



”זבל של אדם אחד הוא האוצר של אדם אחר”

הפקת אנרגיה משריפת פסולת ביתית, ניסוי חקר רמה 2*

דניאל באלק, ירדן אוחנונה ורון קובלנקו, אורט ערד, בהנחיית המורה יעל חורב

כשנרשמנו לתחרות ”יש לנו כימיה” מההתחלה ידענו שאנו רוצים לעשות חקר בנושא משמעותי. כשחשבנו ברצינות על הנושא עלו הרבה רעיונות הקשורים למחזור, ולכן החלטנו לחפש מפעלים או חברות העוסקות בנושא זה על מנת לקבל השראה. כך נתקלנו בעבודתן של ”מטמנות אפעה” - אתר הטמנת הפסולת הגדול ביותר במדינת ישראל. הסיור באתר היה הטריגר לניסוי שביצענו.

על הסיור

קבענו להיפגש עם מר קובי ביטון, מנהל תפעול אתר אפעה. הוא הראה לנו את האתר, הסביר לנו על עבודתו של האתר ועל הפרויקטים הנוכחיים והעתידיים שלהם, כפי שמובא להלן.

אתר זה מקבל 4,000 טון פסולת ביתית כל יום. בסך הכול מועברים לאתר כ-70% מהפסולת בישראל. האתר מטפל בפסולת באמצעות התשתיות הסביבתיות וההנדסיות המתקדמות ביותר, זאת בהתאם לדרישות המשרד להגנת הסביבה ורשויות אחרות. כלל הפסולת מועברת לתאי הטמנה, שבהם האשפה נערמת ומעליה שכבת אדמה על מנת למנוע פליטת גזים לאוויר ועל מנת להקטין ככל האפשר את הפגיעה הנופית. בבסיס הערימה מערכת איטום העשויה משכבת חרסית ומעליה שכבת איטום סינתטית, שאינה מאפשרת לתשטיפי פסולת לחלחל אל תוך הקרקע. בכל תא הטמנה מותקנת מערכת לאיסוף

* ניסוי חקר זה זכה בפרס ראשון בתחרות ”יש לנו כימיה” בשנת תשע”ח

תשטיפי פסולת, העשויה משכבת חצץ ומערכת איסוף והובלת התשטיפים בצנרת פלסטית. התשטיפים נאספים אל מחוץ לתאי ההטמנה ומועברים לבריכות אידוי שבהן הם מטופלים. הטיפול הוא על ידי אידוי המים המהווים את עיקר נפח התשטיף (במצב הנוכחי האידוי אינו מספיק מהיר, ועל כן הם מחפשים דרכים ליעיל את התהליך). המוצקים שוקעים עד שנפח בריכת האידוי מצטמצם, ואז הם מוטמנים באתר. בשתיים ממטמנות האתר מותקנת מערכת לאיסוף הביוגז (מתאן). הגז נאסף מתאי ההטמנה באמצעות מערכות קידוחים החודרים לעומק של כ-20 מ' אל תוך גוף הפסולת. הגז נאסף למערכת מבוססת גנרטורים, אשר משתמשת במתאן השרוף להפקת חשמל, וכך נוצר במפעל חשמל "ירוק" המאפשר לספק חשמל לעיר בינונית בישראל. עודפים של מתאן מועברים אל לפיד אשר שורף אותם. באופן זה המערכת מונעת פליטה של הביוגז אל האוויר. בניסוי נבחן את האנרגיה הנפלטת משריפת חומרים שונים הנזרקים כפסולת. תהליך כזה יאפשר הפקת אנרגיה ממקור מתחדש ויוריד את התלות במקורות אנרגיה בלתי מתחדשים כדוגמת פחם.



אתר הטמנה של פסולת

רקע מדעי

תגובה אקסותרמית היא תגובה כימית שבמהלכה אנרגיה נפלטת לסביבה, להבדיל מתגובה אנדותרמית, שבמהלכה האנרגיה נקלטת מהסביבה. בתגובה אקסותרמית אנתלפיית התגובה היא שלילית.

פחם - הפחם הוא מקור אנרגיה חשוב ועיקרי בעולם כיום, הוא מהווה 30% ממשק האנרגיה העולמי ו-50% ממשק החשמל העולמי. בתגובת שריפה של פחם נפלט לאוויר פחמן דו-חמצני, גז המגביר את ההתחממות הגלובלית. בימינו השימוש העיקרי בפחם הוא להפקת חשמל באמצעות טורבינה המשתמשת בחום המופק ממנו בזמן בעירתו. כמחצית מהחשמל בעולם מופק כיום בתחנות כוח מבוססות-פחם. צריכת הפחם במאתיים השנים האחרונות גדלה פי מאה. כריית פחם היא עבודה מפרכת ובתהליך שריפה של פחם נוצר זיהום רב של חלקיקים נשימתיים. על כן אנו מנסים למצוא לו תחליף מזהם פחות.



חום שריפה של פחם לפי הספרות 393.5 kJ/mol. בניסוי זה נשרוף 4 גרמים. מסה מולרית של 12 גרם למול, כלומר, נשרוף 1/3 מול פחם, והחום הנפלט צפוי להיות 131.2kJ. בניסוי השתמשנו בפחם עץ, בעוד שבתחנות כוח משתמשים בפחם אבן, וזאת משום שזה חומר הגלם שהיה ברשותנו.

אתנול בריכוז 95%: תרכובת אורגנית ממשפחת הכוהליים שנוסחתה: C₂H₅OH. בניסוי שלנו האתנול משמש כחומר בעירה המסייע בהצתת כל החומרים, ונפחו (ומסתו) הוא גורם קבוע בניסוי.



דגני קורנפלקס: תירס הוא צמח ממשפחת הדגניים, המהווה כיום את הגידול החקלאי הנרחב ביותר בעולם. רובו מורכב מעמילן שהוא פולימר המורכב מיחידות חוזרות של גלוקוז. הערך הקלורי של הקורנפלקס, כפי שכתוב על אריזת "קורנפלקס של אלופים" - פתיתי תירס קלויים של "תלמה" הוא: 381 קילו-קלוריות ל-100 גרם. בניסוי שלנו השתמשנו ב-4 גרמים של קורנפלקס, שלפי החישוב מהווה כ-15.24 קילו-קלוריות, השווים ל-63.64 קילו-גאול לארבעה גרם.



בגד 100% כותנה: כותנה היא סיב רך הצומח סביב זרעי צמח הכותנה. סיב זה משמש לרוב לטוויית חוטים ואריגתם לבד רך ו"נושם". כאשר נוקתה הכותנה והוסרו ממנה שעווה וחלבונים, נותר פולימר טבעי של תאית טהורה שממנה מייצרים בדים. תאית היא פולימר המורכב משרשראות ארוכות של מולקולות גלוקוז-בטא. הנוסחה הכימית של תאית היא: $(C_6H_{10}O_5)_n$.

בחרנו בחומר זה מכיוון שבדים קרועים רבים נזרקים לפח ומזהמים את הסביבה. בעזרת ניסוי זה אנו מנסים למצוא ניצול טוב של הבדים במקום להעבירם למטמנות ומזבלות, הכותנה גם משמשת כייצוג לביגוד הנזרק לפח בחקר שלנו.



קלקר: הקלקר, הידוע גם בשם פוליסטירן מוקצף, הוא פולימר של המונומר סטירן שנוסחתו הכימית היא $(C_8H_8)_n$. זהו פחמימן נוזלי שמופק באופן מסחרי מנפט. החומר הזה אינו מתכלה אף פעם, הוא מזהם את הסביבה במטמנות, ועל כן הוא מהווה בעיה סביבתית מהגדולות בעולם. בניסוי בדקנו את האופציה להפיק אנרגיה משריפת קלקר. הקלקר משמש כייצוג לפלסטיקים ולפסולת המלאכותית הנזרקים לפח בחקר שלנו.

חישוב חום שריפה: את האנרגיה הנפלטת (kJ) אנו נחשב על ידי בדיקת הפרש הטמפרטורות בנוזל אשר מהווה חלק מהסביבה של המערכת, לפני ואחרי השריפה, ולאחר מכן על ידי הצבה בנוסחה $Q = mCp\Delta T$
 Q - החום במערכת; m - מסת החומר הנשרף; Cp - קבול חום סגולי של הנוזל (הסביבה) שמקיף את המערכת. (מים - 4.19 $kJ/Kg^\circ C$, ΔT - הפרש הטמפרטורה של הנוזל.)

חישוב חום שריפה של אתנול: חום שריפה של אתנול נוזלי $\Delta H_c = -1370.7 kJ/mol$: בניסוי היה שימוש ב- 13.41 גרם אתנול 95%. מסה מולרית של אתנול: 46 גרם למול.
 נחשב את כמות האנרגיה התאורטית שנפלטה.

חישוב מספר מולי האתנול שנשרפו:

$$13.41g \cdot 0.95 / 46g/mol = 0.277mol$$

$$0.277 \cdot 1370.7 = 379.6 kJ$$

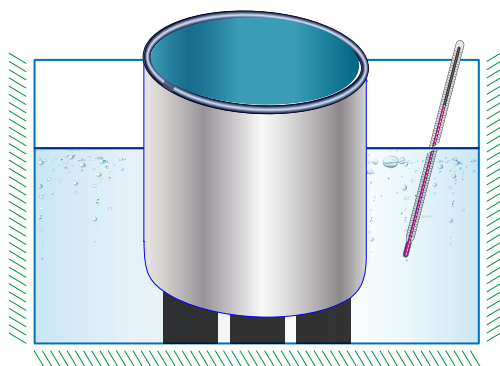
$$Q = 502 \cdot 4.19 \cdot 50 / 1000 = 105.2 kJ$$

קלורימטר: הוא מכשיר מדידה המשמש לביצוע מדידה של חום הנפלט מתגובות כימיות או משינויים פיזיקליים. קלורימטר פשוט מורכב ממדחום המחובר למכל מבודד, ותפקידו למצוא את אנתלפיית השינוי לכל מול של חומר בתגובה בין שני חומרים. מוסיפים את החומרים לתוך הקלורימטר ומודדים את הטמפרטורות לפני ואחרי תום התגובה. כופלים את שינוי הטמפרטורה במסה ובקיבולות חום מסוימות ומקבלים את ערך האנרגיה הנפלטת במהלך התגובה (בהנחה שהתגובה אקסותרמית). מחלקים את שינוי האנרגיה במספר המולים של החומר ומקבלים את אנתלפיית השינוי של התגובה.

נבנה קלורימטר מאולתר כך:



מערכת הניסוי - קלורימטר



איור של מערכת הניסוי

המערכת מכילה:

- מכל מבודד (באיור בצבע ירוק)
- מכל שריפה עשוי מתכת (באיור בצבע אפור)
- מד טמפרטורה
- נוזל (באיור פני הנוזל בכחול)
- משקולות (באיור בצבע שחור)

תיאור המערכת

בתוך מכל מבודד ממוקם מכל שריפה ממתכת שאליו מחוברות משקולות מתכת במטרה למנוע מהמכל לצוף. סביב מכל השריפה יש נפח ריק אשר ממולא בנוזל' ובתוך הנוזל מד טמפרטורה. לתוך מכל השריפה יונס החומר האורגני הנבדק. כתוצאה מהשריפה יפלט חום, חומר המבנה של מכל השריפה יאפשר מעבר חום מיטבי לנוזל. המכל החיצוני מבודד, וכך יימנע איבוד חום לסביבה. מכל השריפה פתוח בשביל לאפשר כניסת חמצן אשר הכרחי לבעירה מלאה. המערכת נבנתה ממכל עשוי אלומיניום שלתחתיתו הודבקו משקולות.

המכל הוכנס לכוס זכוכית אשר סביבה חומר מבודד. מסביב לחומר המבודד הוספנו מעטפת של אלומיניום מטעמי בטיחות (על מנת למנוע התלקחות).



תגובת שריפה בקלורימטר

מהלך החקר

שאלת החקר שבחרנו: כיצד סוג החומר הנשרף משפיע על כמות האנרגיה הנפלטת?

משתנה בלתי תלוי: סוג החומר הנשרף. בחרנו שהגורם הקבוע יהיה מסת החומר על מנת שנוכל להשוות בין חומרים שונים.

משתנה תלוי: כמות האנרגיה הנפלטת (kJ). את האנרגיה הנפלטת נחשב על ידי בדיקת הפרש הטמפרטורות בנוזל לפני ואחרי השריפה, ולאחר מכן על ידי הצבה בנוסחה $Q = mCp\Delta T$.

השערה: אנו משערים כי בכל תהליכי השריפה תיפלט אנרגיה לסביבה. קשה לקבוע איזה חומר יפיק הכי הרבה אנרגיה. ניסינו לחשב לפי אנרגיית קשר אך החישוב מתאים לחומרים גזיים בלבד בגלל שבנוסחה זו לא הובאו בחשבון קשרים בין-מולקולריים. בכל הפסולות שאנו מתכוונים לשרוף ישנם קשרי ואן-דר-וואלס ולכן נוסחה זו לחישוב אינה מתאימה לנו. לפי ידיעתנו, הדרך המקובלת לחשב אנרגיה היא רק בעזרת קלורימטר מקצועי.

חום שריפה של פחם לפי הספרות - 393.5 kJ/mol. בניסוי זה נשרף 4 גרמים. מסה מולרית של 12 גרם למול, כלומר, נשרוף 1/3 מול פחם, והחום הנפלט צפוי להיות 131.2 kJ.

החום הצפוי משריפת קורנפלקס הוא 63.64 קילו ג'אול (כפי שתואר ברקע התאורטי). לכן אנו משערים שהפחם יפלוט יותר אנרגיה. כיום משתמשים בתירס כמקור אנרגיה, ולכן אנו משערים שהקורנפלקס העשוי מתירס יהיה אחד מחומרי הפסולת שמפיקים הכי הרבה אנרגיה.

תכנון הניסוי

ציוד וחומרים

- 4 גרמים קורנפלקס אלופים (תירס).
- 4 גרם בגד מ-100% כותנה.
- 4 גרם פחם.
- 4 גרם קלקר.
- 67.05 גרם אתנול 95% (90 מ"ל).
- 2510 גרם מים.
- 5 משורות זכוכית של 20 מ"ל.
- משפך.
- 5 כוסות כימיות של 800 מ"ל.
- מאזניים.
- סטנד עם תפסן.
- מצית ארוכה.
- סטופר.
- קלורימטר מאולתר (כמו שצוין ברקע המדעי).

מהלך הניסוי

הבקרה בניסוי: חיצונית - שריפת אתנול ללא חומר נוסף. בכל אחד מהניסויים מוסיפים כמות זהה של אתנול על מנת להתחיל את הבעירה. בבקרה נבצע שריפה של אתנול לבד. בדיקת כמות האנרגיה שנפלטת בשריפת אתנול לבדו יכולה להיות מושווה לערך ספרותי וההפרש ביניהם יהווה את איבודי החום לסביבה (איבודי החום שאינם נקלטים ע"י הנוזל) במערכת הניסוי.

גורמים קבועים: מסת החומר הנשרף היא קבועה; הנוזל בקלורימטר - מים; נפח נוזל בקלורימטר; טמפרטורת מים התחלתית; מסת האתנול וריכוז האתנול; משך זמן השריפה*; טמפרטורת הסביבה; כלי המדידה (קלורימטר, מד טמפרטורה, כלי קיבול למדידת נפח, מאזניים).

*נאספו נתונים לגבי הטמפרטורה בזמנים קבועים ועד שהמערכת כבתה. ראינו כי לאחר פרק זמן מסוים כל המערכות הגיעו לטמפרטורה המקסימלית שלהן, ולכן החלטנו להתייחס לזמן בעירה קבוע.

חשוב לשמור על גורמים קבועים אלה על מנת שהאיבוד לסביבה יהיה זהה ונוכל להשוות בין החומרים השונים.

שלבי הניסוי

- שקלו 13.41 גרם (18 מ"ל) אתנול 95% בתוך משורה של 20 מ"ל. חזרו על הפעולה 4 פעמים נוספות.
- שקלו 4 גרם מהחומרים הבאים: פחם, בגד 100% כותנה, קורנפלקס (תירס), קלקר.
- שקלו 502 גרם מים בתוך כוס כימית של 800 מ"ל (נפח זה נקבע מאחר שזה נפח המים שיש להוסיף על מנת שגובה המים יהיה בדיוק עד סף תא השריפה). חזרו על הפעולה 4 פעמים נוספות.
- שפכו את המים לתוך הקלורימטר במקום המיועד לו.
- העבירו את ה-13.41 גרם אתנול לתוך תא השריפה של הקלורימטר.
- רשמו את טמפרטורת המים ההתחלתית (לפי הוריית מד טמפרטורה של הקלורימטר).
- הכינו את הסטופר ובעזרת מצית ארוכה הציתו את האתנול.
- רשמו את הוריית מד הטמפרטורה בזמנים שבטבלה ומלאו את הטבלה:

זמן (דקות)	0.4	1.4	3.4	4.3	6	7.4	8.4	9.4
טמפרטורה (צלזיוס)								

- החליפו כל פעם את המים במים האחרים ששקלתם, על מנת להתחיל מאותה טמפרטורת מים וחזרו על השלבים עם החומרים הבאים:
 1. אתנול ללא חומר נוסף (הבדיקה תבוצע פעמיים).
 2. 4 גרמים בגד מ-100% כותנה + 13.41 גרם אתנול (הבדיקה תבוצע פעמיים).
 3. 4 גרמים פחם + 13.41 גרם אתנול.
 4. 4 גרמים קורנפלקס (תירס) + 13.41 גרם אתנול.
 5. 4 גרמים קלקר + 13.41 גרם אתנול.
- סכמו את כל התוצאות בטבלה אחת.
- חשבו את האנרגיה הנפלטת למים בעזרת הנוסחה הבאה לחישוב אנרגיית חום.

תצפיות

אתנול: הטמפרטורה ההתחלתית לפי ראיית מד הטמפרטורה הייתה 18 מעלות צלזיוס. ברגע שהצתנו את האתנול חסר הצבע הופיעה להבה גדולה, והטמפרטורה החלה לעלות. בתום התגובה לא נשאר אתנול במכל שריפה, והוא והמים היו חמים למגע. (ביצענו את הניסוי פעמיים כדי לבדוק חזרתיות)

כותנה+אתנול: הטמפרטורה ההתחלתית לפי ראיית מד הטמפרטורה הייתה 18 מעלות צלזיוס. ברגע שהצתנו את האתנול חסר הצבע עם הכותנה הלבנה הופיעה להבה גדולה, והטמפרטורה החלה לעלות. בתום התגובה נשאר 1.64 גרם כותנה אשר השחיר (במערכה 1) ו-1.70 גרם כותנה אשר השחיר (במערכה 2) במכל השריפה, והמערכת הייתה חמה למגע. (ביצענו את הניסוי פעמיים כדי לבדוק חזרתיות)

קלקר+אתנול: הטמפרטורה ההתחלתית לפי ראיית מד הטמפרטורה הייתה 18 מעלות צלזיוס. ברגע שהצתנו את האתנול חסר הצבע ואת הקלקר הלבן הופיעה להבה גדולה, והטמפרטורה החלה לעלות. בתום התגובה נשאר 3.4 גרמים של קלקר שהשחיר (במערכה 1) ו-3.8 גרמים (במערכה 2) במכל השריפה, והוא והמים היו חמים למגע. הקלקר איבד מנפחו בתוך מכל השריפה. (ביצענו את הניסוי פעמיים כדי לבדוק אמינות).

פחם+אתנול: הטמפרטורה ההתחלתית לפי ראיית מד הטמפרטורה הייתה 18 מעלות צלזיוס. ברגע שהצתנו את האתנול חסר הצבע עם הפחם השחור הופיעה להבה גדולה, והטמפרטורה החלה לעלות. בתום התגובה נשאר 3.97 גרמים של פחם שחור במכל השריפה, והוא והמים היו חמים למגע.

קורנפלקס (תירס)+אתנול: הטמפרטורה ההתחלתית לפי ראיית מד הטמפרטורה הייתה 18 מעלות צלזיוס. ברגע שהצתנו את האתנול חסר הצבע והקורנפלקס הצהוב הופיעה להבה גדולה, והטמפרטורה החלה לעלות. בתום התגובה נשאר 3.76 גרמים של קורנפלקס (תירס) אשר השחיר במכל השריפה, והוא והמים היו חמים למגע.

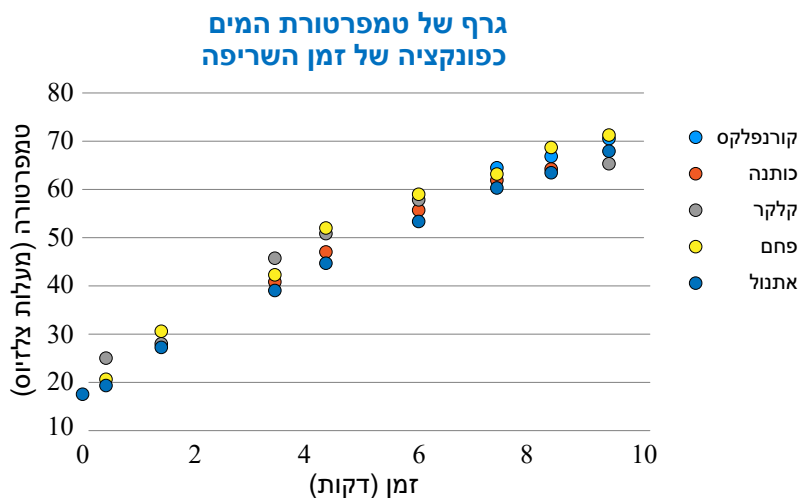
מאחר שלא נצפו הבדלים ניכרים בין שתי החזרות בשלושת תהליכי השריפה הראשונים, ומפאת חוסר הזמן הוחלט להסתפק בחזרה אחת בהמשך הניסוי.



להפוך מטרד למשאב

זמן [דקות] / טמפ' [°C]	קורנפלקס	כותנה	קלקר	פחם	אתנול
0	18	18	18	18	18
0.4	21	21	25	21	20
1.4	31	28	28	31	27
3.4	41	41	46	42	40
4.3	51	47	51	52	45
6	59	55	58	60	52
7.4	65	62	63	63	60
8.4	68	65	64	70	64
9.4	70	68	65	71	68

עיבוד התצפיות לגרף



מגמה: ניתן לראות עבור כל חומרי הבעירה כי ככל שהזמן עבר עלתה הטמפרטורה

חישבנו את כמות האנרגיה שנקלטה ע"י המערכת כפי שהוסבר ברקע התאורטי. את תוספת האנרגיה כתוצאה משריפת החומר האורגני חישבנו ע"י החסרת כמות האנרגיה של האתנול מסך האנרגיה שחושבה.

התוצאות מרוכזות בטבלה הבאה:

אתנול	פחם	קלקר	כותנה	קורנפלקס	
105.2	111.5	98.9	105.2	109.4	חישוב אנרגיה שנקלטה ע"י המים kJ
-	6.31	-6.31	-	4.21	תוספת אנרגיה כתוצאה משריפת החומר האורגני kJ

פירוש התצפיות

- לא נצפו הבדלים ניכרים בין הטמפרטורות של החומרים השונים. למים קיבולת חום גבוהה. ייתכן ששימוש בנוזל בעל קיבולת חום נמוכה יותר (כגון שמן) היה מביא להפקת תוצאות מגוונות יותר שמהן היה ניתן להסיק מסקנות רחבות יותר.
- כמות האנרגיה שנקלטה ע"י המערכת קטנה מהערך התאורטי שחושב ברקע המדעי. דבר זה נובע מאיבודי חום לסביבה אשר לא נקלטו ע"י המים. למרות השימוש במערכת מבודדת, עדיין יש איבודי חום גם דרך הבידוד וגם מהחלק העליון שנשאר פתוח על מנת לאפשר כניסת חמצן.
- הסברים אפשריים לשאריות החומר שנותרו בניסויים השונים:
 - ייתכן שהטמפרטורה לא הייתה גבוהה מספיק על מנת להגיע לשריפה מלאה.
 - החומרים שבהם השתמשנו אינם תרכובות טהורות, והם מכילים אי ניקיונות אשר נשארים בתום תהליך השריפה. דבר זה קורה בכל שריפה מכיוון שכיום עדיין אין לנו הטכנולוגיה המתאימה על מנת להגיע לתרכובת טהורה ולחומר נקי לחלוטין.
- הכותנה והקורנפלקס השחירו בגלל התפחמותם.
- אתנול הוא חומר דליק, ולכן כשקירבנו את המצית הבווער אליו, הוא דלק ושרף גם את הפסולת שהייתה איתו במכל הבעירה.
- הטמפרטורה במים עולה מכיוון שמכל השריפה נמצא בתוך המכל, והוא עשוי מחומר מוליך חום (אלומיניום). ישנם מעברי חום בין פנים המכל למים, ותהליך השריפה פולט חום (תגובה אקסותרמית), והמים קולטים את החום הנפלט.
- לא נשאר אתנול במיכל מכיוון שבכל אחת מהתצפיות נשרף האתנול כליל.
- מאחר שהאנרגיה שהתקבלה משריפת הקלקר עם האתנול נמוכה מזו שהתקבלה עם האתנול לבדו, אנו משערים כי הקלקר נמס במהלך השריפה, וכי תהליך זה קלט חלק מהחום שנפלט בתהליך השריפה, ועל כן המים פחות התחממו.

מסקנות

- בכל תהליכי השריפה נפלטה כצפוי אנרגיה לסביבה.
- חומרים אורגניים נשרפים.
- שמנו לב שחומרים שיש בהם סוכרים (בכותנה-תאית ובמזון-גלוקוז), מפיקים יותר אנרגיה.
- לפי התוצאות ניתן לראות שכדאי לנצל פסולת להפקת אנרגיה. מומלץ לבדוק שוב את הקלקר והכותנה בקלורимטר מקצועי. מומלץ לבדוק גם את הפליטות, קיימות דרכים למזער פליטות ולטפל בהן, אך בכל מקרה צריך להביא בחשבון שהחומרים אינם טהורים, ולכן יפלטו גם גזים נוספים לפד"ח ואדי מים גם בתנאים של שריפה מלאה.
- התוצאות שלנו תומכות בהשערה אך כפי שפירטנו, יש הסתייגות.
- כמו ששיערנו אכן מכלל החומרים שבדקנו, היה הקורנפלקס אחד מהפסולות שמפיקות הכי הרבה אנרגיה.

התייחסות ביקורתית

- הקלורימטר לא היה מבודד מספיק, ולכן היו איבודי חום לסביבה אשר לא נקלטו ע"י המים. למרות שהוספנו לו שכבת בידוד, עדיין היו איבודים, משום שכמו שניתן לראות בתצלום, החלק העליון שלו נשאר פתוח על מנת לאפשר כניסת חמצן, והבידוד לא היה אבסולוטי.
- במהלך הניסוי הפסיקו חלק מהמדחומים לעבוד (כלומר, הטמפרטורה בהם הפסיקה לעלות מעל ל-22 מעלות צלזיוס, למרות שהתגובה המשיכה להתרחש). דבר זה פגם בניסוי וגזל זמן רב.
- כל החומרים לא נשרפו עד הסוף למעט הכוהל, לכן כמות האנרגיה שנפלטה לא הייתה מקסימלית.
- ברקע התאורטי שנרשם בהתחלה הייתה התייחסות לפחם טהור, בעוד שאנחנו השתמשנו בפחם עץ שאינו פחם טהור לחלוטין, ולכן ערך האנתלפיה הספרותי אינו מייצג באופן מדויק את התהליך.

סיכום

מדי יום נזרקים 6,000 טונות פסולת רק בארצנו הקטנה, ועם הכמות העצומה של הפסולת הזו לא נעשה דבר. כשהתחלנו את החקר הייתה מטרתנו למצוא שימוש לפסולת הרבות הנזרקות כל יום, והצלחנו.

בחקר שלנו גילינו שאכן משתלם לשרוף פסולות. קודם כול בגלל שלא נעשה בהן כל שימוש, ולכן אפילו אם הן מפיקות כמות קטנה יותר של אנרגיה מפחם, הן עדיין זמינות יותר וזולות ויותר מאנרגיה המופקת מפחם (שהוא חומר אשר אינו מתחדש), ולכן השימוש בהן הוא יעיל.

שנית, תהליך הכרייה של הפחם הוא מזהם ואף מסוכן לכורים, ולכן שימוש חוזר בפסולת - לא רק יטיב איתנו (בגלל זמינותה והעלות שלה) אלא גם יטיב עם הסביבה בכך שיפחית את כמויות האשפה המועברות להטמנה. ובנוסף יטיב תהליך זה גם עם חייהם של הכורים שנתונים בסכנה בכריית הפחם.

החוויות מהחקר: החקר היה תהליך ארוך ומאתגר, וכלל הרבה רגעי משבר, אך הצלחנו להתגבר עליהם בסופו של דבר, ואנחנו מרוצים מאוד מהתוצאה הסופית, וזאת בזכות התמיכה שקיבלנו זה מזה ומהמורה שלנו, יעל.

שאלות שהתעוררו לנו בעקבות הניסוי

- מה הם הגזים שנפלטו במהלך שריפת החומרים?
- כיצד ניתן לצמצם את הפליטות?
- כיצד ניתן להשתמש בפליטות ולנצל אותן לתהליכים אחרים?
- כיצד ניתן להפחית את כמויות האשפה?
- כיצד ניתן לשפר את הקלורימטר המאולתר שלנו על מנת שיתקבלו תוצאות אמינות ומדויקות יותר?

ביבליוגרפיה

- אתר אינטרנטי של "אתר אפעה" <http://www.ef-eh.com/> ויקיפדיה.
- ספר נתונים, "הכימיה-אתגר". עורכת: איטה כהן. מהדורה תשיעית. המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות.
- אפקט החממה http://ecowiki.org.il/wiki/%D7%90%D7%A4%D7%A7%D7%98_%D7%94%D7%97%D7%9E%D7%9E%D7%94
- NIST Chemistry webbook <http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C64175&Mask=2>
- נתוני אנתלפיה <https://chemistry.stackexchange.com/questions/28641/hesss-law-enthalpy-of-combustion>

תודות

- מנהל תפעול אתר אפעה - מר קובי ביטון.
- המורה והמלווה שלנו יעל חורב, שנשארה איתנו עד השעות הקטנות של הלילה על מנת לעבור על העבודה שלנו ולעזור לנו לשפר אותה.
- ד"ר דבורה מרצ'ק לכימיה פיזיקלית.
- מרסלו קולקר - לבורנט המעבדה.

ניתן להיכנס לאתר התוכנית למידע נוסף בנושא [התחרות "יש לנו כימיה"](#).