

דניאל מדר

יועץ מדעי עצמאי, לשעבר עמית
ממשק, ויועץ למדענית הראשית,
המשרד להגנת הסביבה

מאמר זה עבר שיפוט עמיתים

ציטוט מומלץ

מדר ד. 2015. שיפור מערך הפקת
האנרגיה מפסולת אורגנית בישראל.
אקולוגיה וסביבה 6(3): 231–240.



מתקן עיכול אנאירובי להפקת ביו-מתאן מבוצה משופעלת

שיפור מערך הפקת האנרגיה מפסולת אורגנית בישראל

גיליון סתיו 2015 / כרך 6(3) / דלקים חלופיים ואנרגיה 20 באוקטובר, 2015

[חזית המחקר](#)

על קצה המזלג

- בישראל מיוצרות כל שנה כשמונה מיליון טונות פסולת אורגנית.
- מצד אחד, חלק ניכר מפסולת זו הוא מטרד, מפגע או שאינו מטופל בדרך שמקובלת על-ידי כל בעלי העניין. מצד שני, ניתן להפיק מהפסולת תועלת ולהשתמש בה לדישון, להפקת אנרגיה ועוד.
- גופים שונים אחראים על קטגוריות שונות של פסולת אורגנית, עובדה המקשה על ניצול מיטבי של משאב זה תוך צמצום מרבי של המפגעים הנגרמים ממנו.
- מומלץ שגוף ממשלתי אחד ירכז את התחום, יתמקצע בו ויביא לניצול מיטבי של אפשרויות הפקת אנרגיה מפסולת אורגנית.

המערכת

תקציר

בארץ מיוצרים כל שנה כשמונה מיליון טונות פסולת ביומסה (פסולת אורגנית). בשנים האחרונות התקבלו מספר החלטות ממשלה שעסקו בקידום מחקרים בתחום הפקת אנרגיה מפסולת ביומסה, וכן הוקצו מכסות לייצור חשמל מפסולת ביומסה. המשרד להגנת הסביבה מממן מחקרים בתחום, והמטרה העיקרית של תכנית זו היא מציאת דרכי

הפקה כלכלית של אנרגיה לשם מניעת הטמנת פסולת, תוך הפחתה וצמצום של תוצרי לוואי. המאמר סוקר את המחקרים שמומנו עד כה, מעריך את מידת הצלחתם ויישומם, מקשרם למדיניות המשרד, ממליץ על כיווני מחקר עתידיים ועל נקודות לשיפור התחום בארץ.

המסקנה העיקרית מהמחקר היא שקיימת בעיה מובנית בניהול הסוגים השונים של הפסולת האורגנית בארץ, מאחר שהאחריות והטיפול מבוזרים בין המשרד להגנת הסביבה, משרד החקלאות ופיתוח הכפר, רשויות מקומיות וקק"ל. לשם ניהול תקין ומיטבי של תחום הפסולת האורגנית בארץ, מומלץ שגוף ממשלתי אחד ירכז את הנושא בכל המגזרים, ויתכנן תכנית-אב שתביא בחשבון את כל ההיצע והביקוש לתוצרים השונים.

מומלץ למקד את המחקר בתחום הפקת אנרגיה מפסולת ביומסה בטכנולוגיות שמסוגלות לטפל בסוגי פסולת שמיוצרים בהיקף גדול (לפחות 50,000 טונות בשנה), ושניתן להפיק מהם אנרגיה פשוטה או זמינה (כגון חשמל, ביוגז, סינגז). כדי להגיע ליעד הפקת החשמל מפסולת ביומסה שנקבע בהחלטות הממשלה, יש להעדיף הפקת אנרגיה בטכנולוגיות תרמיות (כגון גזיפיקציה) על פני עיכול אנאירובי שמפיק מעט אנרגיה, או להסב מכסות להפקת חשמל מביומסה למכסות להפקת חשמל מאנרגיית שמש. נוסף על כך, יש לבחון מתי עדיף להקים מתקני קצה מקומיים וקטנים על פני מתקנים גדולים ואזוריים.

קע לקולות קוראים למחקרי הפקת אנרגיה מביומסה

בהתאם להחלטות ממשלה מס' 3954 (21.8.2008), 4450 (29.1.2009), 3484 (17.7.2011) ו-5327 (13.1.2013), נקבעו יעדים להפקת 5% חשמל מאנרגיות מתחדשות בארץ בשנת 2015 ו-10% בשנת 2020. נוסף על כך, הוטל על המשרד להגנת הסביבה לקדם ולהזמין מחקרים תשתיתיים ויישומיים בתחום הפקת אנרגיה מביומסה, וכן הוקצו לפחות 210 מ"גה-ואט להפקת אנרגיה מביומסה, מ"גה-ואט ומפסולת, מתוכם לפחות 160 מ"גה-ואט על-ידי ביוגז. כתוצאה מכך, בשנים 2010–2013 פורסמו ארבעה קולות קוראים בתחום, ומומנו 24 מחקרים בהיקף של 8.89 מיליון ₪.

המטרה העיקרית של תכנית מחקר זו היא הפקת כלכלית של אנרגיה לשם מניעת הטמנת פסולת, תוך הפחתה וצמצום של תוצרי לוואי.

עם זאת, המשרד להגנת הסביבה אימץ את היררכיית הפסולת האירופית, שמעניקה עדיפות לשימוש משולב בפסולת לפי הסדר: הפחתה, שימוש חוזר, מחזור, הפקת אנרגיה והטמנה. מדיניות זו מקטינה את כמות הפסולת האורגנית הזמינה להפקת אנרגיה בכחצי [2]. כמו כן, ישנה העדפה למחזור פסולת אורגנית לדשן מוצק מתוצרי הלוואי של העיכול האנאירובי (בעברית: עיכול אל-אווירני), על פני הפקת אנרגיה מרבית מפסולת זו, בשל הרצון להעשיר אדמות חקלאיות בחומר אורגני. העדפה זו מורידה עוד יותר את פוטנציאל האנרגיה של הפסולת האורגנית (ראו בהמשך).

זאמר זה מתמצת דו"ח שסקר את הנושא [8], ומטרתם המשותפת היא לסכם את המחקרים שבוצעו עד כה בתכנית זו, לקשר אותם למדיניות המשרד והממשלה ולהמליץ על כיווני מחקר עתידיים. הדו"ח המקורי כולל את החלטות הממשלה הרלוונטיות, את תקצירי המחקרים וכן טבלה שמסכמת את כל המחקרים.



לפסולת חקלאית אורגנית פוטנציאל גדול להפקת אנרגיה בשל הכמות הרבה שלה | צילום: חדזה שנדרוביץ, מאתר פיקיוויקי (CC BY 2.5)

תובנות מדעיות ופוטנציאל יישום המחקרים

המחקרים חולקו לפי ארבעה סוגי פסולת עיקריים שהניתוח התבצע לפיהם: שפכים מימיים, שמנים ושומנים, פסולת אורגנית עירונית ופסולת אורגנית חקלאית (תוצרי לוואי חקלאיים). ישנם מחקרים שהראו הצלחה רבה: החוקרים הצליחו להפיק את תוצר האנרגיה המבוקש, המחקר מוסחר, ולעתים תוצרי הידע של המחקרים משווקים בארץ ובח"ל. אך יש לשים לב שאם מידת התרומה של מחקרים "מוצלחים" לצמצום כמויות הפסולת האורגנית בישראל נמוכה, אין הם נחשבים מוצלחים לפי

[illegible]

ברחבי הארץ קיימת כמובן מערכת איסוף נרחבת ויעילה של שפכים, ולכן איסוף פסולת זו פשוט יחסית, ואין צורך להשקיע

כסף וזמן בבניית מערך איסוף. למרות היתרונות הגלויים בכך, נלווה לכך גם צד מגביל – שינוי של מערך זה לטובת מערך להפקת אנרגיה, שכאמור אינה רבה, אינו סביר. לכן, על מערכות להפקת אנרגיה להתחבר למערך האיסוף והטיפול הקיים בשפכים, ולא לשאוף לשנות את המערך הקיים.

בוצת השפכים, תוצר אורגני מוצק של שפכים מסוננים, היא המקור היחידי שיכול לשמש להפקת אנרגיה ברמה רצינית בתחום השפכים: 120 אלף טונות בוצה חומר יבש או 600 אלף טונות בוצה רטובה ^[11] (טבלה 2), אך תכנית המחקר לא כוללת תחום זה.

לאחר שקלול כל זאת, ומתוצאות המחקרים עד כה, נראה כי הפוטנציאל הגדול ביותר לקבלת מוצר בעל ערך סביבתי וכלכלי הוא מטכנולוגיות תאי דלק חידקיים שמיצרות חשמל תוך פירוק תרכובות אורגניות ארומטיות רעילות. כאמור, התוצאה לא תהיה חשמל רב, אך לפחות יפורקו תרכובות אורגניות ארומטיות רעילות, שאין להן כיום פתרון אחר. חיסרון בולט של טכנולוגיה זו הוא חוסר הבשלות הטכנולוגית והמרחק הרב יחסית עד ליישומה בפועל (כ-10 שנים).

טבלה 2. כמויות פסולת הביומסה בארץ

מבוסס על איילון ואחרים (2013) ^[2], אשור בן-ארי (2013) ^[4], למ"ס (2014) ^[7], משרד החקלאות ואחרים ^[10] וצדיקוב א ורובין ד (2014) ^[11].

סוג הפסולת	כמות פסולת כוללת (טונות לשנה)	כמות פסולת פנויה ללא שימוש יעיל או חוקי כיום (טונות לשנה)
בוצת מט"שים	600,000 (רטוב) או 120,000 (חומר יבש)	474,000 (רטוב) או 95,000 (חומר יבש)
שמינים ושומנים	100,000–50,000	10,000–5,000
פסולת עירונית	250,000	250,000
	1,750,000	1,750,000
	764,000	300,000
	1,120,000	200,000
פסולת חקלאית	2,840,000	1,456,000
	46,000	40,000
	70,000	70,000
	52,000	0
קק"ל	7,600,000	4,550,000
סך הכול		

טבלה 2

כמויות פסולת הביומסה בארץ

מבוסס על איילון ואחרים (2013) ^[2], אשור בן-ארי (2013) ^[4], למ"ס (2014) ^[7], משרד החקלאות ואחרים ^[10] וצדיקוב ורובין ד (2014) ^[11].

הפקת אנרגיה משמינים ומשומנים

שמינים ושומנים הם חומרים אורגניים בעלי תכולת אנרגיה גבוהה. בתחום הפקת אנרגיה מביומסה, הם משמשים בדרך כלל להפקת ביודזל. כ-250,000 טונות שמיני מאכל נצרכים כל שנה בישראל ^[2]. מתוך כמות זו, 20-40% מושלכת כפסולת (שי מדיוני, חברת פאנדנגו. מידע בע"פ, מאי 2014), כלומר כ-50,000–100,000 טונות בשנה. בדו"ח טכנולוגיות להפקת דלקים מפסולת ^[2] נמסרה הערכה גסה גבוהה יותר של כמות פסולת השמינים למאכל, של 125,000–200,000 טונות בשנה, אך משיחות עם אנשי שטח בתחום נראה כי הכמויות קטנות יותר כאמור. נוסף על כך, יש כ-4,000 טונות פסולת שומן מבתי מטבחיים. בשל מגבלות איסוף ושקיעת שמן בצנרת הביוב ובבוצה, ניתן לאסוף כיום כ-20,000 טונות שמינים ושומנים בלבד בשנה לצורך הפקת ביודזל (טבלה 2). כמות זו שוות ערך לכ-0.7% מצריכת הסולר השנתית בארץ או ל-0.3% מצריכת הדלק לתחבורה ^[1]. חלק מכמות זו ממוחזר כבר כיום למאכל בעלי חיים, ומושב לאנרגיה כביודזל לתעשייה. לכן, הכמות הניתנת לאיסוף כיום לשם ייצור ביודזל לתחבורה אינה מצדיקה השקעות נרחבות. רק אם יהיה ניתן לאסוף לפחות 60,000 טונות שמן משומש בשנה, תתחיל להיות כמות שמצדיקה השקעה נוספת בתחום.

לחילופין, שמינים ושומנים יכולים לעבור עיכול אנאירובי. אמנם הם עלולים לעכב פעילות מעכלים אנאירוביים אם הם מצויים בריכוזים גבוהים מדי, אך במינונים מסוימים ניתן להוסיף אותם אל המעכלים ללא פגיעה בתהליך, ולעתים אף להביא לשיפור הפעילות ^[2].

הפקת אנרגיה מפסולת עירונית

לפסולת עירונית אורגנית פוטנציאל גדול להפקת אנרגיה, בשל הכמות הרבה שלה (2 מיליון טונות בשנה – [טבלה 2](#)). זאת גם הסיבה שלמחקרים בתחום זה פוטנציאל גדול לתרום לצמצום כמות פסולת אורגנית משמעותית. פסולת עירונית נאספת בצורה מסודרת ברוב היישובים בארץ. עדיין אין איסוף יעיל של פסולת אורגנית עירונית ברמה ארצית, מכיוון שפחות מ-20% מבתי האב בישראל מפרידים פסולת אורגנית, אך המספרים במגמת עלייה. המדינה תומכת בהקמת מתקני עיכול אנאירובי לטיפול בכל הפסולת האורגנית העירונית. תוך מספר שנים צפויים להיות בארץ 15 מתקני עיכול אנאירובי אזוריים. מדיניות המשרד להגנת הסביבה היא למקם מתקני עיכול וקומפוסטציה אזוריים במרחק של 30–50 ק"מ ממקורות הפסולת ^[6]. לעומת זאת, בגרמניה הראו כי במקרים רבים משתלם להקים מעכלים אנאירוביים קטנים ומפוזרים על פני שטח פסולת אורגנית אל מעכלים גדולים מרוחקים ^[12, 13], וכי יש לשקלל גם את שינוע הדשן המעוכל אל החקלאים כאשר מחשבים עלות-תועלת של הקמת מעכלים.

מבחינת פוטנציאל הפקת אנרגיה, עיכול אנאירובי אינו יעיל, היות שנותר חומר אורגני לא מנוצל. מ-100 טונות פסולת אורגנית ניתן להפיק ביוגז שווה ערך ל-1 מגה-ואט. בשיטות תרמיות שורפים את חומר הגלם להפקת אנרגיה בצורת חום (מבערה, RDF) או מחממים אותו בהיעדר חמצן עד להפיכתו לדלקים שנחשבים יותר לשימוש, למשל הפיכה לסינגל על-ידי גזיפיקציה (gasification, בעברית – גזון), הפיכה לביו-נפט על-ידי פירוליזה, או קלייה לביו-פחם על-ידי טרפיקציה. בשיטות תרמיות ניתן להפיק פי שלושה יותר אנרגיה לכל טונה לעומת עיכול אנאירובי, וכן מתקבלת כמות קטנה של אפר כתוצר לוואי. עם זאת, התוצר המעוכל של עיכול אנאירובי הוא חומר לדישון ולהשבתת שדות, שמבוקש על-ידי חקלאים (לפחות כל עוד מחירו נמוך). לכן, המשרד להגנת הסביבה מעדיף עיכול אנאירובי (מחזור) מבחינת סדר הטיפול בפסולת (מחזור קודם להשבה לאנרגיה).

גל פי סקירת טכנולוגיות להפקת אנרגיה וחישוב של היתכנות כלכלית ^[14] יש הצדקה כלכלית וסביבתית להפרדת פסולת לזרם רטוב ולזרם יבש מבחינת שימוש בפסולת להפקת אנרגיה. עם זאת, בחישוב לא נכללו עלות מיזם ההפרדה במקור, עלות התפעול של ההפרדה או העלות הכלכלית של הזיהום הנפלט. כלומר, לא הובאו בחשבון הכדאיות והעלויות הכלכליות והסביבתיות של כל מערך הפרדת הפסולת לזרמים, וגם לא נערכה השוואה לחלופות הפקת אנרגיה באפשרויות השונות (עיכול, גזיפיקציה וכו'), אל מול אי-הפרדת פסולת או הפקת אנרגיה ללא הפרדה.

הפקת אנרגיה מפסולת חקלאית

גם לפסולת חקלאית אורגנית פוטנציאל גדול להפקת אנרגיה בשל הכמות הרבה שלה (כ-5 מיליון טונות בשנה, [טבלה 2](#)). פסולת חקלאית מפוזרת על פני כל חלקי הארץ, לרוב ביישובים חקלאיים קטנים. לחלק ניכר (~40%) מהפסולת אין כלל איסוף או טיפול הולם. השתת עלויות הפינוי, הטיפול והשינוע של פסולת אורגנית זו על החקלאים בעייתית, ועבור חלק מהם המשמעות היא פשיטת רגל. השילוב של הפיזור המרחבי הרב של הפסולת החקלאית עם היעדר הטיפול והאיסוף כיום, מקשה מאוד על מתן פתרונות בנושא. ייתכן שעדיף להתמקד בפתרונות מקומיים, ברמת היישוב, להפקת אנרגיה (או בפתרונות אחרים, כגון קומפוסטציה).

נקודה נוספת היא שכיום יש ביקוש רב לפרש (זבל) בעלי חיים לשם זיבול שדות (רוב הפסולת החקלאית). כיום חצי מפרש בעלי החיים אינו מטופל ואינו מועבר לדישון שדות. כמות פרש בעלי החיים שמועברת לדישון שדות היא רק כ-58% מהביקוש. לכן, צפוי כי אם יהיה שיפור בטיפול בפרש בעלי חיים, רובו ילך לכסות את "גירעון" הפרש בשדות, ולא יופנה להפקת אנרגיה (למעט אולי הפניה לייצור ביוגז שממנו יישאר בסוף גם תוצר מעוכל לדישון). בעצם, משרד החקלאות אינו מעוניין לוותר על פרש בעלי חיים לצורך הפקת אנרגיה, מה גם ששימוש בפרש בעלי חיים להפקת ביוגז בעיכול אנאירובי רטוב מותיר את התוצר הסופי (לאחר הפקת הביוגז) עני יחסית, ופחות מבוקש על-ידי חקלאים לזיבול שדות ^[10].

קיימת גם פסולת גזם ביערות קק"ל בהיקף של 70,000 טונות (180,000 קוב) ([טבלה 2](#)) בעשרות אתרים ברחבי הארץ בשנה. ישנה בעיה קשה של שינוע, וכיום הגזם נשאר ביערות (יניב זליג, קק"ל. מידע בע"פ, פברואר 2014). מבחינה טכנולוגית הטיפול דומה לפסולת חקלאית מעוצה.

סיכום משולב של פסולת אורגנית עירונית ופסולת אורגנית חקלאית

לפסולת עירונית ולפסולת חקלאית מאפיינים דומים, ולכן הטכנולוגיות חופפות. עדיף להפיק אנרגיה מפסולת מעוצה יבשה יחסית (גזם עצים) בעזרת טכנולוגיות תרמיות: גזיפיקציה, טרפיקציה ופירוליזה. לרוב מעדיפים כיום להפיק אנרגיה מפסולת לא מעוצה ועשירה יותר במים (פרות, ירקות) בעזרת מעכלים אנאירוביים. טכנולוגיה זו היא גם הבשלה ביותר כיום. בשל תמיכת

המדינה בהקמת מתקני עיכול אנאירובי רצוי לתמוך במחקרים שיאפשרו מיטוב (אופטימיזציה) של מתקנים אלה: הפקה מרבית של ביוגז בזמן הקצר ביותר, עם כמה שפחות השפעה סביבתית שלילית.

טכנולוגיות ביולוגיות וכימיות להפקת ביו-אתנול יתאימו בדרך כלל לסוג ביומסה מסוים. טכנולוגיה לפירוק קש חיטה, למשל, לא תתאים לפירוק קש תירס (הרכב שונה של הצמח משפיע על התגובה הכימית והאנזימטית). לכן, מחקרים שבדקים פעילות בפסולת מסוג מסוים לאו דווקא ישקפו מה קורה בסוג פסולת אחר. זאת אומרת, כדי לאפשר הפיכה יעילה של רוב פסולת הביומסה לביו-אתנול כנראה שיידרשו מחקרים רבים וארוכים שיכסו את רוב סוגי הפסולת, אלא אם כן תימצא דרך שאדישה לסוג הביומסה.

לטווח הבינוני (יישום תוך כחמש שנים), התחום שנראה המבטיח ביותר כרגע מבחינת אנרגיה ומחיר הוא ייצור של ביו-פחם וביו-נפט. שניהם מזהמים פחות לעומת פחם ונפט מינרליים, אבל כנראה שניתן יהיה להשתמש בהם במתקני הפקת האנרגיה הקיימים ולא יהיה צורך לשנות אותם, עובדה שתקל על חדירתם לשוק.

לטווח הארוך (יישום תוך כעשר שנים), ישנו מחקר מעניין שהתחיל ב-2014 בנושא גזיפיקציה במים סופר-קריטיים (מים בלחץ גבוה ובטמפרטורה גבוהה מאוד). בגזיפיקציה, הופכים חומר אורגני לסינגז, שניתן להפכו לדלק נוזלי או לשרפו לחשמל. זו טכנולוגיית הפקת האנרגיה התרמית הנקייה ביותר [3,2]. אחד החסמים בגזיפיקציה הוא הצורך בחומר אורגני יבש לשם ביצוע התגובה. לכן, או שמחממים את החומר האורגני לשם ייבושו – פעולה שמגדילה את עלויות התהליך ומקטינה את היעילות מבחינת האנרגיה – או שהתהליך מוגבל לחומר אורגני יבש. במחקר המדובר תיחקר הפקת סינגז מפסולת אורגנית רטובה ללא צורך בייבושה, בתוך מים סופר-קריטיים.



חדר בקרה במעברה להפקת אנרגיה מפסולת עירונית מוצקה בגרמניה / באדיבות VGB Power Tech GmbH Germany

סוגיות ייחודיות לישראל

יסולות ביומסה בארץ: כמויות ופוטנציאל הפקת האנרגיה

נדמה כי בישראל יש היצע גדול של פסולת אורגנית שעשויה לשמש למחזור או להפקת אנרגיה.

עם זאת, מתוך 7.6 מיליון טונות פסולת ביומסה בשנה, רק כ-4.1 מיליון טונות יכולות לשמש לייצור אנרגיה בעיכול אנאירובי כיום. בשאר הפסולת משתמשים למטרות מוצלחות אחרות, והיא אינה רלוונטית לעיכול אנאירובי (כמו גזם מעוצה) או שבלתי אפשרי לאסוף אותה (כמו פרש פרות במרעה). מתוך כמות זו, נניח כי 80% ישמשו להפקת אנרגיה (במקרה הטוב). אנו מגיעים להיקף ייצור חשמל דרך עיכול אנאירובי של כ-90 מגה-ואט, שהוא נמוך בהרבה ממכסות החשמל להפקת אנרגיה מביומסה (שעמדו עד 2014 על 210 מגה-ואט) או מביוגז (שעמדו עד 2014 על 160 מגה-ואט). יותר מכך, משיחות פנימיות במשרד להגנת הסביבה עולה כי אין תכניות או יכולת להקים מתקני עיכול בהיקף העולה על 70 מגה-ואט.

ניתן יהיה להגדיל כמות זו רק אם יהיה ניתן לשכנע את משרד החקלאות להעביר את רוב או את כל פרש הפרות, שמשמש בחקלאות, דרך עיכול אנאירובי יבש. אך גם אז, הפקת החשמל המרבית בעיכול אנאירובי תעמוד על כ-120 מגה-ואט.

פסולת מעוצה אינה מתאימה לעיכול אנאירובי, אלא יכולה לשמש לייצור קומפוסט או להפקת אנרגיה בשיטות תרמיות. מתוך 1.1 מיליון טונות בשנה של פסולת מעוצה (גזם, עצים, גזמים), כ-620 אלף טונות פנויות כיום לשימוש. מכמות זו ניתן להפיק חשמל דרך גזיפיקציה בהיקף של כ-50 מגה-ואט מותקן.

ו"ח טכנולוגיות להפקת דלקים לתחבורה מפסולת ממליץ שלא להמיר פסולת אורגנית לדלקים לתחבורה ^[2] ממספר סיבות: שילוב של חוסר יעילות בהפקת דלקים לתחבורה מפסולת ביומסה כיום, איבוד אנרגיה רב בדרך, היצע פסולת קטן יחסית בארץ, מדיניות המשרד להגנת הסביבה לצמצום הפסולת, והשקעת כסף רב מדי בתהליכים אלה. כיום עדיף להפיק חשמל או חום ממקורות אנרגיה אלה.

אקלים

ברוב הארץ שורר אקלים מדברי עד ים תיכוני. באקלים הים תיכוני החמים, פסולת אורגנית נוטה להירקב במהרה ולשחרר ריחות וגזי חממה. לכן יש לטפל בה במהירות. באקלים המדברי, החום העז ויובש יכולים לעצור תהליכי ריקבון. ניתן לנצל את השמש המקומית העזה בכל הארץ לחימום סביל של מתקני עיכול אנאירובי תרמופילי, וכך לחסוך באנרגיה.

זיקוד: עיכול אנאירובי רטוב ויבש

הטכנולוגיה הבשלה ביותר כרגע להפקת אנרגיה מביומסה היא עיכול אנאירובי להפקת ביוגז. טכנולוגיה זו מתאימה בעיקר לחומר אורגני שאינו מעוצה, כמו פירות, ירקות, בשר, מוצרי חלב וכו'. ניתן לחלק את העיכול האנאירובי לשתי שיטות עיקריות: רטוב ויבש.

עיכול אנאירובי יבש עדיף באופן מובהק מבחינה סביבתית על פני עיכול אנאירובי רטוב לטיפול בפסולת עירונית אורגנית (ראו [טבלה 3](#)): אין מי תסנין שצריך לטוהר, שטח המתקנים ונפחם קטנים יותר, המתקנים פשוטים יותר וחסניים יותר לתקלות, השקעת האנרגיה נמוכה יותר, צריכת המים קטנה כמעט פי 20, התוצר המעוכל עשיר יותר בחומרים מזינים לחקלאות, וזמן השהייה של הפסולת במתקנים היבשים קטן יותר, וכך מתאפשר טיפול בכמות פסולת רבה יותר בפרק זמן נתון. כמות הביוגז המופקת בדרך כלל דומה בשתי השיטות. גם מבחינה כלכלית יש יותר מקורות שמצביעים כי יבש עדיף על רטוב. ישנם אפילו מחקרים שמראים כי לפרש פרות עדיף עיכול יבש על רטוב ^[25]. רוב מתקני העיכול האנאירובי המוקמים כיום בעולם לטיפול בפסולת עירונית הם מסוג עיכול אנאירובי יבש ^[2, 17]. באירופה 70% מהמתקנים שהוקמו בשנים 2007–2012 היו יבשים, 62% מכל המתקנים הקיימים בשנת 2013 כבר היו יבשים, ואחוז זה נמצא במגמת עלייה ^[17].

טבלה 3. השוואה בין עיכול אנאירובי רטוב ועיכול אנאירובי יבש

הקריטריון	עיכול רטוב	עיכול יבש
פסולת מתאימה [24, 22, 19, 16, 15]	15-8 מוצקים (פרש בעלי חיים נוזלי או הוספת מים וטחינה של פסולת מוצקה יותר)	60-15 מוצקים (פסולת אורגנית מוצקה)
עלות הקמה [26, 23, 13]	450-600 דולר לטונה חומר גלם לשנה	250-530 דולר לטונה חומר גלם לשנה (זול אם יש הפרדה במקור)
עלות תפעול שוטף [27, 26, 24, 23, 13]	20-35 דולר לטונה	פחות מ-20 דולר לטונה
הפקת ביוגז לכמות חומר גלם רטוב [23]	15-25 (קוב לטונה)	60-220 (קוב לטונה)
הפקת ביוגז לכמות חומר גלם יבש [25, 23, 22]	זהה. לעיתים מיוצרים 15% יותר מאשר בעיכול יבש בשל ערבוב טוב יותר	
משך הדגרת חומר אורגני במעכל [27, 15]	18-60 ימים	8-21 ימים (מהיר יותר עד פי שלושה)
שטח מתקן (5.5- מנה "אט") [24, 19]	40 דונם	21 דונם (פי שניים פחות)
צריכת מים [25, 24, 22, 14]	1,000 ליטר מים לטונה חומר	60 ליטר מים לטונה חומר (פי 17 פחות מים)
צריכת אנרגיה [27, 24, 23, 14, 13]	30%-10 מהאנרגיה המיוצרת	20%-5 מהאנרגיה המיוצרת
עלות הכנת הפסולת למעכל (יקר יותר אם אין הפרדה במקור לזרם אורגני) [24]	לא טובה (חייבים להפריד לפני כדי למנוע פגיעה במערכת וביעילות)	טובה (לא חייבים להפריד, אך יכול להוריד את היעילות)
התמודדות עם חומרים זרים (קיימים לרוב בפסולת עירונית מופרדת) [24, 19, 13]	קומפוסט עני יחסית. כמות עצומה של מי תסנין (שפכים בעלי מליחות גבוהה גורמים להמלחת שדות ומי תהום, או לחלופין מצריכים טיפול יקר לפני הזרמה לביוגז, בערך 1 קוב מי תסנין לכל טונה של חומר)	קומפוסט עשיר (כי אין שטיפה של נוטריינטים למי התסנין). אין מי תסנין בכמות שדורשת טיפול.
פרטים נוספים [27, 26, 24, 19]	מתקן מורכב וגדול. הערבוב נעשה בעזרת משאבה פשוטה	מתקן פשוט וקטן יחסית. ניתן להקים מתקן נייד בתוך מכולה. לעיתים מתבצע ערבוב בעזרת מכונות יקרות, אך יש גם דגמים יעילים ללא ערבוב

טבלה 3

השוואה בין עיכול אנאירובי רטוב ועיכול אנאירובי יבש

לפרש פרות נוזלי, שהוא הפסולת האורגנית החקלאית הנפוצה ביותר, מתאים יותר עיכול אנאירובי רטוב. עיכול יבש לפרש פרות נוזלי מצריך ייבוש פעיל של פרש הפרות למצב מוצק, מהלך שהיה גורר הוצאות מיותרות של אנרגיה ותפעול. עם זאת, חלק ניכר מפרש הפרות בארץ אינו נוזלי אלא יבש. זאת משום שברוב הארץ שמונה חודשים בשנה נחשבים יבשים, וכן מאחר שהרפורמה במשק החלב בחקלאות כללה צעדים שגרמו לייבוש נוסף של חלק ניכר מפרש הפרות (למשל, קירוי של סככות הרביצה של הפרות כנגד חדירת גשם).

מתקני העיכול האנאירובי הספורים הקיימים בארץ משתמשים בטכנולוגיית העיכול הרטוב, היות שהיסטורית הם משתמשים בחומר גלם שהוא פרש פרות נוזלי. זו הטכנולוגיה המוכרת בארץ. כמו כן, מכרזי המשרד להגנת הסביבה למתקני עיכול אנאירוביים לא שמו מספיק דגש על ההשפעות הסביבתיות של מתקנים אלה על הסביבה – למשל, לא התייחסו כראוי למפגע מי התסנין או מי הנטל. היות שכך, הגופים שפנו למכרזים יכלו להתעלם מהבעיות הסביבתיות הללו. סיבות אלה ואחרות מטות כיום את הכף לטובת הקמת מתקני עיכול רטובים, שעם מפגעים הסביבתיים ניאלץ להתמודד עוד שנים רבות.



מהמחקר עולה שלטובת ניהול תקין ומיטבי של הסוגים השונים של הפסולת האורגנית בארץ, מומלץ לרכז את הסמכויות הרלוונטיות בגוף ממשלתי אחד | צילום: Mike Steinhoff (CC BY 2.0)

המלצות

מדיניות

החכם המרכזי שמונע את קידום תחום הפקת האנרגיה מפסולת ביומסה הוא העובדה שאין גוף ממשלתי אחד בעל ידע מעמיק בנושא, שמרכז את התחום, מבצע הערכה של כמות פסולת ביומסה ופיוזורה בארץ, מאיץ תהליכים שבטיפול רשויות המדינה, ומתכן מיטב כלכלי וסביבתי של השימוש בפסולת זו. חסם זה מקשה על רשויות מקומיות ואזוריות לתכנן טיפול מתאים בפסולת ביומסה, ולא מאפשר ליזמים להקים מתקנים בשל חוסר ודאות ועומס בירוקרטי. כמו כן, ישנם עיכובים ומניעה של גמלון (up scaling) טכנולוגיות שפותחו במסגרת מו"פ המשרד, והיעדר טיפול או אחידות בטיפול בחלק ניכר מפסולת הביומסה (למשל, לא כל פסולת הביומסה העירונית מופרדת, חלק ניכר מהפסולת החקלאית לא מטופל כלל). לכן, מומלץ שגוף ממשלתי אחד ירכז וינהל את כל תחום פסולת הביומסה בארץ (עירוני, חקלאי, תעשייה, קק"ל, שפכים) ויתכן תכנית-אב שתביא בחשבון את כלל היצע הפסולת והביקושים לתוצרים השונים.

מומלץ להקים מעכלים אנאירוביים יבשים על פני מעכלים אנאירוביים רטובים לפסולת ביומסה מוצקה, ולשקול זאת אף לפרש בעלי חיים מוצק. לנוכח ביזור פסולת הביומסה ברחבי הארץ מומלץ לבחון השקעה בפתרונות בקנה מידה מקומי (ברמת היישוב) לטיפול בפסולת זו.

כדי להתקרב אל יעדי הממשלה להפקת אנרגיות מתחדשות עד 2015 ולעמוד ביעדים עד 2020, יש לייעד כמה מאות אלפי טונות של פסולת אורגנית בשנה להפקת אנרגיה על-ידי גזיפיקציה, להעביר מכסות חשמל לא מנוצלות מתחום הביומסה לאנרגיה מתחדשת אחרת (כמו אנרגיית שמש) או לשלב בין האפשרויות הללו.

מומלץ לאשר שינוע וטיפול משותפים לפסולת אורגנית חקלאית ועירונית במתקני קצה ואליהם כדי למנוע כפילויות של מתקנים ותקציבים, לצמצם את שינוע הפסולת ברחבי הארץ, ולאפשר הקמת מתקנים בעלי היתכנות כלכלית ובעלי אספקה יציבה יותר של חומר גלם.

מחקרים

באופן גורף, מומלץ כי המשרד להגנת הסביבה ישקיע במחקרים שנותנים פתרון לפסולת ביומסה בהיקף של 50 אלף טונות בשנה לפחות, במחקרים בעלי תפוקה סביבתית כפולה: אנרגיה וערך מוסף אחר (כמו פירוק רעלים), במחקרים שמתבססים על תשתיות קיימות, ובמחקרים שמפיקים אנרגיה זמינה ופשוטה (חשמל, ביוגז, סינגז) ולא בכאלה המצריכים עיבודים מסובכים שמייקרים את התהליך ומורידים את ערך האנרגיה שאפשר להפיק מהחומר. יש לבחון דרכים לגמלון טכנולוגיות מוצלחות שמפותחות במז"פ המשרד.



מפסולת מעוצה יבשה יחסית (גזם עצים וחלק מהפסולת העירונית והחקלאית) עדיף להפיק אנרגיה בעזרת טכנולוגיות תרמיות: גזיפיקציה, טרפיקציה ופירוליזה

אחרית דבר

מאז פרסום הדוח המקורי בשנת 2014 יושמו ההמלצות לגבי תמיכה במחקרים בקולות הקוראים שפורסמו בתחום הפקת אנרגיה מביומסה. בשנת 2014 מוצה התקציב למחקרים בתחום, ובסופו של דבר מומנו מחקרים בהיקף של כ-10 מיליון ₪ במשך חמש שנות התכנית.

נוסף על כך, הממשלה אישרה את המלצת הדו"ח באשר להעברת מכסות להפקת חשמל מביומסה שאין סיכוי לנצלן אל תחומי אנרגיות מתחדשות אחרות. באוקטובר 2014 אישרה הממשלה הסטת מכסות חשמל מביומסה בהיקף של 60 מגה-ואט, שתורגמה למכסות חשמל מאנרגיה פוטו-וולטאית (PV) בהיקף של 230 מגה-ואט. הסטה זו היא חלק הארי מהסטה של מספר מכסות חשמל (ההסטות האחרות הן מאנרגיית רוח ומאנרגיה תרמו-סולרית [ניצול אנרגיית שמש להפקת חום, למשל בהנעת טורבינות קיטור]) שהביאו להנפקת מכסת חשמל מאנרגיה פוטו-וולטאית בהיקף של 340 מגה-ואט. הנפקה זו היא הראשונה מאז שנת 2012, והיקפה למעלה מ-50% מהמכסות שניתנו עד כה [5, 9].

מו, כן, במשרדי הממשלה בוחנים בימים אלה את קידום תחום הפקת האנרגיה מפסולת ביומסה מעוצה באמצעות גזיפיקציה.

מקורות

1. אגמון ת. 2011. ניתוח מרווחי המסים והשיווק בשוק הדלק בישראל ובמדינות מערב אירופה.

- הכנסת, מרכז המחקר והמידע.
2. אילון א, ליבס ע, גרינברג י ואחרים. 2013. טכנולוגיות להפקת תחליפי דלקים לתחבורה מפסולת – דו"ח מסכם. המשרד להגנת הסביבה.
3. אילון א, עשצ' ו שטיבלמן ע. 2012. ניתוח עלות-תועלת וניתוח מחזור חיים לבחינת ניצול פסולת פלסטיק בישראל. המרכז לחקר משאבי טבע וסביבה, אוניברסיטת חיפה.
4. אשור בן-ארי נ. 2013. [ניהול חומרים – מהפכת הפסולת בישראל](#). המשרד להגנת הסביבה.
5. גוטמן ל. 2014. הממשלה אישרה רשת ביטחון להקמת מתקני חשמל סולארי ביהודה ושומרון. *כלכליסט*. 22 באוקטובר.
6. זיס ד, סלע ד, בלומנפלד ס ואחרים. 2012. תכנית אב מחוזית לפסולת מעורבת – מחוז צפון. משרד הפנים, המשרד להגנת הסביבה.
7. הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה. 2014. [שנתון סטטיסטי לישראל – שפכים במכוני טיפול](#).
8. מדר ד. 2014. [הפקת אנרגיה מפסולת ביומסה: תקצירי מחקרים ותובנות. המשרד להגנת הסביבה](#).
9. ממשלת ישראל. 2014. החלטת ממשלה מספר 2117 מיום 22.10.2014. יישום יעדי הממשלה לייצור חשמל ממקורות מתחדשים – דיון בעררים על החלטת ועדת השרים לעניין קידום, פיתוח ויישום אנרגיות מתחדשות.
10. משרד החקלאות ופיתוח הכפר, המשרד להגנת הסביבה, התאחדות חקלאי ישראל, מרכז המועצות האזוריות, הלמ"ס. תוצרי הלואי בחקלאות בישראל – מסמך מסכם לקביעת מדיניות (טרם פורסם).
11. צדיקוב א ורובין ד. 2014. [סילוק בוצות מט"שים עירוניים 2013](#). המשרד להגנת הסביבה.
12. שמואלי ל, בסי, באסל ד ואחרים. 2012. סקירת טכנולוגיות להפקת אנרגיה וחישוב דמי כניסה. המשרד להגנת הסביבה.
13. Aikan Technology. [Method comparisons – Anaerobic digestion](#). Viewed 9 Feb 2014.
14. Bioferm Energy Systems. 2009. [Dry Fermentation vs. Wet Fermentation](#). Viewed 9 Feb 2014.
15. Bolzonella D, Pavan P, Mace S, et al. 2006. Dry anaerobic digestion of differently sorted organic municipal solid waste: A full-scale experience. *Water Science and Technology* **53**(8): 23–32.
16. De Baerre L. 2000. Anaerobic digestion of solid waste: State-of-the-art. *Water Science and Technology* **41**(3): 283–290.
17. De Baere L and Mattheeuws B. 2013. Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste in Europe – Status, experience and prospects. In: Thomä-Kozmiesky KJ and Thiel S (Eds). [Waste Management: Vol. 3. Recycling and Recovering](#). (pp. 517–526). TK Verlag.
18. Delzeit R and Kellner U. 2011. How location decisions influence the transport cost of processed and unprocessed bioenergy digestates: The impact of plant size and location on profitability of biogas plants in Germany. Kiel Institute for the World Economy.

19. Harvest- Power of We. [Benefits of Anaerobic Digestion](#). 2012.
20. Kellner U, Delzeit R, and Thiering J. 2011. Digestate treatment: The influence of the location and size of the plant on the cost. *Berichte Uber Landwirtsch.* **89**(1): 38–55.
21. Li Y, Park SY and Zhu J. 2011. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **15**(1): 821–826.
22. Luning L, van Zundert EMH, and Brinkmann AJF. 2003. Comparison of dry and wet digestion for solid waste. *Water Science and Technology* **48**: 15–20.
23. Pytlar Jr T. 2013. [Comparison of anaerobic digestion options: Mixed refuse versus pre-segregated organics processing and wet versus dry systems](#). D&B Engineers and Architects.
24. The Wales Centre of Excellence for Anaerobic Digestion. [Wet & Dry Systems](#). Viewed 9 Feb 2014.
25. Uppal PK, Jain S, and Bhatia R. 2012. Analysis of dry anaerobic digestion of cow dung with respect to wet anaerobic digestion on biogas production. *International Journal of Current Research and Review* **4**(19): 197–201.
26. Waltenberger R and Kirchmayr R. 2013. [Wet and dry anaerobic digestion processes](#). BDI. Jyvaskyla Summerschool.
27. Zero Waste Energy. [Dry Anaerobic Digestion](#). Viewed 9 Feb 2014.