

הפקת פחם פעיל מזבל מרבצים ברפת החלב

עיראפל¹, הלל מלכה¹, אלעד אפל², רון ברטוב³, אושר חן³

¹תחום בקר לחלב, אגף בעלי-חיים, שירות ההדרכה והמקצוע, משרד החקלאות ופיתוח הכפר;
²יזמות סביבתית; ³רפת קבוצת יבנה

דו"ח מסכם למחקר מס' 870-3015-21 של קרן שה"מ

תקציר

הפרה הממוצעת מפרישה בשנה כ-22,000 ק"ג פרש רטוב (צואה וששתן) (מלכה וחוב') ולכן, טיפול ופינוי זבל פרות ושפכי רפת החלב מהווים אתגר תמידי הדורש המון תשומת לב בהתאם לדרישות הסביבתיות. הטיפול בשפכי רפת ופתרון הקצה להם מהווה נטל כבד על הרפת והיה גורם מרכזי בתכנון הרפורמה בענף החלב. גם לאחר השלמת הרפורמה בענף החלב מוצאות רוב הרפתות בארץ קשיים במציאת פתרון סביר לטיפול בשפכיהן, גם אם מדובר בפתרון קצה שאושר במסגרת הרפורמה. פחם פעיל הינו פחם נקי ללא שיירים כימיים, בעל שטח פנים גבוה. במחקר זה, נבחן שיטה חדשה לטיפול בזבל, המתבססת על שריפת הזבל והפיכתו לפחם פעיל, ותכלול בין היתר תהליכי ייבוש, שריפה ללא נוכחות חמצן, שטיפות ותהליכים כימיים לשיפור התוצר. לצורך הניסוי נבנה תנור אבטיפוס בנפח 4 ליטרים בעל שני גופי חימום בהספק כולל של 2200 וואט ויכולת חימום ל-1,000 מעלות צלזיוס. בוצעו תהליכי ייבוש, שריפה, קיטור ושטיפה, שבסיומם נשלחו הבדיקות למעבדה למדידת שטח הפנים של התוצר הסופי שיעיד על איכותו. טיפולי הניסוי היו בטמפרטורות שריפה שונות - 600, 700 ו-800 מעלות צלזיוס ובזמן של בין 60 ל-120 דקות. לא נצפתה השפעה למשך השריפה, צריכת החשמל הגבוהה ביותר נמדדה ב-800 מעלות ושטח הפנים הגדול ביותר היה בעת שריפה שריפת הזבל ב-700 מעלות. תוצאות בדיקות המעבדה הראו כי תוצרי הניסויים אינם איכותיים ביחס לספרות או לחומרי הגלם המופקים בתעשייה והערכים מעט נמוכים. על מנת לממש את הפוטנציאל הסביבתי, הטכנולוגי, והכלכלי הגלום בתהליך, עובד היזם על בניית אבטיפוס חדש בעל יכולות משופרות אשר יאפשרו תהליך יציב ומבוקר בהרבה.

מבוא ותיאור הבעיה

טיפול ופינוי זבל פרות ושפכי רפת החלב מהווים אתגר תמידי הדורש המון תשומת לב בהתאם לדרישות הסביבתיות. כיום, המשרד לאיכות הסביבה מתיר פיזור זבל בשדות רק לאחר טיפול, לרבות קילטור, קומפוסטציה או מתקן עיכול אנאירובי. ע"פ נתונים שפורסמו ע"י המשרד להגנת הסביבה בתחילת הדרך, ולאחרונה נבחנו ונבדקו שוב ע"י מדריכי שה"מ, מפרישה הפרה כ-62 ק"ג (ח"ר) ביום (צואה וששתן), המכילים כ-15% חומר יבש. בשנה מפרישה הפרה כ-22,000 ק"ג פרש רטוב (צואה וששתן). הפרה מפרישה את רוב ההפרשות בזמן האכילה. כתוצאה מכך, כ-65% מכמות הפרש (14,300 ק"ג ח"ר) יהיה זבל "מדרכים" וכ-35% יהיה זבל יבש בשטח הרביצה. מבדיקות שנערכו במעבדה בנווה יער נמצא שאלף ק"ג זבל מדרכים רטוב (80% ח"ר) שווה בקרוב לאחד קוב זבל. מכאן ניתן לומר שהפרה הממוצעת מייצרת כ-14 מ"ק זבל מדרכים רטוב בשנה (מלכה וחוב'). מדובר בכמות אדירה המצריכה השקעת משאבים גדולה ופתרונות יעילים ושימיים.

בתוך כל הכמות הזו, השפכים ברמות רטיבות שונות, מזבל חצרות יבש ועד זבל מדרכים רטוב יותר. הטיפול בשפכי רפת ופתרון הקצה להם מהווה נטל כבד על הרפת והיה גורם מרכזי בתכנון הרפורמה בענף החלב. שפכים אלה גורמים לבעיות רבות במטשי"ם ובמאגרי ההשקיה אליהם הם מגיעים, ולעתים אף גורמים לנזקים ומונעים את השימוש בקולחים להשקיה. גם לאחר השלמת הרפורמה בענף החלב מוצאות רוב הרפתות בארץ קשיים במציאת פתרון סביר לטיפול בשפכיהן, גם אם מדובר בפתרון קצה שאושר במסגרת הרפורמה.

פחם פעיל הינו פחם נקי ללא שיירים כימיים בעל שטח פנים גבוה. מחיר הפחם נקבע על פי תכונותיו הפיזיקליות והכימיות, רמת ניקיון, יכולת ספיחה ושטח הפנים. בסדרת הניסויים נרצה לבדוק מגוון רחב של תוצרים ככל הניתן ע"י שינוי טמפרטורת השריפה, זמני התהליך, הוספה של כימיקלים שונים וייתכנו שינויים נוספים שניתן לבצע. פחם פעיל הינו חומר גלם בעל ביקוש רב בתעשיות הכימיות לרבות סביבה, מזון ומשקאות ופרמצבטיקה ובכלל בתהליכי הפרדה כימיים. קיימות תעשיות עשירות יותר בהם יש ניסיון להכניס שימוש בפחם פעיל בשל שטח הפנים הגדול שלו בעיקר בתחומי המיקרואלקטרוניקה. במחקר זה, נבחן שיטה חדשה לטיפול בזבל, המתבססת על שריפת הזבל והפיכתו לפחם פעיל, ותכלול בין היתר תהליכי ייבוש, שריפה ללא נוכחות חמצן, שטיפות ותהליכים כימיים לשיפור התוצר.

מטרות המחקר

בחינת שיטה חדשה לטיפול בזבל רפתות ברמות רטיבות שונות. מדובר בשריפת חומר רטוב בטמפ' גבוהה הכוללת ייבוש, שריפה ללא נוכחות חמצן, שטיפות ותהליכים כימיים לשיפור התוצר. התועלת הצפויה מהמחקר היא שיטה חדשה לטיפול בזבל כאשר התוצר הסופי הוא פחם פעיל המהווה את הפוטנציאל הכלכלי של התהליך. מדובר בחומר גלם בעל ביקוש רב בתעשיות הכימיות לרבות סביבה, מזון ומשקאות ופרמצבטיקה ובכלל בתהליכי הפרדה כימיים. התוצר המשני הינו אפר אינרטי המכיל מינרלים באיכות גבוהה ויכול להוות דשן איכותי מאוד ללא פוטנציאל פגיעה בקרקע. בנוסף, ייפלטו גזים משריפת חומר המוצא שבהמשך תיבחן האפשרות לעשות בגזים אלו שימוש להפקת אנרגיה והוזלת התהליך.

שיטות וחומרים

לצורך הניסוי תוכנן ונבנה אבטיפוס- תנור שריפה בנפח 4 ליטרים בעל שני גופי חימום בהספק כולל של 2200 וואט, מוט לערבול הדוגמה לצורכי הומוגניות של התהליך, דוד לחימום מים המחובר בצינור נחושת לתא השריפה לצורך שלב השפעול, מערכת חשמלית ממוחשבת עם רכיבי SSR ורגש טמפרטורה לשמירה על טמפרטורה יציבה מרגע ההגעה לטמפרטורה הנדרשת.

דיגום: זבל מרבצים מסככת חולבות עם תכולת חומר יבש של 75%-80% נאסף מפני השטח ועד עומק של 20 ס"מ לצורך ביצוע סדרת בדיקות. הזבל, ששימש כחומר הגלם זהה בכל הטיפולים נשלח למעבדת שירות שדה בנווה יער לבדיקת תכולת חומר יבש ומינרלים, בדגש על פחמן, שיכול להשפיע על כמות תוצר סופי של פחם פעיל מדוגמא נבדקת.

ייבוש: דגימת זבל בנפח 2,000 מ"ל ובמשקל סגולי ממוצע של 0.46 גר"/מ"ל הוכנסה לתנור שחומם מראש ל-105 מעלות צלזיוס לצורך ייבוש ראשוני שנמשך 90 דקות.

שריפה: לאחר הייבוש, עלתה טמפ' התנור לטמפ' שריפה שהיוותה את שלושת טיפולי הניסוי. בניסוי זה תהליכי השריפה בוצעו בטמפרטורות של 600, 700 ו-800 מעלות צלזיוס. השריפה בוצעה ללא נוכחות חמצן באמצעות תא שריפה אינרטי בעל בקרת טמפרטורה ולחות. גופי החימום של התנור מגיעים עד ל-1000 מעלות צלזיוס וצריכת החשמל שלהם היא כ-2200W. עקב השימוש בזבל מדרכים יבש בלבד, תהליך השריפה ערך שעתיים בלבד לכל דוגמא. בכל טמפרטורת שריפה בוצעו 4 חזרות. לפני ואחרי כל אחד מהשלבים הנ"ל תועדו משקל הדוגמא, נפח הדוגמא וצריכת החשמל.

קִיטוֹר (אקטיבציה): לאחר שלב השריפה הורתחו מים בדוד הנלווה וצינור החיבור בין הדוד לתא השריפה חומם בעזרת להביוור להשגת קיטור בכניסה לתא. משך זמן הקיטור נע בין 30-60 דקות. תא השריפה המשיך לשמור על טמפרטורת השריפה בשלב הקיטור. שלב זה אחראי על שפעול האתרים הפעילים, הגדלת שטח הפנים וניקיון של הדוגמא הנבחנת. עם סיום שלב הקיטור הושארה הדוגמה בתוך התנור לקירור עד ליום למחרת.

שטיפה: הדוגמה נשאבה אל מחוץ לתנור והוכנסה לשקית סינון בעלת סריג בצפיפות של 100 מיקרון. השקית הונחה בדלי עם מים רותחים והשטיפה בוצעה תוך כדי בעבוע אוויר ע"י אבן אוורור לאקווריום למשך 30 דקות. לאחר מכן השקית הונחה בדלי עם מים קרים למשך אותו פרק זמן תוך כדי בעבוע אוויר. המשקל הסגולי של הדוגמה לפני ואחרי השטיפה לא השתנה.

בדיקות מעבדה: לאחר סיום כלל התהליכים נשלחו הדוגמאות למעבדה לצורך מדידת שטח הפנים של התוצר באמצעות מכשיר BET (Brunauer, Emmett and Teller), המודד זאת דרך ספיחת חנקן המהווה מדד ליעילות הפחמן הפעיל. הרכבו הכימי של הפחמן הפעיל גם משפיע על יעילות התוצר, אך בעבודה זו לא נבדק.

תוצאות

בבדיקות המעבדה של זבל המרבצים נמצאה תכולת חומר יבש של 81.7% ו-תכולת פחמן של 29.5% על בסיס חומר יבש.

צריכת חשמל: בכל הרצה נמדדה צריכת החשמל של התנור בעת ייבוש ושריפת הדוגמאות. עבור טמפרטורת שריפה של 600, 700 ו-800 מעלות נמדדו צריכות חשמל של 3.5, 4.4 ו-5.7 קוט"ש בהתאמה. באופן טבעי צריכת החשמל עלתה ככל שטמפ' השריפה הייתה גבוהה יותר היות ומשך זמן העבודה היה זהה בכל הטיפולים ובכל החזרות.

טבלה 1. משקל הדוגמאות בתחילת הבדיקה, לאחר שריפה ושטיפה ואחוז התוצר הסופי ממשקל ההתחלה

מספר דוגמא	טמפ' שריפה (C°)	משקל התחלתי (גר')	משקל לאחר שריפה (גר')	% תוצר לאחר שריפה מתוך משקל התחלה
1	600	920	312	33.9%
2	600	920	325	35.3%
3	600	930	317	34%
4	600	980	341	34.8%
5	700	980	344	35.1%
6	700	800	289	36.1%
7	700	1000	360	36%
8	700	850	306	36%
9	800	950	300	31.5%
10	800	900	290	32.2%
11	800	950	318	33.4%
12	800	880	280	31.8%

אחוז התוצר הסופי לאחר השריפה ממשקל ההתחלה של כל דוגמא נע בין 31.5% ל-36% כאשר הערכים יורדים ככל שטמפ' השריפה עלתה (טבלה 1). אחד הגורמים העשויים להשפיע על אחוז התוצר הסופי הוא תכולת הפחמן בחומר הגלם שעמדה על 29.5% על בסיס חומר יבש. חשוב לציין כי לא בוצעה בדיקת יסודות לפחמן ולא ידוע ריכוז הפחמן בתוצר הסופי אך ככלל, פחמן הוא היסוד הכימי העיקרי בפחם פעיל, ולכן סביר להניח שריכוזו גבוה.

לצורך מדידה של שטח הפנים של התוצר נשלחו דוגמאות לבדיקה במכשיר BET. התוצאות מלמדות כי הטמפרטורה בה נוצר שטח הפנים הגדול ביותר היא של 700 מעלות צלזיוס (טבלה 2, דוגמא 5). משך זמן השריפה לא הראה השפעה חזקה על שטח הפנים מעבר לזמן שריפה של 90 דקות. השפעתה של רמת הלחות בכניסה לשלב השריפה אחרי שלב הייבוש אינה ניתנת לכימות.

טבלה 2. טמפרטורת שריפה (C°) ושטח הפנים (מ"ר/גרם) של כל דוגמא.

דוגמא	טמפ' שריפה (C°)	זמן שריפה (דקות)	שטח פנים (מ"ר/גרם)
1	600	60	42.2
2	600	120	88.2
3	600	180	80.2
4	600	180	46.0
5	700	120	134.5
6	700	90	45.3
7	700	120	37.9
8	700	90	34.7
9	800	120	46.2
10	800	120	39.0
11	800	120	64.0
12	800	120	108.2

דין ומסקנות

בניסוי הנ"ל נעשה ניסיון להפקה של פחם פעיל מזבל מרבצים. פחם פעיל הינו חומר גלם בעל ביקוש רב בתעשיות כימיות רבות, מזון ומשקאות, טיפול בשפכים ובאוויר מזוהם, פרמצבטיקה ועוד. מן התוצאות, הן המעבדתיות והן מהערכה איכותית של תוצרי הניסויים, ניתן להסיק כי היתכנותו של התהליך אכן קיימת ויש צורך בביצוע מחקר המשך בעזרת אבטיפוס איכותי ובעל יכולות מגוונות יותר על מנת לאפיין את התהליך למציאת התנאים הנכונים ביותר להפקת פחם פעיל איכותי בעל שטח פנים גבוה ורמת ניקיון גבוהה. ככלל, תוצאות בדיקות המעבדה הראו כי תוצרי הניסויים אינם איכותיים ביחס לספרות או לחומרי הגלם המופקים בתעשייה. לשם השוואה, שטח הפנים הגבוה ביותר בניסוי זה היה 134.5 מ"ר/גרם לעומת ערכים שמגיעים לקרוב ל-900 מ"ר/גרם (Li et al, 2018). אחת הסיבות היא שבניסוי הנ"ל לא נעשה שימוש בכימיקלים (לרוב שימוש בתמיסות בסיסיות) בשלב השריפה בשילוב קיטור (אקטיבציה) ושלב השטיפה בוצע ע"י שימוש במים בלבד ולא ע"י תמיסות המכילות כימיקלים (לדוגמה כלור). למרות זאת, כמות הפחם הפעיל

שהתקבל (31.5%-36%) תואמת לריכוז הפחמן שהיה בחומר הגלם (29.5%) ולא נמוכה ממנו. האחוז בתוצר הסופי גבוה מתכולת הפחמן בחומר הגלם מהסיבה שישנו אפר בתוצר הסופי פרט לפחמן. תחולת רטיבות, אפילו נמוכה, בתהליך השריפה משפיעה על השריפה עצמה, זמני הייבוש ככל הנראה לא היו מספיקים על מנת לייבש את הדוגמה כראוי לפני שריפה. במהלך סדרת הניסויים נלוו תקלות, לדוגמה, שריפה של רכיבים חשמליים ופעולה לא טובה של מערכת הקיטור שייתכן והיוו השפעה משמעותית על תוצאות הניסויים. על מנת לממש את פוטנציאל הסביבתי, הטכנולוגי, והכלכלי הגלום בתהליך, עובד היזם על בניית אבטיפוס חדש בעל יכולות משופרות אשר יאפשרו תהליך יציב ומבוקר בהרבה.

רשימת ספרות

1. מלכה הלל, לבון יניב, שורק פרץ, עבוד תומא, סמילנסקי עידו, ברנסי אמין ובן יוסף גיל. בדיקה ואבחון טיפולים מקומיים מעשיים וסביבתיים בזבל המדרכים ברפת החלב.
2. מירון יהושע, יוסף אדית, נקבחת משה, זינו אברהם, צוקרמן אפרים וסולומון רן (2010). זבל רפת לא מעובד כתחליף לדישון כימי בגידול שחת חיטה; השפעות על אילוח בעשבייה, יבול המספוא, הרכבו וערכו התזונתי. משק הבקר והחלב.
3. Li. H, Yang. S, Sun. H & Liu. X, (2018). Production of Activated Carbon from Cow Manure for Wastewater Treatment. BioResources 13(2), 3135-3143.

****כל הזכויות שמורות לאלעד אפל, יזם סביבתי.**