאריות של גידולים עתירי עמילן). לאחר ייצור הסינגז בתהליך הגזיפיקציה, תהליך הסינתיזה כולל את השלבים הבאים:

²⁶ http://www1.eere.energy.gov/bioenergy/technology_pathways.html

- **שלב 1:** סינתזה למתנול – המרה של סינגז למתנול באמצעות קטליזטור (זרז) שמכיל נחושת / תחמוצת אבץ / תחמוצת אלומיניום.
- **שלב 2:** הפרדת התוצרים לאחזור המתנול ואחסונו - הסרת התוצרים הקלים מהמתנול
- **שלב 3:** מתנול לפחמימנים – בשלב הראשון המתנול מועבר לריאקטור שם הוא מומר לדימתיל אתר (DME) ובשלב השני מתקיימת המרה לפחמימנים בעלי אורכי שרשרת קרובים לאלו של דיזל ובנזין (כלומר, יש אפשרות לייצר דיזל או בנזין).
- **שלב 4:** אחזור התוצר – הפרדה של תוצרי הפחמימנים (על מנת לקבל תוצר טהור יותר).

כפי שניתן לראות באיור הבא, בנוסף לתהליך זה, בארה"ב ישנה התמקדות בשני תהליכים נוספים, המרה קטליטית של סינגז לתערובת אלכוהול ליצירת דלקים פחמימניים וחומרי גלם מחומצנים והמרה של סינגז לאתנול ליצירת תערובות (בלנדים) פחמימניים לדלקים לתחבורה. גם תהליכים אלו נמצאים בשלבי מחקר התחלתיים ואין מידע רב בספרות.

תרשים 23 - תהליכי שדרוג סינגז לדלקים פחמימניים



מקור: משרד האנרגיה האמריקאי, http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/syngas_upgrading_to_hydrocarbon_fuels.pdf

האתגרים העומדים בפני פיתוח של תהליך זה הם:

- סלקטיביות ליצירת תוצר סופי – כלומר, פיתוח קטליזטורים שיכולים לזרז ריאקציה ליצירת דלקים פחמימניים על פני תוצרים אחרים כגון גז ופחם (coke).
- עמידות הקטליזטור – נכון להיום, אורך החיים, התחזוקה, היציבות וקצב ההתחדשות של הקטליזטורים בתהליך זה אינם ידועים ויש צורך במחקר לבחון את היכולת של הקטליזטורים לעמוד בפני זיהומים.
- תהליכי אמצע אלטרנטיביים – כיום, המחקר והפיתוח האמריקאי מתמקד במתנול כאמצעי לסינתזה, אבל יש לבחון את הכדאיות הכלכלית של אמצעים אחרים כגון: אולפינים קלים (olefins), תרכובות אלכוהול, או חמצנים.
- שילוב התהליכים – יש לבחון אפשרויות לשלב ולאחד תהליכים, כגון הסרת השלב שבו מתנול מומר ל-DME.
- הדגמה מסחרית – אין יכולת לדעת מה יהיו התוצרים ברמה מסחרית ולכן יש צורך בקידום פיילוט על מנת להדגים את הטכנולוגיה.

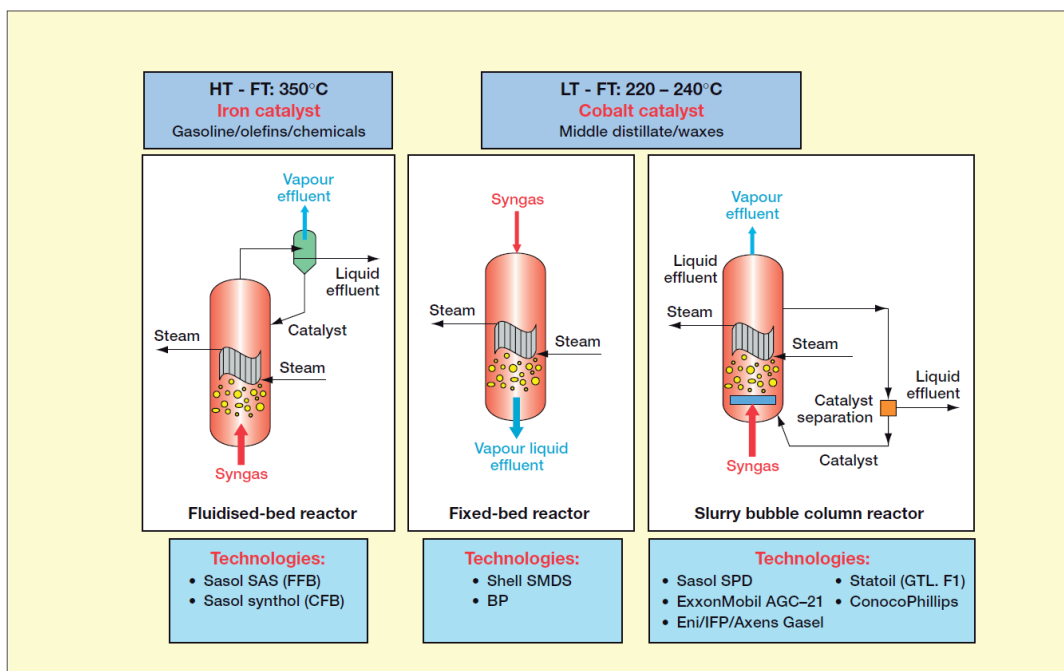
4.3.2.4. פישר-טרופס

תהליך סינתזה נוסף, ותיק ומוכח, הוא תהליך הפישר-טרופס (Fischer-Trposch). תוצר התהליך הוא דלק לתחבורה. תהליך הפישר-טרופס כולל ארבעה פרמטרים מרכזיים:

1. **קטליזטור** - קיימים שני סוגים מרכזיים: קטליזטור מבוסס ברזל, או קטליזטור מבוסס קובלט
2. **ריאקטור** - קיימים שלושה סוגים מרכזיים, כאשר ההבדל ביניהם זה האופן שבו החומר בא במגע עם הקטליזטור:
 - ריאקטור בעל מצע מקובע (fixed bed reactor)
 - ריאקטור בעל מצע מרחף (fluidized bed)
 - קולונת בעבוע (slurry bubble column)
3. **טמפרטורות** -
 - פישר-טרופס בטמפרטורה גבוהה (HT-FT), מעל 350 מעלות צלזיוס
 - פישר-טרופס בטמפרטורה נמוכה (LT-FT), בין 220 ל-240 מעלות צלזיוס
4. **התוצרים הסופיים** לאחר שדרוג הפישר-טרופס:
 - דיזל (פרפינים הנגזרים מנפטא) (לפעמים גם חומרי סיכה ושעווה)
 - בנזין (אולפינים וכימיקלים).

כיום בעולם, יש שלושה סוגים של משפחות של טכנולוגיות הפישר טרופס, המשלבים את הפרמטרים השונים אשר צוינו לעיל:

תרשים 24 - שלוש המשפחות הטכנולוגיות של פישר-טרופס



מקור: Axens, 2008

<http://www.axens.net/document/19/conversion-of-syngas-to-diesel--article-ptq/english.html>

למרות היותו תהליך ותיק אשר נעשה בו שימוש לאורך השנים, כאשר מדובר בחומרי גלם כגון ביומסה ופסולת, מרבית מהאתגרים המתוארים לעיל בתהליך הסינתזה באמצעות מתנול, תקפים גם לגבי תהליך הסינתזה באמצעות פישר-טרופס:

- סלקטיביות ליצירת תוצר סופי – בתהליך פישר-טרופס קונבנציונאלי (כלומר כאשר משתמשים בחומר גלם שאינו פסולת), התהליך הוא בדרך כלל לא בררני בייצור פחמימנים – מאחר ונעשה שימוש בכל התוצרים, לא רק בדלקים פחמימניים. לעומת זאת, בתהליך המיועד ספציפית לייצור דלקים פחמימניים, יש צורך בפיתוח קטליזטורים שיכולים לזרז ריאקציה ליצירת דלקים אלו על פני תוצרים אחרים כגון גז ופחם (coke).
- הדגמה – טכנולוגית הפישר-טרופס לרוב נבנית במתקנים מסחריים גדולים, אך כיום יש צורך לבחון אותה בקנה מידה יותר קטן על מנת לבחון את התוצרים כאשר חומרי הגלם הם סוגי פסולות (בריאקטורים גדולים קיימות מגבלות של העברת מסה וחום אשר מפחיתות את יעילות התהליך). לכן, ישנה מגמה לייצר את הטכנולוגיה בקנה מידה יותר קטן, כגון Micro channel Reactors, ריאקטורים קטנים שלהם ערוצים עם קוטר של כמילימטר (חברת Velocys²⁷ עובדת על פיתוחם). כאשר הקוטר יותר קטן, ניתן לפזר חום יותר מהר לעומת הריאקטורים הקונבנציונאליים, וזה יכול לסייע לקטליזטורים להשיג שיעורי המרה יותר גבוהים.

לסיכום, גם הטכנולוגיה הוותיקה, איננה בשלה לפיתוח מסחרי של דלקים פחמימניים כאשר חומרי הגלם הם פסולות.

4.3.2.5 יעילות אנרגטית של התהליך

כפי שצוין, שימוש בטכנולוגית הגזיפיקציה לטובת ייצור דלקים, נמצאת בראשית דרכה ונכון להיום אין מתקן גזיפיקציה מסחרי בעולם המייצר דלקים פחמימניים. עם זאת, ממחקרים שנעשים בארה"ב יש נתונים ראשוניים על תשומות אפשריות בתהליך הגזיפיקציה. מאפייני הפסולת המוזנת לתהליך, איכותה וסוג הטיפול המקדים (במידה והפסולת מעורבת) הינם מהותיים ליעילות הטכנולוגיה הן אנרגטית והן סביבתית. במחקר של המעבדה הלאומית הצפון-מערבית של ארה"ב (Pacific Northwest National Lab, PNNL) משנת 2009, התוצאות הראו כי יכולת ייצור אתנול מביומסה של שבבי עץ היא 50 גלון לטון ח"ג, ומפסולת עירונית מוצקה 28 גלון לטון ח"ג יבש. ביומסה מתאית (לינגו-צלולוזה) יותר אחידה (איננה דורשת טיפול מוקדם) ולכן תפוקת האתנול היא גבוהה יותר לעומת תפוקת האתנול מפסולת עירונית מוצקה, אשר מורכבת ממספר חומרי גלם ודורשת תהליך מיון וטיפול מקדים. עם זאת, פסולת עירונית ממצה כמות משמעותית יותר של גופרית וחומרים הניתנים למחזור (מתכות בעיקר). אך כאשר בוחנים את שאריות התהליך, כמות הפסולת המסוכנת הנוצרת מח"ג מבוססי פסולת עירונית היא גבוהה לעומת מעט הפסולת המסוכנת הנוצרת מח"ג מבוססי תאית.

²⁷ www.oxfordcatalysts.com/ocge02.php

טבלה 14 - השוואה בין טיפול תרמי בפסולת עירונית מוצקה לבין טיפול בביומסה ממקור צמחי

Table 4-1 Main Performance Analysis Results

Case	MSW Case	Biomass Case
Feedstock		
Wood chips or MSW, dry million lb/y	1930 MSW; 1,447 RDF	1,447 Wood chips
Products		
Ethanol, mmgal/y	27	36
Propanol and high alcohols, million gal/y	9	12
Sulfur, lb/y	81,600	35,200
Recyclable scrap aluminum, million lb/y	110	0
Recyclable scrap iron, million lb/y	25	0
Yields		
Ethanol, gal/ton dry feedstock	28 MSW basis; 38 RDF basis	50
Higher alcohols, gal/ton dry feedstock	9 MSW basis; 13 RDF basis	17
Waste Products		
Hazardous waste, lb/y	80,000	0
Total Non-hazardous solid waste, million lb/y	390	22.5
Ash, million lb/y	152	19
Spent olivine, million lb/y	3	3.5
MSW rejects, million lb/y	235	0
Net Power for export, MW	9.3	3.2

מקור: PNNL, http://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/pnnl-18482.pdf

4.3.2.6 תוצרי התהליך ותהליך הניקוי של סינגז

סינגז הנוצר מגזיפיקציה של ביומסה ו/או פסולת מכיל מזהמים כמו אבק, זפת (Tar), גופרית, חנקן, תרכובות כלור, אלקלי, ומתכות כבדות. למרות שהריכוזים של המזהמים השונים יכולים להיות נמוכים, דבר התלוי בחומר הגלם בו משתמשים וכן במתקן הגזיפיקציה, יש להשמיד ולהסיר אותם לפני שמשתמשים בסינגז למטרתו הסופית, בין אם מדובר למטרת חשמל או לדלק לתחבורה. הצורך בניקוי גז, ובמיוחד בטכנולוגיה להסרת זפת, ל-CHP או למטרת סינתזה, נחשב ל"עקב אכילס" של גזיפיקציה של ביומסה / פסולת (Zwart, 2009). יתכן ויש צורך במערכות ניקוי יותר משוכללות לניקוי הסינגז בהשוואה למערכות אשר עושות שימוש בחומר גלם אחר כגון פחם (Ciferno & Marano, 2002), בגלל שהמזהמים הנוצרים לא תמיד דומים (דוגמת זפת או תרכובות כלור). מבחינת המחקר, הטכנולוגיה הסטנדרטית הוכיחה את עצמה כלא מספיק טובה להשמדת והסרת הזפת וכיום מאמצי המחקר והפיתוח עדין נמשכים, במיוחד בתחומי הביקוע הקטליטי של הזפת וכן טכנולוגיות קרצוף מתקדמות (Zwart, 2009).

בטבלה הבאה ניתן לראות את התרכובות של מספר סוגי חומרי גלם, וניתן לראות שכאשר חומר הגלם הוא פרש בעלי חיים לדוגמה, יש מזהמים באחוזים יותר גבוהים, כגון אבק, גופרית וכלור. כלומר, ידרשו אמצעי ניקוי נוספים.

שילוב תחליפי נפט מבוססי פסולת במערך התחבורה בישראל
 עבור המנהלת לקידום תחליפי נפט במשרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים
 שלב א': סקר ספרות

טבלה 15 - מרכיבים כימיים של חומרי גלם שונים

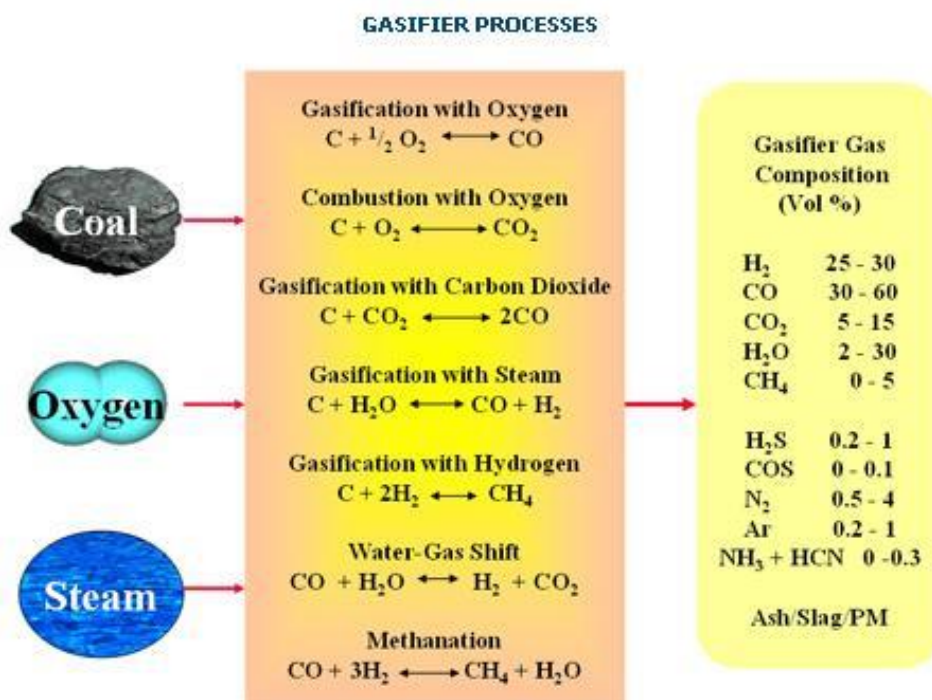
	C (wt% _{dry})	H (wt% _{dry})	O (wt% _{dry})	N (wt% _{dry})	S (wt% _{dry})	Cl (wt% _{dry})	Ash (wt% _{dry})	H ₂ O (wt% _w)
Untreated wood	48,8	6,0	44,6	0,4	0,03	0,02	1,6	12,8
Treated wood	50,7	6,1	41,7	1,2	0,11	0,08	2,7	17,8
• Demolition	49,4	5,9	43,1	0,9	0,08	0,05	4,3	18,9
• Impregnated	52,5	6,2	40,4	0,6	0,17	0,11	1,5	23,5
• Particle board	50,1	6,2	41,6	2,2	0,08	0,08	2,3	11,1
Grass	49,2	6,0	43,5	0,9	0,16	0,38	3,6	15,4
Straw	50,5	6,1	41,3	1,1	0,15	0,48	10,9	6,1
Mamure	51,8	6,4	34,2	4,4	0,85	1,41	32,9	45,7
• Poultry	48,2	5,6	34,8	6,2	0,74	0,73	19,6	30,1
• Cow	53,1	6,8	34,9	2,6	0,95	1,66	43,7	14,9
• Pig	54,1	6,8	33,0	4,3	-	1,84	35,4	92,1
Sludge	50,2	7,2	39,7	2,9	1,00	0,30	25,3	25,3
• Food industry	52,8	8,1	39,9	1,0	0,77	0,01	9,3	7,8
• Paper	49,2	6,0	43,1	1,1	0,45	0,43	33,3	36,8
• Sewage	48,5	7,5	36,2	6,7	1,87	0,53	33,4	31,2
Refuse Derived Fuel	51,8	7,2	39,3	1,1	0,40	0,39	15,0	25,0
Municipal Solid Waste	56,0	5,1	26,6	1,2	0,50	1,13	39,6	34,8

מקור: Zwart, 2009

באיור הבא ניתן לראות ולהשוות את הרכב הסינגו המיוצר מתהליך גזיפיקציה של פחם לחומרי הגלם שהוצגו לעיל. הוא מכיל תערובת של גזים, הכוללים פחמן חד-חמצני (CO) ומימן (H₂), יחד עם כמויות קטנות של פחמן דו-חמצני (CO₂), קיטור (H₂O), תרכובות גופרית של מימן גופרתי (H₂S) וקרבוניל גופרתי (COS), אמוניה וקצת אפר וחלקיקים.

שילוב תחליפי נפט מבוססי פסולת במערך התחבורה בישראל
 עבור המנהלת לקידום תחליפי נפט במשרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים
 שלב א': סקר ספרות

תרשים 25 - מרכיבים של סינגז המיוצר מגזיפיקציה של פחם



מקור: DOE, http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/gasifipedia/4-gasifiers/4-3_syngas-detail.html

טבלה 16 - סיכום של המזהמים השונים בסינגז מביומסה / פסולת שיש להסיר

Contaminant	Example	Potential Problem
Particles	Ash, char, fluid bed material	Erosion
Alkali Metals	Sodium and Potassium Compounds	Hot corrosion, catalyst poisoning
Nitrogen Compounds	NH ₃ and HCN	Emissions
Tars	Refractive aromatics	Clogging of filters
Sulfur, Chlorine	H ₂ S and HCl	Corrosion, emissions, catalyst poisoning

מקור: Ciferno & Marano, 2009

ישנם 4 שימושים מרכזיים של סינגז שנבחנו להפקת דלקים נוזליים (כאשר חומר הגלם הוא ביומסה ו/או פסולות):

- **סינתזה של פישר-טרופס** - תהליך קטליטי כימי שמשמשים בו מאז 1920 להפקת דלקים נוזליים מסינגז המיוצר מפחם וגז טבעי,
- **סינתזה באמצעות מתנול** - תהליך קטליטי כימי שמשמשים בו להפקת מתנול מסינגז המיוצר מקיטור (steam reform) או סינגז מפחם,
- **סינתזה של כוהלים מעורבבים** - תהליך קטליטי כימי שמייצר תערובות של מתנול, אתנול, פרופאנול, בוטאנול, וכמויות יותר קטנות של כוהלים יותר גבוהים,
- **התססה של סינגז** - תהליך ביולוגי שמשמש במיקרואורגניזמים אנארוביים להתסיס את הסינגז ליצירת אתנול או כימיקלים.

לכל אחד מהתהליכים המוזכרים לעיל יש דרישות שונות מבחינת התרכובות של הסינגז שנכנס לתהליך וכן תפוקה שונה, על מנת שיהפך לכדאי מבחינה מסחרית.

שילוב תחליפי נפט מבוססי פסולת במערך התחבורה בישראל
 עבור המנהלת לקידום תחליפי נפט במשרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים
 שלב א': סקר ספרות

טבלה 17 - דרישות סינגז עבור ארבעת התהליכים להמרת הגז לדלקים נוזליים

Conversion	Fischer-Tropsch		Methanol		Mixed Alcohol				Fermentation	
Products	Olefins + CO ₂	Paraffins + H ₂ O	Methanol	Methanol	Mixture of ethanol and higher alcohols				Ethanol	
Catalyst	Fe	Co	Cu/ZnO/Al ₂ O ₃ (Gas contact)	Cu/ZnO (Liquid contact)	Alkali/Cu /ZnO(Al ₂ O ₃)	Alkali/ZnO /Cr ₂ O ₃	Alkali/CuO /CoO	Alkali/MoS ₂	Biological	
Temp (°C)	300-350	200-250	220-275	225-265	275-310	300-425	260-340	260-350	20-40	
Pressure (bar)	20-40	10-40	50-100	50	50-100	125-300	60-200	30-175	1-2	
H ₂ /CO ratio	0.6 - 1.7	Slightly >2	Unimportant		1 - 1.2				Not sensitive	
(H ₂ -CO ₂)/ (CO+CO ₂) ratio	Unimportant		Slightly >2	Low ratios ~0.68	Same as methanol (gaseous)	Same as methanol (gaseous)	Same as FT (Co catalyst)	Unimportant	Unimportant	
CO ₂	<5%		4-8% (very slow reaction without any CO ₂ , but also inhibited if too much present)					<5% (avoid promotion of methanol)	Aids initial growth rates	
H ₂ O	Low (slowly oxidises catalysts, very large amounts inhibit Fe based FT synthesis)		Low (excessive amounts block active sites, reducing activity but increasing selectivity)					Same as FT (Co catalyst)	Most reactors use an aqueous solution	
Hydrocarbons	Recycle to produce smaller molecules (to improve efficiency)		Recycle to produce smaller molecules (to improve efficiency)						None	
C ₂ H ₂	Low (inert)		Low (inert)	<5ppmv					Unknown	
CH ₄	<2% (inert)		Low (inert)						Low (inert)	
N ₂	Low (inert)		Low (inert)						Low (inert)	
HCN	<10ppb (poison)		<10ppb (poison)						Unknown	
NH ₃	<10ppb (poison)		<10ppb (poison)						Can help organism growth <40ppmv, since >150ppmv inhibits bacterial enzymes	
NO _x	<100ppb (poison)		<100ppb (poison)						Resistant, 50-100ppmv is actually needed	Tolerant (up to 2% H ₂ S), since S can help certain organisms' growth
Sulphur (COS, H ₂ S, CS ₂)	<100ppb (most important poison)	<60ppb (most important poison)	<100ppb (poison, permanent activity loss) COS only a poison in liquid phase Zn can scavenge 0.4% of its weight in S while maintaining 70% activity							
Halides (HCl, Br, F)	<10ppb (poison, can lead to structural changes in the catalyst)		<1ppb (poison, leads to sintering)	<10ppb (poison, leads to sintering)					Same as FT (Co catalyst)	Should be removed, although some organisms tolerant to Cl compounds
Alkali metals (Na, K)	<10ppb (promotes mixed alcohol reaction)		Low (avoid due to promotion of mixed alcohol reaction)					Unknown		
Tars	Concentration below dew point (otherwise condense on surfaces)		Concentration below dew point (otherwise tars will condense on catalyst and reactor surfaces)					Must be removed – similar requirements to FT		
Particulates	<0.1 ppm		<0.1 ppm	<0.1 ppm	Must be removed					
Particulate size	<2µm		Unknown	Low	Co (beneficial methanol to ethanol conversion)	Must be removed				
Other trace species:	Unimportant		Avoid: As, P, Pb (lower activity, as with other heavy metals), Co (form CH ₄ , activity reduced), SiO ₂ (promotes wax with surface area loss), free Al ₂ O ₃ (promotes DME), Ni and Fe (promote FT)							

Chemical key: H₂ = Hydrogen, CO = Carbon monoxide, CO₂ = Carbon dioxide, H₂O = Water, C₂H₂ = Acetylene, CH₄ = Methane, CH₃OH = Methanol, N₂ = Nitrogen, HCN = Hydrogen cyanide, NH₃ = Ammonia, NO_x = Nitrous oxides, COS = Carbonyl sulfide, H₂S = Hydrogen sulphide, CS₂ = Carbon bisulphide, HCl = Hydrogen chloride, Br = Bromine, F = Fluorine, Na = Sodium, K = Potassium, SiO₂ = Silica, Co = Cobalt, Cu = Copper, Fe = Iron, Ni = Nickel, As = Arsenic, P = Phosphorous, Pb = Lead, Zn = Zinc, Al₂O₃ = Aluminium Oxide (Alumina), Cr = Chromium, Cr₂O₃ = Chromium Oxide, MoS₂ = Molybdenum Sulphide

מקור: Review of Technologies for Gasification of Biomass and Wastes Final report (NNFCC project 09/008), 2009

חשוב לציין כי לא משנה מהי טכנולוגיית הגזיפיקציה, תמיד נמצאים בחומר הגלם מבימוסה או פסולת אחרת אלמנטים כגון גופרית וכלור, אשר מייצרים גזים שיש להסיר לאחר תהליך הגזיפיקציה.

אין טכנולוגיית גזיפיקציה אחת שיכולה לעמוד בדרישות האיכות של הסינגו עבור דלקים נוזליים ללא תהליך ניקוי של הגז. עם זאת, חשוב לציין כי יש טכנולוגיות גזיפיקציה שמייצרות סינגו יותר מתאים לתהליך הניקוי. הטבלה הבאה מציגה השוואה בין המתקנים השונים מבחינת כדאיות השימוש בהם לטובת ייצור דלקים.

טבלה 18 - השוואה בין סוגי מתקני הגזיפיקציה השונים להפקת דלקים נוזליים

Gasifier type	Feedstock tolerance	Syngas quality	Development status	Scale up potential	Costs
EF	● Preparation to <1mm, 15% moisture, low ash %, composition unchanging over time	●●● Very low CH ₄ , C ₂₊ and tars, high H ₂ and CO	●●● Constructing BTL demos, integration and large scale experience, large industrial players	●●●● Very large gasifiers and plants possible	●●● High efficiency. Expensive pre-treatment if decentralised
BFB	●●● <50-150mm, 10-55% moisture, care with ash	●● C ₂₊ and tars present, high H ₂ and CO only if O ₂ blown. Particles	●● Past heat & power applications, modest scale up, some BTL interest	●●● Many large projects planned	●● Possible higher gasifier capital costs and lower efficiency
CFB	●●● <20mm, 5-60% moisture, care with ash	●● C ₂₊ and tars present, high H ₂ and CO only if O ₂ blown. Particles	●● Extensive heat & power expertise, research & scale up, but few developers, particularly for BTL	●●● Many large projects planned	●●● Possible higher gasifier capital costs
Dual	●●● <75mm, 10-50% moisture, care with ash	●● C ₂₊ and tars present, high H ₂ , but high CH ₄ . Particles	● Few and small developers, early stages, only very recent interest in BTL	●● Some projects planned, but only modest scale up	●●● Potential for low syngas production costs
Plasma	●●●● No specific requirements	●●●● No CH ₄ , C ₂₊ and tars High H ₂ and CO	●● Several developers, many power applications, early stage of scale-up	● Only small scale, modular systems	● Very high capital costs, low efficiency

מקור: Review of Technologies for Gasification of Biomass and Wastes Final report (NNFCC project 09/008), 2009

● (נמוך) ●●●● (טוב)

סוגי מתקני הגזיפיקציה המצוינים בטבלה לעיל:

- (Entrained Flow) EF
- (Bubbling Fluidized Bed) BFB
- (Circulating Fluidized Bed) CFB
- (Dual Fluidized Bed) Dual

דוגמאות לעלויות:

- סך עלויות ההון עבור מפעל גזיפיקציה (בקנה מידה קטן) עבור סינתזה של פישר-טרופס (1,520 טון יבש/יום של קלט של ביומסה) מוערכות החל מ-138-207 מיליון ליש"ט (1,140-760 מיליון ₪). הערכה זו כוללת טיפול מקדים של חומר הגלם, אך לא כוללת את המרת הסינגו לדלק נוזלי.
- עלויות תפעול של מפעלי גזיפיקציה מוערכות בכ-3.5-5.7% מעלויות ההון, לשנה.
- טיפול מקדים שלא במפעל יכול להוסיף הרבה לעלות ההון של המערכת – כלומר, שווה יותר מבחינה כלכלית לעשות את הטיפול המקדים במפעל עצמו.
- מערכות המפעילות לחץ (כגון, מערכות דחיסה של אוויר או חמצן) יכולות להוזיל באופן משמעותי את עלות ניקוי הסינגו ועלויות ההון באופן כללי.
- מחירי ניקוי הגז שונים באופן משמעותי, והמידע עליהם הוא מאוד מצומצם (Review of Technologies for Gasification of Biomass and Wastes Final report (NNFCC project (09/008), 2009).

4.3.2.7 השלכות סביבתיות של תהליך הגזיפיקציה

בפרק זה יוצגו השלכותיהן של טכנולוגיות הפירוק הגזי בכלל המאפיינות באופן כללי את משפחת טכנולוגיות ההמרה התרמית והרלוונטיות בעיקר לגזיפיקציה. המאפיינים הייחודיים לכל טכנולוגיה יוצגו בפרקים הרלוונטיים.

הזיהום מטיפול תרמי בפסולת מתחלק ל-4 סוגים:

1. זיהום אוויר
2. גזי חממה
3. אפר
4. זיהום מים וקרקע

חשוב להדגיש כי רמת הזיהום תלויה באופן ישיר וחזק בסוג הפסולת הנכנסת לתהליך. על מנת לבחון יסודית טכנולוגיות שיובאו לארץ יש צורך למפות ולאפיין את סוג הפסולת המיועדת לטיפול במתקן על מנת לצפות את רמת הזיהום הצפויה כתוצאה מטיפול בה. אם כן, כפי שיפורט בהמשך

זיהום אוויר

יתרונה המרכזי של טכנולוגיות הפירוק הגזי בכלל והגזיפיקציה בפרט הינה במידת זיהום האוויר הפחותה, יחסית, שמייצרת הטכנולוגיה. ההתקדמות הטכנולוגית אפשרה להמיר את הפסולת לאנרגיה מבלי לשרוף אותה ישירות. כמו כן, גז הסינגו עובר תהליך ניקוי טרם שריפתו (בניגוד לשריפה קובנציונאלית, בה הפסולת נשרפת ישירות) הליך שמונע פליטה רבה של מזהמים. תכונה זו של טכנולוגיות הפירוק הגזי אפשרה את לטכנולוגיה לעמוד בתקנים סביבתיים מחמירים.

הגזים הנוצרים בעת שריפת דלקים ובכללם פסולת אורגנית ופסולת מעורבת, מכילים מרכיבים המסכנים את בריאות האדם ואת סביבתו. ההתנגדות הציבורית לפליטת מזהמי אוויר והביסוס המדעי להשלכות ההרסניות של זיהום האוויר על בריאות האדם וסביבתו, האיצו את הרגולציה וכפועל יוצא מכך את התפתחותן של טכנולוגיות לטיפול בגזי הפליטה. המזהמים הראשיים של תהליך שריפת/פירוק גזי של

הפסולת הינם: דיאוקסינים, חלקיקים, גזים חומציים, מתכות רעילות, הידרוקרבוניס, תרכובות אורגניות וחומרים מסוכנים אחרים (בהתאם להימצאותם בזרם הפסולת).

התקינה להגבלת פליטת מזהמי האוויר ממתקני שריפת פסולת, הנה הגורם העיקרי למרוץ הטכנולוגי שחל בשנים האחרונות בתחום הטיפול התרמי בפסולת, והיא זו שקובעת **דה-פקטו** את רמת הפליטה ממתקנים אלו. עד לפני מספר שנים התמקדו הטכנולוגיות ביצירת פתרון זול תוך עמידה מינימאלית בתקני הפליטה במקום המפעל, שהולכים ומוחמרים ע"י קובעי מדיניות במרבית מדינות המערב.

אופי גזי הפליטה מתהליכי טיפול תרמי בפסולת נובע ראשית מהרכב הפסולת המובערת. היות הפסולת תשומה בלתי צפויה שאינה הומוגנית מתבטאת בתמהיל גזי פליטה מורכב יותר מזה של שריפת דלקים פוסיליים. רכיבים שונים הקיימים בפסולת כגון: מתכות ופלסטיקים, מייצרים זיהום אוויר אשר אינו בנמצא בתחנות כוח פחמיות וכבשני תעשייה. פרמטרים נוספים עיקריים המשפיעים על הרכב גזי הפליטה הם סוג התהליך התרמי טמפרטורות הבעירה ואמצעי הפחתת המזהמים הננקטים במפעל.

מערכות טיפול בגזי פליטה

מתקני הגזיפיקציה, בדומה למתקני השריפה הקונבנציונאלית, נדרשים במערכת (Air Pollution) APC (Control) על מנת לעמוד בתקני הפליטה. סוג המערכת משתנה בהתאם לטכנולוגיה המיושמת במתקן ובאופן הפקת והשבת הסינגז. מערכת הטיפול בגזי הפליטה מתהליך הגזיפיקציה שונה מזה של השריפה הקונבנציונאלית, כאמור, משום שבגזיפיקציה מתרחש תהליך הטיפול בגז, טרם השבתו לאנרגיה (ולא לאחר ההשבה, כמו בשריפה) ובכך "נחסכת" פליטה של מזהמים נוספים לאוויר.

ישנן טכנולוגיות שונות לטיפול בגזי הפליטה הנבדלות זו מזו בין היתר בעלויותיהן, ביעילות הניקוי, באמינותן ובמורכבות הטכנולוגית שלהן.

השיקולים בקביעת מערכת הטיפול המתאימה לגזי הפליטה במתקן לטיפול תרמי בפסולת עירונית הינם:

- **אפיון הפסולת** - תהליך בעל חשיבות מכרעת בחיזוי כמויות הפליטה ממתקני הטיפול. מומלץ לבצע ניתוח, המבוסס על בחינת מרכיבי הפסולת בישראל, לחיזוי מרכיבי הפסולת שייכנסו לתהליך.

- **אופן השבת הסינגז**

- **תקנות הפליטה** - כאמור, תקנות הפליטה הן אלו שיכתיבו את כמות הפליטה בפועל.

- **תקציב וכלכליות** - הטכנולוגיות נבדלות זו מזו בעלויותיהן.

- **סוג הטיפול התרמי** - שריפה לעומת פירוק גזי.

- **גורמים מקומיים** - קרקע, אקלים, קרבה למוקדי אוכלוסייה, דעת הציבור וניסיון היזם.

4.3.2.8 תקינה ואכיפה

עמידה בתקני הפליטה למפעלים בכלל ולמפעלי טיפול תרמי בפרט, הינו כרטיס הכניסה והאישור הראשוני להפעלת הטכנולוגיה בארץ. לאחר הבדיקה כי ערכי הפליטה עומדים בתקנים, מתבצעות בדיקות מקיפות הלוקחות בחשבון את קצבי הפליטה ואת כמויות המזהמים שייפלטו לאוויר כתוצאה מהפעלת המתקן.

חשוב להדגיש כי תקני פליטות המזהמים ממתקנים לטיפול תרמי בפסולת המקודמים ע"י המשרד להגנ"ס, הינם בין המחמירים בעולם ודומים לאלו שבגרמניה.

4.3.2.9. ישימות בעולם

הפקת אנרגיה מדלקים פוסיליים ע"י טכנולוגיית הגזיפיקציה, הינה תהליך מוכר הנמצא בשימוש ברחבי העולם עשרות שנים. עם זאת, יישומה של הטכנולוגיה כטיפול בפסולת עירונית נמצא בראשית הדרך ומתמזה בעיקר ביפן ובגרמניה.

ממחקר ישראלי (בר-זיו, 2010) עולה כי קיימות עשרות חברות שעוסקות בגזיפיקציה של פסולת עירונית מוצקה, המפעילות כ-74 מתקנים לפסולת ביתי בקנה מידה מסחרי (500-100 טון ביממה). רשימה מפורטת נמצאת בנספח ב'.

מן הממצאים הללו וממקורות נוספים עולה, כי מרבית המתקנים הפועלים כיום בקנה מידה מסחרי נמצאים ביפן. הסיבה לכך טמונה בדרישות הרגולציה היפנית, המחמירות בתקני פליטת הדיאוקסינים לאוויר. האפר הנותר מתהליך הגזיפיקציה מכיל כמויות קטנות יותר של דיאוקסינים מזה שנותר בתהליך השריפה הקונבנציונאלית ולכן מעודדת ממשלת יפן הקמה ושימוש בטכנולוגיות הפירוק הגזי על פני השימוש בשריפה. כבר בשנת 2000, הביקושים להקמת מתקני גזיפיקציה ביפן עלו על אלו של מתקני השריפה הקונבנציונאלית. על פי סקירת שוק שערכה חברת Stantec, הטכנולוגיות המוכחות ביותר של גזיפיקציה לטיפול בפסולת עירונית מוצקה, פותחה ע"י חברת Nippon Steel היפנית המפעילה 28 מתקני גזיפיקציה מסחריים לטיפול בפסולת ביתית. היישום כיום של טכנולוגיית הגזיפיקציה מחוץ ליפן (כשתשומת התהליך הינה פסולת ביתית) נמצא בראשיתו.

נדגיש כי היישום המוגבל של הטכנולוגיה בטיפול בפסולות שתואר לעיל, נכון עבור השימושים הנפוצים בסינגו שהם חום וחשמל. על כן, ישימות התהליך לצורך הפקת דלקים לתחבורה מפסולות (כיום ובעתיד הנראה לעין) הינה מוגבלת ביותר.

כיום, הייעודים העיקריים לתוצר הסינגו הם:

- חומר הזנה לייצור חשמל (השימוש הנפוץ ביותר כיום לתהליך הגזיפיקציה – ראה טבלה 30)
- חומר גלם לתעשיית הכימיקלים העולמית

וכפי שצוין לעיל, נעשית עבודה בתחום המחקר והפיתוח ליעד את הסינגו כ:

- חומר הזנה לייצור אתנול כתחליף לבנזין להזנת כלי תחבורה (תשומה עיקרית מגידולים חקלאיים ייעודיים),
- ייצור בידלקים (כגון דיזל, קרוסין, דס"ל, DME, מתנול) להזנת כלי תחבורה (תשומות שונות כגון פסולת עירונית מוצקה, פסולת חקלאית, פסולת פלסטיק וצמיגים ועוד).

טבלה 19 - תשומות תעשיית הגזיפיקציה העולמית (מגה-וואט לייצור חשמל או חום)

Feedstock		Operating 2010	Under Construction 2010	Planned 2011-2016	Totals
Coal	Syngas Capacity (MW _{th})	36,315	10,857	28,376	75,548
	Gasifiers	201	17	58	276
	Plants	53	11	29	93
Petroleum	Syngas Capacity (MW _{th})	17,938			17,938
	Gasifiers	138			138
	Plants	56			56
Gas	Syngas Capacity (MW _{th})	15,281			15,281
	Gasifiers	59			59
	Plants	23			23
Petcoke	Syngas Capacity (MW _{th})	911		12,027	12,938
	Gasifiers	5		16	21
	Plants	3		6	9
Biomass/Waste	Syngas Capacity (MW _{th})	373		29	402
	Gasifiers	9		2	11
	Plants	9		2	11
Total Syngas Capacity (MW _{th})		70,817	10,857	40,432	122,106
Total Gasifiers		412	17	76	505
Total Plants		144	11	37	192

מקור: NETL, <http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/worlddatabase/summary.html>

4.3.2.10. עלויות תהליך הגזיפיקציה²⁸

מניתוח טכנו-כלכלי שנעשה עבור משרד האנרגיה האמריקאי בשנת 2009 על הפקת אתנול מפסולת עירונית מוצקה בטכנולוגיית הגזיפיקציה, נלקח בחשבון כי פסולת עירונית מוצקה מהווה חומר גלם שעלותו אפסית וכי המתכות שממוצות מתהליך הטיפול המקדים נמכרות בשוק (זאת לעומת ביומסה של שבבי עץ שעלותה 60 דולר לטון). מהמחקר עולה כי עלות האתנול המופק בתהליך הוא \$1.85 לגלון (נכון לשער הדולר בתחילת שנת 2008 ו-10% החזר השקעה), מחיר תחרותי לשוק האתנול נכון לתקופת הזמן הנידונה. כמו כן, עלה במחקר כי מכירת החומרים הניתנים למחזור (דוגמת מתכות) הינם מהותיים לרווחיות התהליך, שיפורים טכנולוגיים יכולים להעלות משמעותית את החזר ההשקעה וכי יש להרחיב את המחקר והניתוח של רעילות זרם הפסולת המועברות לטיפול בגזיפיקציה.

²⁸ לאומדן מבוסס יותר (בשל ישימות הטכנולוגיה להפקת חשמל) על מתקן גזיפיקציה המייצר חשמל ראו -"שילוב טכנולוגיות הפירוק הגזי במערך הטיפול בפסולת בישראל", כיוון 2011.

טבלה 20 - עלויות הון לייצור אתנול מפסולת עירונית מוצקה וביומסה

Table 4-2 Capital Costs for the MSW and Biomass Cases

	MSW Case		Biomass Case	
Million gallons/year ethanol	27		36	
Capital Costs	Million \$	% of Total	Million \$	% of Total
RDF production	\$105	23%	\$0	
Feedstock drying	\$40	9%	\$39	11%
Gasification, tar reforming, scrubbing	\$67	15%	\$56	16%
Syngas conditioning	\$164	37%	\$167	49%
Mixed alcohol synthesis	\$20	4%	\$21	6%
Mixed alcohol separation	\$9	2%	\$11	3%
Steam system and power generation	\$34	8%	\$39	11%
Remainder off-site battery limits	\$9	2%	\$9	3%
Total Capital Investment	\$449		\$343	
Project investment/annual gallon ethanol	16		9	

מקור: PNNL, http://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/pnnl-18482.pdf

עלויות קבועות ועלויות התפעול משתנות כתלות בהרכב חומר הגלם (מידת הניקיון, אפשרות למכור מוצרים כגון אלומיניום וברזל, שיעור הרטיבות וכד'). פרטים נוספים ניתן למצוא במסמך לעיל של PNNL-

Pacific Northwest National Lab.

4.3.3. פירוליזה

הפירוליזה, המכונה גם תרמוליזה, היא תהליך פירוק תרמי של חומרים בהעדר חמצן (ובטמפרטורות שונות, כפי שיוסבר להלן) לייצור של דלקים דחוסים ולא דחוסים. בתהליך זה מחממים בטמפרטורות גבוהות את הביומסה המתפרקת לגורמים, לאחר מכן עוברים החומרים קירור מידי (quenching), נוצרים אדים, החומר ממוצה והתוצר הסופי הוא יחסית הומוגני. תהליך זה נחקר בעשורים האחרונים על מנת להבין את התהליך הפיסיקאלי ואת התכונות הכימיות של תוצרי התהליך (דלקים) בו זמנית. התהליך הטכנולוגי עצמו דורש כ-15% מהאנרגיה המופקת לצורך קיומו.

שלושת התוצרים העיקריים של הטכנולוגיה הינה:

1. **זרם גז** - מכיל בעיקר מימן, מתאן, פחמן חד חמצני, פחמן דו חמצני וגזים אחרים התלויים בחומר האורגני המוזן למערכת
2. **זרם נוזלי** - מכיל זרם שומני המורכב מחומצה אצטית, אצטון, מתנול ורכובות פחמניות מחומצנות. באמצעות עיבוד נוסף ניתן לייצר דלק סינתטי שומני.
3. **זרם מוצק** - סוג פחם, המכיל פחמן כמעט טהור יחד עם חומרים אינרטיים אשר היו במקור בפסולת המוצקה.

ניתן לסווג את הטכנולוגיה לשלוש תת-טכנולוגיות:

1. **פירוליזה איטית** - בטמפרטורות נמוכות (כ-300 מ"צ), המיועדת בעיקר לחומרים אורגניים שאינם צורכים חום גבוה. טכנולוגיה המשמשת בעיקר לייצור פחם וגז.
2. **פירוליזה בינונית** - בטמפ' בינונית (בין 300-500 מ"צ)
3. **פירוליזה מהירה** - בטמפ' גבוהות (500 מ"צ). תהליך זה הכי מתאים להפקת דלק מביומסה. טכנולוגיה זו משתנה ונמצאת בשלבי מחקר ופיתוח - מבין הניסויים ליישומה קיימת שיטת המצע המרחף, מיכל קוני סיבובי, פירוליזה ואקום ועוד. הסיבה העיקרית ליישום הפירוליזה המהירה נובע מיכולת ההשבה הגבוהה (כ-80% משקלית) בתהליך פשוט ומהיר באופן יחסי.

4.3.3.1. מרכיבי תהליך הפירוליזה²⁹

1. מיון חומר הגלם (ביומסה/ פסולת) וכן ייבוש חומר ההזנה והפחתת נפחו
2. פירוליזה מהירה- חימום מהיר של חומר ההזנה
3. תהליך Hydrotreating (ניקוי באמצעות מימן) של השמן שנוצר בתהליך הפירוליזה המהירה לייצובו
4. תהליך Hydrocracking (תהליך המשלב פיצוח קטליטי והידרוגנציה באמצעות מימן) של השמן הפחמימני
5. זיקוק השמן לתערובות בנוין (gasoline) ודיזל
6. חילול אדים בתהליך off-gas ליצירת מימן הנדרש לתהליכי ה-Hydrotreating וה-Hydrocracking.

כפי שכבר צוין במסמך זה, משרד האנרגיה האמריקאי מתמקד בשמונה טכניקות שיש להתמקד בהם ולהשקיע מאמצים בתחום המחקר והפיתוח כדי לקדם. בין הטכנולוגיות כלול תהליך הפירוליזה המהירה ו-Hydroprocessing.

תהליך הפירוליזה המהירה וה-Hydroprocessing לייצור דלק מביומסה³⁰ כולל את השלבים הבאים:

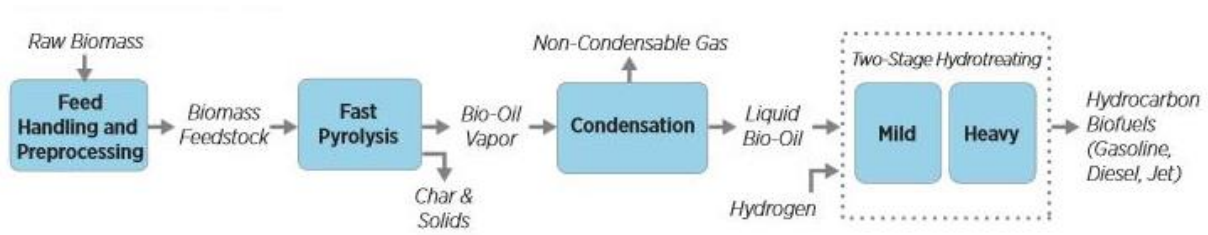
1. **ייבוש ביומסה** - להפחתת משקלה (מ-30% ל-10% לחות) ויצירת אחידות בגודל גרגר של ח"ג הנכנס לתהליך הפירוליזה (6-2 מ"מ). מקורו של החום מיוצר מהתהליך עצמו.
2. **פירוליזה מהירה** - הביומסה מחוממת במהירות לטמפ' של כ-500 מ"צ בפחות משניה, לרוב בתוך ריאקטור של מצע מרחף (Fluidize bed) ללא נוכחות חמצן.
3. אדי שמן הפירוליזה יוצאים מהריאקטור, החלקיקים המוצקים והאפר הנותר מוסרים באמצעות צנטריפוגה.
4. אדי השמן מתקררים ומתעבים לכדי נוזל גולמי עם תפוקה של כ-75% ממשקלם היבש.

שמן הפירוליזה שנוצר אינו מתאים לשימוש ישיר כדלק לתחבורה ולכן עליו לעבור תהליך שדרוג על מנת לייעד את השמן לדלק תחבורה.

²⁹ PNNL, http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/pnnl-18284.pdf

³⁰ ביומסה - שאריות חקלאות ויערות, פסולת עירונית מוצקה (MSW), פסולת תעשייתית, יבולים יבשתיים או מימיים הגדלים אך ורק עבור ייצור אנרגיה.

תרשים 26 - תהליך הפירוליזה המהירה לייצור דלקים פחמימניים



מקור: U.S. DOE, www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/fast_pyrolysis_and_hydroprocessing.pdf

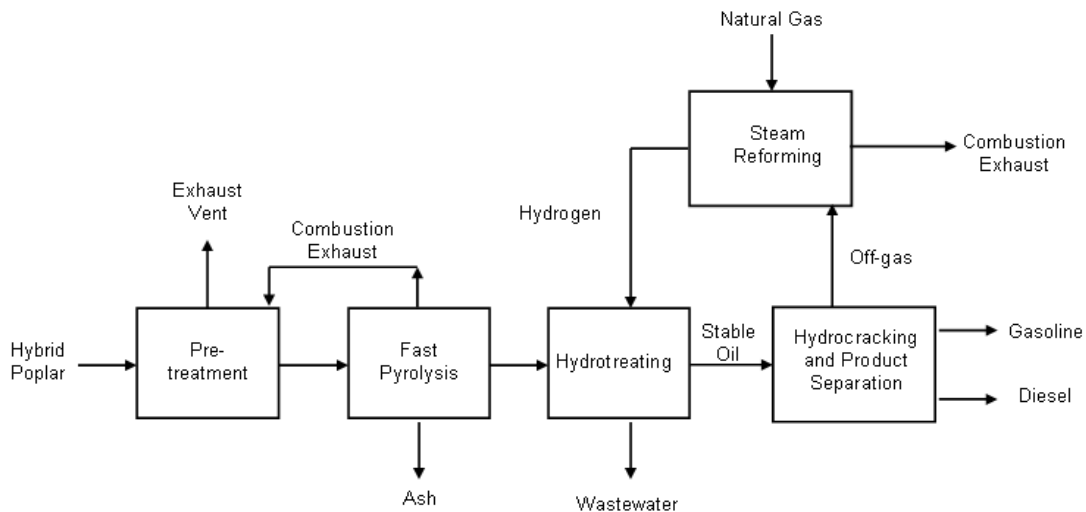
המחקר של משרד האנרגיה בארה"ב מתמקד בפיתוח תהליך ה-Hydroprocessing, תהליך נפוץ בתעשיית הנפט, המחולק לשני שלבים:

1. **Hydrotreating מתון** - ריכוך של חלקים ריאקטיביים ולא מיוצבים בטמפ' של 240 מ"צ בלחץ של 2500 psig³¹ (כ-37 בר) בנוכחות של מימן וקטליזטור מסוג קובלט מולבידן (CoMo).
2. **Hydrotreating כבד** - בשלב זה החומר מועבר לתנאים של 370 מ"צ בלחץ של כ-2000 psig בנוכחות של מימן וקטליזטור (מסוג CoMo למשל) במטרה להסיר את מרבית החמצן הנותר בשמן ולעבד את מולקולות השמן לכדי פחמימניים המתאימים להוספה לתערובת של דלקים קונבנציונליים.
3. שלב מימי הכולל 2% פחמן מופרד מהשמן הפחמימני לאחר תהליכי ה-Hydroprocessing ומועבר לטיפול במתקן לטיפול בשפכים (מט"ש).
4. לאחר שמתקבל שמן יציב, הוא עובר תהליך של הפרדה ופיצוח באמצעות מימן (Hydrocracking) כדי לקבל תוצרי בנזין ודיזל.
5. תוצר השמן שנוצר משני השלבים האחרונים באמצעות טיפול ה-Hydroprocessing ניתן לייעד ל:

1. גזים קלים לדלקים וכחומר גלם לתעשיות שונות
2. תערובות (בלנדים) של נפטא
3. תערובות (בלנדים) של דיזל
4. תערובות (בלנדים) של נפטא ודיזל לרכבים כבדים יותר

³¹ pounds per square inch gauge

תרשים 27 - שדרוג שמן הפירוליזה לתוצרי בנזין ודיזל



מקור: PNNL, http://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/pnnl-18284.pdf

בנוסף לתהליך ה-Hydroprocessing, ניתן לייצר סינגו משמן פירוליזה ולהשתמש בתהליך סינתזה להמיר אותו לדלקים לתחבורה (כפי שתואר בפרק על גזיפיקציה).

4.3.3.2 חומרי גלם לתהליך הפירוליזה

חומרי הגלם (סוגי הפסולת) בהם משתמשים לתהליך הפירוליזה המהירה (שכאמור מתאימה להפקת דלקים לתחבורה) הם:

- ביומסה שמקורה בחומרים מתאית דוגמת שבבי עץ, שאריות חקלאיות (קליפות אורז, קש וכו') ושאריות עצים מיערות – זו התשומה המרכזית בה נעשה שימוש כיום.
- פסולת עירונית שעברה טיפול מקדים של מיון, טחינה וייבוש. נכון להיום, אין ניסיון בקנה מידה גדול וכמעט ואין ספרות על השבת שמן מפסולת מעורבת בתהליך פירוליזה מהירה (Brown et al., 2013).

4.3.3.3 תוצרי תהליך הפירוליזה המהירה

התנאים בהם מתקיים תהליך הפירוליזה (כגון תהליך הקירור המהיר - quenching) ואופן הפעלת הקיטור משפיעים על תכונות תוצרי התהליך.

התוצרים המתקבלים לפני תהליך השדרוג של שמן הפירוליזה לדלק תחבורה:

- 60-75% שמן (נוזלים)
- 15-20% אפר (Char) (מוצקים)
- 10-20% גז (על פי חברת Dynamotive³²)

כאמור, הפיכת פסולת לדלק לתחבורה נמצאת עדיין בשלבי מחקר ראשוניים. אנו מציגים להלן מגוון עבודות שנעשו במעבדות שונות, בעיקר בארה"ב, בהן בחנו את התהליכים.

³² www.dynamotive.com

במחקר של המעבדה הלאומית לאנרגיה מתחדשת (NREL) משנת 2010, בו השתמשו בשאריות תירס כחומר הגלם, התוצרים הסופיים הם תוצרי לוואי קלים, מים ופחמן דו-חמצני, בנזין ודיזל. הבנזין היווה 30% משקלי והדיזל 8% משקלי מהתוצרים הסופיים (Wright et al., 2010).

טבלה 21 - תוצרים (Yield) מתהליך פירוליזה ו-Hydrotreating/Hydrocracking של תאית (יחידות: אחוז משקלי)

Feed	Wt %
Pyrolytic Lignin	100
Hydrogen	4-5
Product	
Light Ends	15
Gasoline	30
Diesel	8
Water, Carbon Dioxide	51-52

מקור: PNNL, http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/pnnl-18284.pdf

ההבדלים בין התוצאות יכולים לנבוע ממספר סיבות: חומר גלם שונה, שימוש בטכניקות ובכלים שונים לביצוע השדרוג (כגון קטליזטורים שונים, מתקני פירוליזה שונים וכדומה). אך, הנקודה החשובה היא כי הטכנולוגיה נמצאת כיום בתהליכי מחקר ופיתוח ואין אחידות בממצאים.

4.3.3.4 יעילות אנרגטית של טכנולוגיית הפירוליזה

כפי שתואר לעיל, יכולת ההשבה של ביומסה בתהליך הפירוליזה המהירה תלוי בעיקר בסוג חומר ההזנה ובטמפרטורת החימום. יכולת ההשבה המקסימלית מתרחשת בטמפי חימום של $480-520^{\circ}\text{C}$ בהתאם לחומר הגלם המוזן. עשבים שונים מעניקים מקסימום השבה של נזל 55-60% משקלית לאחר שיובשו. התוצר הנוזלי של התהליך מכיל כ-42% מתכולת האנרגיה של דלק (fuel oil) משקלית ו-61% נפחית (Bridgewater, 2012).

מבחינת יחסי תשומה תפוקה, ממקרה בוחן של PNNL משנת 2009, עולה כי על כל 0.05 טון של ביומסה משבבי עץ צפצפה ניתן למצות כ-0.03 טון ביו-שמן, יחס של 0.6 בין שבבי העץ המוזנים לתוצר שמן הפירוליזה. לאחר מכן עובר השמן זיקוק נוסף בתהליך Hydrotreating. בתהליך זה על כל 0.05 טון שמן פירוליזה מזוקק כ-0.02 טון שמן מיוצב (Jones et al., 2009). כלומר על כל טון ביומסה מיובשת מתקבל 0.12 טון שמן מיוצב אשר יכול לשמש כדלק לתחבורה.

4.3.3.5 שאריות מתהליך הפירוליזה המהירה

ישנן דעות חלוקות לגבי ההשפעה הבריאותית של הטכנולוגיה לאורך זמן בקנה מידה גדול. כמו כן יש מחלוקות מסוימות באשר להשפעות הבריאותיות של האפר, תוצר הלוואי של התהליך, מבחינת החשיפה הכרונית (חשיפה ממושכת לחומרים רעילים למשך זמן). בשנת 2005 נעשה מחקר אודות הרעילות של מספר תוצרי השמן (European Community, 2005), התוצאות מורכבות אך עם זאת המסקנה העולה מהניתוח היא שתוצר השמן אינו מביא עמו סיכון בריאותי וסביבתי משמעותי (Bridgewater, 2011). בהשוואה לדלק ממקורות פוסיליים, תוצר השמן מתכלה מהר יותר ונחשב פחות רעיל.

- **פליטות** - שימוש בשמן כחומר הזנה לדלקים מפחית את פליטות הפחמן מאחר ומקורם בביומסה ממקור צמחי לרוב (ניטרלי מבחינת פד"ח). השמן מכיל כ-100 כימיקלים מקבוצות שונות דוגמת חומצות אורגניות, אדלהידים, תערובות פנוליות, ארומטיים ועוד. ההרכב משתנה בהתאם לחומר הגלם המוזן לתהליך ולתנאי הפירוליזה וכך גם הרעילות. עד כה לא בוצעו מחקרים שיטתיים בנושא עקב העלות הגבוהה הנדרשת למחקרים אלו, אשר ממומנים לרוב ע"י החברות היצרניות.
- **שפכים** - שלב מימי הכולל 2% פחמן מופרד מהשמן הפחמימני לאחר תהליכי ה-Hydroprocessing ומועבר לטיפול במטי"ש (Fast Pyrolysis and Hydroprocessing, (n.d.)).
- **צ'אר** - האפר הנוצר מתהליך הפירוליזה מספק מקור אנרגיה לחימום בתהליך ייבוש חומר ההזנה ובמתקנים גדולים משמש לצורך הפקת חשמל. לרוב האפר מכיל כ-25% מסך האנרגיה של חומר ההזנה, וכ-75% מאנרגיה זו מועברת לתפעול התהליך (Bridgewater, 2011).

4.3.3.6. ישימות טכנולוגית הפירוליזה

אל אף שהטכנולוגיה ידועה ומוכרת מזה 25 שנה יישומה ונפיצותה הינה מוגבלת וישנו מספר מועט של מתקנים ברחבי העולם הממוקמים בעיקר באירופה וביפן. הסיבה לכך טמונה במורכבות ועלות התפעול של הטכנולוגיה.

טכנולוגית הפירוליזה המהירה לדלקים לתחבורה נוסתה בקנה מידה קטן עד כה, שלא באופן מסחרי, והיא נמצאת בשלבים ראשוניים של תיעוש. ההתמקדות בפיתוח טכנולוגיה זו באה לידי ביטוי בתנאי התהליך (הזנה, טיפול מקדים, התמודדות עם תוצרי האפר) ופחות בפיתוח תהליך הפירוליזה עצמו.

אחד האתגרים הטכנולוגיים טמון בהפרדת האפר מהנוזל. על מנת לשמור על יציבות השמן ידוע כי יש להפריד את המתכות האלקליות מהאפר מאחר ואלו מהוות קטליזטור לפולימריזציה בין תרכובות המצויות בשמן. נושא זה מהווה אתגר משמעותי ועדיין תרים אחר פתרון להפרדת האפר באופן אפקטיבי שאינו מייקר את תהליך הזיקוק. מאחר והאפר מורכב חלקיקים הקטנים ממיקרון, ניתן להוסיף לתערובת אלכוהול או ממיסים לשיפור יציבות האחסון. חשוב לציין כי התהליך עדיין לא נוסה באופן מסחרי וישנו חשש לגבי הטמפרטורות הגבוהות במיכל. הצורך בתהליך זה הוא מיצוי דלק בעל זמן מדף הדומה לדלקים ואחוזי אפר אפסיים.

כמו כן, תוצרי התהליך הינם קורוזיביים (ערך הגבה נמוך, 2-3), בעלי צמיגות גבוהה, נדיפות נמוכה ואינם יציבים מבחינה תרמית וכימית עדיין (Miguel et al., 2012).

4.3.3.7. עלויות תהליך הפירוליזה המהירה

טכנולוגיות הפירוליזה המהירה לייצור דלקים נוזליים הוכחו כמוצלחים בקנה מידה קטן, ונמצאים בשלב תפעולי ראשוני בקנה מידה מסחרי. עם זאת תוצר הדלק הנוצר מהתהליך עדיין יקר ביחס לדלקים הפוסיליים. לכן, החסם הטכנולוגי והכלכלי מונעים מחדירת דלקים אלו לשוק האנרגיה העולמי (Bridgewater, 2011).

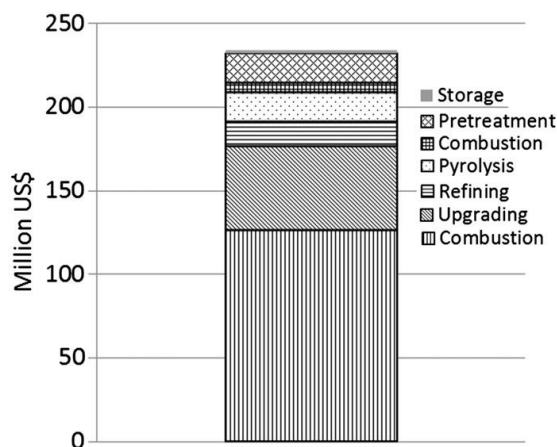
ממחקר טכנו-כלכלי שנעשה השנה ע"י Brown ועמיתיו (2013), עבור הפקת דלקים וחשמל בתהליך הפירוליזה המהירה ותהליך ה-Hydrotreating של מפעל המטפל ב-2,000 טון ליום של ביומסה מתאית,

עולה כי עלות ההתקנה וההשקעה הינם כ-234 ו-363 מיליון דולר בהתאמה. עלות התפעול מוערכת בכ-84 מיליון דולר לשנה. בהתחשב בשיעור תשואה פנימי של 20 שנה וערך נוכחי נקי בהתאם למיקום המתקן (הערך הנוכחי רגיש להשבת השמן, עלות חומר גלם, מיקום המתקן, וערך שוק הדלקים לתחבורה ונע בין 7.4% ל-17.2%).

מסקנות מחקר זה, שבדק 30 מקרי בוחן שונים בארה"ב, מראות כי הישימות הכלכלית מושפעת באופן משמעותי ממיקום המתקן (המשפיע על עלות ההובלה של חומר הגלם), אחוזי ההשבה, עלויות המתקן, עלויות התפעול, מיסים וערך שוק הדלקים.

מהתרשים הבא, המציג את עלויות הקמת מתקן פירוליזה, ניתן לראות כי תהליך הבעירה הוא היקר ביותר ועלותו עולה על 100 מיליון דולר (למתקן המטפל ב-2,000 טון פסולת ביום), לאחר מכן שלב השדרוג לדלקים לתחבורה, כאשר עלותם של שאר המרכיבים נמוכה משמעותית.

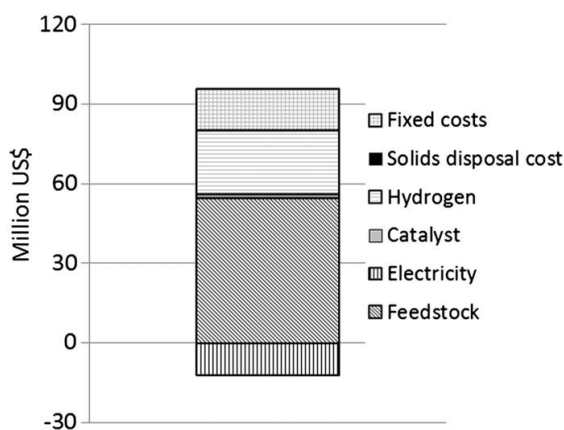
תרשים 28 - עלויות הקמת מתקן פירוליזה



מקור: Brown et al. (2013)

בתרשים הבא ניתן לראות כי העלות המשמעותית בשלב התפעול של מתקן פירוליזה, היא העלות של חומר הגלם המוזן, אך חשוב לציין כי מדובר כאן בחומרים מתאית, כגון שבבי עץ ולא בפסולות.

תרשים 29 - עלויות שלב התפעול של מתקן פירוליזה



מקור: Brown et al. (2013)

4.3.4. פלסמה

פלסמה ידועה כמצב הצבירה הרביעי, בה גז מיונן הנוצר מפריקה אלקטרונית בטמפרטורות גבוהות במיוחד מוליך זרם חשמלי (ברק הינו דוגמה טובה לתופעה זו בטבע). בתהליך זה חושפים גז דרך קשת חשמלית (שקף של אלקטרונים) אשר מייננים את הגז ומשחררים את האנרגיה שקושרת את האטומים יחד בצורת חום. טמפרטורת הפלסמה מגיעה ל-6,000 מ"צ ביציאתו של הגז מלפיד הפלסמה ויורדת בריבוע למרחק, כך שטמפ' התהליך נעה בין 1,500-1,300 מ"צ. טכנולוגיית פלסמה נמצאת ביישומים תעשייתיים שונים דוגמת חיתוך, ריתוך, התזה, מטלורגיה, ועוד, בנוסף על ניסיונות הטיפול בפסולות שונות. מאחר ותהליך זה קשור בטמפרטורות גבוהות מאוד, היישום העיקרי בפסולות בא לידי ביטוי בטיפול בפסולת המכילה חומרים רעילים (דוגמת תוצרי לוואי ממערכות לטיהור אוויר (APC), חומרים רדיואקטיביים, פסולת רפואית ועוד). בשנים האחרונות, עקב העלייה במודעות לטיפול בפסולת עירונית מוצקה וחיפוש אחר אלטרנטיבות שונות להטמנה (המביאה עמה פליטות גבוהות לסביבה), יחד עם הפוטנציאל האנרגטי של המרכיב האורגני (להבדיל מהערך הקלורי הירוד של פסולות אנאורגניות), ישנם ניסיונות שונים לפיתוח טכנולוגיית פלסמה לטיפול בפסולת עירונית, כאשר במרבית המקרים מדובר בהפקת חשמל ולא דלק לתחבורה.

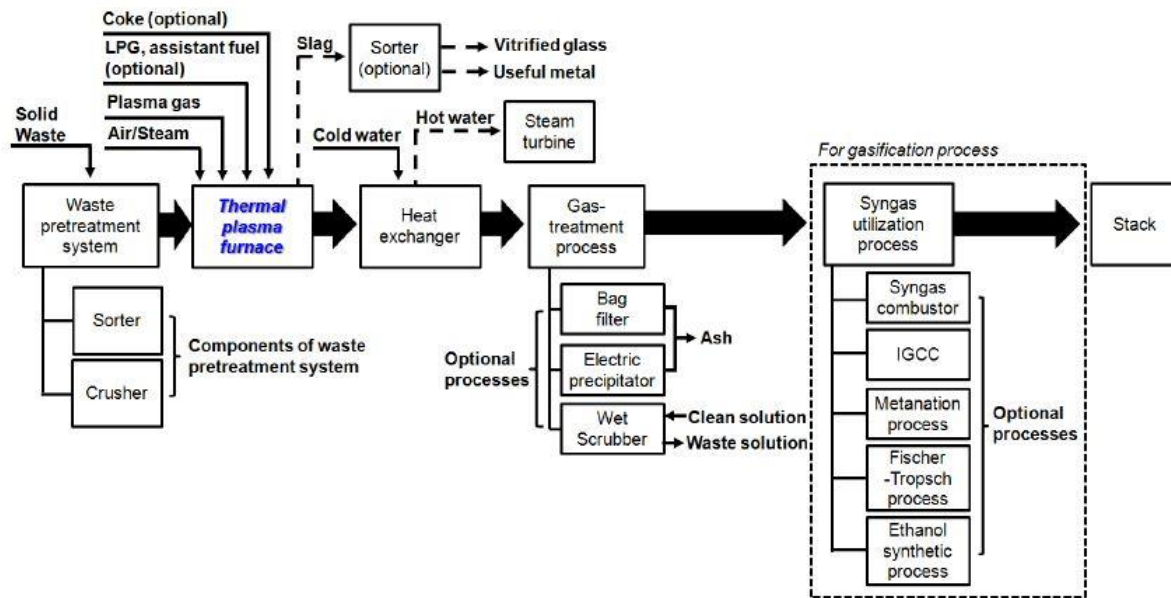
ישנם סוגים שונים של תהליכי פלסמה לטיפול בפסולת דוגמת Plasma Arc gasification, Thermal Plasma pyrolysis technology, הכוללים בתוכם תהליכי פירוליזה ו/או גזיפיקציה. בפרק זה נתמקד בתהליך הטכנולוגי מסוג Plasma Arc gasification מאחר ונמצאה עליו ספרות כתובה עשירה יותר. בנוסף, יצוין מקרה בוחן של טכנולוגיית פלסמה מסוג PGM (Plasma Gasification Melting process) אשר פותחה בישראל ומיושמת כפיילוט החל משנת 2007 לטיפול בפסולת עירונית מוצקה. בתהליך הפלסמה המרכיבים האורגנים מומרים לגז סינטטי אשר מכיל בעיקר מימן (H_2) ופחמן חד-חמצני (CO) ומרכיבים אנאורגניים המזוגגים לכדי סיגים אינרטים גושיים דמויי זכוכית.

4.3.4.1. מרכיבי התהליך הבסיסיים של תהליך הפלסמה הינם:

1. פירוליזה (ללא נוכחות חמצן) של גז, נוזל ופסולת מוצקה בכבשן עם לפיד פלסמה.
2. גזיפיקציה (בנוכחות מוגבלת של חמצן) של פסולת מוצקה הכוללת מרכיבים אורגניים המשמשים לייצור גז סינטטי (H_2+CO).
3. זיגוג של הפסולת האנאורגנית ע"י לפיד פלסמה היברידי.

בתהליך זה ניתן להזין מגוון פסולות במצבי צבירה שונים- נוזלים, מוצקים וגזים. סוגי הפסולות המטופלות בתהליך הינן: פסולת חומרים מסוכנים, תוצרי לוואי ממערכות לטיהור אוויר (APC), חומרים רדיואקטיביים, פסולת רפואית, פסולת עירונית מוצקה. הטכנולוגיה הבסיסית מותאמת לטיפול בפסולת מסוכנת ורדיואקטיבית, עם זאת, כאמור, הערך הקלורי של הפסולת האורגנית הוא הגבוה ביותר ובעל פוטנציאל להשבה לאנרגיה.

תרשים 30 - תהליך הייצור במתקן פלסמה



מקור: Byun et al. (2012)

כפי שמתואר בתרשים, השלבים המרכזיים של תהליך הפלסמה הם:

- **שלב 1: טיפול מקדים** - בשלב זה מתבצע מיון של הפסולת וקציצתה לחלקיקים בגודל אחד בדומה לטיפול המקדים בטכנולוגיות הטיפול התרמי השונות (פירוליזה/ גזיפיקציה).
- **שלב 2: כבשן גזיפיקציה** - החומר המטופל מועבר לכבשן גזיפיקציה המצויד בליד פלסמה. לעיתים נוסף מבער גז פחמימני מעובה (LPG) המשמש להגברת הטמפרטורה כאשר ערך החום של הפסולת המוצקה אינו מספק. טמפרטורת הגז עולה על 1,200 מ"צ.
- **שלב 3: מחליף חום** - הגז שנוצר עובר דרך מחליף חום הגורם להשבת החום מהגז. שאריות החום לעיתים מועברות כמקור אנרגיה המפעיל טורבינת אדים.
- **שלב 4: הגז המקורר** עובר תהליך טיהור ליצירת סינגז נקי. ישנן דרכים שונות לטיפול בגז הסינטטי. באופן כללי פילטרים וקרצוף רטוב משמשים להסרת האפר המרחף והגזים החומציים.
- **שלב 5: לאחר טיהור הגז** במערכת לטיהור פליטות הגז הסינטטי יכול לשמש כמקורות אנרגיה שונים:

- שימוש בגז הסינטטי לטובת אנרגיה חשמלית הנוצרת ע"י אדים ו/או טורבינת גז,
- ייצור כימיקלים בעלי ערך גבוה מהסינגז ע"י תהליך כימי,
- ייצור מתאן בתהליך מתאניזציה*,
- ייצור שעווה כימית בתהליך הפישר טרופס*,
- ייצור תאי דלק*.

* תהליכים אלו עדיין לא מומשו ונמצאים בשלבי מחקר והדגמה ראשוניים.

4.3.4.2 תוצרי תהליך הפלסמה

לטכנולוגיית הפלסמה יתרון בולט בזכות התוצרים הנקיים שמתקבלים וכן פליטות מזהמים נמוכות ביחס לטכנולוגיות תרמו-כימיות אחרות. לתהליך הפלסמה ישנם שני תוצרים עיקריים - מוצקים וגזים. להבדיל מטכנולוגיות גזיפיקציה ופירוליזה בהן התוצרים הם גם נוזלים הכוללים תרכובות כבדות של פחמימנים שקשה להפריד מתוצרי הגז והמוצקים, בתהליך הפלסמה פסולת אורגנית מומרת לגז סינטטי ולמוצקים אנאורגניים.

טבלה 22 - תרכובת טיפוסית של הגז הסינטטי הנוצר בתהליך פלסמה (תלוי בסוג הפסולת הנכנסת לתהליך)

שיעור בתרכובת	סוג הגז
24-43%	H ₂
25-44%	CO
10-26%	CO ₂ , N ₂

מקור: Moustakas et al. (2005)

גזים אלו משמשים לייצור חשמל, פחמימנים לדלק, חמצן לתאי דלק ולמנועי גז, אמוניה לדשן, ומתנול לתעשיית הכימיקלים. המינרלים האנאורגניים מומרים לסיגים אינרטיים- אלו ראויים לשימוש בתעשיות שונות לייצור חומרי בידוד מתועשים (למשל צמר סלעים), אריחי רצפה, רעפים ועוד. הסינגז הנוצר מהתהליך משמש בעיקר לייצור חשמל.

4.3.4.3 שאריות מתהליך הפלסמה

הפסולת מתהליך הפלסמה מהווה 4% ביחס לפסולת שנכנסה למתקן. בתהליך זה אין פליטה של NO_x מאחר ובתוך כבשן הפלסמה יש כמות חמצן מוגבלת.

- פליטות - בתהליך זה כמעט ואין פליטה של NO_x ו-SO_x מאחר ובתוך כבשן הפלסמה יש כמות חמצן מוגבלת. כמו כן, ישנם שיעורי פליטות נמוכים של דיאוקסינים. (Byun, et al. 2012)
- שפכים - הנוזלים המעטים הנוצרים מתהליך הקירור המהיר והקירצוף מוערכים ב-0.43 Nm³ לטון, מועברים דרך מערכת לטיפול במים וממוחזרים חזרה לתהליך הייצור. השפכים מרכזים בעיקר גזים חומציים.
- אפר - בתהליך זה לא מדווח על תוצרי אפר.

4.3.4.4 יעילות אנרגטית של טכנולוגיית הפלסמה

תהליך הפלסמה דורש כמות אנרגיה רבה להפעלת המערכת על מנת להגיע לטמפרטורות גבוהות לקיום התהליך (יכול להגיע גם ל-8,000 מ"צ בלפיד הפלסמה עצמו). כמות תוצרי הגז הנוצרים במתקן המועברת לתפעול התהליך מגיעה ל-70-80%, כלומר הרווח האנרגטי נמוך יחסית.

4.3.4.5 ישימות טכנולוגיית הפלסמה

עד כה היישום העיקרי של טכנולוגיה זו בא לידי ביטוי בטיפול בפסולת מסוכנת. עם זאת, בעקבות הצורך העולה לטיפול בכלל זרמי הפסולת ויכולתה של הטכנולוגיה לטפל בפסולות מסוגים שונים ומגוונים, חומרים אורגניים ואנאורגניים, מתקיימים בשנים האחרונות פיילוטים ופיתוחים ליישום הטכנולוגיה באופן מסחרי לטיפול במגוון פסולות. טכנולוגיה זו נחשבת מתקדמת בעלת פוטנציאל לטיפול בפסולות. עם זאת, ישנם עדיין אתגרים טכנולוגיים וכלכליים ליישום הטכנולוגיה באופן מסחרי.

4.3.4.6. עלויות תהליך הפלסמה

אחד מהחסרונות לקיום טכנולוגיה זו טמון בשימוש הרב בחשמל. הוצאות משתנות כוללות את האופי המדיניות המקומית, סוג הפסולת המטופלת, קיבולת המתקן ועוד. בארה"ב עלויות הטמנה נעות בין 30-80 \$ לטון וממוצע עלות השריפה עומד על 69 \$ לטון. במדינות קטנות יותר דוגמת ארצות באירופה ויפן עלות הטמנה נעה בין 200-300 \$ לטון, לכן טכנולוגית הפלסמה לטיפול בפסולת מפותחת יותר במקומות אלו.

עלות הקמת מתקן מוערכת ב-0.13-0.30 מיליון דולר / טון ליום. לדוגמה, עלות הקמתו של המפעל Utashinai ביפן המטפל ב-300 טון ליום הייתה 0.17 מיליון דולר / טון ליום, ועלות הקמתו של מפעל בקנדה המטפל ב-600 טון ליום דומה (עם זאת מצוין כי המידע אינו במלואו). לעומת זאת, מפעל בקוריאה שהקים מתקן לטיפול ב-10 טון ליום בלבד דיווח כי עלות הקמתו הינה 0.39 מיליון דולר / טון ליום. ממצאים אלו מעלים כי ככל שהמתקן מסוגל לטפל בכמות פסולת גדולה יותר כך המחיר לטיפול עבור כל טון יורד באופן משמעותי.

ממחקר נוסף שנעשה תועד כי עלות לטיפול (בממוצע בארה"ב ואירופה) עולה על 100 דולר לטון נכון לשנת 2005 (טיפול תרמי בפסולת, HDV, 2005).

4.3.5. מדיניות לקידום הטכנולוגיות התרמו-כימיות

כאשר בוחנים מדיניות שונות לקידום הטכנולוגיות התרמו-כימיות, מרבית מהמדיניות הקיימת או מהמדיניות אשר מנסים לפתח מתמקדות בשלב של ביסוס הטכנולוגיה להפקת אנרגיה מפסולות ואינן דנות באופן ממוקד בדרכי השדרוג השונים לייצור דלקים מהפסולות. כלומר, גם ברמה של ייצור חשמל וחום, המדיניות והרגולציה נמצאות בשלבי פיתוח ויישום.

הנקודות המרכזיות העולות מסקירת הספרות בנושא של מדיניות בתחום הטכנולוגיות התרמו-כימיות הן:

- פיתוח תקני איכות לטכנולוגיות השונות
- קידום רגולציה ברורה ואחידה בנושא היתרי בנייה של מתקנים
- פיתוח ויישום תקני בריאות ובטיחות
- פיתוח ויישום של הנחיות לסילוק הפסולת בסוף כל תהליך
- קידום תמריצים פיננסיים לפיתוח הטכנולוגיות

למרות המחסור בתקנים ותמריצים, ישנה פעילות מחקר ופיתוח (מו"פ) רחבה. בתחום הגזיפיקציה למשל, משרד האנרגיה האמריקאי (DOE), פעול לשיפור תהליכי הגזיפיקציה מביומסה על מנת לעמוד ביעדי המדיניות האמריקאים להפחתת פליטות גזי חממה. בארה"ב, ההתמקדות היא בשיפור טכנולוגיות גזיפיקציה לייצור סינגז מפסולת חקלאית (שאריות תירס) עבור הייצור הסופי של אתנול. הרציונל העומד מאחורי המדיניות האמריקאית הוא שימוש בפסולת הרבה הנוצרת מגידולי תירס בארה"ב. ישנה פעילות עולמית נוספת, אך היא לאו דווקא מרוכזת במחקר לטובת ייצור דלקים. לדוגמה, בגרמניה, המשרד הפדרלי לכלכלה ותעסוקה, יזם תכנית מו"פ בשם COORETEC (טכנולוגיות להפחתת פחמן דו-חמצני), אשר מובילה פרויקטים מחקריים בתחום הגזיפיקציה כאשר המטרה הסופית היא פיתוח תחנות כוח עם אפס פליטות גז"ח. ובהודו, משרד האנרגיה החדשה והמתחדשת, מקיים מחקר בנושא גזיפיקציה לייצור חשמל באזורים כפריים.

בטכנולוגיית הפירוליזה המהירה, ישנה פעילות יותר ברורה לקידום מדיניות אשר תסייע לפיתוח הטכנולוגי לטובת דלקים. ב-2010, נוצר "צוות עבודה 34" (Task 34) של ה-IEA, הצוות (המונה נציגים משש מדינות: ארה"ב, בריטניה, הולנד, קנדה, גרמניה ופינלנד) אמון על קידום טכנולוגיית הפירוליזה של ביומסה לייצור דלקים וכימיקלים. הצוות אמור לסקור את התחום, לתת חוות דעת ולהמליץ על פתרונות לאתגרים העומדים בפני הטכנולוגיה. בתוך מסגרת העבודה של הצוות, מצוינת הצורך בתמיכה ביישום סטנדרטים לשימוש בשמן הפירוליזה, ובמיוחד בפיתוח סטנדרטים של גופי תקינה כגון ASTM ו-CEN אשר יגדירו את הדרישות לשדרוג שמן הפירוליזה ולשימוש כדלק בעירה, דלק לטורבינה ודיזל. קיימת פעילות לקידום מדיניות אשר תסייע לפיתוח וקידום הטכנולוגיות התרמו-כימיות, אך כפי שניתן להבין מהדוגמאות לעיל, גם היא נמצאת בתחילת הדרך.

4.3.6. ניתוח השוואתי בין הטכנולוגיות הפיסיקאליות וניתוח SWOT

גזיפיקציה ופירוליזה הינם תהליכים דומים אשר מפרקים פסולת אורגנית באמצעות חימום לטמפרטורות גבוהות. בשני המקרים ישנה כמות מוגבלת של חמצן הנמצא בתוך התהליך כאשר ההבדל בין השתיים הוא רמת החמצן בתהליך- בתהליך הגזיפיקציה נוכחות החמצן היא מוגבלת ואילו בתהליך הפירוליזה החמצן כלל אינו נוכח. פעמים רבות כשמציינים את טכנולוגיית הגזיפיקציה של פסולת מתייחסים גם לפירוליזה כחלק מהשלבים המובנים של התהליך.

במרץ 2012 משרד האנרגיה האמריקאי (Department of Energy - DOE) פרסם את תכנית הביומסה (Office of biomass program - OBP) אשר קבעה את סדרי העדיפות למו"פ להפיכת ביומסה לדלקים פחמימניים כתחליפים לדלק הפוסילי. במקום השלישי נבחרה טכנולוגיית הפירוליזה המהירה וה-Hydroprocessing ובעדיפות שמינית נבחרה טכנולוגיית שדרוג הסינגז לדלקים פחמימניים. הקריטריונים לבחירת הטכנולוגיות כללו פוטנציאל טכנו-כלכלי, מידת הקיימות הסביבתית, זמינות חומר הגלם ועוד (Fast Pyrolysis and Hydroprocessing, n.d.).

טבלה 23 - השוואה בין שלושת הטכנולוגיות לטיפול תרמי בפסולת

טכנולוגיה	פלסמה	פירוליזה	גזיפיקציה
תהליך ייצור	פירוק תרמי ע"י מבער פלסמה בטמפ' של כ- 1,300-1,500 מ"צ (לפיד הפלסמה מגיע עד 8,000 מ"צ)	פירוק תרמי של חומרים בהעדר חמצן בטמפ' של כ- 500 מ"צ	פירוק תרמי של חומרים ע"י שימוש מוגבל בחמצן בטמפ' של כ- 800 מ"צ
תשומות	כמעט כל סוגי הפסולות, לרבות פסולת מסוכנת. הערך האנרגטי הגבוה ביותר מצוי בחומרים האורגניים.	כמעט כל סוגי הפסולות, לרבות פסולת מסוכנת. הערך האנרגטי הגבוה ביותר מצוי בחומרים האורגניים.	כמעט כל סוגי הפסולות, לרבות פסולת מסוכנת. הערך האנרגטי הגבוה ביותר מצוי בחומרים האורגניים.
תוצרי התהליך	סינגז (60-70%) ומוצקים אינרטיים (15-20%).	55%-60% משקלית מח"ג יבש של שמן מיוצב. עבור דלקים לתחבורה עובר תהליך שדרוג בסופו מתקבלים 12% משקלית של דלק.	סינגז (85%). עבור דלקים לתחבורה עובר תהליך הנזלה (פישר טרופס או תהליכים אחרים הנבחנים כיום).
תוצרי לוואי	תוצרי לוואי מעטים. תוצר נקי באופן יחסי.	תלוי בחומר הגלם הנכנס לתהליך. ייתכנו תוצרי לוואי של: מתכות כבדות, גזים חומציים, חומרים אורגניים רעילים, פחמן חד חמצני, דיאוקסין ועוד. להפחתת תוצרי הלוואי ישנם דרכים לאופטימיזציה של תהליך הייצור. בתוצר האפר הנותר (10-20% משקלית) ניתן להשתמש בתעשיות שונות כדשן, תשתיות, ייצור מלט ועוד (עם זאת יש דעות חלוקות לגבי רעילות התוצר).	תלוי בחומר הגלם הנכנס לתהליך. מתכות כבדות, גזים חומציים, חומרים אורגניים רעילים, פחמן חד חמצני, דיאוקסין ועוד. להפחתת תוצרי הלוואי ישנם דרכים לאופטימיזציה של תהליך הייצור. בתוצר האפר הנותר (10-20% משקלית) ניתן להשתמש בתעשיות שונות כדשן, תשתיות, ייצור מלט ועוד (עם זאת יש דעות חלוקות לגבי רעילות התוצר).
יישומים עיקריים	הפקת חשמל	הפקת דלקים לתעשייה במבערים, מנועים, טורבינות.	הפקת חשמל
אספקת אנרגיה לקיום התהליך (מסך האנרגיה המיוצרת)	40% ויותר.	15%	10%
יעילות אנרגטית (דוגמאות מספריות משלבי מו"פ)	על כל טון חומר גלם, ניתן לקבל 0.3-0.6 טון דלק.	על כל טון ביומסה מיובשת מתקבל 0.12 טון שמן מיוצב.	על כל טון פסולת עירונית מוצקה מתקבל 28 גלון של אתנול. הערך הקלורי של תוצר הסינגז שווה ל- 25-40% מזה של הגז הטבעי.

ניתוח SWOT

חוזקות:

- עצמאות אנרגטית בייצור דלקים מקומיים
- הפחתת נפח הפסולת באופן משמעותי: כ-90% מנפח הפסולת וכ-70% ממשקלה (המשרד להגני"ס, 2011)
- הפיכת הפסולת למשאב בעל ערך
- ייצור אנרגיה מחומר מתחדש וזמין
- פחות שטח נדרש לצרכי הטמנה, בעיקר במדינות בעלות שטח אדמה מוגבל דוגמת ישראל
- הפחתת פליטות גזי חממה בשיעור ניכר (כ-90%)
- הפחתת התלות בנפט ממקורות פוסיליים

חולשות:

- הפסולת לרוב אינה הומוגנית ודורשת טיפולים מקדימים על מנת לקבל איכות תוצר גבוהה, עובדה אשר מעלה את עלויות ההפקה
- הטכנולוגיות להפקת דלקים לתחבורה מפסולת עדיין בשלבי פיתוח בקנה מידה תעשייתי ולכן עדיין אין הערכות כלכליות מובהקות
- היקף מוגבל לשימוש בביו-דלקים בתערובות דלקים קונבנציונאליים, כ-10% בלבד
- חוסר הכרות עם תוצרי התהליך והשפעתם הסביבתית לאורך זמן בקנה מידה גדול

הזדמנויות:

- חיבור למו"פ בינלאומי לפיתוח הטכנולוגיה
- הקניית מקור אנרגיה מקומי וזמין המפחית את התלות בשימוש בדלקים הפוסיליים

חסמים:

- מגבלות מדיניות- העדפת המשרד להגני"ס את מדיניות המחזור על פני הפקת האנרגיה (בייחוד מחזור של פלסטיק ונייר)
- מגבלות כלכליות- עלות גבוהה לביסוס והקמת תשתית למתקנים, לתפעול כמו עלות תוצר גבוהה ביחס לדלקים הפוסיליים
- מגבלות טכניות- יישום הטכנולוגיה בקנה מידה גדול וחסמים טכניים לעמידות ויציבות תוצר הדלק
- מגבלות תודעתיות- אמון כללי של הרשויות ושל הציבור בטכנולוגיות חדשות הנכנסות לשוק

5. היצע הפסולת בישראל ופוטנציאל הפקת הדלק מהן

5.1. מבוא

5.1.1. רקע ומטרות

מטרתו של פרק זה היא למפות ולאפיין את היצע הפסולת המיוצרת בישראל על מנת לזהות ולכמת את הזרמים הרלוונטיים לתהליכי הפקת דלקים מהם. מלבד הצגת הכמות המקסימאלית לייצור ביו-דלקים תחת תרחישי כמויות והקצאה שונים, מטרתו של הפרק היא גם לרכז מתוך מסת המידע שהוצגה במסמך זה את עיקרי הדברים. האמור יסייע להציג את מסקנותינו לקראת השלב השני למכרז זה.

הניתוח יתייחס לשלושה צירים שמחד אינם קשורים זה לזה ומאידך אינם יכולים להתקיים בנפרד בכל הקשור להפקת דלקים מפסולות. הראשון, **ציר חומרי הגלם** המפרט למעשה את היצע הפסולת בישראל לפי חתכי מקור, זרמים ראשיים ותתי זרמים. הציר השני, **הטכנולוגי**, מגדיר את התהליכים הקיימים כיום להפקת דלקים מתתי זרמי הפסולת שהוגדרו. הטכנולוגיות שפורטו נרחבות במסמך זה, מחולקות לענייננו, לשלוש משפחות עיקריות: הביו-כימיות (עיכול אנאירובי והידרוליזה), התרמו-כימיות (גזיפיקציה, פירוליזה ופלסמה) והטכנולוגיות המטפלות בשמנים מוצגות (ההידרוגנציה והאסטרופיקציה). הציר השלישי הוא תוצר **הדלק** האפשרי ו/או המבוקש.

5.1.2. מקורות

בטבלה 35 מפורטים מקורות המידע ביחס לכמויות ולזמינות של הפסולת לסוגיה, וכן לאיזה צורך שימש כל מקור מידע.

טבלה 24 - מקורות המידע לכמויות הפסולת בישראל בשנת 2012

המקור	רפרנס ל:
חברת "כיוון" וחברת "צנובר", פסולות חקלאיות - בסיס נתונים וניתוח עלות-תועלת של החוק המוצע. הוגש למשרד להג"ס, נובמבר 2012	כמויות של פסולות חקלאיות
מסמך מדיניות הפקת אנרגיה מפסולת. המשרד להג"ס, נוב. 2012	כמויות של שאר הפסולות (לא חקלאיות) דרישות ותכניות המחזור של המשרד להג"ס
סקר הרכב הפסולת העירונית חברת שלד"ג, 2005	הרכב הפסולת העירונית (הערה: בהקדם יתפרסם סקר חדש)
מוסד שמואל נאמן (בהשתתפות חב' כיוון), מסמך המלצות לקראת גיבוש מדיניות בולטת לטיפול באריזות בישראל הוגש למשרד להג"ס, יולי 2010	כמות והרכב לפי חומרים של פסולות תעשייתיות
למ"ס, שנתון סטטיסטי לישראל 2011 לוח 27.16 (פסולת מוצקה ביתית, מסחרית וגזם)	בקרה על כמויות הפסולות הביתיות והגזם
אומדן של הצוות המקצועי	% הפסולת הביתית הרטובה האפקטיבי והזמין ליצירת אנרגיה

אלו מקורות המידע הראשיים לחלק זה. מקורות נוספים לנושאים ספציפיים פורטו בגוף העבודה. התוצר של שלב זה הוא מטריצה המפרטת את פוטנציאל היצע הפסולת בישראל הזמינה, לייצור דלקים, וזאת תחת נתוני 2012 ובאלפי טון לשנה³³.

³³ כפי שצוין במבוא העבודה נדגיש כי מדובר בהערכות ובנתונים מהספרות בלבד (בעיקר רלוונטי הדבר למקדמים).

5.2. מתודולוגיה והגדרות יסוד

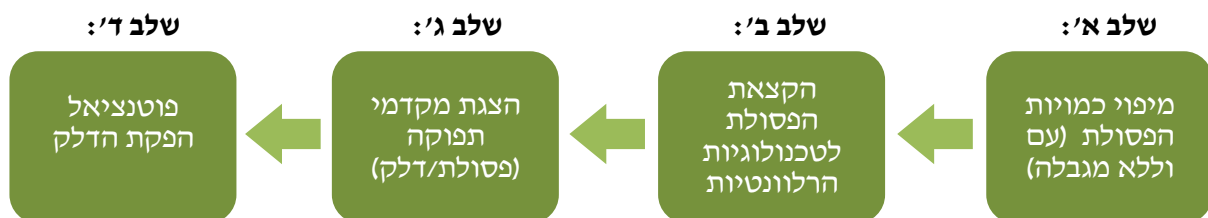
לפנינו שתי מטרות: האחת לספק אמידה מושכלת של כמות הדלקים המקסימאלית שניתן יהיה לייצר מפסולות בישראל. השנייה, נובעת ממנה, מגדירה מהן ההקצאות האפשריות של הפסולת הנבחרת לטכנולוגיות השונות, הן בהיבטי פיזיביליות טכנולוגית וניסיון עולמי והן בהיבטי יעילות תהליכית.

נדגיש כי בשל ראשוניות התהליכים שנסקרו בעבודה זו לעיבוד פסולות כחומרי גלם לדלקים, נמצא קושי לאתר מקדמים לכל תתי הזרמים, בכל אחת מהקומבינציות האפשריות. בנוסף נדגיש כי החלק הארי של המקדמים שכן אותרו בספרות המקצועית, מקורם ביישומי פיילוט ובתנאי מעבדה ולא בהיקף שימוש מסחרי. כמו כן ישנן קומבינציות של חומרי גלם, תהליכים ותוצרי דלק שעבורם לא נמצאו מקדמים כלל.

הניתוח מתבצע תחת מספר תרחישים. הראשונים, שיתוארו להלן, הם תרחישי הכמויות של היצע הפסולות (לפי חיתוכים שונים) עם וללא מגבלות מדיניות המשרד להגנת הסביבה (יפורט להלן). שני התרחישים הבאים, חשובים לא פחות, הם תרחישי הקצאת זרמי הפסולת לטכנולוגיות (להלן: "תרחישי הקצאה"). מעבר להיותם כלי חישובי, תרחישים אלו משקפים למעשה את מסלולי הייצור הפיזיבליים בשלב זה (לרבות תהליכי השדרוג הנמצאים אף הם בתהליכי מחקר ופיתוח). הפיזיביליות נאמדה על פי מסקנותינו בפרקי סקרי הספרות ועל פי מצאי המקדמים שנמצאו (יורחב בהמשך).

הצגת הפוטנציאל הישראלי להפקת ביו-דלקים מפסולות תיערך בארבעת השלבים הבאים:

תרשים 31 - שלבי הצגת פוטנציאל הפקת ביו-דלקים בישראל



שלב א': מיפוי כמויות הפסולות

בשלב הראשון יוצג היצע הפסולות בישראל (על פי נתוני 2012) תוך חלוקה לסקטורים (עירונית/חקלאית/תעשייתית וכו'), זרמים ראשיים (פסולת מוצקה יבשה, פסולת אורגנית רקבובית, פסולת צמחית) ותתי הזרמים המוכללים בהם (קרטון, פרש בע"ח, בוצות שפכים וכו').

ההיצע יוצג תחת שני תרחישי כמויות:

- האחד – מלוא הכמות של הפסולת הזמינה ללא הפנמת מדיניות המשרד להגנת הסביבה בכל הנוגע למחזור והשבה. כמות זו משקפת את ההיצע הפיזיבילי המקסימאלי בישראל של פסולות לדלקים.
- השני – היצע הפסולות לאחרי הפנמת מדיניות של המשרד להגנת הסביבה ביחס ליעודי זרמי הפסולת למחזור³⁴. תחת הנחה זו הפסולת הזמינה לייצור דלק היא רק זו שנותרת לאחר שתיושם מדיניות המשרד.

³⁴ מסמך מדיניות הפקת אנרגיה מפסולת, המשרד להגנת הסביבה, 2012.

תוצרו של שלב זה הינו טבלה המסכמת את כמות תתי הזרמים הזמינים לייצור דלק (אלפי טון פסולת בשנה) עם וללא מגבלות מדיניות.

שלב ב': הקצאה לטכנולוגיות הרלוונטיות

טכנולוגיות שונות מסוגלות לטפל בחומרים זהים ולהיפך. מכיוון שכמות הפסולת מוגבלת, נדרש לקבוע מהי הקצאת החומרים בפסולת לטכנולוגיות השונות לצורך השבתם לדלקים. תרחישים אלו הוגדרו על פי מסקנותינו מפרקי סקרי הספרות על הניסיון הבינלאומי של הטכנולוגיות, מהימנות המקדמים שנמצאו, וכמות הפסולת הרלוונטית בישראל.

הטכנולוגיות שנסקרו במסמך זה נחלקות לשלוש משפחות עיקריות: הביוכימיות, התרמו-כימיות ואלו המיועדות לטיפול בשמנים. האחרונות ייחודיות בכך שהן לא תחליפיות לטכנולוגיות מתחרות ומטפלות בזרם ייעודי וייחודי להן (אם כי יש תהליכים יוצאי דופן³⁵, אך הם לא רלוונטיים לענייננו). הטכנולוגיות הביוכימיות והתרמו-כימיות לעומתן, תחליפיות במידה מהותית מבחינת היצע החומרים בהם הן מסוגלות לטפל. מכל משפחת טכנולוגיות נבחרה הטכנולוגיה המיושמת ביותר כיום וכזו שיש עליה מידע מהימן יחסית בספרות. נדגיש כי גם עבורן לא נמצאו מרבית המקדמים האפשריים תיאורטית (בגלל חוסר היישום העולמי).

ינותחו תרחישי הקצאות שעולים בקנה אחד עם הניסיון עולמי להשבת פסולות בכלל ולהפקת דלקים מהן, בפרט. תוצרו של שלב זה הוא טבלת הקצאות של כל תתי הזרמים לטכנולוגיות המיועדות להן.

שלב ג': הצגת מקדמי תפוקה

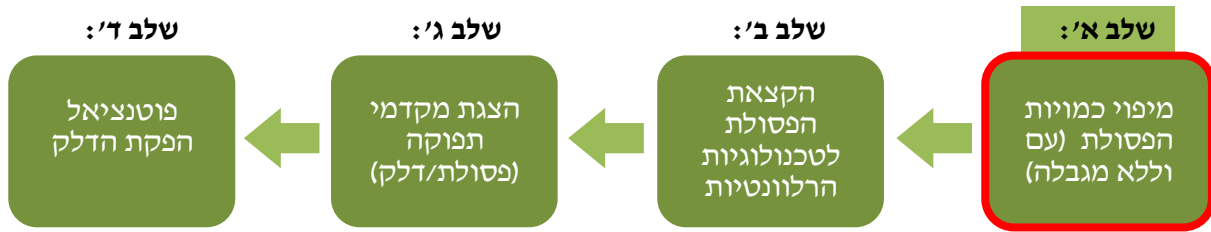
סעיף זה יכיל טבלה מסכמת של המידע שסוקר במסמך זה שיציג בין היתר, את מקדמי התפוקה במונחי פסולת/ביו-דלק (בהתאם לתהליך השדרוג הרלוונטי). לכל צירוף של חומר גלם וטכנולוגיה יוצג, עד כמה שניתן, מקדם תפוקה הממיר טון פסולת לגלון דלק או מ"ק ביומתאן (בהתאם למצב צבירת הדלק).

שלב ד': פוטנציאל הפקת דלקים מפסולות בישראל

שלב זה הוא למעשה ההכפלה של כמויות הפסולת במקדם התפוקה הרלוונטי לטכנולוגיות שהן הוקצו אליהן. תוצר ההכפלה הינו כמות הביו-דלקים המקסימאלית תחת כל תרחיש.

³⁵ ראה פרק 5.2.2 על עיכול אנאירובי של שמנים

5.3. היצע הפסולת בישראל



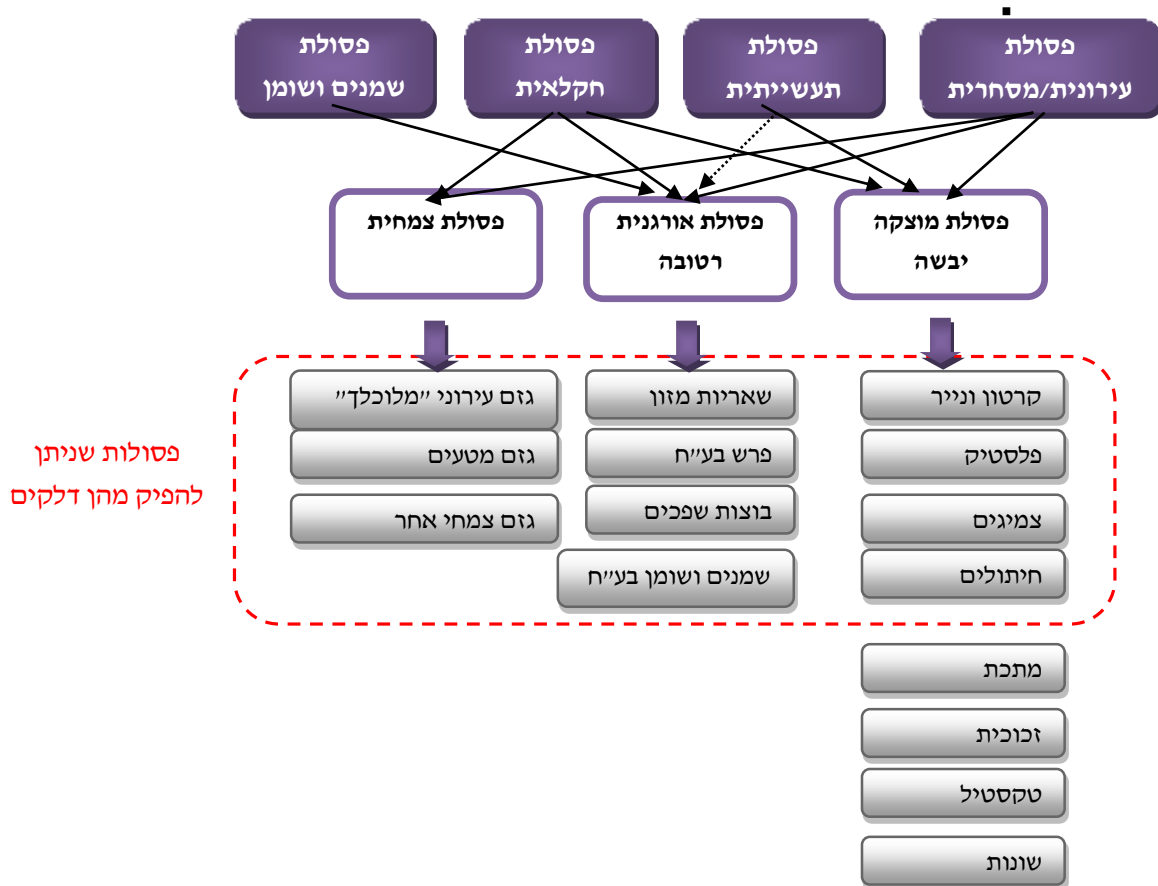
5.3.1. גבולות הניתוח

הפרק יתייחס לזרמי הפסולת המוניציפאלית (ביתית ומסחרית), הפסולת התעשייתית, ופסולת אחרת הכוללת בעיקר צמיגים ובוצות שפכים. פסולות השמנים ינותחו בנפרד. לא תהיה התייחסות לזרמים שייצור הדלק מהן מורכב מאוד וכן גם איסוף וריכוז הפסולת מסורבל ולא יעיל. בקטגוריה זו נמצאות פסולות מסוכנות (כולל רפואיות), וגם פגרי בקר ועופות. גם זרמים שיש להם שימוש חלופי מובהק בשוק לא יכללו בניתוח ובכללן: פסדי עוף ובקר ופסולת מוצקה שמקורה בפסולת בניין. פסדי עוף ובקר הן פסולות משחטות המועברות היום למכונני פסדים ושם מופקים מהן תוצרי חלבון ושומן הממוחזרים למכונני המזון לבעלי חיים. יעוד פסדי המשחטות להפקת דלק יחייב את מכונני התערוכת למצוא מקורות חלופיים, דבר שעלול לייתר את מכונני הפסדים ולייקר את מוצרי המזון מהחי. כמו כן ספק אם הדלק שיווצר יוכל לעמוד במחיר האלטרנטיבי. ייתכן ובעתיד אם תתפתחנה השקפות צרכנים ומגמות שוק השוללות מחזור פסדים מהחי למזון מהחי, אזי ניתן יהיה לבחון זאת שנית. בנוסף, רכיבי הפלסטיק, הקרטון, נייר והעץ שמקורם בפסולת הבניין לא ייספרו בתחשיב זה. הסיבה לכך שזרמים אלו מהווים כיום את מקור ההכנסה העיקרי של אתרי הטיפול בפסולת בניין, תלויים בהם מפעלי מחזור והפעילות שלהם יעילה ונתמכת ע"י המשרד להגנת הסביבה. לפיכך לא הונחה מהפיכה בתחום.

חשוב להעיר כי העבודה לא בוחנת חלופות אנרגטיות אחרות לשימוש בפסולת (חשמל, חום), אלא מתייחסת בהגדרת הפוטנציאל לשני מצבים (עם ובלי מחזור לפי הגנת הסביבה) בהם כל הכמות הזמינה של הפסולת מופנית לייצור דלק.

להלן זרמי הפסולת הראשיים, והחומרים המוכלים בהם (תתי הזרמים) הרלוונטיים לענייננו:

תרשים 32 - זרמי הפסולת הרלוונטיים לניתוח היצע הפסולת בישראל



תתי הזרמים המוקפים במסגרת יהיו אלו שייבחנו במסגרת פרק זה.

5.3.2. התפלגות הפסולת

הפסולת מוצגת תחת מספר אפיונים:

- **לפי מקור הפסולת** - מקורות הפסולת שנבחנו הם הסקטורים הביתיים/מסחריים (פסולת מוניציפאלית), הפסולת התעשייתית והפסולת החקלאית. פסולת השומן והשמנים ייחשבו כמקור נפרד.
- **אפיון לפי זרם ראשי ("מצב צבירה")** - נעשה מיון לשלוש קבוצות: פסולת מוצקה יבשה, פסולת אורגנית רטובה ופסולת צמחית (הכוללת בעיקרה סוגי גזם שונים).
- **אפיון לפי תתי זרמים** - אפיון לפי סוגי חומרים מחייב פילוח הפסולת על פי מקורותיה, הזרמים הראשיים בה והחומרים המוכלים בהם. זאת תוך הבחנה בין תתי הזרמים שניתן להפיק מהם דלק (כגון פלסטיק, קרטון, נייר, וחיתולים) לבין אלו שלא ניתן להשיבם (כגון מתכת וזכוכית).

הסיווג לחומרים הכרחי כיוון שמקדמי שתשומה/תפוקה (כמות דלק לטון פסולת) משתנה הן בהתאם לחומר הגלם והן בהתאם לטכנולוגיה המיושמת. חומרים בעלי אפיון דומה יכולים לבוע ממקורות שונים. לדוגמא: פלסטיק יכול להגיע מפסולת עירונית, פסולת תעשייתית או פסולת חקלאית (כשאריות מחממה). ישנם כמובן גם חומרים שזהותם נובעת מהמקור, כגון פרש בעלי חיים או בוצות ממתקנים לטיפול בשפכים. בנוסף נעיר כי פרש בעלי החיים פוצל בין זה שמקורו בבקר ובצאן לזה שמקורו בענפי הלול וגידול העופות.

5.3.3. ההיצע הכולל של הפסולת

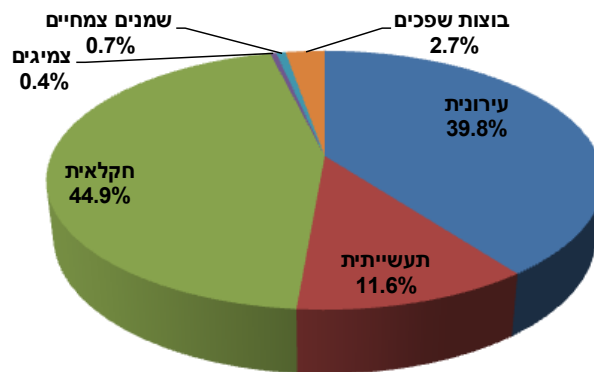
על פי המקורות שנבחנו, היצע הפסולת הזמינה להפקת דלקים בישראל, בשנת 2012, עמד על כ-12.1 מיליון טון. הטבלה הבאה מפרטת את סך הפסולת בישראל במונחים שנתיים מפולחת לפי מקורות ולפי הרכיבים הראשיים ("מצב צבירה": יבש, רטוב, צמחי).

טבלה 25 - מקורות הפסולת (אלפי טון בשנה, 2012)

סה"כ	בוצות שפכים	שמנים צמחיים	צמיגים	חקלאית	תעשייתית	עירונית	יבש
4,125			50	15	1,400	2,660	
960				720		240	
7,030	330	80		4,700		1,920	
12,115	330	80	50	5,435	1,400	4,820	

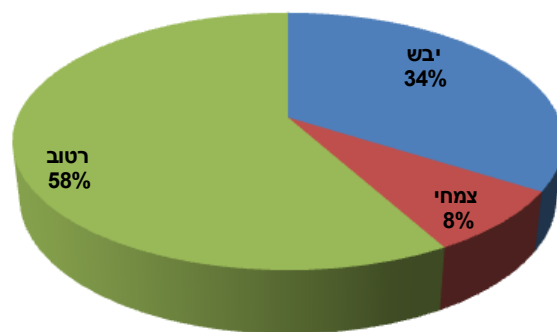
זרמי הפסולת החקלאית והעירונית מספקים כ-45% וכ-40% מכמות הפסולת המיוצרת בישראל, כמופיע בתרשים להלן:

תרשים 33 - התפלגות הפסולת שיוצרה בישראל לפי סקטורים, שנת 2012, אלפי טון בשנה



חתך לפי מצב צבירתה של הפסולת מעלה כי יוצרו בשנת 2012 כ-4.1 מיליון טון פסולת יבשה שהם כ-34% מכלל ההיצע, 7 מיליון טון בשנה פסולת רקבובית אורגנית (58% מכלל ההיצע) וקצת פחות ממיליון טון בשנה פסולת צמחית (כולל גזם) המהווה 8% מכלל ההיצע. עוד עולה כי כ-86% מהפסולת החקלאית היא פסולת רטובה (בעבור הפסולת העירונית, מהווה זרם ראשי זה כ-40% מסך הכמות(משקלית). סקטור התעשייה, לעומתם, מייצר כמות זניחה מאוד של פסולת רקבובית רטובה.

תרשים 34 - פילוח היצע הפסולת לפי זרמים ראשיים



כל זרם ראשי מכיל מספר רב של תתי זרמים שהם סוגי החומרים בפסולת. חלקם ניתנים להשבה וחלקם לא. בפסקאות הבאות יוצגו החומרים המוכלים בכל סקטור ויזוהו הזרמים הרלוונטיים לתהליך הפקת דלקים. עבור כל מקטע פסולת יוצג היצעו בארץ לפני ואחרי הפנמת מדיניות המשרד להג"ס (כפי שפורט במבוא לפרק זה).

5.3.4. פסולת יבשה

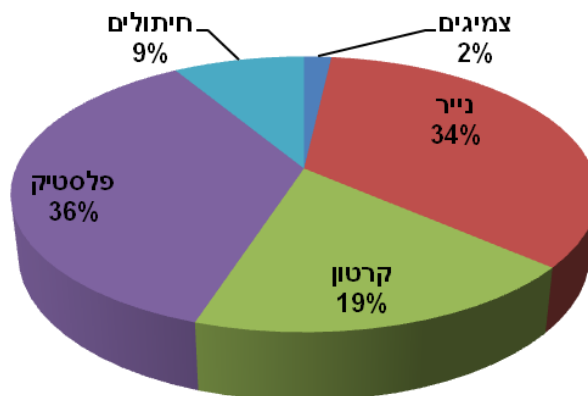
סך הפסולת היבשה שיוצרה בשנת 2012 עמדה על כ-4.1 מיליון טון. שני שלישים מכלל הפסולת היבשה (כולל גזם ופסולת צמחית) הם פוטנציאליים ליצור דלק (כמות פסולת של 2.7 מיליון טון בשנה). למעלה ממחצית מכמות זו מקורה בפסולת העירונית, כמפורט בטבלה הבאה:

טבלה 26 - התפלגות הפסולת היבשה לפי מקורות ותתי זרמים (אלפי טון, כולל פסולת צמחית)

התפלגות	סה"כ	צמיגים	חקלאי	תעשייתי	עירוני	
1%	50	50				צמיגים
23%	958			210	748	נייר
13%	518			210	308	קרטון
25%	1007		15	420	572	פלסטיק
5%	240				240	חיתולים
67%	2773	50	15	840	1,868	סה"כ פוטנציאל לדלק
4%	176				176	טקסטיל
7%	272			140	132	מתכת
13%	552			420	132	זכוכית
9%	352				352	שונות
33%	1352			560	792	סה"כ אחר
100%	4105	50	15	1,400	2,660	סה"כ מקור יבש

מתוך הפסולות הרלוונטיות לענייננו ניכרים שני זרמים עיקריים המהווים יחד כשני שלישים מהיצע הפסולת היבשה להפקת דלקים והם הפלסטיק והנייר המהווים 36% ו-53% מההיצע, בהתאמה.

תרשים 35 - התפלגות היצע הכולל של זרמי הפסולת היבשים שניתן להפיק מהם דלקים



5.3.5. פסולת רטובה

הזרם הראשי הרטוב מכיל ארבעה תתי זרמים הנבדלים זה מזה בהן בסקטור המייצר אותם, הן בסוגי התהליכים הרלוונטיים להפקת דלקים מהם והן באופן ונגישות איסופם. הכמות הכוללת של זרם ראשי זה נאמדה בבכ-7 מיליון טון בשנה, כאשר הזרם העיקרי הינו פסולת פרש בעלי החיים³⁶ המהווה 67% מסך החומר הרטוב. הרכיב האורגני הרקבובי מהזרם העירוני מהווה כ-27% מהסה"כ ובוצות השפכים והשמנים מהווים 5% ו-1% בהתאמה.

טבלה 27 - כמות והתפלגות הפסולת הרטובה המיוצרת בישראל, 2012, אלפי טון בשנה

1,920	פסולת עירונית אורגנית רקבובית (זרם מופרד)
4,700	פסולת חקלאית
330	בוצות שפכים
80	שמנים צמחיים
7,030	סה"כ

על מנת לייצר את הכמות הפיזיבילית שניתן לייצר ממנה דלקים הנחנו את ההנחות הבאות:

- **פרש בעלי חיים** - נבחין בין פרש הבקר ופרש העופות. הראשון משמש ברובו ליצירת קומפוסט. זהו קומפוסט איכותי (החקלאים משלמים עבורו 80 ש"ח/טון בשער השדה). תרומתו היא הן בחומרי הזנה (חנקן, זרחן ואשלגן) וכן בשיפור איכות הקרקע המביאה לחסכון בכמות המים המושקית (פחות חלחול) וכנראה גם להגדלת יבול. הונח כי החקלאות לא תוכל לוותר על קומפוסט זה ועל כן 80% מהפרש הזה לא יהיה זמין לאנרגיה. ביחס לפרש הלולים המצב שונה. פסולת זו בדרך כלל נערמת לימים ספורים על משטח פתוח ומיידי מפוזרת בשדה. תרומתה לגידולים הצמחיים רק בחומרי הזנה ולא בשיפור איכות הקרקע. המשרד להגנת הסביבה מקדם "חוק פסולות חקלאיות" שעל פיו תחויב המועצה האזורית לדאוג לכך שפרש הלולים יטופל באופן טוב יותר ולא יהיה סיכון סביבתי (לקרקע ולאקוויפרים תחתה). הדבר ייקר את הכנת הקומפוסט מפרש זה ואשר ממילא הוא קומפוסט פחות איכותי.
- לפיכך נניח כי 80% מהכמות הכוללת (4.7 מיליון טון בשנה) זמינה ליצור אנרגיה ודלק, גם אחרי התחשבות בהנחיות המשרד להגני"ס.
- **זרם האורגני הרקבובי המיוצר בסקטור המוניציפאלי** ("פסולת עירונית רטובה") - עיקרו של זרם זה הינו שאריות אוכל. כידוע, בישראל של היום, זרם זה לא מופרד כמעט בכלל מזרמי הפסולת היבשים של הסקטור העירוני (להלן "זרם מעורב"). עם חזירת מדיניות ההפרדה במקור שאותה מקדם נמרצות המשרד להגנת הסביבה, צפוי זרם זה להיות נגיש יותר לאיסוף אם כי עדיין לא לגמרי. נכון הוא שמבחינה פיזיקלית כ-40% מהפסולת המוניציפלית היא רטובה-אורגנית. אולם הניסיון בעולם מורה שבאופן אפקטיבי לא ניתן להשיג יותר מ-20% מהכמות כפסולת רטובה מופרדת (כך לדוגמא, בישוב שוהם בו נהוגה מזה זמן הפרדת פסולת ביתית במקור, הרי הכמות הרטובה המופרדת מהווה 12-15% מהמשקל הכולל של הפסולת וכל היתר הוא "לכלוך" של הפסולת היבשה). לפיכך הונח כי רק מחצית מהפסולת הרטובה ממקור הוא פוטנציאל לשימוש כלשהו.

³⁶ נזכיר כי ישנם זרמים רטובים מזרם ראשי זה שלא נלקחו בחשבון בתחשיב ההיצע הכולל של הפסולת לדלקים (כאמור במבוא לפרק זה)

- **פסולות השמנים הצמחיים** - מהווה את התת זרם השלישי הרטוב, הרלוונטי לתהליכי הפקת דלקים. כמותם הפיזיבילית לאיסוף והפקת דלקים הונחה בגובה (מקסימלי ולא ישים) של 80,000 טון בשנה. לתיאור ופירוט על זרם זה ראו פרק 5.2.
- **בוצות שפכים** - כמותם נאמדה בכ-330 אלפי טון.

לאור המפורט לעיל, כמות הפסולת הרטובה הזמינה להפקת דלקים עומדת על כ-6 מיליון טון בשנה.

טבלה 28 - כמות והתפלגות הפסולת הרטובה הזמינה להפקת דלקים

תתי זרמים	סך היצע (אלפי טון בשנה)
פסולת עירונית אורגנית רקבובית (זרם מופרד)	960
פסולת חקלאית	4,700
בוצות שפכים	330
שמנים צמחיים	80
סה"כ	6,070

5.3.6. פסולת צמחית

הפסולת הצמחית מתחלקת לשלושה זרמי גזם: גזם עירוני, גזם מטעים וגזם אחר. כמותם הכוללת נאמדה בגובה של 960 אלף טון בשנה כאשר גזם המטעים מהווה 63% ממנה, הגזם העירוני 23% והיתר הגזם האחר.

5.3.7. זמינות הפסולות לצורך יצור אנרגיה (כולל מדיניות המשרד להגנת

הסביבה)

כפי שהוסבר במתודולוגיה, היצע הפסולות ליצור דלק יחושב בשני תרחישי כמויות: האחד ללא כל מגבלה והשני תחת הנחיות המדיניות של המשרד להג"ס ביחס למחזור, כאשר היתרה זמינה לאנרגיה.

להלן פירוט המדיניות והכמות הנובעת ממנה, עבור כל אחד מזרמי הפסולת הראשיים³⁷:

פסולת יבשה:

טבלה 29 - פסולת יבשה ממנה ניתן להפיק דלק (אלפי טון בשנה)

החומר	סה"כ (מקסימום)	% מחזור במדיניות המשרד להג"ס	יתרה לאנרגיה
צמיגים	50	80%	10
נייר	958	80%	192
קרטון	518	80%	104
פלסטיק	1,007	60%	403
חיתולים	240	-	240
סה"כ יבש	2,773	67%	949

מתוך ההיצע המלא של 2.7 מיליון טון בשנה, רק 33% מהפסולת היבשה, זמינים ליצור אנרגיה כאשר מביאים בחשבון את הנחיות המחזור של המשרד להגנת הסביבה, כ-950 אלף טון בשנה.

³⁷ מתוך מסמך מדיניות המשרד להגנת הסביבה

http://www.sviva.gov.il/subjectsEnv/Waste/Policy/Documents/waste_energy.pdf

פסולת רטובה:

טבלה 30 - פסולת רטובה (אלפי טון בשנה)

יתרה לאנרגיה	שימוש חלופי	כמות מלאה	החומר
700	80%	3,500	פרש בקר
960	20%	1,200	פרש לולים
1,660	85%	4,700	סה"כ פרש בע"ח
960	0%	960	מוניציפלי רטוב
330	0%	330	בוצות שפכים
80	0%	80	שמנים
3,030	50%	6,070	סה"כ

מתוך כ-7 מיליון טון פסולת רטובה כ-86%, כ-6 מיליון טון, יכולים אפקטיבית להיות זמינים לשימוש כלשהו. מחצית מתוכם זמינים גם לאחר שימושים חקלאיים בפרש בעלי החיים.

פסולת צמחית

כאמור, בישראל מיוצרים בשנה כ-720 אלף טון פסולת צמחית בשנה. 75% מתוכה זמינים לייצור אנרגיה ודלק (אחרי מדיניות המשרד להגנ"ס).

טבלה 31 - פסולת צמחית (אלפי טון בשנה)

יתרה לאנרגיה	% מחזור במדיניות המשרד להג"ס	סה"כ כמות	סוג הגזם
240		240	עירוני
400		600	חקלאי: מטעים
120		120	צמחי אתר
720	25%	960	סה"כ

היצע הפסולות הזמינות להפקת דלקים לאחר הטמעת מדיניות המשרד להגנת הסביבה

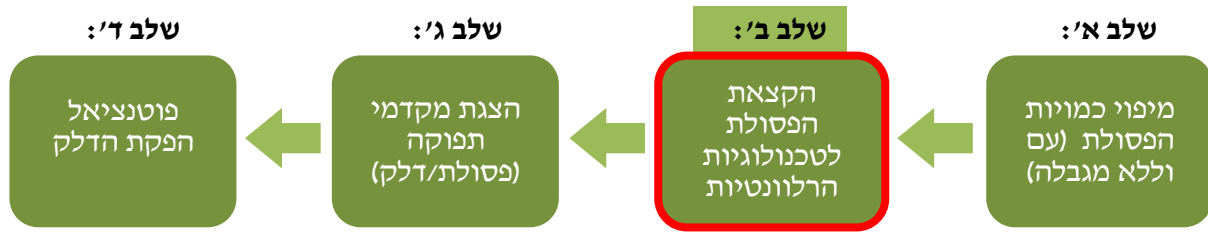
טבלה 32 - ריכוז היצע הפסולת הפוטנציאלי ליצור דלק (אלפי טון בשנה)

%	עם מגבלות שימוש חלופי	ללא מגבלה	
33%	949	2,733	פסולת יבשה
75%	720	960	פסולת צמחית
50%	3,030	6,070	פסולת רטובה
48%	4,699	9,763	סה"כ



מתוך 12.1 מיליון טון פסולת בשנה בישראל ב-2012, כ-89.8 מיליון טון (81%) יכולים להיות זמינים לשימוש של הפקת אנרגיה לרבות דלק. לאחר מגבלות מחזור ושימוש חלופי נותר היצע של 4.7 מיליון טון בשנה, שהם 48% מהפוטנציאל ללא מגבלה.

5.4. הקצאת זרמי הפסולת לטכנולוגיות הנבחרות



סעיף זה יחל בטבלה שמתמצתת את עיקר המידע הרלוונטי לתהליכי יישום של הטכנולוגיות הנבחרות בישראל. הטבלה מציגה את החומרים האפשריים להשבה בכל טכנולוגיה, את תוצר האמצע הנובע מהתהליך, את טכנולוגיות השדרוג הרלוונטיות, את התוצרים הפוטנציאליים ולבסוף את מקדמי התפוקה שנמצאו בספרות.

שילוב תחליפי נפט מבוססי פסולת במערך התחבורה בישראל
 עבור המנהלת לקידום תחליפי נפט במשרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים
 שלב א': סקר ספרות

טבלה 33 - טבלה מסכמת- הפקת דלקים מפסולת - חומרי גלם, טכנולוגיות, תהליכי שדרוג ותוצרים סופיים

מקדם(גלון/טון פסולת) (מהספרות)	תוצר	טכנולוגית שדרוג	תוצר אמצע	טכנולוגיה	משפחה טכנולוגית	חומר גלם
50 גלון / טון פסולת יבשה	אתנול	סיתנזה באמצעות מתנול פישר טרופס (התוצר תלוי בקטליזטור ובמכשור בו משתמשים)	סינגז	גזיפיקציה	תרמו-כימיות	תאית (לינגו- צללזה) (גזם, פסולת חקלאית, שאריות מיערות, פסולת עירונית)
	דיזל					
	בנזין					
	SNG (גז סינטטי)					
0.12 טון/ טון ביומסה מיובשת 26.4 גלון/ טון	מימן	טיפול באמצעות מימן (Hydrotreating and Hydrocracking) סינתזת המרת שמן הפירוליזה לשמן מיוצב	שמן פירוליזה	פירוליזה	ביו-כימיות	פסולת מגידולים עתירי עמילן (שאריות תירס)
	דיזל					
	בנזין					
	שמן מיוצב (Crude BioOil)					
81.5 גלון/ טון פסולת יבשה (שאריות יערנות)*	אתנול	הידרוליזה כימית (באמצעות חומצה) או אנזימטית (באמצעות אנזימים)	גלוקוז	הידרוליזה כימית / אנזימטית	ביו-כימיות	פסולת מגידולים עתירי עמילן (שאריות תירס)
	דיזל					
	בנזין					
	אתנול					
113 גלון/ טון פסולת יבשה (שאריות תירס)*	אתנול	הידרוליזה כימית (באמצעות חומצה) או אנזימטית (באמצעות אנזימים)	גלוקוז	הידרוליזה כימית / אנזימטית	ביו-כימיות	פסולת מגידולים עתירי עמילן (שאריות תירס)
	דיזל					
	בנזין					
	SNG (גז סינטטי)					
8 wt% (אחוז מסה מסך המשקל) 26 גלון / טון	מימן	טיפול באמצעות מימן (Hydrotreating and Hydrocracking)	שמן פירוליזה	פירוליזה	תרמו-כימיות	פסולת מגידולים עתירי עמילן (שאריות תירס)
	דיזל					
	בנזין					
	אתנול					
30 wt% (אחוז מסה מסך המשקל) 110 גלון / טון	דיזל	טיפול באמצעות מימן (Hydrotreating and Hydrocracking)	שמן פירוליזה	פירוליזה	ביו-כימיות	פסולת מגידולים עתירי עמילן (שאריות תירס)
	בנזין					
	דלק פחמימני					
	דיזל (Hydrogenation-Derived) (HDRD, Renewable Diesel)					
0.85 גלון דלק / 1 גלון פסולת שמנים ושומנים 264 גלון / טון	דיזל (Fatty Acid Methyl Ester) (FAME,	קטליזטור או אנזימים		הידרוגנציה	ביו-כימיות	שמן צמחי / שומן בע"ח
	אתנול	סיתנזה באמצעות מתנול פישר טרופס (התוצר תלוי בקטליזטור ובמיכשור בו משתמשים)	סינגז	גזיפיקציה	תרמו-כימיות	פסולת עירונית מוצקה (נייר, קרטון, פלסטיק, צמיגים)
	דיזל					
	בנזין					
SNG (גז סינטטי)						
28 גלון/ טון פסולת יבשה	מימן	טיפול באמצעות מימן (Hydrotreating and Hydrocracking)	שמן פירוליזה	פירוליזה	ביו-כימיות	פסולת מגידולים עתירי עמילן (שאריות תירס)
	דיזל					
	בנזין					
	אתנול					

שילוב תחליפי נפט מבוססי פסולת במערך התחבורה בישראל
 עבור המנהלת לקידום תחליפי נפט במשרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים
 שלב א': סקר ספרות

מקדם(גלון/טון פסולת) (מהספרות)	תוצר	טכנולוגית שדרוג	תוצר אמצע	טכנולוגיה	משפחה טכנולוגית	חומר גלם
	דיזל	טיפול באמצעות מימן (Hydrotreating and Hydrocracking)	שמן פירוליזה	פירוליזה		
	בנזין					
	דלק פחמימני	סינתזה : המרת שמן הפירוליזה לסינגז והמרתו לדלק פחמימני				
	ביומתאן (לפחות 98%)	ספיגה כימית/ קרצוף ע"י מים בלחץ גבוה/ ספיגה באמצעות לחץ/ הפרדה קריוגנית/ הפרדה באמצעות ממברנה	ביוגז 65% מתאן)**	עיכול אנארובי	ביו-כימיות	פסולת אורגנית:
79.2 מ"ק/ טון פסולת	פסולת ירוקה (גזם)					
135 מ"ק/ טון פסולת	מזון					
12.59 מ"ק/ טון פסולת	בוצות מט"ש					
112.48 מ"ק/ טון פסולת (יבש)	פרש פרות (יבש)					
17.5 מ"ק/ טון פסולת (רטוב)	פרש פרות (רטוב)					
129.62 מ"ק/ טון פסולת	פסולת נייר					

חשוב להבדיל בין פוטנציאל תיאורטי לבין ישימות מעשית. יש מקרים בהם טכנולוגיה יכולה להשיב חומרים מסוימים לדלקים אך התהליך ארוך ולא יעיל בהשוואה לאלטרנטיבות אחרות (לדוגמה הקצאת קרטון לעיכול אנאירובי יאריך את התהליך ויהיה פחות יעיל אנרגטית מהקצאת אותו קרטון לתהליך גזיפיקציה).

לצורך הניתוח יונחו שני תרחישי הקצאה. הם נבחרו משיקולי פיזיביליות טכנולוגית, זמינות הנתונים והפסולת הרלוונטיות בישראל. מדובר על שני מסלולי הקצאה של הפסולת (מלבד השמנים) לשתי טכנולוגיות עיקריות: העיכול האנאירובי, ממשפחת הביוכימיות והגזיפיקציה ממשפחת התרמו-כימיות. השמנים, כאמור, יוקצו לאחת משתי הטכנולוגיות שנסקרו והן: ההידרוגנציה והטראנסאסטרופיקציה.

כאמור, מכל משפחת טכנולוגיות נבחרה הטכנולוגיה המיושמת ביותר כיום וכזו שיש עליה מידע מהימן יחסית בספרות. מתוך משפחת הטכנולוגיות הביוכימיות נתמקד בטכנולוגיית העיכול האנאירובי ומבין המשפחה התרמית, נתמקד בגזיפיקציה.

שני תרחישי ההקצאה הינם:

▪ **תרחיש ההקצאה המשולב** המניח את התפלגות הפסולת בין טכנולוגיות ביוכימיות לתרמוכימיות: פסולת רטובה תיועד לתהליך עיכול אנאירובי ויתר הזרמים לטכנולוגיית גזיפיקציה (ש"יודעת" לטפל בכלל זרמי הפסולת שנבחנו).

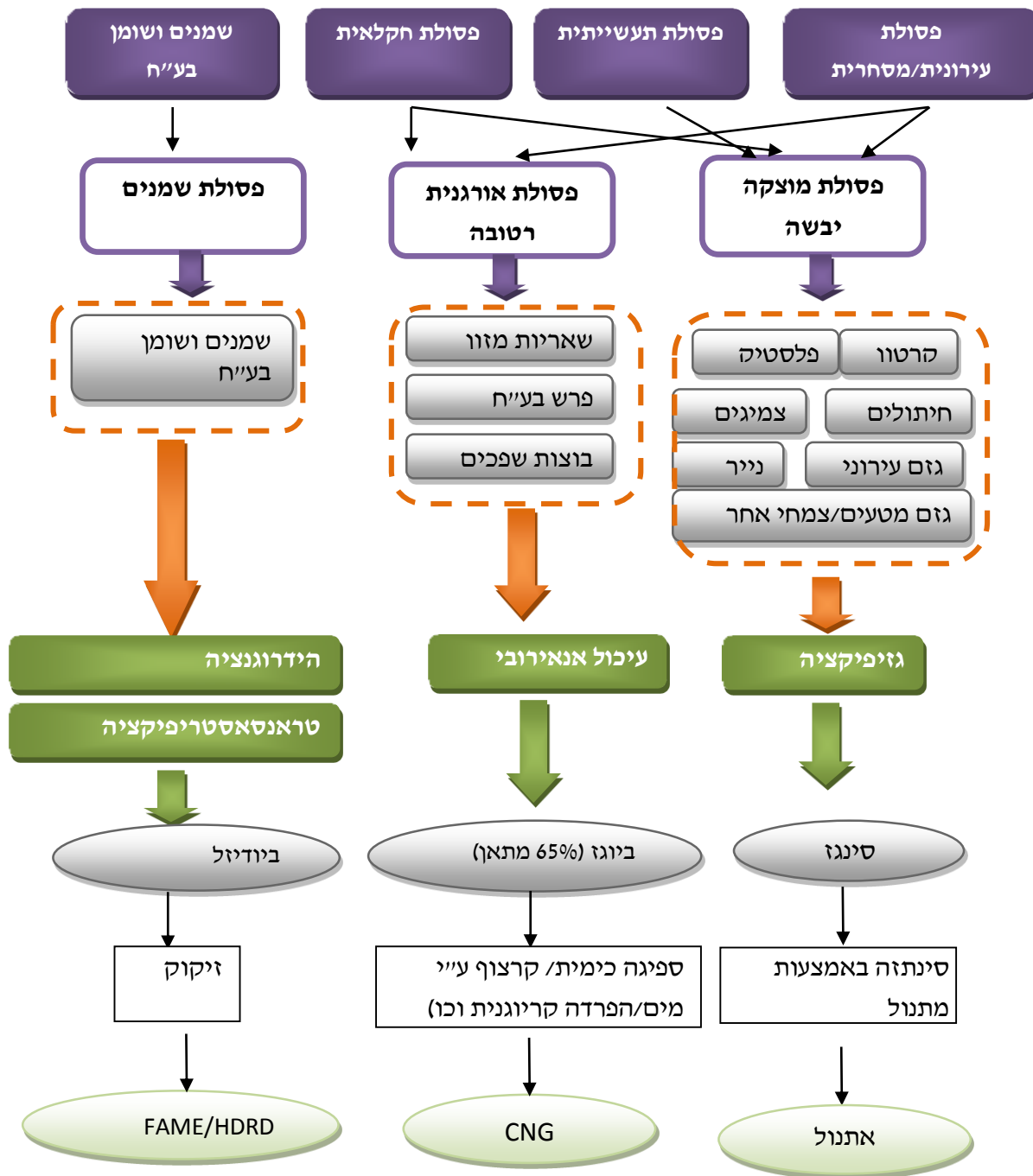
השימוש בטכנולוגיות הביוכימיות לטיפול בזרמי הפסולת הרטובה נמצא ביישום נרחב (ומקודם ע"י המשרד להגנת הסביבה). נכון הדבר גם להקצאת פסולות יבשות מוצקות לטכנולוגיית הגזיפיקציה (בעיקר בגרמניה ויפן) לצורך השבתן לחום ו/או חשמל (שהם השימושים העיקריים בה כיום). שימוש בגזיפיקציה להפקת דלקים **מפסולות** נמצא בשלבים מוקדמים אם כי מתקדמים ביחס לטכנולוגיות תרמו כימיות אחרות כגון: פירוליזה ופלסמה.

בתרחיש זה יוקצה כל זרם ראשי לטכנולוגיית בעלת היתרון היחסי והן אלו שלרוב מקודמות במדיניות משרדי אנרגיה וסביבה ברחבי העולם:

הזרמים הרטובים יוקצו לטכנולוגיית העיכול, שתוצרה ביוגז (בעל 65% מתאן) שבתהליך מתאניזציה הופך לביומתאן באיכות של גז טבעי (98% מתאן). הגז הטבעי משמש סקטורים נוספים מלבד תחבורה. לענייננו, הביומתאן מועבר לדחיסה ומיושם כדלק CNG להנעת רכבים. נציין כי לאחר השבת החומר לביוגז נותרת בוצה המשמשת, במקומות רבים בעולם, לטיוב ו/או דישון הקרקע (לאחר תהליך עיכול ביולוגי נוסף, הקומפוסטציה).

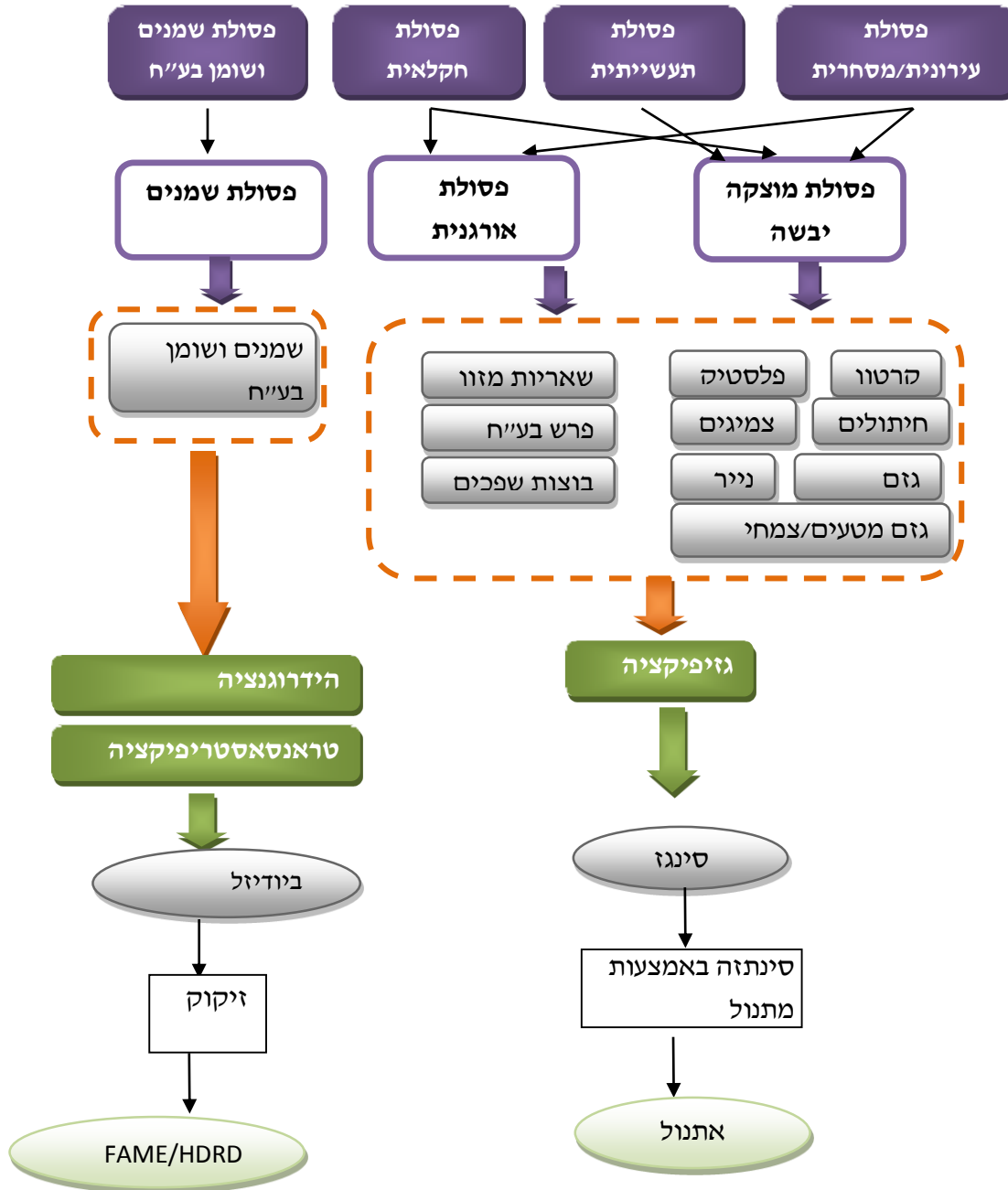
לתהליך הגזיפיקציה תוקצה **הפסולת היבשה המוצקה**-התהליך מטפל במגוון רחב יותר של זרמים (לרבות פסולת אורגנית רטובה). עם זאת, היעילות האנרגטית והכלכלית של טכנולוגיה זו נובעת בעיקר מזרמי הפסולת היבשה המוניציפאלית והתעשייתית ומפסולת מעורבת.

תרשים 36 - תרחיש הקצאה משולב (עיכול אנאירובי, גזיפיקציה וטיפול בשמנים)



תרחיש גזיפיקציה בתרחיש זה כל זרמי הפסולת יופנו לתהליך הגזיפיקציה, מלבד פסולות השמנים.

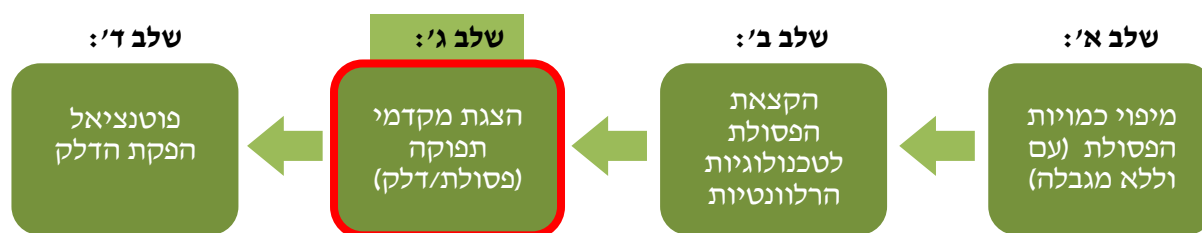
תרשים 37 - תרחיש גזיפיקציה (גזיפיקציה וטיפול בשמנים)



ההבדלים בין התרחישים נובעים מהקצאת הזרם הראשי הרטוב לעיכול האנאירובי (תרחיש א) או לטיפול תרמי בטכנולוגית הגזיפיקציה (תרחיש ב). בשני התרחישים השמנים יופנו לטכנולוגיות המתמחות בהן בשלב זה לא תיעשה הבחנה ביניהם מאחר ומקדמי התפוקה שלהם כמעט זהים³⁸. כמו כן משותפת לשני התרחישים הקצאת הפסולת המוצקה לגזיפיקציה.

³⁸ בשלב הבא של העבודה, במסגרת שלב ב' למכרז זה, יופנמו בהקצאת זרמי הפסולות גם שיקולים כלכליים.

5.5. מקדמי תפוקה



להלן טבלת מקדמי התפוקה שישמשו את תחשיב ההיצע תחת תרחישי הכמויות וההקצאה שפורט עליהן. היחידות עבור גזיפיקציה הן ליטר אתנול לטון פסולת יבשה³⁹ (שיעור החומר היבש משתנה מזרם לזרם), עבור עיכול אנאירובי היחידות הן במונחי מ"ק ביומתאן (98%) לטון פסולת ועבור השמנים הן גלון ביודיזל לטון פסולת.

טבלה 34 - מקדמי תפוקה

הזרם	תת זרם	עיכול אנאירובי (מ"ק ביומתאן (98%) /טון פסולת)	גזיפיקציה (גלון אתנול/טון פסולת יבשה)	הידרוגנציה/ טראנאסטרפיקציה (גלון ביודיזל/ טון שמן)
יבש	נייר וקרטון	129.62	50	
	פלסטיק		28	
	צמיגים		28	
	חיתולים חד פעמיים		28	
צמחי	גזם עירוני	79.20	50	
	גזם מטעים	79.20	50	
	פסולת חממות	79.20	50	
רטוב	פסולת עירונית רטובה	135	14	
	פרש בקר יבש/פרש לולים	112.48	14	
	טון פרש בקר רטוב	17.50	14	
	בוצות שפכים	12.59	14	
שמנים	שמן צמחי/שומן בע"ח			264

- המקדמים הינם תוצר חישובי המסתמך על מקדמי הספרות שפורטו בטבלה 34 ועל הערכות שיעור הפסולת היבשה בזרמים כמפורט להלן⁴⁰.

טבלה 35 - שיעור החומר היבש בזרמי פסולת שונים

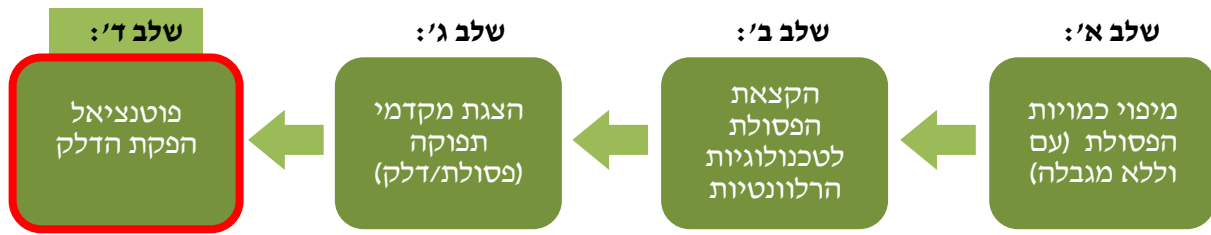
החומר	% חומר יבש
גזם עירוני	45% (כולל גדר חיה שהיא לחה יותר)
גזם מטעים (חקלאי)	58%
פסולת חממות	25% (על בסיס פרמטרים של שאריות תירס)
פסולת עירונית רטובה/ בוצות מט"שים/ פרש בקר רטוב	18%

- לגבי פרש לולים הונח שתפוקתו במונחי ביוגז דומה לפרש בקר יבש
- לא נמצאו מקדמי תפוקה בטכנולוגית הגזיפיקציה לגבי פסולות רקבוביות כמו פסולת מזון, בוצות מט"שים ופרש בעלי חיים. הונח באופן ראשוני שהמקדם הינו מחצית מזה של פסולת עירונית מוצקה, קרי 14 גלון/טון פסולת.

³⁹ התוצר היחידי שנמצא עבורו מקדמים להפקת דלקים מפסולות בטכנולוגיות הגזיפיקציה.

⁴⁰ בהסתמך על ד"ר בני לב ממנהל המחקר החקלאי

5.6. פוטנציאל הפקת הדלק



כמות הדלקים תחושב תחת ארבעה התרחישים שנידונו (כמות והקצאה). הכמות תחושב על ידי הכפלה של המקדם הספציפי לתת הזרם בכמות השנתית של אותו תת זרם. כמות הפסולת הפנויה תיבחן עם וללא מגבלות מדיניות המחזור של המשרד להגנת הסביבה.

כמות הפסולת הזמינה להפקת דלקים עומדת על כ-9.7 מיליון טון בשנה ללא מגבלת המשרד ועל כ-4.7 מיליון טון בשנה לאחר הפניית זרמי פסולת למחזור (על פי מדיניות המשרד), כמפורט להלן:

טבלה 36 - היצע הפסולת לדלקים בשני תרחישי כמויות של פסולת מוצקה יבשה

מחזור	תרחיש מדיניות (אלפי טון בשנה)	תרחיש כמות מקסימלית (אלפי טון בשנה)	צמיגים
	10	50	נייר
	192	958	קרטון
	104	518	פלסטיק
	403	1,007	חיתולים
	240	240	גזם עירוני
	240	240	גזם מטעים
	400	600	גזם אחר
	120	120	סה"כ היצע פסולת יבשה מוצקה
	1,709	3,733	

טבלה 37 - היצע פסולת רטובה לדלקים בשני תרחישי הכמויות

מחזור	תרחיש מדיניות (אלפי טון בשנה)	תרחיש כמות מקסימלית (אלפי טון בשנה)	פסולת עירונית אורגנית רקבובית (זרם מופרד)
	960	960	פרש בקר
	700	3,500	פרש לולים
	960	1,200	בוצות שפכים
	330	330	שמנים צמחיים
	80	80	סה"כ פסולת רטובה אורגנית
	3,030	6,070	

הכפלת כמויות הפסולת שהוצגו לעיל במקדמים תניב את כמויות הביודלקים המקסימאליות שניתן יהיה להפיק מזרמי הפסולת בישראל תחת שני תרחישי ההקצאה.

טבלה 38 - כמות הדלקים שניתן להפיק בשנה מהפסולות בישראל, ללא מגבלת המשרד

תרחיש גזיפיקציה		תרחיש משולב		תתי זרמים
ביודיזל משמנים (אלפי גלון בשנה)*	אתנול מגזיפיקציה (אלפי גלון בשנה)	ביודיזל משמנים (אלפי גלון בשנה)*	ביומתאן (98% מתאן) (אלפי מ"ק בשנה)	
	1,400			צמיגים
	47,900			נייר
	25,900			קרטון
	28,196			פלסטיק
	6,720			חיתולים חד פעמיים
	12,000			גזם עירוני
	30,000			גזם מטעים
	6,000			גזם אחר
	13,440		129,600	פסולת עירונית רטובה
	26,600		213,712	פרש בקר יבש / לולים
	39,200		49,000	פרש בקר רטוב
	4,620		4,155	בוצות שפכים
21,120		21,120		שמן צמחי / שומן בע"ח
21,120	241,976	21,120	396,467	סה"כ

מהפסולות שנבחנו ניתן לייצר, תחת תרחישי ההקצאה, למעלה מ-240 אלף גלון אתנול, כ-21 מיליון גלון ביודיזל (מהשמנים) וכ-400 מיליון מ"ק ביומתאן (98%). אתנול הוא בעל ערך קלורי של כשני שלישים בהשוואה לבנזין. לגבי כל שאר הדלקים ניתן להניח יחס של 1:1 בערך הקלורי.

תחת תרחיש הגזיפיקציה ניתן לייצר כמות מקסימאלית של 242 מיליון גלון אתנול בשנה. בתרחיש המשולב "מוסטסים" זרמי הפסולת הרטובה לתהליך העיכול ומיוצרים כ-400 מיליון מ"ק ביו-מתאן (על חשבון ירידה של כ-84 מיליון גלון אתנול).

בנוסף להפקת אתנול בתהליך גזיפיקציה, ניתן גם להפיק מתנול ודלקים פחמימניים (BTL). הרחבה לגבי תהליכים ותוצרים אלה מופיעה בשלב ב' של עבודה זו, תחת פרק 4 הפקת מתנול, דלקים פחמימניים ואתנול מגזיפיקציה - ניתוח כלכלי.

תחת מגבלת מדיניות המשרד להגנת הסביבה, הכמויות קטנות ומוצגות להלן:

טבלה 39 - כמות הביודלקים שניתן להפיק בשנה מהפסולות בישראל - לאחר הטמעת מדיניות מחזור

תרחיש גזיפיקציה		תרחיש משולב			תרחישי כמויות:
ביודיזל משמנים (אלפי גלון בשנה)*	אתנול מגזיפיקציה (אלפי גלון בשנה)	ביודיזל משמנים (אלפי גלון בשנה)*	ביומתאן (98% מתאן) (אלפי מ"ק בשנה)	אתנול מגזיפיקציה (אלפי גלון בשנה)	תתי זרמים
	280			280	צמיגים
	9,600			9,600	נייר
	5,200			5,200	קרטון
	11,284			11,284	פלסטיק
	6,720			6,720	חיתולים חד פעמיים
	12,000			12,000	גזם עירוני
	20,000			20,000	גזם מטעים
	6,000			6,000	גזם אחר
	13,440		129,600		פסולת עירונית רטובה
	15,400		12,3728		פרש בקר יבש / פרש לולים
	7,840		9,800		טון פרש בקר רטוב
	4,620		4,155		בוצות שפכים
21,120		21,120			שמן צמחי / שומן בע"ח
21,120	112,384	21,120	267,283	71,084	סה"כ

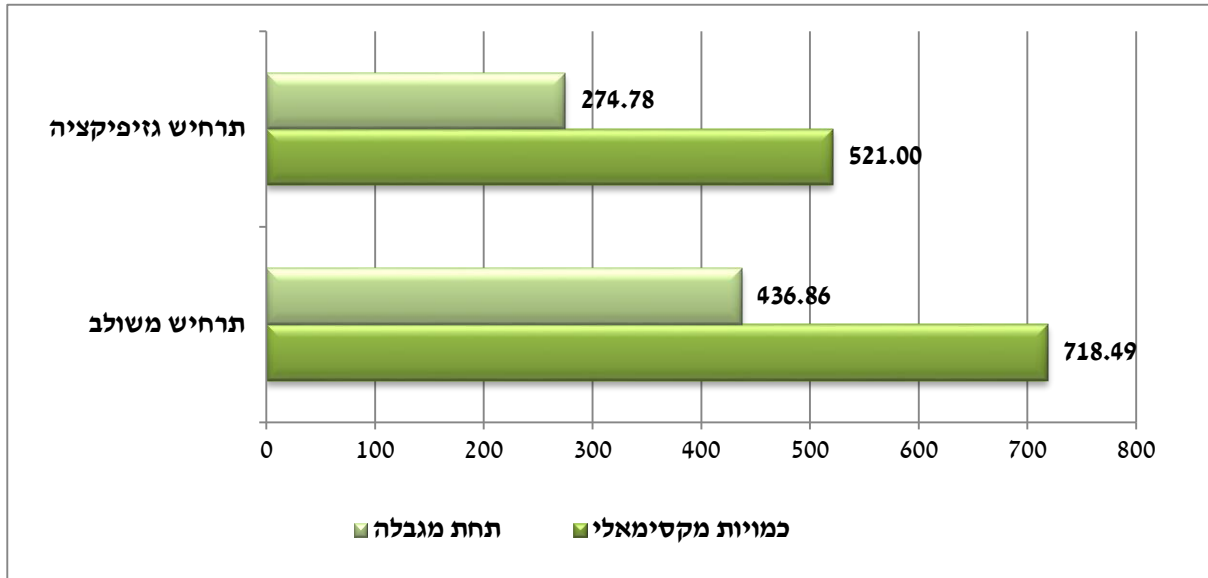
- בתרחיש המשולב כמות האתנול המקסימאלית קטנה ל-112 מיליון גלון (פחות ממחצית הכמות בתרחיש ללא המגבלה). הסתת הזרמים הרטובים לתהליך העיכול יתרום כ-267 מיליון מ"ק ביומתאן להיקפי הייצור ויפחית בכ-40 מיליון טון את תפוקת האתנול השנתית. בנוסף להפקת אתנול בתהליך גזיפיקציה, ניתן גם להפיק מתנול ודלקים פחמימניים (BTL). הרחבה לגבי תהליכים ותוצרים אלה מופיעה בשלב ב' של עבודה זו, תחת פרק 4 הפקת מתנול, דלקים פחמימניים ואתנול מגזיפיקציה - ניתוח כלכלי.
- כמות הביודיזל המיוצרת משמנים נותרת ללא שינוי בשני התרחישים ועומדת על כ-21 מיליון גלון.

הטבלה הבאה מציגה את פוטנציאל השבת הפסולות לדלקים במונחי אלפי שעט"ן:

טבלה 40 - פוטנציאל השבת הפסולות לדלקים במונחי כמויות דלק ושעט"ן בשנה

תרחיש גזיפיקציה		תרחיש משולב			כמות מיוצרת	
ביודיזל	אתנול	ביודיזל	ביומתאן (98%)	אתנול		
21,120	241,976	21,120		158,116	אלפי גלון אתנול בשנה	תרחיש כמויות מקסימאלי
			396,467		אלפי מ"ק ביומתאן (98%)	
61	460	61	356	300	אלפי שעט"ן	
	521		718		סה"כ אלפי שעט"ן לתחבורה	
21,120	112,384	21,120		71,084	אלפי גלון אתנול בשנה	תרחיש מדיניות המשרד להגנ"ס
			267,283		אלפי מ"ק ביומתאן (98%)	
61	213.5	61	240.6	135	אלפי שעט"ן	
	274		436		סה"כ אלפי שעט"ן לתחבורה	
0.0029	0.0019	0.0029	0.0009	0.0019	מקדם שעט"ן לגלון למ"ק	

תרשים 38 - פוטנציאל הפקת דלקים מפסולות בישראל - אלפי שעט"ן



תחת התרחיש האופטימאלי ניתן יהיה לייצר כ-718 אלף שעט"ן לשימוש בתחבורה, המהווים כ-13% מהביקושים כיום. הכמות המקסימאלית מתאפשרת באופן טבעי תחת תרחיש כמויות מקסימאלי ותחת תרחיש ההקצאה המשולב, המייעד לכל טכנולוגיה (מכל אחת מהמשפחות) את זרמי הפסולת האופטימאליים לה (במונחי יעילות אנרגטית). תחת מגבלת מדיניות המחזור פוחתת כמות זו לכ-437 אלף שעט"ן המספקים כ-8% מהביקושים.

6. ביבליוגרפיה

1. A European project for sustainable development. (n.d.). *BIOGASMAX*.
<http://www.biogasmax.eu/biogasmx-project-biogas-and-biofuel/biogas-and-biofuel-for-sustainable-developpement.html>
2. About DME. (n.d.). *BioDME*. Retrieved July 8, 2013, from <http://www.biodme.eu/about-dme>
3. Alternative Fuels Data Center: Biogas. (n.d.). *EERE*.
http://www.afdc.energy.gov/fuels/emerging_biogas.html
4. American Coalition for Ethanol (2005). Fuel Economy Study: Comparing Performance and Cost of Various Ethanol Blends and Standard Unleaded Gasoline.
5. Anaerobic digestion - A case study McDonnell Farms Biogas Limited, Shanagolden, Co. Limerick. (n.d.). *Sustainable Energy Authority of Ireland*.
www.seai.ie/Publications/Renewables_Publications_/Bioenergy/Anaerobic_Digestion-Shanagolden_Case_Study_2010.pdf
6. Anaerobic digestion, POST note number 387. (2011). *The UK Parliamentary Office of Science and Technology*.
www.google.co.il/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDkQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.parliament.uk%2Fbriefing-papers%2Fpost-pn-387.pdf&ei=BQV1Ud3dDIOptAa2nYCYCw&usq=AFQjCNHqDvp5FyHFzeFo8oLQcd_Ol69Waw&bvm=bv.45512109,d.Yms
7. Arena, U. (2012). Process and technological aspects of municipal solid waste gasification – A review. *Waste Management, Vol. 32, 625–639*.
8. Arsova, L. (2010, May 1). Anaerobic digestion of food waste: Current status, problems and an alternative product. *Columbia University*. Retrieved August 19, 2013, from
www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/arsova_thesis.pdf
9. Bacovsky, D., Ludwiczek, N., Ognissanto, M. & Wörgetter, M. (2013). Status of advanced biofuels demonstration facilities in 2012. *bioenergy2020.eu*
10. Bazin de Caix, C., & Dubost, J. (2012). *CEN/TC 408 Project committee: Biomethane for transport and injection mandate M/475*.
http://www.greengasgrids.eu/sites/default/files/files/4_Jacques%20Dubost_GDF%20Suez_CEN%20TC%20408%20Biomethane%20for%20transport%20and%20injection.pdf
11. Bergthorson, J., Ngadi, M., Fishbein, B., Salusbury, S., Bakari, M. & Toepoel, V. (n.d.). *2nd generation biomass conversion efficiency*. www.iata.org
12. Biomethane for transportation: Opportunities for Washington state. (n.d.). *Washington State University*.
http://www.energy.wsu.edu/Documents/Biomethane_For_Transportation_WWCleanCities.pdf
13. Bridgewater, A. V. (2012). *Upgrading biomass fast pyrolysis Liquids*. Wiley Online Library.
14. Bridgewater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bio Energy, Vol. 38, 68 -94*.
15. Bright, A., Bulson, H., Henderson, A., Sharpe, N., Dorstewitz, H., & Pickering, J. (n.d.). An introduction to the production of biomethane gas and injection to the national grid: Revised final report. *Organic Resource Agency*.
<http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/AWM%20Biomethane%20to%20Grid%2005%2007%2011.pdf>

16. Bromberg, L., & Cheng, W. (2010, November 28). Methanol as an alternative transportation fuel in the US: Options for sustainable and/or energy-secure transportation. *U.S. Department of Energy*. Retrieved July 16, 2013, from www.afdc.energy.gov/pdfs/mit_methanol_white_paper.pdf
17. Brown, T. R., Thilakarathne, R., Brown, R.C. & Huc, G. (2013). Regional differences in the economic feasibility of advanced biorefineries: Fast pyrolysis and hydroprocessing. *Energy Policy*, Vol. 57, 234–243.
18. Bryce, A. (2013, February 9). Open Fuel Standard. *Blue Fuel Energy*. Retrieved July 17, 2013, from http://bluefuelenergy.com/open-fuel-standard/open-fuel-standard/?doing_wp_cron=1373986787.7246890068
19. Byun, Y., Cho, M., Hwang, S. & Chung, J. (2012). *Thermal plasma gasification of municipal solid waste (MSW)*. <http://dx.doi.org/10.5772/48537>
20. CELLULOSIC ETHANOL HEADS FOR COST-COMPETITIVENESS BY 2016. (2013, March 12). *Bloomberg New Energy Finance*. Retrieved November 3, 2013, from <http://about.bnef.com/press-releases/cellulosic-ethanol-heads-for-cost-competitiveness-by-2016/>
21. Ciferno, J. P., & Marano, J. J. (2002, June 1). Benchmarking Biomass Gasification Technologies for Fuels, Chemicals and Hydrogen Production. *U.S. Department of Energy*. Retrieved June 27, 2013, from <http://seca.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/pubs/pdf/BMassGasFinal.pdf>
22. Cirad. (2012). *An assessment of bio-oil toxicity for safe handling and transportation*.
23. Davis, J., Haase, S. & Warren, A. (2011). *Waste-to-energy evaluation: U.S. Virgin Islands*. NREL/TP-7A20-52308.
24. de Hulu, J., Maassen, J. I. W., van Meel, P. A., Shazad, S. & Vaessen, J.M.P. (2008). Comparing different biogas upgrading techniques - Final report. *Eindhoven University of Technology & DMT*. <http://students.chem.tue.nl/ifp24/BiogasPublic.pdf>
25. Demirbas, M. F., Balat, M. & Balat, H. (2011). Biowastes-to-biofuels. *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, 1815–1828.
26. Dimethyl ether (DME): Biofuel Fact Sheet. (n.d.). *European Biofuels Technology Platform*. Retrieved July 7, 2013, from www.biofuelstp.eu/factsheets/dme-fact-sheet.pdf
27. DME Production Process. (n.d.). *Oberon Fuels*. Retrieved July 7, 2013, from <http://www.oberonfuels.com/technology/oberon-process/>
28. DRAFT Successful Applications of Anaerobic Digestion from Across the World. (2013, July 12). *The Global Methane Initiative (GMI)*. Retrieved August 19, 2013, from https://www.globalmethane.org/documents/ag_case_studies_guide.pdf
29. Dubost, J. (2013). Biomethane standards: What is the status? *GreenGasGrid*. <http://www.greengasgrids.eu/sites/default/files/files/Biomethane%20standards%20-%20Jacques%20Dubost.pdf>
30. Ducharme, C. & Themelis, N. (2010). *Analysis of thermal plasma-assisted waste to energy process*. Earth and Environmental Engineering and Earth Engineering Center.
31. European Biofuels Technology Platform EBTP. (n.d.). *European Biofuels Technology Platform*. <http://www.biofuelstp.eu/overview.html>
32. European Commission. M/475 Mandate to CEN for standards for biomethane for use in transport and injection in natural gas pipelines. (2010). http://ec.europa.eu/enterprise/standards_policy/mandates/database/index.cfm?fuseaction=search.detail&id=459#

33. European Commission. Clean power for transport – Frequently asked questions (MEMO/13/24). (2013). [http://europa.eu/rapid/press-release MEMO-13-24_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-13-24_en.htm)
34. European Community. *An assessment of bio-oil toxicity for safe handling and transportation*. (2005, June 30). Retrieved May 3, 2013, from http://ec.europa.eu/energy/renewables/bioenergy/doc/pyrolysis/biotox_publishable_report.pdf
35. Fact sheet: Upgrading biogas to biomethane. (n.d.). *Sustainable Energy Authority of Ireland*. [www.seai.ie/Publications/Renewables_Publications/_Bioenergy/Upgrading Biogas to Biomethane.pdf](http://www.seai.ie/Publications/Renewables_Publications/_Bioenergy/Upgrading_Biogas_to_Biomethane.pdf)
36. FAQ. (n.d.). *International DME Association*. Retrieved July 7, 2013, from <http://www.aboutdme.org/index.asp?bid=234>
37. Fast Pyrolysis and Hydroprocessing. (n.d.). *DOE*. Retrieved May 3, 2013, from www1.eere.energy.gov/bioenergy/pdfs/fast_pyrolysis_and_hydroprocessing.pdf
38. Feasibility of anaerobic digestion of organic wastes for biofuel production. (2012). *California Environmental Protection Agency*. www.arb.ca.gov/fuels/lcfs/2a2b/internal/hsad-rng-yield-062812.xlsx
39. Gasification. (n.d.). *DOE - National Energy Technology Laboratory*. Retrieved June 24, 2013, from http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/gasifipedia/7-advantages/7-3-2_waste.html
40. Hui, H. (2013, April 4). *China methanol usage to surge as new fuel standards take effect*. Chemical Industry News & Chemical Market Intelligence | ICIS.com. Retrieved July 17, 2013, from <http://www.icis.com/Articles/2013/04/04/9655662/china+methanol+usage+to+surge+as+new+fuel+standards+take.html>
41. IEA Bioenergy Task 37. (2011). *Plant List*. Retrieved August 19, 2013, from <http://www.iea-biogas.net/content/plant-list/plant-list.html>
42. Introduction to anaerobic digestion. (n.d.). *Sustainable Energy Authority of Ireland*. [www.seai.ie/Publications/Renewables_Publications/_Bioenergy/Anaerobic Digestion-Factsheet.pdf](http://www.seai.ie/Publications/Renewables_Publications/_Bioenergy/Anaerobic_Digestion-Factsheet.pdf)
43. ISO/DIS 16861 - Petroleum products -- Fuels (class F) -- Specifications of Dimethylether (DME). (n.d.). *ISO - International Organization for Standardization*. Retrieved July 7, 2013, from http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=57835
44. Jia, H. (2009, September 13). *New methanol fuel standards for China*. Royal Society of Chemistry. Retrieved July 16, 2013, from www.rsc.org/chemistryworld/News/2009/November/13110901.asp
45. Jones, S.B., Valkenburg, C., Walton, C., Elliott, D.C., Holladay, J.E., Stevens, D.J., Kinchin, C. & Czernik, S. (2009). *Production of gasoline and diesel from biomass via fast pyrolysis, hydrotreating and hydrocracking: A design case*. Richland, Washington 99352: Pacific Northwest National Laboratory. Retrieved May 3, 2013, from www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/pnnl-18284.pdf
46. Lauwers, J., Appels, L., Taes, S., Van Impe, J., & Dewil, R. (2012). Anaerobic Co-Digestion of Fats, Oils and Grease (FOG) with Waste Activated-Sludge. *CHEMICAL ENGINEERING*, 29.
47. Martín-González, L., Colturato, L. F., Font, X., & Vicent, T. (2010). Anaerobic co-digestion of the organic fraction of municipal solid waste with FOG waste from a sewage treatment plant: recovering a wasted methane potential and enhancing the biogas yield. *Waste management*, 30(10), 1854-1859.
48. Methanol from Biomass Fact Sheet . (n.d.). *European Biofuels Technology Platform*. Retrieved July 17, 2013, from <http://www.biofuelstp.eu/factsheets/methanol-fact-sheet.html>
49. Methanol: The Clear Alternative for Transportation. (n.d.). *Methanol Institute*. Retrieved July 16, 2013, from www.methanol.org/energy/resources/alternative-fuel/methanol-flexible-fuel-vehicles.aspx
50. Miguel, G. S., Makibar, J. & Fernandez-Akarregi, A. R. (2012). New advances in the fast pyrolysis of biomass. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, Vol. 6, 1–11.

51. Moustakas, K., Fatta, D., Malamis, S., Haralambous, K. & Loizidou, M. (2005). Demonstration plasma gasification/vitrification system for effective hazardous waste treatment. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 123 120–126.
52. Munoz, C., Van Gerpen, J., & He, B. (2012). *Production of Renewable Diesel Fuel* (No. KLK766).
53. NGVA Europe: Report of activities. (n.d.). *Natural & bio Gas Vehicle Association*.
www.ngvaeurope.eu/members/2012_Report_of_activities.pdf
54. OECD (2013), *Taxing Energy Use: A Graphical Analysis*, OECD Publishing.
doi: [10.1787/9789264183933-en](https://doi.org/10.1787/9789264183933-en)
55. Production of Bio-methanol: Technology Brief. (n.d.). IRENA. Retrieved July 14, 2013, from
www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA-ETSAP%20Tech%20Brief%20108%20Production_of_Bio-methanol.pdf
56. Production of methanol for use as a biofuel in Europe. (n.d.). *European Biofuels Technology Platform*. Retrieved July 8, 2013, from <http://www.biofuelstp.eu/methanol.html>
57. Renewable fuels policy. (n.d.). *Ford Motor Company*. <http://corporate.ford.com/microsites/sustainability-report-2011-12/environment-climate-policy-renewable>
58. Review of Technologies for Gasification of Biomass and Wastes Final report (NNFCC project 09/008). (2009, June 1). *Ecolateral*. Retrieved June 30, 2013, from <http://www.ecolateral.org/gasificationnnfcc090609.pdf>
59. SMP (2004) *Mobility 2030: Meeting the challenges to sustainability*, Sustainable Mobility Project, World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)
<http://www.michelinman.com/mediabin/Approved/Michelin/Visuals/Digital/Mobility2030-Overview.pdf>
60. Summary - Initiative for natural gas-based mobility. (n.d.). *Initiative Erdgasmobilität*.
<http://www.erdgasmobilitaet.info/en/aims-and-content.html>
61. Sun, Y., & Cheng, J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource technology*, 83(1), 1-11.
62. Volvo Trucks to begin limited production of DME heavy-duty trucks in NA in 2015; customer trials; Oberon partnership. (2013, June 7). *Green Car Congress*. Retrieved July 7, 2013, from
<http://www.greencarcongress.com/2013/06/dme-20130607.html>
63. Volvo Trucks to Commercialize DME-Powered Vehicles for North America. (2013, June 7). *Volvo Group*. Retrieved July 7, 2013, from <http://www.volvogroup.com/group/global/en-gb/layouts/CWP.Internet.VolvoCom/NewsItem.aspx?News.ItemId=143286&News.Language=en-gb>
64. Wan, C., Zhou, Q., Fu, G., & Li, Y. (2011). Semi-continuous anaerobic co-digestion of thickened waste activated sludge and fat, oil and grease. *Waste management*, 31(8), 1752-1758.
65. Wright, M. M., Satrio, J. A., Brown, R. C., Daugaard, D. E., & Hsu, D. D. (2010, November 1). Techno-Economic Analysis of Biomass Fast Pyrolysis to Transportation Fuels. *NREL*. Retrieved May 2, 2013, from
www.nrel.gov/docs/fy11osti/46586.pdf
66. Zhang, Q., Dor, L., Fenigshtein, D., Yang, W. & Blasiak, W. (2011). *Gasification of municipal solid waste in the plasma gasification melting process*. *Applied Energy*.
67. Zwart, R. (2009, September 6). Gas cleaning downstream biomass gasification – status report 2009. *ECN*. Retrieved June 30, 2013, from www.ecn.nl/docs/library/report/2008/e08078.pdf

68. אשור בן ארי נ. 2012. *הפקת אנרגיה מפסולת*. המשרד להגנת הסביבה.

http://www.sviva.gov.il/subjectsEnv/Waste/Policy/Documents/waste_energy.pdf

שילוב תחליפי נפט מבוססי פסולת במערך התחבורה בישראל
עבור המנהלת לקידום תחליפי נפט במשרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים
שלב א': סקר ספרות

69. בר זיו, ע. קורטיני, י. 2010, "סקר ובחינה של טיפול תרמי בפסולת עירונית מוצקה והשוואת חלופות לטיפול תרמי בצמיגים",
http://www.sviva.gov.il/Enviroment/bin/en.jsp?enPage=BlankPage&enDisplay=view&enDispWhat=object&&enDispWho=mechkarim^I371&enZone=pirsum_Mechkarim&enVersion=0
70. "הנחיות בנושא זיהום אוויר למתקנים השורפים פסולת", המשרד להגנת הסביבה, 2009.
http://www.sviva.gov.il/subjectsEnv/SvivaAir/Documents/waste_burning_instructions.pdf
71. "טיפול תרמי בפסולת עירונית- מסמך רקעי". חברת DHV עבור המשרד להגנת הסביבה, 2005.
<http://www.dhvmed.com/DHV/Templates/showpage.asp?DBID=1&LNGID=2&TMID=327siD=385>
72. "מדיניות משרד התשתיות הלאומיות לשילוב אנרגיות מתחדשות במערך ייצוא החשמל בישראל". משרד התשתיות הלאומיות, 2010.
<http://energy.gov.il/GxmsMniPublications/renewables.pdf>
73. "מסמך מדיניות הפקת אנרגיה מפסולת (על פי החלטת הממשלה מס. 3484 מיום 17.7.2011 בעניין אנרגיות מתחדשות)". המשרד להגנת הסביבה, 2012.
http://www.sviva.gov.il/subjectsEnv/Waste/Policy/Documents/waste_energy.pdf
74. שילוב טכנולוגיות הפירוק הגזי במערך הטיפול בפסולת בישראל, בדיקת היתכנות כלכלית", גדי רוזנטל, דנה גבאי, הוגש למשרד להגנת הסביבה, אגף כלכלה.
75. שלדג, סקר הרכב פסולת עירונית בישראל, 2005
<http://www.sviva.gov.il/InfoServices/ReservoirInfo/DocLib2/Publications/P0401-P0500/p0423.pdf>

7. נספחים

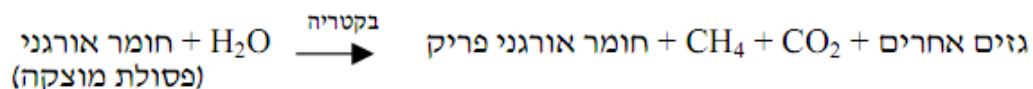
7.1. נספח א - הפקת ביו-גז מפסולת ועיכול אנאירובי

החומרים האורגניים הנוצרים במהלך גידול צמחים ותהליכי ריקבון של פסולת מהווים מקור פוטנציאלי לאנרגיה מתחדשת. בתהליך זה המרכיבים האורגניים מתפרקים ע"י מיקרואורגניזמים בסביבה אנאירובית (מחוסרת חמצן), תוך יצירת תוצרי לוואי שונים, ביניהם תערובת הביו-גז. תערובת זו מכילה בעיקר פחמן דו חמצני ומתאן- גז פחמימני דליק, אשר מקנה לביו-גז יכולת בעירה שניתן להפיק ממנה אנרגיה. תהליך הפקת ביו-גז מפסולת אינו נכלל במשפחת הטיפול התרמי בפסולת.

את הפקת הביו-גז מהפסולת ניתן לבצע הן אחרי הטמנת הפסולת והן כטיפול/סילוק של הפסולת האורגנית, על מנת להימנע מהטמנה. במקרה של הטמנת הפסולת, "מסופקת" לפסולת האורגנית סביבה אנאירובית בה מתרחש תהליך עיכול ופירוק הפסולת, מתחת לאדמה. כתוצאה מכך הגז המיוצר נפלט לסביבה מבעד לקרקע ונוצרים מפגעים סביבתיים רבים מפאת תכונותיו המזהמות של מרכיביו השונים של הביו-גז ומפאת היות גז המתאן (המרכיב העיקרי בביו-גז) אחד הגורמים הראשיים לאפקט החממה, שכן נזקו של טון גז מתאן שקול לנזק הנגרם מ- 21 טון CO₂. לעומת זאת כאשר מתבצע איסוף מבוקר של הביו-גז, ניתן למנוע את השלכותיו השליליות על הסביבה ולהשתמש בתכונת גז המתאן כגז דליק על מנת להפיק ממנו חשמל.

השבה לאנרגיה של ביו-גז מפסולת מתרחשת בעיקר בשלושה תהליכים:

- השבה לאנרגיה של גזי מטמנות- השימוש בביו-גז הנפלט ממטמנות הינו פיתרון Ex Post (לאחר מעשה) יעיל לפסולת שכבר הוטמנה. לא נרחיב את הכתוב על תהליך זה שכן הוא אינו מהווה פיתרון עצמאי לסילוק פסולת.
- הפקת חשמל מביו-גז במטש"ים- מכוני טיהור שפכים מבצעים השבת האנרגיה כתוצאה מתהליך העיכול האנאירובי כחלק מחובות הטיפול בשפכים. בין אם ייצרו חשמל ובין אם לאו, המכוניים מחויבים באיסוף המתאן והטיפול בו. גם ביחס אליו, לא נרחיב את הכתוב על הליך זה שכן אינו במסגרת פתרונות הטיפול בפסולת עירונית מוצקה.
- מתקני עיכול אנאירובי- עיכול מבוקר של הזרם האורגני בפסולת ושימוש בביו-גז להפקת אנרגיה. כמו כן נוצר בתהליך קומפוסט העשוי לשמש דשן חקלאי. המתאן המתקבל יכול לשמש כדלק ביולוגי למנועי שריפה ליצירת קיטור להפקת חשמל. כמו כן המתאן יכול להיות מומר למתנול לשימוש כדלק נוזלי לשימוש ישיר של טורבינות ומנועים. הנוסחה הכימית הכללית לפירוק אנאירובי של הפסולת המוצקה ניתנת להצגה באופן הבא:



7.2. נספח ב - רשימה של מתקני טכנולוגיות פירוק גזי שפועלים כיום

(מקור: בר-זיו, קוריטני 2010)

Table 6.1: Thermochemical technologies for MSW conversion

#	Company and contact information	Technology	Plant status	Began operation	MSW capacity, tpd
1	AdaptiveARC, Inc. 6205 Engle Way, #J Gilroy CA 95020 Voice 858-704-0508 Fax 760-436-0666 http://www.adaptiveARC.com/	Arc-Plasma Gasification	No commercial or pilot projects	N/A	N/A
2	AlterNRG and Westinghouse Plasma Corporation (WPC) 700, 910 - 7 Avenue SW Calgary, Alberta T2P 3N8 Telephone: 403.806.3875 Fax: 403.806.3721 Email: info@alternrg.ca http://www.alternrg.ca/ http://www.westinghouse-plasma.com/	Plasma gasification	See below	See below	See below
2a	AlterNRG and Westinghouse Plasma Corporation (WPC) Mihama-Mikata WTE plant http://alternrg.com/project_development/commercial_projects/mihama-mikata	Plasma gasification	commercial	2002	20 tpd of MSW and 4 tpd of waste water sludge
2b	AlterNRG and Westinghouse Plasma Corporation (WPC) Eco-Valley, Utashinai, Hokkaido http://alternrg.com/project_development/commercial_projects/utashinai	Plasma gasification	commercial	2003	180 tonnes-per-day of MSW and auto shredder (ASR) residue
3	EBARA http://www.ebara.ch/ Thurgauerstrasse 40 CH-8050 Zurich Tel. +41 44 307 35 20 Fax +41 44 307 35 26 contact@ebara.ch	Fluidized bed gasification and ash melting	See below	See below	See below
3a	EBARA - Kawaguchi, Japan http://www.ebara.ch/en/twinrec.php?n=1	Fluidized bed gasification and ash melting	commercial	2002	3x140 tpd
3b	EBARA - Nagareyama, Japan http://www.ebara.ch/en/twinrec.php?n=1	Fluidized bed gasification and ash melting	commercial	2004	3x69 tpd
3c	EBARA - Ube City, Japan http://www.ebara.ch/en/twinrec.php?n=1	Fluidized bed gasification and ash melting	commercial	2002	3x66 tpd
3d	EBARA - Sakata Area, Japan http://www.ebara.ch/en/twinrec.php?n=1	Fluidized bed gasification and ash melting	commercial	2002	2x98 tpd

שילוב תחליפי נפט מבוססי פסולת במערך התחבורה בישראל
 עבור המנהלת לקידום תחליפי נפט במשרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים
 שלב א': סקר ספרות

3e	EBARA - Chuno Union, Japan http://www.ebara.ch/en/twinrec.php?n=1	Fluidized bed gasification and ash melting	commercial	2003	3x56 tpd
3f	EBARA - Minami-Shinshu, Japan http://www.ebara.ch/en/twinrec.php?n=1	Fluidized bed gasification and ash melting	commercial	2003	2x46.5 tpd
3g	EBARA – Hino City, Japan http://www.ebara.ch/en/twinrec.php?n=1	Fluidized bed gasification and ash melting	commercial	2007	3x60 tpd
3h	EBARA – Sodegaura R&D Lab, Japan http://www.ebara.ch/downloads/ICFG_Overview.pdf	ICFG (Internally Circulating Fluidized-bed Gasifier)	Pilot plant	2004	15 tpd
4	Eco Waste Solutions 14-5195 Harvester Road Burlington, Ontario L7L 6E9 Canada Phone: 905.634.7022 Fax: 905.634.0831 Email: info@ecosolutions.com http://www.ecosolutions.com/	gasification	See below	See below	See below
4a	Eco Waste Solutions Wemindji, Quebec Canada http://www.ecosolutions.com/index.php/scr/en/remote_communities	Gasification	commercial	2003	3
4b	Eco Waste Solutions City of Skagway, Alaska http://www.ecosolutions.com/index.php/scr/en/remote_communities	Gasification	commercial	1998	8
5	Enerkem / Enerkem GreenField Alberta Biofuels (EGAB) 615 René-Lévesque Blvd West, Suite 820 Montréal QC H3B 1P5 Canada Telephone: 514-875-0284 Fax: 514-875-0835 enerkem@enerkem.com http://www.enerkem.com/index.php?module=CMS	gasification	See below	See below	See below
5a	Edmonton http://www.enerkem.com/index.php?module=CMS&id=22&newlang=eng	gasification	construction	Scheduled for the end of 2009	100,000 tpy
5b	Sherbrooke, Québec http://www.enerkem.com/index.php?module=CMS&id=10&newlang=eng	gasification	Pilot	2003	N/A
6	Envirotherm GMBH SVZ, Germany Hansjobst Hirschfelder	gasification	commercial	2001	275,000 tpy

שילוב תחליפי נפט מבוססי פסולת במערך התחבורה בישראל
 עבור המנהלת לקידום תחליפי נפט במשרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים
 שלב א': סקר ספרות

	Phone: +49 201 6346 604 Fax: +49-201-6346-908 E-Mail: hansjobst_hirschfelder@envirotherm.de http://envirotherm.de/content/index_eng.html				
7	Foster Wheeler Energia Oy Metsänneidonkuja 8 FI-02130 Espoo, Finland Phone: +358-10-393-11 Fax: +358-10-393-6162 http://www.fwc.com/ http://www.fwc.com/publications/pdf/GasificationBrochure.pdf?DIRNAME=%23dirName%23 http://www.fwc.com/publications/tech_papers/files/TP_PC_05_05.pdf?DIRNAME=%23dirName%23 http://www.fwc.com/publications/pdf/FactSheets/CFB_Factsheet_111009_CML.pdf	gasification	Pilot for RDF	N/A	250,000-300,000 tpy
8	Hitachi Zosen 7-89, Nanko-kita 1-chome, Suminoe-ku, Osaka 559-8559, Japan Phone: +81-6-6569-0001 Facsimile: +81-6-6569-0002 environment_plant@hitachizosen.co.jp http://www.hitachizosen.co.jp/english/product/plant/heat.html	gasification	See below	See below	See below
8a	Kagawa, Japan	gasification	commercial	2004	300
8b	Ishikawa, Japan	gasification	commercial	2003	160
8c	Nara, Japan	gasification	commercial	2001	150
8d	Nagasaki, Japan	gasification	commercial	2003	58
8e	Gifu, Japan	gasification	commercial	1998	33
9	IES – International Environmental Solutions 25685 Sherman Road Romoland CA 92585 Phone: (951) 928-5671 Fax: (951) 928-5672 Email: contact@wastetopower.com http://www.wastetopower.com/index.htm	pyrolysis	No commercial or pilot projects	N/A	N/A
10	Mitsui Babcock Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. (MES) 4-6, Nishikasai 8-chome, Edogawa-ku, Tokyo 134-0088 Japan	Pyrolysis gasification	See below	See below	See below

שילוב תחליפי נפט מבוססי פסולת במערך התחבורה בישראל
 עבור המנהלת לקידום תחליפי נפט במשרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים
 שלב א': סקר ספרות

	TEL +81-3-3675-6748 FAX +81-3-3675-7098 http://www.mes.co.jp				
10a	Toyohashi City, Japan http://www.mes.co.jp/english/companv/pdf/02envreport_e.pdf (pg 13)	Pyrolysis gasification	commercial	2002	400 tpd
10b	Mitsui Babcock Yame Seibu, Japan http://www.mes.co.jp/english/companv/pdf/02envreport_e.pdf (pg 13) and http://www.gcc.jp/JSIM_DATA/WASTE/WASTE_3/html/Doc_436.html	pyrolysis	commercial	2000	220
10c	Mitsui Babcock Nishi Ihuri, Japan http://www.mes.co.jp/english/companv/pdf/03envreport_e.pdf (pg 8)	pyrolysis	commercial	2003	2x115 tpd 63 tpd bulky waste facility
10d	Mitsui Babcock Koga Seibu, Japan	pyrolysis	commercial	2003	2x143 tpd No bulky waste facility
10e	Mitsui Babcock Kyouhoku, Japan	pyrolysis	commercial	2003	2x88 tpd No bulky waste facility
10f	Mitsui Babcock Ebetsu City, Japan	pyrolysis	commercial	2002	2x77 tpd 38 tpd bulky waste facility
11	Nippon Steel Engineering Co., Ltd. Environmental Affairs Division Nippon Steel Corporation 6-3, Otemachi 2-chome, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8071, Japan Phone: +81-3-3275-5145 Fax: +81-3-3275-5979 E-mail: kankyo@nsc.co.jp http://www.nsc.co.jp/en/index.html	gasification	commercial	1979	35 systems in Japan and overseas
11a	Nippon Steel Okazaki City, Aichi Prefecture	gasification	commercial	July 2011	380
11b	Nippon Steel Matsue City, Shimane Prefecture	gasification	commercial	April 2010	255
11c	Nippon Steel Ibaraki, japan	gasification	commercial	1980	500
11d	Nippon Steel Akita, japan	gasification	commercial	2002	440
11e	Nippon Steel Oita, japan	gasification	commercial	2003	428
11f	Nippon Steel Ibaraki #2, japan	gasification	commercial	1996	332

שילוב תחליפי נפט מבוססי פסולת במערך התחבורה בישראל
 עבור המנהלת לקידום תחליפי נפט במשרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים
 שלב א': סקר ספרות

11g	Nippon Steel Narashino City, japan	gasification	commercial	2002	222
11h	Nippon Steel Itoshima-Kumiai, japan	gasification	commercial	2000	220
11i	Nippon Steel Kazusa, japan	gasification	commercial	2002	220
11j	Nippon Steel Kagawatobu-Kumiai, japan	gasification	commercial	1997	216
11k	Nippon Steel Lizuka, japan	gasification	commercial	1998	198
11l	Nippon Steel Tajimi City, japan	gasification	commercial	2003	188
11m	Nippon Steel Genkai Envir. Union, japan	gasification	commercial	2003	176
11n	Nippon Steel Iabarki #3, japan	gasification	commercial	1999	166
11o	Nippon Steel Kocki West Envir., japan	gasification	commercial	2002	154
11p	Nippon Steel Toyokama union, japan	gasification	commercial	2003	144
11q	Nippon Steel Iryu-Kumiai, Japan	gasification	commercial	1997	132
11r	Nippon Steel Maki-machi-kumiai, Japan	gasification	commercial	2002	132
11s	Nippon Steel Kamaishi, Japan	gasification	commercial	1979	110
11t	Nippon Steel Takizawa, Japan	gasification	commercial	2002	110
11u	Nippon Steel Seino Waste, Japan	gasification	commercial	2004	99
11v	Nippon Steel Kameyama, Japan	gasification	commercial	2000	88
12	Plasco Energy Group 1000 Innovation Drive, Suite 400 Ottawa, ON K2K 3E7 Phone 613-591-9438 http://www.plascoeenergygroup.com/	gasification	commercial scale demonstrati on plant	2007	100
12a	Trail Road landfill, Ottawa, Canada http://www.zerowasteottawa.com/en/About-Project/	gasification	Demonstrati on plant	2006	85
	The Solena Group The Ronald Regan Building and International Trade Center 1300 Pennsylvania Avenue NW, Suite G- 0003 Washington, DC 20004, USA T: +1 202 682 2405	Plasma arc			

6

שילוב תחליפי נפט מבוססי פסולת במערך התחבורה בישראל
 עבור המנהלת לקידום תחליפי נפט במשרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים
 שלב א': סקר ספרות

	F: +1 202 682 1843 http://www.solenagroup.com/				
13	Sun Energy Facility (Sun Energy Group) 650 Poydras Street, Suite 2525 New Orleans, LA 70130 504.274.1940 stephanie@sunenergygrp.com http://www.sunenergygrp.com/about.shtml	Plasma gasification	Under construction	2011	4,000
14	Siemens AG Wittelsbacherplatz 2 80333 Munich Germany +49 (69) 797 6660 Email: contact@siemens.com http://w1.siemens.com/entr/ce/en/ http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-generation/fuel-gasifier/ Linköping, Sweden http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/energy-topics/pdfs/en/industrial%20applications/3_Enhanced_power_and_heat.pdf	gasification	commercial	1994	230000 tpy
15	Takuma Takuma Bldg., 2-2-33 Kinrakuji-cho, Amagasaki, Hyogo 660-0806, Japan TEL : 06-6487-4820 FAX : 06-6487-4829 URL : http://www.takuma.co.jp/english/ http://www.takuma.co.jp/english/csr/environmental-report/2006/2006-03-e.pdf	pyrolysis	See below	See below	See below
15a	Kokubu, Japan http://www.takuma.co.jp/english/gijutu/gihou/e-12-1.html	pyrolysis	commercial	2003	2x89 tpd
15b	Oshima, Hokkaido Is., Japan http://www.takuma.co.jp/english/gijutu/gihou/e-12-1.html	pyrolysis	commercial	N/A	2x66 tpd
16	TechTrade GmbH Venloer Straße 241-245 D – 50823 Cologne Phone +49 221 / 71508 – 60 Fax +49 221 / 71508 – 70 Email mail@techtrade.de Internet www.techtrade.de	Pyrolysis	See below	See below	See below
16a	RWE-Contherm-Plant in Hamm (Germany) http://www.techtrade.de/index.html	pyrolysis	commercial	2002	100,000 tpy
16b	Waste Pyrolysis Plant Burgau – Germany http://www.techtrade.de/index.html	pyrolysis	commercial	1985	36,000 tpy
17	Thermoselect/JFE Engineering JFE Steel Cooperation 2-2-3 Uchisaiwaicho, Chiyoda-ku, Tokyo http://www.jfe-steel.co.jp/en/index.html Plan and process description:	pyrolysis	See below	See below	See below



שילוב תחליפי נפט מבוססי פסולת במערך התחבורה בישראל
 עבור המנהלת לקידום תחליפי נפט במשרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים
 שלב א': סקר ספרות

	http://www.iwtonline.com/docs/Thermoselect_process_description.pdf				
17a	Chiba Recycling Center	pyrolysis	commercial	2000	2x150 tpd
17b	Thermoselect/JFE Engineering Mizushima Eco-Works Corp. (Okayama Pref.)	pyrolysis	commercial	2005 scheduled	555
17c	Thermoselect/JFE Engineering Kenoukennan Regional Environmental Association (Nagasaki Pref.)	pyrolysis	commercial	2005 scheduled	300
17d	Thermoselect/JFE Engineering Cyuoukouiki Environmental Facility Association (Tokushima Pref.)	pyrolysis	commercial	2005 scheduled	120
17e	Thermoselect/JFE Karlsruhe, Germany	Gasification	commercial	2001 Closed in March 2004 (Anonymous 2004b)	792
17f	Thermoselect/JFE Mutsu, Japan Locarno, Switzerland	Gasification pyrolysis	commercial	2003	140
18	Thide Environnement 19bis avenue Duguay-Trouin - 78960 Voisins-le-Bretonneux, France Tel: 01.39.30.94.50 info@thide.com http://www.thide.com/uk/	Pyrolysis	See below	See below	See below
18a	ARTHELYSE® the thermolysis plant of the Syndicat Mixte Artois Valorisation (SMAV) at Saint Laurent Blangy à near Arras (Pas de Calais) http://www.thide.com/thermolysse/produire/	pyrolysis	Commercial	N/A	50,000 tpy
18b	Thide/Hitachi Izumo, Japan http://www.thide.com/uk/divers/contact/	pyrolysis	commercial	2003	70,000 tpy
18c	Thide/Hitachi Itoigawa, Japan http://www.thide.com/uk/divers/contact/	pyrolysis	commercial	2002	25,000 tpy
18d	Thide/Hitachi Nakaminato, Japan http://www.thide.com/uk/divers/contact/	Pyrolysis	demonstration	N/A	10,000 tpy
19	TPS Termiska Processer AB Nyköping Box 624, 611 10 NYKÖPING, Sweden Tel: +46-(0)8-53 52 46 00 Fax: +46-(0)155-26 30 52 info@tps.se http://www.tps.se/(S(0gbieo4500i5bf5euriho3f))/defaultEng.aspx?langID=2	Gasification	N/A	N/A	N/A
20	WasteGen UK www.wastegen.com (internet site didn't work)	Pyrolysis	N/A	N/A	N/A