

לא על הכר/ס לבדו

מים המלח למוצרים בשירות האדם

מירי קסנר

מהדורת ניסוי

הסחלקה
להוראת הסדעים
מכון ויצמן למדע



לא על הכר/ס לבדו

מים המלח למוצרים בשירות האדם

מירי קסנר

מהדורה ניסוי



המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע



יוצא לאור במסגרת

המרכז הישראלי להוראת המדעים ע"ש עמוס דה-שליט
מיסודם של

משרד החינוך התרבות והספורט, האוניברסיטה העברית בירושלים ומכון ויצמן למדע, רחובות

הדפסה ועריכה במחשב: זיוה בוטנר

גרפיקה: אסנת סבגיל

סיגלית בר-מנשה

זיוה בוטנר

צילומים: יוסי אלבז, סטודיו "אקט"

מיקי קורן

לוי קליין

ד"ר חיים סטרז'

ד"ר מירי קסנר

ארכיון חברת הברום

אלברט דנקברג

עיצוב והפקה: אגי בוקשפן

שער קדמי: עמודות זיקוק ברום על רקע בריכות האידוי

שער אחורי: מיתקן ייצור ב"תרכובות ברום" על רקע בריכות האידוי

סריקות: אנה משיח, הסטודיו

אין לשכפל, להעתיק, לצלם, להקליט, לתרגם, לאחסן במאגר מידע, לשדר או לקלוט בכל דרך או אמצעי אלקטרוני, אופטי או מכני או אחר, כל חלק שהוא מהחומר שבספר זה. שימוש מסחרי מכל סוג שהוא בחומר הכלול בספר זה אסור בהחלט, אלא, ברשות מפורשת בכתב מהמוציא לאור.



כל הזכויות שמורות למכון ויצמן למדע,

למשרד החינוך, התרבות והספורט ולחברת הברום

נדפס בישראל תש"ס-1999

דפוס מאירי בע"מ

הספר מוקדש לזכרו של סעדיה מלל ז"ל

סעדיה ז"ל היה מיוזמי הקשר בין מפעל "תרכובות ברוס" והמחלקה להוראת המדעים במכון ויצמן למדע ברחובות. בנוסף לכל התפקידים החשובים שמילא במפעל "תרכובות ברוס", הציב לעצמו יעד חינוכי שמטרתו היתה לקרב את הנוער בישראל לתעשייה הכימית. הוא הבין את החשיבות של הצגת הצדדים היישומיים של הכימיה בפני התלמידים ושל ההכרות מקרוב עם התעשייה הכימית בארץ. הוא ידע שלימודי הכימיה יעשו מעניינים יותר דרך הצגת הקשר בין התאוריה לבין היישום בחיי היום יום.

ביוזמתו נבנתה מערכת מתנדבים של אנשי "תרכובות ברוס", שמרצים ומדריכים בסיורי תלמידים במפעל. פעילות זו נמשכת לאורך כל השנים ומיושמת גם במפעלים אחרים. כמו כן פעל לשילוב נושא הברוס ותרכובותיו במסגרת תכנית הלימודים לבגרות עבור תלמידים המתמחים בכימיה (ברמת 5 יחידות לימוד). הוא תמך בכתובתה של המהדורה הראשונה של ספר הלימוד "הברוס ותרכובותיו" שיצאה לאור ב- 1990 ושימשה במשך כ-10 שנים אלפי תלמידים. ספר זה הוא מהדורה שנייה ומעודכנת, שנכתבה על סמך ההתנסות בהוראת נושאי התעשייה הכימית מצד אחד, ועוקבת אחר ההתפתחויות בתעשיית הברוס ותרכובותיו מצד שני.

פתח דבר

יחידת לימוד זו עוסקת בנושא התעשייה הכימית ומציגה את הצד היישומי תעשייתי של מדע בכלל, ומדע הכימיה בפרט. התעשייה הכימית רותמת ידע מדעי ובעזרת פיתוח טכנולוגיות מתאימות מנצלת אותו לייצור חומרים לשימוש האדם. לימוד נושא זה במסגרת לימודי הכימיה משתלב עם המגמה ההולכת ומתחזקת בהוראת המדעים בעולם ודוגלת בהצגת המדע בשילוב עם קשרי הגומלין שהוא יוצר עם טכנולוגיה וחברה (Science, Technology, Society).

הספר "לא על הברום לבדו" נכתב כחלק מסדרת ספרים בנושא התעשייה הכימית. נושאי התעשייה הכימית השונים יאפשרו לכם, תלמידי הכימיה, ללמוד על הקשר בין מדע וטכנולוגיה ולראות את השפעתם על חיי הפרט והחברה. כמו כן תוכלו להכיר דרך לימוד הנושא מושגים בסיסיים בעולם של אנשי התעשייה הכימית ולהתרשם מהבעיות המעסיקות אותם במהלך עבודתם. דרך סיפורה של קבוצת הברום תוכלו ללמוד על עולם התעשייה הכימית בכלל ועל פרקים חשובים בתעשייה הכימית הישראלית בפרט. לתעשייה הכימית תפקיד חשוב בכלכלה הישראלית. תעשייה זו למדה לנצל את הידע האנושי ואת אוצרות הטבע המעטים המצויים בארץ להפקת מוצרים חשובים המשווקים בעולם כולו.

המהדורה הראשונה של ספר זה יצאה לאור ב-1990 ביוזמתו של מר סעדיה מלל ז"ל (אז סמנכ"ל בחברה) ותמיכתו של מר אריאל גינזבורג (אז מנכ"ל החברה) ותודות לעזרתם של רבים אחרים במפעל "תרכובות ברום", שסייעו בהשגת מידע, בתמונות ובכל שנדרש. ראוייה לציון מיוחד תרומתו של הצוות המוביל שכלל את ד"ר שאול ינאי, ד"ר מירה פרייברג וד"ר מיכאל פלד, אשר ליוו את הפרויקט לאורך כל הדרך וכן את תרומתו של ד"ר אבי הופשטיין, מפמ"ר כימיה דאז, שפעל במשך שנים רבות רבות לשילוב נושאי התעשייה הכימית במסגרת תוכנית הלימודים בכימיה.

ההתפתחות והשינויים הרבים שהתחוללו במהלך העשור האחרון במבנה המפעל, בתהליכי הייצור, בטכנולוגיות, בתחומי הבטיחות, איכות הסביבה ועוד חייבו עדכון וכתובה מחדש של הספר.

מעל לכל מטרנתו היא להראות לכם תלמידי הכימיה:

א. כיצד תאוריות וחוקים כלליים, עליהם למדתם במסגרת לימודי הכימיה, מיושמים ב"עולם האמיתי" של התעשייה הכימית.

ב. את הרלוונטיות של המדע לנושאים אחרים, כמו טכנולוגיה, כלכלה, חברה, אקולוגיה, גיאוגרפיה, פוליטיקה ועוד, המשפיעים על חיי הפרט והחברה.

שילוב כל ההיבטים הללו לרשת רחבה אחת של שיקולים היא חלק בלתי נפרד מנושא התעשייה הכימית, שהוא נושא רחב ומרתק המהווה אתגר לכל העוסקים בו.

רבים תרמו לכתיבתו של ספר זה ובלי עזרתם לא הייתי יכולה להשלימו. ארוכה הרשימה מאד ואני מקווה שלא שכחתי לציין את כולם. לכל אחד אני מודה על תרומתו החשובה.

ב"קבוצת הברוס":

לאשר גרינבאום, מנכ"ל קבוצת הברוס, על שתמך בפרויקט ואפשר את ביצועו.
ד"ר מיכאל פלד, שליווה את הפרויקט מתחילתו ועד סופו ועזר בכל.
שלום קופלמן, שקרא את כל החומר, על הערותיו החשובות.
ד"ר מירה פרייברג שקראה את כל החומר ועזרה בכל עת, על עזרתה והערותיה החשובות.
לכל עובדי אנשי החברה, שתרמו כל אחד בשטחי התמחותו להפקת הספר:

אישק בנצי, אמיתי עצמון, בר יעקב יואב, גולן גבי, גולדמן מרדכי, גילמור בוב, גליקמן רות, גרמזה יאיר, דווידזון דפנה, דוידי אהרון, וייס תמי, זורלט פייר, חנה זילברברג, זלמנוביץ ניר, טוירשטיין אברהם, כוהן דודו, ליטרט איציק, לירון אפרת, מלכה ויקטור, מירוס אהרון, מרקוס איציק, סודק אריה, סילם אנדרה, ד"ר חיים סטרוז, ד"ר צדוק אלעזר, רוזנטל מיכאל, ד"ר קורנברג נורית, קליין לוי, קלמוס שרה, קרפ מרה, שדה שוש ועוד רבים אחרים שתרמו כל אחד את חלקו, במישרין או בעקיפין.

ב "מועצה אזורית רמת-חובב" :

לרעיה אבו ויאיר מרקוביץ על עזרתם בכתיבת הפרק העוסק בטיפול ביולוגי.

במחלקה להוראת המדעים במכון ויצמן למדע:

לד"ר רות בן-צבי על הערותיה המועילות והחשובות לאורך כל הדרך.
לד"ר אבי הופשטיין על עזרתו בהוצאת המהדורה הראשונה של הספר ועל תרומתו החשובה לשילוב נושאי התעשייה הכימית בתוכנית הלימודים.
ליהודית זילברשטיין על עזרתה והערותיה.
לנורית ארד על העזרה בתכנון הניסויים.
לזיוה בוטנר על המאמץ הגדול שהשקיעה בהדפסה, בעריכה ובגרפיקה.

תוכן העניינים

7	פרק א' מבוא
7	1.א. מדוע ברום?
9	2.א. הברום ותכונותיו
	גילוי הברום
	התגובות הכימיות של הברום
14	3.א. מברום לתרכובותיו
	סקירה היסטורית
	עליתו ונפילתו של ה-EDB
	האם יש עתיד לברום אחרי ה-EDB?
28	4.א. ברום בעולם
	נפיצות הברום
	ייצור הברום בעולם
	ייצור תרכובות ברום בעולם
35	פרק ב' ברום מים המלח
35	1.ב. ברום מים המלח, מדוע ?
41	2.ב. שלבים ושיקולים בהקמתה של תעשיית הברום בארץ
47	מושגים שלמדת בפרקים א ו-ב
48	שאלות לפרקים א ו-ב
51	פרק ג' כיצד מייצרים ברום?
51	1ג. מבוא
54	2ג. כיצד מפיקים כלור במעבדה?
55	3ג. כיצד מפיקים ברום במעבדה?
61	4ג. הבטיחות במעבדה
63	5ג. מהפקת ברום במעבדה לייצור ברום בתעשייה
66	6ג. כיצד מייצרים כלור בתעשייה?
69	7ג. ייצור הברום בסדום-כיצד מייצרים ברום בתעשייה?
82	8ג. חומרי מבנה במיתקן הברום
83	9ג. בטיחות ייצור, איחסון, שינוע ושימוש בברום
	כללי
	סכנות הברום
	בטיחות בייצור הברום
	טיפול בטיחותי בדליפת ברום
	בטיחות באחסון ברום
	שינוע בטיחותי של ברום
	בטיחות השימוש בברום
95	מושגים שלמדת בפרק ג
97	שאלות לפרק ג

פרק ד' מרעיון למוצר 101

1.ד. עקרונות כלליים בפיתוח מוצר 101

כללי

בדיקת הרעיון

מרעיון למעבדה

מהמעבדה לייצור

המישתנים העיקריים הנלקחים בחשבון בתהליך הגימלון

"ספקטרום" - מיתקני הפילוט של "תרכובות ברום"

2.ד. איך משיגים איכות כוללת?

בקרה, ביקורת טיב, אבטחת איכות וניהול הסביבה 122

3.ד. שמירה על בטיחות ואיכות הסביבה 126

כללי

בתעשייה

4.ד. רעילות (טוקסיקולוגיה) ורישוי חומרים 131

5.ד. טיפול בפסולת תעשייתית 138

כללי

טיפול ביולוגי

מושגים שלמדת בפרק ד 142

שאלות לפרק ד 143

פרק ה' ייצור תרכובות ברום 147

כללי

1.ה. ייצור מימן ברומי 150

2.ה. ייצור סידן ברומי 158

3.ה. ייצור נתרן ברומטי ואשלגן ברומטי 165

4.ה. ייצור ברומו מתאן 174

מושגים שלמדת בפרק ה 183

שאלות לפרק ה 183

פרק ו' שימושי הברום ותרכובותיו 187

כללי

1.ו. תרכובות ברום בחקלאות 188

בעיית המזון בעולם

הדברת נגעים

תרכובות ברום כחומרי הדברה

כיצד משתמשים במתיל ברומיד?

שיקולים בשימוש במתיל ברומיד?
פתרונות אפשריים?
ציני דרך

- 2.1 תרכובות ברום בעלות פעילות ביולוגית (ביוצידים) 201
מבוא
השימוש בהלוגנים ובתרכובותיהם כחומרי חיטוי
- 3.1 מעכבי בעירה 209
מבוא
הבעירה וסכנותיה
תהליך הבעירה של תרכובות פחמן-כדוגמא לתגובת שרשרת
כיבוי בעירה
עיכוב בעירה ומנגנוני פעולה של מעכבי בעירה
כיצד משלבים את מעכבי הבעירה במוצרים השונים?
שיקולים בבחירת מעכבי בעירה
- 4.1 תרכובות ברום בקידוחי נפט 236
- 5.1 תרכובות ברום בתעשיית הצילום 241
- 6.1 שימוש בליתיום ברומי למערכות קירור 245
- 7.1 השימוש בברומטים 246
- 8.1 תרכובות ברום כחומרי ביניים, לשימושים רפואיים ואחרים 248
- מושגים שלמדת בפרק 1 250
שאלות לפרק 1 251
- פרק סיכום עבר, הווה ועם הפנים לעתיד** 255
עבר, הווה ועתיד
מבנה ואירגון
כח אדם
נתונים כלכליים
לסיכום
- שאלות כלליות לסיכום ולהעשרה 269
- נספחים** : 271

נספח א' - המרה וניצולת
נספח ב' - דף מידע בטיחותי (ברום)
נספח ג' - מהו פטנט?

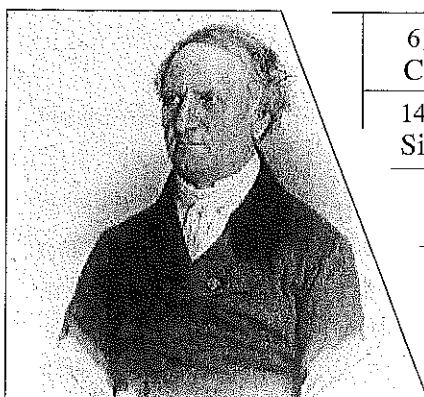
פרק א מבוא

א.1 – מדוע ברום?

מדוע בחרנו לעסוק דוקא בברום ובתרכובותיו? מה מייחד את הברום משאר היסודות? מדוע אנו מקדישים לו ספר לימוד? את התשובות לשאלות אלו תגלה בפרק זה.

הברום מוכר לך מלימודך בפרקים קודמים.

- אסוף נתונים רבים ככל האפשר על הברום.
- מהן תכונותיו של הברום על פי הנתונים שאספת? הסבר.
- אילו תגובות של הברום אתה מכיר?



				2 He
6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
		52 Te	53 I	54 Xn
		84 Po	85 At	86 Rn

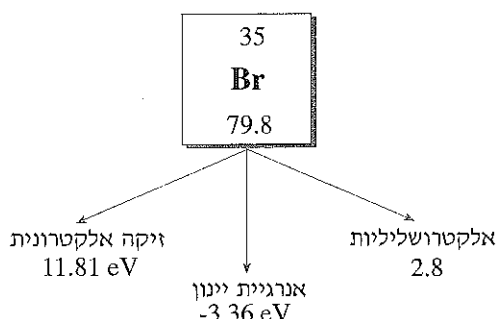
מגלה הברום - אנטואן באלאר

הברום שייך למשפחת ההלוגנים המוכרת לך כבר מלימודיך הקודמים. שמם נגזר מיוונית ופרושו **יוצרי מלחים**.

- ההלוגנים אינם מצויים בטבע כיסודות חופשיים, אלא בתרכובות עם מתכות שונות. הסבר מדוע!

יחד עם ההבדלים הברורים בין ההלוגנים השונים, קיים גם דמיון ניכר בתכונותיהם, הנובע מהערכות זהה של שבעת אלקטרוני הערכיות.

מיקומו של הברום במשפחת יסודות מיוחדת זו בין הכלור לiodine מרמז על חוסר קיצוניות בתכונותיו. האלקטרושליליות של הברום אינה גבוהה כמו זו של הפלואור או הכלור, אך היא גם אינה נמוכה כמו האלקטרושליליות של היוד והאסטטין. יחד עם זאת האלקטרושליליות מספיק גבוהה כדי שהברום יתנהג כיסוד אל-מתכתי מובהק.



דרג את ההלוגנים על פי כושרם לחמצן.

ההלוגנים ידועים ברבגוניות התרכובות שהם יוצרים: תרכובות אנאורגניות ואורגניות, חומרים יוניים, חומרים מולקולריים ואף פולימרים. גם תכונותיהן של תרכובות ההלוגנים מאוד מגוונות ולכן הן יכולות לשמש בתחומים רבים. ערוך רשימה של תרכובות ברום שונות המוכרות לך מלימודיך ומיין אותן לפי סוגי הקשרים:

- תרכובות יוניות

- תרכובות מולקולריות

2.א - הברום ותכונותיו

גילוי הברום

הברום (Br_2) בודד וזוהה לראשונה ב-1825, על-ידי הכימאי הצרפתי בן ה-23 אנטואן באלאר (A.J. Balard), אשר העביר זרם של גז כלור (Cl_2) דרך תמיסה מרוכזת של מי-ים והבחין בהיווצרות בלתי צפויה של חומר בעל צבע חום. לאחר הפרדת החומר מצא באלאר שהחומר החדש הוא נוזל נדיף, בעל ריח חריף וצבע חום אדמדם. באלאר איפיון חומר זה כיסוד והאקדמיה הצרפתית קבעה את שמו ברומוס (bromos) שמשמעותו ביוונית מסריח.

ניסוי 1: בריום ממי ים

- א. הכנס לתוך מבחנה כ-5 סמ"ק מי ים תיכון והוסף באמצעות טפי כ-20 טיפות של תמיסת אקונומיקה¹. סגור את המבחנה עם פקק והתבונן בצבע התמיסה.
- ב. הכנס לתוך מבחנה כ-5 סמ"ק מי ים המלח והוסף באמצעות טפי כ-20 טיפות של תמיסת אקונומיקה. סגור את המבחנה עם פקק והתבונן בצבע התמיסה.
- ג. הוסף למבחנה השנייה כ-1 סמ"ק ציקלוהקסאן. סגור אותה עם הפקק וטלטל קלות. השאר את המבחנה במנוחה מספר דקות והתבונן בה שוב.

- רשום את תצפיותיך עבור כל אחד מהשלבים ופרש אותן.
- האם ישנן תצפיות שאינך יכול עדיין לפרש? מהן?
- איזה תפקיד ממלאת האקונומיקה?
- איזה תפקיד ממלא הציקלוהקסאן?
- נסח את התגובות שהתרחשו בשלבים א-ג.

הברום מתקבל בניסוי זה באמצעות תהליך חמצון חיזור עליו למדת² בפרק קודם. כבר בראשית המאה ה-19 הספיק הידע שהצטבר כדי להבחין בין קבוצות מסוימות של יסודות שנתגלו כבעלי תגובות כימיות דומות. הברום הצטרף עם גילוייו לכלור וליוד, שנתגלו כבר קודם לכן (ב-1774 ו-1811 בהתאמה). בתקופה זו כבר היתה המעבדה הכימית ברמה מספיקה כדי לערוך ניסויים רבים ומגוונים.

1 תמיסת אקונומיקה - תמיסה מימית של נתרן תת כלוריתי, NaClO . האקונומיקה המיועדת לשימוש ביתי מכילה כ-5% כלור זמין.

2 ראה בספר: ה"כימיה - אתגר" פרק 7, מאת רות בן-צבי ויהודית זילברשטיין בהוצאת המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע.

ההתקדמות המהירה והמפתיעה בחקר הברום ותכונותיו היתה אפשרית בגלל הדמיון הגדול בין הברום לבין הכלור והיוד, שכבר היו מוכרים היטב לחוקרים. מיד עם גילוי הברום החלו באלאר ורבים אחרים בחקירת תכונותיו של הברום. הם הכינו תרכובות ברום עם גפרית, זרחן, כלור, יוד, ומימן, ברומידים מתכתיים וברומטים³ ותארו את תכונותיהם. כמו כן הצליחו החוקרים לבצע תגובות של ברום עם תרכובות אורגניות כמו חומצה אצטית ואתאנול. תגובות אלו מתוארות כבר בתקופה הסמוכה לגילוי הברום. דוגמאות לניסוחים של חלק מההליכים אלה ניתן לראות בסעיף הבא.

מסמך⁴ מעניין ביותר הוא המכתב ששלח דולון לברצליוס ביולי 1826 ובו נכתב:

"ועכשיו חדשות... זהו "גוף" פשוט חדש שימצא את מקומו בין הכלור והיוד. גילוי זה שייך לבלאר ממונפליה. "גוף" חדש זה... נמצא במי ים. באלאר מיצה אותו מתמיסת האם של תמלחות מונפליה על ידי טיפול בכלור ולאחר מכן זיקוק. התקבל חומר נוזלי אדום כהה הרוחה ב-47°. האדים דומים לאלה של חומצה חנקתית. הצפיפות הסגולית היא 3. שומרים אותו מתחת לחומצה גופרתית. הוא מגיב עם מתכות אשר חלק מהן נדיפות, למשל התרכובת עם אשלגן..."

- קרא את המכתב והסבר מדוע לדעתך קיימים הבדלים בין טמפרטורת הרתיחה והצפיפות של ה"גוף" החדש שמצא באלאר לבין אלו הנתונות ב"כרטיס"⁵ הברום המופיע בעמוד הבא.
- מדוע לדעתך שמר באלאר את הברום מתחת לחומצה גופרתית?
- כיצד מגיב לדעתך הברום עם אשלגן? רשום ניסוח תגובה.
- תרכובת הברום עם אשלגן, לפי דברי דולון, הינה נדיפה. האמנם? מה יכול להיות מקורה של קביעה זו?
- מהם האדים הדומים לאלו של חומצה חנקתית?

3 כגון KBrO_3 ו- NaBrO_3

4 מתורגם ומעובד מהספר: Discovery of the Elements
בהוצאת: Journal of Chemical Education, 1968

5 בהמשך נציג "כרטיסים" של חומרים נוספים שיבואו לעזרתכם בהשגת מידע על חומרים שונים.

שם החומר: ברום

ג/כ/נ/ג

יסוד בעל מולקולות דו-אטומיות (Br_2)
 צבע: אדום חום
 ריח: חריף
 טמפרטורת חיתוך: -7.25°C
 טמפרטורת רתיחה: 59.5°
 צפיפות: 3.12 גרם/סמ"ק (20°C)
 מסיסות במים: נמוכה (תוך כדי תגובה)
 3.58 גר' ב- 100 סמ"ק מים (-20°C)
 3.52 גר' ב- 100 סמ"ק מים (-50°C)
 מסיסות בממסים אחרים: מסיסות גבוהה באלקאנים, בכהלים, באתרים, בפחמן דו-גפרי.
 רעילות: חומר רעיל מאכל רקמות בגוף וגורם לכוויות גם בריכוז נמוך (ppm^*) גורם לגירויים באף, בגרון בעור ובעיניים.
 תגובות אופייניות:
 * מגיב עם מתכות רבות, במיוחד כשהוא מכיל מים.
 * מגיב עם אלמנטות רבות.
 * מגיב בתגובות סיפוח והתמרה עם תרכובות פחמן שונות.
 דליקות: לא דליק.
 שינוי האנתלפיה בהיתוך (ΔH°): 10.57 ק' גיול/מול מולקולות.
 שינוי האנתלפיה ברתיחה (ΔH°): 30.0 ק' גיול/מול מולקולות.
 אנתלפיית קשר: 193 ק' גיול/מול.

ענה על השאלות הבאות על פי תכונות הברום המופיעות ב"כרטיס":

- באיזה מצב צבירה מצוי הברום בטמפרטורת החדר?
- הסבר את נתוני המסיסות של הברום:
- (א) במים (ב) באלקאנים (ג) בכהלים (ד) באתרים (ה) בפחמן דו-גפרי
- מה יכולה להיות הסיבה לכך שברום מסוכן בנשימה וגורם לכוויות בעור ובעיניים?
- כיצד ניתן לטפל בדליפה של ברום (או כפי שנהוג לומר לנטרל את הברום)?
- ציין יתרונות וחסרונות של כל אחת מהשיטות שהצעת בתשובתך.
- הברום הוא חומר משתך (קורוזיבי) ביותר, ובמיוחד כשהוא רטוב. ממה נובעת תכונה זו? מהן השלכותיה?

שיתוך (קורוזיה): תהליך בו חל קלקול של חומר מוצק (בדרך כלל מתכתי) כתוצאה ממגע עם חומרים אחרים. הקלקול בדרך כלל כרוך ביצירת חורים, סדקים או התפוררות החומר. תהליך זה גורם לשינוי התכונות המכניות של החומר וכתוצאה מכך לאי התאמתו לייעודו.

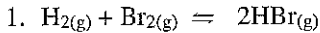
* Parts Per million-ppm, חלקיקים למיליון.

התגובות הכימיות של ברום

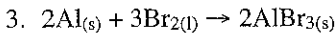
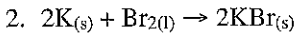
כאמור, מיד עם גילוי הברום החלו בחקירת תכונותיו, בהכנת תרכובות רבות שלו ובאיסוף מידע לאיפיון תכונותיהן.

כפי שכבר ציינו קודם, מגיב הברום בתגובות חמצון-חיזור עם מיגוון רחב של חומרים, לעיתים כמחמצן ולעיתים כמחזור. בתגובות מסויימות עובר הברום חמצון-חיזור עצמי, כלומר חלק מאטומי הברום מחמצנים (דרגת החמצון שלהם יורדת) וחלק מהם מחוזרים (דרגת החמצון שלהם עולה). להלן מפורטות חלק מהתגובות החשובות ביותר של הברום. רוב התגובות כבר מוכרות לך מלימודיך הקודמים.

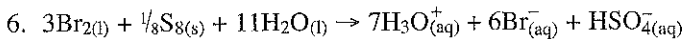
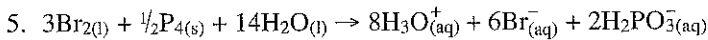
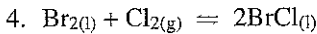
תגובה עם מימן:



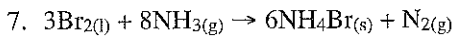
תגובות עם מתכות שונות, כגון:



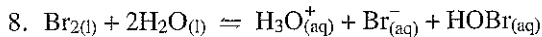
תגובות עם אל-מתכות שונות, כגון:



תגובה עם אמוניה:



תגובה עם מים:

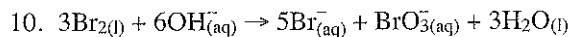


תגובתו של הברום בתמיסה מימית תלויה ב-pH, ובהתאם לכך עשויים להתקבל תוצרים שונים.

בתמיסה בסיסית מאוד ($\text{pH} > 13$) מתרחשת התגובה:

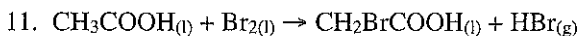


בתמיסה פחות בסיסית ($\text{pH} < 13$) מתרחשת התגובה:

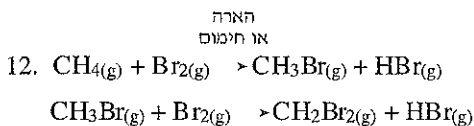


הברום מגיב עם תרכובות אורגניות רבות. נביא רק מספר דוגמאות. תוכל להשתמש בדיעותיך ולהוסיף תגובות עם חומרים אחרים.

תגובה עם חומצה אצטית:

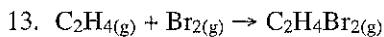


תגובה עם מתאן⁶:

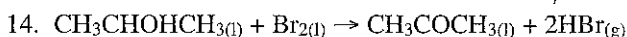


וכו'

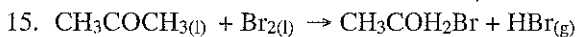
תגובה עם אתן:



תגובה עם כוהל שניוני, למשל 2-פרופאנול:



תגובה עם קטון, למשל אצטון:



- מייך את התגובות לעיל לתגובות בהן הברום משמש כמחמצן, כמחזר או שניהם גם יחד.
- בתגובה בין ברום למים נוצר $\text{HOBr}_{(aq)}$. נסה להסביר (במונחי שיווי משקל) מדוע מקבלים בסביבה בסיסית מאד יוני $\text{OBr}^-_{(aq)}$.
- השווה את התגובה המתרחשת בין ברום לבין מתאן עם התגובה המתרחשת בין ברום ואתן מבחינת: תנאי התגובה, אנרגיית השפעול, מספר התוצרים, נקיון התוצר.
- אמוניה מגיבה עם ברום על פי המיסוח הבא:

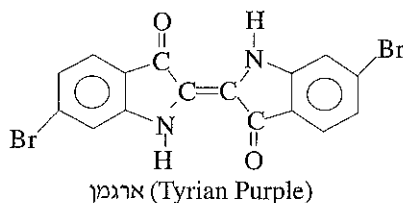
$$8\text{NH}_3_{(g)} + 3\text{Br}_{2(l)} \rightarrow 6\text{NH}_4\text{Br}_{(s)} + \text{N}_{2(g)}$$
- מהו סוג התגובה (חומצה-בסיס, חמצון-חיזור, שיקוע וכדו')? מה ידוע לך על היישומים של תגובה זו? (העזר במקורות מידע שונים).
- כיצד ניתן לוודא שכל הברום הגיב ולא נותר ממנו עודף?

6 ראה פרוט על ניסויים בין ברום לבין אלקאן ואלקן בספר "הכימיה אתגר - תרכובות פחמן", מאת נאווה מילגר, בהוצאת המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע.

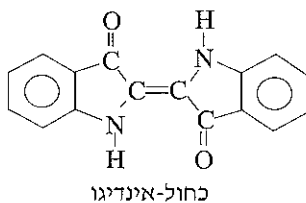
3.א – מברום לתרכובותיו

סקירה הסטורית

אלפי שנים לפני שהתגלה היסוד ברום היתה שימושית אחת מתרכובותיו האורגניות - הארגמן (Tyrian Purple). החומר, שהופק על-ידי הפניקים כ-1500 שנה לפני הספירה, נחשב במשך כ-3000 שנה לאחר מכן כצבע חשוב ויקר ביותר. אין פלא איפוא, כי גם בתנ"ך יש עדות לקיומו של הארגמן. בספר שמות, למשל, מוזכרים הארגמן והתכלת ששימשו בין השאר להכנת הפרוכת במשכן וכן להכנת בגדי הכוהנים. הקיסרים הרומיים הכריזו כי רק לבני משפחת המלוכה קיימת הזכות ללבוש בגדים הצבועים בצבע ארגמן, וכך היה שמו - "צבע הקיסרים"⁷. הצבע הוכן מנוזל בשם Murex. נוזל זה מוצא מחלזונות שנמצאו לאורך חופי הים התיכון. הנוזל חסר הצבע הפך בתהליך סודי, אשר היה ידוע למתי מעט, לצבע ארגמן. כיום ידוע כי מולקולת הארגמן הינה מסובכת למדי ומכילה 2 אטומי ברום:



למרות שהכימיה לא היתה בתקופה זו "מדע" מפותח, כבר אז ידעו מעבדי העורות במזרח התיכון כיצד להפוך צבע ארגמן לצבע כחול-אינדיגו. בפועל, מבלי לדעת על המבנה המולקולרי, הם הוציאו ממולקולות הארגמן את אטומי הברום וקבלו כחול-אינדיגו.



7 לקריאה נוספת:

- צבע מהטבע. על צבעים טבעיים בעת העתיקה. בעריכת חגית שורק ואיתן איילון. מוזיאון ארץ ישראל-תל-אביב.
- The Royal Purple and The Biblical Blue, Keter Publishing House, Jerusalem
- הכימיה של טקסטילים עתיקים. מאת פרופ' צבי קורן. כימיה, גיליון 20, 1994 (תמונת החילוון בעמ' הבא נלקחה ממאמר זה). פרופ' קורן הוא ראש החוג לכימיה תעשייתית בביה"ס הגבוה ע"ש שנקר ומנהל מרכז אדלשטיין לטקסטילים עתיקים.

יש הוכחות לכך שתהליך זה נעשה באמצעות קרינת השמש ולפיכך היה כנראה אחד מהתהליכים הפוטוכימיים התעשייתיים העתיקים ביותר בתולדות האנושות.

תהליך פוטוכימי: תהליך כימי המתבצע באמצעות אור הנבלע על ידי המערכת.⁸



החילוץ ממנו הפיקו בתקופות קדומות את צבע הארגמן

כפי שצינו קודם, לאחר גילוי הברום (ב-1825) נעשו בדיקות מעבדתיות מקיפות ונתגלו רבות מהתגובות האופייניות לו. החיפוש אחר שימושים שייעשו בברום ובתרכובותיו החל מיד עם גילויו וכבר ב-1835 הוכנו תרופות ראשונות המכילות ברום אשר שימשו להרגעה. גילוי הברום התרחש בערך באותה תקופה בה הומצאה טכניקת הצילום והחלו להשתמש בכסף ברומי, AgBr , למטרה זו.⁹ כך נעשה הברום לראשונה (ב-1840) מוצר תעשייתי. כל זמן שהצילום נעשה בשיטות פרימיטיביות ולא היה נפוץ, היתה הדרישה לברום קטנה.

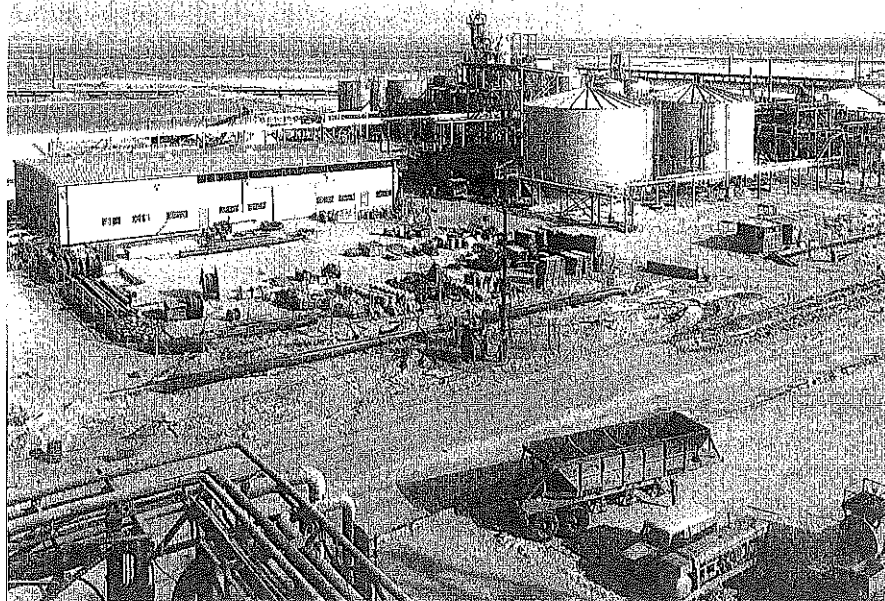
ההתפתחות בטכנולוגיית הצילום הביאה לשינוי דרמטי בביקוש לברום. השיפור שחל בשיטות הצילום, המצאת הפילם, התמונה הנעה והצילום בקרני-X (למטרות רפואיות בעיקר), הגבירו את הדרישה לכסף ברומי. מאוחר יותר התרחב השימוש בצילום למטרות מחקר, למטרות צבאיות ובמיוחד לצילום חובבני. באותן שנים החלו במקביל להשתמש בברום גם לתעשיית הצבעים (למשל להכנת הצבע אאוזין המיוצר עד היום). כל אלו גרמו לדרישה גוברת ועולה לברום. ב-1846 החל לפעול בארה"ב המפעל הראשון להפקת ברום וב-1865 הוקם המפעל הראשון באירופה. ב-1889 הקים הרברט דאו (Herbert H. Dow), שנחשב לאבי תעשיית הברום המודרנית את המפעל הגדול הראשון בארה"ב.

8 לכל תהליך פוטוכימי תחום ספקטרלי מסוים המאפשר את ביצועו.

9 ראה סעיף 5.1: שימוש בתרכובות ברום לצילום.

ציוני דרך

- 1774 - גילוי הכלור - (C. W. Scheele)
- 1811 - גילוי היוד - (Bernard Courtois)
- 1825 - גילוי הברום - (A. J. Balard)
- 1835 - **תרופות ראשונות המכילות ברום**
- 1840 - התחלת השימוש בכסף ברומי **לצילום** והכנת **צבעים** מכילי ברום (אאווין)
- 1846 - המפעל הראשון להפקת ברום בארה"ב
- 1865 - המפעל הראשון להפקת ברום באירופה (גרמניה)
- 1886 - גילוי הפלואור - (H. Moissan)
- 1889 - פיתוח תהליך חדשני להפקת ברום ממי-ים על ידי Herbert H. Dow (ארה"ב) אבי תעשיית הברום המודרנית



המפעל בסדום בשנותיו הראשונות

עלייתו ונפילתו של ה-EDB (אתילן דו-ברומי)

מלחמת העולם הראשונה והשנים שאחריה הביאו להתפתחות ניכרת בתעשיית המכוניות ובמיוחד בארה"ב. השימוש ההולך וגדל במכוניות הביא לפיתוח מנועים חזקים יותר, ובעיקר על ידי הגברת הדחיסה של האוויר והדלק. שינוי זה גרם להוצרות תופעה הקרויה "דפיקות מנוע", אשר נבעה מההצתה העצמית של הדלק וגרמה להורדת היעילות של פעולת המנוע.

מדענים מצאו כי הוספת חומרים מסויימים לדלק עשויה לחקטין בעייה זו של "דפיקות מנוע" ועל ידי כך לפרוץ את הדרך לפיתוח מנועים יעילים יותר ומכוניות מהירות יותר. החומרים הראשונים שהוצעו היו יקרים מדי, או לא יעילים מספיק. ב-1922 הוכיחה החברה האמריקאית את יעילותה של התרכובת עופרת ארבע-אתילית, $Pb(C_2H_5)_4$ (Tetra Ethyl Lead או בקיצור Tel), שמחירה הזול יחסית עשה אותה למבוקשת ביותר.

הוספת העופרת הארבע-אתילית אמנם מונעת את ההצתה העצמית של הדלק, אך לרוע המזל נתגלתה בעייה חמורה ביותר הנובעת מהשימוש בחומר זה. יחד עם בעירת הדלק מתרחש תהליך של חמצון העופרת הארבע-אתילית ומתקבלת עופרת חמצנית, $PbO_{(s)}$, השוקעת על חלקי המנוע ומשבשת את פעולתו. המחקר התמקד בחיפוש אחר חומרים שימנעו את שקיעת העופרת החמצנית. הפתרון היה למצוא חומר שיתרכב עם העופרת וייצור תרכובות נדיפות שתוכלנה לצאת יחד עם שאר גזי הפליטה. באופן כזה הגיעו לבסוף ל-2,1 דו-ברומו אתאן, CH_2BrCH_2Br (או כפי שנקרא אתילן דו-ברומי ובקיצור EDB), היוצר תוך כדי שרפתו תרכובות עופרת נדיפות (למשל: $PbBr_2$, $PbBr_4$).

דלק מכיל עופרת (Leaded fuel): דלק שהוסיפו לו את התרכובת עופרת ארבע-אתילית. מטרת תוסף זה למנוע תופעות של הצתה עצמית ו"דפיקות מנוע".

- האם מוכרים בארץ דלק מכיל עופרת?
- מהי לפי דעתך הסיבה לכך?

שם החומר: 1, 2 די ברומו אתאן - $\text{CH}_2\text{BrCH}_2\text{Br}$ (EDB)

גבולות

נוזל נדיף וחסר צבע, בעל ריח מתוק, מתפרק לאט באור
מסה מולרית: 187.88 גר'/מול
טמ' היתוך: 9.8°C
טמ' רתיחה: 132°C
צפיפות: 2.18 גר'/סמ"ק ב- 20°C
מסיסות במים: נמוכה. 0.43 גר' ב-100 גר' מים ב- 30°C
מסיסות בממסים אחרים: גבוהה בממסים אורגניים.
דליקות: לא דליק ולא מתפוצץ
רעילות: רעיל ביותר הן כנוזל והן כגז. בנשימה ובמגע עם העור
והעניניים. הטיפול בו מחייב נקיטת אמצעי בטיחות.
תגובות אופייניות:
* מגיב עם אלומיניום או מגנזיום לקבלת אתן או פולימרים.
* מגיב עם בסיסים חזקים לקבלת אתן או כוהל.
* מגיב עם מחמצנים חזקים.
* מגיב עם אמוניה נוזלית.
* מתפרק בהשפעת אור או חום.
* יכול להתפלמר בחשיפה לחום ו/או לאור.
שימושים: להדברת מזיקי קרקע ולהדברת חרקים בחקלאות,
תוספת לדלק וממס בתעשייה הכימית ובתעשיית
התרופות.

מציאת ה-EDB כתוספת המשפרת את יעילות המנועים המבוססים על דלק נוזלי
והתחלת ייצורו, הפכו את הברום למוצר בעל חשיבות איסטרטגית רבה. מדינות
רבות עשו מאמצים על מנת להפיק ברום ולייצר EDB ועל ידי כך להיות בלתי
תלויות באספקתו ממדינות זרות.

אנו רואים פה דוגמה להשתלשלות מעניינת של ארועים המשלבים התפתחות
טכנולוגית בד בבד עם התפתחות מדעית ושתיהן גם יחד משפיעות על גורמים
חברתיים, כלכליים וסביבתיים.

במקביל לשימוש ב-EDB כתוספת לדלק הוכחו תכונותיו כמדביר מזיקים בקרקע
ובתוצרת חקלאית שנועדה לאיחסון ממושך (פרוט על כך יבוא בהמשך בפרק ו').
הביקוש לברום הלך והתרחב ונערכו חיפושים אחר מקורות חדשים להפקתו. לשם
כך נבדקו אפשרויות שונות להפקת ברום מאוקינוסים וימות והוקמו מפעלים
אחדים בארה"ב, באירופה ובארץ ישראל (ב-1932).

כמויות הברום שהופקו הלכו וגדלו ומרביתן היתה מיועדת לייצור ה-EDB.
בתקופה שבין 1936 ל-1950 גדל הביקוש ל-EDB והוא עלה בהדרגה מ-70%
ל-95% מהצריכה הכוללת של ברום בעולם.

ברום מארץ ישראל וחשיבותו במלחמת העולם השנייה¹⁰

לפני מלחמת העולם השנייה לא היו באנגליה מפעלים להפקת ברום אך הוכנו מספר תרכובות של ברום מברום שהובא מארץ ישראל במהלך מלחמת העולם השנייה החלה אנגליה לייצר את ה-EDB שאיפשר ניצול יעיל של מטוסי הקרב, שיפר את ביצועיהם והפך למוצר אסטרטגי חשוב ביותר. כשגילו הגרמנים כי הברום המועבר מארץ ישראל משמש למטרות צבאיות ועלול לשפר את יכולת הלחימה של בנות הברית, הורו לאיטלקים להפציץ את האוניות נושאות הברום בעת מסען בים התיכון. בגלל רעילותו של הברום ויכולת השיתוך הרבה שלו, פגעה הפצצת האוניות הן בצוותים והן בחלקי המתכת שבאוניות והובלתו הופסקה. המשך אספקת הברום לאנגליה התאפשר רק בזכות שיטה חלופית להובלת ברום "לא מסוכן" שפותחה על-ידי חוקרים מהאוניברסיטה העברית בירושלים ומחברת האשלו. בשיטה זו הכינו מחברום סידן ברומי מוצק (CaBr_2) אותו הובילו ללא תקלות באוניות לאנגליה. מהסידן הברומי שהגיע לאנגליה חזרו והכינו את הברום הדרוש לייצור ה-EDB.

התבונן ב"כרטיס" של הברום וכמו כן ב"כרטיס" של סידן ברומי בעמ' 160 וענה על השאלות הבאות:

- מהם היתרונות והחסרונות של הובלת ברום? פרט.
- מהם היתרונות והחסרונות של הובלת סידן ברומי מוצק? פרט.

בשנים שלאחר מלחמת העולם השנייה הלך וגבר השימוש ב-EDB והגיע לשיאו בשנות ה-70. מדינות רבות הקימו מפעלים לייצור החומר והוא הפך לתרכובת הברום החשובה ביותר. במקביל החלו בהדרגה להרחיב את השימושים בברום ובתרכובותיו ולייצר תרכובות ברום נוספות. ב-1976 כבר היווה ה-EDB רק כ-70% מצריכת הברום בעולם.

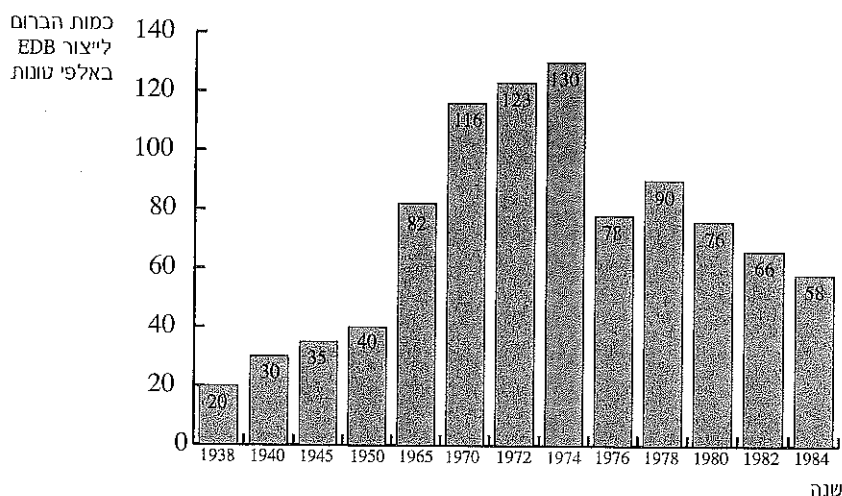
בסוף שנות ה-70 מצאו שתרכובות עופרת רעילות ביותר לאדם, ובמיוחד אותן תרכובות עופרת הנפלטות יחד עם גזי הפליטה בתהליך שריפת הדלק במנועים". המודעות ההולכת וגוברת לבעיות זיהום האוויר הביאה לפתיחת מאבק ציבורי למניעת השימוש בתרכובות עופרת כתוסף לדלק. במדינות אחדות אף פורסם תקן האוסר את השימוש בהן למטרה זו.

10 לקריאה נוספת: הברום מים המלח סייע לבריטים במלחמת העולם השנייה. ברומון, שבועות, תשמ"ט.

11 לקריאה נוספת: על הסכנה שבעופרת, מאת מיכאל גרבר, "לדעת", כרך י"ט, חוברת 9-10, עמ' 23-21.

**דלק נטול עופרת: (Unleaded fuel) דלק שאינו מכיל תוספת של עופרת
ארבע-אתילית.**

החל מ-1983 חל איסור השימוש בחומר זה בארה"ב ואליה הצטרפו ארצות
מפותחות נוספות. כתוצאה מכך הולך ופוחת מאז ייצור ה-EDB בעולם ומפעלים
רבים מייצרים כמויות קטנות יותר של חומר זה או נסגרים.
הגרף הבא מראה את כמות הברום שנדרשה לייצור ה-EDB בארה"ב בין השנים
1938 ו-1984:

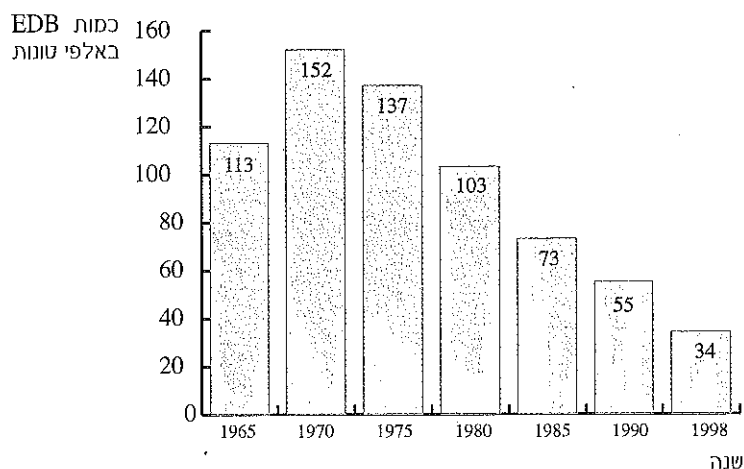


צריכת ברום לייצור תוספים לדלק בארה"ב

כיום, הולך ויורד השימוש ב-EDB כתוסף לדלק וגובר השימוש בדלק "נטול
עופרת", למרות שהינו יקר יותר. כמו כן נערך חיפוש אחר תחליפים מתאימים
המשפרים את איכות הדלק¹². גם השימוש ב-EDB בחקלאות כמדביר מזיקים
הלך ופחת במהלך השנים, זאת מכיוון שנמצא כי הוא מחלחל למי-התהום.

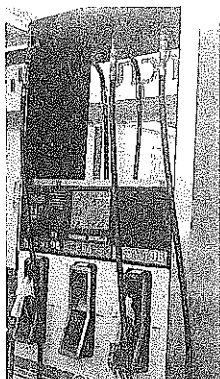
12 לקריאה נוספת: מאתאנוול בבניין, מאת מרית סלוין, "מדע", כרך ל' חוברת 5-6 עמ' 237-240

הגרף הבא כולל נתונים לגבי ייצור EDB בעולם לכל השימושים בין השנים 1965-1998:



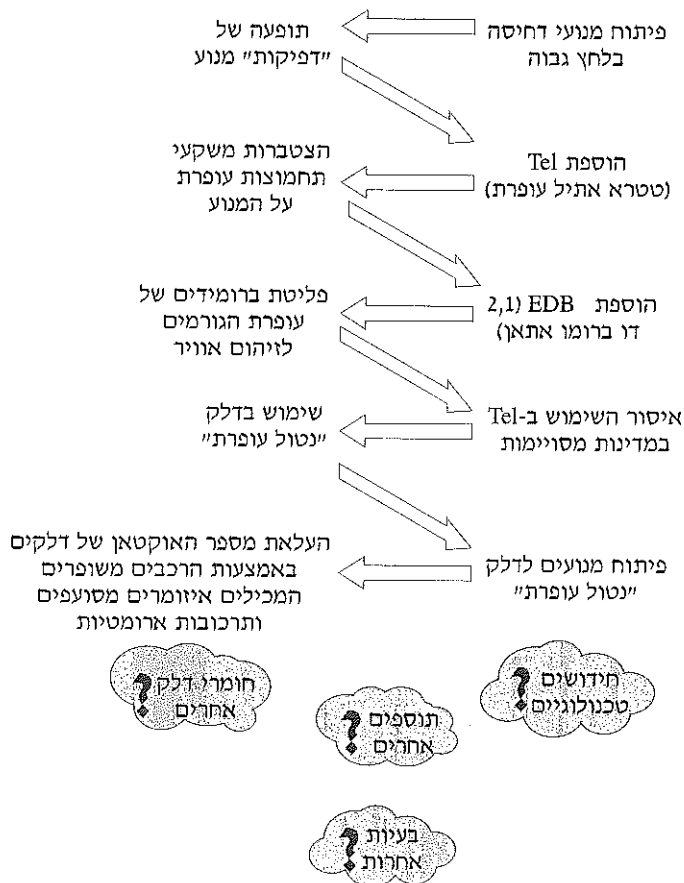
ייצור EDB עולמי לכל השימושים

ב-1990 היה ייצור ה-EDB בעולם כולו כ-55,000 טון, כמות הקרובה לזו שיוצרה ב-1944, שבה רק כ-20%-30 מצריכת הברום בעולם נוצלה למטרה זו. ירידה זו התרחשה למרות שחל גידול משמעותי ביותר במהלך השנים הללו בתחום צריכת הדלק. עובדה זו מצביעה באופן דרמטי ביותר על "ירידתו" של ה-EDB מ"גדולתו". מאז 1990 נמשכת מגמת הירידה בייצור ה-EDB בעולם. בשנת 1998 עמד ייצור ה-EDB בעולם על כ-34,000 טון, המהווים פחות מ-10% מכלל צריכת הברום בעולם. יש להניח שכמות זו תלך ותתרד ככל שהמודעות לאיכות הסביבה תעלה ויותר מדינות תאסורנה את השימוש בדלק המכיל עופרת ארבע-אתילית. הסכימה הבאה מדגישה את הקשר בין מדע, טכנולוגיה וסביבה ומראה כיצד פתרון לבעייה אחת עלול ליצור בעייה אחרת.



סוגי דלקים שונים למכירה

הסכימה הבאה מדגישה את הקשר בין מדע, טכנולוגיה וסביבה ומראה כיצד פתרון לבעיה אחת עלול ליצור בעיה אחרת.



כיום קיימות מכונות המונעות בעזרת אנרגיה סולרית או אנרגיה חשמלית (מצברים). כמו כן נבדקים דלקים שונים ותוספים שונים. זהו תהליך מתמשך, של חיפוש אחר פתרונות טובים יותר ויעילים יותר.

ציוני דרך

- 1922 תערובות המכילות EDB לסילוק שאריות העופרת במנועי מכוניות.
- 1923 יסוד חברות ענק להפקת ברום בארה"ב.
- 1940 14 מפעלים לייצור ברום בכל העולם.
- 1944 93% מהייצור העולמי של ברום מיועד לייצור ה- EDB.
- 1950-60 מפעלים נוספים להפקת ברום באירופה, ביפן, דרום אפריקה וישראל (1959). כניסת מוצרים חדשים המכילים ברום. 80%-85% מייצור הברום העולמי ל- EDB.
- 1975 כל הרכב החדש בארה"ב נוסע על דלק "נטול עופרת" רק 70% מכלל הייצור העולמי של הברום מיועד לייצור ה- EDB.
- 1983 איסור השימוש ב- EDB בארה"ב ובארצות מפותחות אחרות.
- 1988 ירידה תלולה בייצור ה- EDB. רק כ- 20% מייצור הברום העולמי ל- EDB. כמות הברום שנועדה לייצור ה- EDB יורדת לזו שהיתה בסוף מלחמת העולם השנייה.
- 1998 יצור ה- EDB בעולם הוא כ- 34,000 טון בשנה. פחות מ- 10% מכלל צריכת הברום בעולם.

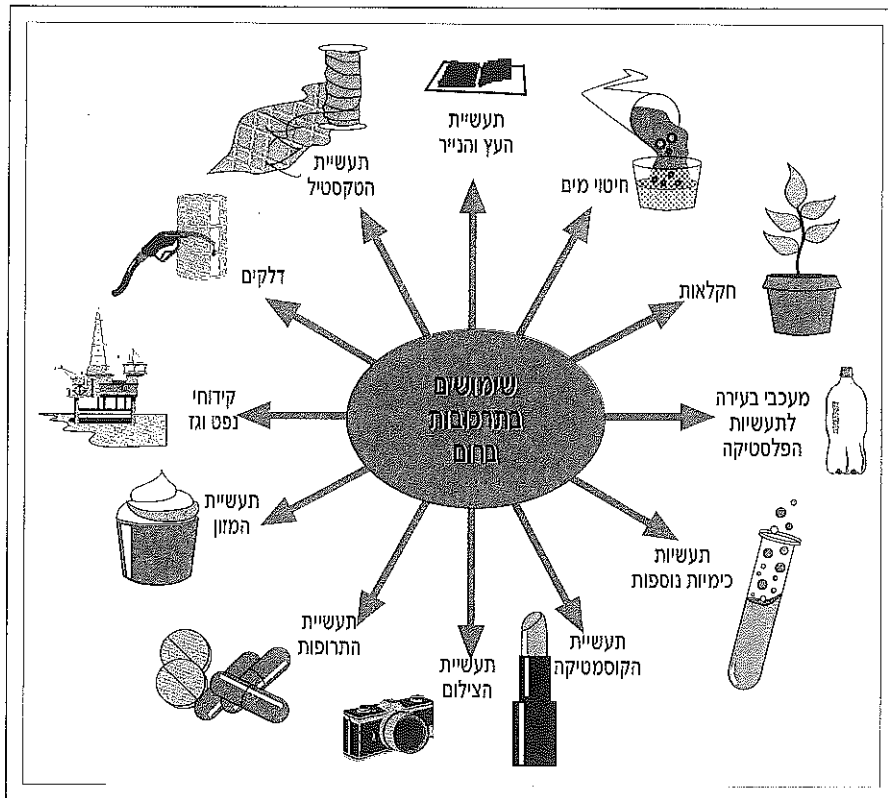


מכונית מונעת על חשמל

האם יש עתיד לברום אחרי ה- EDB?

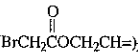
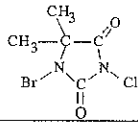
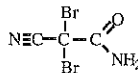
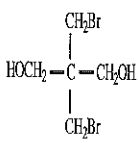
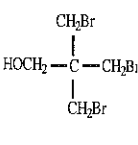
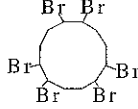
לכאורה, ניתן היה לצפות שירידת השימוש ב- EDB החל משנות ה-80 של המאה תגרום לירידה בביקוש לברום, וכך יבוא הקץ על שיגשוגה של תעשיית מוצרי הברום. לא כך היה: דעיכתו של ה- EDB לא גרמה לדעיכת חשיבותו של הברום עצמו. תכונותיו המיוחדות של הברום והתכונות המיוחדות והרב-גווניות שהוא מקנה לתרכובותיו, הביאו בעזרת המאמץ המחקרי המתמשך, להכנתן של מספר רב של תרכובות שונות בעלות שימושים רבים ומגוונים. מספר תרכובות הברום המיוצרות כיום הוא רב ולתרכובות רבות יש יותר משימוש אחד.

בסכימה הבאה מתוארים חלק ניכר מהשימושים של הברום ותרכובותיו:



לא נוכל להציג פה את כל תרכובות הברום ואף לא את כל אלו המיוצרות בארץ. נביא רק מספר דוגמות לתרכובות, שחלקן בוודאי מוכר לך.

שם החומר	נוסחה	צורת השיווק	תכונות מיוחדות	שימושים עיקריים
1. מימן ברומי	HBr	תמיסה מימית, גז	חומצה חזקה	מקור לברום בתהליכים תעשייתיים
2. נתרן ברומטי	NaBrO ₃	מוצק-אבקה	מחמצן חזק	לסלסול שער ולתהליכי צביעה של טקסטיל
3. אשלגן ברומטי	KBrO ₃	מוצק-אבקה	מחמצן חזק	תוספת בתעשיית המזון, במיוחד לאפייה כחומר העוזר להתפתח הבצק
4. אמון ברומי	NH ₄ Br	מוצק-אבקה	בחימום חזק משחרר אדי ברום	מעכב בעירה לטקסטיל, נייר ועץ, לאמולסיות צילום ותמיסות פיתוח ולתעשיית תרופות
5. אשלגן ברומי	KBr	מוצק-אבקה מגולען	בחימום חזק משחרר אדי ברום	לאמולסיות צילום ותמיסות פיתוח, לתעשיית תרופות
6. נתרן ברומי	NaBr	מוצק-אבקה מגולען	בחימום חזק משחרר אדי ברום	לאמולסיות צילום ותמיסות פיתוח, לתעשיית התרופות ולקידוחי נפט
7. סידן ברומי	CaBr ₂	תמיסה מימית 52% מוצק-אבקה	צפיפות גבוהה צמיגות גבוהה	לקידוחי נפט. להכנת תמיסות לקידוחי נפט לתעשיית התרופות
8. אבץ ברומי	ZnBr ₂	בתמיסה עם סידן ברומי, תמיסה מימית	צפיפות גבוהה צמיגות גבוהה	לקידוחי נפט. לסוללות.
9. ליתיום ברומי	LiBr	תמיסה מימית	בחימום חזק משחרר אדי ברום	למערכות מיוזג אוויר לתעשיית התרופות
10. חומצה חד-ברומו אצטית	CH ₂ BrCOOH	מוצק	גורמת שיתוך, עלולה להתפרק בטמפ' גבוהות	חומר ביניים לייצור ביוצידים ולייצור תרופות
11. ברומו מתאן (מתיל ברומיד)	CH ₃ Br	נוזל דחוס	רעיל ביותר	לחיתוי קרקע וגרעינים

שם החומר	נוסחה	צורת השיווק	תכונות מיוחדות	שימושים עיקריים
12. דו-ברומו מתאן	CH_2Br_2	נוזל	מתפרק בשריפה ומשחרר ברום	חומר ביניים לייצור ביוצידים וקוטלי חרקים, ממס אורגני
13. ברומו-כלורו מתאן	CH_2BrCl	נוזל	מתפרק בטמפ' גבוהות ומשחרר אדים רעילים של ברום וכלור	חומר ביניים לתהליכים אורגניים, ממס אורגני
14. חומצה α ברומו פרופנואית (BPA- α)	$\text{CH}_3\text{CHBrCO}_2\text{H}$	נוזל	גורמת לשיתוך, מתפרקת בקלות בטמפ' גבוהות	חומר ביניים בייצור תרופות
15. BBAB		נוזל	גורם לשיתוך, מתפרק בטמפ' גבוהות	ביוציד
16. 1 ברומו-3 כלורו-5,5-דו-מתיל-הידנתואין (הלוברום)		מוצק-טבליות	מתפרק מעל 160°C ומשחרר גזים רעילים	ביוציד לחיטוי מים
17. 2,2-דו-ברומו-3-ניטרילו פרופיונאמיד (DBNP)		מוצק-אבקה תמיסה מימית*	מתפרק מעל 160°C ומשחרר אדי ברום ומימן ברומי	רגיש לחום ולאור, ביוציד למי תעשייה* מגדלי קירור וכד'
18. דו-ברומו ניאו פנטיל גליקול (DBNPG)		מוצק-אבקה	מסיסות נמוכה במים, מסיסות גבוהה בממסים אורגניים קוטביים	מעכב בעירה
19. טרי-ברומו ניאופנטיל אלכוהול (TBNPA)		מוצק-אבקה	מסיסות נמוכה במים, מסיסות גבוהה בממסים אורגניים קוטביים	מעכב בעירה
20. הקסא-ברומו ציקלודוקאן (HBCD)		מוצק-אבקה	מסיסות זניחה במים, מסיסות נמוכה בממסים אורגניים, מסיסות גבוהה בכוחלים	מעכב בעירה

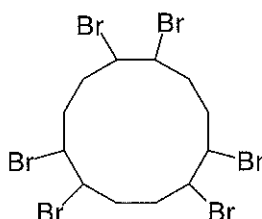
* החומר לא מסיס במים. מוסיפים לו אתילן גליקול המאפשר את מסיסותו.

עיין בנתונים בטבלה בעמ' 25-26 וענה על השאלות הבאות:

- אלו מבין החומרים בטבלה יהיו לדעתך מסיסים טוב במים אך לא יתמוססו היטב בממסים לא קוטביים? הסבר.
- אלו מבין החומרים בטבלה יהיו לדעתך מסיסים טוב יותר בממסים לא קוטביים? הסבר.
- נסה לבדוק האם המיון שעשית תואם את השימושים השונים של החומרים:

חלק מהתרכובות בעלות מולקולות מסובכות יותר ואולי אף תראנה כך כבעלות נוסחות מבנה מוזרות ביותר.

למשל חומר מס' 19 בטבלה שנוסחת המבנה שלו נראית כ"ציור"¹⁰



חומר זה מוסיפים לפולימרים שונים על מנת לעכב את בעירתם. (נרחיב את הדיון על כך בפרק ו').

אם נבחן היטב את הטבלה נראה שלעיתים קרובות מולקולות השונות ביניהן באטום אחד בלבד יכולות להיות שונות לחלוטין ועקב כך להביא להבדלים גדולים בתכונות החומרים ובאפשרויות השימוש בהם.

האם תוכל למצוא בטבלה דוגמאות לכך? פרט.

אין פלא איפוא, כי לא קיים למעשה גבול לרב-גווניות לתכנון ולהכנה של תרכובות חדשות ומגוונות. לכך נתייחס גם בפרקים הבאים. המציאות הוכיחה כי דעיכתו של ה- EDB לא הביאה לחיסולו של "ענף הברוס". יתר על כן, היא אף האיצה את ייצורן של תרכובות חדשות ופתחה פתח לשימושים חדשים בברוס ובמוצרי.

¹⁰ יש לקחת בחשבון שזוהי הצגה סכמטית דו-מימדית ולא הצגה תלת-מימדית של המולקולה כפי שהיא קיימת במציאות. כך גם נעשה לגבי שאר המולקולות בספר זה. ישנן תוכנות מיוחדות שבעזרתן ניתן להכין מודלים תלת מימדיים קרובים יותר למציאות. דוגמאות תוכל לראות באתר האינטרנט של קבוצת הכימיה במחלקה להוראת המדעים במכון ויצמן למדע: <http://stwi/weizmann.ac.il/G-Chem/>

4.4- ברום בעולם

נפיצות הברום

כאמור מופיע הברום בטבע, כמו ההלוגנים האחרים, בעיקר בתרכובות עם מתכות.

- אילו תרכובות הלוגנים מצויות, לדעתך, במערכת הסלעים של כדור הארץ (גיאוספירה)? הבא דוגמאות.
- אילו תרכובות הלוגנים מצויות, לדעתך, במערכת המים של כדור הארץ (הידרוספירה)? הבא דוגמאות.
- חפש במקורות מידע שונים נתונים לגבי נפיצותם היחסית של ההלוגנים השונים על פני כדור הארץ.

הן במערכת הסלעים והן במערכת המים של כדור הארץ מצוי הברום במקומות בהם מצוי הכלור. העובדה שהרדיוס היוני של הברום ($1.96\text{\AA}$) דומה לרדיוס היוני של הכלור ($1.84\text{\AA}$) מסבירה את יכולתו להחליפו בתרכובות יוניות רבות.

כפי שניתן לצפות, מצוי הברום במערכת הסלעים של כדור הארץ בצורת תרכובות יוניות בעלות מסיסות נמוכה. לעומת זאת, במערכת המים של כדור הארץ מופיע הברום כיוני ברומיד מומסים, $\text{Br}^-_{(\text{aq})}$. ניתן להניח כי בעבר הגיאולוגי הקדום היה מצוי הברום במערכת הסלעים. כתוצאה מתהליכי בלייה של הסלעים עברו ברומידים לגופי המים של כדור הארץ (אוקיינוסים, ימות למיניהן, בארות, מעיינות וכו'). ריכוז יוני הברום בגופי מים שונים עשוי להשתנות מריכוז נמוך מאוד, כמו למשל במי נהרות, ועד לריכוז גבוה יותר במי-מלחות בהן מצטברים במהלך השנים כמויות גדולות של מלחים.

עם רוב המתכות יוצר הברום תרכובות יוניות קלות תמס. אין פלא איפוא, שהמינרל¹⁵ הראשון מכיל הברום שנתגלה (במקסיקו ב-1841) היה דוקא מינרל קשה תמס הנקרא ברומיריט, AgBr .

אמנם רוב הברום בטבע מצוי בסלעים, אך ריכוזו בהם נמוך יחסית ואינו עולה על 10 מילגרם לק"ג. ידועות רק מעט תרכובות ברום שיכולות להחשב כמינרלים ורובן דומות לברומיריט. אלו הם מינרלים של כסף עם הלוגנים שונים, למשל, $\text{Ag}(\text{Br}, \text{I})$ ו- $\text{Ag}(\text{Br}, \text{Cl})$ ¹⁶. מינרלים אלו נוצרו כנראה בתגובה בין מלחי הלוגנים

15 מינרל: תרכובת יונית המופיעה בטבע.

16 צורת רישום זו מראה את הרכבו של המינרל שבו קיימים יוני Br^- , Ag^+ ו- Cl^- , שהוא למעשה מעין תערובת של AgBr ו- AgCl .

מסיסים לבין מינרלים של כסף. נציין כי בכל המינרלים הקיימים בטבע גדול ריכוז הכלור פי 100-300 מריכוז הברום ואילו ריכוז היוד קטן בהרבה מזה של הברום. תמונה דומה קיימת גם במקורות המים אך יש הבדלים בריכוזי הכלור והברום וביחס ביניהם במקורות השונים (ריכוז הכלור גדול פי 200-700 מריכוז הברום).

בטבלה הבאה נתונים על תכולת הברום במקורות שונים:

המקור	ריכוז הברומידים	המדינות העיקריות המפיקות
סלעים ומכרות מלח	בסביבות 10 מג' / ק"ג (אחרי הפרדת האשלג מתקבלת תמיסה המכילה 3-1 גר' / ליטר ברומידים)	גרמניה, צרפת
מי-ים ואוקיינוסים	65 מג' / ליטר	בריטניה, צרפת, יפן, איטליה, ספרד, הודו
תמלחות תת-קרקעיות	3-4 גר' / ליטר	ארה"ב (איזור משיגן וארקנזאס), בריה"מ (איזור הים השחור)
ימות ואגמים מלוחים	2-6 גר' / ליטר	ישראל, ים-המלח, 5-6 גר' / ליטר (לאחר הוצאת האשלג 10-12 גר' / ליטר) ארה"ב, ימת סרילס

- לאלו מקורות יש לדעתך יתרון יחסי בהפקת ברום? נמק.
- מהם השיקולים על פיהם ניתן יהיה לבדוק את הכדאיות בהפקת ברום?
- לאילו מדינות כדאי לדעתך להפיק ברום?
- חפש במקורות מידע שונים ובדוק אילו מדינות הן יצרניות הברום הגדולות בעולם.

ייצור הברום בעולם

כדאיות הפקת הברום וההחלטה להפיק אותו הלכה למעשה קשורות במספר גורמים שחלקם כבר הוזכרו קודם:

- שימושים היוצרים ביקוש לברום.
- קיום מקורות מתאימים לברום.
- יכולת טכנולוגית.
- יכולת מימון.

בגורם הראשון דנו בהרחבה קודם (סעיף א.3) והראנו את השלבים שהובילו מגילוי הברום להכנת תרכובותיו ולניצול הברום ותרכובותיו לשימושים השונים. כפי שתארנו היתה ארה"ב המדינה הראשונה שהחלה בהפקת ברום וזה בגלל קיומם של כל ארבעת הגורמים המפורטים לעיל. בגלל חשיבותם הרבה של הברום ותרכובותיו לענפי התעשייה השונים ולצרכים צבאיים הלכו מדינות רבות בעקבות ארה"ב והקימו מפעלים להפקת ברום. לא כל המדינות בורכו במקורות טבעיים מתאימים להפקת ברום ורק לחלק מהן מקורות עשירים בברום.

הידעת?

תהליכי הייצור של ברום ממי-ים או ממקורות אחרים, שאינם עשירים בברום, מורכבים יותר מהתהליכים בהם משתמשים מלכתחילה בתמיסות מרוכזות. בדרך כלל כוללים תהליכי ייצור אלו מספר שלבים מקדימים המתבצעים כדי לקבל תמיסות מרוכזות יותר, אשר מהן מופק הברום¹⁷.

- הצע דרכים להעלאת הריכוז של תמיסות המכילות יוני ברום?
- מהם, לדעתך, היתרונות והחסרונות של הדרכים שהצעת? נמק.

17 ראה לדוגמא שאלה מס' 5 בבחינת בגרות בכימיה, השלמה מ-3 ל-5 יחידות לימוד, תשנ"א.

בטבלה הבאה נתונים על ייצור הברום העולמי (אלפי טון לשנה) ועל המדינות (החשובות ביותר) המפיקות ברום. כמו כן מובאים המקורות להפקת הברום בכל אחת מהמדינות.

המדינה	1978	1982	1988	1992	1994	1997	המקור
צרפת	16.2	9.1	15	3.2	2.2	2.2	מי-ים, תמיסות סופיות ממפעל לייצור אשלג
גרמניה מערבית	3.9	3.1	2.8	-	-	-	תמיסות סופיות ממפעל לייצור אשלג
הודו	0.5	0.3	0.8	1.3	1.4	1.5	מי-ים
ישראל	34.5	69.8	118	135.0	135.0	184	ים המלח, תמיסות סופיות ממפעל לייצור אשלג
איטליה	0.6	0.6	0.3	0.3	0.3	0.3	מי-ים
יפן	12.0	12.0	20.0	15.0	15.0	15.0	מי-ים
ספרד	0.4	0.4	-	0.25	0.2	0.2	מי-ים
בריטניה	24.2	29.8	27.0	29.9	33.8	28.0	מי-ים
בריה"מ	15.0	68.0	50.0	24.0	15.0	12.0*	תמלחות תת-קרקעיות
ארה"ב	202.5	181.9	200	171.0	195.0	250.0	תמלחות תת-קרקעיות
סין	-	-	-	16.6	31.4	30.0	תמלחות תת-קרקעיות
עולמי	309.8	375.0	433	397.0	429.0	523.2	

עיין בטבלה לעיל וציין את המדינות בהן ייצור הברום:

- עולה עם השנים
- יורד עם השנים
- נשאר קבוע עם השנים

מה עשויות לדעתך להיות הסיבות לנתונים אלה בכל אחד מהמקרים:

הטבלה מראה כי ברוב המדינות יורד ייצור הברום או נשאר כמעט קבוע, להוציא ארה"ב וישראל ולאחרונה "נכנסה לתמונה" גם סין. באופן טבעי, תלויה שיטת ההפקה של הברום בטיב המקור ובריכוז יוני הברום בו. ככל שריכוז יוני הברום נמוך יותר, הפקתו קשה יותר ויקרה יותר. באופן כזה עלות הפקת הברום ממי-האוקיינוס (בבריטניה ובצרפת) גבוהה בערך פי 2 מזו הכרוכה בהפקת הברום ממי-בארות ותמלחות (בארה"ב) או מימות מלוחות (בישראל).

* מבוסס על שלושה מקורות: אורביג'אן (2.0), טורקמניסטאן (7.0), אוקרינה (3.0).

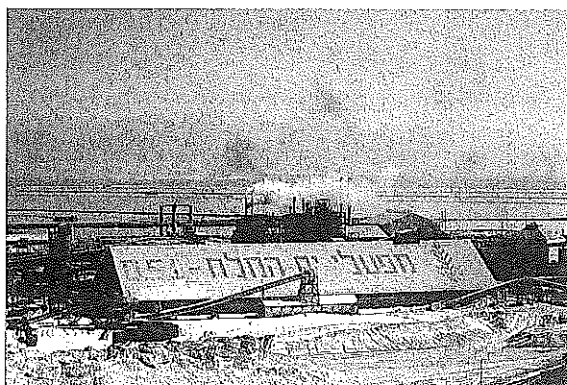
הגורמים העיקריים המשפיעים על עלות ההפקה של הברום:

- עלות ההפקה ממקור בו מצוי הברום כיונים בתמיסה נמוכה מזו הכרוכה בהפקתו מסלעים.
- עלות ההפקה ממקור שעל פני השטח נמוכה מזו של מקור תת-קרקעי. מקור תת-קרקעי מחייב קידוח, וככל שהקידוח עמוק יותר עלותו גבוהה יותר.
- ההפקה מתמיסה בה ריכוז יוני הברום נמוך יותר יקרה יותר בהשוואה להפקתו מתמיסה בה ריכוז יוני הברום גבוה.
- מכיוון שהפקת הברום צורכת אנרגיה (כפי שיפורט בהמשך), אנרגיה זולה וזמינה מורידה את עלות ההפקה.
- עלות ההפקה ממקור בו מצויים בתמיסה גם חומרים אורגניים (כתוצאה ממגע עם שכבות נפט) גבוהה.

שילוב של ארבעת הגורמים העיקריים הללו משפיעה על הכלכליות שבהפקת הברום ומביאה להגבלת מספר המדינות המייצרות אותו. כל הנתונים הללו מסבירים את יתרונה הבולט של ישראל בהפקת הברום:

- ים המלח הוא ימה על-קרקעית.
- ריכוז יוני הברום בים המלח הינו הגבוה ביותר בעולם.
- מיקומו של ים המלח באיזור חם, בו קיימת התאיידות גבוהה ואנרגיה סולרית הניתנת לניצול במשך כל השנה, מוזילה את הייצור של הברום באופן משמעותי ביותר.
- ריכוז החומרים האורגניים נמוך מאד.

על-פי מחקרים וחישובים שנעשו לא קיימת סכנה שכמות הברום בים המלח תרד ותחייב לשנות את שיטת ההפקה. יתר על-כן חישוב שנעשה מורה כי גם אם הפקת הברום תגדל אין לחשוש מניצול "מאגר" הברום בטווח של 800 שנה ויותר.



מפעלי ים המלח בסדום

ייצור תרכובות ברום בעולם

לברום עצמו שימושים מועטים ביותר ורובו משמש לייצור תרכובות (שחלק מהן כבר צוינו בפרקים הקודמים). בסעיפים קודמים תארנו את שלבי ההתפתחות בייצור תרכובות הברום, החל מתקופת גילוי הברום וייצור תרכובותיו הראשונות ועד לייצור ה-EDB אשר היה במשך תקופה ארוכה תרכובת הברום החשובה ביותר.

את ייצור תרכובות הברום ניתן לחלק לפי התקופות הבאות:

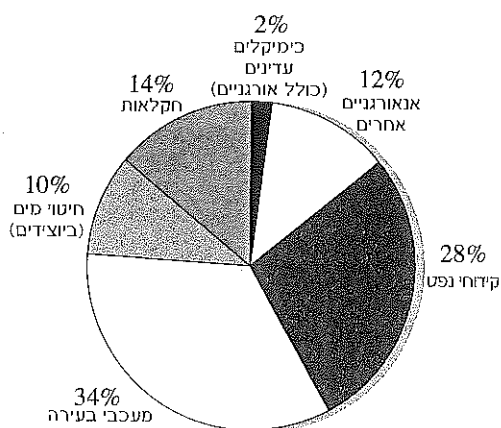
התקופה	שימושים חדשים	השימושים (העיקריים)
1900-1825	תרופות להרגעה צבעים צילום	צילום
1950-1901	EDB כתוספת לדלק (1922) מוצרים לחקלאות טיהור מים	תוספת לדלק
1970-1951	טיהור מים מכרות (הפרדת עפרות)	תוספת לדלק
1990-1971	מעכבי בעירה קידוחי נפט וגז	שימושים חקלאיים מעכבי בעירה תוספת לדלק (בירידה)
1998-1991	מערכות קרור כימיקלים עדינים	מעכבי בעירה נוזלים לקידוחי נפט שימושים חקלאיים חומרים לטיהור מים (ביוצידים)

ומה הלאה? על שאלה זו קשה לענות.

רמז לעתיד נוכל אולי לקבל מהטבלה הבאה המראה את השינויים שחלו בייצור תרכובות הברום בעולם במהלך העשור האחרון.

1997	1988	1985	1980	1970	השנה
531	388	350	295	375	ייצור שנתי של תרכובות ברום (אלפי טון)
החלק היחסי באחוזים					השימוש (החומר)
5%	13%	**21%	32%	*67%	EDB
14%	15%	20%	19%	20%	חקלאות
33%	25%	23%	20%	-	מעכבי בעירה
24%	19%	11%	7%	-	נוזלים לקידוחי נפט
24%	28%	25%	22%	13%	צילום שוות תרופות צבעים חיטוי מים נוזלי קרור

אנו רואים שמאז שנות ה-80 קיימת מגמה שלא להתמקד במוצר אחד אלא לפזר את הייצור למגוון של חומרים המיועדים לשימושים שונים. נטייה זו באה לידי ביטוי גם בחלוקת מוצרי קבוצת הברום המתוארת בסכימה הבאה עבור 1998:



חלוקת מוצרי קבוצת הברום לפי מכירות (1998)

* רוב ה-EDB משמש כתוסף לדלק.

** רוב ה-EDB משמש בחקלאות להדברת מזיקים. השימוש כתוסף לדלק רק כ-1%.

פיק 2 ברום מים המלח

ב.1 – ברום מים המלח, מדוע?

תכולתם של מי-ים המלח זכתה לתשומת לב רבה עוד לפני שהתגלה הברום על-ידי באלאר ויש עדויות לכך שכבר במאות ה-17 וה-18 נעשו להם אנליזות שונות. החיפוש אחר הברום במי-ים המלח החל מיד אחרי גילויו. הראשון שעשה אנליזה למי-ים המלח היה לבואזיה ואחריו גי-לוסק וגמלין, שב-1827 קיבל במעבדתו תוצאות הסוטות רק ב-20% מהערך האמיתי של ריכוז יוני הברום במי-הים. במהלך המאה ה-19 נעשו אנליזות רבות למי-ים המלח¹ והחוקרים היו מודעים לכך שמים אלו עשירים באופן מיוחד ביוני ברום. תאוריות אחדות מנסות להסביר את הווצרותו של ים המלח והריכוז הגבוה של המלחים בו.²

לדעת המדענים חלה הווצרותו של ים המלח לפני מאות מיליוני שנים בתקופות גיאולוגיות קדומות. בקעת הירדן, בה מצוי ים המלח, היא חלק מרצועה צרה וארוכה ששקעה בתוך קרום כדור הארץ ונקראת ה"שבר הסורי-אפריקני". בתקופה גיאולוגית זו נוצרו באזור בקעת הירדן מספר אגמים קדומים, שנקראים בפי הגיאולוגים "אגמי הלשון". אגמים אלו הלכו והתפשטו וכיסו כמעט את כל האזור. עד לפני כ-15,000 שנים כיסה אגם הלשון את כל פני השטח מן הכנרת בצפון ועד אזור חצבה שבדרום. אחר כך, כשבאו תקופות של יובש באזור, חל תהליך הדרגתי של התנדפות מים מהאגם. שטחו הלך והצטמצם עד שנותר רק שריד אחרון והוא ים המלח.

נזכור כי למי-ים המלח אין מוצא טבעי אחר פרט להתנדפות באוויר המדברי. לכך מתווספים תנאי האקלים המדברי המיוחדים:

1. לקריאה נוספת: Nissenbaum, A. (1970). Chemical analyses of Dead Sea and Jordan River water, 1778-1830. *Israel J. of Chemistry*, 8, 281.

2. לקריאה נוספת: ים-המלח, מאת דוד ניב וק"א אמרן, "מדע" כרך י"א, תשכ"ז, אפריל 1967 עמ' 324-332.

- טמפרטורות גבוהות במשך רוב חודשי השנה.
- לחות אוויר נמוכה ומיעוט משקעים.
- זרימת אוויר מיוחדת (משטר רוחות).

בתהליך ממושך של מיליוני שנים וכתוצאה ממכלול הסיבות הללו, עלה ריכוז המלחים באגם וכמות גדולה שלהם אף הצטברה על קרקעיתו. בטבלה הבאה מובאים נתונים (מחושבים) המראים את הכמויות האדירות של המלחים המצויים במי-ים המלח המגיעות לכ-45 מיליארד טון:

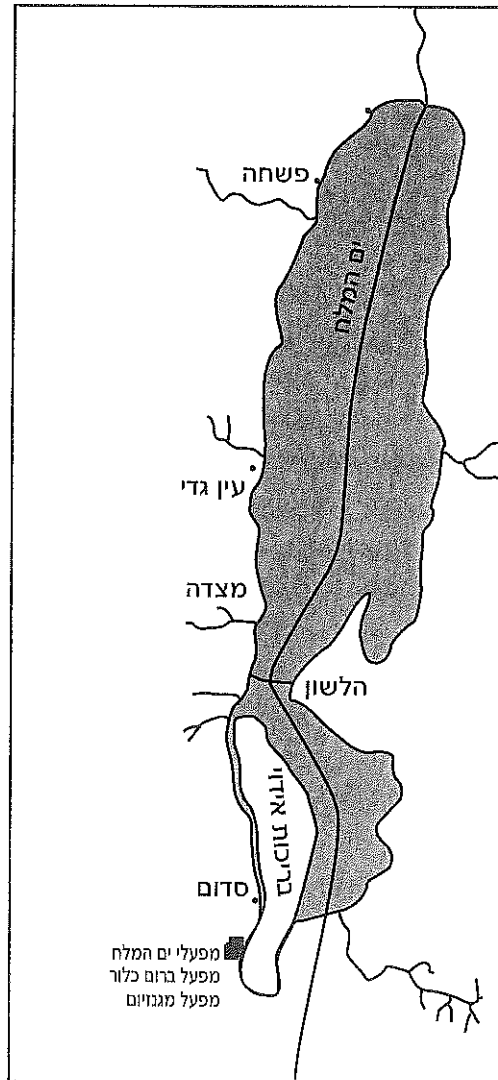
המלח	הכמות (מיליארד טון)
$MgCl_2$	22
$NaCl$	12.5
$CaCl_2$	6
KCl (אשלג)	2
$MgBr_2$	1
$CaSO_4$ (גבס)	0.215

י"ם המלח: נתונים גאוגרפיים

גובה	400 מטר מתחת לפני הים
אורך	80 ק"מ
רוחב מרבי	17.5 ק"מ
שטח	1,000 קמ"ר
עומק ממוצע	אגן צפוני 390 מטר
	אגן דרומי: התייבש - משמש כיום שטח בריכות אידוי
טמ' סביבה ממוצעת	10°C (חורף) עד 40°C (קיץ)
לחץ אטמוספרי	1.05 אטמוספירה
משקעים (סדום)	47 מ"מ
צפיפות מי הים	1.22 גרם לסמ"ק
ריכוז מלחים	300 גרם לליטר

ים המלח הוא:

- הימח הנמוכה ביותר בעולם.
- תכולת המלחים בו גבוהה בהשוואה לכל ימה אחרת בעולם (פתורה או תת-קרקעית)



ריכוז היונים במי-ים המלח ובמי-ים רגילים (גר' לליטר)

היונים	במי-ים המלח	מי-ים רגילים	גדול פי...
קטיונים			
נתרן Na^+	39	10.7	3.6
מגנזיום Mg^{2+}	39.2	1.27	31
סידן Ca^{2+}	17	0.42	40
אשלגן K^+	7	0.4	17.6
אניונים			
כלור Cl^-	208	19.4	10.7
ברום Br^-	5	0.07	70
גפרתי SO_4^{2-}	0.5	3.6	0.14
סה"כ	315	33.68	9.3

ריכוז המלח הממוצע במי-ים המלח הוא כ-30% (כ-310 גר'/ליטר) בעוד שבמי-ים רגילים הריכוז הוא כ-3-4% (כ-33 גר'/ליטר) היחס הקיים בין יוני הכלור והברום בים המלח הוא 1:40 בהתאמה, והוא נדיר ביותר ביחס למקורות האחרים. במי-ים התיכון, למשל, היחס הוא כ-1:280 בהתאמה.

מנסים להסביר את הכמות היחסית הגבוהה של יוני הברום על-פי תיאוריה הטוענת כי מקורו בשכבת מלחים שנשארה על קרקעית ים המלח עוד מתקופת האגם הקדום. התמוססותה של שכבה זו ושקיעתם של מלח הבישול, NaCl , הגיר, CaCO_3 , והגבס, CaSO_4 , גורמים להיווצרות תמיסה עשירה ביוני ברום. תיאוריה אחרת מצביעה על האפשרות לנביעות תת-מימיות של מעיינות עשירים ביוני ברום³.

במשך דורות היה ים המלח מורכב משני אגנים: צפוני ודרומי. אשר ביניהם חוצץ חצי אי הנקרא "לשון". החלק הדרומי היה רדוד והגיע עד מצדה. החלק הצפוני עמוק והשתרע לאורך 50 ק"מ צפונה. אורכו הכולל היה כ-80 ק"מ ורוחבו המרבי כ-17 ק"מ.

בכל התקופות התאזן האידוי בעזרת שלושה גורמים: נחלים המגיעים לים המלח, מי-שטפונות ונביעות תת-מימיות או שכבות מלחים בקרקעית ים המלח. הנחלים ובעיקר הירדן, החזירו כ-60% מהאידוי, השטפונות כ-30% והמעיינות כ-10%. שנות הבצורת וניצול מי-הירדן (פרויקט המוביל הארצי והטיית מקורות הירדן שנעשו במהלך שנות ה-60), גרמו לגרעון חמור במים המגיעים לים וכתוצאה מכך קטן שטחו בהדרגה.

3 לקריאה נוספת: אגם הלשון - אביהם הקדמון של הכנרת וים המלח. מאת זאב ב. בגין, מדע ל"א - 3, 1987/8.

מאז 1977 "נעלם" האגן הדרומי והים מסתיים מול מצדה. המים המצויים כיום באגן הדרומי, הם למעשה בריכות אידוי של מפעלי ים המלח. המפעלים התקינו משאבות ענק השואבות חלק מהמים מהאגן הצפוני (הנמוך יותר) ומעבירות אותם דרך תעלה מלאכותית שנבנתה במיוחד לצורך זה אל בריכות האידוי שנבנו באגן הדרומי. אלו בריכות רדודות ופתוחות, המנצלות את היתרון הגדול של ים המלח - אנרגיית השמש.



תעלת ההזנה

- מהו היתרון בבריכות אידוי רדודות ופתוחות?
- מהם היתרונות של השימוש באנרגיית השמש לאידוי?
- האם קיימים לדעתך גם חסרונות לשימוש באנרגיית השמש לצורך אידוי המים? אם כן, פרט מהם.
- נתון כי: בשריפת 1 גרם פחם משתחררת אנרגיה של 32.8 קילוג'ול
- בבריכות האידוי מתאדים במשך שנה כ- 36×10^6 מ"ק מים.
- מהי כמות הפחם הנדרשת כדי לאדות כמות כזו של מים? הנח כי שטמפרטורת המים הממוצעת היא 35°C .

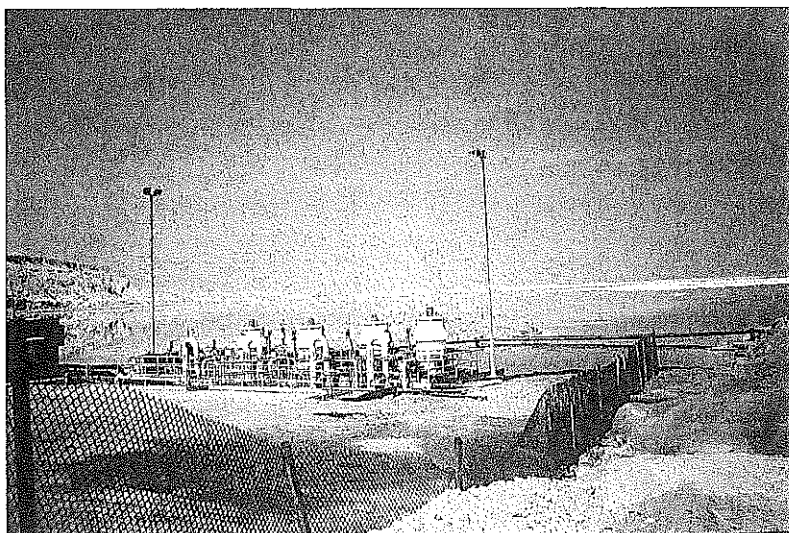
בבריכות האידוי מתבצע תהליך אידוי ושקיעת מלחים שיפורט בהמשך (עמ' 51) במהלכו מתקבלות תמיסות שריכוז יוני הברום בהן מגיע ל-12-10 גרם/ליטר (יחס יוני הכלוריד והברומיד מגיע ל-1:17 בהתאמה). תמיסות אלו, הנקראות תמלחות, משמשות כחומר גלם להפקת הברום.

תמלחות - תמיסה מרוכזת של מלחים.

ריכוז היונים במי ים המלח משתנה בעומקים שונים וכמו כן משתנה בעונות שונות של השנה. בטבלה הבאה נתונים על תכולת היונים הממוצעת על פני השנה בשני עומקים ביחידות של גרם לליטר:

היונים	עד עומק 40 מ'	מעומק של 100 מ'
קטיונים Na^+	38.5	39.7
Mg^{2+}	36.1	42.4
Ca^{2+}	16.4	17.6
K^+	6.5	7.6
אניונים Cl^-	197.0	219.0
Br^-	4.6	5.3
SO_4^{2-}	0.58	0.42
HCO_3^-	0.23	0.22
המליחות הממוצעת	300	332

- מהן הסיבות להבדלים בריכוזי היונים בעונות השונות?
- מהן הסיבות להבדלים בריכוזי היונים בעומקים שונים?
- מאין לדעתך שואבים את המים לאגן הדרומי? נמק.
- באילו עונות שואבים לדעתך את המים לאגן הדרומי? נמק.



תחנת שאיבה

ב.2 - שלבים ושיקולים בהקמתה של תעשיית הברום בארץ

"...ואמנם מים אלה שלנו עשירים הרבה מאשר כל מים אחרים בעולם כולו. אותה האגדה הישנה על דבר אוצר, שטבע בתוך הים, עולה שוב במעלה הזיכרון. תינוקות מאמינים, שאוצר זה אינו אלא שרשרות זהב, טבעות זהב או מטבעות זהב. אבל המלחים של ים המלח אף הם זהב הם. כמות הברום של המים הללו אין להשיג משום תמיסה טבעית אחרת. והרי יודעים אתם איזה חומר יקר הברום, ומה רבה וענפה התוצרת, שאנו מייצרים מחוץ לכל אלה באותו המחוז הפורה של ארצנו, שהיה לפניו השומם מכולם, המת!..."

כך תאר ב-1902, בספרו אלטנוילנד - "ארץ עתיקה חדשה", בנימין זאב הרצל את תעשיית הברום ותרכובותי שתפתח בעתיד בסביבות ים המלח. אמנם חזונו לא התגשם בדיוק כפי שצפה בספרו, אך אין ספק כי בגאוניותו ראה את הנולד.

הנסיונות הראשונים לניצול תעשייתי של אוצרות ים המלח החלו ב-1921 על-ידי המהנדס מ.א. נובומייסקי שהגיע לארץ ישראל ממקום הולדתו שברוסיה⁴.

בחזונו ראה נובומייסקי את האפשרויות העצומות הגלומות בים המלח ופעל ללא לאות להשגת זיכיון מממשלת המנדט לניצול אוצרות ים המלח.

ב-1930, לאחר קבלת הזיכיון ויסוד חברת האשלג, נעשו גם הנסיונות הראשונים להפקת ברום מים המלח. שיטת ההפקה התבססה על חמצון יוני הברום שבתמלחת באמצעות כלור, שיטה הדומה לזו שהביאה כ-100 שנה קודם לכן, לגילוי הברום על-ידי באלאר ותוארה בפרק הראשון. מיתקני הברום הראשונים נבנו מפלטות של בולת והברום אוחסן והובל בכדי חרס.

ב-1931 החלו בהפקת ברום מתמלחות שנתקבלו לאחר הפרדת האשלג. באופן טבעי התרכזו המיתקנים לייצור האשלג והברום בסמוך לים המלח. המיתקנים הראשונים הוקמו בקליה, באיזור הצפוני של ים המלח. המיקום נבחר בגלל קיומן של דרכי גישה נוחות יותר להובלת חומרים ולאספקת מים מתוקים ומוזט לייצור החשמל מאשר בדרום ים המלח.

כבר כשנתיים לאחר התחלת הייצור היה ברור לנובומייסקי כי מיתקני הייצור חייבים להמציא בשטחו הדרומי של ים המלח. בחלק זה המים היו רדודים יותר ותנאי השטח מתאימים לפיתוח בריכות אידוי גדולות יותר, המבוססות על ניצול אנרגית השמש.

4 לקריאה נוספת:

- מלח הארץ, מחברת האשלג הארץ הישראלית למפעלי ים המלח, מאת דב גביש, הוצאת יד יצחק בן צבי, ירושלים, 1995.
- ספר ים המלח, מאת אלי רו, הוצאת החברה להגנת הטבע, ירושלים, 1993.

ב-1934 החלו בהקמת מפעל האשלג בקצה הדרומי של ים המלח - בסדום. המפעל בסדום קיבל את המים המתוקים מהכפר סאפי, שבעבר הירדן. מרבית כח האדם, שכלל בעיקר תושבים בדואים שגרו באיזור, הגיע גם הוא מעבר הירדן. האספקה והמזוט לייצור חשמל הועברו בספינות מהחלק הצפוני של ים המלח. בדרך זו הועברה גם תוצרת מפעל האשלג לצפון ים המלח, ומשם דרך ירושלים, הועברו האשלג והברום (את הברום ייצרו אז רק בצפון ים המלח) לנמלי יפו וחיפה.

כבר עם תחילת הקמתה של התעשייה, המנצלת את אוצרות ים המלח, אנו יכולים להבחין **במערכת שיקולים מורכבת לקביעת מיקומו של המפעל:**

- קרבה למקורות חומרי הגלם.
- תנאי שטח מתאימים להקמת מתקני הייצור.
- נוחיות בקבלת שירותים כגון אספקת מים מתוקים וחשמל.
- דרכי גישה נוחות.
- זמינות כח אדם.

לא תמיד מצביעים כל הגורמים הללו יחד על מיקום אידיאלי אחד עבור המפעל. במרבית המצבים חייבים לעשות פשרה ולהחליט על המיקום המיטבי. במקרה של הקמת מפעל האשלג, כבר באמצע שנות השלושים הכריע הגורם השני את הכף לטובת המפעל הדרומי.

עד מלחמת העולם השנייה הגיעה כמות הברום שהופקה ל-500-700 טון לשנה ובמהלך המלחמה אף עלתה מעבר לזאת (ראה סעיף א.3).

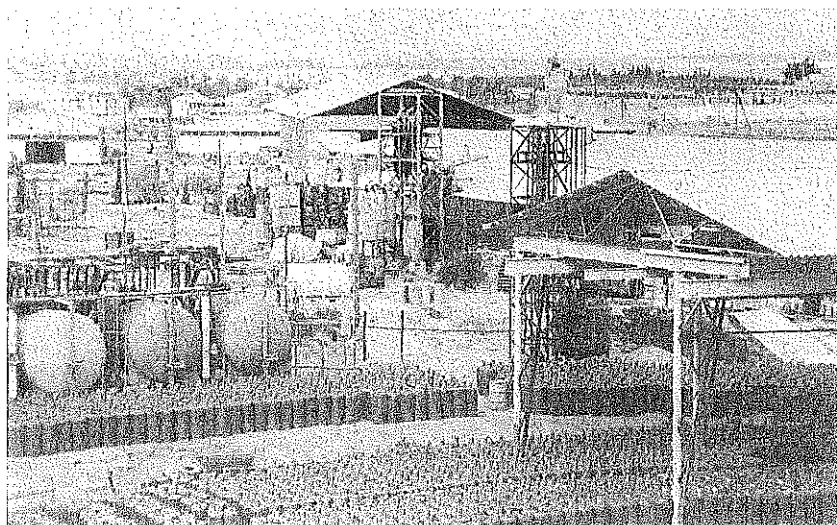
בשנת 1948, בימי מלחמת העצמאות, נהרס המפעל בצפון ים המלח ונותר רק המפעל בסדום כשהוא מנותק מדרכי גישה וממקורות מים מתוקים. הייצור בו הופסק. הפעילות התעשייתית סביב ים המלח התחדשה רק כארבע שנים לאחר מכן, ב-1952, עם הווסדה של חברת "מפעלי ים המלח" והקמתו של מפעל אשלג חדש בדרום ים המלח.

ב-1955 נוסדה "חברת ברום ים המלח" ושנה לאחר מכן הוקם בסדום המפעל לייצור ברום. ייצור הברום החל ב-1957 בתפוקה של מספר מאות טונות בחודש. באותו זמן הוקם סמוך למפעל הברום מיתקן לייצור EDB. לאחר מכן הוקם מיתקן נוסף לייצור החומר דו-ברומו כלורו פרופאן, שנועד לשימוש חקלאי.

מפעל הברום הורחב בהדרגה עם שיפורים טכנולוגיים והתקדמות בחומרי המבנה. הזכויות החליפה את אבן הגרניט והחרס. לאחר מכן החלו להשתמש בברזל מצופה בזכוכית ולבסוף במתכות אצילות. הצמיחה שחלה בביקוש לברום

ולתרכובותיו בעולם, הביאה ב-1960 להקמתה של חברת הבת "תרכובות ברום", בשותפות זרה של 50%. המטרה היתה לייצר מהברום מוצרים מורכבים יותר וכך לתגדיל את הרווחיות.

בשנת 1963 החל המפעל שהוקם באזור התעשייה בבאר-שבע לייצר תרכובות ברום. הקמתו של מפעל זה רחוק ממקור חומרי הגלם נראית אולי תמוהה, אך הסיבות לכך מורכבות יותר וקשורות בעיקר לשיקולים הנוגעים לגיוס כוח אדם מתאים לעבודה במפעל. **תנאי האקלים** הקשים בסדום ו**הריחוק הגיאוגרפי** מריכוזי אוכלוסיה עירוניים גרמו לקשיים בהשגת **כוח אדם** מתאים. ייצור התרכובות, שהוא מסובך בהרבה מייצור הברום, דרש כוח אדם רב יותר ובעל רמה מקצועית גבוהה: מהנדסים, טכנאים, חוקרים ועוד. אזור באר-שבע נמצא מתאים יותר מאשר סדום ואיפשר להשיג ביתר קלות כח אדם מוכשר ומיומן.



מפעל "תרכובות ברום" בשנותיו הראשונות

שלב חשוב נוסף בהתפתחות קבוצת הברום היה הקמתו של מפעל בת באירופה. בשנת 1966 נוסדה בוירדן שבהולנד חברת הבת "ברומכימי". המטרה היתה להקים מפעל לייצור תרכובות ברום בתוך השוק המשותף. זאת, כדי להגדיל את מכירות הברום ולחדור לשוק תרכובות הברום העולמי. ההצלחה היתה גדולה. ב-1971 הועבר ניהול "חברת ברום ים המלח" מ"מפעלי ים המלח" לכימיקלים לישראל בע"מ, תאגיד מפעלי הכימיה הגדול ביותר בארץ. הגדלת הביקוש לברום ולתרכובותיו הביאו להרחבת ייצור הברום בסדום ועקב כך הוקם ב-1975 מפעל לייצור כלור (עד אז השתמשו בכלור שהופק במפעל פרוטארום והובא במיכליות מצפון הארץ). ב-1974 מכרו השותפים ההולנדים את חלקם בחברה ומאז הבעלות היא ישראלית בלבד. ב-1976 הורחב מפעל "ברומכימי" והועתק לעיר טרנווין בדרום-מערב הולנד. ב-1978 הוקם מפעל חדש לתרכובות ברום באזור תעשייה חדש ברמת-חובב. ההחלטה הממשלתית על הקמתו של אזור תעשייה זה, המרוחק כ-15 ק"מ דרומית מבאר שבע, הושפעה מהמודעות ההולכת וגוברת שהתפתחה בשנים אלו לנושאי איכות החיים והסביבה.

הבחירה ברמת-חובב למיקומו של המפעל נבעה מהשיקולים הבאים:

- האתר היה רחוק מאזורים מאוכלסים.
- היתה אפשרות סבירה להשגת כח אדם מתאים.
- היתה קיימת רשת כבישים ומסילת ברזל.
- מחקרים מצאו כי ההרכב הגיאולוגי של תקרקע לא יאפשר חדירה רבה של חומרי פסולת למי-התהום.
- מחקרים הראו כי כיווני הרוחות הנשבות באזור לא יסכנו את איכות החיים של תושבי באר-שבע.
- היתה קיימת באתר אספקה טובה של מים.
- האתר לא היה רחוק מאד ממקור חומרי הגלם בסדום ודרכי הגישה היו נוחות יחסית.

עם השנים גדל כושר הייצור של הברום, הן על ידי הוספת מיתקנים להפקת כלור והן על ידי הוספת מיתקנים להפקת ברום. כמו כן חלה הרחבה בייצור תרכובות ברום הן מבחינת הכמות והן מבחינת המגוון. במקביל נבנה מערך שיווק בינלאומי המורכב מחברות העוסקות בשיווק, במכירות ובהפצה של מוצרי הברום בחלקי העולם השונים.

כפי שאנו רואים זוהי מערכת דינמית שחייבת להשתנות ולהתפתח בהתאם לצרכי השוק ובהתאם לתפיסה הניהולית של העומדים בראשה. ב-1996 נמכרו 51 אחוזים מהמניות למשקיע פרטי אשר מכר את מניותיו למשקיע פרטי אחר בתחילת 1999. הממשלה מחזיקה עדיין ב-49 אחוזים מהמניות, כולל מניית זהב המאפשרת לה להכריע בשאלות גורליות.

- 1924 - נסיונות ראשוניים לניצול תעשייתי של אוצרות ים המלח על-ידי המהנדס מ.א. נובומייסקי
- 1929 - מתן הזיכיון לניצול אוצרות ים המלח למ.א. נובומייסקי
- 1930 - ייסוד חברת "אשלג א"י בע"מ" וחקמת המפעל בצפון ים המלח (קליה)
- 1931 - התחלת ייצור ברום
- 1932 - התחלת ייצור אשלג משלוחים ראשונים של ברום ואשלג
- 1934 - התחלת עבודות הפיתוח להקמת המפעל בדרום ים המלח (סדום)
- 1948 - מלחמת העצמאות, הרס המפעל בצפון ים המלח והפסקת הייצור בדרום ים המלח
- 1952 - ייסוד "חברת מפעלי ים המלח בע"מ"
- 1955 - ייסוד חברת "ברום ים המלח בע"מ" כחברת בת של "מפעלי ים המלח בע"מ" ובניהולה
- 1956 - הקמת מפעל לייצור ברום בדרום ים המלח (סדום) בכושר ייצור כולל של 10,000 טון לשנה
- 1957 - הפעלת מיתקן ברום ראשון בסדום בכושר ייצור של מספר מאות טון ברום לחודש
- 1957-58 - התחלת ייצור תרכובות אורגניות המכילות ברום
- 1961 - ייסוד חברת "תרכובות ברום בע"מ" בבאר-שבע
- 1962 - פתיחת המפעל לייצור תרכובות ברום (באיזור התעשייה באר-שבע)
- 1967 - ייסוד חברת "ברומכימי בע"מ" לייצור תרכובות ברום בוידן, והולנד
- 1971 - העברת ניהול "חברת ברום ים המלח" מ"מפעלי ים המלח" לכימיקלים לישראל בע"מ (כ"ל)
- 1973 - ייצור הטון ה-100,000 של ברום בסדום
- 1973 - הקמת והפעלת מפעל לייצור כלור בסדום בכושר ייצור של 30,000 טון לשנה
- 1977 - הפעלתו של מפעל כלור ראשון בסדום (בשיטת הדיאפרגמה) בכושר ייצור של 45,000 טון בשנה
- 1977 - הרחבת מפעל "ברומכימי" והעתקתו לטהוויזון, הולנד
- 1978 - הרחבת מפעל "תרכובות ברום" והעתקו מבאר-שבע לרמת חובב
- 1987 - הפעלתו של מפעל כלור שני בסדום (בשיטת הממברנות) בכושר ייצור של 45,000 טון כלור בשנה
- 1995 - הפיכת "חברת ברום ים המלח בע"מ" לחברה ציבורית הנסחרת בבורסה בת"א
- 1995 - הפעלת מפעל ברום חדש בסדום בכושר ייצור של 50,000 טון ברום בשנה
- 1995 - רכישת 50% מחברת "קלירון" בארה"ב העוסקת במוצרים לטיפול במים
- 1996 - הקמת מפעל המגנזיום בכושר ייצור של 50,000 טון כלור בשנה
- 1998 - כושר הייצור של כל מיתקני הברום בסדום הוא 250,000 טון לשנה

מושגים שלמדת בפרקים א ו-ב

שיתוך (קורוזיה): תהליך בו חל קלקול של חומר מוצק (בדרך כלל מתכת) כתוצאה ממגע עם חומרים אחרים. הקלקול בדרך כלל כרוך ביצירת חורים, סדקים או התפוררות החומר. תהליך זה גורם לשינוי התכונות המכניות של החומר וכתוצאה מכך לאי התאמתו לייעודו.

תהליך פוטוכימי: תהליך כימי המתבצע באמצעות אור הנבלע על ידי המערכת.

דלק מביל עופרת (Leaded fuel): דלק שהוסיפו לו את התרכובת עופרת ארבע- אתילית. מטרת תוסף זה למנוע תופעות של הצתה עצמית ו"דפיקות מנוע".

דלק נטול עופרת: (Unleaded fuel) דלק שאינו מכיל תוספת של עופרת ארבע- אתילית.

בדאיות הפקת מוצר כלשהו תלויה ב:

- שימושים היוצרים ביקוש למוצר.
- קיום מקורות מתאימים לחומרי גלם.
- יכולת טכנולוגית.
- יכולת מימון.

יתרונה של ישראל בהפקת הברום:

- ים המלח הוא ימה על-קרקעית.
- ריכוז יוני הברום בים המלח הינו הגבוה ביותר בעולם.
- מיקומו של ים המלח באזור חם, בו קיימת התאיידות גבוהה ואנרגיה סולרית הניתנת לניצול במשך כל השנה, מוזילה את הייצור של הברום באופן משמעותי ביותר.

המלחת: תמיסה מרוכזת של מלחים.

השיקולים לקביעת מיקומו של המפעל:

- קרבה למקורות חומרי הגלם.
- תנאי שטח מתאימים להקמת מתקני הייצור.
- נוחיות בקבלת שרותים כגון אספקת מים מתוקים וחשמל.
- דרכי גישה נוחות.
- זמינות כח אדם.

שאלות לפרק א ו-ב

1. הברום הינו יסוד השייך למשפחת ההלוגנים.
 - (א) פרט את תכונותיו של הברום:
 - * הערכות אלקטרונית
 - * אנרגיית יינון
 - * זיקה אלקטרונית
 - * אלקטרושליליות
 - * פוטנציאל חיזור תקני
 - * דרגות חימצון אפשריות
 - (ב) כיצד משפיעות תכונות אלו על תגובות הברום עם חומרים אחרים?
 - (ג) הברום הוא האל-מתכת היחידה שהיא במצב נוזל בטמפ' החדר. הסבר.
2. לפניך רשימת תרכובות ברום שונות:
 CH_2BrCOOH , CH_3Br , PBr_3 , PbBr_2 , Br_2O , BrCl , MgBr_2
 - א. ציין מהם הקשרים הקיימים בכל אחת מן התרכובות.
 - ב. רשום עבור כל אחת מהתרכובות נוסחת ייצוג אלקטרונית.
 - ג. קבע את דרגת החמצון של אטומי הברום בכל אחת מתרכובות אלו.
 - ד. קבע באילו תרכובות עשוי הברום לשמש כמחמצן, כמחזר, כמחמצן וגם כמחזר? נמק.
3. לפניך רשימת חומרים אשר תמיסת מימן ברומי עשויה להגיב עם חלק מהם. בכל מקרה שעשויה להתרחש תגובה, רשום ניסוח מאוזן לתהליך וציין את סוג התגובה: שיקוע, חמצון חיזור, חומצה בסיס וכד'.
 - (א) עופרת חנקתית מוצקה
 - (ב) גז כלור
 - (ג) גז מימן כלורי
 - (ד) גז פחמן דו-חמצני
 - (ה) ליתיום פחמתי מוצק
 - (ו) סידן הידרוקסידי מוצק
 - (ז) סידן פחמתי מוצק
4. השתמש בטבלה בעמ' 25-26 ומיין את תרכובות הברום לקבוצות על פי אמות המידה הבאות:
 - א. תרכובות אי אורגניות
 - ב. תרכובות אורגניות (לפי קב' פונקציונליות)
 - ג. חומרים מחמצנים

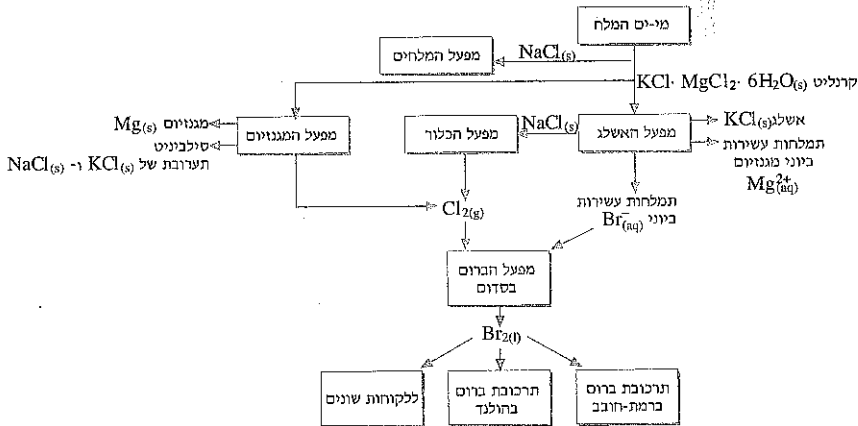
- ד. חומצות
- ה. תמיסות
- ו. חומרים משתכים
- ז. חומרים המתפרקים בחימום תוך כדי שחרור גזים רעילים
- ח. שימושים עיקריים.
5. ברום כלורי (BrCl), המתקבל בתגובה בין ברום וכלור, הוא נוזל בטמפרטורת החדר. ידוע כי אי אפשר לבדוד ברום כלורי ולקבלו נקי. הסבר מדוע.
6. 1, 2 דו-ברומו אתאן (E.D.B) שימש במשך תקופה ארוכה לשתי מטרות עיקריות: - תוסף לדלק
- להדברת מזיקים בקרקע ובתוצרת חקלאית לאיחסון ממושך.
- א. מה היו הסיבות לעליה בביקוש ל-E.D.B ?
- ב. מה היו הסיבות שהביאו לירידה בשימוש E.D.B ?
7. נהוג לקרוא לתקופות מסויימות בהיסטוריה על פי החומרים בהם השתמשו. כך למשל, יש הטוענים כי תקופתנו תקרא תקופת הפלסטיק.
- התבונן בטבלה בעמ' 33 ונסה למצוא קשר בין התפתחות החומרים השונים לבין צורכי האנושות בתקופות השונות. פרט.
8. מהם היתרונות של הפקת הברום ממי-ים המלח בהשוואה להפקתו ממקורות אחרים? פרט.
9. מהם הגורמים העשויים להשפיע על כדאיות ההפקה של הברום בארץ?
10. מהן הסיבות לכך שארה"ב וישראל הן מפיקות הברום ותרכובות הברום החשובות ביותר בעולם?
11. התבונן בטבלה בעמ' 38 המפרטת את תכולת היונים העיקריים במי-ים המלח וענה על השאלות הבאות:
- רשום את נוסחות המלחים העשויים להתקבל בעת אידוי מי-ים המלח.
- במה תלוי, לדעתך, אילו מלחים אכן יתקבלו בזמן אידוי מי-ים המלח?
- מהם המלחים העיקריים המתקבלים בברכות האידוי של ים-המלח?
12. א. מה היו הסיבות לבחירת מיקומם של מפעלי קבוצת הברום:
- מפעל ברום-כלור בסדום
- מפעל "תרכובות ברום" ברמת חובב
- מפעל "ברומכימי" בהולנד
- ב. השווה את הסיבות שרשמת עבור כל מפעל עם השיקולים הכלליים המופעים בעמ' 42.

עקב

ג. 1 - מכתב

ים המלח הינו אוצר טבע המהווה מקור לחומרי גלם עבור תעשייה כימית רבת היקף ועניפה שהברום ותרכובותיו, להם מוקדש ספר זה, הם רק חלק ממנה. אוצר זה ניתן לנצל למטרות רבות ולמעשה אין גבול לפרי הדמיון ולפיתוח חומרים חדשים לשימושים שונים ומגוונים.

הדרך המובילה ממי-ים המלח לברום ולתרכובותיו מתוארת בסכימה הבאה:



עיינן בתרשימים ובטבלה המתארות את תכולת היונים במי ים המלח בעמ' 38 וענה על השאלות הבאות:

- מדוע, לדעתך, אין מפיקים חומרים ממי ים המלח אלא מתמיסות המתקבלות בברכות האידוי?
- אלו חומרים מופרדים ממי ברכות האידוי לפני הזרמתם למפעל הברום?
- במה תלוי, לדעתך, סדר שקיעת המלחים בבריכות האידוי?

1 לקריאה נוספת: סיור לימודי במפעלי ים המלח, מאת מירי קסנר, שרה שני, ניר אוריון, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן, רחובות.



ברכות האידוי במפעלי ים המלח

הידעת?

השטח הכולל של ברכות האידוי הוא כ- 150 קמ"ר וכמות המים המתאדה

בשנה בממוצע היא 135 מיליון מ"ק.

כמות מלח הבישול המיוצרת בשנה (1997): 700,000 טון.

כמות האשלג המיוצרת בשנה (1997): 2.5 מיליון טון.

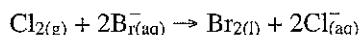
כפי שאנו רואים על פי התרשים בעמוד הקודם מייצרים את הברום מתמלחות שמקורן בברכות האידוי ולאחר הפרדת רוב הנתרן הכלורי והאשלג. בתמיסות אלו ריכוז יוני הברום מגיע ל-10-12 גרי לליטר וזה מה שעושה את תהליך ההפקה יעיל וכדאי מאד בהשוואה לתהליכי הפקה ממקורות אחרים בעולם, בהם ריכוז יוני הברום נמוך בהרבה.

כדי לקבל ברום מתמיסה המכילה יוני ברומיד צריך חומר מחמצן מתאים. כפי שלמדת בפרק העוסק בחמצון-חיזור קיימים מחמצנים רבים היכולים לשמש להפקת ברום.

- אלו חומרים מחמצנים עשויים לדעתך להתאים לקבלת הברום מתמיסת הברומיד?
רשום את נוסחותיהם ובמידת האפשר את ניסוח התהליך.
- מהן הדרישות שצריכות להתקיים לגבי החומרים שמצאת כמתאימים לחימצון הברומיד, כדי שיוכלו לשמש להפקת ברום בתעשייה? פרט שיקולך.
- האם ניתן להציע שיטות נוספות לחימצון הברומיד לברום? פרט.

תהליך הפקת הברום בארץ מבוסס על תגובה עם כלור, בדיוק כפי שנתגלה בתחילת המאה הקודמת ותארנו בפרק הראשון.

זוהי תגובת חמצון-חיזור בה מחמצנים את יוני הברום המצויים בתמיסה המימית ומקבלים ברום במצב היסוד:



בניסוי שמתואר בפרק הראשון משמשת האקונומיקה כמקור לכלור והוא מחמצן את יוני הברומיד בתמיסה.

- נסה לבחון את השימוש בכלור כחומר מחמצן לאור הדרישות שפרטת לעיל?
- חשב מהו נפח הכלור בתנאי תקן הדרוש לייצור 160 ק"ג ברום, על פי ניסוח התגובה ובהנחה שאין אובדנים כלשהם.

כפי שנראה בהמשך, הבחירה בכלור עונה על מרבית הדרישות.

שם החומר: כלור

א/כ/א

גו בעל צבע ירקרק וריח חריף

נקי היתוך: -100°C

נקי רתיחה: -35°C

צפיפות: 2.99 גר' לליטר

מסיסות במים: מעטה (תוך כדי תגובה). 0.63 גר' ב-100 סמ"ק מים (ב- 25°C)

מסיסות בממסים אחרים: טובה ב- CCl_4 * הפטאן, בנזן * וכד'

דליקות: אינו דליק.

רעילות: רעיל מאד. גורם לגירויי עור ולכוויות. מסוכן בשאיפה.

מסוכן לעיניים.

תגובות אופייניות:

- * חומר מחמצן חזק.
- * מגיב בתגובות חתמרה עם אלקאנים ובתגובות סיפוח עם אלקנים.
- * מגיב בקלות עם מרבית היסודות.

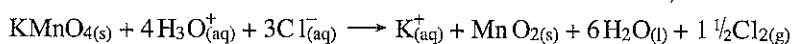
אנתלפיית קשר: 242 ק' ג'ול/מול.

* ברצוננו להזכיר כי חומרים אלו אסורים לשימוש במעבדת ביה"ס.

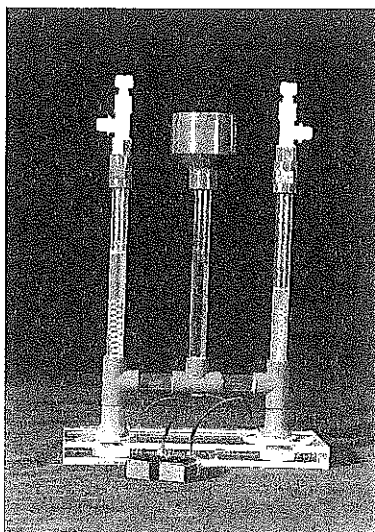
2.2 כיצד מפיקים כלור במעבדה?

- כבר בפרקי הלימוד הקודמים פגשת בתהליכים בהם ניתן להפיק כלור במעבדה:
- תהליכים בהם מתרחש חמצון-חיזור ישיר בין מרכיבי תגובה בה אחד התוצרים הוא כלור.
- תהליך אלקטרוליזה של תמיסה מימית מרוכזת של מלח המכיל יוני כלוריד.

דוגמא אופיינית לתגובת חמצון-חיזור ישיר, המשמשת לעיתים קרובות להפקת כלור במעבדה היא התגובה בין תמיסה מרוכזת של חומצה מימן כלורית לבין גבישי אשלגן על-מנגנטי:



- ניתן לקבל כלור בשיטה אלקטרוליטית הן מתמיסה מימית המכילה יוני כלור והן ממלח כלורידי מותך. תן דוגמאות ונסח את התגובות המתרחשות ליד האנודה וליד הקתודה.
 - מהם ההבטים שעל פיהם ניתן להשוות את האפשרות לקבל כלור על-ידי יישנם שיטת חמצון חיזור ישירה לעומת יישומה של השיטה האלקטרוליטית?
- א במעבדה?
ב בתעשייה?
פרט והסבר בכל מקרה.



מכשיר הופמן לאלקטרוליזה במעבדה

3.2 – כיצד מסיקים ברום במעבדה?

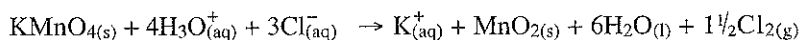
בניסוי² שעשינו בפרק הראשון (2.א) ראינו כיצד ניתן לקבל ברום מתמיסה מימית העשירה ביוני ברום, אך מכאן ועד להפקה תעשייתית של ברום, הדרך ארוכה. כאשר הכימאי מגלה במעבדה תהליך כלשהו שיכול לשמש כרעיון לתהליך חרושתי בקנה מידה גדול עליו לבצע בראש וראשונה ניסויים מעבדתיים. לשם כך עליו לבנות מערכת ניסויית דומה ככל האפשר למערכת הייצור ולבחון את השלבים השונים בתהליך בחינה מדוקדקת ביותר. התגובה אשר בוצעה במבחנה ובה נוצר ברום, היא רק תחילתו של תהליך מורכב המנסה לתרגם את הרעיון לשלבים מעשיים, שבסופם יתקבל ברום בדרגת הניקיון הרצויה ובכמות המבוקשת. גם כדי לקבל ברום במבחנה היה צריך תחילה למצוא מקור לכלור ולהגיבו עם תמיסת יוני הברום. לאחר שהברום מתקבל יש למצוא דרכים מתאימות כדי להפרידו מהתמיסה. כל זה דורש מחשבה ותיכנון המתייחסים, בנוסף להבט התהליכי, גם להבטים נוספים אליהם נתייחס בהמשך.

בואו ונבחן כיצד ניתן לבנות מערכת כזאת אשר תכלול את כל המרכיבים ההכרחיים שצוינו. מערכת כזאת אפשר לחלק לשלושה שלבים עיקריים:

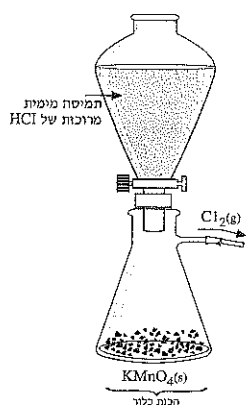
- א. הכנת הכלור.
- ב. התגובה לקבלת ברום.
- ג. הפרדת הברום.

שלב א': הכנת הכלור

במערכת המתוארת סכמתית על יד השרטוט הבא מופק הכלור באמצעות השיטה המעבדתית שהוזכרה קודם, בה מגיבים בין תמיסה מרוכזת של חומצה מימן כלורית לבין גבישי אשלגן על-מנגנטי:



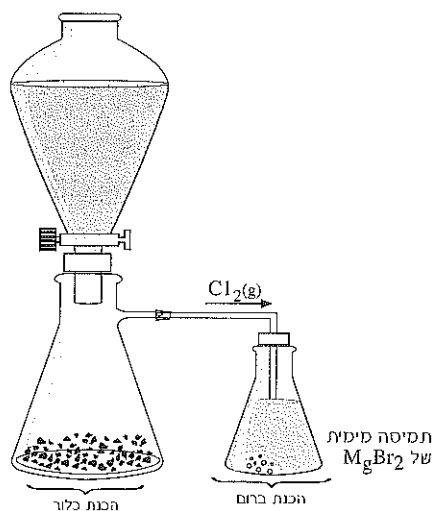
2 הניסוי כולו חייב להתבצע במנדף. אפשרות נוספת היא לראות ניסוי מוסרט הנמצא בקלטת הוידאו: "הברום ורכובותיו" - ניסויים וסרטוני העשרה, בהוצאת המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות. לקלטת מצורפת חוברת הדרכה הכוללת דפי עבודה.



את הכלור המתקבל בתגובה ניתן להזרים ישירות לתוך תמיסת הברומיד. מהם החסרונות והיתרונות של שיטה זו בהשוואה להכנת כלור בכמות הרצויה, איחסונו ולאחר מכן העברתו מכלי האיחסון לתמיסת הברומיד?

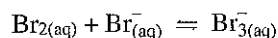
שלב ב': התגובה לקבלת ברום

בשלב א' המתואר לעיל מכינים כמות מסויימת (מנה) של כלור. כמות זו מגיבה עם כמות מסויימת (מנה) של תמיסת מגנזיום ברומי. תהליך זה ניתן עקרונית לבצע גם בקנה מידה גדול יותר ולייצר בעזרתו כמויות גדולות של ברום. הזרמה ישירה של הכלור לתוך תמיסת הברומיד מאפשרת ביצוע קל ויעיל של התגובה. לפיכך נבנה במעבדה מערכת משולבת:



מה יקרה, לדעתך, לברום שיווצר כתוצאה מהזרמת הכלור לתמיסת הברומיד? נמק.

תצפית במתרחש מראה, כי צבע תמיסת מגנזיום הברומיד הולך ומתחזק ונעשה יותר ויותר כתום-חום, בעוד שמעט מאד ברום גזי נראה יוצא ממנה לפאזה הגזית. מסיסותו של הברום בתמיסה המימית מוסברת על-ידי תהליך שיווי משקל בו נוצר יון מורכב, Br_3^- (aq), שהוא בעל מסיסות גבוהה ביותר במים:



עבור התגובה הישירה: $\Delta H < 0$.

יוני הברומיד קושרים למעשה את מולקולות הברום ומשאירים אותן בתמיסה.

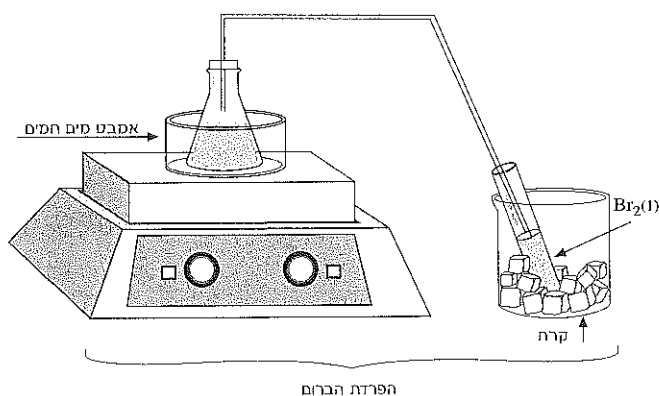
- לאיזה כיוון יש להטות את התהליך כדי "לשחרר" את הברום מהתמיסה?
- התוכל להציע שיטה בעזרתה ניתן יהיה להוציא את הברום מהתמיסה?

שלב ג': הפרדת הברום

התגובה הישירה לקבלת יון ה- Br_3^- (aq) היא, כאמור, אקסותרמית. לפיכך ניתן לשחרר את הברום מן התמיסה באמצעות חימום.

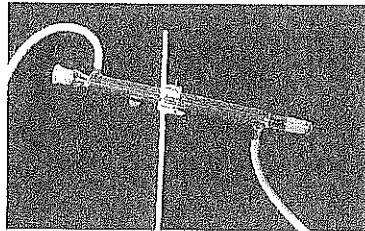
דרך אחת לביצוע התגובה היא להזרים את כל הכמות של הכלור שהוכנה לתוך תמיסת הברומיד ורק לאחר שמסתיימת התגובה לחמם אותה עד לטמפרטורה שבה משתחררים אדי הברום. אפשרות אחרת היא לבצע את הזרמת הכלור והחימום בו זמנית.

את אדי הברום הנפלטים מהתמיסה נעבה ונאסוף בכלי מקורר. עיבוי הברום ניתן לביצוע על ידי הזרמת אדי הברום למבחנה המצויה בתוך קרח (או תערובת קרח-מלח, על מנת להשיג טמפרטורה נמוכה יותר).



דרך אחרת לעיבוי הברום היא שימוש במעבה.

מעבה: מיתקן גלילי בעל דפנות כפולים שבו זורמים הגזים המקוררים. בין הדפנות זורמים מים קרים או תמלחת קרה אשר סופגת את האנרגיה וגורמת לעיבוי כמבוקש.



מעבה

הסבר כיצד פועל מעבה:

- מהו יתרונו ביחס לשימוש במבחנה מקוררת?
- מהו חסרונו ביחס לשימוש במבחנה מקוררת?

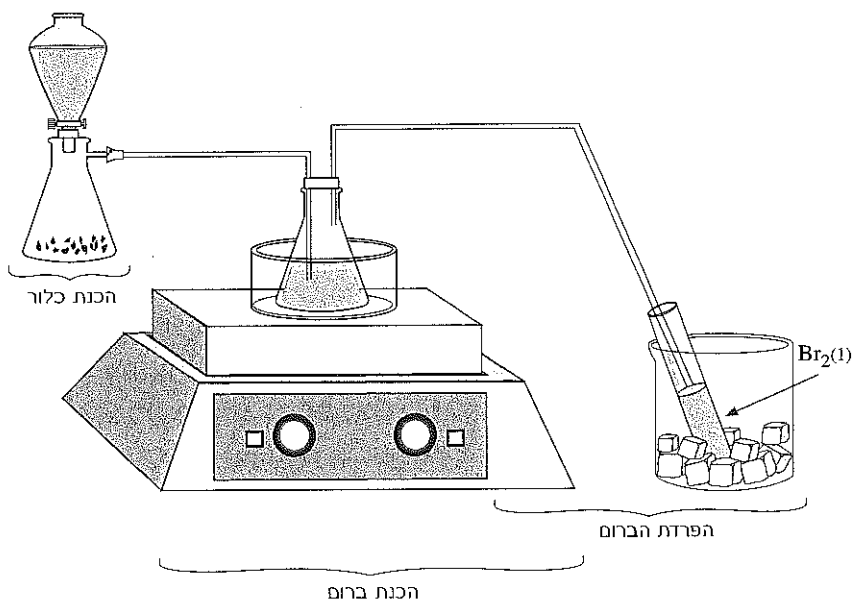
תהליך המתבצע בשלבים, כאשר רק לאחר סיומו של האחד מתחיל השלב הבא אחריו, נקרא בשפת התעשייה תהליך מנתי

תהליך מנתי: תהליך בו מזינים למכל התגובה כמות מסוימת של חומרי גלם (מגיבים, חומר/י עזר). תערובת התגובה עוברת סדרת פעולות לקבלת תוצר/ים מבוקש/ים. רק לאחר קבלת התוצר/ים והוצאת תערובת התגובה מן המכל ניתן להזין כמות נוספת של חומרי גלם שתעבור תהליך זהה לקבלת "מנה" נוספת של תוצר/ים.

רוב ניסויי המעבדה מבוצעים באופן מנתי, אך גם בתעשייה יש תהליכים המבוצעים באופן מנתי.

בדרך כלל משתמשים בתעשייה בתהליכים מנתיים כאשר מייצרים חומרים הנדרשים בכמויות קטנות יחסית ואשר דרך ייצורם אינה מחייבת הפעלה רצופה של המיתקן.

אם מצרפים את כל חלקי המערכת שתארנו קודם ומבצעים את התגובה ללא הפסקה, החל משלב הכנת הכלור ועד לקבלת ברום נוזלי, מתקבלת מערכת נוחה ויעילה יותר. זוהי מערכת משולבת בה התוצרים של כל שלב עוברים ישירות לשלב הבא.



ענה על השאלות הבאות:

- האם יכולה שיטה כזו לשמש להפקת ברום בתעשייה? נמק את תשובתך.
- האם ידועות לך שיטות מעבדתיות נוספות להפקת ברום? אם כן, נסח תגובות והסבר.
- מהי דעתך לגבי יישומן של שיטות מעבדתיות אלה להפקת ברום בתעשייה? נמק את תשובתך.
- מה לדעתך צריכים להיות המאפיינים של תהליך ייצור תעשייתי בהשוואה לתהליך הפקה במעבדה?

נבחן עכשיו את תוצר התגובה, הברום, המתקבל במבחנה המקוררת או בכלי סגור אחר. אם ניתן למבחנה לעמוד זמן מה נראה כי לאחר העיבוי מקבלים במבחנה שכבה חומה המכילה ברום ושכבה מימית בהירה יותר.

- מדוע נוצרות פה שתי שכבות?
- מה מכילה כל אחת מהשכבות?

האם ניתן להשתמש בברום המתקבל בניסוי לצרכים השונים והמגוונים? האם יש מקרים בהם נדרש ברום ללא מים (יבש)? האם יש בברום אי ניקיונות נוספים? אם כן, מהם אי ניקיונות אלו וכיצד ניתן להפרידם ולהכין ברום נקי לחלוטין? האם לכל מטרה ושימוש צריך הברום להיות בדרגת ניקיון זהה? נסה לחשוב על שאלות אלו ולענות עליהן לאחר דיון בקבוצה.

לאחדות מהשאלות ולפתרונות האפשריים נתייחס בסעיף הדן בייצור התעשייתי של הברום.

השתמש בידיעותיך ונסה להציע שיטות לניקוי הברום ממים ומאי ניקיונות נוספים העולים להמצא בו.

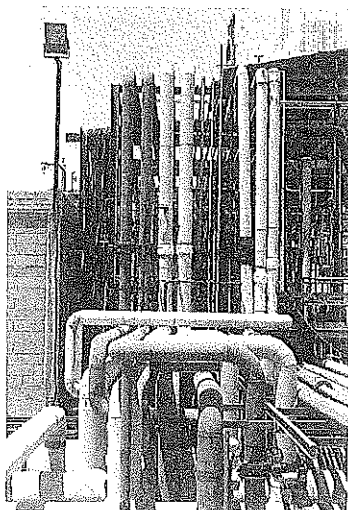
את התהליך כולו ניתן לתאר באופן כללי על-ידי דיאגרמת מלבנים המתארת את השלבים השונים שלו. דיאגרמת מלבנים כזו נקראת בשפת התעשייה תרשים זרימה והיא מציגה את רצף הפעולות המבוצעות בתהליך. כל שלב בתרשים הזרימה מתואר על-ידי משבצת. החיצים הנכנסים למשבצת מסמלים את החומרים "הנכנסים" לתהליך, המגיבים, והחיצים היוצאים ממנה מסמלים את החומרים ה"יוצאים" מן התהליך, התוצרים.



רצף של משבצות כאלה מתאר את התהליך כולו.

תרשים זרימה: דיאגרמת מלבנים המתארת את רצף השלבים בתהליך.

שרטט תרשים זרימה לתהליך הפקת הברום במעבדה.



מערכת צינורות במפעל "תרכובות ברזם"

4.2 הבטיחות במעבדה

למדנו בפרק הראשון, כי הברום הוא יסוד רעיל ובעל יכולת שיתוך (ראה "כרטיס" בעמ' 11). לכן, הוא עלול להיות מסוכן כאשר לא נוקטים באמצעי זהירות מתאימים בעת הטיפול בו. לשמירה על כללי הבטיחות יש חשיבות עליונה והיא תנאי ראשוני והכרחי לביצוע ניסוי כלשהו, ובוודאי כאשר מדובר בחומרים ותהליכים מסוכנים.

בגלל יכולת השיתוך הגבוהה של הברום יש צורך לבחור בקפידה את כלי התגובה, הפקקים, הצנרת או כל חלק אחר במערכת העשוי לבוא במגע עם ברום. כל אלו צריכים להיות בנויים מחומרים העמידים בפני ברום בתנאי התגובה. עמידותה של הזכוכית בפני ברום מאפשרת את השימוש בכלי מעבדה רגילים. הבעיה של בחירת חומרי מבנה עמידים עבור פריטי הצידוד השונים אינה אופיינית רק להפקת ברום אלא מלווה רבות מהתגובות הכימיות ויש לה חשיבות מרובה בתכנון המערכות השונות.

חומרי מבנה: החומרים מהם עשויים פריטי הצידוד השונים המשמשים לביצוע תהליכים כימיים, לאיחסון החומרים או לשיועם.

בגלל רעילותו של הברום יש לבצע כל ניסוי בו הוא משתתף במינדף ולהקפיד על שימוש באמצעי מיגון מתאימים, כמו כפפות להגנת הידיים ומשקפים מיוחדים להגנת העיניים. יחד עם זאת חשוב ביותר לפני ביצוע ניסוי כלשהו לברר מהן הסכנות הצפויות ולהכין מבעוד מועד אמצעים מתאימים בהם ניתן יהיה להשתמש במקרה של תקלה. עבור חומרים רעילים יש לדאוג להכנת אמצעים או חומרים מתאימים שיוכלו להגיב עימם ולבטל את השפעתם המזיקה במקרה של דליפה או שפך. חומרים אלה נקראים בשפת התעשייה חומרי ניטרול או חומרים מנטרלים

חומרים מנטרלים: חומרים המגיבים עם חומר מסוכן בתגובה שאינה יוצרת חומרים מסוכנים ושאינה גורמת סכנות אחרות כלשהן. חומרים אלו מהווים אמצעי ביטחון במקרה של דליפת החומר המסוכן או תקלה אחרת למניעת סיכונים אפשריים לאדם ולסביבה.

- מהן התכונות הנדרשות מחומר מנטרל טוב? הסבר!
- עיין באוסף התגובות של הברום המופיעות בעמ' 12-13 ונסה להציע חומרים מנטרלים מתאימים עבור ברום.

- נסה לבחון את יתרונותיו וחסרונותיו של כל אחד מהחומרים שהצעת.
- אם אתה זקוק לנתונים נוספים, הגדר מהם והסבר מדוע הם חשובים. נסה למצוא נתונים אלו בעזרת ספרי נתונים או מאגרי מידע.
- בתגובות מסויימות מתקבל ברום גזי ובמקרים אחרים מקבלים ברום נוזלי. נסה להציע חומר מנטרל מתאים עבור: ברום במצב גזי.
- ברום במצב נוזלי.

חומר ניטרול שהיה מקובל שנים רבות ונוח מאד לשימוש במעבדה³ הוא תמיסת נתרן תיו סולפט, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$. במידה והתגובה יוצאת מכלל שליטה, או לאחר סיומה, כאשר רוצים לנטרל את עודפי הברום, ניתן להזרים את הברום ישירות לתוך תמיסת התיו סולפט.

ניסוי 2: כיצד לבחור חומר מנטרל? (הניסוי חייב להעשות במנדף!)

- המורה יכניס לתוך כוס כימית, המבודדת באמצעות כוס קלקר, 50 סמ"ק תמיסת נתרן תיו סולפט בריכוז 1M וימדוד את הטמפרטורה.
- המורה יוסיף לתוך תמיסת התיו סולפט 1 סמ"ק ברום (אמפולה קטנה) תוך כדי בחישה קלה ומדידת הטמפרטורה.
- צפה בתהליך ורשום את השינוי בטמפרטורה.

- כאשר מזרימים ברום לתמיסת התיו סולפט הצבע החום נעלם. מדוע?
- חשב את השינוי באנרגיה המלווה את התגובה?
- חשב את השינוי באנרגיה אם במקום 1 סמ"ק ברום נוסיף 10 סמ"ק ברום?
- חשב מה יהיה השינוי בטמפרטורה במקרה של הוספת 10 סמ"ק ברום?
- מה ניתן ללמוד מניסוי זה?
- התגובה בין ברום לבין תמיסת נתרן תיו סולפט היא אקסותרמית ולכן אינה מתאימה לשימוש בכל המקרים בהם קיימת דליפת ברום.
- מהן הסכנות בניטרול ברום על ידי תמיסת נתרן תיו סולפט?
- במקרה שברום נשפך על חלקי הגוף האם כדאי לדעתך לנטרל אותו באמצעות תמיסת נתרן תיו סולפט? נמק.
- במקרה של פגיעה בחלקי גוף ההמלצה היא לשטוף עם כמות גדולה של מים. הסבר מדוע.
- הצע חומרים נוספים בהם תוכל להשתמש כדי לנטרל ברום. רשום ניסוחים והסבר.
- מה יהיו אמות המידה על פיהם יבחר החומר המתאים ביותר לניטרול הברום?

3 ניתן לצפות בהדגמה של נטרול על ידי תמיסת נתרן תיו סולפט בקלטת הוידאו: "הברום ותרכובותיו - ניסויים וסרטוני העשרה". בהוצאת המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות.

5.ג – מהפקת ברום במעבדה לייצור ברום בתעשייה

הרעיון שעומד מאחורי ייצור הברום בתעשייה דומה לזה שהוצג במערכת הניסויית שתוארה בסעיף 3.ג. יחד עם זאת חשוב לציין שכאשר התהליך המעבדתי "מתורגם" לתהליך תעשייתי עולות בעיות רבות אשר לא באות לידי ביטוי בעת תכנון המערכת המעבדתית. בסעיף זה נציג מספר בעיות הכרוכות במעבר מייצור הברום במעבדה לייצור הברום בתעשייה. מטבע הדברים יכולים להמצא פתרונות שונים לכל אחת מהבעיות. גם כאשר עוסקים בייצור חומרים זהים או בשיטות ייצור דומות, עשויים להיות הבדלים בפתרונות המיושמים לפתרון של בעיות אלו במפעלים שונים ובמדינות שונות. נזכור, כי מעל לכל עומד השיקול הכלכלי ושום פתרון לא יהיה ישים במידה ויגרום להפסדים.

בחירת חומרי הגלם

כאמור, מפיקים ברום הן במעבדה והן בתעשייה באמצעות התגובה בין תמיסה המכילה יוני ברומיד לבין כלור. בניסוי המעבדה הוכן הכלור באמצעות תגובה בין אשלגן על-מנגנטי וחומצה מימן כלורית. שניהם חומרים שכיחים במעבדות, אך יקרים מדי לשימוש תעשייתי. כדי לייצר כלור בתעשייה יש למצוא חומרי גלם זולים יותר, אפילו אם יהיה צורך בשינוי שיטת הייצור. הקביעה מהו חומר הגלם המתאים לייצור חומר כלשהו יכולה להשתנות עם השנים, כאשר נמצאים מקורות מתאימים, זמינים וזולים יותר. נסה להציע מקורות זולים לכלור. כיצד תוכל להשוות את כדאיות השימוש בכלור ממקורות שונים?

בחירת חומרי מבנה

למעשה מלווה בעיית חומרי המבנה את התהליך מתחילתו ועד סופו. כל חלק של המערכת שבא במגע עם החומרים המשתתפים בתגובה חייב להיות עמיד בתנאים השוררים בה. דרישת העמידות אינה מסתיימת במיתקן הייצור עצמו, אלא מתייחסת גם לצנרת המיועדת להזרמת הכלור והתמלחת, מכלי האחסון, אמצעי ההובלה של הברום וכד'.

הציוד והכלים בהם השתמשנו במעבדה עשויים מזכוכית, שהיא עמידה בפני טמפרטורות גבוהות ומתאימה גם לחומרים רבים בעלי יכולת שיתוך גבוהה. אלו כלים שבירים ויקרים יחסית, המתאימים להכנת כמויות קטנות של חומרים. אמנם הזכוכית טובה לשימוש עבור תהליכים בהם משתתפים חומרים כמו כלור

וברום, אך אין זה מעשי להשתמש בציוד העשוי רק מזכוכית כאשר מדובר בצנרת ובמתקנים בקנה מידה תעשייתי.

במקרה של הברום הבעייה קשה במיוחד. כבר בפרק הראשון למדת על תגובותיו המגוונות של הברום עם חומרים שונים, ביניהם מתכות רבות. עובדה זו מצביעה על הקושי הרב בבחירת חומרי מבנה מתאימים.

האם ניתן לאחסן ברום בכלי עשוי מאלומיניום? ברזל? נירוסטה (פלדת אל חלד) המכילה בנוסף לברזל גם ניקל וכרום? הסבר.

הכמותיות בתהליך

בניסויי מעבדתי אין בדרך כלל דרישות מיוחדות לגבי הכמויות המיוצרות. המטרה היא לבדוק את התהליך מבחינה עקרונית: האם הוא אפשרי? באילו תנאים? במרבית המקרים לא קיימת בניסוי המעבדתי בעיה של עלויות וגם לכמות המופקת אין חשיבות מכרעת. לעומת זאת, במפעל המייצר בקנה מידה גדול, יש לדאוג ליעילות מרבית של תהליך הפיכת חומרי הגלם לתוצרים.

- במערכת הניסויית של הפקת הברום לא התייחסנו לכלור שלא הגיב ויצא מן המערכת. מהי המשמעות שיש לכך מבחינה כמותית?
- נסה לבחון זאת מהבטים שונים העשויים להשפיע על הייצור התעשייתי.

זרגת הניקיון של התוצר

בניסוי הצלחנו להפיק ברום, אך לא דאגנו לרמת הניקיון שלו. לא הבאנו בחשבון קיומם של אי נקיונות, כמו מים וכלור, המתמוססים בו במידה מסוימת. חשוב לציין, כי לרוב המטרות יש צורך בברום נקי, ולשם כך עליו לעבור תהליכי ניקוי שונים שיפורטו בהמשך.

שיטות הניקוי הן מגוונות ונבחרות בהתאם לחומרים ולתכונותיהם, לזרגת הניקיון הנדרשת ולעלות הכספית הכרוכה בהפרדת הזיהומים השונים. שיקולים כגון אלו הם חלק בלתי נפרד מתיכנון התהליך, ולעיתים אף מהווים חלק נכבד ביותר בו.

- הצע שיטות באמצעותן ניתן להפריד מהברום את הכלור והמים המומסים בו.
- אם הצעת מספר שיטות, נסה להשוות אותן מבחינת העלות היחסית שלהן. התייחס לגורמים כמו השקעת אנרגיה, חומרים נדרשים וכד'.

עלויות אנרגיה

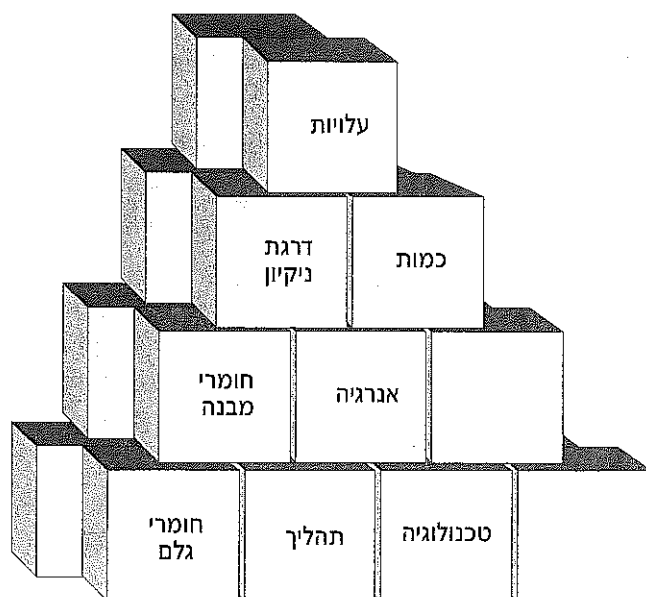
את מתכנני המיתקנים מטרידה לכל אורך הדרך השאלה: כיצד ניתן לחסוך בעלויות אנרגיה?

בניסוי במעבדה חממנו באמצעות פלטה חשמלית. כיצד נחמם בתעשייה?

- האם ידועים לך אמצעים אחרים לחימום? פרט.
- גם שלב עיבוי הברום יכול להשפיע באופן משמעותי על עלות התהליך המתבצע בקנה מידה תעשייתי. מהם המשתנים שיש לקחת בחשבון? הסבר.

לדרכים בהן פותרים את בעיות האנרגיה בתהליך ייצור הברום נתייחס בסעיף הבא.

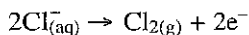
- מהם הגורמים הנוספים שיש לדעתך לקחת בחשבון במעבר מייצור ברום במעבדה לייצור ברום בתעשייה?



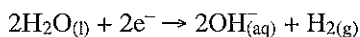
6.ג – כיצד מייצרים כלור בתעשייה?

בפרקי הלימוד הקודמים למדת על תהליכי אלקטרוליזה בתמיסה מימית ובוודאי גם בצעת ניסויים בהם העברת זרם חשמלי דרך תמיסות של מלחי כלור. זוהי הדרך שנבחרה כדי להפיק את הכלור הדרוש לייצור הברום.
לכאורה ניתן לחשוב כי תהליך האלקטרוליזה בו מושקעת אנרגיה חשמלית אינו כדאי, מה, לדעתך, יכולות להיות הסיבות בגללן נבחר דוקא תהליך זה?

את הכלור מייצרים במפעל הכלור בסדום. כאמור, חומר הגלם המקובל זה שנים רבות הוא מלח בישול, NaCl .⁴
לאחר שהנתרן הכלורי עובר תהליכי ניקוי ממיסים אותו במים ואת התמלחת המתקבלת מעבירים לתאי אלקטרוליזה. תוך כדי תהליך האלקטרוליזה מתקבל ליד האנודה גז כלור:



ליד הקתודה מתקבל גז המימן:



המתח המופעל בתאי האלקטרוליזה צריך להתאים הן לחמצון הכלור ליד האנודה והן לחיזור המים למימן ליד הקתודה. מתח זה מספקים לתאי האלקטרוליזה באמצעות החשמל המיוצר בתחנת הכח של מפעלי ים המלח שנבנתה בסמוך למפעלים במיוחד לצורך זה.

- מהו המתח המינימלי הנדרש לביצוע האלקטרוליזה?⁵
- האם ניתן, לדעתך, להשתמש עבור תהליך האלקטרוליזה ישירות במלח בישול הנכרה בבריכות האידוי? נמק.
- האם ניתן לדעתך להשתמש במים רגילים עבור תהליך האלקטרוליזה? נמק.
- מהי כמות הכלור הנדרשת להפקת טון של ברום? פרט את חישוביך. הנח כי התגובה מתרחשת עד תום וללא אובדן חומרים.

לעומת זאת, מתבצע תהליך הייצור של הברום בתעשייה בדומה לתהליך המעבדתי, באמצעות תגובה ישירה עם כלור. זהו תהליך מהיר, פשוט יחסית וכלכלי.

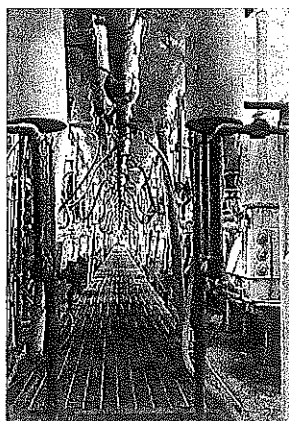
4 משתמשים במלח הבישול המתקבל בתהליך הפרדת האשלג מהקרנליט.

5 בפועל צריך להגדיל את המתח המופעל מעל למתח המינימלי שחישבת. ההפרש בין המתח הנדרש בפועל לבין המתח שחשבת נקרא מתח יתר. מתח יתר הוא ביטוי לאנרגית השפעול שיש להשקיע בתהליך.

לכאורה ניתן היה לחשוב על שיטה אלקטרוליטית דומה לייצור ברום ממי-ים המלח. הרי גם את יוני הברום ניתן לחמצן באמצעות זרם חשמלי (ראה טבלת פוטנציאלי חיזור בספר הנתונים).

- מהו המתח המינימלי הדרוש להפקת הברום?
- מהם היתרונות של חמצון יוני הברום באמצעות זרם חשמלי?

לרוע המזל רעיון זה, על פיו ניתן לחסוך את שלב הכנת הכלור, אינו ניתן למימוש. למרות הנסיונות הרבים והמחקרים שנעשו בתחום זה, קיימות בתגובה בעיות טכנולוגיות אשר טרם נמצא להן פיתרון.



תאי אלקטרוליזה במפעל הכלור (שיטת הממברנות)

באופן טבעי ממוקמים מפעל הכלור ומפעל הברום זה ליד זה ובסמוך למקור חומר הגלם המשותף - ים המלח. קו צינורות מזרים את הכלור באופן רצוף ישירות מתאי האלקטרוליזה אל מפעל הברום.

- מהם היתרונות בהקמת מפעל הכלור ליד מפעל הברום? פרט.
- מהם השיקולים להקמת שני המפעלים דוקא ליד ים המלח?
- האם קיימים לדעתך חסרונות במיקום שני המפעלים דוקא ליד ים המלח? פרט.

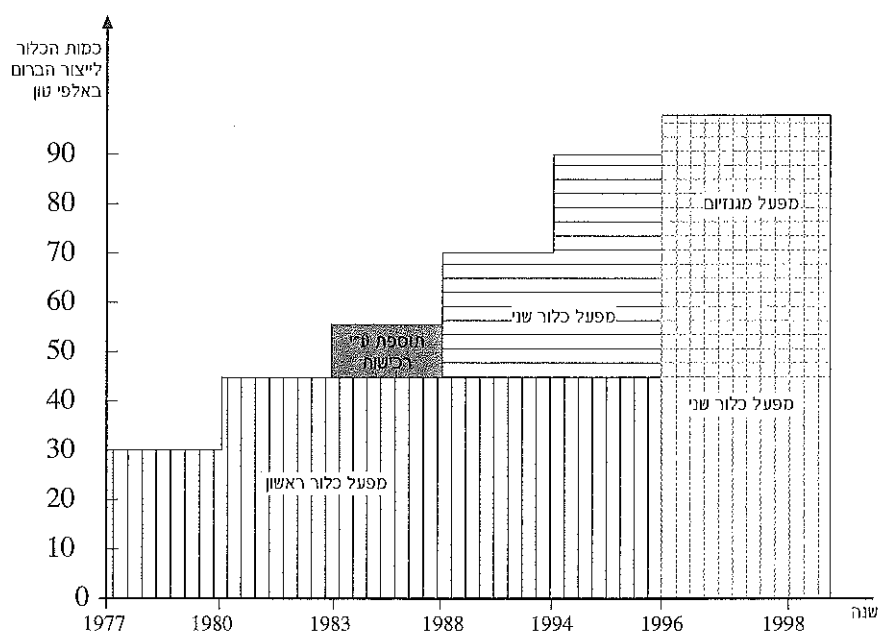
כאמור, בשנים הראשונות של המפעל לא הפיקו כלור בסדום. את הכלור היו מביאים במכליות ממפעל פרוטרום הממוקם באזור התעשייה בעכו. רק בשלבים מאוחרים יותר הוקמו שני מפעלי כלור⁶, הראשון בעל כושר ייצור של 45,000 טון לשנה, הוקם ב-1976 והוא מבוסס על תהליך אלקטרוליזה בתאי דיאפרגמות. השני, גם הוא בעל כושר ייצור של 45,000 טון לשנה, הוקם ב-1987 והוא מבוסס על תהליך אלקטרוליזה בתאי ממברנות.

6 לקריאה נוספת: ייצור של כלור וקאוסטיק סודה בתאי ממברנות, מאת א. מוספייר כימיה-הנדסה כימית. גיליון 13, מרץ 1990.

- "כמות הכלור שניתן להשיג קובעת את הקף הייצור של הברום". חווה דעתך על משפט זה.
- מהי כמות הברום בטונות לשנה שניתן לקבל על פי כמות הכלור שהופקה בשני מפעלי הכלור? הנח שהתהליך הולך עד תום ושאינן אובדנים.
 - נסה להסביר את הנתונים על כמויות הברום המיוצרות בישראל החל משנת 1975 (ראה טבלה בעמ' 31).

בדצמבר 1996 החל בפעולתו מפעל להפקת מגנזיום⁷ המבוסס על אלקטרוליזה של קרנליט (מלח הידראט של מגנזיום כלורי ואשלגן כלורי) שעבר תהליך של הוצאת מים והתכה. בנוסף למגנזיום מתקבל בתהליך זה גם כלור.

- כיצד יכולה להשפיע הקמת מפעל המגנזיום על ייצור הברום?
- כיצד יכולה להשפיע הקמת מפעל המגנזיום על הייצור במפעל הכלור?
- אלו בעיות עלולות להופיע כתוצאה מהשימוש בכלור שמקורו במפעל המגנזיום?
- מה היתרון של השימוש בכלור המופק במפעל המגנזיום?



הגידול בתפוקת הכלור לאורך השנים

כמות הכלור המסופקת כיום על ידי מפעל המגנזיום היא כ-45,000 טון לשנה. לכן השביתו מאז אמצע שנת 1998 את פעולתו של מפעל הכלור הראשון והמפעל השני מפיק כלור בהתאם לצרכים.

- חשב מהי כמות הכלור הדרושה לייצור של 185,000 טון ברום (ייצור שנתי ב-1998)?

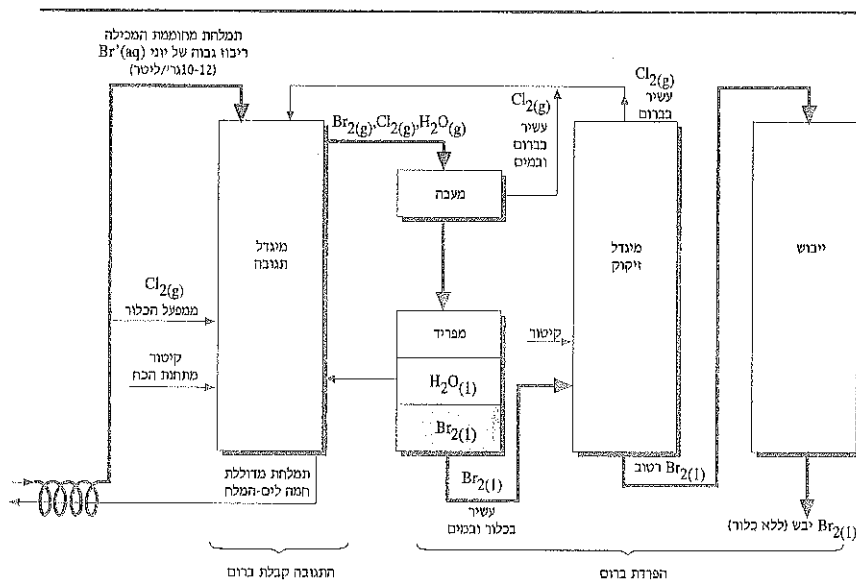
7 לקריאה נוספת: ייצור מגנזיום מתכתי במפעלי ים המלח, מאת אריה בודנהיימר, קשר לתעשייה הכימית, חוברת מס' 1, תשנ"ז.

ג.ג - ייצור הברום בסדום - כיצד מייצרים ברום בתעשייה?

תהליך ייצור הברום בתעשייה דומה באופן עקרוני לתהליך המעבדתי, והוא מתבצע באמצעות תגובה ישירה של כלור עם תמלחות עשירות ביוני ברום. כאמור, זהו תהליך מהיר, פשוט יחסית וכלכלי.

ייצור הברום נעשה בסדום בשיטה ה"חמה". שיטה זו מבוססת על הזרמה של כלור וקיסור (המיוצר בתחנת הכוח של מפעלי ים המלח) ישירות לתוך מיגדל התגובה אליו מוזרמת גם תמלחת עשירה ביוני ברומיד.

הסכימה הכללית⁸ הבאה מציגה את תהליך ייצורו של הברום:



בסעיף זה נתאר את השלבים השונים של תהליך ייצור הברום בסדום ונציג את ההבטים המדעיים והטכנולוגיים העיקריים.

8 פרטים מסוימיים שאינם קשורים בתהליך ייצור עצמו אלא בהגברת הניצולת של המערכת הושטמו כדי לפשט.

שלב קבלת הברום:

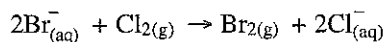
למיגדל תגובה מזרימים:

מלמעלה - תמלחת כמה עשירה ביוני ברום.

מלמטה - כלור וקיסור.

מדוע מזרימים למיגדל התגובה את התמלחת מלמעלה ואילו את הכלור מלמטה?

במיגדל התגובה מתרחשת תגובת חמצון-חיזור בה נוצר הברום:



כדי שהברום הנוצר לא ישאר בתמיסה, כפי שקרה בשלבים הראשונים של הניסוי, ראינו שיש צורך בחימום.

החימום נעשה באמצעות קיטורי הממלא למעשה שני תפקידים:
- חימום מיגדל התגובה לטמפרטורה מעל 100°C (100°C - 120°C).
- "גירוש" הברום מהתמיסה (הקיטור סוחף איתו את אדי הברום).

תערובת הגזים הכוללת אדי ברום, שאריות כלור וקיסור עולה לראש המיגדל, ואילו התמלחת הנוזלית מתנקזת בתחתית המיגדל. כדי לשפר את יעילות התגובה במערכת של גז-נוזל (שתי-פאזות) יש לנקוט באמצעים שיביאו למגע מיטבי בין החומרים המגיבים. ממלאים את המיגדל בחומרי מילוי מתאימים (בצורת טבעות, דיסקיות וכד' העשויים מחומרים עמידים) ועל-ידי כך מגדילים את השטח וזמן המגע בין הגזים לתמיסה. הן הגזים והן התמיסה חייבים לעבור בחללים בין חומרי המילוי וכך מובטחת יעילות טובה יותר של התגובה. מיגדל כזה נקרא מיגדל ממולא.

מיגדל ממולא: מיגדל ובו חומרי מילוי (בצורת טבעות, דיסקיות וכד') שבו מתבצעת תגובה בין הגזים לבין נוזל או תמיסה. מטרת חומרי המילוי להגדיל את שטח המגע בין החומרים המגיבים במיגדל.

תנאי התגובה, יחסי הכמויות וקצב הזרמת המגיבים קובעים את יעילות התגובה ולכן יש לקבוע תנאים מיטביים (אופטימליים) שיביאו ליצירת כמות מרבית של ברום. זוהי בעייה הנדסית-טכנולוגית, היוצאת מתחום עיסוקם הבלעדי של

הכימאים ועוברת לידי מהנדסי הכימיה. כמות הברום התאורטית המרבית שניתן לקבל בתגובה, על פי הניסוח (יחסי המולים) ובהתחשב בכך שזוהי תגובה המתרחשת עד תום היא 2.2 טון לכל טון כלור המוזרם לתגובה (ראה שאלה בעמ' 66). זאת כמובן בהנחה שהתהליך מתוכנן כך שתתרחש תגובה מלאה של הכלור.

למעשה כדי לקבל יעילות מרבית של התהליך צריכים להתקיים שני תנאים:
- כל יוני הברום בתמלחת יגיבו.
- התוצר היחיד שיתקבל בתגובה זו הוא ברום.

משמעות קיום שני תנאים אלו יחד היא שכל יוני הברום בתמלחת יגיבו ליצירת ברום. זהו כמובן מצב אידאלי שיש לשאוף להגיע אליו קרוב ככל האפשר, אך אם רוצים לשמור על עלויות סבירות וזמנים ריאליים יש בדרך כלל למצוא תנאים של פשרה מעשית.

בפועל, חלק מיוני הברום בתמיסה לא מגיבים ומוזרמים עם התמלחת השארית חזרה לים המלח. במקרה כזה כמובן לא נעשה ניצול מרבי של התמלחת וחלק מפוטנציאל הייצור של ברום מתבזבז. ביזבוז זה גדול יותר כתוצאה מכך שלא נעשה ניצול מרבי של תשומות שכבר נעשתה בהם השקעה כגון: הכנת קיטור, חימום וכד'. עקרונית ניתן לתכנן מצב בו רוב יוני הברום יגיבו ליצירת ברום על ידי תכנון קצב זרימה מתאים ושימוש בעודף כלור.

ריכוז יוני הברום בתמלחת המדוללת המוחזרת לים המלח הוא כ-1 גרם לליטר. אם תתבונן בטבלה בעמ' 29 תוכל לקבל אישור נוסף ליתרונו של ים המלח כמקור להפרדת ברום. הסבר.

אחד המדדים ליעילות התגובה היא הכמות היחסית של המגיבים שהגיבה. אנשי התעשייה משתמשים במושג המרה או אחוז המרה¹⁰.

המרה (Conversion): היחס, מבוטא באחוזים, בין כמות המגיב שהגיבה לבין כמות המגיב שהוכנסה למכל התגובה.

לדוגמא: אם רק 80% מיוני הברום הגיבו והשאר נשארו בתמלחת והוחזרו עימה לים המלח אזי אחוז ההמרה לגבי יוני הברום הוא 80%. ניתן למדוד את ההמרה לגבי כל מגיב במערכת ובתהליך זה ניתן כמובן לחשב את אחוז ההמרה גם ביחס לכלור.

האם ההמרה מהווה תמיד מדד מדויק ליעילות התגובה? נמק.

10 דוגמאות נוספות ראה בנספח א'.

הידעת?

בתגובות הפיכות, העשויות להגיע למצב שיווי משקל, תלוי אחוז ההמרה בקבוע שיווי המשקל. כאשר קבוע שיווי המשקל של התגובה נמוך מאד אחוז ההמרה נמוך מאד. כאשר קבוע שיווי המשקל של התגובה גבוה מאד אחוז ההמרה גבוה מאד ויכול להגיע ל-100% ואז התגובה באופן מעשי "הולכת" עד תום.

אחוז ההמרה, בדיוק כמו קבוע שיווי משקל, ייחודי לכל תגובה ומושפע מהתנאים בהם היא מתבצעת, כמו למשל: טמפרטורה, לחץ (כאשר משתתפים בתגובה גזים) וריכוזים.

בתעשייה בדרך כלל לא עובדים בתנאי שיווי משקל, זאת, גם אם התגובה הפיכה ויכולה באופן עקרוני (כאשר ניתן מספיק זמן לשם כך) להגיע למצב שיווי משקל. יחד עם זאת מיישמים בעת תכנון התהליך ובקביעת תנאי התגובה את הידע שנצבר לגבי תהליכים הפיכים, הבא לידי ביטוי בעיקרון לה-שטלייה.

גורם נוסף שמתכנני התהליך צריכים לקחת בחשבון הוא מניעת התרחשותן של תגובות מתחרות של הברום או של הכלור במהלכן נוצרים תוצרי לוואי בלתי רצויים.

- האם הווצרות תוצר לוואי משפיעה על אחוז ההמרה? הסבר.
- כיצד ניתן להעלות את אחוז ההמרה? פרט.

היווצרות תוצרי לוואי גורמת לירידה ביעילות התהליך ויש לה גם משמעות כלכלית. מצד אחד לא מתקבלת הכמות המרבית האפשרית של התוצר הרצוי, ומצד שני הווצרות תוצרי לוואי בלתי רצויים גורמת לכך שנדרשת השקעה נוספת בעת תהליך התוצר לצורך הפרדתו מתערובת התגובה. גורם זה משפיע על מדד מדויק יותר ליעילות הנקרא בשפת התעשייה ניצולת התגובה.¹¹ ניצולת התגובה מתייחסת לכמות התוצר המבוקש שמתקבלת בתגובה.

ניצולת התגובה: היחס, מבוטא באחוזים, בין כמות התוצר-המבוקש המתקבלת בתגובה לבין הכמות שהיתה צריכה להתקבל על פי ניסוח התגובה, הכמות ההתחלתית של המגיבים ואחוז ההמרה.

לדוגמא: אם ההמרה היא 100% אבל רק 80% מהמגיב הפכו לתוצר המבוקש, ניצולת התגובה היא 80%. כל זאת כמובן בהנחה שאין אובדנים בגלל סיבות נוספות.

- מהם הגורמים הנוספים העלולים להשפיע על ירידה בניצולת התגובה?

11 דוגמאות נוספות ראה נספח א'.

לרוע המזל קיימים גם בשלב הפקת הברום מספר מכשולים העלולים להשפיע הן על אחוז ההמרה והן על אחוז הניצולת. נתונים אלה יש לקחת בחשבון כאשר מתכננים את התהליך:

שאריות חומרים אורגניים המצויים בתמלחות ים המלח

במידה והתמלחת מכילה שאריות חומרים אורגניים יכולה כמות הברום המופק לרדת באופן משמעותי ביותר, שכן חלק מהכלור מחמצן את החומרים האורגניים במקום את יוני הברום וכמו כן גם הברום עצמו עשוי להגיב עם החומרים האורגניים. מצד שני, עלולות התרכובות האורגניות לזהם את התוצר ולהביא לצורך להוסיף שלבי טיהור ולירידה בניצולת כתוצאה מהפסדי חומר.

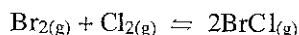
בארה"ב מייצרים ברום מתמלחות תת-קרקעיות הנקדחות מבארות בהן מצויים גם מאגרי נפט. מסיבה זו הברום המופק מתמלחות אלו מכיל זיהומים אורגניים. זיהומים אלו ניתן להפריד על-ידי זיקוק¹².

- מהו העיקרון עליו מבוסס תהליך הזיקוק?
- כיצד בנויה מערכת זיקוק?
- כיצד עשוי להשפיע תהליך הזיקוק על הניצולת של תהליך הפקת הברום?
- מהו היתרון של הפקת ברום מים המלח ביחס להפקתו מתמלחות הנקדחות מבארות בהן מצויים גם מאגרי נפט?

זיקוק: תהליך שבו מפרידים מרכיבים נוזליים מתמיסה באמצעות חימום לטמפרטורה מתאימה.

תגובות לוואי העלולות להתרחש במיגדל התגובה

בתערובת בה מצויים כלור וברום, ובנוסף אליהם גם יוני ברום וכלור עלולות להתרחש מספר תגובות מתחרות, אשר אחת מהן היא תגובת שיווי המשקל הבאה :



נתון כי אנרגיית הקשר Br-Cl היא 215.1 ק' ג'ול למול.

- העזר בספר הנתונים וחשב את אנטלפית התגובה לעיל.
- הצע דרכים באמצעותן ניתן להטות את התגובה לקבלת כמות מרבית של ברום (כמות מזערית של ברום כלורי)?

¹² תהליך זה של הפרדה באמצעות זיקוק ניתן לבצע כאשר התערובת מכילה מספר מרכיבים בעלי טמפרטורות רתיחה שונות. כל מרכיב יהפוך לגז כאשר תשרור הטמפרטורה המתאימה למעבר זה. במקרה כזה דואגים שהטמפרטורה תעלה בהדרגה ותאפשר הפרדתם של החומרים השונים.

תגובות מתחרות כגון אלו עלולות לגרום להקטנת כמות הברום המתקבל ולכן רצוי כמובן שאחוז ההמרה לגביהן יהיה קטן ככל האפשר.

התגובה ליצירת $\text{BrCl}_{(g)}$ היא אנדותרמית ולפיכך כדי להקטין את אחוז ההמרה ולמנוע את הווצרותו של ברום כלורי דרושה טמפרטורה גבוהה. טמפרטורה נמוכה מדי תגרום לאחוז המרה גבוה בתגובה לעיל והווצרות כמות גדולה יחסית של ברום כלורי. טמפרטורה גבוהה נדרשת גם כדי שהקיסור הסוחף עימו את הברום לא יתעבה וכמובן גם כדי שהברום עצמו יהיה במצב גזי.

שימוש בעודף כלור מביא לנוכחות של BrCl במוצר. למעשה עלולה תגובה זו להפריע רק כאשר משתמשים בעודף גדול של כלור.

בעייה נוספת, עליה כבר למדת בסעיף ג.3, היא הווצרות היון המורכב $\text{Br}_3^-_{(aq)}$ שמסיסותו במים גבוהה. ראינו כי היון המורכב אינו יציב בטמפרטורות גבוהות ולכן גם מבחינה זו רצוי שהטמפרטורות לא תהיינה נמוכות מדי.

זוהי מערכת מורכבת של שיקולים המנסה למצוא תנאים מתאימים שיתנו את התוצאה הטובה ביותר. מצד אחד ניצולת מרבית ומצד שני תוצר נקי ככל האפשר. כל זאת מבלי לגרום לכך שהעלויות תהיינה גבוהות מדי. לפיכך, יש לדאוג שכמות הכלור תהייה מספיקה כך שלא ישארו יוני ברום בתמיסה, מצד שני לא רצוי שכמות הכלור המוזנת למיגדל התגובה תהייה גבוהה מדי.

הבאנו פה דוגמא המראה כיצד מכלול הדרישות מחייב בדיקה מעמיקה ובחירת תנאים מיטביים של פשרה. עבור מיגדל התגובה נבחרה טמפרטורת אופטימלית שהיא בין $100-120^\circ\text{C}$ ואילו הכלור מוזרם בעודף קטן ככל האפשר.

- מהי הסיבה לשימוש בעודף כלור?
- מדוע לא כדאי שהכלור יהיה בעודף גדול מדי? ציין שתי סיבות לפחות.

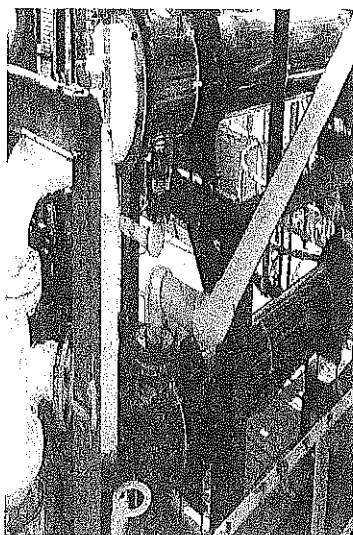
התמלחת ה"מנוצלת" מוחזרת לים המלח והיא מכילה יוני כלור בכמות הגדולה במעט מהכמות המקורית וכמות קטנה של יוני ברום שלא הגיבו עם הכלור. החזרת יוני הברום ל"מאגר" הראשוני מונעת את "ביזבוזו".

- האם, לדעתך, החזרת תמלחת זו לים מהווה בעייה אקולוגית? נמק.
- התמלחת יוצאת מתחתית מיגדל התגובה כשהיא חמה. האם כדאי לדעתך להזרים את התמיסה החמה ישירות לים המלח? נמק.

התמלחת מוזרמת לים המלח רק לאחר שנעשה ניצול האנרגיה על-ידי מערכת החלפת אנרגיה בין התמיסה הקרה שנכנסת למיגדל והתמיסה החמה שמוחזרת לים. החלפת האנרגיה נעשית על ידי שימוש במערכת צינורות בעלת שטח פנים גדול למגע הנקראת מחליפי חום¹³.

13 צריך למעשה לומר מחליפי אנרגיה, אבל בתעשייה נהוג לקרוא להם מחליפי חום.

מחליף חום: מיתקן בו מתקיים מעבר אנרגיה לא ישיר בין זרמים
בטמפרטורות שונות לצורך חיסכון באנרגיה.



מחליף חום במיתקן לייצור ברום

התמלחת ה"גולמית" המוזרמת למיגדל התגובה עוברת דרך מחליפי החום הללו ומתחממת על ידי התמלחת ה"מנוצלת" החמה היוצאת ממיגדל התגובה.

- מהו העיקרון התרמודינמי עליו מבוססת פעולתם של מחליפי החום?
- כיצד תורמים מחליפי החום לחיסכון באנרגיה?

גם כאשר נשמרים תנאים מיטביים לתגובה כפי שפרטנו לעיל מכילה התמלחת המוחזרת לים המלח כמות קטנה יחסית של יוני ברום. המטרה היא שכמות זו תהייה קטנה ככל האפשר, וכך יושג ניצול מרבי של תכולת יוני הברום בתמלחת הנכנסת לתגובה.

שלבי הפרדת הברום:

מראש המיגדל יוצאת תערובת חמה של גזים המכילה ברום, כלור ואידי מים. תערובת זו חייבת לעבור סדרה של פעולות שבחלקן דומות לאלו שבוצעו בניסוי המעבדה שתואר קודם. בניסוי ראינו שכדי לקבל ברום במצב נוזל יש צורך בשלב ראשון לקרר את תערובת הגזים.

1. עיבוי:

תערובת הגזים החמה מגיעה למעבה בו שוררת טמפרטורה המתאימה לעיבוי הברום אך אינה מאפשרת את עיבוי הכלור.

- לאיזו טמפרטורה יש לקרר את תערובת האדים כדי שיתקבל ברום נוזלי?
- מהו מצב הצבירה של המים בטמפרטורה זו?
- מהו מצב הצבירה של הכלור בטמפרטורה זו?
- מהו טווח הטמפרטורות המתאים לעיבוי הברום ללא עיבוי הכלור?
- מה יקרה לאדי המים בטמפרטורות אלה? הסבר.
- האם הברום יהיה לדעתך נקי? הסבר.
- אם לא, ציין מהם לדעתך אי הניקיונות שהוא מכיל והסבר.
- האם הכלור יהיה לדעתך נקי? הסבר.
- אם לא, ציין מהם לדעתך אי הניקיונות שהוא מכיל והסבר.
- מהם שלבי ההמשך שיש לבצע עם הברום? הסבר.
- מהם שלבי ההמשך שיש לבצע עם הכלור? הסבר.
- מהם שלבי ההמשך שיש לבצע עם המים? הסבר.

בתנאי הטמפרטורה השוררים במעבה נפרד הכלור הגזי משכבת הנוזל והוא יוצא מן המעבה עשיר בברום ובמים ומוחזר למיגדל התגובה. כך נעשה ניצול יעיל של חומרי גלם יקרים וכמו כן נחסך שלב נוסף של פתרון אקולוגי לחומרים מסוכנים, שכן חומרים אלה לא ניתן ל"הזרים" לאטמוספירה ללא טיפול מתאים. החזרת חומרי גלם שלא הגיבו לתגובה נקראת מיחזור.

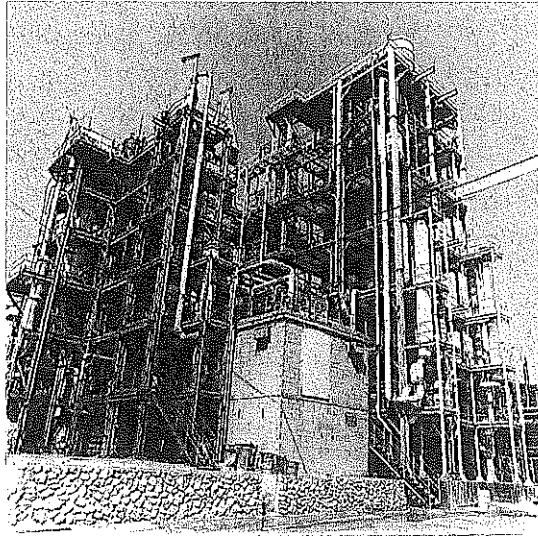
מיחזור: החזרת המגיבים שלא הגיבו למכל התגובה.

השכבה הנוזלית מכילה ברום, המכיל כלור ומים עוברת לשלב נוסף של הפרדה באמצעות מכל מיוחד הנקרא מפריד.

2. הפרדה:

במפריד מתקבלות שתי שכבות.

- מה מכילה כל אחת מהשכבות הללו?
- מדוע מתקבלות שתי שכבות? הסבר.
- איזו שכבה תהייה לדעתך התחתונה ואיזו תהייה העליונה? הסבר.



מיתקן הברום בסדום

השכבה הכבדה היא הברום והיא השכבה התחתונה. השכבה הקלה היא השכבה המימית והיא נמצאת כשכבה עליונה.

שיטת ההפרדה (הנקראת הפרדת פאזות) מבוססת על תכונות הברום שכבר חכרת.

- מסיסותו הנמוכה של ברום במים
- צפיפותו הגבוהה יחסית של הברום ביחס למים

- מה צריכים להיות לדעתך שלבי ההמשך לטיפול בשכבת הברום?
- מה צריכים להיות לדעתך שלבי ההמשך לטיפול בשכבה המימית?

השכבה המימית מכילה גם ברום וכלור המתמוססים במים בכמות קטנה (ראה "כרטיסים" בעמ' 11 ו-53). שכבה זו גולשת מהמפריד ומוחזרת למיגדל התגובה. שכבת הברום, שגם היא אינה נקייה ומכילה כלור ומים, עוברת לשלבי ניקוי נוספים בהתאם לצורך.

3. ניקוי:

כאמור, הברום המתקבל לאחר ההפרדה אינו נקי לגמרי והוא מכיל כלור ומים המומסים בתוכו.

- הסבר את עובדת התמוססותו של הכלור בברום;
- כיצד ניתן להסביר את התמוססות המים בברום;
- כיצד ניתן לדעתך להפריד את הכלור מהברום; הסבר.
- כיצד ניתן לדעתך להפריד את המים מהברום; הסבר.

הכלור וחלק גדול מהמים מופרדים על ידי זיקוק ומוחזרים למיגדל התגובה. כדי לקבל ברום "יבש" לחלוטין מסלקים את שארית המים בתהליך ייבוש. שלב אחרון זה של ייבוש הברום משאריות המים נעשה לפי הצורך. יש יישומים שבהם אפשר להשתמש ב"ברום רטוב" שהוא ברום שלא עובר ייבוש, ויש תהליכים שבהם חשוב להשתמש בברום "יבש" לחלוטין.

- נסה להציע שיטות ייבוש מתאימות לברום נוזלי. פרט.
- אילו עקרונות צריכים להשמר בבחירת שיטת הייבוש?

ייבוש: הוצאת המים מהחומר.

לאורך השלבים השונים של תהליך הייצור מתבצעת בקרה קפדנית ונלקחות דגימות אשר מבטיחות את קבלת הברום באיכות המבוקשת. הברום המתקבל מוזרם למכלי איחסון הנמצאים בסמוך למיתקן ומשם מועבר לאמצעי השינוע, כפי שיפורט בהמשך.

כפי שאנו רואים התהליך כולו מורכב ממספר שלבים המתבצעים במכלים שונים הבאים ברצף, האחד לאחר השני. תהליך כזה נקרא תהליך רציף. הזנת חומרי הגלם נעשית ללא הפסקה למכל התגובה הראשון בו מתבצע השלב הראשון של התגובה. המכלים השונים מחוברים על ידי צנרת מתאימה, משאבות ופרטי ציוד נוספים המאפשרים זרימה של תערובת התגובה משלב לשלב ללא הפסקה. בכל מכל (שלב) דואגים שישררו התנאים המתאימים לביצוע מטבי של התגובה המתרחשת בו (טמפרטורה, לחץ, זרז וכד'). לאחר השלב האחרון מקבלים את התוצר המבוקש. כך למעשה מתקיימת הזנה רצופה של חומרי גלם ובמקביל אין הפסקה בקבלת התוצר.

תהליך רציף: תהליך בו מזינים למערכת חומר/י גלם בקצב קבוע ובמקביל נעשית הוצאה קבועה של התוצר/ים. בכל חלק של המערכת העובדת באופן רציף מתבצעות פעולות קבועות במשך התהליך. מכך נובע כי ריכוז המגיבים והתוצרים בכל חלק של המערכת קבוע, ובקרת התהליך נעשית באמצעות שמירה על ריכוזים אלה.

תהליך רציף מתכננים כאשר למוצר אותו רוצים לייצר יש ביקוש קבוע ויש צורך לייצר אותו בכמויות גדולות. תהליך כזה מסובך הרבה יותר מבחינה טכנולוגית מתהליך מנתי ודורש בקרה הרבה יותר מורכבת, אבל יש לו גם יתרונות. בתהליך רציף ניתן לייצר כמויות גדולות ללא צורך במכלים גדולים, שכן תערובת התגובה לא שוהה זמן רב בכל שלב והיא זורמת ללא הפסקה ממכל אחד לשני. החסכון בבניית מכלים קטנים, וכתוצאה מכך גם במקום, מחזיר השקעות שנעשות באוטומציה ובבקרה. כמו כן, במידה ואין תקלות ותנאי התגובה בכל אחד מהשלבים נשמרים קבועים, איכות המוצרים אינה מישתנה באופן משמעותי ובאופן מעשי נשארת קבועה¹⁴.

בתעשייה קיימות מערכות שונות: החל ממערכות רציפות לגמרי ועד למערכות שחלקים מסויימים בהן רציפים ואחרים מנתיים. כל שלב וכל תהליך מתוכנן בהתאם לשיקולים המיוחדים אותו. בפרק הבא נראה מספר דוגמאות נוספות, הן של תהליכים מנתיים והן של תהליכים רציפים.

- אילו שינויים יש לבצע כדי להפוך את המערכת המעבדתית המתוארת בעמ' 59 למערכת רציפה? האם כדאי לדעתך לעשות כך במערכת זו? פרט.
- ציין סיבות אפשריות נוספות לתכנון מיתקן רציף וסיבות אפשריות נוספות לתכנון מיתקן מנתי.
- ציין יתרונות וחסרונות של מיתקן מנתי ויתרונות וחסרונות של מיתקן רציף.

בתהליך התעשייתי יש למדוד את כמות התוצר המתקבל מכמות נתונה של חומרי גלם ובכך נמדדת יעילות התהליך. יש חשיבות מרכזית להקטנת אובדנים של חומרי גלם או תוצרים לכל אורכו של תהליך הייצור. כאשר התהליך מורכב ממספר שלבים, ניתן לחשב את ניצולת התגובה לכל שלב בנפרד. מהן הסיבות האפשריות העלולות לגרום לירידה בניצולת בכל אחד משלבי ההפרדה השונים של הברוס?

את אנשי התעשייה מעניינת בסופו של דבר מהי כמות התוצר המתקבלת מכמות מסויימת של מגיבים שהוכנסה לתהליך וכיצד ניתן לשפר את יעילות התהליך ולקבל את הכמות המרבית של תוצר זה. לצורך זה מסתכלים לעיתים קרובות על היעילות הכוללת של התהליך על שלביו השונים מתחילתו ועד סופו ומגדירים את המושג ניצולת כוללת¹⁵. הניצולת הכוללת מחושבת על פי כמות התוצר המתקבלת בתהליך ביחס לכמות התאורטית שהיתה אמורה להתקבל מכמות התחלתית נתונה של מגיבים.

14 לקריאה נוספת: תהליך מנתי או רציף? מאת מירי קסנר, קשר לתעשייה הכימית, גיליון 3, ינואר 1998.

15 ראה דוגמאות בנספח א'.

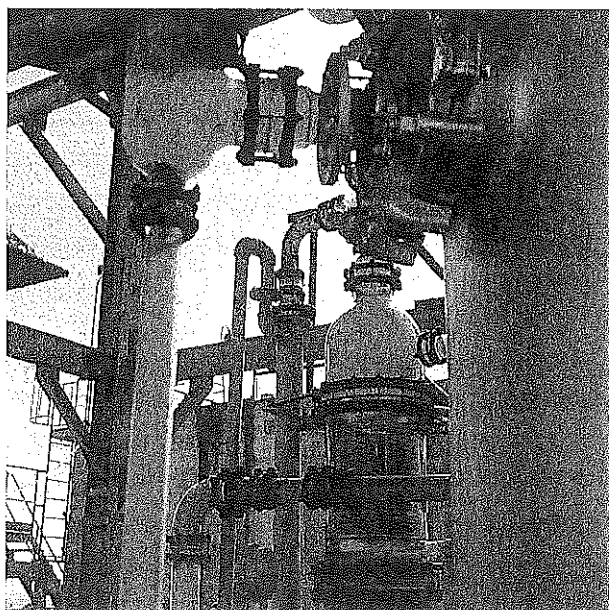
ניצולת כוללת: כמות התוצר, מבוטאת באחוזים, המתקבלת בפועל ביחס לכמות שהיתה צריכה להתקבל על פי ניסוחי התגובות והכמות ההתחלתית של המגיבים.¹⁶

במקרה זה של ייצור הברוס תחושב הניצולת הכוללת על פי כמות הכלור (או התמלחת המרוכזת) שהוזנה לתהליך והכמות הסופית של הברוס הנקי שהתקבלה ואוחסנה במכלי האיסון השונים. בדרך כלל מחשבים את הניצולת הכוללת ביחס למגיב היקר ביותר המשתתף בתהליך. בחישוב זה לא מתייחסים לשלבים השונים בתהליך אלא לנקודת ההתחלה ונקודת הסיום.

- מיחזור הכלור והשבתו למיגדל התגובה מעלה את הניצולת הכוללת בתהליך. הסבר.

- האם משנה מיחזור הכלור את הניצולת בתגובה המתרחשת במיגדל? הסבר.

בתהליך מנתי ניתן לחשב את הניצולת הכוללת לכל מנה. בתהליך רציף, לעומת זאת, צריך לחשב את הניצולת הכוללת ליחידת זמן. יחידת זמן זו יכולה להיות יממה, שבוע, חודש, שנה וכד'.

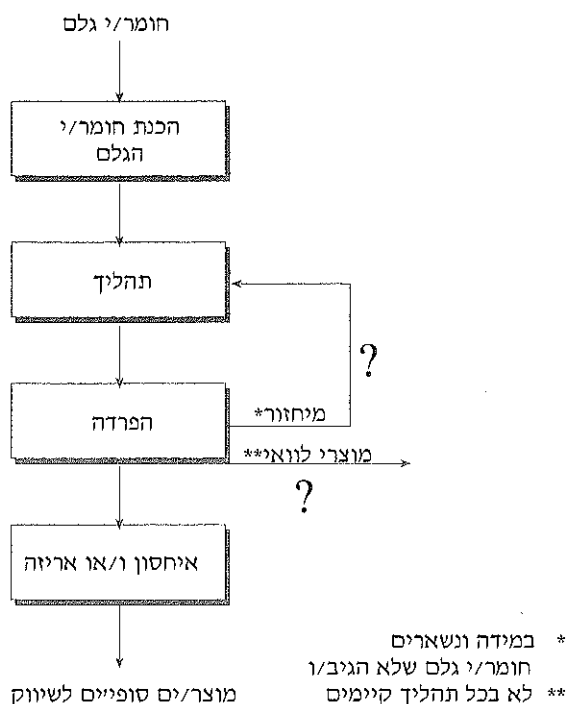


מיגדל זיקוק ברום

¹⁶ בדרך כלל מקובל להתייחס לחומר הגלם היקר ביותר המשתתף בתהליך.

לסיכום:

אם נעבור על כל שלבי ייצור הברום נוכל לפשט את תרשים הזרימה על ידי הכנת תרשים הזרימה הכללי הבא:



תזרים פעולה ביחידת ייצור במפעל כימי

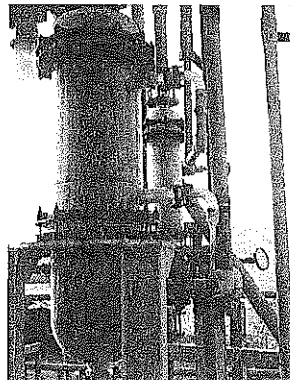
תרשים זה יכול להקל עלינו בעת ניתוח תהליך ייצור הברום או כל תהליך אחר בו ניתקל בהמשך הספר. כל "משבצת" יכולה להתייחס לשלב אחד או למספר שלבים בהתאם לתהליך הנדון.

- מהם השלבים השונים בתהליך ייצור הברום, שתואר בפרק זה, המתאימים ל"משבצות" בתרשים הזרימה הכללי?
- ערוך השוואה בין הפקת ברום במעבדה לבין ייצור ברום בתעשייה עבור כל אחד מהשלבים בתרשים הזרימה הכללי.

8.2 חומרי המבנה במיתקן הברום

תן הברום והן הכלור הם חומרים בעלי יכולת שיתוך גבוהה, ובמיוחד בנוכחות מים. בנוסף לכך קיימים בתהליך ייצור הברום שלבים בהם יש להתחשב גם בגורמים נוספים, כמו טמפרטורה גבוהה, נוכחות גזים וכד'. זוהי הסיבה שבכל המערכות קיים צורך להשתמש בחומרי בנייה יחודיים ובתכנון הולם.

בימיו הראשונים של מפעל הברום, בתקופת טרום המדינה השתמשו בחומרי מבנה זמינים שנמצאו מתאימים, גם אם לא אידאליים. מיגדל התגובה וחלקים אחרים של המיתקן נבנו מאבן צורנית וכמכלי האיחסון שימשו כדי חרס. עם התפתחות הטכנולוגיות לעיבוד זכוכית, החלו בונים את מגדלי התגובה וחלקים אחרים של המיתקן מזכוכית העמידה בפני ברום ושאר מרכיבי תערובת התגובה. עד היום משמשת הזכוכית כחומר מבנה המקובל ביותר לבניית ציוד בתעשיית הברום. בשלב מאוחר יותר התחילו לבנות את מיגדלי התגובה ופרטי ציוד אחרים מברזל מצופה בזכוכית, שהוא כמובן חזק יותר מבחינה מכנית. כיום, יש אפילו מיגדלים וחלקי ציוד אחרים הבנויים ממתכות נדירות כמו טנטלום, שעמידות בפני ברום. מיגדלים כאלה אמנם יקרים יותר, אך יתרונם הברור הוא בחוזקם ואי שבירותם. כל שאר חלקי המיתקן כמו צינורות, משאבות, ברזים, שסתומים ומחליפי חום חייבים גם הם להיות בנויים מחומרים עמידים מתאימים. עם ההתפתחות הטכנולוגית ופיתוח החומרים הפלסטיים הוחלפו חלקי צנרת שונים שהיו עשויים מעופרת או מזכוכית בצינורות העשויים חומרים פלסטיים ממשפחת הפלואורו פחמימנים בעלי עמידות מיוחדת כמו פולי ויניל דו-פלואורי (PVDF), טפלון ואחרים. המשאבות עשויות מברזל המצופה באחד מהחומרים הפלסטיים המתאימים. במקרים בהם נדרשת גם מוליכות חום, כמו למשל במעבה, ובמחליפי החום, נבנה הציוד ממתכות מיוחדות העמידות בפני ברום.



מיתקן עשוי מתכות עמידות בברום

9.2 בטיחות ייצור, איחסון, שינוע ושימוש בברום

כללי

לברום כיסוד יש מעט מאוד שימושים ולכן רוב הברום המיוצר בעולם משמש להפקת תרכובות ברום. לתרכובות הברום שימושים מגוונים, והחשובים בהם יפורטו בפרק ו'.

הייצור העולמי של הברום בשנת 1998 היה כ- 470 אלף טון.
כ- 75% מהכמות הכוללת של הברום מייצרות שלוש חברות:

שתי חברות בארה"ב מייצרות כ- 50%

ברום ים המלח בישראל מייצרת כ- 30%

שלוש חברות אלו הן גם הייצרניות הגדולות ביותר של תרכובות ברום, אך קיימות גם חברות רבות אחרות המייצרות תרכובות ברום והן מפוזרות במדינות שונות וביבשות שונות (ראה טבלה בעמ' 31).

מכאן, שאת הברום יש לשנע למפעלים הצורכים אותו בכל רחבי העולם. הן במפעלים המייצרים ברום והן באלו המייצרים תרכובות ברום, יש לטפל בו בצורה נכונה ובטיחותית כך שניתן יהיה לספק את כל צרכי המפעל באופן שוטף ויעיל מבלי לסכן את העובדים או לגרום נזק לסביבה.

נחזור ונתבונן ב"כרטיס" הברום (עמ' 11) כדי להיזכר בתכונותיו.
הברום הוא:

קטלני

בעל צפיפות גבוהה

לא דליק

רעיל

מימן

נתונים אלה יש לקחת בחשבון לאורך כל הדרך: בשלבי הייצור, האחסון, השינוע והשימוש. בשמירה על הבטיחות על כל הבטיה נעסוק בפרק זה.

סכנות הברום

עריכת סקר סיכונים מקיף והכרת הסיכונים הם תנאים בסיסיים וראשוניים לטיפול בטיחותי בחומרים בכל השלבים הכוללים את: הייצור, האיחסון, השינוע והשימוש.

לשם כך נחזור לתכונותיו של הברום:

- במצב הגזי הברום הינו בעל צבע כתום חום ובעל ריח חריף ומחניק. בגלל ריחו החריף קל לזהותו באוויר אפילו בריכוזים נמוכים 0.05 - 3.5 ppm.
- הברום הוא נוזל בטמפרטורת החדר, אך מכיוון שטמפרטורת הרתיחה שלו אינה גבוהה יחסית הוא נחשב לנוזל נדיף. הנדיפות עלולה להביא לפיזור אדי ברום בסביבה גם כאשר נשפך ברום נוזלי.
- צפיפותם הגבוהה של אדי הברום ביחס לאוויר גורמת לכך שהם מתרכזים במקומות הנמוכים. עובדה זו יש לקחת בחשבון במקרה של תאונה או תקלה, שכן הוא עלול להשאר זמן רב יחסית קרוב לקרקע ואינו מתפזר במהירות.
- הברום מוגדר כחומר לא דליק באוויר, אך בגלל היותו חומר מחמצן חזק הוא עלול להדלק במגע עם חומרים אורגניים או גזים דליקים.
- רעילותו הגבוהה של הברום מתבטאת בכך שאפילו חשיפה קצרה לאדי ברום עלולה לגרום לנזק זמני או קבוע. להלן ערכי החשיפה המותרת לברום¹⁵:

חשיפה משוקללת מותרת (TLV-TWA): 0.10 ppm
חשיפה מותרת לזמן קצר (TLV-STEL): 0.2 ppm

- הברום הינו חומר משתף במיוחד בנוכחות מים. ברום "יבש" אינו משתף, אך לברום "רטוב" יכולת שיתוף גבוהה מאד.

15 שתיים מהדרכים המקובלות להגדרת ריכוזים מותרים/אסורים לחשיפה לחומרים מסוכנים: חשיפה משוקללת מותרת (TLV-TWA): הריכוז הממוצע העליון המותר (המשוקלל על פני חשיפה של שמונה שעות ביום עבודה, בשבוע עבודה בן 40 שעות, אשר לו יכולים כמעט כל העובדים להיות חשופים באופן חוזר יום אחר יום מבלי שתיגרם להם השפעה בריאותית שלילית).

TLV - TWA - Threshold Limit Value - Time Weighted Average
חשיפה מותרת לזמן קצר (TLV-STEL): רמת חשיפה המותרת לפרק זמן קצר של 15 דקות.
TLV - STEL - Threshold Limit Value - Short - Term Exposure Limit

בתקנים הבינלאומיים של האו"ם מוגדר הברום כחומר:

* מאכל קורוזיבי:

משתיך לקבוצת "חומרים מאכלים קורוזיביים": חומרים אשר בפעילותם הכימית עלולים לגרום נזק קשה לרקמה חיה או לגרום נזקים לאמצעי האריוזה והשינוע.

* רעיל:

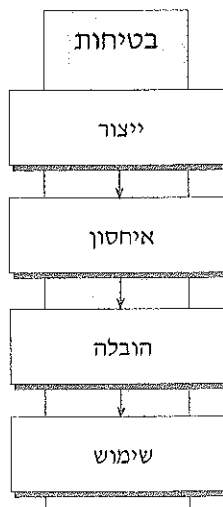
משתיך לקבוצת "חומרים רעילים": חומרים העלולים לפגוע בבריאות האדם או לגרום למותו.

התייחס לתכונותיו של הברום ונסה:

- לאתר בעיות בייצור, אחסון, שינוע ושימוש הנובעות מתכונות אלה.
- להציע דרך כדי להתגבר על הקושי שמציגה כל אחת מהן.

בכל מקרה של שימוש או טיפול בברום יש צורך להשתמש בכללי בטיחות המבוססים על תקנים מחמירים ביותר, שאם מקפידים על שמירתם לא נשקפת סכנה לאדם ולסביבה.

הכלל שצריך להתקיים ללא פשרות לגבי כל חומר מסוכן הוא **שמירה על בטיחות מוחלטת!**



בטיחות בייצור הברום

בייצור הברום, כמו גם בכל תהליך ייצור אחר בו משתתף ברום¹⁶, חייבים לשמור על אמצעי בטיחות מרביים המתבססים על סקר סיכונים המקיף את כל התהליך, חומרי הגלם, חומרי הביניים והמוצרים.

יש לשמור על כך ש:

- כל המערכות במיתקנים תחיינה אטומות באופן מוחלט.
- יעשה טיפול מתאים בכל הזרמים היוצאים מהמיתקן (מוצרים, תוצרי לוואי, גזי פליטה, שפכים ופסולת מוצקה) למניעת מפגעים בטיחותיים ואקולוגיים.
- יעשה טיפול מתאים למניעת פליטתם של גזים רעילים.
- כל חלקי המיתקן חייבים להיות בנויים מחומרים עמידים בפני ברום.

ליד המיתקנים חייבים להיות באופן קבוע:

- אמצעי ניטור לגזים
- גלאים לזיהוי חומרים מסוכנים בכל הזרמים היוצאים
- מערכות התרעה
- חומרים מנטרלים
- ביגוד וציוד מגן

כמו כן צריכים להכתב נהלים מפורטים להפעלה שגרתית לתרחישים ולתקלות וכל העובדים חייבים להיות מודעים לכל פרטיהם.

אחד האמצעים החשובים ביותר למניעת דליפות של ברום לסביבה הם מיגדלי הספיגה שמטרתם לקלוט כל כמות של ברום העלולה להפלט החוצה.

ספיגה: המסה של גז בנוזל תוך כדי תגובה.

מיגדל ספיגה: מכל זוכית המלא בטבעות זוכית, דיסקיות קרמיות או חומר מילוי אחר, ובו זורמת מלמעלה התמיסה המנטרלת ומלמטה זורמים הגזים "הנספגים" בה.

כל חלק של מערכת הייצור, בו עשויה להיות פליטה של אדי ברום, סגור באטם מיוחד הרגיש ללחץ ומתחבר למיגדל ספיגה. פליטה של אדי ברום יוצרת לחץ

¹⁶ השמירה על כללי בטיחות חשובה בייצור חומרים בכלל ובייצור חומרים מסוכנים בפרט. כמובן שעבור כל תהליך או חומר יחודי יש לקבוע כללי בטיחות מיוחדים על פי טיב התהליך ותכונות החומרים.

המשחרר את האטם והאדים זורמים אל חלקו התחתון של מיגדל הספיגה. מתרחשת תגובה המנטרלת את הברום וכך נמנעת סכנת דליפתו החוצה.

כתמיסת ניטרול עבור ברום משמשת תמיסה מהולה (10%) של נתרן הידרוקסיד. עקרונית אפשר להשתמש גם בבסיס אחר זול יותר, כמו סידן הידרוקסיד, אך הבחירה אינה תלויה רק במחיר החומר המנטרל אלא גם בגורמים נוספים, כמו הצורך לערבב באופן רצוף כאשר משתמשים בחומר בלתי מסיס וביכולת למחזר את תמיסת הספיגה או לנצל אותה למטרות אחרות במפעל.

- מהי התגובה המתרחשת במיגדלי רשום ניסוח.
- מדוע האדים מזורמים מלמטה והתמיסה מלמעלה?
- לשם מה ממלאים את מיגדל הספיגה בטבעות זכוכית?

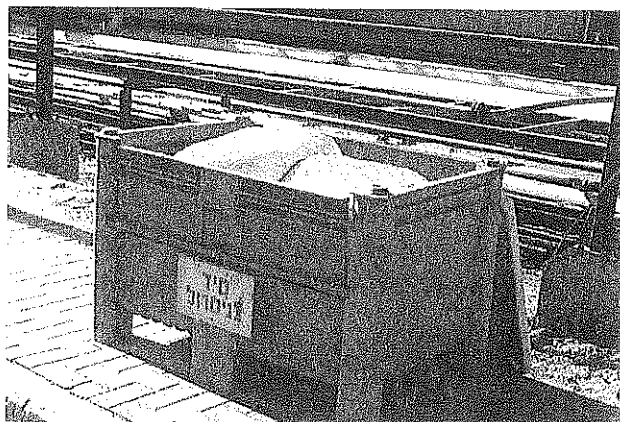
לצורך מעקב אחר התהליך ואיכות התוצר נלקחות דגימות משלבים שונים במהלך הייצור. אמצעי הדגימה מתוכננים כך שלא תהייה סכנת פליטה של ברום ושהעובדים יהיו מוגנים. בנוסף לכך מצוידים עובדי מיתקן הברום בחליפות מגן מתאימות, כפפות, מסכות ומערכות נשימה סגורה לשעת הצורך.



מכלי ניטרול לברום גז

במיתקן ייצור הברום נבנו מכלים מרכזיים בהם מאוחסנים חומרים מנטרלים. ממכלים אלה יוצאים צינורות המגיעים לאזורים שונים במיתקן ודרכם מזרימים את חומרי הניטרול במידת הצורך. מכלי האמוניה עצמם נמצאים במרחק מהמיתקן והם מופעלים כאשר יש חשש מדליפת אדי ברום. באזורים שונים של המיתקן מצויים מכלים עם תמיסות מהולות של נתרן תיו סולפט ונתרן מימן גפריתי והם מופעלים כאשר יש חשש לדליפת ברום נוזלי. כמו כן קיימים מכלים המכילים תמיסת סידן הידרוקסיד. כל אמצעי הניטרול מופעלים תחת בקרה קפדנית של קצב הזרימה, כדי לשמור שתגובת הניטרול עצמה, שבכל המקרים הללו היא אקסותרמית, לא תהייה מסוכנת ולא תגרום לנזקים. הניטרול צריך להעשות במינון ובקצב הנכונים, תוך שימוש בתמיסות מהולות ושמירה על אמצעי בטיחות מרביים.

התמלחת ה"מנוצלת" היוצאת ממיגדל התגובה עלולה להכיל כמויות שאריות של ברום או כלור. גם אם ריכוז הברום או הכלור נמוכים מאד יש לדאוג לניטרולם לפני הזרמת התמלחת חזרה לים המלח. לשם כך נבנתה מערכת בקרה הכוללת גלאים הפועלים באופן רצוף ובדקים את תכולתה של התמלחת. במידה ומתגלה שריכוז הברום או הכלור בתמלחת גבוהים מהמותר מזרימים לתוכה כמויות מתאימות של אמוניה או תמיסות אחרות המשמשות לניטרול.



עמדת ניטרול - שקי סיד



ניידת חרום

טיפול בטיחותי בדליפת ברום

במידה ויש תקלה ומתרחשת דליפת ברום, חשוב לטפל בדליפה זו מיידית ובצורה שתמנע ככל האפשר נזקים לאדם ולסביבה. ראינו כיצד מנטרלים ברום במעבדה. השיקולים לקביעת שיטות מתאימות לנטרול ברום בתעשייה, כאשר הכל נעשה בקנה מידה גדול יותר, עשויים להיות שונים. כמויות גדולות יותר של חומרים מחייבות התייחסות משמעותית יותר לשיקולים כמו:

- נוחיות הטיפול
- מידת הזמינות של החומרים המנטרלים
- עלויות
- אנתלפיית התגובה

הטיפול בדליפת ברום צריך להיות מותאם למצב הצבירה בו הוא מצוי. **ברום גזי** מנטרלים על ידי תגובה עם אמוניה. שני הגזים מגיבים זה עם זה בתגובה אקסותרמית ליצירת אמון ברומי. לפיכך, כאשר משחררים אמוניה באזור בו דלף ברום גזי, רואים "ענן" לבן שהוא למעשה גרגירי האמון הברומי.

- מהו התהליך שמתרחש? רשום ניסוח.
- מדוע שיטה זו טובה רק לטיפול בדליפה של ברום גזי?
- התהליך הוא אקסותרמי. מדוע אין עובדה זו מהווה בעיה כאשר מדובר בניטרול ברום גזי?

ברום נוזלי ניתן לנטרל על ידי תגובה ישירה עם תמיסת תיו סולפט כפי שתארנו בפרק הראשון, אולם זוהי תגובה מאד אקסותרמית ועלולה לגרום להתנדפות אדי ברום או התזתו ולכן אינה מומלצת. הדרך הטובה ביותר לניטרול ברום נוזלי היא על ידי ספיגת הנוזל על ידי חומר מוצק מתאים ולאחר מכן שטיפה או תגובה עם חומר מנטרל. לצורך זה משתמשים במפעל בדרך כלל באבקת סיד - $\text{Ca(OH)}_{2(s)}$. לאחר ספיגת הברום על ידי הסיד שוטפים בכמות מתאימה של מים ואז מתרחשת תגובת הניטרול. חסרונה של תגובה זו הוא באיטיותה היחסית.

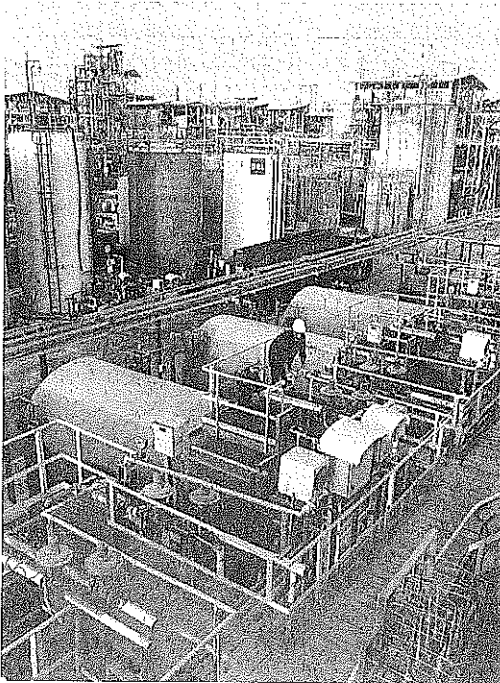
- נסח את התגובה בין ברום נוזלי לבין סיד בנוכחות מים (העזר בתגובות הרשומות בעמ' 13).
- מהו תפקיד הספיגה?
- מדוע מתבצעת קודם הספיגה ואחר כך השטיפה ולא להפך?
- כאשר אין בסביבה חומר אחר ניתן להשתמש גם בחול כדי לנטרל ברום נוזלי. הסבר.
- לניטרול ברום נוזלי ניתן להשתמש גם בתמיסת נתרן הידרוקסידי (10%). נסח תגובה והסבר.
- כאשר אין בסביבה אמוניה ניתן לנטרל אדי ברום על ידי ריסוס במים. הסבר.
- התגובה בין ברום נוזלי לבין נתרן פחמתי, $\text{Na}_2\text{CO}_{3(s)}$, היא פחות אקסותרמית. מדוע בכל זאת משתמשים במפעל בדרך כלל בסיד ולא בנתרן פחמתי?

בטיחות באחסון הברום

אחסון בטיחותי של חומרים הוא נושא חשוב שהפך עם השנים לתורה בפני עצמה. כללי האחסון ושיטות האחסון חייבים להתאים לתכונותיו הייחודיות של כל חומר, תגובותיו עם חומרים אחרים והסכנות השונות הכרוכות בכל אלו.

לתכונות הברום השלכות חשובות גם על צורת האחסון שלו:

- **נדיפותו של הברום** מכתיבה את הצורך לאחסן אותו במקום מוגן מפני פגיעה חיצונית.
 - **כושר החמצון** שלו מכתיב את הצורך להרחיקו מחומרים מחזרים, תרכובות אורגניות וחומרים דליקים.
 - **יכולת השיתוך הגבוהה** שלו בנוכחות מים מכתיבה את הצורך לאחסנו במקום יבש ולבנות את מכלי האחסון עם ציפוי בעל עמידות מתאימה.
 - **יכולתו ליצור רדיקלים חופשיים בנוכחות אור** מכתיבה את הצורך לשמור אותו במקום חשוך.
 - כמו כן מצטרפות דרישות אחרות, כמו הגנה מפני חשמל סטטי ועוד.
- אסור לאחסן בריום ליד אמוניה, זרחן, ומתכות. הסבר מדוע.



בסמוך למיתקן ניתן לראות מכלי אחסון גדולים אליהם מוזרם הברום לאחר הייצור ומהם נשאב הברום לצורך מילוי אמצעי ההובלה. מכלים אלו בנויים מברזל והם מצופים מבפנים בזכוכית. המכלים מוגנים על ידי מערכות ספיגה, באמצעותן ניתן בשעת הצורך לנטרל את עודפי הברום. מסביב למכלים בנויות מאצרות, שהן למעשה קירות נמוכים מבטון ומטרתם למנוע גלישה של בריום נוזלי לסביבה במקרה של תקלה.

חוות מכלים לאחסון בריום

שינוע בטיחותי של ברום

תאונות הקשורות בחומרים רעילים או במפעלים המייצרים אותם עולות מהר לכותרות וגורמות לויכוחים רבים. בדרך כלל קשורות התאונות בחוסר זהירות, רשלנות או טעויות אנוש. תאונות רבות בעת הובלת חומרים מסוכנים מתרחשות כתוצאה מנהיגה במהירות מופרזת. תאונות אלו היו יכולות להמנע אילו היו נשמרים הכללים המחייבים את כל אלו המובילים חומרים כלשהם בכלל וחומרים מסוכנים בפרט.

שינוע חומרים מסוכנים הוא תורה בפני עצמה¹⁷ והברום הוא רק אחד מחומרים אלה. שינוע הברום בעולם ובארץ נתון תחת פיקוח וחוקים בינלאומיים של הובלת חומרים מסוכנים.

את הברום משנעים בצורה נוזלית, אך נדיפותו ורעילותו מחייבות הובלה בתנאי בטיחות מרביים המבטיחים את אטימותו המוחלטת של אמצעי ההובלה ומונעת את סכנת דליפתו של הברום לאוויר.

מהו היתרון של שינוע נוזל בהשוואה לשינוע גז?

האם יש צורך לנקוט באמצעים מיוחדים כדי לשמור על הברום בצורה נוזלית? נמק.

כדי להתגבר על הסכנות שפורטו בסעיף הקודם פיתחה חברת הברום "איזוטנקים"¹⁸ מיוחדים לברום על פי התקנים הבינלאומיים של האו"ם. לצורך זה קיימים איזוטנקים בעלי נפחים שונים (מ-1250 ליטר ועד - 8000 ליטר). גוף המכל של ה"איזוטנק" המיועד לשינוע ברום עשו מפלדה והחלל הפנימי שלו מצופה בשכבת עופרת (לברום "יבש") או זכוכית (לברום "רטוב")¹⁹. הפלדה מקנה להם חוזק מכני והציפוי הפנימי מקנה להם עמידות בפני יכולת השיתוך הגבוהה של הברום.

- השינוע באיזוטנקים מצופים עופרת מתאים לברום "יבש" אך אינו מתאים לברום "רטוב". הסבר.

- מהו משקל הברום באיזוטנק שנפחו 8000 ליטר?

17 לקריאה נוספת: תורה חדשה להפחתת הסיכון בשינוע כימיקלים, מאת משה זרחי, כימיה, גיליון 17, 1993.

18 מכולות מיוחדות הנישאות על גבי משאיות כבדות ומשמשות להובלת חומרים מסוכנים.

19 כיום מרבית האיזוטנקים מצופים עופרת. כל המשלוחים לחו"ל נעשים ב"איזוטנקים" עם ציפוי עופרת ואילו ה"איזוטנקים" המצופים זכוכית משמשים רק להובלה בארץ.

מכל ה"איוטננק" תפוס ומחוזק בתוך מסגרת אשר בארבע קצותיה יחידות נעילה מיוחדות. יחידות אלו מאפשרות להוריד את ה"איוטננק" באמצעות משנע מכולות. באופן כזה מובטחת יציבות מרבית של ה"איוטננק" בעת ההובלה וכמו כן קיימת אפשרות להוריד אותו מהמשאית ולהשתמש בו לצורך אחסון. ל"איוטננקים" מערכות בטיחות ובקרה המבטיחות בטיחות מרבית בזמן מילוי, שינוע וריקון.

כל ה"איוטננקים" עומדים בתקן הבינלאומי לשינוע חומרים מסוכנים. לאחר כל הובלה נבדקת תקינותם של כל האביזרים וכמו כן בהתאם לתקנות חומרים מסוכנים (חומ"ס) נבדקת פעם בשנה שלמות הציפוי הפנימי שלהם. בדיקה זו נעשית כמובן לאחר ריקון מוחלט של המכלים. ריקון זה נעשה על ידי הזרמת אוויר במשך מספר ימים ותוך כדי נקיטת אמצעי בטיחות מרביים השומרים הן על איכות הסביבה והן על בטיחות העובדים.

צרכנים הזקוקים לכמויות קטנות יותר של ברום מקבלים אותו בבקבוקי זכוכית (המכילים 1 ליטר ברום) או מכלי ברזל המצופים עופרת (המכילים כ-140 ליטר ברום).

האריזה וההובלה של הבקבוקים נעשית תוך כדי שמירה קפדנית על כללי הבטיחות ולפי תקני ההובלה הבינלאומיים.

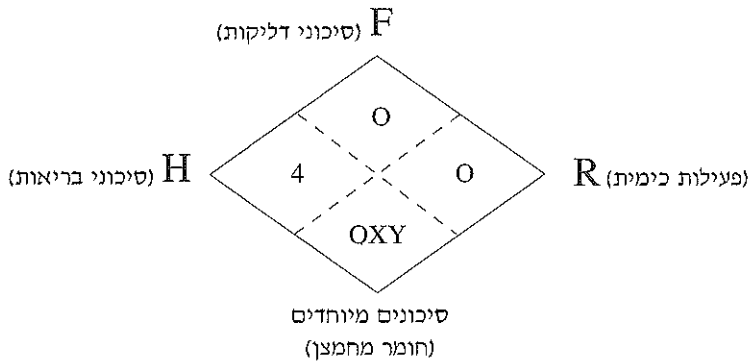
כל שישה בקבוקים נאזרים בתוך ארגז כאשר המרווחים בין הבקבוקים ובינם הארגז ממולאים בחומר הנקרא ורמיקוליט. זהו מחצב בעל תכונות ספיגה מיוחדות והוא משמש, הן לבלימת הזעזועים בזמן ההובלה, והן לספיחה מוחלטת של הברום. כמות החומר מתאימה למצב תאורטי בו נשברים כל הבקבוקים והברום דולף. כל ארגז כזה נקשר למשטח המכיל קבוצה של ארגזים והוא מוכנס לתוך מכולה סגורה.

לפי האיגוד האמריקאי למניעת שריפות, (N.F.P.A), פותחה שיטה פשוטה לזיהוי סיכונים באחסון ובהובלת חומרים מסוכנים אשר אומצה גם בישראל. על פי שיטה זו מוטבע על כל אמצעי האחסון והשינוע סימון מיוחד המזהיר את כל הגורמים מפני הסכנות.

על מכלי האחסון של כל חומר מסוכן קיים סימון מוסכם המתאר את הפעילות הכימית של החומר, דליקותו, סיכוני בריאות וסיכונים מיוחדים אחרים.²⁰ שיטה זו מגדירה את הברום כחומר לא דליק ויציב אך רעיל מאד ומחמצן.

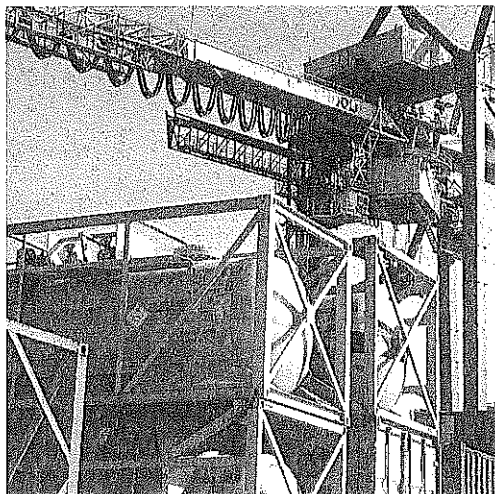
20 לקריאה נוספת: טיפול בפסולת תעשייתית מסוכנת, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות.

סימון כזה עבור מכלי האיחסון של הברום:



בשילוט המיועד לאמצעי ההובלה מופיע מספר האו"ם, שהוא מספר זיהוי בינלאומי של החומר המשונע, וקוד נוסף למידע על פעילות שיש לנקוט בעת תאונה או שעת חרום. הנהג חייב להיות מוביל מורשה להובלת חומרים מסוכנים, ובידו כרטיס הוראות (גליון בטיחות) המפרט את הפעולות ואמצעי הטיפול שיש לנקוט בשעת חרום. סימונים מיוחדים קיימים להובלה בים, ביבשה (כבישים ורכבות) ובאוויר.

מספר או"ם: מספר זיהוי בינלאומי לחומר משונע.



"איזוטנק" להובלת ברומ

בטיחות השימוש בברום

הברום משמש לצרכים שונים במחקר ובתעשייה. כל הכללים הנקוטים לגבי השמירה על הבטיחות בעת ייצור הברום, איחסונו ושינועו צריכים להלקח בחשבון בכל טיפול או שימוש העושים בו.

לכל לקוח המשתמש בברום בכמויות גדולות חייבת להיות תחנת פריקה. הפריקה נעשית תוך כדי חיבור ה"איזוטנק" או המכל למיגדל ספיגה כדי למנוע מצב בו יפלטו אדי ברום לאוויר.

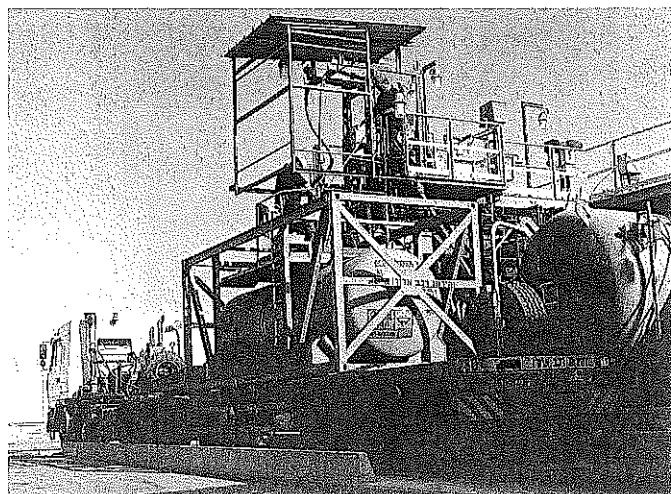
הבקרה על ריקון ה"איזוטנק" או המכל נעשית על ידי שקילה או דרך חלון הצצה מזכוכית. כאשר כל הברום מתרוקן משתנה הצבע המתגלה דרך חלון הזכוכית מחום אדום לגוון בהיר.

חומרי ניטרול מתאימים וציוד מגן הם תנאי הכרחי בכל תחנה כזו.

הבטיחות בשימוש מחייבת:

- פיתוח טכנולוגיות שימוש
- הדרכה ללקוחות
- הכנת גיליונות בטיחות (ראה פרוט בעמ' 136)
- סימון ותוויות

גיליון בטיחות: דף מידע בו מרוכז כל המידע לגבי תכונות החומר, רעילותו, הסכנות הנשקפות במצבים שונים של חשיפה לחומר ודרכי טיפול מתאימות.



תחנת לפריקת ברום ב"תרכובות ברום"-עובד מרוקן "איזוטנק"

מושגים של מדת בפרק ג

מעבה: מיתקן גלילי בעל דפנות כפולים שבו זורמים הגזים המקוררים. בין הדפנות זורמים מים קרים או תמלחת קרה אשר סופגת את האנרגיה וגורמת לעיבוי במבוקש.

תהליך מנתז: תהליך בו מזינים למכל התגובה כמות מסוימת של חומרי גלם (מגיבים, חומר/י עזר). תערובת התגובה עוברת סדרת פעולות לקבלת תוצר/ים מבוקש/ים. רק לאחר קבלת התוצר/ים והוצאת תערובת התגובה מן המכל ניתן להזין כמות נוספת של חומרי גלם שתעבור תהליך זהה לקבלת "מנה" נוספת של תוצר/ים.

תרשים זרימה: דיאגרמת מלבנים המתארת את רצף השלבים בתהליך.

חומרי מבנה: החומרים מהם עשויים פריטי הציד השונים המשמשים לביצוע תהליכים כימיים, לאיחסון החומרים או לשינועם.

חומרים מנטרלים: חומרים המגיבים עם חומר מסוכן בתגובה שאינה יוצרת חומרים מסוכנים ושאינה גורמת סכנות אחרות כלשהן. חומרים אלו מהווים אמצעי ביטחון במקרה של דליפת החומר המסוכן או תקלה אחרת למניעת סיכונים אפשריים לאדם ולסביבה.

מיגדל מנוולא: מיגדל ובו חומרי מילוי (בצורת טבעות, דיסקיות וכד') שבו מתבצעת תגובה בין הגזים לבין נוזל או תמיסה. מטרת חומרי המילוי להגדיל את שטח המגע בין החומרים המגיבים במיגדל.

המרה (Conversion): היחס, מבוטא באחוזים, בין כמות המגיב שהגיבה לבין כמות המגיב שהוכנסה למכל התגובה.

ניצולת התגובה: היחס, מבוטא באחוזים, בין כמות התוצר המבוקש המתקבלת בתגובה לבין הכמות שהיתה צריכה להתקבל על פי ניסוח התגובה, הכמות ההתחלתית של המגיבים ואחוז ההמרה.

זיקוק: תהליך שבו מפרידים מרכיבים נוזליים מתמיסה באמצעות חימום לטמפרטורה מתאימה.

מתליף חום: מיתקן בו מתקיים מעבר אנרגיה בין זרמים בטמפרטורות שונות לצורך חיכוך באנרגיה.

מיחזור: החזרת המגיבים שלא הגיבו למכל התגובה.

ייבוש: הוצאת המים מהחומר.

תהליך רציף: תהליך בו מזינים למערכת חומר/י גלם בקצב קבוע ובמקביל נעשית הוצאה קבועה של התוצר/ים. בכל חלק של המערכת העובדת באופן רציף מתבצעות פעולות קבועות במשך התהליך. מכך נובע כי ריכוז המגיבים והתוצרים בכל חלק של המערכת קבוע ובקרת התהליך נעשית באמצעות שמירה על ריכוזים אלה.

ניצולת מוללת: כמות התוצר, מבוטאת באחוזים, המתקבלת בפועל ביחס לכמות שהיתה צריכה להתקבל על פי ניסוחי התגובות והכמות ההתחלתית של המגיבים.

חשיפה משוקללת מותרת (TLV-TWA): הריכוז הממוצע העליון המותר (המשוקלל על פני חשיפה של שמונה שעות ביום עבודה, בשבוע עבודה בן 40 שעות, אשר לו יכולים כמעט כל העובדים להיות חשופים באופן חוזר יום אחר יום מבלי שתגרם להם השפעה בריאותית שלילית.
TLV - TWA - Threshold Limit Value - Time Weighted Average

חשיפה מותרת לזמן קצר (TLV-STEL): רמת חשיפה המותרת לפרק זמן קצר של 15 דקות.
TLV - STEL - Threshold Limit Value - Short - Term Exposure Limit

ספיגה: המסה של גז בנוזל תוך כדי תגובה

מיגזל ספיגה: מכל זכוכית המלא בטבעות זכוכית, דיסקיות קרמיות או חומר מילוי אחר, ובו זורמת מלמעלה התמיסה המנטרלת ומלמטה זורמים הגזים "הנספגים" בה.

מספר או"ם: מספר זיהוי בינלאומי לחומר משונע.

גיליון בטיחות: דף מידע בו מרוכז כל המידע לגבי תכונות החומר, רעילותו, הסכנות הנשקפות במצבים שונים של חשיפה לחומר ודרכי טיפול מתאימות.

שאלות לפרק ג

1. "כמות הברום שניתן לייצר נקבעת על פי מקורות הכלור". הסבר ותן דוגמאות.
2. אילו תכונות של הברום מנוצלות בשלבים השונים של הפקתו התעשייתית?
3. בטבלה הבאה רשומות הבעיות העיקריות הכרוכות בתהליך ייצור הברום בתעשייה. ציין מהם הפתרונות המתאימים שנבחרו לכל אחת מהן.

בעיות	פתרונות בתעשייה
חומרי גלם מתאימים	
חומרי מבנה מתאימים	
חסכון באנרגיה	
ייצור כמויות גדולות	
הגדלת משך התגובה	
ניצולת גבוהה	
איחסון ושינוע	
שמירה על בטיחות	

4. בתהליך ייצור הברום, איחסונו ושינועו נעשה שימוש בטכנולוגיות שונות. מהם העקרונות המדעיים עליהם מבוססות טכנולוגיות אלו? תן דוגמאות.

5. א) כמה טון ברום יתקבלו מתגובה בין 18.2 טון מגנזיום ברומיד עם כלור (במידה מספקת), בהנחה שאחוז ההמרה הוא 98%, והניצולת 95%? פרט חישוביך!

ב) מהו נפח תמיסת מגנזיום הברומיד הנדרשת בהנחה שהתמיסה מכילה ברומידים בריכוז של 12 גרם/ליטר.

ג) מהם הגורמים העשויים להשפיע בתגובה זו על:

- אחוז ההמרה.
- אחוז הניצולת.

6. קרא את קטע העיתונות הבא וענה על השאלות:

**תאונת משאית הברום ליד
דימונה נגרמה כנראה בשל
רשלנות הנהג.**

מאת איתן רבין, ה"ארץ", 5.3.1989.

למקום הגיעו גם צוותים של מומחים מהמפעל לברום, שבמשך שעות מספר שקלו כיצד להעמיד את המשאית על גלגליה, בלי לגרום לדליפת ברום נוספת. לבסוף הובא מנוף מים המלח והחלו במאמצים להפוך את המשאית. במקום הוקם חפ"ק מיוחד של צה"ל והמשטרה, שכלל את מנכ"ל כימיקלים לישראל ואנשי משרד הבריאות, שבדקו את כיווני הרוח. בשלב מסוים נשקלה האפשרות לפנות את כל דימונה מתושביה..."

הממצאים הראשוניים של החקירה על נסיבות התהפכות של משאית הברום שלשום באזור התעשייה בדימונה מצביעים על רשלנות נהג המשאית שבעטיה ניתקה הנגרת ותמשאית התהפכה...

לפי עדויות של עד ראיה, הברום במשאית החפוכה המשיך להתפשט ולמקום הגיעו כוחות גדולים של צה"ל וכן צוותים של מכבי האש, מצוידים בציוד מתאים לניטרול הברום באמצעות סיד, מים וקצף.

א) כיצד אירעה התאונה?

ב) כל מוביל של חומר מסוכן חייב לשאת עימו גיליון בטיחות.

העוזר ב"כרטיס" הברום וב"דף מידע" שבנספח ב' וציין מהן הסכנות בתאונה מסוג זה ומהן הדרכים לטיפול בסכנות אלו?

ג) מהן הפעולות שנקטו הצוותים שהגיעו למקום התאונה על פי הכתבה ומהי המטרה של כל אחת מהן?

ד) על פי דו"ח שירותי הכבאות בצעו ציוותי הכיבוי מספר פעולות לפי הסדר הבא:

- כיסוי השפך באמצעות קצף כיבוי.
 - הקמת סוללת עפר מסביב למכלית.
 - שפיכת סיד על פני הברום הנוזלי והרטבתו במים.
 - הרמת המכלית והצבתה על גלגליה תוך כדי התזת סילוני קצף.
- מהי לדעתך מטרתה של כל אחת מפעולות אלו? מדוע בוצעו בסדר זה? נמק והעזר בתכונות הברום.

7. קרא את קטע העיתונות הבא, הדין בתאונה שהתרחשה במפעל אחר, וענה על השאלות.

פיצוץ קטלני

בחדר המפעל קוקה קולה התגלתה דליפת חומצה, המשמשת לפירוק שפכים. שרשרת של טעויות, במהלך הניסיונות לניטרולה, גרמה לפיצוץ עז. כבאי בן 35, נהרג, 40 נפצעו קל.

"מעריב", 29.10.93

מאת אדר אבישר, עדי כץ וקובי גלייך

כבאי אחד נהרג ו-40 נפצעו באורח קל, בפיצוץ שאירע בבור לאיחסון חומצה מלחית, במפעל "קוקה-קולה" בבני ברק.

אתמול, בסביבות השעה 9.30, הוזעקו כוחות כיבוי מתחנת בני-ברק למפעל קוקה-קולה. דווח על דליפת חומצה, המשמשת לפירוק שפכים. זמן קצר אחר כך נשמע פיצוץ עז. מחקירה ראשונית נראה כי שיקול מוטעה וטעויות אנוש, הם שגרמו לאסון. גורם בכיר בחקירה סיפר אמש **למעריב** כי הפיצוץ נגרם ממגע החומצה עם גבישי סודה קאוסטית.

צירוף מקרים אומלל

"מעדויות ראשונות", סיפר הגורם הבכיר, "עולה כי כאשר אנשי המפעל, וביניהם הכימאי, הבחינו בדליפה, הם התארגנו לפעולת סתירה של החומצה. הנוהל המקובל במקרה של דליפה הוא, שקודם כל מטפלים בה צוותים של המפעל ואחר-כך, כשמגיעים צוותי החירום, הם לוקחים אחריות. העובדים הביאו למקום הדליפה שקים עם גבישים של סודה קאוסטית, חומר סותר חומצה. ההוראות קובעות כי יש לסתור את החומצה בסודה קאוסטית מדוללת במים, בשיעור של 10 אחוזים".

צירוף מקרים אומלל הביא את צוותי הכיבוי הראשונים למקום בדיוק לאחר

שהונחו שקי הסודה הקאוסטית בפתח הבור. נראה כי הכבאים, מסיבה כלשהי, לא קראו את ההוראות ולא עיינו בטבלאות הזיהוי, המורות על שיעור הדילול הדרוש. אז, כך נראה, שפכו אל תוך בור החומצה המלחית את גבישי הסודה הקאוסטית - שהיו בריכוז עצום של כמעט 100 אחוז. התגובה הכימית בין שני החומרים המרוכזים היא שגרמה את הפיצוץ. ככל הנראה, ההדף שייצר הפיצוץ הוא שהעיק את הכבאי שעמד על פי הבור, לתוך החומר הכימי החרוף. שם מצא את מותו.

מה בעצם קרה? החומצה המלחית דלפה מתוך מיכל גדול, בכושר קיבול של מאות ליטרים, במיתקן תת-קרקעי לניטרול שפכים. בהיותה בריכוז גבוה, החומצה המלחית מאכלת את השפכים - ובתהליך זה היא פולטת אדים חריפים. כדי לנטרל את דליפת החומצה, יש צורך לערבב אותה בחול יחד עם חומר בשם סודה אש (סודיום קרבונאט). את התערובת הזו, יש לנטרל באמצעות תמיסה מהולה מאוד של סודה קאוסטית, בריכוז של 10 אחוז בלבד. במקום זאת, שפכו לתוך התערובת סודה קאוסטית בריכוז אדיר, של 98 אחוז - מה שגרם לפיצוץ.

אלכס דורון.

- (א) מה היתה לדעתך סיבת האסון שהתרחש בחצר מפעל "קוקה קולה"?
- (ב) איזה חומר רצו לנטרל במפעל?
- (ג) מהו החומר ששימש כחומר מנטרל?
- (ד) נסח את התגובה.
- (ה) מהי לדעתך השגיאה שנעשתה?
- (ו) כיצד היה ניתן למנוע את האסון?
- (ז) מהן, לדעתך, הפעולות שהיו צריכים לעשות כדי לטפל בדרך בטוחה בדליפת החומרים וכדי למנוע אסון? פרט.
8. כחומר מנטרל לברום ניתן להשתמש בבסיסים שונים וביניהם גם $\text{Ca(OH)}_{2(s)}$ ו- $\text{Na}_2\text{CO}_{3(s)}$.
- (א) האם מתאימים, לדעתך, בסיסים אלו לניטרול ברום גזי? נמק.
- (ב) האם מתאימים, לדעתך, בסיסים אלו לניטרול ברום נוזלי? נמק.
- (ג) כיצד נעשית, לדעתך, פעולת הניטרול באמצעות $\text{Na}_2\text{CO}_{3(s)}$ או $\text{Ca(OH)}_{2(s)}$. הסבר.
- (ד) מה יהיו השיקולים שעל פיהם תבחן ההחלטה האם להשתמש לצורך הניטרול ב- $\text{Ca(OH)}_{2(s)}$ או ב- $\text{Na}_2\text{CO}_{3(s)}$. פרט.
- (ה) רשום ניסוח לתגובות הניטרול באמצעות $\text{Na}_2\text{CO}_{3(s)}$ ו- $\text{Ca(OH)}_{2(s)}$.
9. הבא דוגמאות לחומרים העשויים להתאים ל"ניטרול" של:
- (א) כלור גזי.
- (ב) תמיסה מימית של מימן ברומי, $\text{HBr}_{(aq)}$.
- (ג) מימן ברומי גזי, $\text{HBr}_{(g)}$.
- (ד) תמיסה מימית של חומצה גופרתית, $\text{H}_2\text{SO}_{4(aq)}$.
- (ה) תמיסה מימית של נתרן הידרוקסידי, $\text{NaOH}_{(aq)}$.
- רשום ניסוחים ותאר מהי, לדעתך, דרך הניטרול המומלצת.

פרק ד מרעיון למוצר

1.7 עקרונות כלליים בפיתוח מוצר

כללי

בפרק זה נציג את העקרונות המרכזיים המלווים את פעילותה של קבוצת הברום ואשר חלק גדול מהם מיישמים גם במפעלים אחרים. דרך לימוד פרק זה נוכל להכיר מושגים רבים נוספים ב"שפת התעשייה" בכלל וב"שפת התעשייה הכימית" בפרט.

פרויקט לפיתוח תהליך או מוצר חדש מתחיל בשלב ייזום הרעיון ומסתיים במכירה שוטפת של המוצר. זוהי דרך ארוכה ומרתקת הדורשת עבודת צוות, סיעור מוחות ותהליכים של חשיבה יצירתית ובחירה בין חלופות בתנאים של אי-וודאות.

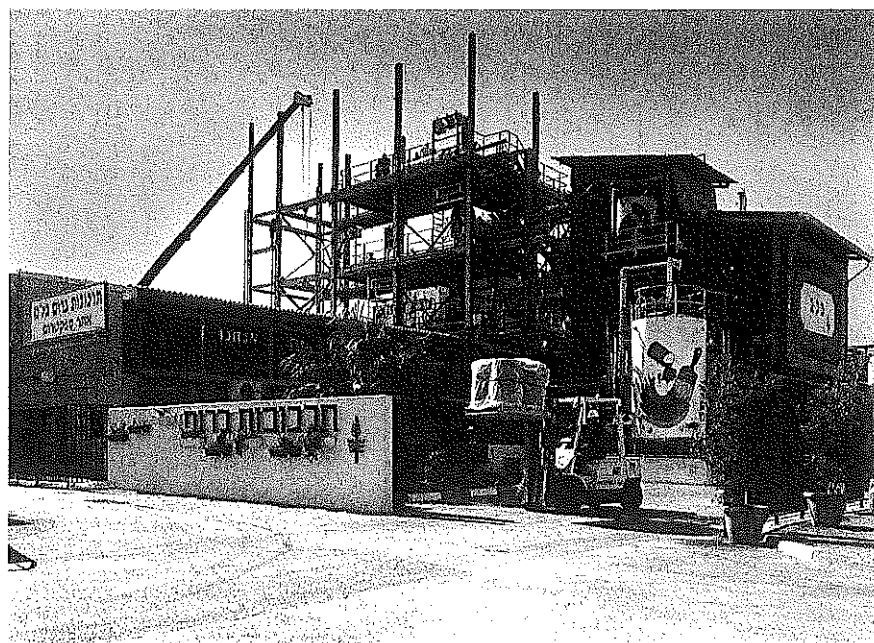
ניתן לחלק את הפרויקט מתחילתו ועד סופו לשלבים המרכזיים הבאים:

מחקר ופיתוח:	ייזום, גישוש וסינון ראשוני מחקר מעבדתי פיתוח במיתקן חצי חרושתי (פיילוט) הכנת חבילת פרויקט דיושם או דיושם ¹
ניהול המוצר:	אישור ההשקעה בהקמת מיתקן ייצור תכנון הקמה הרצה ייצור המוצר מכירה שוטפת

כל שלבי הפרויקט מנוהלים על פי התפיסה של הבטחת איכות שנפרט בהמשך הפרק. אחד העקרונות המרכזיים של תפיסה זו הוא שלאחר כל שלב נעשית בחינה של התוצאות וההשגים ומתקבלת החלטה אם להמשיך בתהליך, להפסיקו או להשלים בדיקות לפני המעבר לשלב הבא.

1 בדיקת ההבטים הבטיחותיים והשפעה על איכות הסביבה לאורך כל חיי המוצר.

ההערכה של **שלבי המחקר והפיתוח** נעשית על ידי צוות מוביל המורכב מבעלי תפקידים שונים הכוללים אנשי ניהול ושיווק, נציגי המחקר והפיתוח, נציגי ההנדסה ואנשי איכות הסביבה והבטיחות. במידת הצורך ובהתאם לנושא הנדון מתמנים בעלי תפקידים נוספים. הצוות מקדיש מאמץ רב בחיזוי בעיות ובפתרון ודן גם בסיכונים ובאי הוודאויות בתחומי היישום הטכנולוגי, השיווק והכלכלה. לאחר מתן האישור לפרויקט מתבצעים שאר **שלבי ניהול המוצר** על ידי צוות בינתחומי הכולל אנשי שיווק וייצור, אנשי מחקר ופיתוח, מנהל הנדסי ובמידת הצורך נציגי המעבדה האנליטית, נציגי מעבדת הפלסטיקה ואחרים. בפרק זה ננסה לפרוש בפניכם כמה מהעקרונות הכלליים המלווים את התהליך הארוך המוביל מרעיון למוצר.



אתר "ספקטרום" ברמת חובב

בדיקת הרעיון

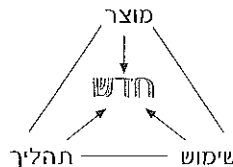
השלב הראשון הינו שלב הייזום בו בודקים יוזמות ורעיונות חדשים המתייחסים לפיתוח מוצר חדש או שיפור של מוצר או תהליך קיים. בשלב זה עושים הערכות שיווקיות, בודקים את הטכנולוגיות הקיימות, מבצעים בדיקות מוקדמות במעבדה ומחקרי גישוש שונים ועל פיהם שוקלים את אפשרויות המימוש של הרעיונות השונים. כל זה נעשה תוך כדי בחינת האיסטרטגיה העסקית של החברה ויעדיה. מטבע הדברים זהו השלב בו נעשה סינון ראשוני של הרעיונות המתייחסים בדרך כלל לתחומים כמו:

- * ייצור מוצר חדש לשימוש ידוע
- * ייצור מוצר קיים לשימוש חדש²
- * ייצור מוצר קיים בתהליך חדש.
- * ייצור מוצר חדש בתהליך חדש.

עוד בשלבים הראשונים של קבלת ההחלטות נעשות בדיקות שיווקיות וכלכליות המנסות להעריך:

- * האם קיים ביקוש למוצר?
- * מיהם חלקויות האפשריים?
- * מהו גודל השוק?
- * מיהם היצרנים המתחרים?
- * אלו מוצרים חלופיים קיימים ומה מחירם?
- * מהו גודל ההשקעה הנדרשת?
- * מהו המחיר הנוכחי למוצר ומהן אפשרויות הרווח?
- * מהם לוחות הזמנים הצפויים להקמה ולהפעלה?
- * מהו פרק הזמן בו ההשקעה תחזיר את עצמה?

כל אלה נעשים תוך כדי חיפוש מקורות מימון אפשריים: מימון עצמי, מקורות מימון ממשלתיים, הלוואות בנקאיות, שיתוף פעולה עם חברות אחרות או משקיעי חוץ וכד'.



² שימוש חדש יכול לחייב ייצור חומר בדרגת ניקיון שונה ולפיכך עשוי לדרוש שינויים בתהליך הייצור. כך, למשל, חומרים המותאמים לשילוב במוצרי מזון חייבים להיות בעלי דרגת ניקיון גבוהה ביותר.

מרעיון למעבדה

לאחר שלבי הבדיקה הראשונית, במידה והתקבלה ההחלטה להמשיך לשלב הבא ולבדוק את הרעיון בדיקה יסודית יותר במעבדה, מכין הצוות הממונה (שהוא צוות בינתחומי) תוכנית עבודה מפורטת המתייחסת לכל המרכיבים שהועלו בשלב הראשוני. תחילתו של כל פרויקט או רעיון חדש העוסק בפיתוח מוצר חדש, תהליך ייצור שאינו ידוע³, שיפור של מוצר או תהליך קיים מתבצעת במעבדות המחקר של קבוצת הברום או במעבדות המרכזיות של חברת האם כימיקלים לישראל בע"מ (כ"ל) בחיפה⁴. מוצר חדש יכול להיות חומר מוכר וידוע שהמפעל החליט לבדוק את האפשרות לייצר אותו ולא בהכרח חומר חדשני ולא מוכר. במעבדות המחקר מקדישים החוקרים מאמצים רבים להכנת תרכובות חדשות ולהכרת תכונותיהן, בודקים שיטות שונות להפקתן, עורכים סקרי פטנטים⁵, בעזרת סקר ספרות מנסים לזהות נקודות תורפה אפשריות מבחינה בטיחותית ועורכים מיפוי ראשוני של טכנולוגיות נדרשות וזמינות. כמו כן עוסקים בפיתוח שיטות אנליטיות⁶ מתאימות, במציאת חומרי מבנה מתאימים שיעמדו בתנאי התגובה ועוד.

הניסוי המעבדתי הוא שלב ראשוני, הכרחי וחשוב שנועד לחקירת התגובה ולמציאת תנאי תגובה מתאימים. בשלב זה מבצעים את התגובות בקנה מידה קטן ובודקים את כל ההיבטים הכימיים שלהן. במידה מסוימת אף נחקרות בעיות ונצפים קשיים אשר עלולים להופיע כאשר יבוצעו התהליכים בקנה מידה גדול יותר.

לפעמים תוך כדי הניסויים במעבדה "עולים" על רעיון ייחודי הקשור בחומרים חדשים, תהליכים חדשים, טכנולוגיה חדשה וכד'. כדי להגן עליו מפני העתקה או גניבה מדעית רושמים אותו כפטנט.

כאשר בודקים את התהליך במעבדת המחקר משתמשים בדרך כלל במכשירים סטנדרטיים (כלי זכוכית, בוחשים מגנטיים, יחידות חימום קטנות וכד') ובשיטות עבודה פשוטות יחסית.

3 ישנן חברות בעולם המוכרות ידע ו/או מיתקנים לייצור חומרים שונים. בדרך כלל מדובר בחומרים המיוצרים בכמויות גדולות ונחשבים ל-commodities

4 מעבדות המחקר המרכזיות של כ"ל נמצאות במכון המחקר תמ"י שבמפרץ חיפה (מידע נוסף ניתן למצוא באתר האינטרנט: <http://www.tami-imi.com/>)

5 ראה נספח ג': מהו פטנט?

6 שיטות אנליטיות: בדיקות המיועדות לזהוי חומרים ולבדיקה כמותית מזויקת שלהם.

כבר בשלב זה בודקים את כלכליות התהליך ועושים הערכות המתבססות על עלות חומרי הגלם, התשומות ומחירו הצפוי של המוצר. כל זאת בהנחה של ניצולות שונות (70%, 90%) עבור התהליך המתוכנן.

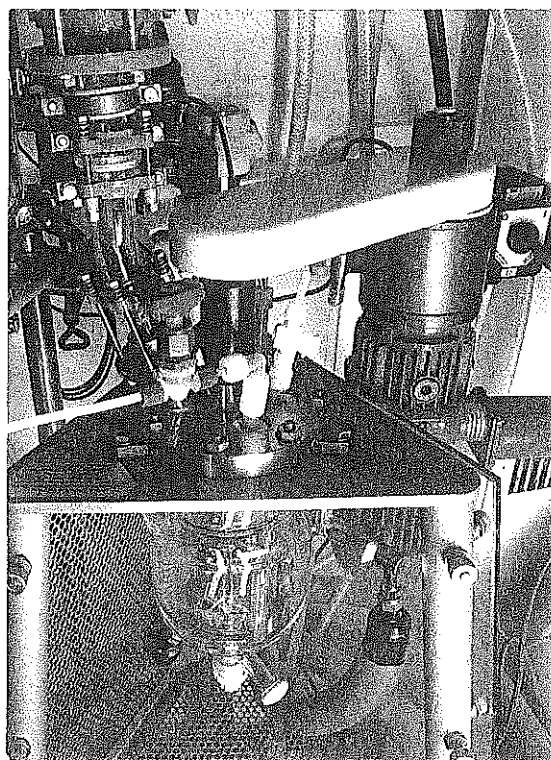
במעבדה מבצעים את התהליך כתהליך מנתי. אחת השאלות הנשאלות בשלבים אלה היא: האם לבצע את התהליך באופן מנתי או רציף?

מהנדס התהליך, המשתתף בצוות הבינתחומי, מסייע בידי הכימאים לזהות בעיות טכניות והנדסיות בתהליכים המתוכננים, תוך כדי התייחסות לשאלות כגון:

איך להעביר חומרים מכלי לכלי? כיצד לבחוש? כיצד לסנן? וכדומה.

כבר בשלבים ראשונים אלו מקדישים מאמץ רב בהכנת סקר סיכונים, בזהוי בעיות אפשריות הקשורות לאיכות הסביבה ובהצעת דרכים לפתרון של כל אלו.

כך למשל נשאלות שאלות כגון: מה לעשות עם חומרי הלוואי או תוצרים לא רצויים הנוצרים בתהליך? כיצד להיפטר מגזים רעילים? מה לעשות עם שפכים מסוכנים? כיצד לבצע את התהליך באופן בטיחותי? כיצד לעשות בקרה של התהליך על שלביו השונים? ועוד.



מיתקן גישוש במעבדת המחקר

מהמעבדה לייצור

כשהתהליך המעבדתי "מתורגם" לתהליך תעשייתי עולות בעיות רבות אשר לא באות לידי ביטוי בעת תכנון המערכת המעבדתית ואשר בדרך כלל אי-אפשר לצפותן מראש. ברוב המקרים אי-אפשר להעתיק את המערכות, להגדילן ולבצע את התהליך באותו אופן כפי שהתבצע במעבדה.

מרבית הבעיות נובעות מההבדלים במבנה הציוד, בכמויות ובדרגת הניקיון של התוצרים. במעבדה מכינים בדרך כלל כמויות קטנות של חומרים בעוד שבתהליך תעשייתי מיוצרות כמויות גדולות של חומרים. בשלבים הראשונים של המחקר במעבדה אין חשיבות מכרעת לניצולת התהליך או לדרגת הניקיון של החומרים המיוצרים, והמטרה היא להוכיח שהתהליך אפשרי מבחינה כימית.

כדי לעבור מהתהליך המעבדתי לתהליך התעשייתי צריך לעשות שינויים ולהתאים את כל השלבים והמערכות כאשר היעד הוא **קבלת הכמות הנדרשת בניצולת המרבית ובדרגת הניקיון הנדרשת**.

תכנון הייצור מתבטא בהגדלת הכמויות והמיתקנים. מעבר זה מהכנת חומרים בקנה מידה מעבדתי לייצור בקנה מידה תעשייתי נקרא גימלון (scaling-up) והשלבים השונים נקראים שלבי גימלון.

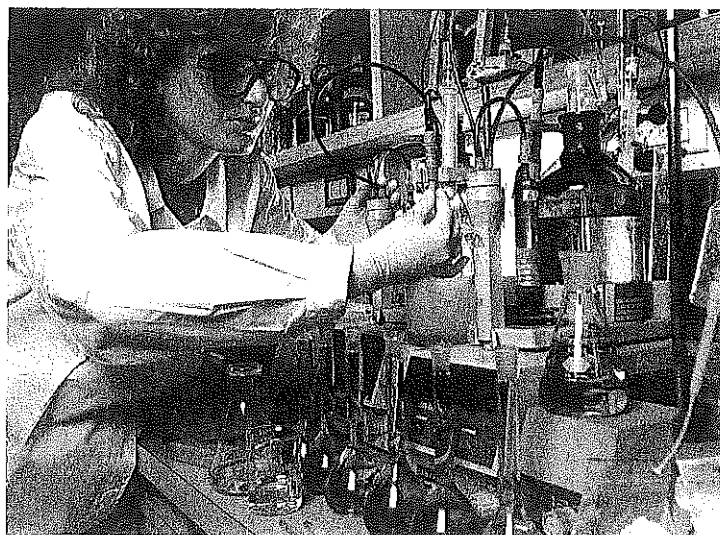
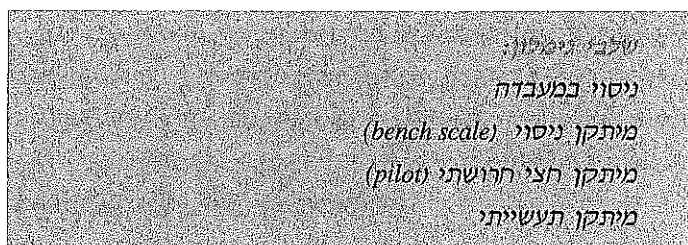
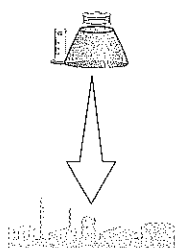
גימלון: הגדלת הכמויות והציוד במעבר מהפקה מעבדתית לייצור תעשייתי.

קבלת המוצר בניצולת המרבית ובדרגת הניקיון הנדרשת כרוכה בתכנון תהליכים שונים, שהם בעיקר תהליכי הפרדה ומיחזור. מכלול תהליכים זה נקרא Work-up.

Work-up - מכלול התהליכים הנעשים לאחר סיום התגובה כדי לקבל כמות מרבית של התוצר הרצוי בדרגת הניקיון הנדרשת.

- ה-Work-up מתייחס למתן פתרונות עבור שאלות כמו:
- מהו סדר הוספת חומרי הגלם למכל התגובה?
 - כיצד מזרימים/מוסיפים את חומרי הגלם למכל התגובה?
 - איך מחממים?
 - איך מקררים?
 - איך מערבבים?
 - באילו שיטות הפרדה כדאי להשתמש?
 - כמה שלבי הפרדה נדרשים?
 - איך מסננים?
 - איך מגבשים?
 - איך מייבשים?
- כל זאת כדי לקבל את התוצר בדרגת הניקיון הרצויה ובניצולת סבירה.

הגימלון, או המעבר ממערכת מעבדתית למיתקן תעשייתי לא נעשה בדרך כלל ישירות אלא בשלבים, העשויים להיות שונים ממקרה אחד למשנהו. בתכנון מיטבי יש לעשות קפיצות של יחסי גודל 10:1, אך לא תמיד מעשי לעבור את כל השלבים הללו. לרוב לאחר הניסוי במעבדה מקימים מיתקן ניסויי (bench scale), שגודלו כ- $\frac{1}{100} \pm \frac{1}{1000}$ מהמיתקן התעשייתי ולאחריו מיתקן חצי חרושתי ⁷ (pilot) שגודלו כ- $\frac{1}{10} \pm \frac{1}{30}$ מהמיתקן התעשייתי. מיתקן זה "מתרגם" לקנה מידה קטן את המערכת התעשייתית הסופית על כל שלביה ההנדסיים ומטרתו לצמצם את אי הוודאות הקיימת בעת הקמת המיתקן הסופי. בכל אחד מהשלבים נעשים שינויים והתאמות ויכולים לחול שינויים הן בתהליך עצמו והן בצידוד. כתוצאה מכך עשויים לחול שינויים גם באיכות התוצר. רק לאחר כל השלבים הללו עוברים להקמתו של המיתקן הסופי - שהוא המיתקן התעשייתי.



מערכת טיטרציה במעבדות "ספקטרום"

7 מקובל לקרוא למיתקן החצי חרושתי בשמו הלועזי - פילוט או מיתקן חלוצי.

יתרון נוסף וחשוב ביותר של המיתקן החצי חרושתי הוא האפשרות לקבל דוגמות של המוצר באיכות דומה לזו שתתקבל במיתקן הסופי. דוגמות אלה מקובל לתת ללקוחות לבדיקה ולניסוי עוד לפני שניגשים להקמת המיתקן החרושתי. שיטה זו מונעת סיכונים כלכליים ויש לה יתרון שיווקי ברור:

- בדיקת ביצועים של המוצר בחברה ואצל לקוחות.
- בדיקת התאמה לתקנים פנימיים וחיצוניים.
- בדיקות שוק.
- קביעה סופית של מפרט המוצר והתהליך.
- עדכון התכנית העסקית.

מיתקן חצי חרושתי דורש השקעה כספית לא מבוטלת וכן זמן ממושך לבחינה של התהליכים וחומרי המבנה. יתרונו בכך שהוא עשוי להצביע על בעיות שונות שעלולות להתגלות במיתקני הייצור הסופיים. איתור בעיות והפקת לקחים מבעוד מועד מאפשר עריכת שינויים מתאימים ולהקטנת הקף התקלות וההפסדים הכספיים העלולים לנבוע מהן. יחד עם זאת חשוב לזכור שגם מיתקן חצי חרושתי אינו זהה לחלוטין למיתקן הסופי ולא בהכרח תתגלנה בו כל הבעיות העלולות להופיע במיתקן החרושתי העובד בהיקף ייצור מלא.

בדרך כלל לא מדלגים על מיתקן ניסויי ועל מיתקן חצי חרושתי, אך כבר היו בעבר במפעלים שונים מקרים בהם עברו ישירות לייצור בקנה מידה גדול מטעמים שונים של חיסכון בזמן ובכסף. ברוב המקרים הללו התעוררו בעיות רבות ומסובכות ונגרמו הפסדים כספיים גדולים, אשר היו נחשכים אילו היו שומרים על ביצוע שלבי הגימלון השונים כסדרם.

הניסיון הוכיח שאת הבעיות יש לפתור לפני שנעשות השקעות גדולות בהקמה, בצידוד וכד'. מילותיו של ממציא הבקליט ליאו בקלנד (1863-1944) מדברות בעד עצמן:

עדיף לעשות טעויות בקנה מידה קטן ורווחים בקנה מידה גדול

הידעת?

גם לאחר שנמצאו הפתרונות המתאימים לכל הבעיות שנתגלו בשלבי הגימלון השונים ומקימים את המיתקן הסופי, המלאכה אינה מסתיימת. המערכות משתכללות, מתגלים אמצעים חדשים וחומרים חדשים ומחפשים פתרונות טובים יותר. זהו אתגר בלתי פוסק להשתפרות ולהתאמת.

המישתנים העיקריים הנלקחים בחשבון בתהליך הגימלון

חומרי גלם

בחירת חומרי הגלם במעבדה פשוטה בהרבה מאשר בתעשייה. בדרך כלל, כאשר רוצים להפיק במעבדה כמות קטנה של חומר, מחיר חומרי הגלם אינו מהווה בעייה מהותית. לעומת זאת, בתעשייה, כאשר המטרה העיקרית הינה רווח כלכלי, יש לבחירת חומרי הגלם חשיבות מכרעת. בחירת חומרי הגלם עשויה להשפיע גם על התהליך עצמו, שכן ניתן לעיתים להשיג **חומרי גלם** בדרגת ניקיון שונה, או עם תכולת אי ניקיונות שונה (כפי שנראה בהמשך בסעיף ה.2).

תנאי התגובה ומהירותה

התכנות תהליך כלשהו נבחנת על פי שתי אמות מידה של בקרה:

בקרה תרמודינמית: קשורה בספונטניות התהליך ונקבעת לפי ערכו של השינוי באנרגיה החופשית של התהליך בטמפרטורה נתונה.
בקרה קינטית: קשורה בשיקולים של מהירות תגובה ונקבעת לפי ערכו של השינוי באנרגיה החופשית של השפועל בטמפרטורה נתונה.

בחירת התנאים המיטביים תלויה הן בנתונים התרמודינמיים והן בנתונים הקינטיים של התגובה.

משתנים כמו טמפרטורה, לחץ, pH עשויים לקבוע את:

- סוג התוצרים
- הריכוזים
- קצב התגובה

ההשפעה יכולה לנבוע הן משיקולים תרמודינמיים, שמשמעותם עדיפות לתהליך הגורם להגדלת האנטרופיה של היקום (כמו למשל, בתגובה הפיכה בה משתתפים גזים, הגדלת האנטרופיה של היקום תתרחש על-ידי התגברות התגובה בה נוצרות יותר מולקולות), הן משיקולים קינטיים (כמו למשל, האצת קצב התגובה כתוצאה מהעלאת הטמפרטורה) והן משיקולים אחרים (כמו למשל, מניעת אובדני חומר על-ידי אידוי או שמירה על הבטיחות).

בניסוי המעבדתי בדרך כלל לא לוקחים בחשבון את מרכיב הזמן. בתעשייה, לעומת זאת, יש חשיבות מכרעת לשאלת הזמן, או ביתר דיוק לכמות התוצר

המתקבלת ליחידת זמן⁸. במיוחד חשוב הדבר כאשר מדובר בייצור כמויות גדולות של חומרים. בעיית הזמן משתלבת למעשה כמעט בכל השיקולים שהוזכרו לעיל: בחירת חומרי הגלם, קביעת תנאי התגובה, בחירת הטכנולוגיה, הציוד ועוד. את כל הגורמים הללו צריכים לקחת בחשבון, כאשר המטרה היא להגיע למצב מיטבי ללא צורך להגדיל יותר מדי את העלויות.

קיצור זמן התגובה יכול להעשות הן על-ידי בחירת הטכנולוגיה והן על-ידי התערבות בתהליך עצמו. כאשר התוצרים מתקבלים בתגובות מהירות ניתן לקצר את זמני התגובה על-ידי הגברת קצב הזרימה במערכת או על-ידי הקטנת זמן השהייה של מרכיבי התגובה במכלים השונים. כאשר התגובה איטית ניתן לקצר את הזמן הנדרש לקבלת כמות מבוקשת של תוצרים על-ידי שימוש בזרימה מתאים. במסגרת פרקי הכימיה הקודמים למדת על השפעתו של הזרי על מהירות תהליכים. הזרי מוריד את האנרגיה החופשית של השפועל של התהליך (או שלב מסוים בו) וכך מקצר את הזמן הנדרש להשלמת התגובה. בסוף התגובה חוזר הזרי (בדרך כלל) למצבו ההתחלתי וכך יכול למלא שוב ושוב את תפקידו.

זרי: חומר שמוסיפים לתגובה כדי להגדיל את מהירותה.

אנרגיה חופשית של שפועל: האנרגיה המוערית הדרושה על מנת להביא את המגיבים למצב מעבר המאפשר קבלת תוצרים.

האם הוספת זרי לתהליך עשויה לשנות את כמות התוצר? הסבר.

התייחס לשתי אפשרויות:

- מוסיפים זרי ולא משנים את הטמפרטורה.

- מוסיפים זרי ומשנים את הטמפרטורה.

דון בשני מקרים:

- בתגובה בה אפשרי רק תוצר אחד.

- בתגובה בה אפשריים מספר תוצרים.

במקרים רבים בתעשייה משתמשים בזרזים מוצקים, אשר סופחים על שטח פניהם את המגיבים ועל-ידי כך מאפשרים קבלת תוצרי ביניים בעלי תכולת אנרגיה נמוכה יותר מאלו המתקבלים ללא זרי. זרזים הפועלים באמצעות מנגנון זה חייבים להיות בעלי שטח פנים גדול. משיגים זאת על-ידי מבנה נקבובי או שימוש בחלקיקים קטנים ורבים.

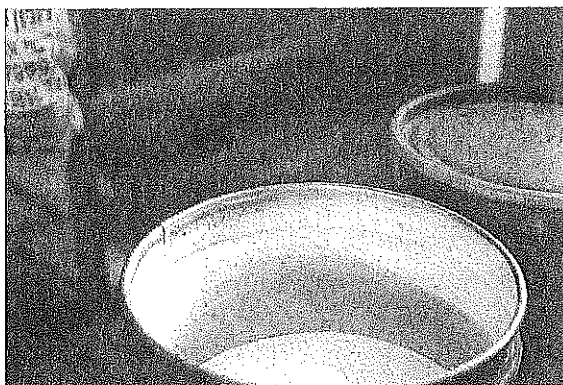
8 כמות זו נקראת תפוקה. ראה הגדרה בעמ' 117.

במשך הזמן קיימות תופעות שונות הגורמות לירידה ביעילות הזרז. באופן מעשי קיים לכל זרז פרק זמן מסוים בו הוא יכול למלא את תפקידו ביעילות. ירידת יעילותו של הזרז עקב סיפוח חומרים לא רצויים לשטח הפנים שלו נקראת הרעלת זרז. סיבות אחרות לירידה ביעילות הזרז הן התנדפות הזרז בטמפרטורות גבוהות, שינויים החלים במבנה הזרז או סיבות טכנולוגיות אחרות הגורמות לקילקולו ולצורך להחליפו מדי פעם.

הרעלת זרז: ירידת יעילותו של הזרז עקב סיפוח חומרים לא רצויים לשטח הפנים שלו, או גורמים אחרים הפוגמים בפעילותו.

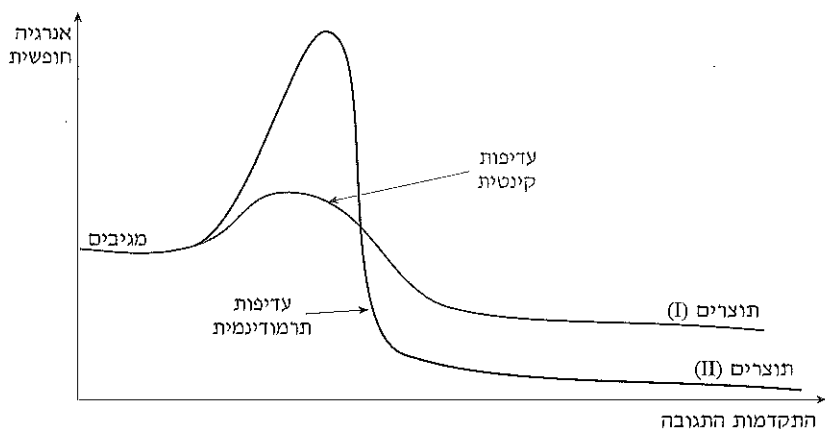
בדרך כלל מוצאים בתעשייה תנאים של פשרה כלכלית הלוקחים בחשבון את עלות הזרז ופרק הזמן בו הוא ממלא את תפקידו ביעילות יחסית. במקרים מסוימים דואגים להשבת הזרז או לניצולו למטרות אחרות כדי לחסוך בעלויות.

השבת זרז: תהליך של חידוש הזרז והבאתו חזרה לצורה פעילה.



זרז אלומיניום כלוריד המשמש במספר תהליכים במפעל

לעיתים קרובות, בנוסף לתגובה בה מתקבל התוצר המבוקש עשויות להתרחש תגובות מתחרות, במהלכן מתקבלים תוצרים אחרים שהם בלתי רצויים. תופעה זו מורידה את ניצולת התגובה הרצויה. בחירה מתאימה של הטמפרטורה ו/או שימוש בזרז בררני המוריד את האנרגיה החופשית של השפעול של התגובה הרצויה (מבלי לשנות באופן משמעותי את זאת של התגובה המתחרה) יכולים לנתב את התגובה לכיוון הרצוי. באופן כזה תתרחש התגובה שמלכתחילה לא היתה לה **עדיפות קינטית** גבוהה יותר, או אותה התגובה שהיתה מלכתחילה בעלת **עדיפות תרמודינמית** נמוכה יותר. בתרשים הבא מוצגת באופן סכימתי דוגמא למצב כגון זה עבור שני תהליכים מתחרים:



- האם כדאי להוסיף זרז במקרה שרצויים תוצרי תגובה (I)? נמק.
- האם כדאי להוסיף זרז במקרה שרצויים תוצרי תגובה (II)? נמק.
- באילו תנאי טמפרטורה תתרחש התגובה בעלת העדיפות התרמודינמית?
- באילו תנאי טמפרטורה תתרחש התגובה בעלת העדיפות הקינטית?

בפרקים קודמים למדת כי **בתהליכים הפיכים** בהם משתתפים גזים עשוי שינוי הלחץ להשפיע על ריכוז התוצרים. כמו כן למדת כי בתהליכים הפיכים ניתן להשפיע על כמות התוצר המתקבלת באמצעות שינוי הטמפרטורה.

האם כדאי להעלות את הלחץ או את הטמפרטורה? זוהי כבר שאלה מורכבת יותר, התלויה גם בשיקולים כלכליים הלוקחים בחשבון גם את העלויות השונות הכרוכות בכך: עלויות אנרגיה, עלויות שינוי חומרי המבנה, עלויות הקשורות בבחירת הטכנולוגיות המתאימות וכד'.

- כיצד תשפיע הורדת/העלאת הטמפרטורה על כמות התוצר בתהליך הפיך הנמצא במצב שיווי משקל כאשר התהליך הישיר הוא אקסותרמי? אנדותרמי?
- כיצד תשפיע הורדת/העלאת הלחץ על כמות התוצר בתהליך הפיך הנמצא במצב שיווי משקל כאשר: אין שינוי במספר המולים של הגזים המשתתפים בתגובה? יש שינוי במספר המולים של הגזים המשתתפים בתגובה?
- מהם המשתתנים שיש לבחון כאשר רוצים להוריד את הטמפרטורה?
- מהם המשתתנים שיש לבחון כאשר רוצים להעלות את הטמפרטורה?
- מהם המשתתנים שיש לבחון כאשר רוצים להעלות את הלחץ?
- מהם המשתתנים שיש לבחון כאשר רוצים להוריד את הלחץ?

כללית, יש להתייחס לתהליך הייצור כאילו הוא מורכב מפעולות יסוד. פעולות היסוד כוללות שינוע חומרים (חומרי גלם, חומרי ביניים או מוצרים), ערבוב חומרים, סינון, איוד, גיבוש, זיקוק, ייבוש, אריזה ועוד. לכל פעולה יש לבחור את הציוד המתאים והוא נבחר על פי יעילותו, עמידותו בפני שיתוך, מחירו ועלות אחזקתו. בחירה זו היא תפקידם של מהנדסי הכימיה המתכננים את המיתקן.

בחירת הציוד והתאמתו לפעולת היסוד הנדרשת תלויה במכלול גורמים וביניהם:

- כמות החומר
- מצב הצבירה של החומר
- העמידות הנדרשת
- עלויות (הקמה, תפעול ואחזקה)

בראש ובראשונה מושפעת בחירת הציוד מאופי החומרים ומהכמויות המתוכננות לייצור. לעיתים, כאשר מדובר בייצור כמויות גדולות מאד, משתמשים במספר מערכות קטנות יותר העובדות במקביל וכך כאשר קיימת תקלה במערכת אחת המערכת השנייה ממשיכה לעבוד.

מידע על מצבי הצבירה חשוב לתכנון פעולות שונות כמו הוספה רצופה של החומר למכל התגובה, בחישה, שאיבה, סינון וכד'.

עמידות הציוד משמעותה התאמת חומרי המבנה לחומרים המשתתפים בתגובה ולתנאיה. זוהי אחת הבעיות המרכזיות המלוות את בחירת פריטי הציוד השונים לכל אורכו של התהליך התעשייתי.

כאמור, הציוד והכלים המשמשים במעבדה הם בדרך כלל סטנדרטיים ועשויים מזכוכית מיוחדת. יתרונה של הזכוכית הוא בעמידותה בטמפרטורות גבוהות ובנוכחות חומרים רבים בעלי יכולת שיתוך גבוהה. יתרון נוסף הוא שקיפותה, המאפשרת לראות את המתרחש בכלי בעת שלבי הניסוי במעבדה. עבור מיתקנים בקנה מידה תעשייתי בדרך כלל אין זה מעשי להשתמש בציוד העשוי מזכוכית, אך קיימים מקרים בהם אין ברירה אחרת (ראינו זאת בפרק ג' הדן בייצור הברוס).

התאמת חומרי מבנה תעשית על בסיס המשתנים הבאים:

- גודל המיתקן והחוזק המינימלי הנדרש ממנו
- תנאי הטמפרטורה והלחץ השוררים במיתקן
- בעיות שיתוך ייחודיות
- עלות חומרי המבנה המתאימים ויעילותם היחסית.

לדוגמא: עמידות בפני תנאים של לחץ גבוה דורשת בניית מיתקנים בעלי חוזק מיכני מיוחד. לצורך זה משתמשים במקרים רבים בפלדת אל-חלד (נירוסטה), שהיא סגסוגת המכילה בעיקר ברזל, ניקל וכרום. כמו כן עשויה צורת הכלי להשפיע על חוזק הכלי. עבור כלי או מכל האמור לעמוד בתנאי לחץ גבוה עדיפה צורה כדורית, שהיא חזקה יותר. בכלי כזה ניתן להסתפק בדופן דקה יותר ולכן העלות יורדת.⁹

לעתים קרובות קיימות גם בעיות שיתוך מיוחדות, הקשורות לחומרים המשתתפים בתגובה ובתנאית. כך למשל, קורה כאשר עובדים עם הלוגנים, תמיסות מימיות של חומצות וכד'. במקרים כאלה פלדת אל-חלד אינה מתאימה ויש לחפש פתרונות מתאימים, כגון שימוש בחומרים פלסטיים מיוחדים, סגסוגות מיוחדות, ציפויים שונים ועוד.

כאשר מתקבצות יחד מספר דרישות, כמו חומרים משתכים, טמפרטורות גבוהות ולחצים גבוהים, נעשית מלאכת ההתאמה מסובכת הרבה יותר. במקרים אלו יש להשתמש בחומרים עמידים במיוחד, שהם גם בדרך כלל יקרים ביותר (למשל סגסוגות של טיטניום או טנטלום, שהוזכרו בפרק ג' בהקשר למיתקני הברום החדשים).

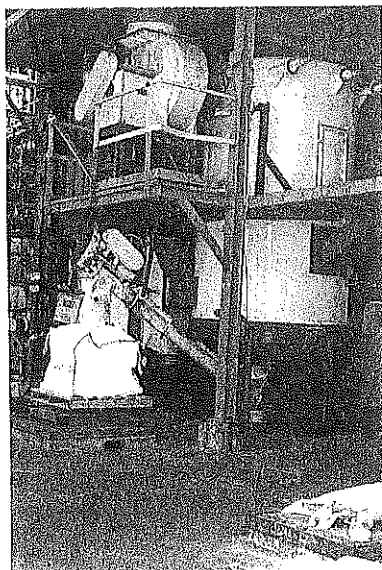
אחת המשימות של החוקרים העוסקים בתחום זה הינה למצוא חומרי מבנה שיענו על מכלול הדרישות בצורה המיטבית.

תהליך הבחירה של יחידות הציוד לצורך ביצוע הפעולות השונות בתהליך הייצור (כגון: משאבות, מסננים, תנורי ייבוש ועוד) הינו מורכב ודורש ידע וניסיון רב.¹⁰ הבחירה אינה מתייחסת רק לחומרי מבנה אלא גם לתכונות אחרות של המערכות שחייבות להתאים לתכונות הייחודיות של החומרים המשתתפים או מתקבלים בתהליך.

לדוגמא, כאשר המוצר הוא מוצק יש חשיבות לגודל הגבישים, למידת הרטיבות שלהם וכד'. למרות שניתן לייבש חומרים בשיטות רבות, לא כולן מתאימות לתהליך. ידועים מקרים שונים בהם נכשל תהליך בגלל חוסר היכולת לקבל את החומר במצב הגבישי ובמידת היובש המתאימים. הבחירה בשיטת הייבוש ובציוד המיועד לכך צריכה להיות מותאמת למצב החומר המתקבל בתהליך הייצור ואיפיון המוצר על פי דרישות הלקוח.

9 כך למשל בנויים מכלי האיחסון לגזים בלחץ גבוה, כמו אמוניה, כלור, גז בישול ועוד.

10 לקריאה נוספת: "לא על הדשן לבדו". מאת מירי קסנר, הוצאת המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, עמ' 84-85.



תנור ייבוש

אנרגיה

במעבדה ניתן לחמם או לקרר באופנים שונים, אך לשאלת העלות אין בדרך כלל חשיבות מרכזית. בייצור, לעומת זאת, יש משמעות כלכלית מכרעת לעלויות האנרגיה.

מהם, לפי דעתך, ההבטים על פיהם בוחרים את השיטה לחימום? לקירור? תן דוגמאות לשיטות שונות של חימום וקירור.

במהלך שלבי הגימלון השונים יש לפתור גם בעיות אנרגיה הנובעות מהגדלת הכמויות והכלים. בעת התכנון ההנדסי יש לקחת בחשבון משתנים כמו קצב חימום או קירור, התלויים בין השאר בנפח הכלי ובשטח הפנים שלו. יחס זה בין הנפח לשטח הפנים משתנה ותלוי בצורת הכלי.

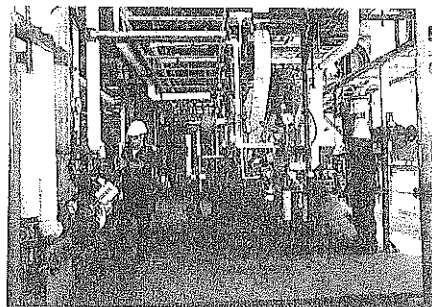
כך לדוגמא, אם יגדל הרדיוס של כלי בעל צורה כדורית פי 10, יגדל נפחו פי 1000 ושטח הפנים שלו יגדל רק פי 100. כמות החומר שניתן יהיה להכניס לכלי תגדל פי 1000 וכך גם כמות האנרגיה שתפלט או תדרש בתהליך. לעומת זאת, קצב החימום והקירור, התלויים בשטח הפנים של הכלי, יגדלו פי 100 בלבד.

גם שיטת הקירור או החימום עשויה להשתנות בהתאם לתנאי התגובה, לטמפרטורה השוררת במכל ולמידת הקירור או החימום הרצויה. ניתן לבחור באמצעים שונים כמו: אוויר קר או חם, מים המצויים בטמפרטורת הסביבה, תמלחת קרה (כאשר נדרש קירור לטמפרטורות נמוכות מאד) ועוד. דוגמאות לכך נראה בפרק ו' כאשר נדון בתהליכי הייצור השונים.

לעיתים קרובות נשאלת שאלה זו והתשובה אינה פשוטה ונשענת על מספר שיקולים שונים. לכל שיטה קיימים יתרונות וחסרונות שצריכים להשקל זה כנגד זה. יתרון בולט בתהליך מנתי הוא האפשרות לשלוט ביתר קלות על ריכוזי החומרים ולוודא מתי הסתיימה התגובה. כמו כן קל יותר לפקח על תנאי התגובה (לחץ, טמפרטורה, pH וכד'). החיסרון העיקרי בשיטה זו הוא ביצוע התהליך עם מנות מוגדרות של חומרים. רק כאשר מסתיים התהליך עם מנה אחת אפשר להמשיך ולייצר מנות נוספות. לעומת זאת, בתהליך הרציף החומרים לא נשארים במכלים, אלא ממשיכים בזרימתם. כשם שחומרי הגלם מוזנים ללא הפסקה, כך גם מתקבלים ללא הפסקה התוצרים. כך, במיתקן מנתי ניתן על-ידי שינויים מתאימים לייצר יותר ממוצר אחד ואילו מיתקן רציף מתוכנן למוצר אחד בלבד. בגלל הבדלים אלו נדרשים עבור תהליך מנתי מכלי תגובה גדולים יותר מאשר המכלים הנדרשים עבור תהליך זהה הבנוי בצורה רציפה. היכולת להקטין את מכלי התגובה וכתוצאה מכך גם את המיתקנים היא אחד היתרונות הבולטים של התהליך הרציף.

תכנון תהליך רציף מסובך הרבה יותר מתכנון תהליך מנתי. תהליך רציף מחייב זרימה רצופה של חומרים לאורך תהליך הייצור ושמידה על תנאים קבועים בכל חלקי המערכת. לפיכך מחייב תכנון תהליך רציף התקנת משאבות ומערכות בקרה אוטומטיות המתבססות על מישתנים מדידים ומאפשרות שליטה מרחוק בקצב הזרימה של החומרים, בריכוזי החומרים, בתנאי התגובה וכד'. כל זה מתייחס לכל אחד מהמישתנים המשפיעים על התהליך: חומרי גלם, תוצרים, מי-קירור, אנרגיה וכד'. בתהליך מנתי לעומת זאת ניתן לדגום ולבצע בדיקות מחוץ למערכת. ההחלטה, אם לתכנן תהליך מנתי או רציף תלויה בדרך כלל בכמויות המיוצרות וביציבות הביקוש. אם הביקוש רצוף והכמויות גדולות כדאי להשקיע בבניית מיתקן רציף, שהוא יקר יותר. עבור מוצרים הנדרשים בכמות קטנה, או שהביקוש להם אינו קבוע, מועדף מיתקן מנתי.

האם ניתן באמצעות תרשים זרימה לדעת האם התהליך מנתי או רציף? הסבר.



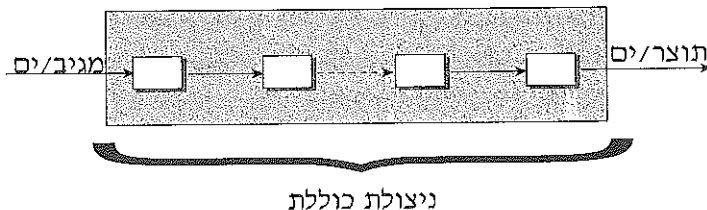
תחזוקה שוטפת באחד ממיתקני הייצור

בניסוי מעבדתי לא קיימות בדרך כלל דרישות מיוחדות לגבי הכמויות המיוצרות וכתוצאה מכך אין חשיבות לתפוקה או לניצולת. לעומת זאת במפעל המייצר בקנה מידה גדול יש לדאוג לתפוקה המתאימה לדרישות השיווק ולניצולת מיטבית כדי להגדיל את הרווחיות.

תפוקה: כמות התוצר המתקבלת ליחידת זמן.
 התפוקה יכולה להמדד לשעה, ליום, לשבוע, לחודש או לשנה.
 בדרך כלל כאשר מדובר בחומרים בסיסיים המיוצרים בכמויות גדולות (commodities) התפוקה נמדדת בטונות או מאות אלפי טונות לשנה.

בתהליך התעשייתי יש למדוד את כמות התוצר המתקבלת מכמות נתונה של חומרי גלם ובכך נמדדת יעילות התהליך. יש חשיבות מרכזית להקטנת אובדנים של חומרי גלם או תוצרים לכל אורכו של תהליך הייצור. יש לדאוג לכך שהבזבז יהיה מזערי מכיוון שכאן בזבזים קטנים הופכים לבזבזים גדולים. בהתאם לכך יבחרו תנאי תגובה מתאימים, שיטות עבודה מתאימות וכד'. לצורך זה מגדירים, כפי שראינו בפרק הקודם, את המושג ניצולת התגובה, שמהווה מדד לכמות התוצר המתקבלת בשלב כלשהו של התהליך ביחס לכמות התאורטית שהיתה אמורה להתקבל מכמות התחלתית נתונה של מגיבים. מדד חשוב יותר לכמות התוצר המתקבלת בתהליך הוא הניצולת הכוללת.

בחישוב הניצולת הכוללת מתייחסים לכל התהליך מתחילתו ועד סופו (כולל כל שלבי התגובה, ההפרדה והמיחזור) כאל "קופסא שחורה", כאשר החישוב נעשה על פי כמויות המגיבים הנכנסות לתהליך וכמויות התוצרים המתקבלות בסופו.



דרגת הניקיון של החומר חשובה במרבית המוצרים התעשייתיים. יחד עם זאת חשוב לציין כי דרגת הניקיון של המוצר צריכה להיות מותאמת לשימושו. אין צורך להשקיע בחומרי גלם נקיים במיוחד (שהם כמובן יקרים יותר) או בתהליכי ניקוי מיותרים (כל שלב הפרדה נוסף מעלה את ההשקעה הכספית) כאשר השימושים בתוצר אינם דורשים זאת. כך לדוגמא, חומצה זרחתית המשמשת לייצור דשנים יכולה להיות בדרגת ניקיון נמוכה יותר מאותה חומצה המשמשת בייצור קוקה קולה. **דרגת הניקיון של התוצר צריכה להיות מותאמת לדרישות הלקוח.** זהו אחד העקרונות הבסיסיים של הבטחת איכות, גישה הנעשית כיום מקובלת יותר ויותר בעולם התעשייה המודרני ואשר נפרט יותר בהמשך פרק זה. שיטות הניקוי הן מגוונות ונבחרות בהתאם לחומרים ולתכונותיהם, דרגת הניקיון הנדרשת והעלויות הכספיות. לעיתים שימוש בחומרי גלם שונים, או אפילו באותם חומרי גלם ממקורות שונים יביא להבדלים בדרגת הניקיון של התוצר. גם שימוש בשיטות הפרדה שונות עשוי להביא לחומרים בעלי דרגות ניקיון שונות.

תן דוגמאות לשיטות שונות באמצעותן ניתן לנקות: מוצר אורגני

מוצר אנאורגני.

מהם השיקולים על פיהם תבחר שיטת הניקוי?

ישנם גורמים נוספים אשר אין להם חשיבות כלכלית בתהליך מעבדתי, אך לא כן בתהליך תעשייתי. רובם קשורים בחיסכון בתשומות כמו מים, אנרגיה, חומרי עזר (ממסים, זרזים וכד') וחומרי גלם או בהשקעה בשמירה על בטיחות ואיכות הסביבה.

תשומות: כל מרכיב כלכלי שנכנס לחישוב העלות הכוללת של המוצר.

חיסכון בתשומות

מים: במקרים רבים הופך השימוש במי-קירור או במי-שטיפה למרכיב חשוב ביותר בעלות התהליך התעשייתי, וניצול יעיל שלהם משפר את הכלכליות. כדי לחסוך במים משתמשים בדרך כלל במי קירור הזורמים במעגל סגור. המים מסתחררים במערכת, מתקררים ומתחממים בהתאמה, אך כמו במקרים רבים אחרים יחד עם פתרון בעיה אחת צצה בעיה אחרת. מערכות קרור מסוג זה יכולות להוות בית גידול לפטריות, אצות ומיקרואורגניזמים שונים העלולים להתרבות ולהביא לסתימת המערכות ולשיתוך שלהן. למניעת התופעות הללו נהוג להוסיף למים המסוחררים במעגל סגור חומרי חיטוי מתאימים שמטרתם לדכא את התפתחות המיקרואורגניזמים השונים וכמו כן חומרים מונעי שיתוך. בפרק ה' תלמד בהרחבה על חומרי החיטוי ואופן פעולתם, שכן זהו אחד מתחומי העיסוק החשובים של מפעל "תרכובות ברום".

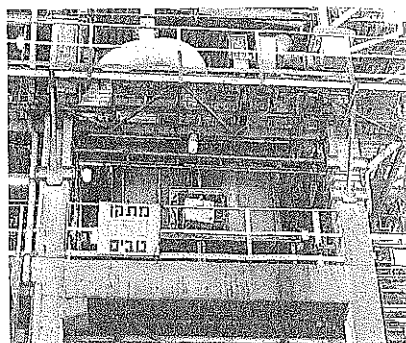
ניתן לחסוך במי שטיפה הן על-ידי תכנון מתאים של אופן השטיפה, והן על-ידי הוספת תהליכי ניקוי המאפשרים לעשות בהם שימוש חוזר.

אנרגיה: בגלל החשיבות הרבה של **החיסכון באנרגיה** נעשה מאמץ לניצול יעיל ככל האפשר של האנרגיה הנפלטת בתהליכים אקסותרמיים לשימוש בתהליכים אנדותרמיים. במיתקנים תעשייתיים מנסים עד כמה שאפשר למנוע בזבוז אנרגיה על-ידי העברתה מזרמים בטמפרטורה גבוהה, שאותם רוצים לקרר, אל זרמים בטמפרטורה נמוכה, שאותם רוצים לחמם. ראינו זאת במיתקן הברוס, כאשר האנרגיה התרמית של התמלחת ה"מנוצלת" החמה מחממת את התמלחת "הגולמית" המוזנת למיגדל התגובה. במקרים רבים בתעשייה משתמשים באנרגיה הנפלטת בתהליכים אקסותרמיים לחימום מים ולייצור קיטור.

בנוסף לכך קיים בדרך כלל מיתקן מרכזי לקירור מים והוא מספק את כל צרכי המפעל. הפעלתו של מיתקן מרכזי כזה מהווה חיסכון בתשומות.

חומרי עזר: כאמור, בתהליכים רבים משתמשים **בזרזים**. גם אם שומרים על הזרזים ודואגים שלא יורעלו, עם הזמן מצטברים עליהם זיהומים ומתרחשים תהליכים שונים הגורמים בסופו של דבר להקטנת יעילותם. למרבית הזרזים מחיר גבוה, ולפיכך יש חשיבות גדולה לחיסכון בתחום זה **ולהשבת הזרז** לפעילות תקינה, כאשר ניתן לעשות זאת. השבת הזרז דורשת בדרך כלל טיפול מיוחד ומתבצעת במרבית המקרים במפעל המייצר אותו.

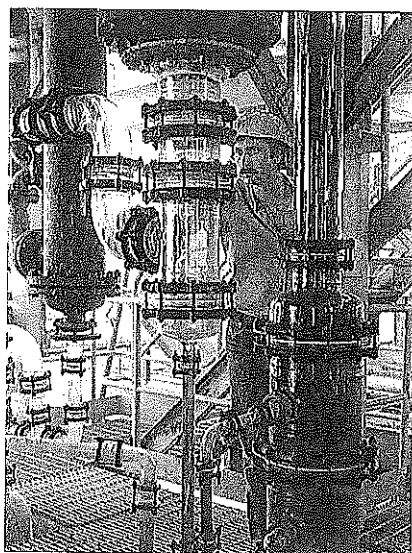
באופן דומה לחיסכון הנעשה במי קרור על-ידי סחרורם במערכת רצוי גם לדאוג **לחיסכון בממסים**. יחד עם זאת יש לעיתים קרובות לקחת בחשבון, כי גם בממסים הזורמים במעגל סגור עשויים עם הזמן להצטבר חומרים מזהמים, העלולים כשריכוזם גבוה מדי לפגוע בתהליך. לכן חייבים ממסים אלה לעבור מדי פעם תהליכי ניקוי לסילוק המזהמים. אמנם תהליכי ניקוי אלה דורשים השקעה נוספת, אך יש לזכור כי בנוסף לחשיבות הכלכלית, יש לסחרור ממסים גם חשיבות בשמירה על איכות הסביבה.



מערכת לזיקוק ממס

"ספקטרום" – מיתקני הפילוט של "תרכובות ברום"

למפעל "תרכובות ברום" אתר מיוחד הנמצא בסמוך לו ובו נעשים שלבי הגימלון השונים הנדרשים והבדיקות הנלוות כדי להתאים את התהליך המעבדתי לייצור בקנה מידה תעשייתי. זהו אתר "ספקטרום" בו מצויים מיתקני הפילוט של המפעל. בשלב הראשון עובר התהליך למעבדת האתר שהיא מעין פילוט מוקטן (מיני פילוט) ממוחשב. זוהי מעבדה משוכללת ומצוידת במיטב הציוד המודרני שתפקידה לבדוק את התהליך לאחר שעבר את שלבי הפיתוח הראשוניים במעבדת המחקר. כל שלב בתהליך נבדק בצורה יסודית כדי למצוא את חומרי הגלם המתאימים, התנאים המיטביים לביצועו, משך הזמן הנדרש, חומרי לוואי, אי ניקיונות וכד'. כל זאת על-ידי עריכת שינויים בגורמים שונים כמו תנאי התגובה, קצב זרימת החומרים ומשך הזמן שבו מתבצעת התגובה, עד למציאת התנאים המיטביים שיובילו לקבלת המוצר הרצוי בדרגת הניקיון המבוקשת. בדיקת ריכוזי החומרים השונים בתערובת התגובה, הטמפרטורה, ה-pH ומשתנים אחרים הנקבעים על פי הצורך, מתבצעת באמצעות גלאים משוכללים הקשורים למחשבים האוספים את נתוני המדידות לאורך פרקי זמן מתוכננים מראש, שיכולים להגיע אפילו למספר ימים. ניתוח התוצאות נעשה באמצעות תוכנות מחשב מיוחדות. זוהי עבודת פסיפס חשובה ביותר ובעלת אתגר, שבסופה נקבעים תנאים מדויקים עבור כל שלב ושלב בתהליך.



מיתקן חצי חרושתי ב"ספקטרום"

לאחר שהסתיימו שלבי בדיקה אלו בפילוט המוקטן הממוחשב עובר התהליך לביצוע בקנה מידה גדול יותר במיתקן החצי חרושתי. מיתקן זה כולל מערכות בגדלים שונים שהן כבר קרובות יותר בצורתן למיתקן הייצור הסופי. גם פה ניתן להגדיל את המערכות בשלבים וכך להגיע למערכת שבאמצעותה ניתן לבדוק גם את יעילותן של טכנולוגיות שונות. סופו של תהליך ארוך וממושך זה, הנמשך לעיתים חדשים אחדים, הוא "חבילת התהליך". זהו ספר המכיל הוראות מדוייקות ובעזרתו ניתן לתכנן ולהקים את מיתקן הייצור הסופי ולהפעילו בצורה מסחרית.

כל הבעיות הללו ואחרות יוצאות מתחומי עיסוקם הבלעדי של כימאים ועובדות לטיפולם של בעלי מקצוע אחרים כמו: מהנדסי כימיה, אנשי איכות סביבה, כלכלנים ועוד. הפתרונות לבעיות הללו יכולים להיות שונים ובדרך כלל נבחנים על-ידי כדאיותם הכלכלית.

כפי שכבר ראינו קודם, אחד היתרונות החשובים של המיתקן החצי חרושתי היא האפשרות לקבל דוגמאות מסחריות לבדיקת הלקוחות כבר בשלבים המוקדמים. הלקוחות בודקים את החומר וכך יכולים להחליט אם אכן החומר מתאים לשימוש, האם יש לערוך שינויים בתהליך שלהם או שיש לבקש שינויים אצל היצרן. משלוח הדוגמאות לבדיקה אצל הלקוחות משפר את התהליך השיוקי ומאפשר לדעת מראש מי יהיו הלקוחות, מה תהיינה דרישותיהם, כמה חומר יקנו וכד'.

איזה חלק מן הרעיונות זוכים למימוש?



בתעשייה הכימית מקובל להתייחס ליחס של 1:100¹¹. מכל מאה רעיונות הנבדקים בשלב הגיוש מגיעים כארבעים רעיונות לבדיקה ראשונית במעבדה. כששה מהם מגיעים לשלבים מתקדמים יותר של הבדיקה המעבדתית, בהם נבחנים התנאים המיטביים

(אופטימיזציה). רק כשניים מכל מאה רעיונות מגיעים לבדיקה במיתקן החצי חרושתי ורק אחד מהם עשוי להגיע למימוש. פרק הזמן הדרוש כדי לעבור את כל השלבים הללו בפיתוח מוצר חדש יכול להגיע לשבע שנים ולעיתים אף יותר מכך. עבור מוצרים שאינם חדשים, המיוצרים גם על-ידי חברות אחרות¹², נדרש בדרך כלל פרק זמן קצר יותר.

11 בתעשיית התרופות מקובל יחס של 1:1000

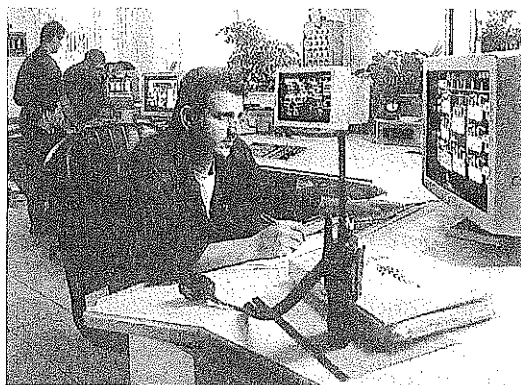
12 מוצרים אלה נקראים Me Too

2.2 – איך משיגים איכות כוללת?

בקרה, ביקורת טיב, אבטחת איכות וניהול הסביבה

בסעיף זה נציג מספר מושגים בסיסיים בתחום הבקרה והאיכות ואת העקרונות הבסיסיים הנוגעים להבטחת איכות, תורה ניהולית שאומצה על ידי קבוצת הברום.

בקרת התהליך היא חלק בלתי נפרד מפעולתו הרצופה והתקינה של כל מיתקן. בעזרת מערכות הבקרה בודקים האם כל שלבי התהליך מתנהלים כמתוכנן. במיוחד חשוב הדבר בשלבים הדורשים תנאים מיוחדים, שלבים בעלי דרגת סיכון גבוהה, שלבים משמעותיים ביותר בקביעת ניצולת התהליך או אלו המשפיעים על דרגת הניקיון של התוצר. שיטות הבקרה מתפתחות באופן מתמיד ובמרבית המיתקנים הוכנסו מערכות בקרה ממוחשבות, המראות למפעילי המיתקנים מהם התנאים השוררים בכל רגע ורגע במקומות השונים במיתקן, ואף מאפשרות להם לשנות גורמים מסויימים במידת הצורך. כל תהליך מבוקר על-פי המשתנים המייחדים אותו. למשל: תגובות חומצה-בסיס ניתן לבקר על-ידי שליטה בדרגת החומציות, תגובות אקסותרמיות מבוקרות על-ידי בקרת הטמפרטורה, תגובות בין גזים מבוקרות על-ידי הלחץ וכד'. בקרת התהליך כוללת לקיחת דגימות משלבים שונים של התהליך והעברתן למעבדה לצורך בדיקות איכותיות וכמותיות.



חדר בקרה במיתקן

ככל שהבקרה בכל שלב ושלב תהייה טובה יותר, המוצר שיתקבל יתאים יותר לדרישות הלקוח והניצולת הכללית של התהליך תהיה גבוהה יותר. כדי לבדוק האם המוצר הסופי אכן מתאים לדרישות נלקחות דגימות המועברות לבדיקות

מעבדה. בדיקות אלו יאפיינו את המוצר הסופי, תכונותיו ותכולת אי-הניקיונות בו. כך ניתן להחליט האם הסתיים התהליך והתקבל המוצר המבוקש, או שיש להמשיך במספר פעולות כדי לשפרו.

בעבר היה נהוג לבצע ביקורת איכות, או כפי שהיא נקראת ביקורת טיב של המוצר הסופי, רק בסופו של תהליך הייצור. שיטה זו חייבה פסילתו של משלוח במידה ולא התאים בתכונותיו לדרישות. כתוצאה מכך נגרם הפסד כספי למפעל ולעיתים אף נגרם עיכוב באספקת התוצרת ללקוח. על פי תפיסה ישנה זו שימשה ביקורת האיכות מעין "תחנת מיון" בסוף תהליך הייצור ולא היתה לה השפעה על תהליך הייצור עצמו או איכות המוצר.

כיום תופסת חשיבות הולכת וגדלה, במפעלי התעשייה בכלל ובתעשייה הכימית בפרט, גישה האומרת כי ביקורת לטיב המוצר אינה מספקת ויש צורך במערך של הבטחת איכות. כאמור, אומצה תורה זו על-ידי קבוצת הברום, ובהדרגה קיבלו כל מפעליה את תו התקן הבינלאומי להבטחת איכות (ISO 9000). הבטחת האיכות מתחילה מתיכנון ופיתוח המוצר, מתייחסת לכל הפעילויות המלוות את המוצר עד להגעתו ללקוח ונמשכת גם לאחר מכן, כאשר מסתיים השימוש בו. זוהי מדיניות ארגונית של מניעת כשל, כאשר המטרה היא לבצע נכון בפעם הראשונה. מדיניות זו כוללת מעקב אחר כל התהליכים, איסוף נתונים ומדידת ביצועים להיוון חוזר הנחוץ לפעולה מתקנת על פי הצורך.

מערביות בקרה: מיכשור, אמצעים ונהלים למעקב צמוד אחר משתנים חשובים בתהליכים תעשייתיים ואחרים.

ביקורת טיב: בדיקה של איכות המוצר בסוף תהליך הייצור האם עומד בדרישות שנקבעו מראש, או שיש לפסול אותו.

הבטחת איכות: מכלול פעילויות שיטתי ומתוכנן, הדרוש להקניית ביטחון, שמוצר או שירות יספקו את דרישות האיכות, המשקפות את מלוא צרכי המשתמש.

כיום, עובדת כל קבוצת הברום תחת מערכת נהלים מפורטת הבוחנת כל שלב בתהליך וכל פעילות על פי מערכת אמות מידה שנקבעה מראש ומטרתה להביא לאיכות כוללת של הפעילויות ושל המוצרים. בזאת מוכללים המחקר והפיתוח, תכנון והקמת מיתקנים, רכש ציוד וחומרי גלם, (כולל ספקים) ייצור ובקרה, שימוש במכשירים ובדיקות מעבדה, אריזה, איחסון ושינוע, הדרת עובדים ולקוחות, שמירה על בטיחות ואיכות הסביבה ועוד.

שיטה זו מקטינה במידה ניכרת את פסילתם של מוצרים סופיים לאחר שהושקעו בהם עלויות גבוהות של חומרי הגלם, אנרגיה, עבודה ולכן מעלה את רווחיות המפעל. לא מחכים עד סופו של התהליך כדי לערוך ביקורת טיב ולבדוק האם

המוצר הסופי שהתקבל תואם את הדרישות, אלא מפקחים על כל שלב ומתקנים על פי הצורך; החל מהשלבים הראשונים ביותר ועד לאחרון השלבים. כמו כן מוגדרות נקודות צומת מתוכננות מראש (שערי איכות), שהן ציוני דרך בהם בוחנים את תוצאות השלב הקודם על פי אמות מידה מוגדרות. מאפיינים חשובים ביותר של גישה זו הם:

- מערכת מתועדת של ניהול איכות.
- ביקורת תהליכים סטטיסטית.
- עבודת צוות.

תפקיד מדיניות הבטחת האיכות היא הפיכתה לחלק בלתי נפרד מביצועיו ומאחריותו של כל עובד, תוך כדי הדגשה של עבודת צוות. גישה זו מעניקה לעובד יותר סמכויות בבקרת התהליכים ומדגישה את חשיבות תרומתו האישית של כל עובד. היא מעודדת יוזמה של העובד לשיפור התהליכים, להקטנת עלויות ולשיפור האיכות. מדינת ישראל מקיימת כל שנה תחרות איכות בה משתתפים חברות וארגונים רבים. בשנת 1998 זכתה קבוצת הברום במקום ראשון בתחרות זו.

בשנים האחרונות הולכת וגוברת המודעות לשמירה על הבטיחות ואיכות הסביבה בעולם וכמובן גם בארץ. עקב כך נקבעו על ידי הרשויות המתאימות תקנות שמטרתן לשמור על איכות הסביבה. תקנות אלו מדגישות במיוחד את:

- השמירה מפני פליטת עשן או פיח בכמות גבוהה.
- השמירה מפני פליטת גזים רעילים לאוויר.
- השמירה מפני הזרמת חומרים רעילים למערכת הביוב.
- השמירה מפני חילחול של חומרים רעילים למי-התהום.
- השמירה מפני הזרמת שפכים מסוכנים לנחלים, אגמים, חופים וכדומה.

- כיצד ניתן למנוע את פליטתם של גזים רעילים לאטמוספירה?
- גם בשרפת דלק נפלטת גזים רעילים לאטמוספירה. מהם גזים אלו? כיצד ניתן למנוע או להקטין את פליטתם לאטמוספירה?
- כיצד ניתן למנוע נזקים העלולים להגרם מהזרמת שפכים מסוכנים ללא בקרה?

במרץ 1997 הוענקה למפעל "תרכובות ברום" הסמכה לתקן הבינלאומי של מערכת ניהול סביבתי (ISO 14001). זהו מפעל הכימיה הראשון בארץ שקיבל אסמכה זו (על-ידי מכון התקנים הבריטי). עקרונותיה של תורה זו לניהול הסביבה מבוססים על יישום מלוא החוקים והתקנות הנוגעים לאיכות הסביבה, תוך

שיתוף פעולה מלא עם הרשויות ובמטרה למזער את הפגיעה בסביבה ואת הסכנות הבטיחותיות.

קבוצת הברום אימצה לעצמה מדיניות זו שמטרתה הגנה על העובד והסביבה:

- שמירה על איכות הסביבה בכל פעולות החברה
- הקטנת זיהום (אוויר, מים, קרקע, פסולת מסוכנת)
- שמירה על בריאות העובדים
- עמידה בחוקים ותקנות
- ניהול מוצרי החברה בכל מחזור חייהם
- שמירה על משאבים טבעיים
- מחויבות והעמדת אמצעים לניהול איכות סביבה
- הדרכה ותרגול
- בחירת ספקים¹³
- הפצת מידע ותקשורת פתוחה.

למאמץ ולהשקעה הנדרשים ביישום עקרונות אלו יש פיצוי בהתייעלות, בשיפור האיכות ובשמירה על סביבה "ירוקה" יותר ולעיתים קרובות גם בחיסכון המביא לרווח כלכלי. חשוב לזכור כי מדובר בתהליך של השתפרות מתמדת שאינו עוסק רק בתפעול ובתהליכי הייצור אלא גם מכתוב לחברה את החובה להקפיד על ייצור מוצרים איכותיים התואמים את התקנים והסטנדרטים הבינלאומיים. הטיפול נעשה בכל מוצר ולכל אורך מחזור חייו, משלב המחקר והפיתוח ועד לסילוקו לאשפה או מיחזורו בתום חייו המועילים. תורה זו נקראת ניהול חיי המוצר והיא הולכת ומתחזקת בעולם התעשייתי בכלל ובקבוצת הברום בפרט. בסעיף הבא נציג ביתר פירוט את העקרונות הכלליים העוסקים בשמירה על הבטיחות ואיכות הסביבה בתעשייה, ואת יישומם של עקרונות אלו בקבוצת הברום.



13 חלק חשוב במדיניות זו כולל מתן עדיפות לספקים ולנותני שירותים בעלי מודעות גבוהה לשמירה וקידום ערכי איכות הסביבה.

3.ד שמירה על בטיחות ואיכות הסביבה

כללי

השמירה על הבטיחות חייבת ללוות אותנו כמעט כל תחום בחיינו בבית, הספר, במקומות העבודה, במקומות הבילוי ועוד.

- במעבדת בית הספר יש כללים ברורים להתנהגות ולעבודה בטוחה. פרט מהם.
- מהם אמצעי הבטיחות הקיימים במעבדת בית הספר שלך?

השמירה על הבטיחות בתעשייה היא תנאי חשוב לפעילות תקינה לכל אורך הדרך, החל ממעבדות המחקר ועד לייצור, הובלה, שיווק ומכירות. לעיתים קרובות קשורה השמירה על הבטיחות לשמירה על איכות הסביבה. תקלה או אסון עלולים לסכן, לא רק את חיי העובדים, אלא גם לגרום נזק לסביבה.

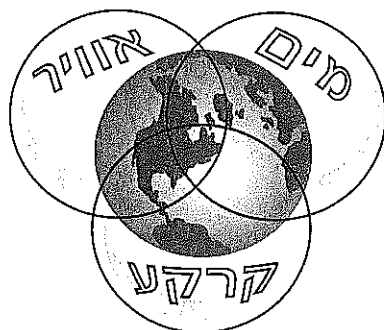
בתהליכים רבים שמבצעים במעבדה קיימת סכנה של התחממות יתר, פיצוץ, דליפה וכד'. יחד עם זאת, כאשר עובדים עם כמויות קטנות של חומרים, קל יותר לשמור על תנאים המבטיחים בטיחות מוחלטת. בכל ניסוי יש לשמור על אמצעי בטיחות מתאימים ולכך מחויבים כל עובדי המעבדה או המיתקנים הניסויים. כאשר נוצרים בתהליך מעבדתי חומרים רעילים ניתן בדרך כלל לפתור את בעיית הבטיחות בקלות על-ידי ניקוז במינדף (במידה ומדובר בגזים) או בדרכים אחרות (במידה ומדובר בנוזלים או מוצקים). כך למשל ניתן לתכנן תגובה בין החומר המסוכן לבין חומר מנטרל מתאים ולהפוך אותו לתוצר לא מסוכן מבלי להתחשב במחירו של החומר המנטרל או בגורמים אחרים, כמו נוחות הטיפול וכד'. השמירה על הבטיחות בתעשייה מקיפה נושאים כמו:

- בטיחות מבנים, מיתקנים וציוד (למניעת שרפות, סדקים, התמוטטות וכד')
- בטיחות הטיפול בחומרים מסוכנים
- בטיחות תהליכים
- בטיחות וגהות¹⁴ העובדים במיתקנים

לכל אלו עשויה להיות השפעה ישירה על איכות הסביבה. צינור סדוק ממנו דולף חומר מסוכן עלול לגרום לזיהום האוויר, הקרקע או אפילו לסכן את מי התהום. פסולת מסוכנת שלא טופלה כראוי עלולה לגרום לנזק מיידי, כמו פיצוץ ושרפה, או לנזק ארוך טווח, כמו הרעלת מקורות מים, פגיעה בריאותית בתושבים ועוד.

14 גהות - שמירה על בריאות ומניעת מחלות.

השמירה על הבטיחות מצד אחד ועל איכות הסביבה מצד שני תשמור על משאבי הטבע, תמנע זיהום האוויר, המים והקרקע ותשמור מפני פגיעה באדם ובסביבתו.



בתעשייה

השמירה על הבטיחות ואיכות הסביבה בתעשייה מתייחסת לכל תחומי הפעילות:

מחקר ופיתוח

תכנון, הקמה והרצה

ייצור

אחסון (חומרי גלם, חומרי עזר ומוצרים)

הובלה, שינוע והפצה

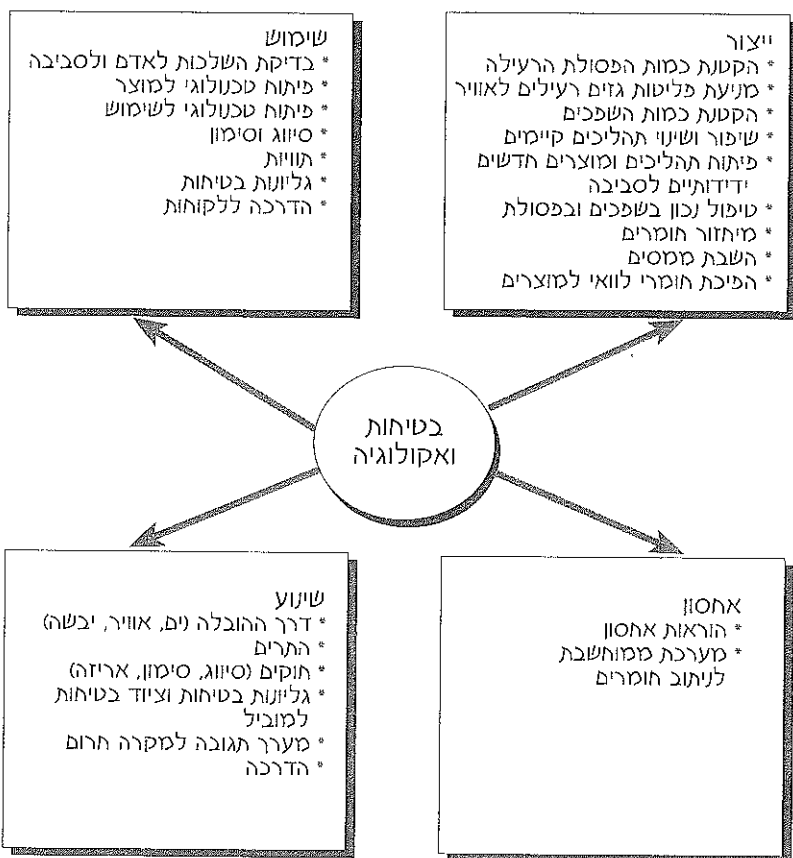
שימוש במוצרים

טיפול בגזי פליטה, שפכים ופסולת מוצקה (לרבות האריזות של המוצרים השונים).

בכל אחד מתחומי הפעילות שצוינו קודם יש לנקוט במכלול דרכים, אשר יחד יתנו את התשובה המתאימה:

- סקר סיכונים.
- נחלי טיפול/עבודה/שימוש מתאימים לכל חומר או תהליך.
- הדרכת עובדים/לקוחות.
- שלטי אזהרה.
- אמצעי מגן.
- הערכות למקרי חרום.

כפי שראינו בסעיף הקודם הבטחת האיכות ומערכת ניהול הסביבה מתייחסים לבטיחות ולאיכות הסביבה כבר משלבי המחקר והפיתוח ומלווים אותם גם בשלבי התכנון, ההקמה וההרצה. זוהי למעשה פעילות בלתי פוסקת המלווה את כל שלבי הייצור, האחסון, השינוע והשימוש ומנסה לשפר את עצמה ללא לאות. בסכימה הבאה מוצגים הנושאים העיקריים המטופלים במסגרת מדיניות השמירה על הבטיחות והסביבה (אקולוגיה).



כאמור, המטרה הינה להכיר את הסיכונים, למצוא את הפתרונות המתאימים ועל-ידי כך להקטין ככל האפשר את מספר התקלות ואת הנזקים. יחד עם זאת אין להתעלם מהעובדה שבכל מפעל מתרחשות לעיתים תקלות בלתי צפויות והמפעל חייב להיות ערוך לכך. במפעלי הייצור קיימות מערכות שונות שמטרתן שמירה על הבטיחות ואיכות הסביבה:

- מערכות ניטרול לחומרים מסוכנים.
- מערכות מרכזיות לנייקה, ספיגה וניטרול של גזים מסוכנים.
- מערכות ניטור אוויר ומדידה רציפה של גזים מסוכנים.
- מערכות גילוי והתרעה משוכללות.
- מערכות כיבוי אש.
- ניידת חרום.

קיימת מערכת שלימה של בעלי תפקידים הדואגת לפעולות חינוך והדרכה שוטפות של העובדים, לתרגול נהלי חרום ולזמינותם של אמצעים מתאימים לטיפול במקרים של תקלות. כמו כן קיימים במפעל צוותי חרום המאומנים לפעול במהירות ובמיומנות במקרה של תקלה או תאונה.

בעת סיור במפעל ניתן להבחין בשלטי אזהרה המורים על דרישה לנקיטת אמצעי זהירות. שלטי האזהרה באים להזכיר לעובדים מהן הסכנות הצפויות ואלו אמצעי זהירות שגורתיים עליהם לנקוט (למשל: חבישת קסדה, נעליים גבוהות וכדומה). כמו כן מפוזרים בשטח המפעל מערכות כיבוי אש, מכלים או שקים של חומרים "מנטרלים", מיתקנים לשטיפת עיניים, מקלחות חרום וכדומה.

אמצעי הכיבוי וחומרי הניטרול חייבים להיות זמינים בכל מקום המועד לסכנה. שיטות הכיבוי והניטרול צריכות להיות מותאמות לטיב החומרים ולסביבתם.

כיום, לא מאשרים בקבוצת הברום תהליך ללא פתרונות כוללים לכל הבעיות האקולוגיות הכרוכות בו. כל אחד מהזרמים היוצאים מכל מיתקן (המוצר, תוצרי הלוואי, חומרי העזר וכל חומרי הפסולת למיניהם) חייבים לקבל טיפול מתאים, כך שלא יוכלו לפגוע בסביבה או באדם.



ציוד כיבוי אש במפעל

בחלק מהמיתקנים הצליחו לפתח תהליכים המפרידים את החומרים הבעיתיים מזרמי השפכים והופכים אותם לתוצרים שאפשר להשתמש בהם או למכור אותם (כמוצר או כחומר גלם למפעל אחר) וכך להגדיל את הרווחים. במיתקנים אחרים פותחו שיטות להשתמש שימוש חוזר בממסים אורגניים, על-ידי שימוש במערכות פחם פעיל הסופח את החומרים מזהמים ומשחרר ממס נקי לשימוש חוזר. כמו כן נבנו מיגדלי ספיגה למניעת פליטות גזים ולהשבת חומרים. עם ההתפתחות בנושאים הקשורים לשמירה על איכות הסביבה, נגלה יותר מקרים בהם טיפול נכון עשוי גם להביא לרווח כספי.

הרווח הינו כפול: רווח כלכלי ורווח סביבתי

יחד עם זאת יש לזכור כי הפתרונות הבטיחותיים והאקולוגיים חייבים להתאים לשימוש בקנה מידה גדול ולא להיות יקרים מדי. עלות כספית גבוהה מדי עלולה לגרום לכך שהתהליך כולו לא יהיה כדאי. זהו אתגר חשוב והכרחי לאנשי התעשייה הכימית, האמורים מצד אחד לשמור על הסביבה ולקיים את החוקים והתקנות, אך מצד שני לאפשר למפעל להמשיך ולייצר ויחד עם זאת לא להפסיד.

ניסוי 3: הפרדה עם פחם פעיל

- א. הכן תמיסה מרוכזת של מיץ פטל על ידי ערבוב של 25 מ"ל מים עם 25 מ"ל תרכיז מיץ פטל. העבר 10 מ"ל מתמיסה זו למבחנה והשאר אותה לביקורת.
- ב. הכן נייר סינון בגודל המתאים ושים אותו במשפך סינון. העמד את המשפך מעל כוס כימית או בקבוק קוני.
- ג. פזר במרכז נייר הסינון כפית אחת של פחם פעיל (Activated carbon).
- ג. שפוך דרך נייר הסינון את התמיסה שהכנת.

- רשום את תצפיותיך ופרש אותן.
- האם ישנן תצפיות שאינך יכול עדיין לפרש? מהן?
- מהו העקרון על פיו פעלה מערכת זו?

ד.4 רעילות (טוקסיקולוגיה) ורישוי חומרים

רעילות (טוקסיקולוגיה): מדע המתייחס לרעילותם של חומרים לאדם, לצמח ולבעלי חיים. זהו מדע המשלב בתוכו מספר תחומים - כימיה, מערכות ביולוגיות וגם תהליכים פיסיולוגיים וביוכימיים בבעלי חיים ובגוף האדם.

שנים רבות ידועה רעילותם של ההלוגנים כולם ושל אחדות ממתכותיהם. ידוע היה כי חומרים אלו עלולים לגרום לנזקים חמורים לצמחים, לבעלי חיים, לאורגניזמים קטנים, כמו אצות וחיידקים ואף לאדם.

גז הכלור הוא דוגמה לחומר, אשר רעילותו ותגובתו עם רקמות חיות נוצלה לרעה בימי מלחמת העולם הראשונה, כאשר שימש חומר לחימה קטלני ביותר. יחד עם זאת מנוצלות אותן תכונות של הכלור לשימושים חשובים וחייוניים לאדם, כמו חיטוי מים לשתייה, לרחצה, לטיהור שפכים ועוד. לשימוש זה של הכלור חשיבות רבה ביותר ברפואה המונעת ולעיתים אף להצלת חיי אדם (פרוט על כך יבוא בפרק ו' בו יש הרחבה על חומרי חיטוי למים וחשיבותם).

חלק מהמוצרים, חומרי הגלם וחומרי הביניים בחברת הברום הם חומרים הידועים כרעילים או מסוכנים. בטבלה הבאה רשומים נתונים לגבי רעילותם של הברום ומספר ממתכותיו:

החומר	נוסחה	תופעות המתרחשות בחשיפה לחומר
ברום	Br_2	ברום נוזלי תוקף במהירות את העור ורקמות אחרות, גורם לגירוי וכוויות הנרפאות באיטיות. גם ריכוז נמוך יחסית של אדי ברום גורם לגירוי חריף ומכאיב במערכת הנשימה, קשיים בנשימה, כאבי ראש, סחרחורות, דימום באף, שיעול, הקאה, שלשולים וכד'.
מימן ברומי	HBr	הגז מימן ברומי גורם לנזקי בראייה, כוויות בעור, שיעול, קוצר נשימה, בצקת בריאות, נזקים ברקמות הריריות של מערכת העיכול ושלשולים. תמיסה מרוכזת של מימן ברומי גורמת במגע עם העור לכוויות קשות ולשאר הנזקים הנזכרים לעיל כתוצאה מהנדיפות הגבוהה של המימן הברומי.
ברומו מתאן (מתיל ברומיד)	CH_3Br	רעיל במיוחד בנשימה. אפילו בריכוזים נמוכים גורם הגז לנזקים חמורים במערכת הנשימה ולכוויות ברקמות השונות. כן עלול לגרום לנזקים בראייה, במערכת העצבים, בכליות ובמערכת הנשימה.
2,1 די ברומו אתאן (EDB)	$\text{CH}_2\text{BrCH}_2\text{Br}$	רעיל בנשימה, בבליעה, במגע עם העיניים והעור. יכול לחדור דרך העור. גם האדים וגם הנוזל רעילים ביותר וגורמים להרס רקמות, הקאות, עילפון וסחרחורות. גורם נזק לכבד ולכליות ובעל השפעה מצטברת ומוטגנית ¹⁵ .

¹⁵ מוטגני - גורם לשינויים בחומר התורשתי

אם נתבונן בטבלה זו נוכל לראות כי רעילות יכולה להתייחס להיבטים שונים: נשימה, בליעה, מגע עם העור, מגע עם העיניים ועוד. רעילות בהיבט אחד אינה מחייבת בהכרח רעילות בהיבט אחר. כך לדוגמה, חומר שהוא רעיל בבליעה אינו בהכרח רעיל במגע עם העור.

"רעילות" של חומר אינה מושג מוחלט, והיא יחסית לכמות ולאופן השימוש בו. אין חומר אשר ביחס לכל שימוש בו אינו רעיל או מסוכן. לכל דבר בעולם יש שימוש נכון ויש שימוש לא נכון. ישנן דרכים מסוכנות או דרכים בטוחות לעבוד עם חומרים או להשתמש בהם. כמו כן חשוב לזכור, כי רעילות אינה תלויה רק בכמות החומר אלא גם במשך זמן החשיפה אליו (ראה הגדרות בפרק ג' עמ' 84). גם חומרים הנראים לכאורה "תמימים" לחלוטין עלולים להיות רעילים בשימוש לא נכון. תוכל למצוא לכך דוגמאות למכביר.

לכאורה ניתן לחשוב כי עדיף לא לייצר חומרים רעילים. יש בעולם גופים הטוענים זאת. אם כך היה, הרי לא היתה האנושות נהנית מהשגים רבים של המדע והטכנולוגיה ובעיות קשות שהאנושות סבלה מהן היו ממשיכות להטרידה ללא פתרון. אפילו בתחומים שנראים לנו כמובנים מאליהם היינו צריכים לסגת אחורה ולוותר על נוחיות, איכות חיים, בריאות, ועוד ועוד.

דוגמות לכך קיימות כמעט בכל תחום: ברפואה, בחקלאות, בתעשייה, בתקשורת ועוד. כך למשל, מחלות אשר גרמו למגפות קטלניות הודברו עקב שימוש בתרופות שרבות מהן מורכבות מחומרים רעילים. האם נפסיק לייצר אותן או להשתמש בהן? ברור לנו שלא נוכל לעשות זאת. המדע והרפואה עוזרים למצוא את ההתאמה והמינון הדרושים לשימוש בתרופות, כדי שהשפעתן המזיקה תהייה מזערית. כך למשל תרופות רבות למחלת הסרטן הינן רעילות ביותר. יחד עם זאת הצילו תרופות אלו חייהם של חולים רבים. האם נוכל לוותר עליהן?

דוגמא נוספת היא השימוש בחומרי הדברה. רעילותם של חומרים אלה פועלת כנגד מזיקים בחקלאות, אך במינון גבוה וללא נקיטת אמצעי זהירות מתאימים עלולה לפגוע באדם ובסביבה.

דון בקבוצה בנושא: בעד ונגד השימוש בחומרי הדברה.
התייחס לנקודות הבאות:

- יתרונות השימוש בחומרי הדברה?
- סכנות השימוש בחומרי הדברה?
- כיצד, לדעתך, יראה העולם ללא שימוש בחומרי הדברה?
- מי, לדעתך, יהיו הסובלים העיקריים מאי-השימוש בחומרי הדברה?

את בעיית הרעילות והבטיחות יש לפתור לא על-ידי הפסקת השימוש בחומרים חיוניים, שאין להם תחליף, אלא על-ידי הכרת הסיכונים ומציאת פתרונות מתאימים להקטנתם.

כל טיפול, ייצור או שימוש בחומרים רעילים חייב להיות תחת פיקוח קפדני בהתאם לכללי הבטיחות, הגהות והשמירה על איכות הסביבה.

מה גורם לחומר מסוים להיות רעיל ולחומר אחר לא? מהן הסיבות בגללן תרכובת של הלוגן מסויים היא רעילה ותרכובת אחרת פחות רעילה, או אינה רעילה כלל? שאלות אלה ואחרות העסיקו מדענים רבים מאז ומעולם. לחלק משאלות אלו נמצא הסבר וחלקן עדיין לוט בערפל.

יש הסוברים כי הרעילות של תרכובות הלוגן שונות תלויה בגודל אטום ההלוגן ובחוזק הקשרים שהוא יוצר.

- כיצד עשוי, לדעתך, להשפיע גודל אטום ההלוגן על חוזק הקשר שלו עם אטומים אחרים? דון למשל בקשר עם אטומי פחמן.

- מחקרים הוכיחו כי הרעילות עולה ככל שאטום ההלוגן גדול יותר. נסה למצוא לכך הסבר.

תרכובות המכילות קשרי C-F, הן יציבות ולא נוטות להשתתף בתגובות כימיות וככל שמספר קשרי C-F גדול יותר יש ירידה ברעילות. תרכובות של כלור, כגון CH_2Cl_2 , CHCl_3 ו- CH_3Cl , המכילות קשרי C-Cl, ידועות כרעילות. תרכובות דומות של ברום, המכילות קשרי C-Br, אף עולות עליהן ברעילות. דוגמה לכך הם מתיל ברומיד, CH_3Br , ואתילן דו-ברומי, $\text{CH}_2\text{BrCH}_2\text{Br}$, המשמשים כחומרים קוטלי מזיקים. רעילותן של תרכובות יוד גדולה אף יותר מרעילותן של תרכובות הברום, אך השימוש בהן לא שכיח בגלל תפוצתו הנמוכה של היוד ומחירו הגבוה יחסית להלוגנים האחרים.

ניתן להוריד את רעילותן של תרכובות ברום או כלור על-ידי שילוב של אטומי פלואור הגורמים לייצוב הקשר C-Br ו- C-Cl ואף לייצוב המולקולה כולה. כך למשל ניתן להשוות בין CH_3Br , אשר הינו רעיל ביותר, לבין החומר CF_3Br שהוא יציב, אינו רעיל ומשמש לכיבוי שריפות. דוגמות נוספות הן תרכובות מסוג הפראונים כמו CHClF_2 , CCl_2F_2 , שאינן רעילות ושימשו עד לאחרונה למכשירי קירור (מזגנים ומקררים) ולמכלי תרסיס. ליציבות זו של תרכובות הפלואור יש גם השפעות שליליות. לאחרונה הסתבר כי שימוש מוגבר בפראונים פוגע בשכבת האוזון האטמוספירית. מכיוון שמולקולות הפראונים מצטברות ואינן מתפרקות, הן נשארות באטמוספירה ופגיעתן בשכבת האוזון עשויה להיות ממושכת. כיום נאסר השימוש בחומרים אלה במדינות רבות וקיימת מגמה למצוא להם תחליפים ולאסור את השימוש בהם.

החל מאמצע שנות ה-70 החלה התעוררות רבה בעולם בנושאי בריאות ואיכות הסביבה והמודעות לבעיית הרעילות של חומרים שונים הולכת וגדלה. במדינות רבות החלו לחוקק חוקים ותקנות בנושאים אלה, אשר הפכו לחלק בלתי נפרד מההרשאה להשתמש בחומרים המוגדרים כרעילים או מסוכנים.

רישום: תהליך של הכנסת חומר לרשימת החומרים הניתנים לייצור, שיווק או שימוש על-ידי הרשות המוסמכת.
רישוי: מתן אישורים על-ידי הרשות המוסמכת לשימוש מסוים בחומר רעיל.

בקבוצת הברום הוקם אגף מיוחד, העוסק בנושאי הרעילות, הבטיחות, הבריאות ואיכות הסביבה והוא אחראי על המוצרים לאורך כל מחזור חייהם: איסוף מידע על כל חומר בכל אחד משלבי הפיתוח, בעת השימוש וגם לאחריו, כאשר המוצר הופך למרכיב בפסולת. לשם כך נבנתה מערכת מקצועית שמזהה את החומרים ותכונותיהם ונותנת לזה ביטוי בהוראות מתאימות לעבודה בטיחותית וטיפול מתאים לכל אורך הדרך. זהו למעשה מערך כולל של ניהול חיי המוצר.

איך לומדים על חומר חדש?

קודם כל סוקרים את הספרות הקיימת ואת הפטנטים הרשומים. בשלב מתקדם יותר, כאשר מגיעים לאופטימיזציה של התהליך והמוצר, מעבירים את החומר לבדיקות במעבדות שונות ברחבי העולם, כדי לקבל תמונה על תכונותיו הביולוגיות והכימיות. במעבדות בודקים אם החומר רעיל בצורה חריפה, האם הוא מאכל, האם עלול החומר לגרום לשינוי גנטי או מסרטן. כמו כן, בודקים גם רעילות לטווח ארוך, בכדי לברר מה תהייה השפעת החומר על עובדים הנחשפים לכמויות קטנות במשך זמן ארוך. את הבדיקות הללו מבצעים, בהתאם לסטנדרטים בינלאומיים המקובלים.

כשנאסף מידע מתאים מגדירים את החומר על פי תכונותיו ורמת הסיכון שלו ומכינים תעודת זהות של החומר, אשר בהתאם לה נקבעים נהלי עבודה ובטיחות.

בדיקות רעילות ראשוניות לפיתוח מוצר חדש

Ingestion (Acute oral LD50)	רעילות חריפה בהאכלה	*
Inhalation	רעילות בשאיפה	*
Skin irritation	גירוי עור	*
Eye irritation	גירוי עיניים	*
Dermal sensitization	אלרגיות	*
Mutagenity	מוטגניות	*

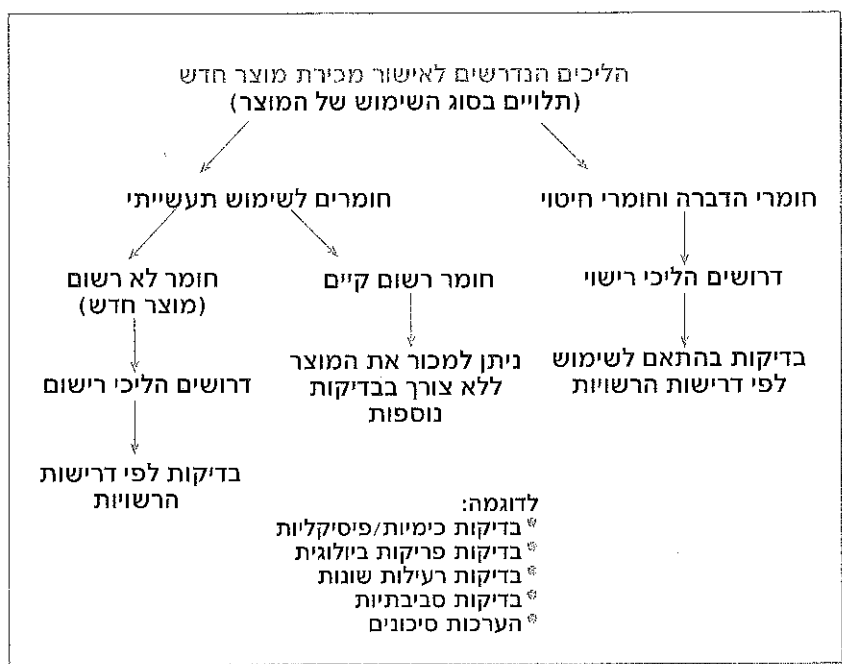
כאשר מגיע החומר לשלב הייצור במפעל, כבר יש עליו מידע הכולל הנחיות בטיחות

מפורטות המגניות על העובד, וכן מידע על השפעתו של החומר על הסביבה. בשלב האחרון, בו יוצא החומר מהמפעל ללקוח, יש לתת מענה גם על דרישות הרשויות השונות לגבי אריזת החומרים, סימונם הובלתם והשימוש בהם.

ההליכים הנדרשים לאישור מוצרי החברה מתחלקים לשתי קבוצות:

- חומרים חקלאיים (חומרי הדברה) וביוצידים (חומרי חיטוי)
- חומרים לשימוש תעשייתי

חומרי ההדברה והחיטוי, שהם חומרים בעלי פעילות ביולוגית, דורשים רישוי ואילו החומרים לשימוש תעשייתי נחלקים לשנים: מוצרים רשומים ומוצרים שאינם רשומים. מוצרים רשומים לא דורשים רישוי ואילו חומרים לא רשומים דורשים הליכי רישוי עד לקבלת אישור מכירה.



נושא הבטיחות והגהות התעסוקתית כולל, בין היתר, הכרת החוקים הקשורים בבטיחות והגנה על העובד ועל הלקוח המשתמש, הכנת גליונות בטיחות עבור מוצרי החברה והכנת הוראות לטיפול בנפגעים. כמו כן מתמחים באגף זה בחוקים הבינלאומיים בנושאים השונים של איכות הסביבה, כמו למשל חוקי ההובלה והאריזה, תוויות וסימונים בינלאומיים. גליונות הבטיחות כוללים מידע רב והם משרתים את עובדי החברה ולקוחותיה. בעמוד הבא תוכלו לראות את הנושאים המופיעים בגליונות הבטיחות.

גיליונות בטיחות/ למוצר * (SDS)

מיגון אישי/ צימצום חשיפה

- * גבולות החשיפה המותרים
- * דרישות איוורור
- * ציוד מגן אש
- * כללי היגיינה תעשייתית

תכונות כימיות ופיסיקליות

- * מופע
- * נקודת היתוך
- * נקודת רתיחה
- * לחץ אדים
- * לחץ יחסי של הגז
- * מסיסות
- * צפיפות
- * פירוק תרמי

יציבות ופעילות (ריאקטיביות)

- * יציבות
- * חומרים לא תואמים
- * תנאים מסוכנים
- * תוצרי פירוק מסוכנים
- * פילמור מסוכן

מידע על רעילות (מידע

טוקסיקולוגי)

- * נתוני רעילות בחיות מעבדה
- * תופעות של חשיפת היתר
- * רעילות כרונית ומסרטנת
- (בחשיפה ממושכת)
- * מוטגניות

מידע אקולוגי

- * רעילות ליצורים החיים בסביבה
- * פריקות כימית בסביבה
- * פריקות ביולוגית בסביבה
- * השפעות על הסביבה (אוויר, קרקע ומים)

המלצות לסילוק פסולת

שינוע

- * הובלה ימית
- * הובלה אווירית
- * הובלה יבשתית

חקיקה ותקינה

זהות החומר והיצרן

- * שם כימי
- * נוסחה
- * מספר CAS**
- * משפחה כימית
- * משקל מולקולרי
- * סוג החומר והשימוש בו
- * זיהוי החברה המייצרת
- * כתובת היצרן
- * טלפון למקרי חרום

זיהוי המרכיבים

- * מרכיבים מסוכנים
- * מרכיבים אחרים

סיכונים עיקריים

- * סכנות עיקריות
- * השפעה בריאותית

עזרה ראשונה

- * מגע עיניים
- * מגע עור
- * שאיפה
- * בליעה

דרכי טיפול באש

- * נקודת הבזקה
- * נקודת התלקחות
- * אמצעים לכיבוי
- * תחום דליקות/פצצות
- * דרכי הטיפול בשריפה
- * סכנות בלתי שגריות
- לאש ופיצוץ

נהלים למקרי פליטה או שפיכה

- * אמצעי זהירות אישיים
- * טיפול בשפך/דליפה

הוראות טיפול ואיסון

- * טיפול שוטף
- * איסון

* באירופה נקראים גליונות אלו Safety Data Sheets-SDS. בארה"ב ובארץ מקובל

להשתמש בשם (MSDS) Material Safety Data.

** מספר CAS: Chemical Abstract Number

היזעתי?

ב-1991 הוקמה בבית החולים סורוקה יחידה לטוקסיקולוגיה קלינית. המספקת שירות מיוחד לקבוצת הברום ולמפעלים אחרים במרחב הנגב.¹⁵ מטרתה של היחידה היא בראש ובראשונה, דאגה לבריאות העובד, בד בבד עם פיתוח מרכז טוקסיקולוגי באזור בו קיימים מפעלים תעשייתיים רבים.

כל תרכובת חדשה המיוצרת במפעלים הופכת לפרויקט עבור היחידה לטוקסיקולוגיה קלינית. היחידה בודקת את כל החיבטים הרפואיים של חשיפת עובדים לחומרי גלם, ממסים, מוצרי ביניים ומוצר סופי המעורבים בתהליך הייצור. מכינים דפי המלצות לטיפול רפואי המיועדים, בעת הצורך, עבור הצוות המטפל בשטח ובבית החולים. בכך נחסך זמן יקר הכרוך באיתור מידע על החומרים והשפעתם על העובד.

אחת מתפקידיה החשובים של היחידה לטוקסיקולוגיה קלינית היא רפואה מונעת. במסגרת זו עובד כל עובד בדיקה רפואית לפחות פעם אחת בשנה תפקיד נוסף, ולא פחות חשוב, הוא הדרכת העובדים על החומרים איתם הם עובדים והשפעותיהם הבריאותיות, כדי להגביר את מודעות העובדים ולהביא אותם להכרה בצורך החיוני של שמירה על חוראות הבטיחות הנדרשות.

**גהות: כללי שמירת הבריאות ומניעת מחלות
בריאות תעסוקתית: שמירה על הבריאות במסגרת מקומות העבודה**

בקבוצת הברום, כמו במפעלים מתקדמים אחרים בעולם, קיימת מגמה של מעבר מהתייחסות לסכנות (Hazards) להתייחסות לסכונים (Risks). חומר שתכונותיו ידועות, גם אם הוא מסוכן, ניתן להשתמש בו בצורה נכונה כאשר יודעים את הסיכונים. פותחו דרכים להכנת מודלים של הערכת סיכונים ועל פיהם מפתחים שיטות ואמצעים להגברת הבטיחות. היום מדברים פחות על טוקסיקולוגיה ועוברים לתפיסה כוללת של האקולוגיה המתקשרת לניהול חיי המוצר מייזום הרעיון עד לסוף חייו; מהבעיות המלוות את ייצור החומר ועד התמודדות של המשתמש באריזה, בשאריות החומר או בשפכים.

**סכונים (Risks): ההסתברות שיגרם נזק בתנאים מסויימים.
סכנות (Hazards): פוטנציאל החומר לגרום נזק בתנאים מסויימים.
בטיחות (Safety): האמצעים והתנאים שנקטים כדי למזער את הסיכונים.**

15 בבית החולים רמב"ם בחיפה קיים מרכז ארצי להרעלות.

5.ד טיפול בפסולת תעשייתית

כל"י

חקיקה חדשה והתארגנות המועצה המקומית רמת-חובב בשיתוף עם מפעלי התעשייה ברמת-חובב הביאה להקמתו של מפעל משותף המטפל באופן ביולוגי בשפכים המכילים חומרים אורגניים. המפעל הוקם בשטח המועצה המקומית התעשייתית רמת-חובב ויופעל על ידה. באמצעות מפעל זה תוקטן כמות החומר האורגני בשפכי התעשייה וכמו כן יופחתו המטרדים והסיכונים באיחסון השפכים האורגניים בבריכות פתוחות. פיתרון זה מחייב את כל המפעלים באזור ובאמצעותו ניתן יהיה להשיג יחד עם טיפול יעיל ומקצועי גם חיסכון בעלויות. לפני הזרמת השפכים למפעל המרכזי חייב כל מפעל לבצע בנפרד **טיפול מקדים** בתחמומו. טיפול זה נעשה כדי להביא את השפכים לרמת איכות מסוימת שמתאימה לטיפול הביולוגי המשותף.

במפעל תרכובות ברום מתבצע הטיפול המקדים (פיזיקלי וכימי) במיתקן מיוחד והוא כולל מספר שלבים:

- הבאת השפכים למצב אחיד (הומוגני)
- הבאת השפכים לניטרליות
- הסמכה ושיקוע מוצקים כבדים
- שיקוע חלקיקי מוצקים מרחפים
- סינון

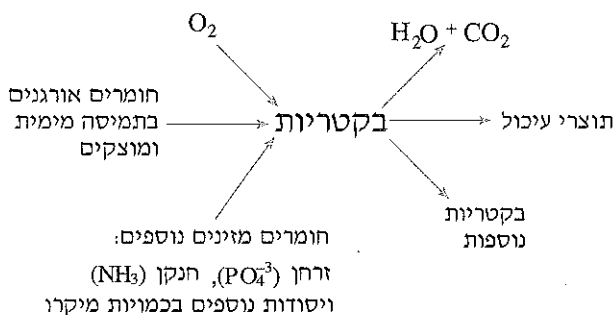
ב"תרכובות ברום" נוקטים בשיטה של "בידוד" הבעיות: כל מיתקן מטפל בשפכים היוצאים ממנו, עד להבאתם למצב בו הם יכולים להצטרף לזרם הכללי של שפכי המפעל להמשך טיפול (כפי שנפרט בהמשך). בסופו של התהליך מקבלים שפכים מדוללים ובוצה. הבוצה מסולקת על פי התקנות למפעל לעיבוד פסולת תעשייתית מסוכנת ברמת-חובב¹⁶ להמשך טיפול ולאחר מכן לשריפה. השפכים המדוללים מוזרמים בעזרת כח הכבידה (גרביטציה) אל המפעל לטיפול ביולוגי. ההזרמה נעשית באמצעות צנרת העשויה מחומר פלסטי עמיד ומוגנת מפני דליפות. כניסת השפכים למפעל נעשית דרך מיתקן בו מורחקים המרכיבים האורגניים הנדיפים המהווים את הגורם העיקרי למטרדי ריח. משם מנותבים השפכים בעזרת משאבות למקומות שונים, בהתאם לאופיים ובהתאם לשלב הטיפול.

16 לקריאה נוספת: טיפול בפסולת תעשייתית מסוכנת, מאת: שושנה מייזנברג מירי קסנר, אתי רוזנטל, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, רחובות.

השפכים, שהגיעו לאחר שעברו תהליכי הכנה מוקדמת במפעלים המייצרים אותם, עוברים, כאמור, בשלב ראשון **טיפול לסילוק חומרים נדיפים**. טיפול זה נעשה במכל מיוחד באמצעות זרם אוויר. האוויר היוצא מהמכל כשהוא נושא עימו את החומר האורגני הנדיף מוזרם לתוך מכלי הטיפול הביולוגי ומנוצל אחר כך כמקור לחמצן עבור תהליך זה. החומרים האורגניים הנדיפים נספחים לתוך הנוזל במכלים ומצטרפים למעשה לשאר החומרים האורגניים העוברים טיפול ביולוגי. לאחר סילוק החומרים הנדיפים עוברים השפכים לבריכת ביניים, (בריכת איזון) בה הם שוהים כ-80 יום לפני המשך טיפול. תוך כדי פרק זמן זה שוקע עודף המוצקים המרחפים בשפכים והשפעים מגיעים למצב אחיד (הומוגני).

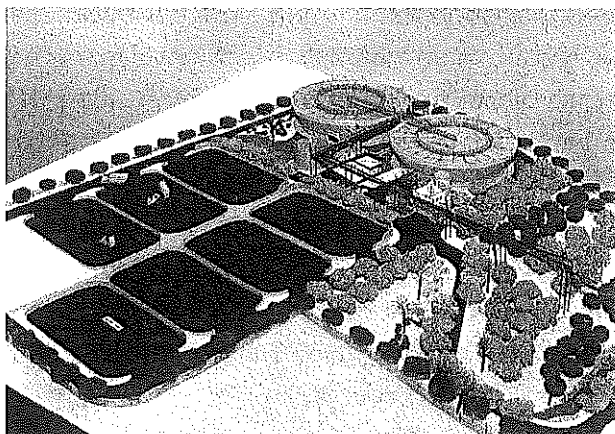
הטיפול עצמו מבוסס על תהליך אווירי (אירובי) בו קיימת הזנה רציפה של השפכים מבריכת הביניים למכלים בהם מתבצע ה**טיפול הביולוגי**. המיתקן לטיפול ביולוגי כולל שני מכלים ענקיים (שנפחם כ- 8000 מ"ק) בהם נעשה הטיפול הביולוגי וכמו כן חדרי מעבדה, חדרי בקרה ומיתקן ניסיוני לבדיקה שוטפת של התהליך.

הטיפול הביולוגי מבוסס על תהליך ביוכימי שבו בקטריות ייחודיות מפרקות את החומרים האורגניים בעזרת חמצן ומנצלות אותם כמקור פחמן לצרכי הזנה והתרבות. התהליך מתבצע בסביבה מימית עשירה בחומרים מזינים נוספים הכוללים חנקן וזרחן ויסודות נוספים בכמויות מיקרו, תוך שמירה על תנאי pH וטמפרטורה מתאימים.



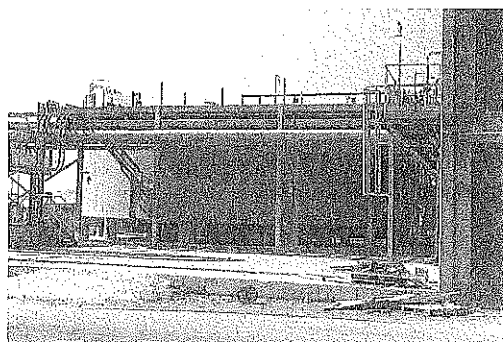
17 ניתן למצוא מידע נוסף באתר האינטרנט של המועצה האזורית רמת חובב:

לאחר הטיפול מועברים השפכים לבריכות אידוי שנבנו במיוחד כדי שיהיו אטומות לחלוט. בתכנון עתידי לפתח תהליכי התפלה שיאפשרו למחזור את המים לשימוש תהליכי במפעלים. הבוצה הביולוגית העודפת עוברת לשדות יבוש ואחר כך להמשך טיפול. קיימות תוכניות לפתח תהליך שיאפשר את שימושה כדשן.



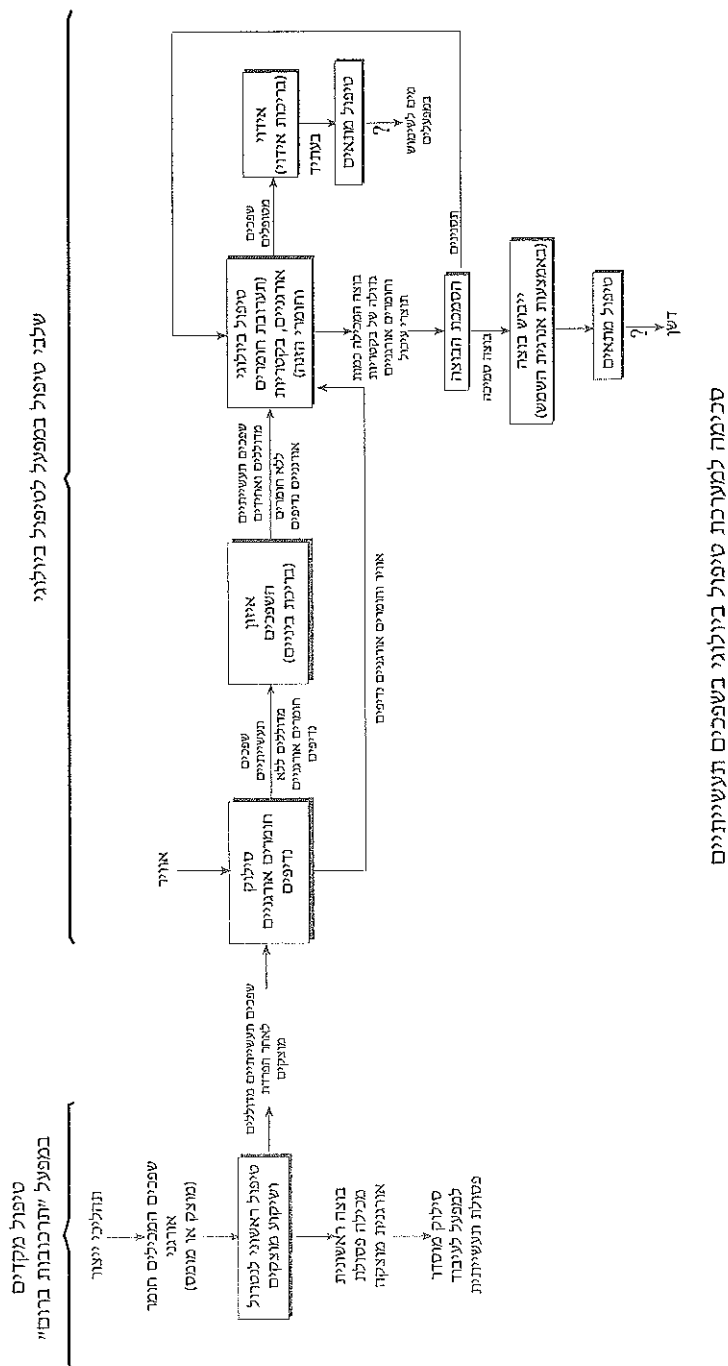
צילום דגם של המפעל לטיפול ביולוגי במועצה המקומית רמת-חובב

כדי להבטיח טיפול רציף ותקין בשפכים של "תרכובות ברום" הוקם כבר ב-1995 במפעל "תרכובות ברום" מיתקן חצי חרושתי שהוא למעשה דגם מוקטן של המיתקן המרכזי לטיפול ביולוגי. באמצעות מיתקן ניסיוני זה מבצעים הערכה רציפה ומבוקרת של השפעת הטיפול הביולוגי על שפכי המפעל הנובעים משינוי מחזורי הייצור במפעל, הפסקות בתהליכי ייצור קיימים, כניסה לייצור תהליכים חדשים והקמתם של מיתקני ייצור חדשים הגורמים לשינויים בזרמי השפכים. בפרויקט זה משתתפות גם מעבדות אוניברסיטת בן-גוריון בשדה בוקר המבצעות באופן שוטף בדיקות ודגימות הנלקחות משלבים שונים הטיפול הניסיוני.



מיתקן לטיפול מקדים (פיזיקלי וכימי) בשפכי "תרכובות ברום"

הסכימה הבאה מראה לנו את הטיפול הכולל הנעשה בשפכים התעשייתיים:



מושגים של מדת בפרק ד

גימלון: הגדלת הכמויות והציוד במעבר מהפקה מעבדתית לייצור תעשייתי.

Work-up: מכלול התהליכים הנעשים לאחר סיום התגובה כדי לקבל כמות מרבית של התוצר הרצוי בדרגת הניקיון הנדרשת.

שלבי גימלון:

ניסוי במעבדה

מיתקן ניסוי (bench scale)

מיתקן חצי חרושתי (pilot)

מיתקן תעשייתי

התכנות תהליך כלשהו נבחנת על פי שתי אמות מידה של בקרה:

בקרה תרמודינמית: קשורה בספונטניות התהליך ונקבעת לפי ערכו של

השינוי באנרגיה החופשית של התהליך בטמפרטורה נתונה.

בקרה קינטית: קשורה בשיקולים של מהירות תגובה ונקבעת לפי ערכו

של השינוי באנרגיה החופשית של השפועול בטמפרטורה נתונה.

17: חומר שמוסיפים לתגובה כדי להגדיל את מהירותה

אנרגיה חופשית של שפועול: האנרגיה המזערית הדרושה על מנת להביא

את המגיבים למצב מעבר המאפשר קבלת תוצרים.

הרעלת 18: ירידת יעילותו של הזרז עקב סיפוח חומרים לא רצויים לשטח

הפנים שלו או גורמים אחרים הפוגמים בפעילותו.

השבת 19: תהליך של חידוש הזרז והבאתו חזרה לצורה פעילה.

התאמת חומרי מבנה נעשית על בסיס המשתנים הבאים:

- גודל המיתקן והחוזק המיכני הנדרש ממנו

- תנאי הטמפרטורה והלחץ השוררים במיתקן

- בעיות שיתוך יחודיות

- עלות חומרי המבנה המתאימים ויעילותם היחסית.

תפוקה: כמות התוצר המתקבלת ליחידת זמן.

התפוקה יכולה להמדד לשעה, ליום, לשבוע, לחודש או לשנה.

בדרך כלל כאשר מדובר בחומרים בסיסיים המיוצרים בכמויות

גדולות (commodities) התפוקה נמדדת בטונות או מאות אלפי טונות לשנה.

תשומות: כל מרכיב כלכלי שנכנס לחישוב העלות הכוללת של המוצר.

מערכות בקרה: מיכשור, אמצעים ונהלים למעקב צמוד אחר משתנים חשובים בתהליכים תעשייתיים ואחרים.

ביקורת טיב: בדיקה של איכות המוצר בסוף תהליך הייצור האם עומד בדרישות שנקבעו מראש, או שיש לפסול אותו.
הבטחת איכות: מכלול פעילויות שיטתי ומתוכנן, הדרוש להקניית ביטחון, שמוצר או שירות יספקו את דרישות האיכות, המשקפות את מלוא צרכי המשתמש.

רעילות (טוקסיקולוגיה): מדע המתייחס לרעילותם של חומרים לאדם, לצמח ולבעלי חיים. זהו מדע המשלב בתוכו מספר תחומים - כימיה, מערכות ביולוגיות וגם תהליכים פיסיולוגיים וביוכימיים בבעלי חיים ובגוף האדם.

רישום: תהליך של הכנסת חומר לרשימת החומרים הניתנים לייצור, שיווק או שימוש על-ידי הרשות המוסמכת.

רישוי: מתן אישורים על-ידי הרשות המוסמכת לשימוש מסויים בחומר רעיל.

בריאות העיסוקית: שמירה על הבריאות במסגרת מקומות העבודה.

גהות: כללי שמירת הבריאות ומניעת מחלות.

סיכונים (Risks): ההסתברות שיגרם נזק בתנאים מסויימים.

סכנות (Hazards): פוטנציאל החומר לגרום נזק בתנאים מסויימים.

בטיחות (Safety): האמצעים והתנאים שנקטים כדי למזער את הסיכונים.

שאלות לפרק ד

בפרק ד עסקת בעיקר במושגים ובעקרונות תעשייתיים כלליים אותם תוכל ליישם ביחס לתהליך ייצור הברוס בו עסקת בפרק ג וגם ביחס לחומרים ולתהליכי הייצור השונים בהם תעסוק בפרקים הבאים.

1. בפרק ג למדת כי אחת הדרכים להפקת כלור היא על ידי תהליך אלקטרוליזה של תמיסת נתרן כלורי. השתמש בערכי פוטנציאל החיזור התקניים של התגובות לקבלת מימן, כלור וחמצן וציין האם, לדעתך, תהליך האלקטרוליזה מתבצע תחת בקרה תרמודינמית או קינטית.

2. ערוך רשימה של שאלות שעליהן צריך לענות באמצעות הפעלת המיתקן החצי חרושתי (pilot).

3. (א) התייחס לשלבים השונים של תהליך ייצור הברוס ונסה למצוא דוגמאות או להציע הצעות לחסכון בתשומות: מים, אנרגיה וחומרי עזר.

(ב) שמירה על איכות הסביבה מתייחסת ל:

אוויר

קרקע

מים

תן דוגמאות למקורות זיהום אפשריים של כל אחד ממרכיבי סביבה אלה עבור תהליך ייצור הברוס.

(ג) מהם האמצעים שננקטים בכל שלב כדי לשמור על בטיחות ואיכות הסביבה?

(ד) האם יש לדעתך לנקוט באמצעים נוספים? אם כן, מהם?

4. (א) אלו שיקולים כלכליים עשויים להשפיע על החלטתה של מדינה כלשהי האם לייצר או לייבא ברוס?

(ב) מהם הגורמים העשויים להשפיע על מחיר הברוס בעולם?

(ג) מהם הגורמים העשויים להשפיע על מחיר תרכובות ברוס בעולם?

5. התייחס באופן כללי לתהליכים תעשייתיים וענה על השאלות הבאות:

(א) במה נמדדת הצלחתו של מפעל?

(ב) מהם תפקידיו של מערך השיווק במפעל?

(ג) הצע דרכים בהן יכול המפעל לפעול לשיפור, להתייעלות ולהצלחה טובה יותר.

6. חלק חשוב ביותר בתפקודו התקין של מפעל הוא פיקוח על איכות המוצר.

(א) כיצד נעשה במפעל הפיקוח על איכות המוצר?

(ב) מה ההבדל בין ביקורת טיב לבין אבטחת איכות?

(ג) נסה להעריך מהם היתרונות והחסרונות של כל אחת מהשיטות שפורטו בסעיף ב. האם ניתן להסתפק רק באחת מהן? חווה דעתך.

(ד) מהם היתרונות של השיטה לניהול הסביבה, שאומצה על ידי מפעל "תרכובות ברוס"?

7. בטבלה בעמ' 131 נתונות דוגמאות למספר חומרים רעילים המיוצרים במפעל תרכובות ברום.

(א) מהן הבעיות הנוצרות כתוצאה מהעיסוק בחומרים רעילים?

(ב) כיצד פותרים בעיות אלה?

(ג) הבא דוגמאות לאמצעי בטיחות שונים בהם משתמשים בתעשייה בעת הטיפול בחומרים רעילים.

8. פסולת תעשייתית מהווה בעייה עולמית. בשנים האחרונות הולכת וגוברת המודעות לצורך בטיפול נכון בפסולת תעשייתית.

(א) מדינה מפותחת נבחרת, בין השאר, על פי הדרכים בהן היא מטפלת בפסולת מסוכנת. הסבר.

(ב) כיצד ניתן לשפר את הדרך בה מטפלים מפעלי תעשייה בבעיית הפסולת.

(ג) מהן הדרכים שאתה מכיר לטיפול בפסולת תעשייתית? פרט.

9. ניתן להשתמש בברום לקבלת מימן ברומי. לשם כך מאיידים את הברום ומגיבים אותו עם מימן.

לפניך ערכי קבוע שיווי משקל של תגובה זו בשתי טמפרטורות:

K	t °C
1.3×10^{19}	25
1.0×10^8	500

(א) נסח את התגובה בין ברום לבין מימן.

(ב) האם התגובה ספונטנית בטמפרטורת החדר? נמק.

במפעל מבצעים את התגובה בטמפרטורה של 500 °C ובלחץ של 1 אטמוספירה.

(ג) חשב את אנתלפית התגובה.

(ד) הסבר מדוע מבצעים את התגובה בטמפרטורה של 500 °C ולא בטמפרטורת החדר.

(ה) הסבר מדוע מבצעים את התגובה בלחץ של 1 אטמוספירה, ולא בלחץ גבוה יותר.

(ו) מהם הגורמים בהם יש להתחשב בבחירת חומרי המבנה למיתקן התגובה?

10. המימן הברומי משווק בדרך כלל כתמיסה מימית, $\text{HBr}_{(\text{aq})}$. למרבית השימושים נדרשת תמיסת מימן ברומי בדרגת ניקיון גבוהה ביותר. תמיסה זו מתקבלת

על ידי המסת המימן הברומי הגזי המיוצר בתגובה בין ברום ומימן (ראה תגובה ראה תגובה 1 בעמ' 12) במים.

(א) תאר על ידי תרשים זרימה פשוט את השלבים הנדרשים, לדעתך, כדי לקבל מברום ומימן תמיסה מימית נקייה של מימן ברומי. פרט והסבר כל שלב.

(ב) השווה את התרשים הזרימה שהצעת עם תרשימי הזרימה שמציעים תלמידים אחרים ונסה למצוא מהי הדרך הזולה והיעילה ביותר באמצעותה ניתן לייצר תמיסת מימן ברומי בדרגת הניקיון הנדרשת. פרט את השיקולים על פיהם תערך ההשוואה.

(ג) השווה בין ההצעות השונות שהועלו על פי שיקולים כמו:

מספר השלבים בתהליך

אחוז ההמרה

ניצולת התגובה

דרגת הניקיון של התוצר

עלויות אנרגיה

(ד) איזה מבין כל התהליכים המוצעים הוא, לדעתך, המומלץ? נמק את תשובתך.

(ה) מהם הגורמים בהם יש להתחשב בבחירת חומרי המבנה עבור מכלי האיחסון של תמיסת מימן ברומי?

סיק ה "צור תרכובות הברום"

כללי

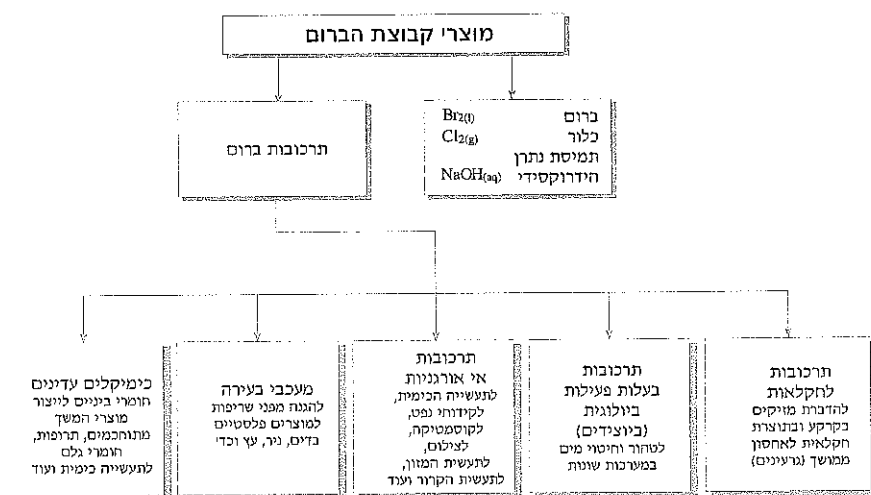
רוב הברום המיוצר בסדום משמש לייצור תרכובות. קבוצת הברום מייצרת כ-70 מוצרי ברום שונים. חלקם מיוצרים ברמת-חובב וחלקם מיוצרים במפעלים בחו"ל: ברומכימי בהולנד וקלירון בארה"ב.

מוצרים אלו משווקים לכ-100 מדינות באמצעות מערכת שיווק ומכירות עניפה שמרצה במשרדי הנהלת קבוצת הברום בבאר-שבע ומשרדיה ממוקמים במרכזי סחר בינלאומיים במדינות אירופה, אמריקה, דרום אפריקה והמזרח הרחוק.

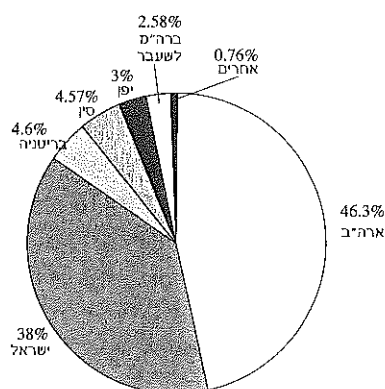
במפעל ברמת-חובב מייצרים תרכובות שהן למעשה המוצרים העיקריים בחברה. רוב המוצרים הינם למטרות שימוש סופי ומיעוטם חומרי ביניים לייצור חומרים שונים.

במפעל בהולנד מייצרים גם כמויות קטנות יותר של חומרים ועל-פי דרישה מיוחדת של הלקוחות. המפעל בארה"ב מייצר בעיקר מוצרים לטיפול במים. לאחרונה רכשה קבוצת הברום חלק ממפעל "כימדע" שנמצא בדרום הארץ. מפעל זה התמחה בייצור תרכובות ברום אורגניות שונות לשימושים ייחודיים, בכמויות קטנות ועל פי דרישת הלקוח.

הסכימה הבאה מפרטת את קבוצות החומרים השונים שמייצרים בקבוצת הברום:

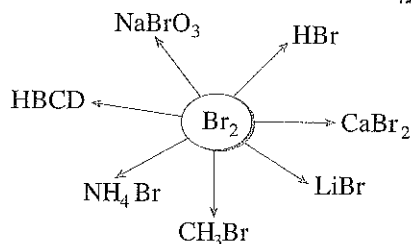


כיום ארה"ב היא המובילה בעולם בתחום ייצור תרכובות הברום, אך חלקה של ישראל הולך וגדל משנה לשנה. ההסבר לכך הוא היתרון העצום שיש לישראל בהפקת הברום מתמלחת על-קרקעית, בהשוואה לעלויות הולכות וגדלות בתהליכי ההפקה בארה"ב, הנובעים מהריכוזים הנמוכים של יוני הברום בתמלחות ומהצורך בקידוחים עמוקים יותר עם הזמן.

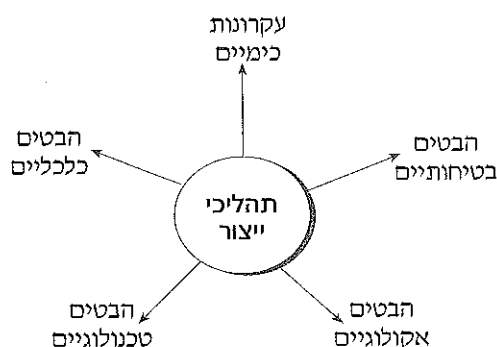


ייצור ברום בעולם 1998

כפי שאנו רואים על פי נתונים אלה ארה"ב וישראל הן יצרניות הברום החשובות ביותר בעולם. כיום, קבוצת הברום היא החברה השנייה הגדולה ביותר בעולם המייצרת ברום ותרכובותיו (בארה"ב קיימות 2 חברות). בפרק זה נתרכז בתהליכי הייצור של מספר תרכובות ברום. תוך כדי כך ננסה ליישם עקרונות שהוצגו בפרקים הקודמים בספר זה וללמוד על הבעיות הכרוכות בייצור התעשייתי של תרכובות אלו. ננסה לראות מהם העקרונות המשותפים לתהליכים השונים ויחד עם זאת את הייחודיות המאפיינת כל אחד מהם. בחרנו במספר תרכובות פשוטות יחסית, חלקן מתחום הכימיה האנאורגנית וחלקן מתחום הכימיה האורגנית. חלק מהתהליכים רציפים, חלקם מנתיים וחלקם בנויים בצורה משולבת, אך כולם נשלטים על-ידי חדרי בקרה ממוחשבים וטכנולוגיות מתקדמות.



נתאר את העקרונות הכימיים עליהם מבוססים התהליכים, הטכנולוגיות בהן משתמשים, הבטים בטיחותיים ואקולוגיים והבטים כלכליים. בעזרת הסכימה הבאה נוכל לנתח את השיקולים השונים הבאים לכדי ביטוי בעת תכנון תהליכי הייצור השונים בקבוצת הברום ואף להכלילם לתהליכי ייצור רבים אחרים המתבצעים במפעלים אחרים:



ככל שהמוצרים מתוחכמים יותר ותהליכי הייצור מורכבים יותר הבעיות נעשות סבוכות יותר. יחד עם זאת חשוב לזכור כי ככל שהמוצרים מתוחכמים יותר הערך המוסף הכלכלי, שהוא מחירו של המוצר ביחס למחיר חומרי הגלם, גבוה יותר ועימו גם הרווח הצפוי.

ערך מוסף כלכלי של המוצר: מחירו של המוצר ביחס למחיר חומרי הגלם. מחירים של מוצרים מתוחכמים, הדורשים ידע רב לשם ייצורם, גבוה יחסית למחיר חומרי הגלם. במקרים אלו למוצרים יש ערך מוסף גבוה.

טבלת המחירים הבאה (משנת 1998) ממחישה את המשמעות של הערך המוסף הכלכלי שיש למוצרי ההמשך בהשוואה למחירו של חומר הגלם, הברום:

מחיר בדולר לטון	החומר
900-1000	ברום
2000-3000	מתיל ברומי (מתיל ברומיד)
2000-4500	מעכבי בעירה
10,000 ויותר	כימיקלים עדינים ¹

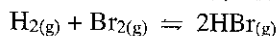
¹ כימיקלים עדינים-מושג זה מתייחס למוצרים המתאפיינים במספר שלבי ייצור גדול, במחיר גבוה יותר ובמכירה של כמויות קטנות יותר.

ה.1 - ייצור מימן ברומי, HBr

שם החומר: מימן ברומי - HBr
גבולות
מסה מולרית: 80.9 גר"/מול
טמפי' היתוך: -88.5°C
טמפי' רתיחה: גז: -67°C
תמיסה (48%): 126°C
מסיסות במים: גבוהה
221 גר' ב-100 סמ"ק מים (ב-0°C)
130 גר' ב-100 סמ"ק מים (ב-100°C)
מסיסות בממסים אחרים: מסיס באלכוהול, בחומצה אצטית
צפיפות: כבד מהאוויר
דליקות: לא דליק, לא מתפוצץ
יציבות: יציב בתנאים רגילים
רעילות: הגז גורם לכוויות ורעיל מאד בנשימה.
תמיסה מרוכזת גורמת לכוויות.
חומר מנטרל: תמיסות 10% NaHCO ₃
תגובות אופייניות:
* תגובה עם בסיסים
* תגובה עם מתכות פעילות
* תגובה עם חומרים מחמצנים חזקים
* תגובה עם תרכובות פחמן שונות כגון אלקנים וכוהלים
שימושים: משווק בדרך כלל כתמיסה בעלת ריכוז 48% או 62% במים.
התמיסה משמשת כמקור ברום בתעשייה הכימית האורגנית והאנאורגנית.

המימן הברומי אינו משמש כמוצר לשימוש סופי, אך יש לו חשיבות רבה כמקור לברום בתרכובות שונות, אורגניות ואנאורגניות. המימן הברומי משווק בעיקר כתמיסה, אך בשלב הראשון מייצרים אותו כגז ורק אחר כך מספיגים את הגז במים. הייצור נעשה בכל מפעלי הקבוצה: במפעל "תרכובות ברום" ברמת-חובב, בסדום וב"ברומכימי" בהולנד.

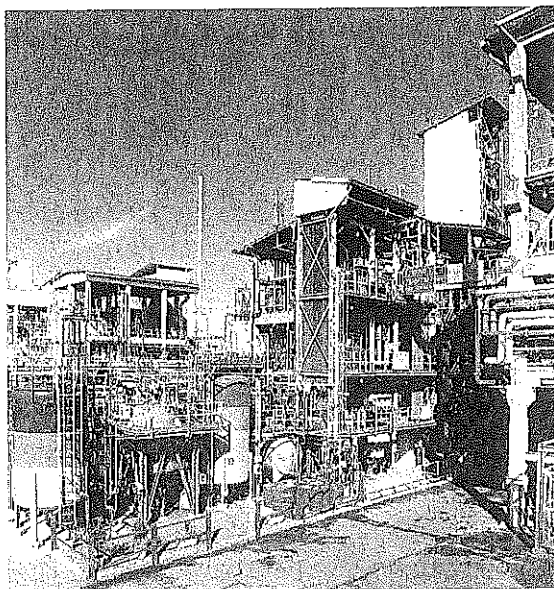
המימן הברומי הגזי מתקבל בתגובה בין מימן וברום על פי הניסוח הבא:



עבור התגובה הישירה: $\Delta H = -103 \text{ kJ}$
להלן הנתונים של ערכי קבוע שיווי משקל, K, לקבלת מימן ברומי גזי בשלוש טמפרטורות שונות:

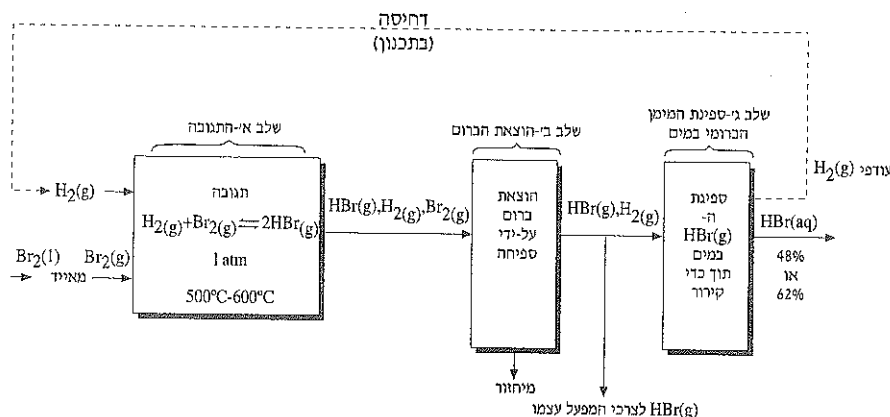
קבוע שיווי המשקל	טמפרטורה (K)
1.3×10^{19}	298
1.0×10^8	773
2.1×10^4	1000

- האם התגובה אפשרית (ספונטנית) מבחינה תרמודינמית בכל אחת מהטמפרטורות הללו?
- הטמפרטורה שנבחרה לביצוע התגובה בתעשייה היא 500°C . מהי, לדעתך, הסיבה לכך?
- מהו יחס הריכוזים של התוצרים והמגיבים בטמפרטורה זו? האם לדעתך ניתן להתייחס באופן מעשי לתהליך ב- 500°C , כפי שהוא מתבצע במפעל "תרכובות ברום", כאל תהליך שיווי משקל או כאל תהליך המתרחש עד תום? נמק.



אחד ממיתקני הייצור של מימן ברומי ברמת-חובב

- כדי לקבל את המימן הברומי הגזי חייבים הן הברום והן המימן להיות נקיים לחלוטין. **חומרי הגלם** שנבחרו הם:
- א. מימן, שהוא ברובו תוצר לוואי של תהליכי פיצוח פחמימנים במפעל "מכתשים" הסמוך, בחלקו תוצר לוואי של תהליך הייצור של נתרן ברומי², NaBrO_3 , במפעל "תרכובות ברום" עצמו ובחלקו תוצר לוואי של תהליך ייצור הכלור בסדום.
- ב. ברום נקי מכלור, העובר תהליך איוד לפני הכנסתו למכל התגובה.
- תהליך הייצור של המימן הברומי הינו רציף והוא מתואר בסכימה הבאה:



- מדוע, לדעתך, נבנה מיתקן רציף לייצור מימן ברומי?
- מהן, לדעתך, הדרישות מחומרי המבנה במיתקן לייצור תמיסות מימן ברומי?
- מדוע, לדעתך, משווקים את המימן הברומי כתמיסה ולא כגז דחוס?

אנו רואים כי התהליך מורכב משלושה שלבים עיקריים:

שלב א' – התגובה לקבלת מימן ברומי

כדי לבצע את השלב הראשון, שהוא ייצור מימן ברומי גזי, מוזרמים לתוך מכל תגובה צינורי ברום גזי (לאחר שעבר איוד) ומימן. התגובה בין המימן והברום היא כאמור אקסותרמית, אך אנרגיית השיפעול שלה גבוהה. מכיוון שהתהליך נעשה ללא שימוש בזרז יש צורך בחימום ראשוני לטמפרטורה גבוהה המתאימה להתחלת התגובה.

כמו בכל תהליך תעשייתי המטרה הינה לקבל כמות מרבית של מימן ברומי ליחידת זמן. אמנם באופן תאורטי התגובה היא תגובת שיווי משקל, אך התבוננות בנתונים מראה כי באופן מעשי ניתן להתייחס אליה בתנאי התגובה כאל תגובה המתרחשת עד תום. ניתן להשפיע על כמות המימן הברומי שמתקבלת רק על-ידי העלאת ריכוזי המגיבים, אשר על פי תורת ההתנגשויות מביאה להגברת מהירות התגובה.

ניתן להעלות את הריכוזים של שני המגיבים ולדאוג לכך שהיחס בין המגיבים ישמר בהתאם ליחס המקדמים בניסוח התגובה. אפשרות אחרת היא להעלות את מהירות התגובה על-ידי שימוש בעודף של מגיב אחד בלבד. אנו רואים פה דוגמא לתגובה המתבצעת בתנאים של בקרה קינטית.

- מהם היתרונות והחסרונות של העלאת הרכיב של רכב שני המגיבים, המימן והברום?
- מהם היתרונות והחסרונות של העלאת הרכיב של מגיב אחד בלבד?



מכלים להובלה ואחסון של מימן

- הוספת עודף ברום אינה כדאית מהסיבות הבאות:
- הברום הינו חומר יקר וכל תהליכי הייצור מתוכננים לנצלו באופן מרבי על מנת להעלות את הרווחיות.
 - משיקולי איכות הסביבה אי אפשר לשחרר עודפי ברום לאטמוספירה, אך ניתן לשחרר עודפי מימן במידה והוא אינו מכיל חומר מזהם.
 - המוצר הסופי חייב להיות נקי וללא שאריות ברום.
- בגלל כל הסיבות הללו משתמשים בעודף מימן.
- התהליך בו נוצר המימן הברומי מתבצע בלחץ אטמוספרי (1 אטמוספירה). הסבר מדוע לא כדאי להעלות את הלחץ.
 - מהן לדעתך התכונות הנדרשות מחומרי המבנה של המכל בו מתבצעת התגובה בין מימן לברום.

מרכיבי התגובה והטמפרטורה בה היא מתבצעת מכתיבים את חומרי המבנה מהם בנוי מכל התגובה. המכל עשוי קוורץ, אשר בנוסף לעמידותו בפני ברום הוא

חייב להיות מספיק חזק, כדי שיתאים לתנאי הטמפרטורה הגבוהה השוררים בתגובה. מכיוון שהתגובה אקסותרמית אין צורך בבידוד המכל כדי לשמור על טמפרטורה של 500°C (השארית המכל חשוף לאוויר מונעת את עליית הטמפרטורה).

בתנאים אלו אחוז ההמרה לגבי הברום גבוה יחסית, אך כאמור נשאר עודף של מימן וכמו כן נשארים גם עקבות של ברום שלא הגיבו. למטרות מסויימות ניתן להשתמש בתוצר זה ללא ניקוי נוסף, אך לרוב המטרות צריך להפריד את עודפי הברום והמימן.

מתערובת הגזים היוצאת ממכל התגובה יש להפריד את המימן והברום. על פי תרשים הזרימה מפרידים בשלב הראשון את הברום ורק אחר כך מפרידים את המימן.

- כיצד מפרידים את הברום?
- כיצד מפרידים את המימן?
- מדוע לדעתך לא מתבצעת קודם הפרדת המימן ואחר כך הפרדת הברום?

שלב ב' – ספיחת הברום

שלב זה של ספיחת הברום חשוב ביותר לניקיון המוצר הסופי. הזרמת תערובת התגובה לתוך מים ללא ספיחה מוקדמת של הברום תביא לספיגתו המלאה של הברום בתמיסת הברומיד. בל נשכח שמתקבלת תמיסה המכילה ריכוז גבוה של יוני ברום, $\text{Br}_{(\text{aq})}^-$, ולכן נוצרים בה יוני $\text{Br}_{3(\text{aq})}^-$, שמסיסותם במים גבוהה (ראה עמ' 57).

תערובת התגובה, המכילה מימן ברומי, מימן ועקבות ברום, מתקררת תוך כדי זרימתה לתוך המכל בו נעשית הספיחה של הברום. ספיחה זו מתבצעת באופן דומה לספיחה על פני פחם פעיל אותה בצעת בניסוי 2 בפרק ד. מתקבלת תמיסה המהווה פסולת והיא מכילה גם כמות מסוימת של חומצה מימן ברומית. פסולת זו חייבת לעבור טיפול עד להבאתה ל- pH נויטרלי לפני הזרמתה לשפכים או מיחזור.

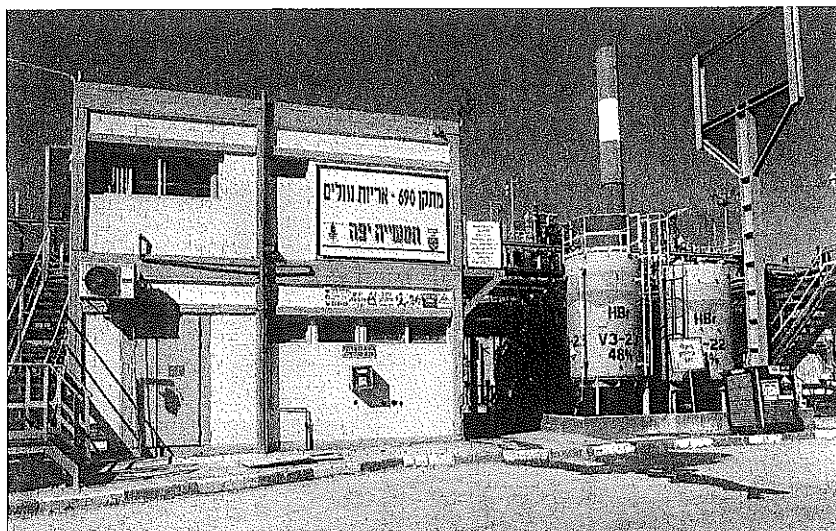
כיצד כדאי לנטרל תמיסה זו? הצע חומר מנטרל מתאים.

שלב ג' – ספיגת המימן הברומי במים

ממכל הספיחה יוצאים המימן הברומי יחד עם מימן שלא הגיב והם מוזרמים לתוך עמודת ספיגה המכילה מים.

- רשום ניסוח לתהליך הספיגה במים.

- הסבר מדוע יוצאים עודפי המימן מעמודת הספיגה.
 - עמודה זו הבנויה מזכוכית מלאה בדיסקיות העשויות מחומר פלסטי (PVDF).
 - תערובת הגזים מוזרמת מלמטה ואילו המים מוזרמים מלמעלה. הסבר מדוע.
 - מהו תפקיד הדיסקיות הקרמיות?
- מתקבלת תמיסת מימן ברומי שריכוזה 48% או תמיסה מרוכזת יותר של 62%. את עודפי המימן משחררים לאטמוספירה, אך יש כוונה לשפר את התהליך ולהזריםם לאחר דחיסה בחזרה למכל התגובה.
- את תמיסת המימן הברומי מאחסנים במכלי פלדה מצופים בפוליאאתילן או במכלים העשויים חומר פלסטי קשיח כמו, פוליוניל כלורי, (PVC).
- אחסון ושיווק תמיסת המימן הברומי נעשה במכלים פלסטיים בגדלים שונים. מכלים אלו עשויים מחומר פלסטי עמיד או בעלי ציפוי פלסטי פנימי.
- מדוע משתמשים בציפוי פלסטי עבור מכלי האחסון של תמיסת המימן הברומי?
 - האם ניתן לשמור תמיסת מימן ברומי במכל עשוי פלדה? נמק.
 - בסמוך למיתקן לייצור מימן ברומי ניתן לראות חביות המכילות בסיס. מהי הסיבה לכך? הסבר.
 - כאלו בסיסים ניתן להשתמש למטרה זו? פרט.
 - מהם השיקולים לבחירת הבסיס המתאים? הסבר.



אריזת נוזלים ומכלי תוצרת של תמיסת מימן ברומי

למקרה של דליפת תמיסת מימן ברומי ניתן להשתמש במהירות וביעילות בסיד כבוי, בסיד לא כבוי או בתמיסה מימית של נתרן הידרוקסיד.

למקרה של דליפת מימן ברומי גזי משתמשים באמוניה.

- נסח את התגובות של תמיסת מימן ברומי עם: סיד כבוי, סיד לא כבוי, תמיסת נתרן הידרוקסיד.

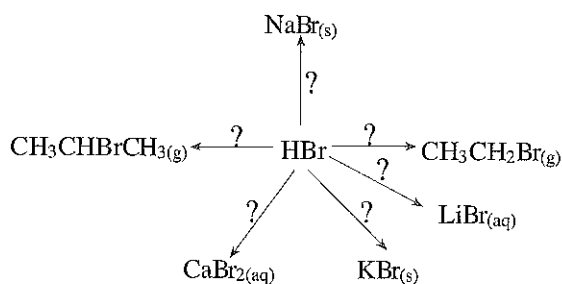
- נסח את התגובה של מימן ברומי גזי עם אמוניה.

- מהם היתרונות והחסרונות של השימוש בכל אחד מהחומרים הללו?

- מדוע לא רצוי להשתמש לניטרול תמיסת מימן ברומי בסידן פחמתי? נמק.

- בחוסר אמוניה ניתן להתזו מים כדי לנטרל מימן ברומי גזי. הסבר מדוע?

כאמור, משמש המימן הברומי כחומר מוצא למספר רב של תרכובות, אשר חלקן מיוצרות במפעל "תרכובות ברום". כך למשל ניתן לקבל ממימן ברומי:

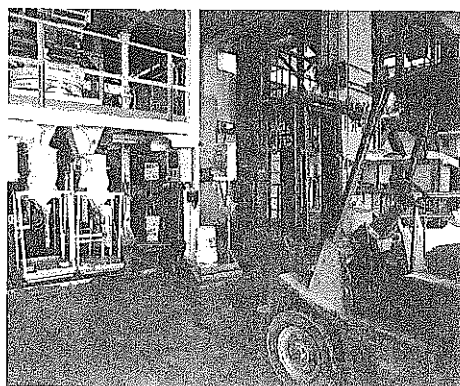


בסכימה לעיל מופיעים סימני שאלה המסמלים תהליכי ייצור של מספר חומרים המתבססים על מימן ברומי כחומר גלם.

- האם תוכל להציע שיטות לקבלת כל אחד מהחומרים הללו ממימן ברומי?

- מהם חומרי הגלם הנוספים הנדרשים? נסח תגובות והסבר.

- מהם העקרונות הכימיים עליהם מבוססת כל אחת מהשיטות שהצעת?



חדר אריזה במיתקן לייצור נתרן ברומי

כחומצה חזקה יכול המימן הברומי להגיב עם בסיסים לקבלת ברומידים אנאורגניים. דוגמא לתהליך כזה הוא תהליך הייצור של סידן ברומי, CaBr_2 , או תהליך הייצור של ליתיום ברומי, LiBr , אליהם נתייחס בהמשך הפרק. כמו כן יכול המימן הברומי להגיב גם עם תרכובות אורגניות שונות. עם אלקנים למשל יכולות להתרחש תגובות סיפוח, ועם כוהלים או הלואלקאנים, תגובות התמרה.

רשום ניסוח עבור תהליכים בהם מגיב מימן ברומי עם:

- אלקן
- כוהל
- הלואלקאן

דוגמא לתהליך התמרה הוא תהליך ייצור המתיל ברומיד אותו נתאר ביתר הרחבה בהמשך הפרק.

המימן הברומי מתקבל גם כתוצר לוואי בתגובות שונות בהם משתתפים חומרים אורגניים. על תגובות כגון אלו למדת בפרק העוסק בתרכובות פחמן.

כך, למשל, מתקבל מימן ברומי בתגובה בין אלקאן לבין ברום.

- נסח (כדוגמא מייצגת בלבד) את התגובה בין פרופאן לבין ברום.
- מהם התנאים הנדרשים לביצוע התגובה?
- האם לדעתך המימן הברומי מתקבל נקי? נמק.
- בתגובה זו עשוי להתקבל יותר מתוצר אחד.
- מהם התוצרים האפשריים? רשום נוסחות.
- כיצד ניתן לדעתך לנקות את המימן הברומי המתקבל בתגובה זו? פרט.

המימן הברומי המתקבל כתוצר לוואי של התגובות האורגניות השונות נאסף, עובר תהליכי ניקוי שונים ומוספג במים. התמיסה המימית מתקבלת בדרגת ניקיון טובה יחסית ויכולה לשמש כחומר גלם לייצור תרכובות שונות.

- קרא בעמ' 236 על השימוש בתמיסות ברומידים לקידוחי נפט. מדוע, לדעתך, ניתן להשתמש בתמיסת מימן ברומי שהיא תוצר לוואי בתהליכים אורגניים לייצור מוצרים המיועדים לקידוחי נפט?
- לייצור תמיסת ליתיום ברומי, המשמשת למערכות מיוזג אוויר וקרור (ראה עמ' 245) משתמשים בתמיסת מימן ברומי המיוצרת במפעל ממימן וברום ולא בתמיסות המתקבלות כתוצר לוואי. הסבר מדוע.
- ציין שני יתרונות של השימוש בתמיסת מימן ברומי המתקבלת כתוצר לוואי בתהליך אחד, כחומר גלם בתהליך אחר? הסבר.

ה.2- ייצור סידן ברומי, CaBr_2 (תמיסה ומוצק)

שם החומר: סידן ברומי
א.כ.ו.א.
 תמיסה צלולה וצמיגה חסרת ריח ולא נדיפה
 מוצק לבן וחסר ריח
 מסה מולרית (של המוצק): 200 גר"/מול
 טמפי' היתוך: מוצק - נמוכה מ- 760°C
 תמיסה 52% - -7°C
 טמפי' רתיחה: מוצק - 810°C
 תמיסה 52% - 130°C
 צפיפות: מוצק - 3.35 גר' לסמ"ק
 תמיסה 52% - 1.7 גר' לסמ"ק
 מסיסות במים: טובה
 142 גר' ל-100 סמ"ק מים (ב- 30°C)
 מסיסות בממסים אחרים: טובה בכוהל ובאצטון
 דליקות: לא דליק ולא מתפוצץ
 יציבות: יציב בתנאים רגילים
 רעילות: התמיסה יכולה לגרום לגירוי קל בעיניים ובעור.
 נשימת האבקה יכולה לגרום לגירוי חזק של דרכי הנשימה.
 בבליעה עלול להגרם נזק למערכת העצבים המרכזית.
 תגובות אופייניות של התמיסה:
 * היגרסקופיות
 * בחימום חזק עלולה לשחרר אדי ברום ומימן ברומי
 * יכולה להגיב עם חומצות חזקות או חומרים מחמצנים
 שימושים: משווק בדרך כלל כתמיסה מימית בריכוז של 52%.
 התמיסה משמשת כנוזל לוויסות לחצים בקידוחי נפט.

בסעיף הקודם ראינו כי במפעל "תרכובות ברום" מייצרים שני סוגים של תמיסת מימן ברומי. האחת מתקבלת על ידי המסה במים של מימן ברומי המיוצר בתגובה בין מימן וברום. השנייה מתקבלת כתוצר לוואי של תהליכי ייצור של חומרים אורגניים שונים במפעל.

באיזו מבין שתי תמיסות המימן הברומי כדאי להשתמש? על שאלה זו יש לענות רק לאחר שנדע מהו השימוש שנעשה במוצר ומה צריכה להיות דרגת הניקיון שלו. בחירת חומרי גלם לייצור מוצר כלשהו תלויה ביישום הסופי שלו. לא כדאי להשתמש בחומר בעל דרגת נקיון גבוהה ביותר, שהוא בוודאי גם יקר יותר, כאשר אין צורך בכך. מציאת חומרי גלם חלופיים זולים יותר מורידה את מחיר המוצר, במקרה זה תמיסת סידן ברומי.

תמיסות סידן ברומי משמשות בתעשיית הנפט כחומר עזר בקידוחי נפט (ראה סעיף ו). התמיסות המשמשות לקידוחי נפט ומוזרמות לקרקע לא חייבות להיות בדרגת ניקיון גבוהה כמו זו הנדרשת מתמיסות המיועדות עבור ייצור תרופות, מוצרי מזון, מערכות מיזוג אוויר וכד'. יחד עם זאת, הצורך למלא אחר הדרישות

לשמירה על איכות הסביבה למניעת זיהום קרקע ומאגרי מים מחייבת תהליכי ניקוי המביאים את התמיסות לדרגת הניקיון המתאימה לדרישות החוק.

חשוב לזכור כי השימוש בתוצרי לוואי מביא לרווח כפול. מצד אחד חיסכון בעלויות הייצור כאשר משתמשים בחומרי גלם זולים יותר המתקבלים כתוצרי לוואי. מצד שני חיסכון בעלויות הטיפול בתמיסות חומציות, שאילו לא היה נעשה בהן שימוש, היו מהוות פסולת מסוכנת שהיה צורך בניטרול.

- כדי לקבל תמיסת סידן ברומי יש צורך, בנוסף לתמיסת מימן ברומי, בבסיס. באילו בסיסים ניתן להשתמש? רשום ניסוחי תגובה.

- מהם לדעתך הקריטריונים על פיהם יבחר הבסיס המתאים לייצור סידן ברומי?

שנים רבות ייצרו תמיסות סידן ברומי באמצעות תגובת חומצה-בסיס בין תמיסה מימית של מימן ברומי לבין סידן הידרוקסידי מוצק, הקרוי גם סיד כבוי.

הידעת?

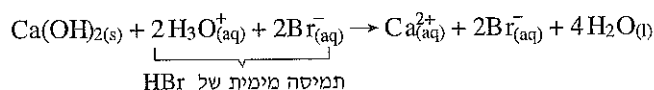
הסידן ההידרוקסידי נקרא סיד כבוי בגלל תהליך ייצורו. חומר זה מקבלים מסידן פחמתי, CaCO_3 , הנמרה במחצבות. בשלב הראשון עובר הסידן הפחמתי תהליך של פרוק על-ידי חימום, בו מקבלים פחמן דו-חמצני וסידן חמצני, הקרוי סיד.

$$\text{CaCO}_3(s) \rightarrow \text{CaO}(s) + \text{CO}_2(g)$$

בשלב השני מגיבים את הסידן החמצני עם מים ומתקבל סיד כבוי שהוא למעשה סידן הידרוקסידי.

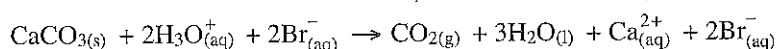
$$\text{CaO}(s) + \text{H}_2\text{O}(l) \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2(s)$$

כאשר מגיבים בין הסיד הכבוי לבין תמיסה של מימן ברומי מתקבלת תמיסת הסידן הברומי:



הבחירה בחומר גלם זה נבעה מהיכולת לפתח תהליך פשוט יותר מבחינה טכנולוגית בהשוואה לחומרי גלם אחרים, כפי שנראה בהמשך.

למעשה הסיד הכבוי אינו חומר אחד והוא מכיל גם שאריות של סידן פחמתי, $\text{CaCO}_3(s)$. שאף הוא מגיב עם המימן הברומי בתגובת חומצה-בסיס:

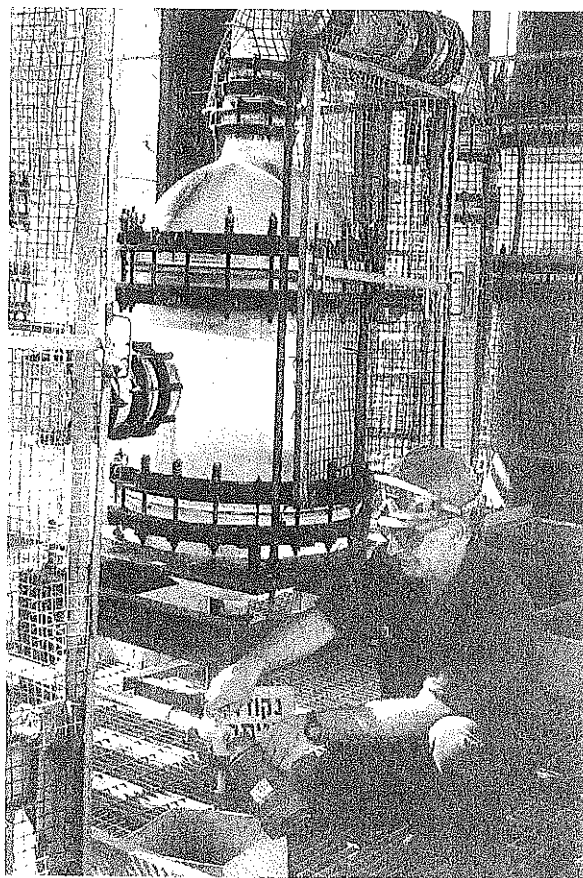


- מהו מקור הסידן הפחמתי בסיד כבוי?

- אלו בעיות עלולות להיווצר כתוצאה מנוכחותו של הסידן הפחמתי בסיד הכבוי? פרט.

הבעייה העיקרית היא הווצרותו של הפחמן הדו-חמצני. זהו גז שאינו גורם כל נזק סביבתי, כאשר מדובר בכמויות קטנות כמו אלו המתקבלות בתהליך הייצור של הסידן הברומי. לעומת זאת עלולה היווצרות הגז להביא לבעיות טכנולוגיות קשות.

- מהן הבעיות הנובעות מהיווצרות הגז פחמן דו-חמצני? פרט.
- הצע שיטות בעזרתן ניתן להתגבר על בעיות אלו. הסבר.



נקודת דגימה במיתקן

הפחמן הדו-חמצני שנפלט מהמערכת עלול ליצור לחץ במכל התגובה. נתון זה יש לקחת בחשבון בעת תכנון המכל. כמו כן עלול הגז לסחוף עימו חומרים שונים המצויים במכל התגובה: טיפות מים, אדי מימן ברומי ואף גרגירי המוצק סיד כבוי.

סחיפת חומרים אלו יחד עם הגז הנפלט בתגובה עלולה להביא, הן לירידה בניצולת והן לפגיעה בסביבה. כדי לפתור בעיות אלו יש להעביר את הפחמן הדו-חמצני דרך מערכת ספיגה.

- באיזה חומר כדאי לדעתך, להשתמש לצורך מערכת ספיגה זו:

במים?

בתמיסת נתרן הידרוקסידי?

בתמיסת סידן הידרוקסידי?

נמק את תשובתך.

- כיצד ניתן למנוע ירידה בניצולת?

לאחרונה נעשה שינוי בתהליך ובמקום בסידן הידרוקסידי $\text{Ca(OH)}_2(\text{s})$, שמחירו כ-80 דולר לטון החלו להשתמש בסידן פחמתי, $\text{CaCO}_3(\text{s})$ (גיר), שמחירו כ-40 דולר לטון.

- מהם היתרונות של שינוי זה? פרט.

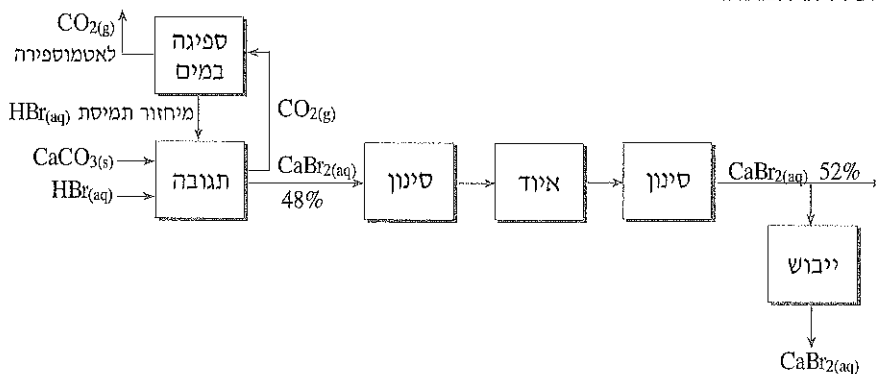
- מהם החסרונות של שינוי זה? פרט.

- הצע שיטות בעזרתן ניתן להתגבר על החסרונות. הסבר.

- מדוע לדעתך פותח בתחילה התהליך עם סידן הידרוקסידי המבוסס על חומר גלם יקר יותר ולא התהליך עם סידן פחמתי, שהוא כאמור זול יותר?

- במיתקן זה מייצרים במוצק כ-150,000 ליטר תמיסת סידן ברומי בריכוז של 52% ביממה. חשב מהי כמות ה- $\text{CO}_2(\text{g})$ המשתחררת ביממה. פרט את חישוביך.

התהליך החדש במפעל "תרכובות ברום" הוא מנתי ומתואר על-ידי הסכימה הכללית הבאה:



- האם התהליך הוא אקסותרמי או אנדותרמי? נמק.

- כיצד ניתן לבקר את התגובה ולדעת מתי הגיעה לסיימה?

- מהן הדרישות לגבי חומרי המבנה עבור מכל התגובה? הצע חומר מתאים.

- האם יש חשיבות כלשהי לסדר הכנסת המגיבים (תמיסת מימן ברומי וסידן כבוי) למכל התגובה? הסבר.

שלב א' – תגובה

למכל התגובה מכניסים ראשית את תמיסת המימן הברומי ורק לאחר מכן מוסיפים תוך כדי בחישה את הסידן הפחמתי.

סדר הכנסת המגיבים מכתיב למעשה את חומרי המבנה מהם בנוי המכל. במקרה זה מוסיפים תחילה את תמיסת המימן הברומי ולכן המכל וגם הבוחש מצופים זכוכית.

- האם זכוכית מתאימה לתמיסה בסיסית?

- מדוע למרות שמוסיפים בסיס בכל זאת ניתן להשתמש בזכוכית?

גם במקרה זה (כמו בתהליך המבוסס על סיד כבוי) נעשית הספיגה של הגז הנפלט ($\text{CO}_2(\text{g})$) באמצעות מים. אין צורך להשתמש למטרה זו בתמיסה בסיסית, שכן גרגירי הסייד הכבוי והמימן הברומי, שהם למעשה חומרי גלם, נסחפים יחד עם הגז ומתמוססים במים. מתרחשת ביניהם תגובת חומצה-בסיס ומתקבלת תמיסה של סידן ברומי המהווה למעשה תוצר. תמיסה זו מוחזרת למכל התגובה וכך מונעים, הן בזבז חומרי גלם והן זיהום סביבתי.

התהליך בין תמיסת המימן הברומי לבין הסידן הפחמתי הוא אקסותרמי אך במידה פחותה בהרבה מהתהליך בין תמיסת המימן הברומי לבין הסייד הכבוי. עובדה זו מקנה לתהליך החדש יתרון נוסף, שכן לא נדרש בו קרור מיוחד של מכל התגובה.

- ניתן לוודא כי התהליך הסתיים באמצעות מדידת ה- pH של התמיסה או הטמפרטורה שלה. הסבר.

- מהם החסרונות של תהליך אקסותרמי

- כיצד ניתן לקרר את מכל התגובה במידה ומתרחשת תגובה אקסותרמית.

שלב ב' – סיכום

משלב התגובה עוברת תמיסת הסידן הברומי לשלב הסינון. הסינון מתבצע באמצעות חומר מוצק המופק ממחצב טבעי ונקרא דקליט. שכבה עבה של חומר זה נמצאת על פני "תוף" מחורר סובב. תמיסת הסידן הברומי מוזרמת בכח תת-לחץ (וואקום) הקיים בחלל ה"תוף". התוף מסתובב כאשר הוא טבול בתמיסת הסידן הברומי. התמיסה נשאבת פנימה דרך שכבת הדקליט, מתנקת וממשיכה הלאה לשלב הבא. מרבית אי-הניקיונות מצטברים על פני השכבה החיצונית של הדקליט והיא עוברת באופן רצוף קילוף איטי על-ידי סכין מיוחדת. הזיהומים נשארים על פני הדקליט ואילו התמיסה, צלולה וללא זיהומים זורמת דרך החורים ונאספת במכלי איחסון. פסולת הדקליט נשלחת למפעל לטיפול בפסולת תעשייתית מסוכנת ברמת-חובב. נשקלה האפשרות להוסיף תהליך השבה של הדקליט על-ידי ביצוע פעולות ניקוי, אך היא נפסלה מסיבות טכניות וכלכליות.

השבה: תהליך של חידוש החומר והבאתו חזרה לצורתו הפעילה. במקרים רבים ההשבה מלווה בפעולות של זיקוק, שטיפה וכד', שבעזרתן מנקים את הזיהומים הנספחים לחומר.

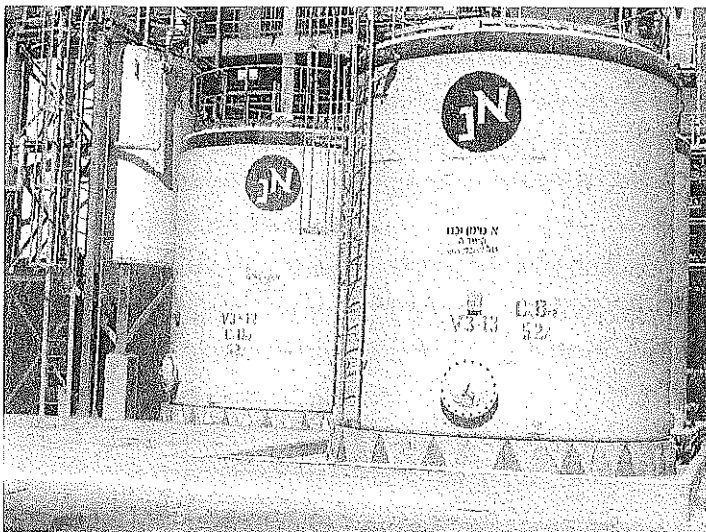
בדרך כלל מתקבלת תמיסת סידן ברומי שריכוזה כ-48%. מכיוון שתמיסת הסידן הברומי משווקת בעיקר בריכוז של 52% יש להוסיף שלב נוסף של איוד המים לצורך העלאת הריכוז.

בגלל האקסותרמיות הרבה של התהליך מתקבלת תמיסה של סידן ברומי שהיא עדיין חמה (כ-50°C), וכך חוסכים חלק מהאנרגיה הדרושה בשלב האיוד. התמיסה מוזרמת למאייד, שהוא למעשה מחליף חום, בו זורם קיטור הגורם לאיוד המים. מתקבלת תמיסה בעלת צפיפות גבוהה ביותר (כ-1.7 גרם/סמ"ק) ששימושיה ידונו בפרק הבא.

חלק קטן מהתמיסה עובר ייבוש לקבלת סידן ברומי מוצק המשמש בדרך כלל כדי להפוך תמיסות סידן ברומי מהולות (למשל בעת מיחזור תמיסות לאחר שנעשה בהן שימוש) לתמיסות מרוכזות.

אחסון תמיסות הסידן הברומי נעשה במכלי ברזל מצופים בשכבה פנימית של צבע אפוקסי. מכלים כאלו קיימים הן המפעל והן בנמלים.

הובלת תמיסות הסידן הברומי מהמפעל למכלי האגירה בנמל נעשית באמצעות מכליות כביש ולארצות היעד בחו"ל באמצעות אוניות צובר. אוניות אלו מרוקנות את תכולתן למכלים ענקיים הנמצאים בנמלים וההובלה ללקוחות נעשית באמצעות מכליות כביש.



מכלי אחסון של תמיסת סידן ברומי

בטיחות

כמו בכל מיתקן אחר, כך גם במיתקן זה חייבים לנקוט באמצעי בטיחות מתאימים.

- מהם, לדעתך אמצעי הבטיחות הנדרשים? פרט.
- הצע דרכים מתאימות.



שלטי בטיחות במיתקן לייצור סידן ברומי

כדי למנוע היווצרות לחץ במכל כתוצאה מפליטת פחמן דו-חמצני, $\text{CO}_2(\text{g})$ נוקטים במספר אמצעי זהירות:

- בקרה ממוחשבת של יחסי המולים בתגובה. מספר המולים של החומצה (המוזנת, כאמור, בשלמותה בתחילת התהליך) מחושב על-ידי מדידת הנפח והצפיפות שלה ובהתאם מזינים את הגיר באמצעות שקילה רצופה. בהתחלה נעשית הזנה מהירה של מרבית הכמות ובסוף הזנה איטית ומבוקרת של היתרה עד לקבלת ה- pH המתאים.
- בקרה נוספת על-ידי מדידת pH כדי לקבוע את סיום התגובה.
- מווסתים את קצב הוספת הגיר והחומצה כך שלא ייוצר לחץ יתר במערכת.
- את ה- $\text{CO}_2(\text{g})$ שואבים מהמכל בעזרת מפוח, המזרים את הגז לתוך מיגדל ספיגה המכיל מים (כמתואר בעמ' 86).
- במקום קריטי במערכת קיימת "דיסקית פיצוץ". כאשר עולה הלחץ מעל ערך מסויים היא נשברת והגז זורם למכל ספיגה. כמו כן פיצוץ הדיסקית גורם לסגירה אוטומטית של הזנת הגיר.
- בקרת התהליך באמצעות מד לחץ, המודד את עליית הלחץ כתוצאה משחרור ה- $\text{CO}_2(\text{g})$. עליית הלחץ מעבר לערך סף עליון גורמת לסגירה של הזנת הגיר.

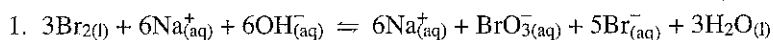
ה.3 – ייצור נתרן ברומטי NaBrO_3 , ואשלגן ברומטי, KBrO_3

שם החומר: נתרן ברומטי, NaBrO_3

אכילוג

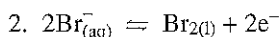
מוצק לבן, חסר ריח (אבקתי או גבישי)
 מסה מולרית: 150.9 גר/מול
 טמפי היתוך: 381°C
 טמפי רתיחה: מתפרק
 צפיפות: 3.34 גר/לסמ"ק ב- 20°C .
 מסיסות במים: טובה. 28.3 גר/ב-100 גר/מים ב- 25°C .
 90.9 גר/ב-100 גר/מים ב- 100°C .
 מסיסות בממסים אחרים: טובה בכוהל.
 דליקות: עלול ליצור תערובות דליקות ופצוצות בנוכחות
 חומרים מחזרים, חומצה גפרתית, מלחי אמוניום
 או אבקה של מתכות. כאשר מעורב בשריפה או
 בטמפרטורה מעל 380°C עלול להתפרק תוך פליטת
 גזים רעילים.
 רעילות: מסוכן בבליעה ובנשימה. גורם לקשוי נשימה, כאבי
 בטן והקאות. גורם לגירוי בעור, בעיניים וברקמות
 ריריות.
 תגובות אופייניות:
 * חומר מחמצן חזק.
 * מגיב עם חומצות חזקות תוך שחרור חום רב וברום
 שימושים: לעיצוב שער, לתהליכי צביעה של מוצרי טקסטיל
 (הלבנת בדים, טיפול התחלתי בצמר) לזיקוק מתכות
 יקרות.

נתרן ברומטי ניתן לייצר באמצעות תגובה בין ברום נוזלי לבין תמיסת נתרן
 הידרוקסיד:



עבור התגובה הישירה: $\Delta H < 0$

מניסוח התהליך ניתן לראות כי רוב הברום הופך ליוני ברום: מכל שלושה מול
 מולקולות ברום מתקבלים חמישה מול יוני ברום ורק מול אחד של יוני ברומט.
 כדי לשפר את יעילות התהליך מוסיפים שלב נוסף בו מבצעים אלקטרוליזה
 שבמהלכה עוברים יוני הברום תהליך חימצון ליד האנודה (האלקטרודה החיובית)
 והופכים חזרה לברום:

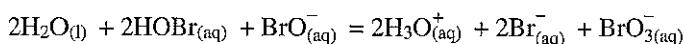
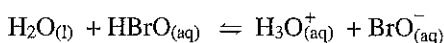
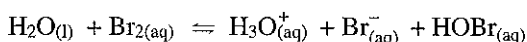


באופן כזה נעשה מיחזור של הברום שלא הפך לתוצר המבוקש והברום שמתקבל
 בתהליך (2) יכול להגיב שוב בתהליך (1) וחוזר חלילה. שילוב זה של התגובה
 והאלקטרוליזה מגביר את יעילות הפיכתו של ברום לברומט.

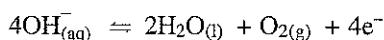
במקביל לתהליך חימצון יוני הברום המתרחש ליד האנודה נוצר ליד הקתודה מימן:



המימן משמש לייצור המימן הברומי כפי שהזכרנו בסעיף 1.1. תהליך הייצור של נתרן ברומטי אינו פשוט כלל ועיקר וכדי לבצע אותו ביעילות יש לפתור מספר בעיות, הן בתחום הכימי והן בתחום הטכנולוגי. כבר הזכרנו בפרק הראשון מספר תגובות העשויות להתרחש בתמיסה המכילה ברום ונתרן הידרוקסידי בריכוזים שונים (ראה עמ' 12). חלק מן התגובות תורמות לקבלת התוצר המבוקש ולכן הן רצויות, וחלקן בלתי רצויות ולכן משתדלים להקטין את הסיכוי להתרחשותן בדרכים שונות. נציין פה רק חלק מכלל התגובות האפשריות:



בתנאי pH חומציים מדי עלול להתרחש ליד האנודה תהליך מתחרה נוסף בו נוצר חמצן:



- לאיזה כיוון יוסחו התגובות ב- pH ים גבוהים מאוד?
- לאיזה כיוון יוסחו התגובות ב- pH ים נמוכים מאוד?
- כיצד ניתן לדאוג לכך שיתרחש התהליך בכיוון הרצוי?

נוצר פה מצב מורכב, המחייב שמירה מדויקת על ה- pH. מצד אחד ה- pH הוא בסיסי (בגלל הנתרן ההידרוקסידי) ומצד שני אסור שייהיה בסיסי מדי, שכן אז עלולות להתרחש תגובות מתחרות בלתי רצויות. ב- pH גבוה מדי עלולות להיווצר כמויות גבוהות מדי של יוני $\text{BrO}_{(\text{aq})}^-$ וחמצן. לעומת זאת ב- pH חומצי מדי עלולים לקבל בעיקר חומצה תת ברומיתית, HOBr , וברום. כדי לקבל נתרן ברומטי בניצולת מרבית יש לשמור על תנאים בסיסיים מתונים (8-9 pH). בנוסף לכך, לפני שהתמיסה עוברת לשלב הגיבוש מוסיפים במערכת II (ראה תרשים כללי של תהליך הייצור בעמ' 170) כמויות קטנות של תמיסת אמוני ברומי.

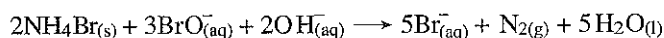
- מהן התגובות העשויות, לדעתך, להתרחש בין אמוני ברומי לבין תמיסה בסיסית?
- מה יקבע איזו תגובה תתרחש?
- מהי חשיבות הוספת האמוני הברומי?

תלות זו של התהליך כולו על שלביו השונים בריכוז הבסיס מחייבת בקרת pH קבועה ומדויקת. לצורך זה היה נהוג לקחת באופן קבוע דגימות מהתמיסה

הנכנסת למיתקן האלקטרוליזה ונבדקים יחסי הריכוזים של יוני הברום והברומט. כדי לייעל את הבקרה ולהקטין את מספר הדגימות נבנה מודל מתמטי המתבסס על הניסיון שהצטבר ועל פיו מחשבים בהתאם לנתוני קצב ההזנה של חומרי הגלם את הריכוזים הצפויים במערכת. נלקחת דגימה בערך פעם ביום ואם יש חוסר התאמה למודל מבצעים תיקונים מתאימים.

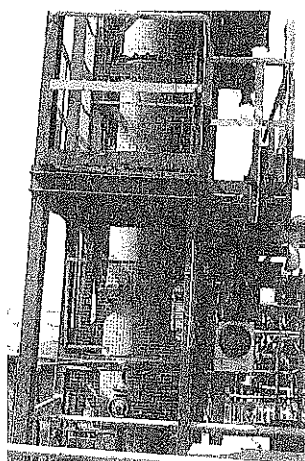
שלב א' – תגובה

תגובה (1) מתרחשת בשני מכלים (I,II) עוקבים. לתוך מכל תגובה I (המוחזק ב-pH בסיסי קבוע) מזרימים ברום נוזלי ותמיסת נתרן הידרוקסידי. התמיסה המתקבלת עוברת למכל תגובה II (שגם בו נשמר pH בסיסי קבוע). למכל זה מוסיפים תמיסת אמון כדי לחסל את שאריות יוני ה- $\text{BrO}^-_{(\text{aq})}$:



בתגובה זו יורד ריכוז יוני ה- $\text{OH}^-_{(\text{aq})}$.

- מהם היתרונות הנוספים קיימים בהזרקה פרט והסבר.
- בתגובה נוצר חנקן.
- מהן הבעיות שעלולות להגרם כתוצאה מהיווצרות החנקן?
- כיצד ניתן לפתור אותן?
- האם היווצרותו של החנקן עלולה לגרום לפגיעה באיכות הסביבה? הסבר.
- החנקן הנפלט בתגובה עובר למיגדל ספיגה שמכיל תמיסת נתרן הידרוקסידי.
- מדוע מזרימים את החנקן למיגדל ספיגה?
- מדוע מיגדל הספיגה מכיל נתרן הידרוקסידי?
- מה ניתן לעשות עם התמיסה המתקבלת במיגדל?



עמודת ספיגה

שלב ב' – הפרדת הגבישים מהתמיסה (וטיפול בגבישים)

התמיסה המתקבלת במכל תגובה II עוברת למסנן מיוחד ומשם למגבש בו מתאידים חלק מהמים והתמיסה מגיעה לריוויין יתר ומתחילה שקיעה של גבישי נתרן ברומטי, שהוא התוצר.

גיבוש: שקיעת גבישי מוצק מתוך תמיסה רוויה.

למעשה מתקבלת בוצה סמיכה המוזרמת למערכת מיוחדת (צנטרפוגה רב-תכליתית) שבה נעשות הפעולות הבאות:

- סינון
 - שטיפה במים
 - סינון נוסף
 - יבוש על-ידי אוויר חם
- לאחר סיום פעולות אלו מקבלים גבישים לבנים של נתרן ברומטי, שהוא למעשה התוצר ותסנין, שהוא למעשה תמיסה רוויה של נתרן ברומטי המכילה גם ריכוז גבוה של יוני בריום. המוצק הגבישי מועבר להמשך טיפול כפי שנפרט בהמשך והתסנין מועבר למיתקן האלקטרוליזה.
- מהן הדרישות מחומרי המבנה במיתקן האלקטרוליזה?
 - הכן רשימה של גורמים היכולים להשפיע על יעילות תגובת האלקטרוליזה.



גשר צנרת מרכזי במפעל

שלב ג' – אלקטרוליזה

האלקטרוליזה מתבצעת במיתקן המורכב ממספר תאים אלקטרוליטיים, המחוברים במקביל, בהם האנודות מצופות במתכות אצילות והקתודות עשויות מפלדה. כדי להעלות את הניצולת החשמלית ולא לגרום לבזבז אנרגיה, כדאי לבצע את התהליך האלקטרוליטי במתח נמוך ככל האפשר. נמצא, כי אפשר להוריד את המתח על-ידי העלאת הטמפרטורה. זוהי דוגמא נוספת להתנגשות בין יתרונות וחסרונות.

מצד אחד כדאי להעלות את הטמפרטורה כדי לחסוך באנרגיה חשמלית, אך מצד שני עלולה העלאת הטמפרטורה לגרום לבעיות תהליכיות ולמגבלות טכנולוגיות.

כל אלו תלויות בין השאר ב:

- עמידותם של חומרי המבנה מהם עשויים האלקטרודות והתאים
 - טמפרטורת הרתיחה של התמיסה
 - השפעת הטמפרטורה על ההתנגדות החשמלית של התמיסה
- כמו במקרים רבים אחרים, יש למצוא פתרון של פשרה ולמצוא טמפרטורה מתאימה, שתענה על מכלול הדרישות בצורה המיטבית. המימן המשתחרר באלקטרוליזה עובר למיגדל ספיגה להפרדת שאריות הברום, כדי שאפשר יהיה לנצלו (כפי שציינו בסעיף ה.1) לתהליך הפקת המימן ברומי.

שלב ד' – ניפוי הגבישים

גבישי הנתרן הברומטי מתקבלים בגדלים שונים: גדולים, בינוניים וקטנים. לכאורה נראה כי קבלת המוצר היא העיקר, אך לא כך הדבר. גם לצורת הגיבוש חשיבות רבה ולעיתים מכרעת. המוצר הסופי חייב להכיל גבישים בגודל בינוני בלבד, שכן הגבישים הקלים והגסים נוטים יחד ליצור גושים. זוהי תופעה שנקראת גיוש

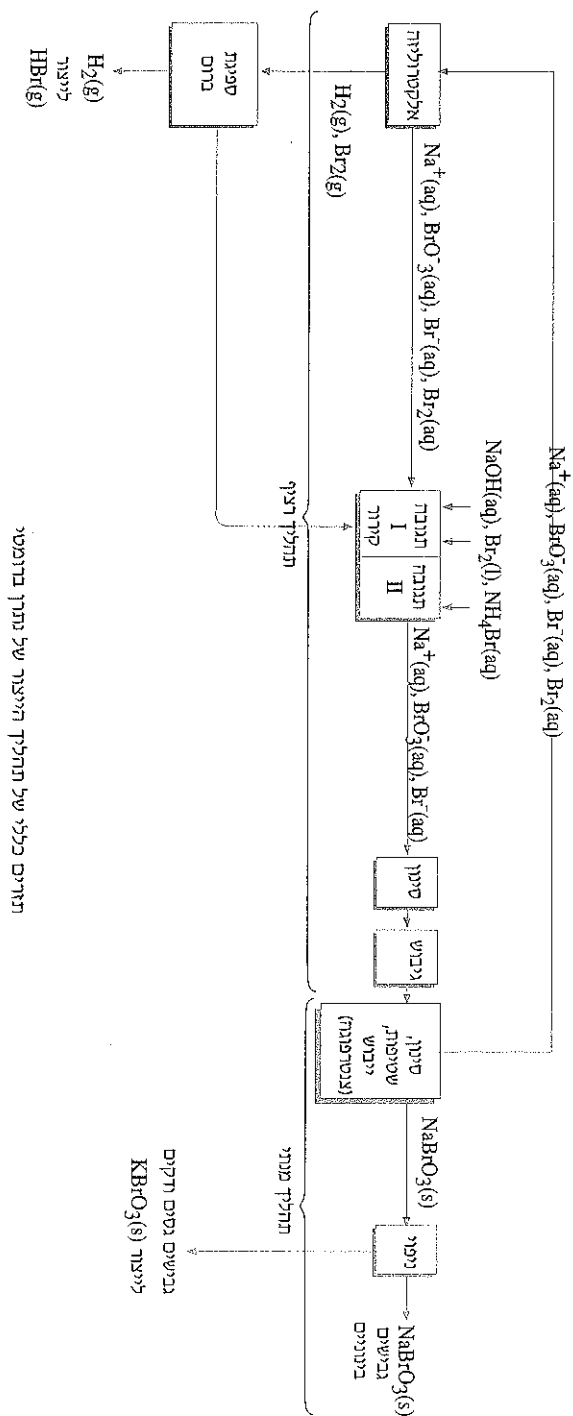
גיוש: יצירת גושים בחומר.

יצירת הגושים פוגמת בטיב המוצר ויוצרת בעיות למשתמשים בו. לפיכך רק הגבישים הבינוניים מהווים את המוצר הסופי. מהן הבעיות העוללות להוצר כתוצאה מיצירת גושים? פרט.

כל הגבישים עוברים ניפוי במהלכו מופרדים הגבישים הבינוניים. הגבישים הגדולים והקטנים נאספים ומשמשים לאחר גיבוש מחדש לתהליך הייצור של אשלגן ברומטי שיפורט בהמשך.

- הצע דרך לגיבוש מחדש של הגבישים.
- האם יש להווצרות גבישי נתרן ברומטי בגדלים שונים השפעה על ניצולת תהליך?

ניתן לתאר את כל שלבי התהליך על-ידי הסכימה הכללית הבאה:



תהליך כללי של תהליך הייצור של מתוך ברומט

לכאורה ניתן היה לחשוב כי גם **אשלגן ברומטי** ניתן לייצר בשיטה דומה לזו שתוארה עבור נתרן ברומטי, אך לא כך הוא. התבוננות ב"כרטיס" האשלגן הברומטי תצביע מיד על המסיסות הנמוכה של אשלגן ברומטי במים בהשוואה לזו של נתרן ברומטי.

שם החומר: אשלגן ברומטי, $KBrO_3$

מב/מל

מוצק לבן, חסר ריח (אבקתי או גבישי)
 מסה מולרית: 167.0 גר"/מול
 טמפי' היתוך: מתפרק ב- $370^{\circ}C$
 מסיסות במים: 13.3 גר' ב-100 סמ"ק מים (ב- $25^{\circ}C$)
 49.75 גר' ב-100 סמ"ק מים (ב- $100^{\circ}C$)

מסיסות בממסים אחרים: טובה בכוהל
 דליקות: יכול ליצור תערובות דליקות ופציצות עם חומרים מחוזרים, דליקים, חומצה גפרתית ומלחי אמוניום
 רעילות: רעיל בבליעה ובנשימה. גורם לגירוי עור, עיניים
 רקמות ריריות.
 הכמות המותרת במזון היא עד 30-40 ppb.
 תגובות אופייניות:

- * חומר מחמצן חזק
- * מתפרק בחימום חזק לאשלגן ברומי, לחמצן ולברום
- * מגיב בחוזה עם טקסטיל, שמן, שומן, סוכר, תרכובות זרחן ותרכובות אמון.
- * מגיב עם חומצות תוך שחרור חום רב וברום.

שימושים: תוסף בתעשיית המזון* (חומר להתפחת בצק**), לתעשיית הבירה ולייצור גבינות) מחמצן בתעשיות הכימיות, תעשיות הקוסמטיקה, מקור לחמצן בתעשיית חומרי הנפץ.

* במדינות מסוימות נאסר לשימוש.
 ** בשילוב עם מגנזיום פחמתי לשיפור תהליך האפייה.

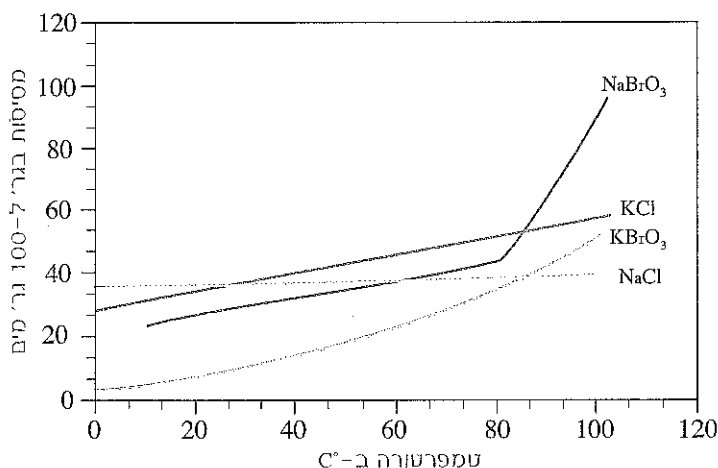
מסיסות נמוכה זו עלולה להביא לשקיעת האשלגן הברומטי בתאי האלקטרוליזה ועל פני האלקטרודות, ולכן תהליך מסוג זה איננו אפשרי וחייבים למצוא דרך חלופית לייצור אשלגן ברומטי.

נסה לחשוב על דרכים אחרות לייצור אשלגן ברומטי. רשום ניסוחים לתגובות שהצעת.

- כדי לקבל מנתרן ברומטי אשלגן ברומטי יש צורך בהוספת חומר המכיל יוני אשלגן.
- מהן הדרישות מחומר המכיל יוני אשלגן העשוי לשמש למטרה זו?
- האם יש לך הצעות? פרט.

בפרק השני ראינו כי אחד המוצרים החשובים המתקבלים מים המלח הוא האשלג, KCl . זהו חומר גלם זול יחסית המתקבל בדרגת ניקיון גבוהה. חומר זה משמש יחד עם הנתרן הברומטי (המיוצר במפעל בתהליך שפרטנו קודם) כדי לייצר אשלגן ברומטי.

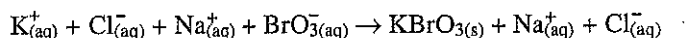
לפניך גרף המתאר את המסיסויות של החומרים השונים הקשורים לתהליך:



מסיסות כתלות בטמפרטורה

- כיצד תלוייה מסיסותו של הנתרן הברומטי בטמפרטורה?
- כיצד תלוייה מסיסותו של האשלגן הברומטי בטמפרטורה?
- באילו טמפרטורות קיים הבדל משמעותי במסיסויות של נתרן ברומטי ואשלגן ברומטי?
- כיצד תוכל לנצל הבדלים אלו במסיסויות כדי לייצר אשלגן ברומטי? הסבר.
- רשום ניסוח לתהליך שהצעת.

ממיסים במים נתון ברומטי ואשלגן כלורי (אשלג). תהליך ההמסה מתבצע תוך כדי חימום ל- 70°C – 80°C . לאחר סינון להוצאת אי-נקיונות, מקררים את התמיסה לטמפרטורה של 5°C – 10°C . בטמפרטורה זו שוקע האשלגן ברומטי, ואילו הנתרן הכלורי נשאר בתמיסה:



את האשלגן הברומטי מיבשים ומקבלים חומר גבישי לבן, שהוא המוצר הסופי.

- כיצד ניתן, לדעתך, לנקות את האשלגן הברומטי?
- כיצד ניתן, לדעתך, ליבש את האשלגן הברומטי?
- שרטט תרשים זרימה כללי לייצור אשלגן ברומטי.

הנתרן הברומטי והאשלגן הברומטי, שהם מוצקים גבישיים, נארזים בשקי פוליאתן (פוליאתילן) בתוך מכלים העשויים מקרטון דחוס. המכלים בגדלים שונים נארזים בקבוצות על גבי משטחי עץ.



מכלי תוצרת

האחסון נעשה תחת פיקוח מיוחד תוך שמירה על מרחק מחומרים מחזירים, שכן שני חומרים אלו הם חומרים מחמצנים חזקים.

התבסס על תכונות הנתרן הברומטי והאשלגן הברומטי וציין:

- אילו דרישות קיימות לדעתך באחסון חומרים אלו?
- אילו דרישות קיימות לדעתך בשינוע חומרים אלו?

ה.4 ייצור ברומו מתאן, CH_3Br (מתיל ברומיד)³

שם החומר: ברומו מתאן (מתיל ברומיד), CH_3Br

אכילוג:

גז רעיל, חסר צבע וריח בריכוזים נמוכים
 מסה מולרית: 95 גר"/מול
 טמפי' היתוך: -94°C
 טמפי' רתיחה: 3.5°C
 צפיפות: - הגז כבד מהאוויר פי 3
 - הנוזל כבד מן המים פי 1.73
 מסיסות במים: נמוכה מאד. 1.34 גר' ב- 100 סמ"ק מים (ב- 25°C).
 מסיסות בממסים אחרים: טובה מאד בממסים לא קוטביים.
 טובה מאד באתאנול, די אתיל אתר
 ואצטון.
 דליקות: לא דליק, אך מסוגל לבעור בטמפרטורה גבוהה.
 רעילות: רעיל ביותר. במיוחד בנשימה ובספיגה דרך העור.
 נזקם לכוויות חמורות בעור, עלול לגרום לנזקים בריאות,
 במערכת העצבים ובכליות. מתפרק מעל 400°C ומשחרר
 גזים רעילים.
 תגובות אופייניות:
 * מגיב עם קבוצות S-H בחלבונים תוך שחרור HBr
 * משתדך לגבי מגנזיום ואלומיניום
 * חשוד כפוגע בשכבת האוזון בסטרטוספירה**
 שימושים: חיטוי קרקע כנגד מזיקים
 חיטוי נפח של תוצרת חקלאית (ממגורות)
 מתילציה של תרכובות אורגניות

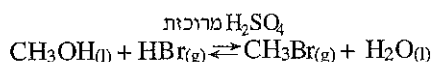
* זהו השם המקובל בתעשייה ולפיכך נשתמש בו גם אנו.
 ** במדינות מסוימות נאסר לשימוש

ברומו מתאן, CH_3Br , ניתן להפיק במספר דרכים עליהן למדת בפרק העוסק בתרכובות פחמן.

- מהם חומרי הגלם היכולים לשמש לייצור ברומו מתאן? פרט.
- רשום ניסוחים לתגובות האפשריות.
- באילו תנאים תתרחשנה התגובות שהצעת? פרט.
- נסה להשוות את הדרכים השונות שהצעת לפי אמות מידה רבות ככל האפשר, למשל: עלות המגיבים, עלות האנרגיה, הניצולת הצפויה ועוד.
- מזהם היתרונות ומהם החסרונות של כל אחת מהדרכים שהצעת?
- מהו התהליך המועדף לזעדת? נמק.

למרות שהמתאן הוא חומר זול יחסית למתאנול והברום זול יותר בהשוואה למימן ברומי בחרו במפעל "תרכובות ברום" להפיק את הברומו מתאן ממתאנול. הפקת ברומו מתאן ממתאנול מועדפת בגלל עלויות אנרגיה נמוכות יותר ושליטה טובה יותר על תוצר אחד בתהליך ההתמרה (המתרחש במגנזיום יוני) עם מימן ברומי בהשוואה לתהליך ההתמרה (המתרחש במגנזיום רדיקלי) בו אפשריים מספר תוצרים שלאחר מכן יש צורך להפרידם.

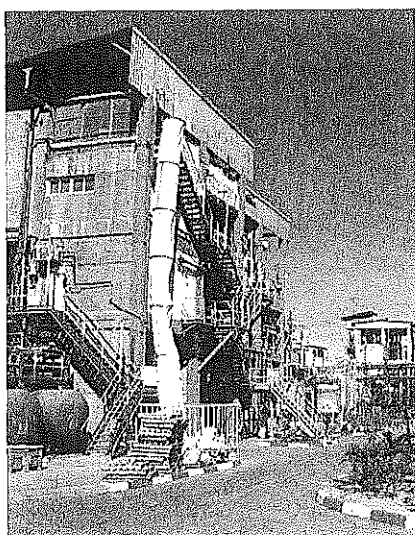
ההתמרה של קבוצת ה-OH במתאנול באטום ברום מתבצעת בנוכחות זרז חומצי:



בתגובה הישירה: $\Delta H < 0$

- אילו תנאי טמפרטורה יועדפו לקבלת ברומו מתאן? הסבר.
- באילו דרכים ניתן להגדיל את אחוז ההתמרה בתגובה? פרט.

שוב אנו רואים שהבחירה בין האפשרויות השונות היא תהליך מורכב בו נבחנים הבטים שונים ונערך מאזן של יתרונות וחסרונות. למרות שבתנאי התגובה יותר מ-95% של חומרי הגלם הופכים לתוצר, חלק הארי של התהליך הינו בעצם הפרדת הברומו מתאן הגולמי מחומרי גלם שלא הגיבו ומחומרי לוואי אחרים (שנפרט בהמשך) הנוצרים במהלך התגובה. לכל אורך תהליך הייצור מצוי הברומו מתאן במצב צבירה גזי ורק באחסון הוא נשמר במצב צבירה נוזלי.



מיתקן לייצור ברומו מתאן

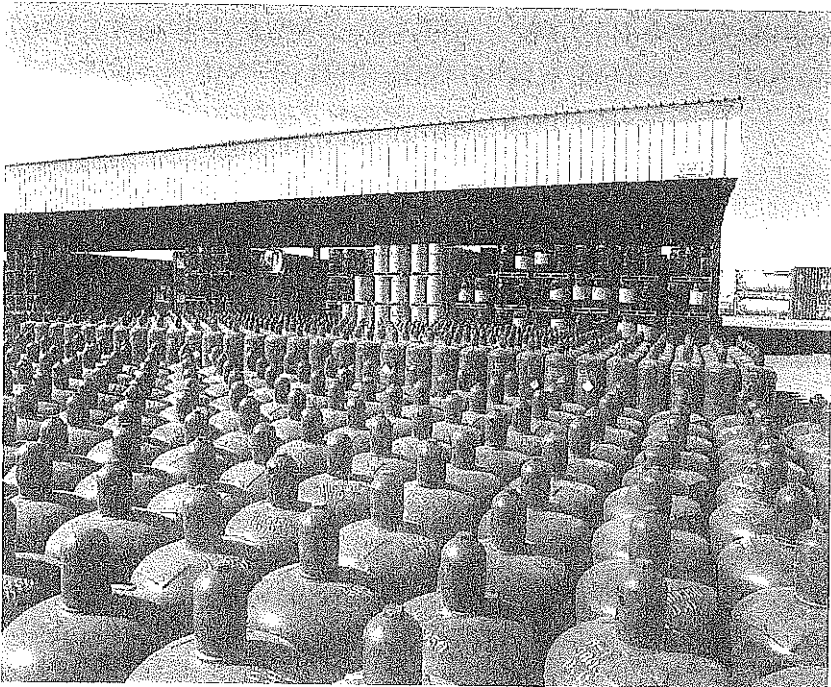
התבונן ב"כרטיס" הברומו מתאן וענה על השאלות הבאות:

- מדוע מצוי החומר במצב גזי לכל אורך התהליך?
- מדוע מנולים אותו לצורך איחסון?
- כל השלבים מתבצעים באופן רציף כאשר המערכת כולה פועלת תחת לחץ הנמוך מלחץ אטמוספרי.
- מהן, לדעתך, הסיבות לכך שהתהליך הוא רציף?
- מהן, לדעתך, הסיבות שהמערכת פועלת תחת לחץ נמוך?

תוכנן תהליך רציף מהסיבות הבאות:

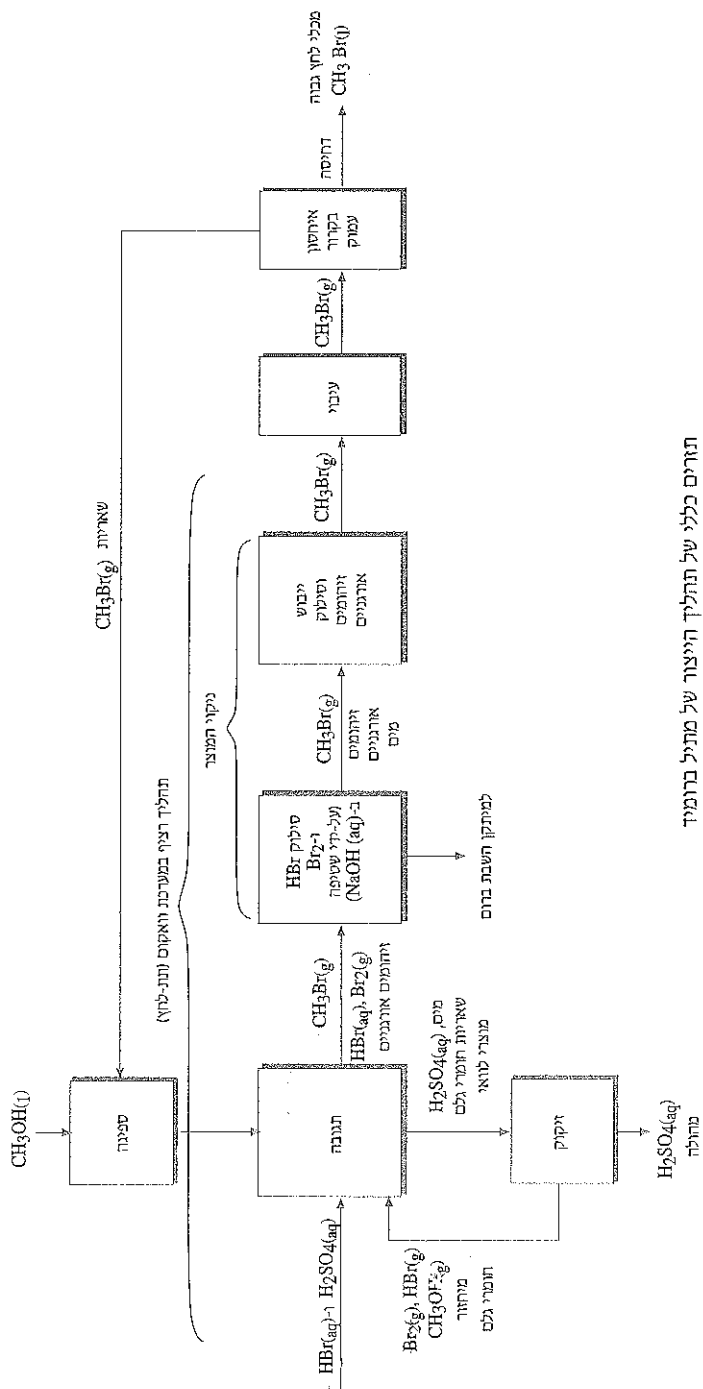
- הכמויות שנדרשו גדולות מאוד.
- ברומו מתאן הוא גז בתנאי התהליך ובאופן טבעי הוא נשאב לכל אורכה של מערכת הייצור.

השמירה על לחץ נמוך במערכת מהווה אמצעי בטיחות הנובע מכך שהברומו מתאן הינו חומר רעיל ביותר והוא מסוכן לנשימה אפילו בריכוזים נמוכים ביותר. המצב הגזי בו הוא מצוי לכל אורך התהליך מחייב שמירה מיוחדת על אטימות המערכת. כל דליפה עלולה להביא לפיזורו בסביבה ולגרימת נזק. לעומת זאת במידה ונוצר סדק או קיימת דליפה כלשהי במערכת בה נשמר תת-לחץ (וואקום), האוויר נשאב לתוכה והגז עצמו אינו דולף החוצה. הבקרה על התהליך מתוכננת כך שהגדלת כמות האוויר הנשאבת לתוך המערכת או העלאת הלחץ בה גורמת להתרעה מיידית ומאפשרת זיהוי מהיר של התקלה ותיקונה.



חיות מכלי ברומו מתאן

תזרים כללי של תהליך הייצור של מתיל ברומיד

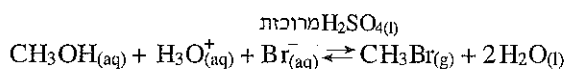


על פי הסכימה אנו רואים כי ניתן לחלק את תהליך הייצור של הברומו מתאן לארבעה שלבים עיקריים:

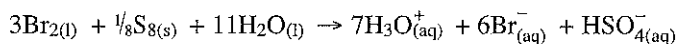
- תגובה
- ניקוי
- עיבוי
- איחסון ואריזה.

שלב א' – תגובה

המתאנול, המימן הברומי והחומצה הגפרתית, המשמשת כורז, הם למעשה החומרים הדרושים לתגובת ההתמרה בה מתחלפת הקבוצה הכוהלית במתאנול ביון ברום:



התהליך הוא, כאמור, אקסותרמי ולכן דואגים לקרר את מכל התגובה. במפעל "תרכובות ברום" לא משתמשים בתמיסת מימן ברומי מוכנה, אלא דואגים לאספקה מבוקרת של מימן ברומי במהלך התגובה באמצעות תגובה בין גופרית וברום, שניסוחה מופיע בפרק הראשון:



במקביל מקבלים בתגובה זו גם חומצה גופרתית.

מהי, לדעתך, הסיבה בגללה משתמשים בברום ובגופרית במקום ביומן ברומי ובחומצה גופרתית?

במקביל לתגובה העיקרית הרצויה מתפתחת שרשרת של תגובות צדדיות מתחרות, שהמידע עליהן איננו מלא, הגורמות להיווצרותם של חומרים אורגניים שונים המזהמים את התוצר. אילו תגובות עשויות להתרחש?

מכיון שהתגובה אינה הולכת עד תום וכן נוצרים בה, כאמור, חומרי לוואי אחדים, יש צורך להפריד את הברומו מתאן, הן מחומרי הגלם שלא הגיבו והן מחומרי הלוואי.

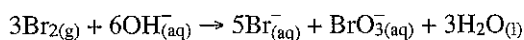
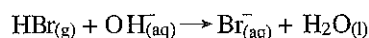
- כיצד ניתן להפריד את התוצר מהחומרים האורגניים המזהמים אותו?
- פרט מהם חומרי הגלם העשויים להמצא בתערובת התגובה וכיצד ניתן להפריד אותם מהתוצר?

שלב ב' – ניקוי

מכיוון שהברומו מתאן מצוי במצב גזי הוא נפרד באופן טבעי מהתמיסה וממשיך לזרום לשלבים הבאים של התהליך. הוא סוחף איתו ברום, מימן ברומי וזיהומים אורגניים ולכן נקרא מוצר גולמי. כדי לקבל ברומו מתאן נקי על המוצר הגולמי לעבור תהליכים שבהם מורחקים מגיבים שלא הגיבו ומתבצעים תהליכי ניקוי על-ידי שטיפות, זיקוקים, ומיצויים בהתאם לצורך.

לדוגמא:

שטיפה עם תמיסת נתרן הידרוקסידי, המוזכרת בסכימה, שמטרתה לנטרל את המימן הברומי ולהוציא את עודף הברום:

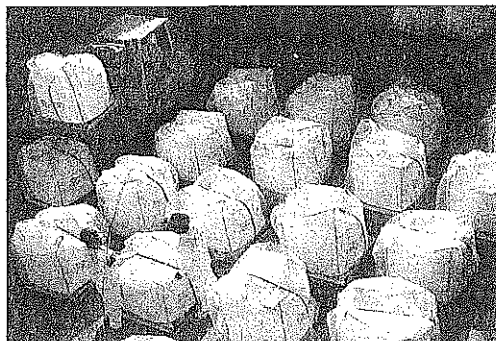


שטיפה זו אמנם סופגת את כל שאריות המימן הברומי והברום, אך מאידך גורמת לכך שבמוצר יהיו אדי מים. כדי למנוע נוכחות מים במוצר הנקי חייבים לבצע תהליך ייבוש.

עיון ב"כרטיס" של הברומו מתאן ובחן את תכונותיו.

- מהם, לדעתך, אמצעי הייבוש בהם ניתן להשתמש על-מנת לסלק את שאריות המים מן המוצר הסופי?
- כיצד ניתן לסלק את הזיהומים האורגניים?

התמיסה המכילה חומצה גפרתית וחומרי גלם שלא הגיבו עוברת למיגדל זיקוק. חומרי הגלם מופרדים מהחומצה הגופרתית וממוחזרים לתגובה. החומצה המתקבלת היא למעשה תוצר לוואי ויכולה לשמש למטרות שונות, הן במפעל והן מחוצה לו.



"איזוטנק" המכיל מתיל ברומיד

לאחר השטיפות ושאר הפעולות מתקבל ברומו מתאן נקי, אך על מנת לאחסן אותו בצורה יעילה ולצמצם את נפחי האחסון צריך לעבותו.

לשם כך מקררים את הברומו מתאן. הקירור מתבצע במעבה בשני שלבים. בשלב הראשון מקררים ל- 20°C באמצעות תמלחת קרה ובשלב השני מקררים קירור עמוק יותר ל- 40°C באמצעות יחידות קירור של אמוניה. באופן כזה מבטיחים ניזול מוחלט של המוצר וקבלת כמות אדים מזערית.

כדי להבטיח באופן מוחלט שלא תהיה פליטה של ברומו מתאן לסביבה מחברים למערכת הקירור העמוק עמודת ספיגה שתפקידה לקלוט את הגזים במידה ואכן לא הכל הופך לנוזל. עמודת הספיגה תוכננה באופן מתוחכם וחשכוני כך שהמתאנול, שהוא למעשה חומר גלם, ישמש כתמיסת הספיגה. המתאנול מוזרם לראש העמודה והזרם הגזי מוזרם מתחתית העמודה.

- ציין שני יתרונות של השימוש בעמודת ספיגה המכילה מתאנול.
- מוהי הסיבה שהמתאנול מוזרם מלמעלה ואילו הזרם הגזי מוזרם מלמטה?

שלב ד' – אחסון ואריזה

לאחר העיבוי מוזרם הברומו מתאן הנוזלי אל מכלי אחסון בעלי דופן כפולה המקוררים אף הם על-ידי תמלחת קרה הזורמת באופן קבוע בחלל החיצוני וכך שומרים על טמפרטורה של 20°C -. הטמפרטורה הנמוכה נשמרת על ידי שכבת בידוד העוטפת את המכלים ומונעת חימום התמלחת על-ידי הסביבה. כל זאת כדי למנוע סכנה של דליפת החומר הרעיל החוצה במידה ויש פגם במכל.

אריזת הברומו מתאן למשלוח נעשית בלחץ לתוך "איזוטנקים" ומכלים בגדלים שונים (לפי דרישת הלקוחות) תוך שמירה על כך שהחומר יהיה מוחזק עד לשימוש במצב נוזלי. ה"איזוטנקים" והמכלים בנויים כך שהם מסוגלים לעמוד בלחץ גבוה של 15 אטמוספירות או יותר, אך כאמצעי ביטחון המילוי הוא בלחץ של כ-6 אטמוספירות בלבד.

- לחץ הגז במכלים תלוי בטמפרטורה. הסבר.
- הסבר מדוע לא ממלאים עד ללחץ של 15 אטמוספירות.

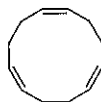
בדרך כלל מוסיפים לברומו מתאן, שהוא גז חסר צבע וריח, חומר הנקרא כלורו פיקרין. חומר זה הוא בעל ריח חריף ביותר וניתן לזהויו מידי גם בריכוזים מאד נמוכים. את הכלורו פיקרין מוסיפים גם לגז בישול ומכאן ריחו החריף שבוודאי מוכר לך. באמצעות חומר זה יכול המשתמש לקבל התרעה במקרה של דליפה ולהגן על עצמו ועל סביבתו מפני סכנת הרעלה.

הן מיתקני הייצור והן מיתקני המילוי מוקפים בגלאים מיוחדים הרגישים לברומו מתאן ופועלים באופן רצוף לזיהוי דליפות. גלאים אלו מחוברים לאזעקה ולאמצעי מיגון אחרים המונעים את פיזור החומר בסביבה.

לסיכום:

בניגוד לכל החומרים האנאורגניים שאת תהליכי הייצור שלהם הצגנו בפרק זה, הברומו מתאן (מתיל ברומיד) הוא הדוגמא היחידה לרכובת פחמן אותה מייצרים במפעל. קבוצת הברום מייצרת עוד חומרים אורגניים רבים לשימושים מגוונים, אך מרבית התהליכים מורכבים וחורגים מתוכנית הלימודים בכימיה ולכן לא נעסוק בהם בפרק זה⁴.

ברוב המקרים מדובר בתהליכי התמרה, כמו זה שתואר בתהליך הייצור של ברומו מתאן, וחלקם מבוססים על תהליכי סיפוח של ברום לקשר כפול. דוגמא לכך היא תהליכי הייצור של 1, 2, 5, 6, 9, 10 - הקסא ברומו ציקלו דודקאן, HBCD, בו גשנו כבר בפרק הראשון. חומר זה מקבלים על-ידי סיפוח של 3 מול ברום ל-1, 5, 9 - ציקלו דודקאטריאן⁵:



1, 5, 9 - ציקלו דודקאטריאן

- נסח את התגובה לקבלת HBCD.
- האם נדרשים תנאים מיוחדים לביצוע התגובה לקבלת HBCD?
- כיצד ניתן לודא שהתגובה הסתיימה?
- באילו אמצעי בטיחות יש, לדעתך, לנקוט? פרט.

במפעל "תרכובות ברום" מייצרים עוד תרכובות רבות שלהן תהליכי ייצור מעניינים לא פחות. בסה"כ מייצרים בקבוצת הברום כ-70 תרכובות, חלקן ברמת-חורב וחלקן במפעל בהולנד ובמפעלי בת אחרים. חלק מתרכובות אלו הן מוצרים לשימוש וחלק מהן מהוות "חומר גלם" לייצור תרכובות מסובכות יותר. כמו כן מייצרים במפעל תרכובות שאינן מכילות ברום, אך משתמשים בברום כדי לייצר אותן. ניסינו להביא בפרק זה מספר תהליכים חשופים (הן מתחום התרכובות

4 דוגמאות למוצרים נוספים ותכונותיהם ניתן לראות באתר האינטרנט של קבוצת הברום: <http://www.deadseabromine.com> (products)

5 הצגה מרחבית מדויקת של המולקולה, שבה הקשרים הכפולים הם ציס, טרנס, טרנס בהתאמה תוכלו לראות באתר האינטרנט שכתובתו ניתנה בעמ' 27.

האנאורגניות והן מתחום התרכובות האורגניות) ולהקיף עד כמה שאפשר את העקרונות החשובים בתעשיית הברום ותרכובותיו. מדוגמאות אלו נוכל ללמוד על:

- עקרונות כלליים בתכנון, הקמה והפעלה של מפעל כימי אלו מיתקן כימי כלשהו.
- בעיות המלוות תהליכי ייצור שונים.
- פתרונות שונים שניתן ליישם כדי לשמור על יעילות, בטיחות ועל איכות הסביבה.

הרעילות מהווה בעייה בתהליכי הייצור, האחסון, ההובלה והשימוש של הברום וחלק מתרכובותיו אך עלולות להתווסף בעיות נוספות כמו יכולת שיתוך, כושר חמצון גבוה, חוסר יציבות באור או בחום, היגרסקופיות וכדומה. כל הבעיות הללו מחייבות מציאת פתרונות מתאימים בכל השלבים, החל מאחסון חומרי הגלם ועד להובלת המוצרים אל הלקוחות ולעיתים אף לאחר גמר השימוש בהם.

לפניך רשימה של בעיות שונות העולות להתקיים עבור תהליכים או חומרים בתעשיית הברום ותרכובותיו או בתעשיות אחרות. תן דוגמאות לחומרים שביחס אליהם קיימות בעיות אלו ולפתרונות שכוחים המיושמים בתעשייה כדי להתגבר עליהן.

בעיות	פתרונות
חומרים רעילים	
לדוגמא:	
חומרים גורמי שיתוך	
לדוגמא:	
חומרים פציצים	
לדוגמא:	
חומרים לא יציבים באור או בחום	
לדוגמא:	
חומרים היגרסקופיים	
לדוגמא:	

הבא דוגמאות לבעיות נוספות ולפתרונותיהן.

מושגים של מדת בפרק ה

ערך מוסף כלכלי של המוצר: מחירו של המוצר ביחס למחיר חומרי הגלם. מחירים של מוצרים מתוחכמים, הדורשים ידע רב לשם ייצורם, גבוה יחסית למחיר חומרי הגלם. במקרים אלו למוצרים יש ערך מוסף גבוה.

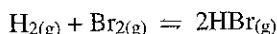
השבה: תהליך של חידוש החומר והבאתו חזרה לצורתו הפעילה. במקרים רבים ההשבה מלווה בפעולות של זיקוק, שטיפה וכד', שבעזרתן מנקים את הזיהומים הנספחים לחומר.

גיבוש: שקיעת גבישי מוצק מתוך תמיסה רוויה.

גיוש: יצירת גושים בחומר.

שאלות לפרק ה

1. תהליך הייצור של מימן ברומי, $\text{HBr}_{(\text{aq})}$, במפעל "תרכובות ברום" מבוסס על התגובה הבאה:



- המימן הברומי משווק כתמיסה מימית שריכוזה 48% או 62%.
התייחס לתרשים הזרימה בעמ' 152 וענה על השאלות הבאות:
- א) מהם חומרי הגלם לייצור מימן ברומי ומה מקורם? האם קיימים תהליכים מקדימים? פרט.
- ב) מהם התנאים השוררים במכל התגובה (שלב א')? התייחס לתנאי הלחץ, הטמפרטורה וריכוזי המגיבים. פרט והסבר מדוע נבחרו תנאים אלו דוקא.
- ג) מהם החומרים היוצאים ממכל התגובה? נמק. בשלב ג' עוברים הגזים שיצאו מהשלב הקודם לתוך צינורות עם דפנות כפולים בהם זורמים מים.
- ד) מהו התהליך המתרחש ומדוע מבצעים אותו?
- ה) מדוע משתמשים במערכת צינורות עם דפנות כפולים ולא במכל גדול עם מים?
- ו) האם ניתן לשמור תמיסה של מימן ברומי במכל עשוי פלדה? נמק.

2. השאלה דנה בייצור תמיסת ליתיום ברומיד המשמשת לצורכי קרור במערכות מיוזג אוויר (השאלה מומלצת לעבודה ולדיון בקבוצות).
- א) הצע לפחות שלוש דרכים המתבססות על חומרי גלם שונים להפקת

- תמיסת ליתיום ברומי. נסח את התגובות.
- (ב) הצע קריטריונים על פיהם תוכל להשוות את השיטות שהצעת על מנת לבחור את התהליך הכדאי ביותר.
- (ג) השווה את שלושת התהליכים על פי הקריטריונים שקבעת.
- (ד) השווה את תשובתך עם תשובותיהם של תלמידים (או קבוצות תלמידים) אחרים ונסו יחד לבחור את התהליך הכדאי ביותר מבין כל התהליכים שהוצעו.
- (ה) שרטט תרשים זרימה לתהליך שנבחר כדי לייצר תמיסת ליתיום ברומיד.
- (ו) מהן, לדעתך, הדרישות לגבי חומרי המבנה עבור המיתקן על חלקיו השונים ומכלי התוצרת.
- (ז) מהם האמצעים הנדרשים, לדעתך, לצורך שמירה על הבטיחות בתהליך ייצור תמיסת הליתיום ברומיד?
- (ח) האם קיימות בעיות סביבתיות בתהליך? אם כן, מהן וכיצד ניתן לפתור אותן?
- (ט) כיצד ניתן לדעתך להעלות את הניצולת הכוללת של תהליך ייצור תמיסת ליתיום ברומי?
4. סידן ברומי משווק בשתי צורות: כתמיסה מימית בריכוז 52% וכמוצק. בסעיף ה-2 מתוארות שני שיטות לייצור סידן ברומי, CaBr_2 . בשתיהן משתמשים בתמיסת מימן ברומי, $\text{HBr}_{(\text{aq})}$, אך חומר הגלם השני שונה בשתי השיטות:
- בשיטה I משתמשים בסיד כבוי, $\text{CaOH}_{2(\text{s})}$.
- בשיטה II משתמשים בגיר, $\text{CaCO}_{3(\text{s})}$.
- (א) נסח את שני התהליכים.
- (ב) ציין מהם היתרונות והחסרונות של הפקת תמיסת $\text{CaBr}_{2(\text{aq})}$. בשיטה II לעומת הפקתה בשיטה I.
- (ג) מהם היתרונות והחסרונות של שיווק הסידן הברומי כתמיסה לעומת שיווקו כמוצק.
- (ד) כמה טון גיר, $\text{CaCO}_{3(\text{s})}$, דרושים כדי לקבל 1 טון תמיסת $\text{CaBr}_{2(\text{aq})}$ בריכוז של 52%? הנח שההמרה היא 100% והניצולת היא 95%.
- (ה) ציין שתי סיבות אפשריות לכך שהניצולת קטנה מ-100%.
- (ו) בפרק הראשון (עמ' 9) מסופר על שינוע ברום בצורת תמיסת סידן ברומי בימי מלחמת העולם השנייה.
- הצע תגובה באמצעותה ניתן להפיק ברום, $\text{Br}_{2(\text{l})}$, מתמיסת סידן ברומי, $\text{CaBr}_{2(\text{aq})}$.
5. ב"תרכובות ברום" מייצרים 1 - ברומו בוטאן. חומר זה משמש כחומר ביניים לייצור תרכובות שונות. ניתן לייצר אותו בשתי שיטות:
- I מהכוהל המתאים.
- II מהאלקאן המתאים.

- (א) נסח את תגובות I ו-II, ופרט את התנאים הדרושים לביצוען.
- (ב) איזו משתי השיטות מתאימה, לדעתך, יותר לייצור 1-ברומו בוטאן בתעשייה? נמק.
- (ג) בתהליך I התקבל 1-ברומו בוטאן בהמרה של 90% ובניצולת של 85%. חשב כמה טון של החומר התקבלו אם הוכנסו למיתקן התגובה 226 טון של כוחל (המרכיבים האחרים הוכנסו בעודף).
- (ד) אילו סיבות יכולות לגרום לכך שההמרה נמוכה מ-100%?
- (ה) אלו סיבות יכולות לגרום לכך שהניצולת נמוכה מ-100%?

6. ייצור נתון ברומטי נעשה בשיטה המשלבת בין תגובה של ברום, $\text{Br}_2(l)$, עם תמיסת נתון הידרוקסיד, $\text{NaOH}(s)$, לבין אלקטרוליזה.

- (א) מהי מטרת האלקטרוליזה?
- (ב) האם האלקטרוליזה משפיעה על ההמרה? הסבר.
- (ג) האם האלקטרוליזה משפיעה על הניצולת הכוללת של התהליך? הסבר.
- (ד) מדוע אי אפשר לייצר בשיטה זו גם אשלגן ברומטי? נמק.

7. ב"תרכובות ברום" מייצרים אמון ברומי מוצק ובתמיסה בתהליך רציף באמצעות תגובה בין ברום ואמוניה.

- (א) נסח את התגובה.
- (ב) באלו דרכים נוספות ניתן לייצר אמון ברומי. רשום ניסוחים.
- (ג) מדוע לדעתך נבחרה דווקא השיטה המתוארת בסעיף א'?
- (ד) נסה לתכנן תרשים זרימה לייצור אמון ברומי.
- (ה) מהו הדרישות מחומרי המבנה בחלקים השונים של מיתקן זה? פרט.
- (ו) נסה להציע דרכים לשמירה על הבטיחות התהליכית וחומרי נטרול מתאימים.
- (ז) מהן הדרישות מחומרי המבנה עבור אמצעי האיחסון של התוצר?

8. בתהליכי הייצור המתוארים בפרק זה משתמשים בתהליכי הפרדה שונים. הצג את תהליכי ההפרדה בטבלה המסכמת הבאה:

תהליך הייצור	החומר המופרד והרכב הנתערבת ממנה הוא מופרד	שיטת ההפרדה	העקרונות עליהם מבוססת שיטת ההפרדה

9. בתהליכי הייצור המתוארים בפרק זה משתמשים לצורך בניית המיתקנים בחומרי מבנה שונים. הצג בטבלה המסכמת את החומרים הייחודיים וציין את הסיבות לבחירתם:

תהליך הייצור	השלב בתהליך	חומר המבנה	השיקולים המשפיעים על בחירת חומר המבנה

10. ליד מיתקני הייצור במפעל "תרכובות ברום" מצויים כאמצעי בטיחות חומרי נטרול שונים. הצג בטבלה המסכמת דוגמאות לחומרי נטרול שונים וציין מהם החומרים שאותם הם אמורים לנטרל ואת השיקולים המשפיעים על בחירתם כחומר מנטרל:

תהליך הייצור	החומר המנטרל	החומר המנטרל	השיקולים המשפיעים על בחירת חומר הניטרול

11. במיתקני הייצור השונים ננקטים אמצעים שונים של בטיחות כדי למנוע תקלות ונזקים לאדם ולסביבה. ציין בכל תהליך מהן הסכנות, מהם אמצעי הבטיחות:

תהליך הייצור	הסכנה	חומר המבנה	אמצעי הבטיחות במיתקן

12. לצורך אחסון המוצרים במפעל "תרכובות ברום" משתמשים במכלים או באמצעים אחרים העשויים מחומרי מבנה שונים. הצג בטבלה המסכמת את חומרי הייחודיים וציין את הסיבות לבחירתם:

החומר המאוחסן	אופן האחסון	חומר המבנה	השיקולים המשפיעים על בחירת חומר המבנה

13. במקומות אסטרטגיים שונים בארץ, בנמלים בצירי הובלה חשובים וכד' מצויות עמדות נטרול המכילות אמוניה וסיד.
(א) מדוע יש צורך בעמדות אלו?
(ב) הכן רשימה של כל החומרים הניתנים לטיפול על ידי חומרים אלו.

פרק ו' שימושי הברום ותרבותיו

כללי

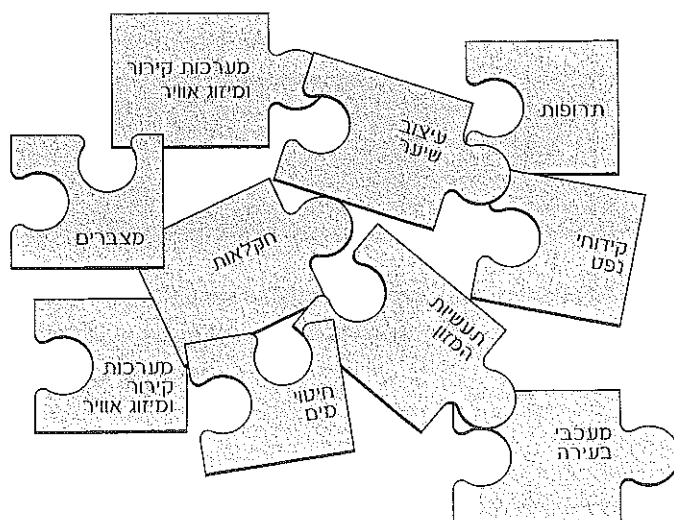
קיימים מספר שימושים לברום כיסוד, אך מרבית השימושים של הברום הם דוקא בצורת תרכובות שונות, שחלק מהן הכרנו בפרקים הקודמים.

נציין רק כמה מהשימושים הנפוצים בברום כיסוד:

- טיפול שטח בגומי המשמש לצמיגים במכוניות.
 - ניקוי משטחים של מעגלים מודפסים.
 - חיטוי בריכות שחייה (שימוש מוגבל) ומי-קרור בתעשייה.
- רוב הברום המופק בעולם משמש כחומר מוצא לתרכובות בעלות שימושים מגוונים. ניתן אף להגדיל ולומר, כי אין כמעט תחום בתחומי חיינו אשר אין בו שימושים לתרכובות ברום.

זהו עולם של תרכובות שנמצא בהתפתחות מתמדת ויש להניח כי תרכובות נוספות תיכנסנה לתחומים רבים נוספים ותאפשרנה שימושים חדשים.

בפרק זה נעמוד על השימושים החשובים ביותר וננסה להסביר את הקשר בין מבנה התרכובות ותכונותיהן לבין השימוש שנעשה בהן.



1.1 – תרכובות ברום בחקלאות

בעיית המזון בעולם

במשך כל הדורות ניסו החקלאים להשיג יבולים טובים יותר ומיגוון גידולים גדול יותר כדי לספק את תצרוכת המזון ההולכת וגדלה של המין האנושי. הגידול באוכלוסיית העולם והירידה בשטחים החקלאיים המעובדים הביאו להחרפת הבעיה של אספקת מזון בעולם המודרני. תופעה זו חריפה במיוחד במדינות המתפתחות שבהן קיימת צפיפות אוכלוסין גבוהה ורבים בהן רעבים ללחם או סובלים מתת-תזונה. לעומת זאת במדינות המפותחות גוברת הדרישה לגיוון הגידולים ולשיפור היבולים ואיכותם. כדי לפתור בעיות אלו יש למצוא דרכים להעלאה משמעותית של היבולים ליחידת שטח מעובד.

בין הגורמים הרבים הקובעים את כמות היבול¹ ואיכותו נודעת חשיבות רבה לתחום של הגנת הצומח. כך החלה להתפתח תעשיית חומרי ההדברה שמטרתם להדביר מזיקים ומחלות הפוגעים בגידולים חקלאיים ולשפר את איכות היבולים. במקביל החלה להתפתח תעשיית הברום ונתגלו תכונות ההדברה של כמה מתרכובותיו. תרכובות אלו מהוות עד היום חלק ממיגוון חומרי ההדברה המשמשים להגנת הצומח מפני נגעי קרקע².

החקלאות המודרנית והגדלת היבולים גרמו להיווצרות צרכים נוספים של אחסון לזמן ארוך של תוצרת חקלאית יבשה (כגון גרעינים וכותנה בממגורות) או טרייה (כגון פירות וירקות בהובלה ימית). נעשה חיפוש אחר חומרים שונים שידבירו את המזיקים העלולים לפגוע בשמירה על איכות התוצרת לאורך זמן.

כללית ניתן לחלק את תחום ההדברה לשלושה תחומים עיקריים:
- הדברת נגעים של חלקי הצמח שמעל הקרקע (עלים, פירות וכדומה)
- הדברת נגעים בקרקע
- הדברת מזיקים באחסון.

בפרק זה נתרכז בעיקר בנושא הדברת נגעי קרקע ומזיקים באחסון, שבו לתרכובות הברום, ובמיוחד למתיל ברומיד, יש תפקיד נכבד ביותר החל משנות השלושים של המאה ה-20.

1 להרחבה עיין בספר: לא על הדשן לבדו, סיפורו של מפעל חיפה כימיקלים. מאת מירי קסנר, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע.

2 נגעים- גורמי מחלות, מזיקים ועשבים.

הדברת נגעים

תחום הדברת הנגעים הפך למדע בפני עצמו ואי אפשר לתאר את החקלאות המודרנית בלעדיו.

הדברת נגעים מעל הקרקע:

זהו תחום רחב ביותר ולא נוכל להרחיב עליו את הדיבור בספר זה. במשך השנים חלה התפתחות עצומה בחומרים המשמשים למטרה זו. ריסוס שטחים חקלאיים בחומרי הדברה הפך לחלק משגרת פעולותיו של החקלאי. רוב החומרים שמשמשים למטרה זו משפיעים על טווח מוגדר של נגעים. בין מאות החומרים המיועדים לתחום זה יש מספר קטן יחסית של תרכובות ברום.

הדברת נגעי קרקע:

נגעי הקרקע העיקריים הם:

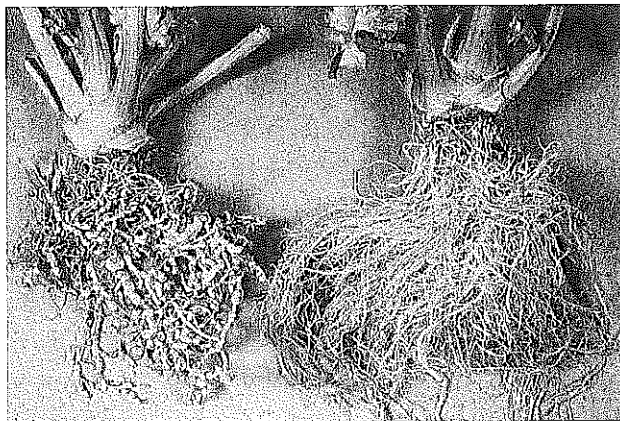
נמטודות - תולעים מיקרוסקופיות הניזונות משורשים ופגיעתן בצמח מקצרת את חייו ומביאה לניוונו.

פטריות קרקע - גורמות לרקבון השורש ולמחלות נבילה.

עשבי בר - מתחרים בצמח בצריכת חומרי מזון ומים ומשמשים לעיתים גורמים בהעברת מחלות ומוזיקים לשטח הגידול.

צמחים טפיליים - צמחים הנטפלים לשורשי צמחים אחרים (פונדקאים), מוצצים את מזונותיהם וגורמים לניוונו.

חרקי קרקע - מכרסמים בשורשים ומביאים לניוונו הצמח או אף למותו.



מערכת שורשים פגועה על ידי נגעי קרקע

מערכת שורשים מפותחת

מכיוון שנגעים אלו מצויים בתוך הקרקע ויש קושי רב בהדברתם, נראה היה כי הפיתרון המיטבי יושג על-ידי השמוש בחומרים נדיפים המצויים במצב גזי אשר יתפשטו בקרקע ויבואו במגע עם כל חלקיקיה (לפיזור הגז בקרקע נהוג לקרוא "איוד" הקרקע). רצוי שהחומרים יהיו בעלי טווח פעולה קטלני רחב ככל האפשר כנגד נגעי הקרקע, ובעלי תכונות פיסיקליות וכימיות המקנות כושר חדירה (דיפוזיה) רב לתוך הקרקע.



צמח שנבל כתוצאה ממחלות קרקע

הדברת מזיקים באחסון:

אחסון לזמן ארוך של תוצרת חקלאית יבשה או טרייה דורש טיפול מתאים כנגד מזיקי אחסון העלולים לפגוע באיכותה. כך הדבר באחסון בממגורות וגם כמובן בייצוא של תוצרת חקלאית לסוגיה. ללא טיפול מוקדם על-ידי חומרי הדברה קיימת בעייה למדינות כמו תאילנד, סין, וויאטנם ואחרות לייצא כמויות גדולות של אורז למערב והוא עלול להגיע כשחלקו או רובו מקולקל ואינו ראוי לעיבוד. באופן דומה חייבים לחטא ממזיקים גרעינים למיניהם, אגוזים, ועוד. גם תוצרת חקלאית המיועדת ליצוא בהובלה ימית חייבת לעבור טיפול מתאים כדי לשמור על איכותה. שרותי ההסגר של מדינות מסויימות, כמו ארצות הברית ואוסטרליה, מקפידים על הדברת כל התוצרת החקלאית המיובאת (כולל פירות וירקות) והן מחייבות חיטוי מוקדם של תאי האחסנה באוניות. גם לשימוש זה יש צורך בחומרי הדברה שהם גזים בטמפרטורה המתאימה וכמו כן בעלי טווח פעולה רחב ככל האפשר.

תרכובות ברום כחומרי הדברה

ב-1925 נעשה לראשונה השימוש ב-1, 2 דו-ברומו אתאן (EDB) כמדביר חרקים באחסון גרעיניים. לאחר שהוכחה יעילותו, שימש במשך שנים רבות להדברת נגעים בקרקע. מכיוון שתהליך הייצור של EDB איננו מסובך והוא נחשב לחומר זול יחסית, יכול היה חומר זה לפתור ביעילות רבה במשך תקופה ארוכה את בעיית מזיקי הקרקע ולהביא לשיפור היבולים.

עיין ב"כרטיס" ה- EDB וענה על השאלות הבאות:

- מהן התכונות שעשו את ה-EDB ליעיל לצורך הדברת מזיקי קרקע?
- האם ה-EDB מתאים לכל סוגי האקלים? נמק.
- מהן הסיבות שהביאו, לדעתך, להגבלת השימוש ב-EDB לצורכי הדברה?

על סיפור "עלייתו וירידתו" של ה-EDB כתוסף לדלק קראת בוודאי בפרק הראשון. זוהי דוגמה מאלפת לחומר אשר השימוש בו היה נפוץ ורחב, ועם השנים דעך באופן משמעותי במרבית הארצות בגלל המודעות הגוברת והולכת לשמירה על איכות הסביבה. ב-1983 החליטה הרשות לאיכות הסביבה בארה"ב לאסור את השימוש ב-EDB לצורכי הדברה בגלל מימצאים שהראו כי הוא חשוד כחומר מסרטן ובבדיקות נמצא כי הוא חלחל (בריכוזים קטנים) למי-תהום. כיום משמש ה-EDB בחלק מהארצות המפותחות רק בפיקוח וכשאין לו תחליף, ובמספר ארצות מתפתחות משמש עדיין ה-EDB גם לאיוד קרקע נגד נמטודות.

ב-1932 תוארו לראשונה תכונותיו של ברומו מתאן (או כפי שקרוי מתיל ברומיד), $\text{CH}_3\text{Br}_{(g)}$, כמדביר רב-צדדי של נגעים בקרקע ובסחורות מאוחסנות.

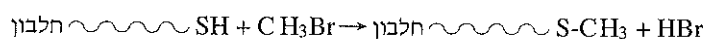
עיין ב"כרטיס" המתיל ברומיד בעמ' 175 וענה על השאלות הבאות:

- מהן התכונות העושות את המתיל ברומיד יעיל לצורך הדברת נגעי קרקע? הסבר.
- האם המתיל ברומיד מתאים לכל סוגי האקלים? נמק.

מתיל ברומיד החל תופס את מקומו של ה-EDB כמדביר נגעים למרות מחירו הגבוה יותר. מהר מאד הפך לחומר העיקרי המשמש למטרה זו, הן בארצות המפותחות והן בארצות המתפתחות.

אם נתבונן ב"כרטיס" המתיל ברומיד נוכל לראות את הקשר הישיר בין תכונותיו ויתרונות השימוש בו:

- א. בעל טמפרטורת רתיחה נמוכה ולפיכך פעיל כגז גם בטמפרטורות נמוכות יחסית ומסוגל לחדור לקרקע לעומק ניכר.
- ב. מתנדף מהר מאוד מהקרקע או מהסחורה המאויידת, ובכך מאפשר זריעה או שתילה כמעט מידיים בקרקע, או שימוש מידי בסחורה המאויידת. תכונה זו בלעדית למתיל ברומיד ולא קיימת בתחליפיו.
- ג. מתיל ברומיד מגיב עם חלבונים וביתר דיוק עם קבוצת ה-S-H שבמולקולות הציטטאין. קבוצת המתיל מתקשרת לאטום הגפרית (תגובת מתילציה) תוך כדי שיחרור מימן ברומי. כתוצאה מכך חל שיבוש בפעילות החלבונים, ובמיוחד חלות הפרעות בתהליך הכפלת ה-D.N.A. תכונה זו מקנה לחומר כושר קטילה רחב ביותר.

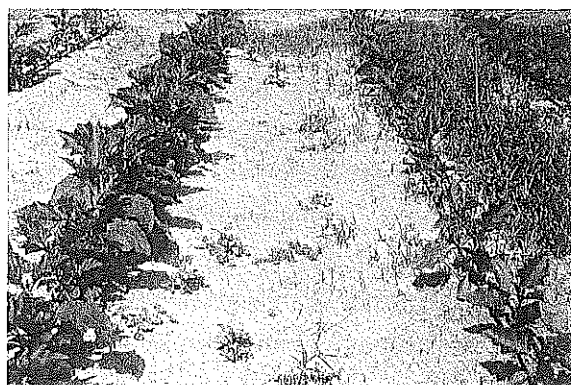


- ד. בגלל מנגנון הפעולה, הגורם לפגיעה ישירה בתהליך ההתרבות של הנגעים, לא מתפתחת נגדו תנגודת ולא מתפתחים זנים העמידים בפניו.
- ה. המימן הברומי שנוצר הוא גז בעל מסיסות גבוהה במים ומגיב עם בסיסים בקרקע. יוני הברום המתקבלים אינם מהווים בעייה עבור מרבית הגידולים החקלאיים, ובמקרים הבודדיים בהם קיימת רגישות מיוחדת שוטפים את הקרקע לפני השתילה. גם ריכוז יוני הברום בתוצרת החקלאית לסוגיה אינו עולה על המותר על פי התקנים המקובלים של שירותי הבריאות.

בגלל יתרונותיו הבולטים של המתיל ברומיד בהשוואה לחומרים אחרים³ שהיו בשוק, ובמיוחד ביחס ל-EDB, הלך והתרחב השימוש בו וכבש לאט לאט את התחום של הדברת הנגעים בקרקע ובתוצרת חקלאית מאוחסנת. יתרונו הברור של המתיל ברומיד הוא ביעילותו הגבוהה גם בטמפרטורות נמוכות. על אף ההתקדמות בידע החקלאי מאז החל השימוש במתיל ברומיד לפני כ-60 שנה, לא נמצא לו עדיין תחליף בעל יעילות דומה. מתיל ברומיד החל לתפוס מקום במערך הייצור של חברת הברום ב-1961, כאשר

3 חומר מתחרה למתיל ברומיד, למטרות חיטוי באחסון אך בעל חסרונות רבים יותר הינו האלומיניום פוספיד, $\text{AlP}_{(6)}$, המשחרר גז פוספין PH_3 , ומשמש לאיוד באופן דומה למתיל ברומיד. חסרונו הבולט ביותר הוא התנגודת שמפתחים נגדו מזיקים כתוצאה ממנגנון פעולה אחר.

הוחלט על הקמת מפעל "תרכובות ברום". הידע לתהליך הייצור של מתיל ברומיד נרכש ממפעל "אגן", שהיה אז מפעל קטן באבו-כביר, וייצר בערך 10 טון לשנה. זו היתה ההערכה לגודלו של השוק בארץ והחומר היה מיועד בעיקר לשימושים חקלאיים. בעת הקמת "תרכובות ברום" היו קיימות תוכניות לייצוא מתיל ברומיד לברזיל, ולכן הוחלט להקים מיתקן גדול יותר שייצר 900 טון לשנה (הכמות המשוערת לצרכי ייצוא). התוכנית למכור מתיל ברומיד לברזיל לא יצאה בסופו של דבר לפועל. לעומת זאת התפתחו מאוד השימושים החקלאיים שלו, הצריכה העולמית של המתיל ברומיד עלתה מדי שנה והביקוש לחומר הלך וגדל במיוחד במדינות המתפתחות.



שדה שחלקו השמאלי עבר חיטוי על-ידי מתיל ברומיד וחלקו הימני לא עבר חיטוי

- בגלל חשיבותו של מוצר זה מחד, והבעיות הרבות הכרוכות בשימוש בו מאידך, ראתה הנהלת קבוצת הברום הכרח להקים מחלקה מיוחדת אשר תהייה אחראית על היישום בשטח. לצורך זה הוקמה בשנת 1962 מחלקה חקלאית שמטרתיה:
- איסוף ידע ופיתוח שיטות להפעלת החומר בשטח, כגון: הזמן המתאים לטיפול, הכמות המתאימה, צורת הפיזור, פיתוח שיטות לאיטום הקרקע בעת הטיפול ולאווירור לאחריו, וכמו כן שימוש באמצעי בטיחות מתאימים.
- בניית מערכת ידע המבוססת על הניסיון החקלאי הקיים בארץ במטרה לייצא את החומר יחד עם הידע.
- עריכת מחקרים לבדיקת סיכונים ורעילות שבשימוש בחומר מבחינת שאריות בקרקע ובצמחים⁴.
- עזרה לשיווק וקידום המכירות של המוצר בחו"ל על-ידי צוות אגרונומים מיומן.

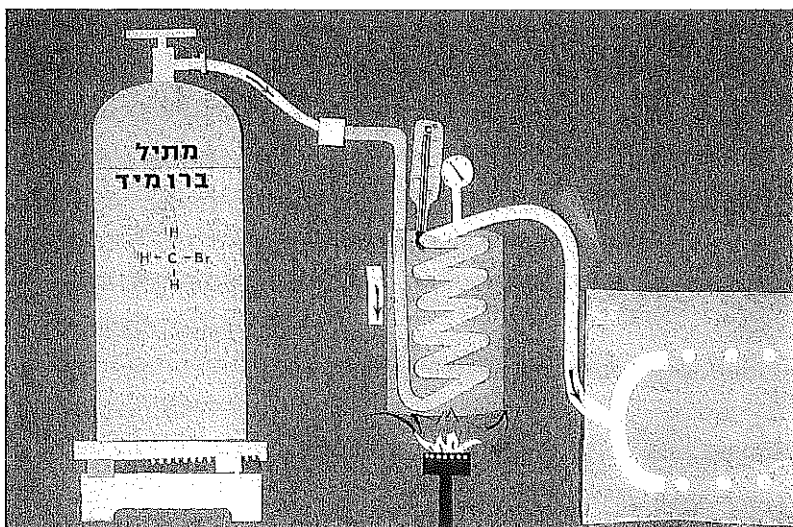
4 המחקרים הוכיחו כי בשימוש נכון בחומר אין סיכון של הצטברות ברומידים בקרקע ובצמחים מעבר למותר על פי הרשויות.

ההצלחה הרבה של קבוצת הברום בתחום זה נבעה למעשה משילוב של שלושה גורמים: כושר תעשייתי, טכנולוגיה חקלאית מתקדמת ומערך שיווקי המתבסס על קשר ישיר עם הלקוח. שילוב זה הוכיח את עצמו כבעל יתרון מסחרי, והקנה לחברה מוניטין רב בתחום זה.

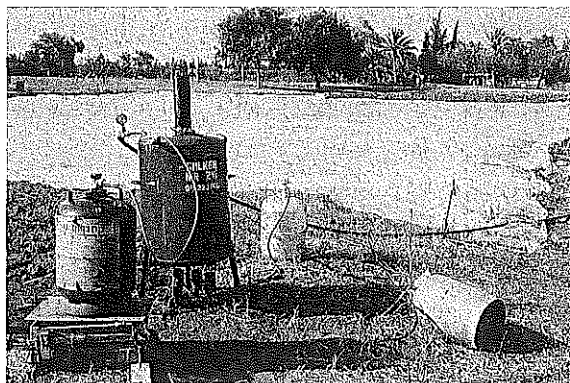
כיצד משתמשים במתיל ברומיד?

מתיל ברומיד הינו גז חסר צבע וריח ובעל רעילות גבוהה גם לבני אדם. לפיכך יש לנקוט באמצעי זהירות מרביים בעת השימוש בו. בגלל נדיפותו הגבוהה מחדירים את המתיל ברומיד לקרקע מתחת ליריעות פלסטיק, וזאת לאחר הכנה מדוקדקת של הקרקע, כולל השקייה ותיחוח. בעת "איוד" קרקע בשדה יש לדאוג לכיסוי מושלם ביריעות פלסטיק. לעיתים קרובות נעשית האטימה על-ידי טרקטורים מיוחדים שפותחו למטרה זו, המתחחים את הקרקע ובמקביל גם מכסים אותה ביריעות הפלסטיק. בעת "איוד" חממות יש כמובן לדאוג לאטימה טובה של כל הפתחים כדי למנוע סכנת הרעלה בסביבה.

הגז נשאר בקרקע מספר ימים כדי שפעולתו תהיה מושלמת. לאחר מכן מסירים את יריעות הפלסטיק (באיוד בשדה) או פותחים את החממה ומאווררים במשך מספר ימים. בשלב זה לא נשקפת סכנה לסביבה מכיוון שרוב החומר הגיב. כאשר הגידולים רגישים לשאריות החומר, שוטפים את הקרקע במים לאחר הסרת יריעות הפלסטיק.



עקרון הפעולה של השימוש במתיל ברומיד ל"איוד" בשדה



מכל מתיל ברומיד ל"איוד" בשדה

שיקולים בשימוש במתיל ברומיד?

התפתחות החקלאות והדרישה לייצור מזון לאוכלוסיה הולכת וגדלה ממשיכה להיות בעלת חשיבות קריטית ככל שאנו מתקרבים למאה ה-21. יחד עם זאת, בשנים האחרונות הולכת וגוברת הדאגה לשמירה על איכות הסביבה והשימוש בחומרים רעילים או חשודים כמוזיקים מקבל תשומת לב רבה יותר. כתוצאה מכך גוברת המחלוקת על השימוש בחומרים שונים ובשיטות שונות שנועדו להעלות את האיכות והכמות של התוצרת החקלאית המיוצרת ברחבי העולם. הוויכוחים נעשים קוטביים יותר ואף גולשים לתחומי הפוליטיקה.

פתרונות אפשריים?

ב-1991 החל להתעורר החשד כי מתיל ברומיד, וכמו CFC's ⁵, עלול להגיב עם האוזון ולגרום לפגיעה בשכבת האוזון הסטרטוספירית. עובדה זו העלתה את המתיל ברומיד לכותרות וגרמה לסערה ולפעילות פוליטית ומדעית הנמשכת עד היום. הוקמו ועדות של מומחים מטעם האו"ם לבחינת ההיבטים השונים של השימוש בחומר, הסכנה הצפויה לשכבת האוזון ומציאת חלופות שונות שיתפסו את מקומו של המתיל ברומיד.

בשנים האחרונות הציגו מומחים הערכות כי חלק גדול (כ-75% אחוז) מהמתיל ברומיד המגיע לסטרטוספירה בא מתהליכים המתרחשים בטבע ומקורו בעיקר בתהליכי חילוף חומרים של מיקרואורגניזמים המצויים באוקיינוסים. שאר המתיל ברומיד המגיע לאטמוספירה נובע משימושים מעשי ידי אדם ובעיקר משימושים חקלאיים שונים ומשריפת דלק מכיל עופרת.

5 חומרים אלו הוכרו על-ידי ועדות בינלאומיות כבעלי פוטנציאל לפגיעה בשכבת האוזון (ODP) Ozon Depletion Potential.

חשוב לציין, כי קיימות אי-וודאויות משמעותיות לגבי מאזן הכמויות של המתיל ברומיד בסטרטוספירה והגורמים המשפיעים עליו: האם הפחתת כמות המתיל ברומיד הנפלט לאטמוספירה ממקורות מעשה ידי אדם יגביר את פליטתו על-ידי מקורות טבעיים? מהם המנגנונים באמצעותם נעשה פירוק טבעי של מתיל ברומיד בסטרטוספירה ומה משפיע עליהם? ניתן לראות זאת בכתבה הבאה:

האם וכיצד פוגע המתיל-ברומיד באוזון-מחקר בין-לאומי

"מעריב", 1994, מאת מאיר בלייך

קטע מתוך כתבה שהתפרסמה במעריב

חברת תרכובות ברום מבאר-שבע - מהמובילות בעולם ביצור ושיווק מתיל-ברומיד - בשיתוף גורמי מחקר שונים בעולם, בוחנת דרכים חדשניות ושילוב עם שיטות ותכשירים נוספים, כדי לחקטין את המינון ואת היקף הפליטה של החומר הכימי הזה לאטמוספירה זאת, כחלק מהמאמץ הבין-לאומי לעצירת התרחבות החורר בשכבת האוזון.

מתיל-ברומיד מיועד לחיטוי קרקע וחוא חומר חשוב להגדלת היבולים ושיפור איכותם. משתמשים בו, תחת בקרה, בגידולי ירקות, פירות ופרחים.

היוזמה לביצוע המחקרים באה בעקבות החלטות

United Nations Environment Program

- הגוף הבין-לאומי המופקד על שמירת איכות הסביבה באויר וביבשה, הוא קבע בנובמבר שעבר כי מחמת החשש לפגיעה באוזון יוכנס המתיל ברומיד לרשימת החומרים בעלי פוטנציאל פגיעה ודיון מחדש בנושא יהיה ב-1995.

או תתכנס "ועדת אמנת מונטריאול". האמנה היא מסמך שנחתם בידי נציגי מדינות רבות, ביניהן ישראל ומבטא את שאיפת הקהילה הבינלאומית להגן על האוזון מכימיקלים שעלולים לפגוע בו.

עד נובמבר 1994, יבוצעו מחקרים

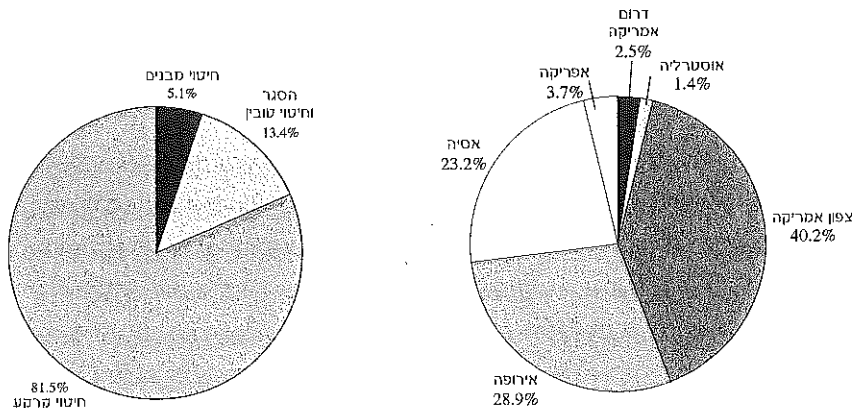
מעמיקים בכימיה של המתיל ברומיד והתנהגותו בחלל. תיבדק השאלה אם הוא בכלל פוגע באוזון. ב-1995 תוקפא רמת יצורו בעולם ותושווה לזו של 1991. תיאסר הגברת הייצור. עד אז לא יוגבלו כמויות הייצור והשימוש בנוכחיות.

אין כיום עוררין על כך ש-85 אחוז מהמתיל ברומיד המצוי באטמוספירה, נפלט ממקורות טבעיים, בעיקר מהאוקיינוסים. מקור נוסף הן מערכות הפליטה של מכוניות המונעות בדלק המכיל עופרת ותוסף האתילן דו-ברומיד המיועד לשיפורו המדיענים חלוקים על מידת השפעה המשמעותית של החומר הזה. מקובלת הדעה בדבר אי-הוודאות בקשר לכימיה של המתיל ברומיד בחלל ומוצרי פירוקו, התנהגותו ופיזורו באטמוספירה - ולפיכך גם תרומתו האמיתית לפגיעה באוזון.

המומחים תמימי-דעים שבחיטוי קרקע ולצורך גידולים מסויימים, קיימת בינתיים תלות מוחלטת במתיל ברומיד. תחליף, ידיוש חומרים ו/או פיתוח שיטות חדשניות. בכל מקרה התוצאה עלולה להיות פחות טובה וגם יקרה בהרבה מזו שקיימת כיום. עולה גם האפשרות ליצירת זיהום סביבתי מסוג וחומר אחר. המסקנה היא: בינתיים הוצאת המתיל ברומיד מרשימת החומרים שבשימוש - יקרה מדי. לפחות עד שנת 2000 ימשך השימוש העכשווי בו.

- מהם המקורות הנוספים למתיל ברומיד באטמוספירה?
- מהם השיקולים בעד ונגד הוצאת מתיל ברומיד משימוש?
- כיצד לדעתך צריכה קבוצת הברום להתכונן לסכנת האיסור שבשימוש בחומר זה?

תמונת מצב לגבי מטרות השימוש במתיל ברומיד בעולם בשנות השיא (1990) ניתן לקבל מהסכימות הבאות:⁶



השימוש העולמי במתיל ברומיד על פי המטרות

השימוש העולמי במתיל ברומיד ביבשות השונות

כיום לא קיים תחליף מוצלח למתיל ברומיד ולא ידועה שיטת הדברה אחת שתחליף את כל השימושים בו. נדרשים תחליפים רבים, כימיים ולא כימיים, כדי להדביר את כל הנגעים שכנגדם משתמשים במתיל ברומיד. יתר על כן, כמה מן התחליפים הינם חומרים רעילים, אשר יכולים להיות בעלי השלכות סביבתיות לא רצויות בעצמם. מצב זה מעמיד את מקבלי ההחלטות בפני דילמות קשות בין הצרכים החקלאיים לבין הבעיות הסביבתיות. ב-1997 הוחלט בוועידת מונטריאול לצמצם בהדרגה את ייצור מתיל ברומיד בעולם עד שנת 2015, בה יופסק כמעט לחלוטין השימוש במתיל ברומיד.

אין להתעלם מכך שיש גורמים נוספים התורמים להרס שכבת האוזון כמו פלואורו כלורו פחמימנים (CFC's) וממסים תעשייתיים. איסור השימוש בהם יכול להשפיע בעיקר על המדינות המפותחות ואילו איסור השימוש במתיל ברומיד ישפיע גם על המדינות המתפתחות. המשך השימוש במתיל ברומיד מחייב מציאת פתרונות שיצמצמו באופן מרבי את הסכנות לסביבה ובו בזמן יבטיחו הדברה

6 מתוך: מתיל ברומיד, דו"ח הוועדה למציאת תחליפים למתיל ברומיד שמונתה על-ידי השר לאיכות הסביבה. פברואר, 1994.

יעילה של הנגעים. השיפור ייעשה על-ידי מציאת שיטות למזעור כמות המתיל ברומיד הנפלטת לאוויר מצד אחד, ועל-ידי הקניית יעילות מרבית לטיפול מצד שני.

ניתן לעשות זאת על-ידי:	
- שיפור האיטום	
- שיפור החיסוי הפלסטי	
- שיפור העיבוד של הקרקע	
- דיוק גדול יותר במינון הדרוש	
- משך זמן ארוך יותר לפעולה	

במקביל נעשים מאמצים גדולים לפיתוח שיטות חלופיות שיתנו מענה לצרכים שונים. רובם נמצאים בשימוש בקנה מידה קטן ובחלקם השימוש ניסויי בלבד. באירופה ובמיוחד בהולנד מדבירים החקלאים את נגעי הקרקע באמצעות קיטור. זוהי שיטה יעילה יחסית אך יקרה ובמרבית המדינות שיטה זו אינה מעשית, שכן מחיר הקיטור גבוה מאד ואינו מאפשר פיתוח חקלאות רווחית. כמו כן פותחו שיטות לחיטוי תוצרת חקלאית העושות שימוש בגזים אוזון ופחמן דו-חמצני, אך יישום שיטות אלו עדיין בשלבים ראשוניים בלבד.

בדרך זו נעלם המרכיב הגורם להבשלת וחרקבת הפרי. ייחודה של השיטה במינון הנכון של האוון, כדי להבטיח את ההתפרקות. נמסר כי החיטוי יאריך את חיי המדף של הפירות והירקות ויהיה לו יתרון שיווקי בנוסף ניתן יהיה לייצא ללא קיטור תוצרת שחוטאה ונארוזה באריזה אטומה, ובכך לחסוך את עלויות האנרגיה הגבוהות... יתרונו של השיטה החדשה הוא בשימוש בגז המתפרק במהירות, ולכן אין לו כל השפעות לוואי על צרכני הפירות והירקות ועל העובדים העוסקים בפעולת החיטוי.	שיטה חדשה לחיטוי פירות וירקות באמצעות גז אוזון פותחה בטכניון מאת דליה מזורי קטע מתוך כתבה שהתפרסמה במעריב, 20.7.98 שיטה חדשה לחיטוי פירות וירקות באמצעות גז האוון פותחה בטכניון בחיפה וגוסתה בהצלחה בפירות הדר, עגבניות, פלפל, ענבי מאכל, ענבי יין, תמרים ועוד. החיטוי נעשה בחדר מיוחד ונמשך עד שעה תוך כדי התהליך מתפרק האוון והופך לחמצן.
---	--

- מהו תהליך התפרקות האוון עליו מדובר וכיצד הוא גורם לחיטוי?
- מהם היתרונות והחסרונות של השימוש באוון? פרט והסבר.

- כמו כן פותחו שיטות הדברה ביולוגיות שהן יותר ספציפיות.
- האם ידועות לך שיטות הדברה ביולוגיות? חפש במקורות מידע שונים ותן דוגמאות.
 - מהם היתרונות והחסרונות של השימוש בשיטות הדברה ביולוגיות? פרט והסבר.

דוגמא לשיטה חלופית שפותחה בארץ (בפקולטה לחקלאות בשיתוף פעולה עם מכון וולקני וקבוצת הברוס) שנבדקה גם בשילוב עם "איוד" באמצעות מתיל ברומיד היא חימום הקרקע באמצעות אנרגיית השמש. השימוש בשיטה זו עדיין לא נפוץ ויש ביישומה הנרחב בעיות הקשורות בעונתיות, בתנאי אקלים ועוד.

אנרגיית השמש להדברת פגעי צמחים

מאת: י. קטן, א. גרינשטיין, א. גרינברגר.

קטע מתוך מאמר שהתפרסם במדע
ל"א-4/7 1988

הפרת שיווי-המשקל הביולוגי בקרקע כתוצאה, למשל, משימוש בחומרי הדברה רעילים או הצנעה חוזרת של צמחים חולים, עלולה להביא להתפרצות מוגברת של מחלות שורש.

ההיכנסה השמשית מבוססת על חימום הקרקע בעזרת קרינת השמש. חימום זה מושג בדרך של חיפוי הקרקע המוכנה לזריעה בפוליאתיילן (או חומר פלסטי אחר). יריעת החיפוי חייבת להיות שקופה כדי לאפשר חדירה של קרינת אור אל הקרקע. היריעה מונעת קירור הקרקע, הנגרם בעיקרו על-ידי התאדות אדי מים.

חיפוי קרקע בפוליאתיילן שקוף בעונת הקיץ, מעלה בה את הטמפרטורה וגורם להדברת מחלות שורש ועשבים רעים. גורמי הקטילה הם החום ותהליכים של הדברה ביולוגית. השיטה, שפותחה בישראל, פשוטה לביצוע, חוסכת שימוש בחומרי הדברה רעילים ואומצה במקומות רבים בעולם.

בקרקע מתקיים שיווי-משקל ביולוגי בין גורמי המחלות והמיקרואורגניזמים הסובבים אותם. הואיל וחלק מהאחרונים הם אויבים טבעיים לפתוגנים⁷, מהווה שיווי-משקל זה מערכת בלימה ביולוגית בפניהם.

מהם היתרונות והחסרונות של השימוש באנרגיית השמש להדברת נגעי קרקע? פרט והסבר.

לא תמיד משלימות השיטות השונות זו את זו ולעיתים נוצר ניגוד אינטרסים הנובע מהצורך לפעול כנגד מיגוון גדול של נגעים קיימים ופוטנציאליים. במקרים רבים הפתרון יושג על-ידי פשרה אשר תהווה את האופטימום האפשרי בתנאים הקיימים.

לאחרונה הוחלט על שיתוף פעולה בין חברת הברוס וחברות אחרות באירופה ובארה"ב לשילוב של חומרים חלופיים לצורך חיטוי קרקע. חומרים אלה המיוצרים על-ידי החברות הזרות ישווקו על-ידי חברת הברוס שיש לה מומחיות בשיווק מתיל ברומיד וביישומו בחקלאות. השיווק ילווה בהדרכה מקצועית של צוותים מיומנים שידירכו את החקלאים בשטח.

7 פתוגנים - גורמי מחלות

- 1985 - חתימה בווינה על אמנה בינלאומית על-ידי מספר גדול של מדינות בעולם המצהירות שיש לפעול לשמירה על שכבת האוזון הסטרטוספרי.
- 1987 - חתימה על פרוטוקול ראשון במונטריאול בו נקבעו שמונה חומרים הגורמים לפגיעה בשכבת האוזון.
- 1991 - החשד 'מתיל ברומיד עלול לפגוע בשכבת האוזון נכלל בדו"ח של הוועדה המדעית שמונתה על-ידי הצדדים לפרוטוקול מונטריאול.
- 1992 - פירסום דוחות של וועדות מומחים המצביעים על הצורך במחקרים נוספים לגבי השפעתן של תרכובות הברום על הסטרטוספירה והערכת מצב על חלופות למתיל ברומיד כחומר ל"איד" קרקע, הערכות כלכליות וכד'.
- 1992 - קופנהגן. הגדלת הקרן שנועדה לסייע למדינות מתפתחות ליישם תחליפים ושיטות חלופיות לחומרים שיוצאו משימוש.
- הכללת מתיל ברומיד ברשימת החומרים המבוקרים אשר יוצאו בעתיד מן השימוש.
- הקפאת רמות הצריכה והייצור של מתיל ברומיד לצורך "איד" קרקע החל מתחילת 1995 לרמות של 1991.
- באמצעות המתפתחות הותר לייצר 10% מעל לכמות זו. המשך מחקר לגבי שכיחות מתיל ברומיד באטמוספירה ופיתוח שיטות באמצעות ניתן יהיה לחקטין את הפליטה של מתיל ברומיד לאטמוספירה.
- 1997 - וועידת מונטריאול בה תוקן פרוטוקול מונטריאול באופן שייצור מתיל ברומיד בכל אחת מן המדינות המפותחות שהן הצדדים לפרוטוקול מונטריאול יופחת על בסיס שנתי החל משנת 1999 ב-25%, ביחס לכמות הייצור המפוקחת ה"הקובעת" (שיוצרה בשנת 1991), החל משנת 2001 ב-50% וחל משנת 2003 ב-70%. החל משנת 2005 תופחת כמות הייצור המפוקחת השנתית לאפס.
- במדינות מתפתחות תהיה הקפאה בייצור ובשימוש משנת 2002 עד שנת 2004 לפי ממוצע הייצור והשימוש בין השנים 1995 ו-1998. בשנת 2005 יוקטנו הייצור והשימוש ב-20% בשנת 2015 הייצור והשימוש ירדו לאפס למעט החריגים.

21 – תרכובות ברום בעלות פעילות ביולוגית (ביוצידים)

"ויאמרו אנשי העיר אל אלישע: הנה נא מושב העיר טוב... והמים רעים, והארץ משכלת ויאמר: קחו לי צלחית חדשה ושימו שם מלח; ויקחו אליו. ויצא אל מוצא המים, וישלך שם מלח, ויאמר: כה אמר ה': רפאתי למים האלה, לא יהיה משם עוד מות ומשכלת. וירפו המים עד היום הזה, כדבר אלישע, אשר דיבר" (מלכים ב', ב', כ"א)

מבוא

יש הרואים בסיפור על אלישע שהכניס מלח לתוך מים "רעים" והפכם למים "טובים" כניסיון הראשון לחיטוי מים. הפיכת המים ה"רעים" ל"טובים" נעשתה על-ידי מלח שתפקידו היה, ככל הנראה, לקטול את האורגניזמים המזיקים אשר פגעו באיכותם ומנעו את השימוש בהם כמי-שתייה. מלח זה היה אולי הביוציד הראשון.

ביוצידים: חומרים קוטלי מיקרואורגניזמים.

חיטוי המים החל להיות חיוני וחשוב עם התפתחות הרפואה המודרנית ובמיוחד עם הגברת המודעות לחשיבותה של הרפואה המונעת. השימוש בחומרי חיטוי ברפואה נראה היום מובן מאליה, אך לא כך היה מאז ומתמיד. עוד בסוף המאה הקודמת נפטרו חולים רבים כתוצאה מזיהומים שהתפתחו בעקבות ניתוחים שנעשו ללא שימוש בחומרי חיטוי. ידועה "קדחת היולדות" שכתוצאה ממנה נפטרו יולדות רבות. מגיפה זו נבעה מאי-שימוש באמצעי חיטוי פשוטים ביותר שלא היו מקובלים באותה תקופה.⁸

השימוש בחומרי חיטוי למי-שתייה החל רק בתחילת המאה הקודמת וגם כיום ויש עדיין מדינות מתפתחות רבות בעולם בהן לא קיימים האמצעים לבצע חיטוי מתאים של מי-השתייה וכתוצאה מכך נחשפים תושביהן למחלות רבות. לעומת זאת, השימוש בחומרים לחיטוי מי-בריכות ומקווי מים למטרות נופש ובילוי הולך ונעשה חשוב ביותר במדינות המפותחות, בהן חלה עלייה ברמת החיים ובתרבות הפנאי.

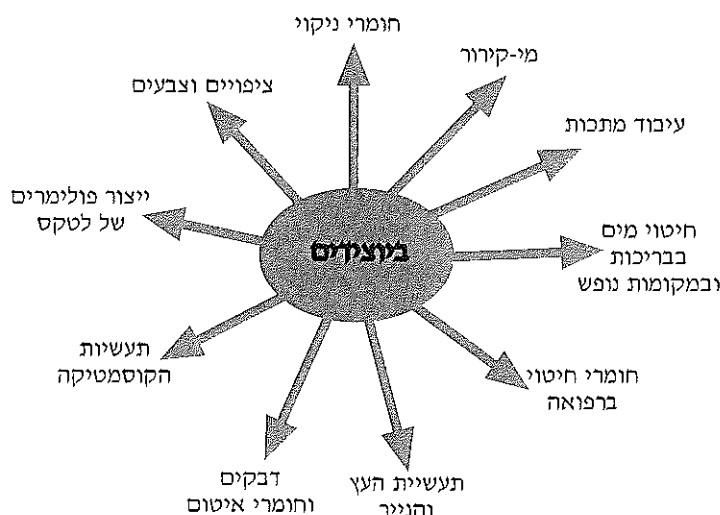
במקביל, הביאה ההתפתחות התעשייתית העצומה לצרכים חדשים של חיטוי מים. כמו שתארנו בפרק ה', במערכות תעשייתיות רבות משתמשים במים הזורמים במעגל סגור לצורכי קירור.

מהן הבעיות העוללות, לדעתך, להיווצר כתוצאה מהתרבות של האורגניזמים השונים במערכות קירור המופעלות על-ידי מים זורמים במעגל סגור. פרט והסבר. מים כאלו מהווים מצע אידיאלי להתפתחות אצות, חיידקים, וכל מיני אורגניזמים

8 לקריאה נוספת: עיין ערך זמלוס א.פ., האנציקלופדיה העברית, כרך 16 עמ' 87.

אחרים⁹, המצטברים על פני דפנות הצינורות ובמעברים, מתרבים ומביאים עד מהרה להיווצרות בעיות טכנולוגיות שונות. בעיות אלו עלולות להשפיע הן על התפעול השוטף והן על עלויות התחזוקה. הצטברות ה"משקעים" הללו על פני דפנות הצינורות עלולה להביא לסתימת המעברים מצד אחד, ולשיתוך המערכות מצד שני. כתוצאה מכך עלולות להיווצר בעיות בזרימת מי-קרוור, בעיות במעברי אנרגיה וקלקול של הצינורות המביא לצורך להחליפם לעיתים קרובות. בעיות דומות עלולות להיווצר במערכות מרכזיות של מיזוג אוויר וקירור המבוססות על זרימת מים במעגל סגור.

שימושים אחרים בתרכובות בעלות פעילות ביולוגית כנגד התפתחות מיקרואורגניזמים שונים נעשים לצורך הארכת חיי המדף ושמירה על האיכות של מוצריהן של תעשיות רבות: ציפויים וצבעים, קוסמטיקה, דבקים וחומרי איטום, חומרי ניקוי, עץ ונייר ועוד.



כל חומרי החיטוי במיגוון השימושים חייבים להיות בעלי רעילות נמוכה. הסבר מדוע.

⁹ לקריאה נוספת: על תהליכים מיקרוביולוגיים במי-קרוור. מאת י. גבריאלי וי. קלשטיין. כימיה, גיליון מס' 14, 1993.

השימוש בהלוגנים ובתרכובותיהם כחומרי חיטוי

קיים מיגוון של חומרים המשמשים לחיטוי ורבים מהם מבוססים על ההלוגנים ועל תרכובותיהם. היוד, הברום והכלור פועלים כביוצידים הן כיסודות והן כשהם משולבים בתרכובות שונות. כל ההלוגנים מסיסים במידה מסוימת במים. תמיסות מימיות של ההלוגנים כלור, ברום ויוד ידועות זה מכבר ככושר החיטוי שלהן, המתבטא בדיכוי התרבותם של מיקרואורגניזמים.

בוודאי מוכרת לך תכונת החיטוי של התמיסה הכוהלית של יוד הנקראת "יוד חום" ונמצאת בשימוש רפואי. ביוצידים המבוססים על יוד ותרכובותיו משמשים בעיקר לצרכים רפואיים.

ביוצידים המבוססים על כלור וברום הם הנפוצים ביותר לכל שאר השימושים. נסיונות ראשונים לשימוש בכלור לחיטוי מים החלו בסוף המאה ה-18. השימוש בברום למטרה זו החל במחצית המאה ה-19, אך השימוש בו אינו נפוץ. את ה"בכורה" תופס הכלור, שהוא החומר החשוב ביותר בחיטוי מים (במיוחד למי-שתייה ולמי-בריכות) עד עצם היום הזה. לאחרונה מסתמנת מגמה של עלייה בשימוש בברום לחיטוי מי-בריכות, ויש להניח שהשימוש בו ילך ויגדל מסיבות שתפורטנה בהמשך.

ביוצידים המבוססים על כלור וברום נחלקים באופן כללי לשני סוגים:

ביוצידים מחמצנים כוללים את הברום, Br_2 , והכלור, Cl_2 , כיסודות וכמו כן תרכובות כמו נתרן תת-כלוריתי, NaClO , סידן תת-כלוריתי, $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ והלוברום (ראה עמ' 208). ביוצידים אלו נפוצים יותר בשימוש והם מיועדים בעיקר לבריכות שחייה, מגדלי קירור, טיפול בשפכים עירוניים ולחיטוי סניטרי.

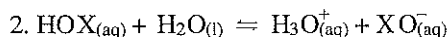
ביוצידים לא מחמצנים הם בדרך כלל חומרים מורכבים ויקרים יותר (בעיקר נגזרות הלוגניות של תרכובות אורגניות) המשמשים בעיקר לתעשיות כמו ציפויים וצבעים, דבקים וחומרי איטום ופולימרים מסויימים.

כדי להבין את מנגנון פעולתם של **הביוצידים המחמצנים** כחומרי חיטוי ננסה ראשית לראות מהם התהליכים המתרחשים כאשר ממיסים הלוגנים במים. נסמל באופן כללי את מולקולת ההלוגן כ- X_2 .

את תכונות החיטוי מייחסים בעיקר למולקולות החומצות החמצניות, HOX , שנוצרות בתגובות בין ההלוגנים, X_2 , לבין מולקולות המים:



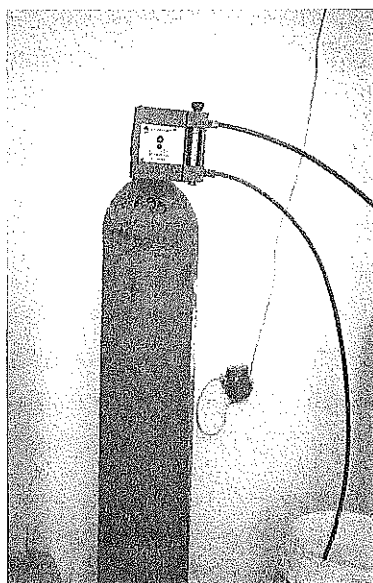
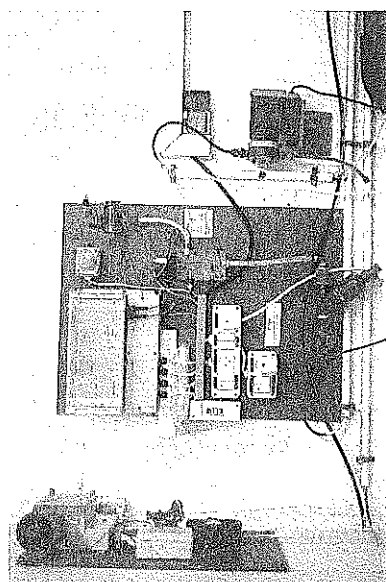
החומצות החמצניות, HOX , הן חומצות חלשות היוצרות במים ריכוזים נמוכים של יוני $\text{XO}^-_{(\text{aq})}$ ויוני $\text{H}_3\text{O}^+_{(\text{aq})}$:



יעילות החיטוי של החומצות החמצניות, HOX , גדולה בהרבה מזו של יוני ה- $\text{XO}^-_{(\text{aq})}$. לפיכך רצוי שתגובה (1) תתרחש באופן מרבי ואילו תגובה (2) תתרחש באופן מזערי. לעיתים עשויים יוני ה- $\text{XO}^-_{(\text{aq})}$ להשתתף בתגובות נוספות וכתוצאה מכך נוצרים חלקיקים נוספים, שגם הם פועלים בתהליכי החיטוי.

ההסבר הניתן לפעולתם של ביוציידים מחמצנים מתבסס על חדירת החלקיקים המחמצנים $\text{HOX}_{(\text{aq})}$ ו- $\text{XO}^-_{(\text{aq})}$ דרך הקרומים לתוך תאי החיידקים (או אורגניזמים אחרים) ושיבוש של תהליכים אנזימטיים מסוימים החיוניים לקיומם והתרבותם.

- אילו חלקיקים יהיו בתמיסות בעלות חומציות גבוהה מאד? נמק את תשובתך.
- אילו חלקיקים יהיו בתמיסות בעלות בסיסיות גבוהה מאד? נמק את תשובתך.
- באילו תנאי pH יהיה ריכוז החומצות החמצניות, $\text{HOX}_{(\text{aq})}$, הגבוה ביותר?



מיתקן לאספקת כלור לברכת שחיה (בלוני כלור, חיישן כלור, מערכת בקרה)

התבוננות בניסוחים (1) ו-(2) מראה, כי ריכוז מולקולות החומצות $\text{HOX}_{(\text{aq})}$ יהיה מרבי ב- pH בסיסי אך לא גבוה מאוד. ב- pH בסיסי מתון יטה שיווי-המשקל בתגובה (1) לכיוון התוצרים וריכוז מולקולות $\text{HOX}_{(\text{aq})}$ יהיה גבוה. לעומת זאת תגובה (2) תתרחש במידה מזערית וריכוז מולקולות ה- $\text{HOX}_{(\text{aq})}$ שיתפרקן לתת יוני $\text{XO}^-_{(\text{aq})}$ יהיה נמוך יחסית.

הכלור כביוצייד

כאמור, הכלור הינו החומר העיקרי המשמש כיום לצורכי חיטוי מים (בעיקר למי-בריכות, למי-שתיה ולמיגדלי קרור בתעשייה). יתרונו של הכלור הוא בזמינותו, במחירו הנמוך יחסית ובנוחיות השימוש בו.

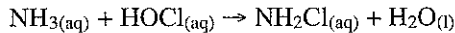
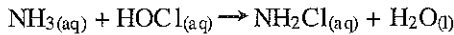
בצד היתרונות של השימוש בכלור יש לציין גם כמה מחסרונותיו:
א. בעל ריח חריף.

ב. גורם לגירוי חריף בעיניים וברקמות ריריות אחרות.

ג. מסיסותו יורדת עם עליית הטמפרטורה.

ד. גורם לשיתוך מהיר יחסית של חלקי מתכת.

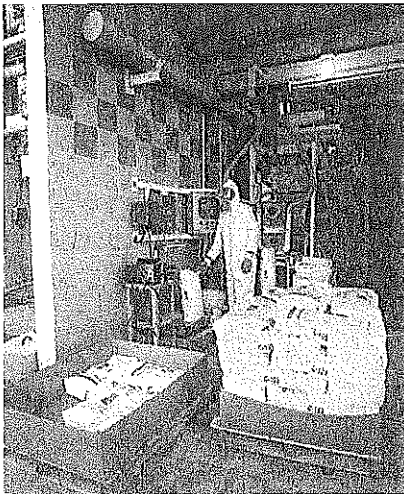
ה. בבריכות שחייה, שבהן קיימים ריכוזים גבוהים יחסית של אמוניה (כתוצאה מהפרשת שתן מתרחצים), מגיב הכלור ליצירת כלוראמינים, שהם חומרים צורבים, בעלי ריח חריף העלולים בריכוזים גבוהים לגרום לבעיות של רעילות.



הכלוראמינים הינם חומרים יציבים יחסית ולכן קצב הפרוק שלהם איטי.

ו. יעילותו תלויה ב-pH. בסביבה בסיסית¹⁰, שהיא הקיימת בדרך כלל בבריכות שחייה ובמי-תעשייה, רוב הכלור אינו מצוי כ-HOCl. כתוצאה מכך כושר החיטוי אינו גבוה ויש לדאוג לאספקה רצופה של כלור, כדי להגיע לרמת חיטוי טובה לאורך זמן.

ז. יעילותו יורדת בחשיפה לקרינה אולטרה סגולה (קרינת U.V.). כתוצאה מכך קיים צורך בהזרמה רצופה של כמויות כלור גדולות, כדי לשמור על ריכוז מתאים של החלקיקים הפעילים.



חסרונות אלו הובילו לחיפושים אחר תחליפים טובים יותר וכך הגיעו לברום ולתרכובותיו, ויותר מאוחר לשילובים של ביוציידים מבוססים על כלור יחד עם ביוציידים מבוססים על ברום.

חדר אריזה לביוציידים

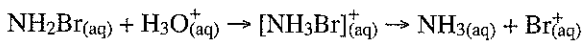
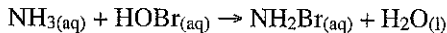
10 חבסיסיות של מי-תעשייה נובעת משימוש בחומרים מעכבי שיתוך שמוסיפים למים.

הברום כביוצייד

עם ההתפתחות שחלה לאחר מלחמת העולם השנייה בייצורו של הברום ופיתוח הטכנולוגיות המתאימות, שאפשרו את הטיפול בו, החל שימוש נרחב יותר בברום למטרות חיטוי מים, במיוחד לבריכות שחייה.

יתרונות השימוש בברום:

- יוצר ריח פחות חריף.
- גורם לגירוי פחות חריף מהכלור לעיניים ולרקמות ריריות.
- מסיסותו עולה עם עליית הטמפרטורה.
- הברומואמינים, הנוצרים בתמיסות מימיות של ברום המכילות גם אמינים (בדומה לכלור היוצר כלורואמינים) אינם צורבים, ריחם פחות חריף ויש להם בעצמם כושר חיטוי המתווסף לכושר החיטוי של הברום. הברומואמינים מתפרקים במהירות גדולה יחסית לכלורואמינים ולכן השפעתם המזיקה קטנה יותר.



ה. ריכוז החומצה $\text{HOBr}(\text{aq})$ בתחום pH 7-8 (ה-pH הקיים בבריכות שחייה) הינו גבוה בהרבה מריכוז החומצה HOCl בתנאים אלו וכתוצאה מכך כושר החיטוי של הברום גבוה יותר.

ו. הירידה ביעילות כתוצאה מחשיפה לקרינה אולטרה סגולה (קרנת U.V.) פחות משמעותית כאשר עושים שקלול של ריכוז החלקיקים הפעילים לעומת קצב הפרוק שלהם.

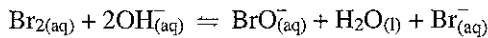
יחד עם זאת גם לשימוש בברום יש חסרונות ובמיוחד יכולת השיתוך הגבוהה שלו ומחירו הגבוה יותר. בגלל יתרונותיו הבולטים ולמרות חסרונותיו הולך ומתרחב השימוש בברום בצורותיו השונות, הן בצורת היסוד והן כתרכובות שלו.

- הסבר מדוע יש ירידה במסיסותו של הכלור במים עם עליית הטמפרטורה?
- הסבר מדוע, בניגוד לכלור, עולה מסיסותו של הברום במים עם עליית הטמפרטורה.
- מהי הסיבה, לדעתך, בגללה ברומואמינים מתפרקים מהר יותר מכלורואמינים?
- מהי הסיבה לכך (כאשר משווים תמיסות שוות ריכוז של כלור וברום) שריכוז החומצה $\text{HOBr}(\text{aq})$ גבוה יותר מאשר ריכוז החומצה $\text{HOCl}(\text{aq})$ התייחס ל-pH השורר בבריכות שחייה.

שילוב של ברום וכלור בביוצידיים

בחיפוש אחר תחליפים שונים לכלור ולברום נמצא, כי כושר החיטוי משתפר כאשר נעשה שילוב של הברום ותרכובות מסויימות של כלור.

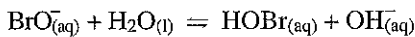
שילוב כזה נעשה למשל בין הברום, Br_2 , ונתרן תת-כלוריתי, NaOCl , אשר את פעילותם בסביבה בסיסית מתונה (pH: 7-8) ניתן לתאר בעזרת הניסוחים הבאים:



יוני $\text{Br}^-_{(\text{aq})}$, מגיבים עם יוני ה- $\text{ClO}^-_{(\text{aq})}$ שמקורם בתמיסת נתרן תת-כלוריתי, NaOCl , ויוצרים כמות נוספת של יוני $\text{BrO}^-_{(\text{aq})}$:



בהיותם בסיס חזק יחסית מגיבים יוני $\text{BrO}^-_{(\text{aq})}$ עם מים ויוצרים מולקולות של החומצה $\text{HOBr}_{(\text{aq})}$, שהיא כאמור בעלת כושר חיטוי גבוה:



זוהי למעשה פעולה סינרגטית שבה שילוב שני חומרים משפר ומגביר את השפעתם באופן שפעולתם של החומרים יחד גדולה מסכום פעולתם כאשר כל אחד מהם נמצא בנפרד. לא תמיד ידוע מנגנון הפעולה של החומרים, אך יודעים כי שילובם יחד משפר את הפעילות.

פעולה סינרגטית: פעולתם של החומרים הפועלים יחד גדולה מסכום פעולם של החומרים כשהם בנפרד.

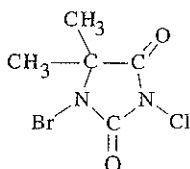
באופן דומה ניתן לשלב בין נתרן תת-כלוריתי, NaOCl , או סידן תת-כלוריתי, $\text{Ca}(\text{ClO})_2$, לבין נתרן ברומי, NaBr או אמוני ברומי, NH_4Br .

כיוון אחר הוא החיפוש אחר מולקולות המכילות הן אטומי ברום והן אטומי כלור. התרכובת הפשוטה ביותר שהמולקולות שלה מכילות את אטומי שני היסודות היא ברום כלורי, $\text{BrCl}_{(\text{l})}$. הברום הכלורי הוא נוזל בטמפרטורת החדר ולכן קל יותר לטיפול מאשר כלור. יכולת השיתוך שלו נמוכה מזו של הברום והוא גורם פחות מהברום לגירוי באף ובעיניים. כמו כן נוטה פחות להתפרק במים חמים.

התגובה של $\text{BrCl}_{(\text{l})}$ עם מים, בה נוצר $\text{HOBr}_{(\text{aq})}$, מהירה בהשוואה לתגובת הברום עם מים ורוב הברום בתמיסה מצוי בצורת $\text{HOBr}_{(\text{aq})}$ שהיא מועדפת. למרות שמחירו של ברום כלורי גבוה יותר מזה של הכלור או הברום, נעשה השימוש בו נפוץ, ובמיוחד בטיפול במים חמים.

שיפור כושר החיטוי מנוצל בשיטות חיטוי חדשות ביותר המשתמשות בתרכובות

ברום אורגניות המכילות גם כלור, כדוגמת 1-ברומו, 3-כלורו 5,5 דימתיל הינדנטואין הנקראת "הלוברום":

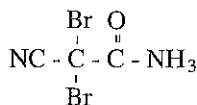


ה"הלוברום" הינו מוצק בטמפרטורת החדר ומיוצר בדרך כלל בצורת טבליות המתמוססות במים בצורה איטית ומבוקרת. הוא הוכח כיעיל ביותר לחיטוי מי-בריכות, מקוואות וכד', והשימוש בו הולך וגדל. כן נמצא יעיל במערכות קירור תעשיתיות ובמיוחד אלו המבוססות על זרימה במעגל סגור.

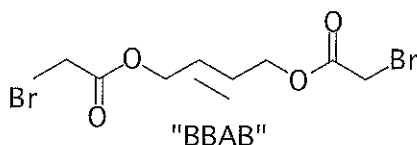
גם בתרכובת זו ניצול הברום הינו מרבי מכיוון שבתגובת ה"הלוברום" עם המים נוצרות הן חומצה תת-ברומיתית, HOBr , והן חומצה תת-כלוריתית, HOCl וכמו כן $\text{BrO}_{(\text{aq})}^-$ ו- $\text{ClO}_{(\text{aq})}^-$. החומצה התת-ברומיתית, שהיא כאמור המחטא העיקרי (במיוחד ב-pH גבוה, שבו החומצה התת-כלוריתית מתפרקת), יוצרת תוך כדי פעולת החיטוי יוני $\text{Br}_{(\text{aq})}^-$. בנוכחות HOCl הופכים יונים אלו מיד ל- HOBr וכך מגבירים את יעילות החיטוי. זהו מעין מיחזור של הברום לצורתו הפעילה, הגורמת לשיפור כושר החיטוי של התרכובת.

- רשום ניסוח לתגובה בין $\text{BrO}_{(\text{aq})}^-$ לבין HOCl .
- האם זוהי תגובת שיווי-משקל? הסבר.
- האם, לדעתך, K גדול מ-/ קטן מ-/שווה ל- 1? נמק.

קיימים ביוצידיים נוספים רבים מורכבים יותר, אך כיום תופסים חומרים אלו חלק קטן יחסית מכלל החומרים המשמשים בתחום זה. דוגמאות לחומרים מסוג זה הם:



"Biobrom"



"BBAB"

הידעתו

גם בסביבתך הקרובה; בבית, בבית הספר, בקולנוע ובמקומות רבים-אחרים, מצויות תרכובות ברזם. תרכובות אלו מצויות בפריטי ריהוט, וילונות, שטיחים, תקרות עץ ופלסטיק, טפטים, מכשירי חשמל ואלקטרוניקה ועוד. קשה לנו לתאר את חיינו ללא מוצרים אלו שנועדו לחקל על חיינו ולהנעים לנו אותם. גם אם לפני מספר עשרות שנים, לא היו מצויים רבים מהם בכל בית, היום נראה כי הפכו לחלק מהציוד שאי-אפשר בלעדיו. היכן "חבויות" תרכובות הברזם במוצרים אלו? מה תפקידן? כיצד הן פועלות? בכל אלו ועוד נעסוק בפרק זה.

מרבית המוצרים המקיפים אותנו בחיי היומיום בנויים (באופן מלא או חלקי) מפולימרים¹², אשר חלקם טבעיים (כמו: עץ, צמר, כותנה) וחלקם מלאכותיים (פולימרים סינתטיים).

פולימר: מקרומולקולה (מולקולת ענק) הבנויה מאלפי אטומים קשורים זה לזה בקשרים קוולנטיים. כל מקרומולקולה מורכבת מיחידות מבנה החוזרות על עצמן בצורה סדירה (מיונית: פולי-הרבה, מר-יחידה).

- ערוך רשימה של מוצרים שונים המצויים בחדרך בבית המכילים פולימרים? האם ידוע לך מאלו פולימרים? הם עשויים? פרט.
- מהן לדעתך הסכנות הכרוכות בבעירתם של חומרים פלסטיים (או חומרים דליקים אחרים). פרט.
- נסה להעריך מהו הזמן הנתון למילוט במידה ופורצת שרפה בחדר מגורים המכיל פריטי ריהוט שכיחים.

המכנה המשותף של רוב הפולימרים הוא היותם מבוססים על תרכובות פחמן הידועות בדליקותן. אין פלא איפוא, כי מקומות מגורים או מקומות ציבוריים הופכים לעיתים למלכודות אש. נזקים גדולים ביותר, הן בנפש והן ברכוש, נגרמים מדי שנה כתוצאה משריפות. על פי נתונים סטטיסטיים שהתפרסמו בארה"ב מעריכים כי כל שנה גורמות

12 לקריאה נוספת: - הכימיה אתגר, תרכובות פחמן, מאת נאוה מילנר (עמ' 134-135).

- הכימיה-אתגר, פולימרים סינתטיים חומרים כבשתך, מאת נאוה מילנר (עמ' 11-19).

השרפות במדינות המפותחות בממוצע ל-10-20 הרוגים על כל מיליון תושבים מהאוכלוסייה. בארה"ב לבדה מתרחשות מדי שנה כחצי מיליון שרפות של מבנים והן גורמות למותם של 4-5 אלפי איש ולפציעתם של 15-20 אלף איש ויותר.

הידעת?

במהלך השנים 1961-1972 גרמו השריפות בארה"ב למספר הרוגים הגדול פי שלושה מזה שנגרם כתוצאה ממלחמת ויטנאם על פי נתונים סטטיסטיים של ארבע השנים האחרונות. מספר ההרוגים הממוצע לשנה בשריפות בארה"ב הוא כ-5000 ובאירופה מגיע מספר זה ל-6000 נפש ויותר. האם חשבת על כך שכל שנה "נעלמת" למעשה "עיר קטנה" מהמפה?

עובדות אלו מוכיחות את הצורך לחפש אחר דרכים שונות למלחמה בשרפות. לא רק חיפוש אחר אמצעי כיבוי כדי לחסל את השרפה כאשר היא כבר בעיצומה, אלא גם חיפוש אחר אמצעים למניעת ההצתה או להאטת שלבי ההתקדמות של השרפה, כאשר לא ניתן לעצור אותה. מאמץ עצום מושקע בעולם המודרני כדי להקטין את נזקי השרפות ואחת הדרכים קשורה בתרכובות הברום. הצורך להגן מפני דליקות ונזקיהן הביא לחיפוש אחר חומרי מבנה שיקנו למוצרים השונים דליקות נמוכה ותכונות אחרות המונעות את התפשטותה המהירה של האש. בפרק זה נעסוק בגורמים המשפיעים על בעירת חומרים, בדרכים למלחמה בשרפות ובהקטנת נזקיהן, בדרכי פעולתם של מעכבי בעירה בכלל ובתרכובות ברום המשמשות כמעכבי בעירה בפרט, דרכים שונות לשילוב מעכבי הבעירה במוצרים פלסטיים ובמוצרים דליקים אחרים ובשיקולים לבחירת מעכבי בעירה עבור יישומים שונים.



מוצרים שונים המכילים מעכבי בעירה

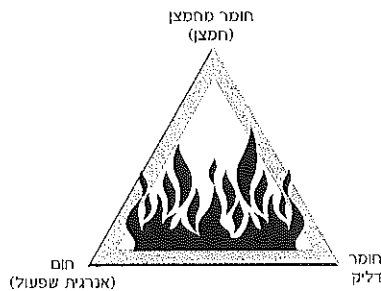
הבעירה וסכנותיה

- מהי בעירה?

- מהם הגורמים הקובעים אם חומר מסוים יבער בתנאים נתונים?

בדרך כלל מגדירים את תהליך הבעירה, כתגובה של חומר עם חמצן בה נפלטת אנרגיה. תגובה זו יכולה להיות מהירה או איטית. בעירה מהירה (שרפה) מלווה בפליטת אנרגיה בצורת חום ובדרך כלל גם בצורת אור. בעירה איטית, לעומת זאת, היא תהליך חמצון בו נפלטת כמות קטנה יחסית של אנרגיה בצורת חום ובדרך כלל לא נפלטת אנרגיה בצורת אור. כל בעירה לא תתחיל מעצמה והיא דורשת השקעה של אנרגיה שפעול¹³ שגודלה תלוי בסוג החומר הבעור. אנרגיה התחלתית זו מתקבלת בדרך כלל באמצעות תהליך של הצתה על-ידי ניצוץ ראשוני. לעיתים קרובות יכול ניצוץ אחד לספק את אנרגיית השפעול הדרושה להתחלת תהליך הבעירה. עם התקדמות הבעירה, כאשר החומר הדליק בוער ומשתחררת אנרגיה, ממשיכה הבעירה ומתפשטת גם כאשר לא קיים יותר גורם ההצתה הראשוני.

מקובל להציג את שלושת הגורמים הדרושים לבעירה, שהם **חומר מחמצן** (בדרך כלל חמצן), **חומר דליק וחום** (אנרגיית השפעול), על-ידי "משולש האש".



רוב החומרים מסוגלים לבעור, אך קיימים הבדלים בתנאים הנדרשים לשם כך. יש חומרים הנדלקים בקלות (למשל: גז בישול, נפט או נייר) בעוד שחומרים אחרים דורשים לשם כך טמפרטורות גבוהות מאוד וריכוז גבוה של חמצן (למשל: טפולן, PVC). התנאים בהם בוערים רוב החומרים נמצאים בין שני מצבים קיצוניים אלו.

- נסה למצוא דוגמאות נוספות לחומרים בעלי דרגות דליקות שונות.

- כיצד ניתן לשמור מפני הדלקותם של חומרים בעלי דליקות גבוהה?

13 למעשה צריך להשתמש במונח אנרגיית חופשית של שפעול.

הידעתו

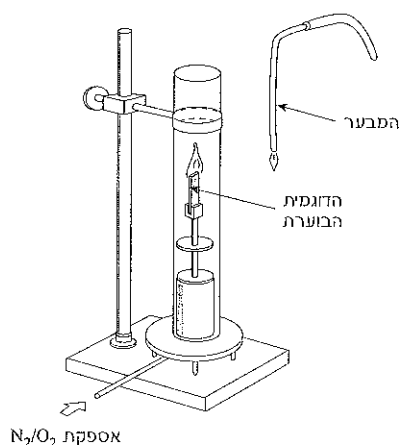
בדיקה פשוטה יחסית ומאד מקובלת היא הבדיקה לכמות המוערית של החמצן הדרושה כדי לקיים את הבעירה (Limiting Oxygen Index) הנקראת בקיצור בדיקת LOI. זוהי בדיקה סטנדרטית, שבה מבעירים מוט או יריעה עשויה מהחומר הנבדק בתוך צינור זכוכית המוצב אנכית. בתוך הצינור מזרימים בצורה מבוקרת ובהרכב ידוע תערובת של חמצן וחנקן. מדליקים את הדגם בקצהו העליון ובודקים אם הדגם בוער או כבה. משנים את ריכוז החמצן בתערובת עד שמוצאים את הערך הגבולי של ריכוז החמצן בו הדגם בוער. המדידה נעשית לפי שתי אמות מידה:

- ריכוז החמצן בו הדגם בוער יותר משלוש דקות

- ריכוז החמצן בו הדגם בוער לאורך 5 ס"מ ויותר.

ההרכב בו יתמלאו דרישות אלו הוא אחוז החמצן המוערי בו תיתכן בעירה של החומר והוא מוגדר כערך LOI שלו. בטבלה הבאה נתונים ערכי LOI של מספר חומרים שכיחים:

החומר	L.O.I (%)
פוליאטן	17.4
פוליפרופן	17.4
פוליסטירן	17.8
ניילון 6,6	24.3
PVC	45
טפולן	95



איור של מכשיר לבדיקה סטנדרטית של LOI

את תכונת הדליקות של החומר מאפיינים גם על-ידי טמפרטורת ההצתה שלו, ובמקרה של נוזל גם על-ידי טמפרטורת ההבזקה שלו.

טמפרטורת ההצתה: (נקראת לפעמים גם טמפרטורת ההצתה העצמית) הטמפרטורה הנמוכה ביותר שבה עשוייה להתרחש בעירת החומר באופן ספונטני בתנאים מוגדרים.

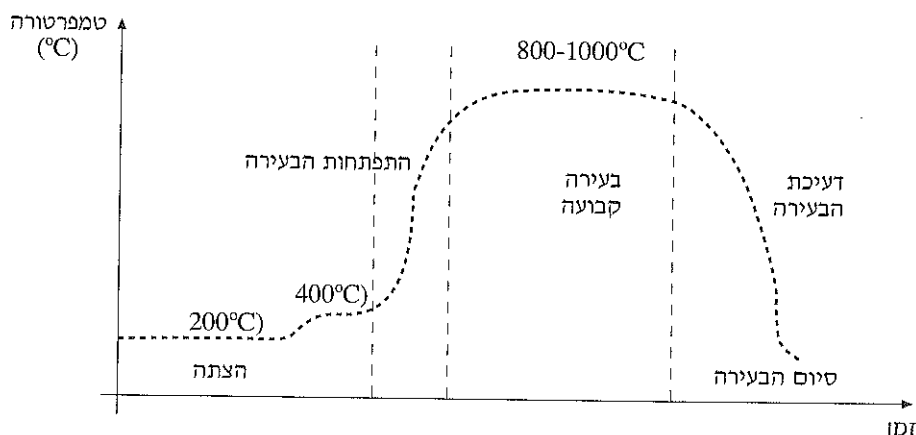
טמפרטורת ההבזקה: הטמפרטורה הנמוכה ביותר שבה האדים שמעל חומר דליק נדיף יוצתו באוויר בעת חשיפתם ללהבה.

- טמפרטורת ההצתה של אתאנול היא 363°C בעוד שטמפרטורת ההבזקה שלו היא 8°C . הסבר מדוע נמוכה טמפרטורת ההבזקה מטמפרטורת ההצתה?
- טמפרטורת ההצתה של חומצה אצטית היא 565°C וטמפרטורת ההבזקה שלו היא 43°C . נסה להסביר ממה נובע ההבדל בין חומצה אצטית לבין אתאנול.

כל המאפיינים הללו לדליקות החומר לא משמשים להגדרת התקנים. תקני הבעירה מתייחסים לשימוש שנעשה בחומרים ובהתאם לכך קיימים תקנים שונים כמו תקן בעירה אנכי (למשל: עבור תקורות), תקן להתפשטות הבעירה (למשל: עבור תעלות בידוד לצנרת חשמלית) ועוד.

- באופן כללי ניתן לחלק את מהלך הבעירה לארבעה שלבים עיקריים:
- הצתה (Ignition)** - השלב בו מקור אנרגיה חיצוני מספק את אנרגיית השפעול המתחילה את התהליך.
 - התפתחות (Propagation)** - השלב בו הבעירה גדלה ומתפתחת.
 - בעירה קבועה (Steady combustion)** - השלב בו הבעירה ממשיכה בקצב ובטמפרטורה קבועים.
 - סיום (Termination)** - השלב בו הבעירה מתחילה לדעוך ולבסוף מסתיימת לחלוטין.

הסכימה בעמוד הבא מתארת את שלביו של תהליך הבעירה:



מתאר הבעירה (ללא מעכב בעירה)

התייחס לסכימה זו ונסה לשרטט שלושה גרפים שונים המשווים את התקדמות הבעירה של שלושת סוגי החומרים הבאים:

- חומר דליק מאוד
- חומר שדליקותו מאוד נמוכה
- חומר עם תכונות של כיבוי עצמי

משך הזמן של שלב ההצתה תלוי בכמות האנרגיה המסופקת על-ידי המקור הראשוני ובטיבו של החומר הבורע.

הקצב בו מתפשטת הבעירה תלוי בעיקר בסוג החומר הבורע ובתנאי הסביבה הקרובה.

פרק הזמן בו מתרחשת בעירה קבועה תלוי בכמות החומר הדליק. הבעירה תסתיים רק אם יתבטל אחד או יותר מהגורמים החיוניים לקיומה; חומר מחמצן, חומר דליק או אנרגית חום. סיום כזה יכול להתרחש באופן טבעי או על-ידי התערבות חיצונית.

האם היית עד לשרפה? נסה לנתח מה התרחש ומה ראית! אם לא, בוודאי הודמן לך לצפות בסרט או בכתבת טלוויזיה המתארים שרפה של בית מגורים, שטח חקלאי, יער וכד'. נסה לזכור מה בדיוק ראית! מהם שלבי השרפה? מהן הסכנות! וכד'.

כפי שכבר ציינו קודם, שרפות עלולות לגרום נזקים חמורים לנפש ולרכוש. הסכנות השונות לאדם כתוצאה משרפות תלויות במידה רבה באופיים של החומרים הבורעים.

- מהם תוצרי השרפה המלאה של פחמימן? רשום ניסוח לדוגמא.
- מהם התוצרים העשויים להתקבל בשרפה לא מלאה של פחמימן? פרט.

- מהם התוצרים העשויים להתקבל בשרפה של פולימר המכיל בנוסף לפחמן ומימן גם גופרית או חנקן?
- העזר בקטע המאמר הבא וציין מהן הסכנות הנשקפות משרפה של חומרים פלסטיים?

הגזים המסוכנים ביותר

קטעים מתוך כתבה שהתפרסמה ב"הארץ", 28.1.90

12-16 בני אדם נספים בישראל מדי שנה מדליקות, רובם מחנק או מגזים רעילים. מקורות הרעלים העיקריים הם פולימרים סינתטיים המצויים בחלק גדול מהריהוט הביתי

החוק החדש שהתקבל בבריטניה מחייב להפסיק מיד ייצור בדים סינתטיים, ספוגים לריפוד ובדי ריפוד המבוססים על פוליאוריתן מוקצף ועל חומרים אחרים המדיפים גזים רעילים בעת בעירתם. אלא אם שולבו בהם חומרים מעכבי בעירה או חומרים פלסטיים חלופיים, שאינם פולטים גזים רעילים. משרד התעשייה הבריטי אף דרש מהקהילה האירופית לאמץ את התקן הבריטי...

במפעל קיסריה פולימרים, המייצר פוליאוריתן מוקצף, הן בלוחות והן בתפזורת, לבידוד גגות שטוחים, ניתן להשיג גם את החומר הכבה מאליו. בהקשר זה חשוב לציין, כי החומרים הכבים מאליהם אינם חסינים משריפה. יתרונם בכך שניצוץ הנפלט, לדוגמה, מדוד חשמל על הגג, לא יגרום שרפה בבואו במגע עם חומר דליק (פלסטיק או עץ וכדומה) אלא רק ינקוב בו חור, בדומה לחור הנוצר בבגד סינתטי ממגע גץ סיגריה לוחט.

כתב העת "פולימרים ופלסטיקה בישראל" סיפר בגיליון נובמבר האחרון, כי בעקבות אסונות שקרו בבריטניה לפני שנתיים, שנגרמו כתוצאה משרפות, הוחלט לבצע שם במהירות רבה כמה שינויים בחוק, כדי למנוע בעתיד אסונות דומים. האסונות הביאו את רשויות חקכו, מוסדות המחקר והמשטרה לבצע בדיקות יסודיות שחשלו כי חלק ניכר מהאבידות בנפש לא נבע מכוויות ופגיעות חום, אלא בגלל חנק מגזים שנפלטו מרהיטים, שטיחים ווילונות העשויים סיבים סינתטיים, ומאבזורים נוספים שהכילו חומרים פלסטיים, כולל תקרות אקוסטיות ותקרות דקורטיביות. אולם עיקר הפגיעות באו משריפתם של אמצעי הריפוד המבוססים על הפוליאוריתן המוקצף. כתוצאה מכך התחוללה בבריטניה שערורייה רבת, שכן התברר שארגוני הצרכנים הגישו דרישה לשינוי תקני הפוליאוריתן המוקצף כבר כמה שנים קודם לכן, אך היא נמוגה בנבכי הבירוקרטיה. לאור האסונות שבו ונשלמו ההצעות, ואושרו כחוק תוך שבועות מספר.

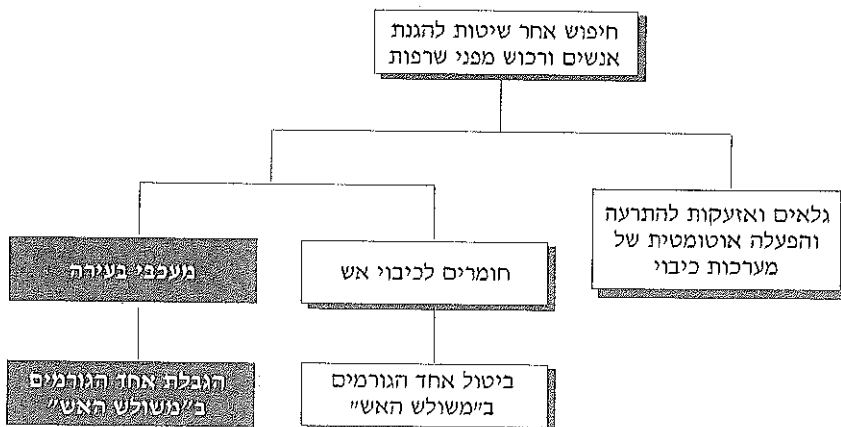
ניתן לחלק את הסכנות ל:

- א. **הרעלה** כתוצאה משאיפת **עשן של גזים רעילים** (למשל בשריפה של מזרונים העשויים מפוליאוריתן נפלט הגז הרעיל מימן ציאני HCN).
- ב. **נזק לרקמות** הנובע מחשיפה **לחום**.
- ג. **חנק** כתוצאה מהפחתת כמות החמצן¹⁴ שבאוויר ועליית ריכוז הפחמן הדו-חמצני והפחמן החד-חמצני (בתנאים של חוסר חמצן נוצר הגז פחמן חד-חמצני. גז זה נקשר למולקולות ההמוגלובין שבכדוריות הדם האדומות ומונע את אספקת החמצן למוח ולחלקי הגוף האחרים).
- ד. **הגבלת שדה הראייה** של הנמלטים והלכודים באיזור הבעירה כתוצאה מפליטת **עשן סמיך ופיח** גורמת להגדלת זמן החשיפה לסכנות המצויינות בסעיפים א'-ג'.

הידעת?

על פי פרסומים של ה-NFPA (האירגון האמריקאי למניעת שרפות) גורמים העשן והגזים הרעילים הנפלטים בעת השרפה ל-60%-90% ממקרי המוות. כמו כן פורסמו נתונים הטוענים כי הזמן הממוצע הנדרש להתפשטות מוחלטת של השרפה במבני מגורים, מבני ציבור ואחרים בעלי תכולה רגילה, הוא 2-5 דקות ולפיכך הזמן הממוצע שבו עדיין ניתן להמלט הינו קצר ביותר.

מאמץ עצום מושקע במלחמה נגד שרפות ובהקטנת נזיקה. פותחו אמצעים שונים לגילוי ולהתרעה, חומרים לכיבוי אש, ואמצעים להקטנת דליקותם של חומרים ומניעת התפשטותה המהירה של האש.



בכל אלו נעסוק בסעיפים הבאים, אך ראשית ננסה להכיר מקרוב את המנגנון הכימי של הבעירה ונקשר אותו עם ארבעת השלבים שתוארו קודם.

¹⁴ בשריפה בה הטמפרטורה היא מעל 1000°C, אפילו כאשר קיימת כמות מספקת של חמצן, נוצר פחמן חד-חמצני בתגובה בין פחמן דו-חמצני ופחמן.

תהליך הבעירה של תרכובות פחמן – כדוגמא לתגובת שרשרת

בפרק זה נעסוק כאמור בבעירתם של חומרים פלסטיים שהם מוצקים בטמפרטורת החדר. כדי להבין טוב יותר את התהליכים המולקולריים המתרחשים בעת הבעירה ואת שלביה, נתאר ראשית את התהליכים המתרחשים ברמה המקרוסקופית כאשר החומר הפלסטי מתחמם ומתחיל לבעור. ניתן לתאר את תהליך הבעירה של המוצק באמצעות הסכימה הבאה:



ברמה המקרוסקופית (מולקולרית) קליטת אנרגיה על ידי החומר עשויה לגרום להגברת התנועה התרמית של המולקולות. תנועה זו מתבטאת בעליית הטמפרטורה ובשבירת קשרים בין-מולקולריים ותוך-מולקולריים. כתוצאה מכך נוצרות מולקולות קטנות יותר ורדיקלים חופשיים העוברים משכבת המוצק לשכבה הגזית הקרובה לשטח פניו. תהליך הבעירה עצמו אינו מתרחש בשכבת המוצק או הנוזל אלא בשכבה הגזית (אזור הבעירה) ובו נוצרים ומשתתפים רדיקלים חופשיים.

רדיקלים חופשיים: חלקיקים בעלי אלקטרון לא מזווג.

כפי שלמדנו בפרקים קודמים, חלקיקים בעלי אלקטרון לא מזווג הם בעלי אנרגיה גבוהה ולכן אינם יציבים ומגיבים באופן לא בררני עם חלקיקים אחרים הנמצאים בסביבתם. באופן כזה גורמים רדיקלים חופשיים להתרחשותן של מספר רב של תגובות ללא סדר ומנגנון קבוע. התגובות בהן משתתפים רדיקלים חופשיים הן תגובות שרשרת המורכבות ממספר שלבים הקשורים זה בזה. ניתן להסביר את ארבעת שלבי תהליך הבעירה שתוארו קודם באופן כללי על-ידי התגובות הרדיקליות המתרחשות בכל אחד מהם:

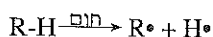
א. **הצתה** (Ignition) - מקור אנרגיה חיצוני מספק את אנרגיית השפעול הדרושה להתחלתו של תהליך **יצירת הרדיקלים החופשיים**.

ב. **התפתחות** (Propagation) - הבעירה מתגברת ומתפשטת על ידי **הגדלת מספר הרדיקלים**. בשלב זה רדיקל אחד גורם להיווצרות של יותר מרדיקל אחד.

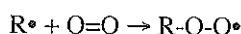
ג. **בעירה קבועה** (Steady combustion) - הבעירה ממשיכה בקצב ובטמפרטורה קבועים. קיים **איזון בין מספר הרדיקלים שנוצרים ומספר הרדיקלים שמתחסלים**.

ד. **סיום** (Termination) - הבעירה מתחילה להחלש ולבסוף דועכת לגמרי. בשלב זה **רדיקלים מגיבים בינם לבין עצמם** מבלי שנוצרים רדיקלים חדשים.

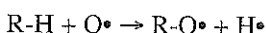
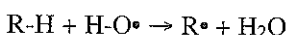
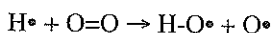
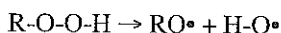
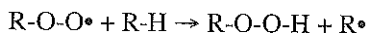
נדגים זאת באמצעות תגובת הבעירה של מולקולות קטנות של פחמימן כלשהו שנסמן כ- $R-H$. מולקולות קטנות אלו נוצרות תוך כדי תהליך הפרוק התרמי של הפולימר והן, כאמור, נודדות לאזור הבעירה (האזור הגזי שמעל הפולימר) ושם הן עוברות תהליכים שונים:



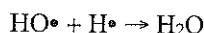
הצתה:



התפתחות ובעירה קבועה:



כתוצאה מתגובות בהן משתתף הרדיקל $CH_3\cdot$, מתקבל הגז פחמן דו-חמצני, CO_2 .



סיום:

או כל תהליך אחר בו מתחברים רדיקאלים ונוצרות מולקולות.

תוך כדי הבעירה נפלטת אנרגיה אשר בחלקה עוברת לסביבה ובחלקה עוברת לשכבת המוצק וגורמת שוב לעליית הטמפרטורה, להיתוך, לפרוק החומר וליצירת מולקולות קטנות ורדיקלים המתרכבים עם החמצן שבאוויר. באופן זה מספקת הבעירה אנרגיה לפירוק החומר הפלסטי, ואילו הפירוק עצמו מספק חלקיקים שיכולים לבעור.... וחוזר חלילה.

כיבוי בעירה

ניתן לכבות בעירה על-ידי פגיעה בכל אחד מהגורמים החיוניים לה והמופיע ב"משולש האש":

- הרחקת החומר הדליק
- ניתוק המגע עם החמצן
- קירור

שיטות הכיבוי חייבות להתאים לטיב החומר הבער ולסביבתו.

לפניך מספר דוגמות המדגימות זאת:

- שרפה הנובעת מדליפת גז ניתן להפסיק על-ידי ניתוק זרם הגז.
- אדם שבעירה אחזה בבגדיו צריך לכסותו בשמיכה או לגלגלו על פני הקרקע, אך אסור שהוא ירוץ. הסבר מדוע.
- מבנה בער ניתן לכבות באמצעות התזת מים.
- בעירה שאחזה במערכת חשמלית ניתן לכבות באמצעות פיזור חומר כיבוי אשר יוצר שכבה מבודדת אך אסור לכבות על ידי התזת מים¹⁵.
- ציין מהו הגורם (או הגורמים) החיוניים לבעירה בו פוגעים בכל אחד מהמקרים לעיל.

שרפות רבות מתפשטות במהירות וכתוצאה מכך לא מאפשרות כיבוי מיידי. לעיתים נדרשות שעות ארוכות עד לחיסולה הגמור של האש, ועד אז עלול להגרם נזק רב הן בנפש והן ברכוש.



אמצעים שונים לכיבוי אש

15 רצוי לנתק כמה שיותר מהר את מקור המתח באזור הבעירה.

עיקוב בעירה ומנגנוני פעולתם של חומרים מעכבי בעירה

כפי שראינו עד עכשיו המלחמה נגד שרפות מתרחשת בחזיתות אחדות, וכל אלו כדי למזער את הנזקים בנפש וברכוש. מטרת השימוש במעכבי הבעירה היא לעכב או למנוע את ההצתה של החומר הדליק, לקטוע את התקדמות הבעירה או לעכב את קצב התפשטותה.

אם כיבוי הבעירה הוא מלחמה שמטרתה חיסולו של אחד משלושת הגורמים ב"משולש האש", הרי שבעיכוב הבעירה המטרה העיקרית היא הגבלתו של אחד או יותר מגורמים אלה, כדי להאט את קצב התפשטות הבעירה ולאפשר מילוט. המים ידועים כמעכבי בעירה טובים. לדוגמא, עץ רטוב יהיה קשה יותר להדליק מאשר עץ יבש וקצב הבעירה שלו יהיה גם נמוך יותר. כך גם לגבי בד ספוג במים בהשוואה לבד יבש. נסה להסביר את פעולתם של המים בדיכוי הבעירה:

האם אפשר לשמור על מוצרי עץ שיהיו רטובים כל הזמן?

האם אפשר לשמור שוילונות, ריפודים, שטיחים וכד' יהיו רטובים?

כמובן שלא! על התעשייה הכימית הוטלה המשימה לייצר חומרים מעכבי בעירה שיוכלו להשתלב בתוך המוצרים הדליקים מבלי לשנות באופן משמעותי את תכונותיהם ומבלי שיחולו בהם שינויים כל זמן שהמוצר לא מתחמם באופן שעלול לגרום להידלקותו. המטרה היא לתכנן חומרים שיתחילו לפעול ול"הפריע" לבעירה רק כאשר הטמפרטורה עולה מעבר לערך מסויים (שהוא ערך ייחודי לכל פולימר ולכל מעכב בעירה).

ניסוי 5: השפעת מעכב בעירה על זליקות של נייר.

- א. חמם כמות קטנה של נתרן מימן פחמתי $\text{NaHCO}_3(s)$ במבחנה יבשה. רשום תצפיותיך ונסה להסביר אותן.
- ב. לשם נקישות אמצעי זהירות הכן כלי רחב ומלא אותו במים (כוס כימית, אמבט מים וכד'). הנח את הכלי עם המים על שולחן העבודה ובצע את כל הניסויים הבאים מעליו.
- ג. המורה יספק לך מספר פיסות של נייר סינון אותן תנסה להדליק על ידי נר בוער. אחוז את פיסת הנייר על ידי מלקטת (פינצטה) עשויה מתכת והקפד על מרחק זהה של כ-1 סמ' בין להבת הנר ופיסת הנייר. כמו כן הקפד על משך זמן זהה לחימום פיסת הנייר, כ-5 שניות בכל ניסוי.

- העתק את הטבלה הבאה למחברתך ורכז בה את התצפיות והמסקנות.

מסקנות	תוצאות התצפית	סוג הנייר
		נייר סינון ייבש רגיל
		נייר סינון ייבש ספוג בנתרן מימן פחמתי
		נייר סינון ייבש ספוג באמון דו מימן זרחתי
		נייר סינון ייבש ספוג באמון ברומי
		נייר סינון ייבש ספוג במלח בישול

- הסבר את תוצאות הניסויים השונים ורשום את מסקנותיך.
- מה צריכות להיות, לדעתך, הדרישות מחומרים שימשו כמעכבי בעירה בפולימרים השונים? התייחס בתשובתך גם לסוג המוצרים ושימושיהם. פרט והסבר.

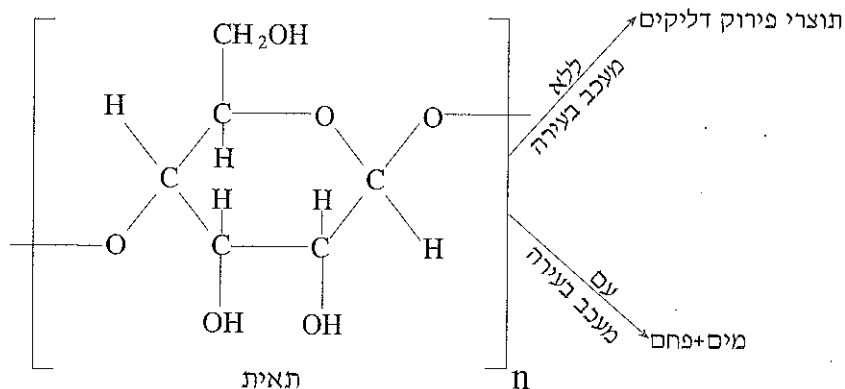
מעכבי בעירה שונים נבדלים זה מזה בתחומים שונים.
 - האזור בו הם פועלים
 - דרך פעולתם והאופן בו הם "מפריעים" לתהליך הבעירה.
 - האופן בו הם משולבים בתוך הפולימר

קיימים מעכבי בעירה הפועלים באופנים שונים, והמידע על דרך פעולתם לעיתים קרובות חלקי בלבד. חומרים מסויימים פועלים בשכבת המוצק, אחרים פועלים בשכבה הגזית שמעל פני המוצק (אזור הבעירה) ויש כאלו הפועלים בו זמנית בשתי השכבות. ברוב החומרים מתרחשת התפרקות אנדותרמית הגורמת לירידה משמעותית בכמות האנרגיה הזמינה לחימום המוצק וכך מאיטה את קצב התפרקותו. בנוסף לכך פועלים מנגנונים נוספים העשויים להשפיע על אחד או יותר מהגורמים השונים ב"משולש האש".

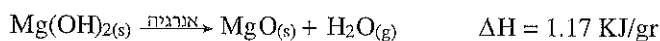
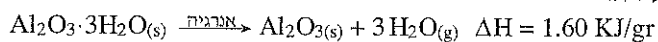
יש חומרים, אשר כתוצאה מהתחממותם מתפרקים ויוצרים על פני המוצק שכבה מבודדת ובלתי חדירה, כדוגמת קצף או משטח זכוכיתי. שכבה מבודדת זו לא מאפשרת לאנרגיה המשתחררת בעת הבעירה להגיע חזרה אל המוצק, ומהגזים הדליקים לצאת לאזור הבעירה.

כך לדוגמא, כשמוסיפים לתאית¹⁶ (צלולוזה) תרכובות זרחן או בור, מתרחש תהליך התפרקות אנדותרמי בו נוצרים אדי מים ו"פיח" (שאינו נדיף ולכן לא מגיע לשכבה הגזית) במקום תוצרי פרוק דליקים המתקבלים ללא נוכחות מעכבים אלו. התהליך האנדותרמי מקטין את כמות האנרגיה הזמינה לתהליך, אדי המים מדללים את ריכוז החמצן באזור הבעירה והפחם הינו חומר מבודד ובעל טמפרטורת התלקחות גבוהה מאוד.

16 תאית - פולימר המצוי בדפנות תאי הצמחים. תאית מעובדת משמשת בין השאר גם לתעשיית הנייר והקרטון.

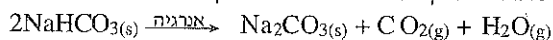


במקרים אחרים, כמו למשל בפוליפרופן, כאשר משתמשים במעכבי בעירה המבוססים על תרכובות אורגניות של זרחן וחנקן או כהלים, מתחילים להיווצר כבר עם תחילת הבעירה והתכתו של החומר הפלסטי גזים אדישים (אינרטיים) כמו אדי מים או פחמן דו-חמצני. בנוסף לכך מתרחשות תגובות כימיות הגורמות לפוליפרופן "להתפחם". הגז נלכד בתוך שכבת "הפיח" ויחד הם מהווים מעין שכבת קצף קשיה המשמשת לבידוד. מצד אחד ממזערת שכבת בידוד זו פרוק של חומר מוצק נוסף על-ידי כך שמונעת מהאנרגיה הנפלטת בתהליכי השרפה (המתרחשים באזור הגזי) להספג חזרה בשכבת המוצק. מצד שני היא אינה מאפשרת לגזים הדליקים שנוצרים לצאת החוצה לשכבה הגזית ולבעור. פעולתם של אלומינה שלוש הידראט (טמפרטורת פרוק 230°C) או מגנזיום הידרוקסידי (טמפרטורת פרוק 320°C) מוסברת מצד אחד על ידי ההתפרקות האנדותרמית הגורמת לירידה בכמות האנרגיה הזמינה להמשך התהליך, ומצד שני על ידי שחרור אדי המים הגורם לדילול החמצן ולהקטנת ריכוז הגזים הדליקים באזור הבעירה.



התבונן בנתונים לגבי אלומינה שלוש הידראט ומגנזיום הידרוקסידי. באילו מקרים ניתן יהיה לדעתך להשתמש בכל אחד מהם?

דוגמא אחרת היא חומרים כמו נתרן מימן פחמתי, NaHCO_3 , אשר בתהליך התפרקות אנדותרמי משחרר בנוסף לאדי מים גם פחמן דו-חמצני:



צפיפות פחמן דו-חמצני היא 1.95 גרם לליטר (ב- 25°C).

צפיפות אוויר יבש היא 1.18 גרם לליטר (ב- 25°C).

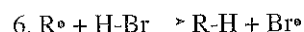
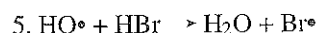
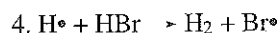
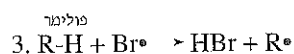
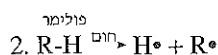
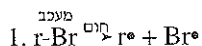
- כיצד משפיעה עובדה זו על תרומתו של הפחמן הדו-חמצני לעיכוב הבעירה?
- מהם הגורמים ב"משולש האש" עליהם עליהם עשוי להשפיע נתרן מימן פחמתי כמעכב בעירה? פרט והסבר.

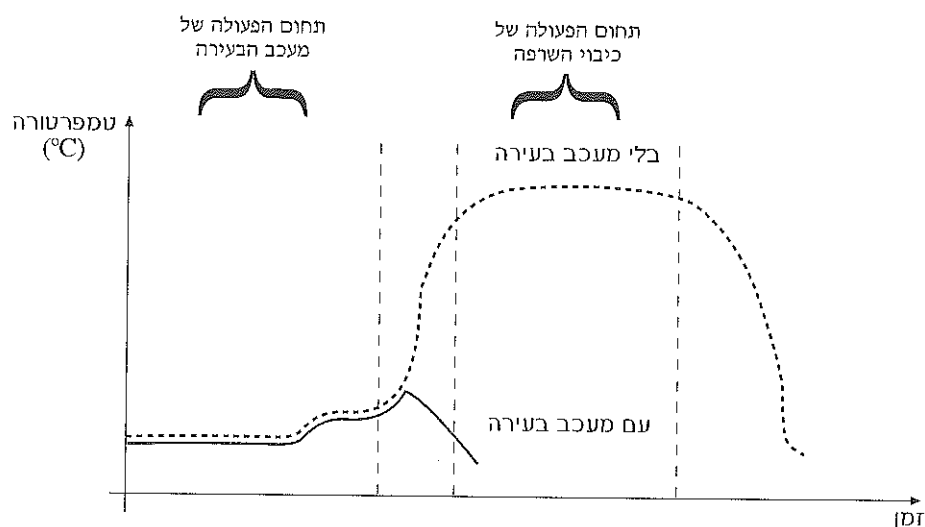
- נתון מימן פחמתי מתפרק בתחום הטמפרטורות $50-100^{\circ}\text{C}$. חומר זה אינו משמש בדרך כלל כמעכב בעירה אבל הוא משמש כאבקה יבשה לכיבוי אש. הסבר.

פעולתו של נתון מימן פחמתי משלבת השפעה על שני גורמים במשולש ה"אש".

- הקטנת כמות האנרגיה הזמינה להמשך הבעירה.
- דילול כמות החמצן בשכבת הגז הקרובה למוצק הבעור, כתוצאה מהתפרקותו לפחמן דו-חמצני ולאדי מים.

תרכובות ההלוגן המשמשות כמעכבי בעירה פועלות בדרך כלל באיזור הגזי. לרוב מדובר בתרכובות פחמן המכילות אטומי כלור וברום. מנגנון פעולתם של מעכבי בעירה אלו מורכב יחסית, אך לא פחות יעיל. זהו מנגנון רדיקלי המשתלב במנגנון הבעירה שתארנו קודם ומביא לעיכובו. קליטת אנרגיה מתאימה על-ידי מעכב בעירה המכיל הלוגן גורמת לפרוק קשרי פחמן-הלוגן (C-Cl ו- C-Br). רדיקלי ההלוגן שנוצרים בשכבה הגזית מגיבים עם אטומי המימן שעל הפולימר ליצירת מולקולות מימן הלוגן (H-Cl ו- H-Br). למולקולות אלו תפקיד חשוב "בבלימת" תגובות השרשרת המתרחשות בעת בעירת הפולימר. אנו רואים (בתגובות 4-5), כי מולקולות אלו מגיבות עם רדיקלים פעילים במיוחד כמו $\text{H}^{\bullet}$ ו- $\text{HO}^{\bullet}$. במקום רדיקלים פעילים אלו נוצרות מולקולות כמו H_2 ו- H_2O ורדיקלים כבדים של $\text{Cl}^{\bullet}$ או $\text{Br}^{\bullet}$, ה"סופגים" כמות גדולה יחסית של אנרגיה מאזור הלהבה, ומשמשים כרדיקלים "מתונים" שפעילותם נמוכה יותר. באופן כזה פוחתת האנרגיה החוזרת לפולימר העולה לגרום לפרוק כמות נוספת שלו. שילובם של רדיקלי הלוגנים בתהליך הבעירה מאט את קצב התפשטותה ומביא לריסונה. נדגים זאת באמצעות חלק מהתגובות המתרחשות בעת בעירה של פולימר כלשהו (שנסמנו ב-R-H) בנוכחות מעכב בעירה המכיל ברום (שנסמנו ב-r-Br):





מקטאר בעירה ללא מעכב בעירה בהשוואה לבעירה מעוכבת

לעיתים קרובות משלבים יחד עם תרכובות ההלוגן האורגניות המשמשות כמעכבי בעירה גם תחמוצות של אנטימון, כמו Sb_2O_3 . תרכובות אלו פועלות באופן סינרגטי, כלומר משפרות ומגבירות את פעולת עיכוב הבעירה באופן שפעולתם של החומרים יחד גדולה מסכום פעולתם של החומרים כשהם בנפרד.

להלן נתונים של ערכי אנרגיות הקשר פחמן-הלוגן.

הקשר	אנרגיית הקשר (ק' ג'ול למול)
C-F	452
C-Cl	333
C-Br	276
C-I	234

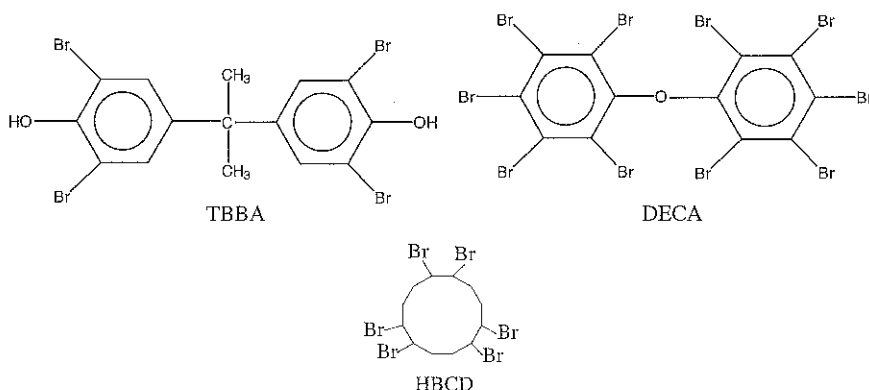
- תרכובות פלואור ותרכובות יוד לא משמשות כמעכבי בעירה. הסבר מדוע.
- מדוע יכולות תרכובות כלור וברום לשמש כמעכבי בעירה?
- לאילו הבדלים ניתן לצפות בין תרכובות כלור לבין תרכובות ברום? נסה לחשוב על תחומים רבים ככל האפשר.

ניתן לצפות כי תרכובות יוד תהיינה היעילות ביותר לעיבוד בעירה, שכן רדיקלי יוד כבדים יותר מרדיקלי כלור או ברום. בפועל אין משתמשים בתרכובות יוד בחומרים פלסטיים בגלל היציבות התרמית הנמוכה שלהן; קשרי C-I חלשים יחסית ולכן טמפרטורת הפרוק שלהן בדרך כלל נמוכה מהטמפרטורה בה מעובד החומר הפלסטי או מהטמפרטורה בה מתרחשת הבעירה. חסרונות נוספים של היוד הם מחירו הגבוה יחסית לזה של הכלור או הברום, וכמו כן יציבותו הגבוהה יחסית של הרדיקל המביאה לפעילותו המוגבלת.

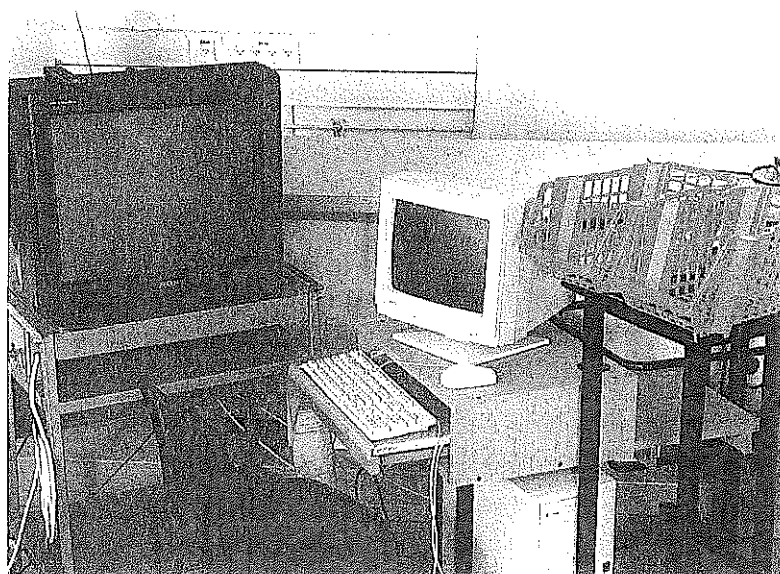
פלואורו פחמימנים הם חומרים לא דליקים, אך למרות זאת אין ביכולתם לשמש כמעכבי בעירה. במקרים מסוימים קשרי C-F יציבים מדי, ובמקרים אחרים רדיקלי הפלואור, שהם מאד פעילים, יוצרים מיד מולקולות HF שאינן משתתפות במנגנון עיכוב הבעירה.

- אילו מעכבי בעירה הם יעילים יותר, לדעתך, מעכבי בעירה המכילים כלור או אלו המכילים ברום? התייחס בתשובתך למצב בו משתמשים במספר מולים זהה של מעכב.
- אילו תרכובות תהיינה לדעתך יקרות יותר, תרכובות הכלור או תרכובות הברום? הסבר.
- נסה להעריך את הכמות היחסית של תרכובות כלור בהשוואה לתרכובות ברום, הנדרשת כדי לקבל פעילות מסוימת זהה של עיכוב בעירה.

כדי להגביר את יעילותם של מעכבי הבעירה נבדקים שילובים של חומרים שונים. כך למשל נמצא, כי שילוב של מגנזיום הידרוקסיד, $Mg(OH)_{2(s)}$, מקטין את כמות העשן הנפלטת בעת שרפה. כמו כן קיימים שילובים המשפרים את התכונות המכניות והחשמליות של המוצר הסופי. דוגמאות למעכבי הבעירה מכילי הברום הנפוצים כיום בשימוש הם:



מעכבי הבעירה המכילים ברום הם בדרך כלל יותר יעילים (כאשר משווים את פעולתם ביחס של מול למול) מאשר אלו המכילים כלור. זאת בגלל שרדיקלי הברום כבדים בהרבה מרדיקלי הכלור (על פי יחסי המסות המולריות האטומיות) ולכן סופגים יותר אנרגיה מתהליך הבעירה. למרות שמחיר הברום גבוה ממחיר הכלור ולמרות שתרכובות הברום תורמות לעליית המסה של הפולימר באופן יחסי יותר מתרכובות הכלור, לעיתים קרובות מעדיפים דוקא את תרכובות הברום בגלל יעילותן הגבוהה יותר באופן יחסי. כדי להשיג אותו עיכוב בעירה נדרש פחות חומר ולכן קטנה יותר השפעתו של החומר הזר על הפולימר ותכונותיו.



מכלי תגובה במיתקן לייצור מעכב בעירה

בחירת מעכבי הבעירה עבור הפולימרים השונים היא תהליך מורכב במהלכו חייבים להתחשב במספר רב של גורמים. עד כאן ראינו, כי מעכבי הבעירה חייבים להתאים לסוג החומר הדליק, לתכונותיו, ולגורמי ההצתה השכיחים בסביבתו. כך למשל, צריכים מוצרי חשמל ואלקטרוניקה להכיל מעכבי בעירה שיגנו עליהם במקרה של קצר חשמלי, שטיחים וריפוד צריכים להכיל מעכבי בעירה שיגנו עליהם כאשר הם חשופים לסיגריות דולקות וכד'. בהמשך הפרק נדון בדרישות נוספות ממעכבי בעירה.

נסה להציע אמות מידה כלליות על פיהן יבחרו מעכבי הבעירה לשימוש במוצרים השונים?

כיצוד משלבים את מעכבי הבעירה במוצרים השונים?

מעכבי הבעירה יכולים להשתלב במוצרים השונים בשתי צורות: כחומרים "מוספים" וכחומרים "פעילים".

מעכבי בעירה "מוספים"

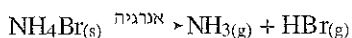
את מעכבי הבעירה "המוספים" משלבים בתוך המוצרים השונים בשתי צורות:
א. מספיגים את תמיסות החומרים בתוך המוצר. בדרך כלל מתייחסת שיטה זו לעץ ולמוצרי או לתעשיות הטקסטיל.
ב. מערבבים את מעכבי הבעירה הללו יחד עם הפולימר ויחד עם תוספים אחרים. בדרך כלל נעשה הערבוב תוך כדי התכתם, בשלב העיבוד של המוצר הפלסטי.

יתרונם הבולט של מעכבי בעירה אלו הוא בכך שאין צורך בתכנון תהליכים כימיים מורכבים כדי לשלב אותם במוצר הפלסטי. כמו כן ניתן להוסיפם בכמויות משתנות ולכוון בדיוק את הכמות הדרושה על פי תקן הבדיקה הנדרש עבור היישום המסוים.

בצד היתרונות של מעכבי בעירה "מוספים" יש להם גם חסרונות. החיסרון העיקרי הוא בכך שבהעדר קשרים קוולנטיים ביניהם לבין מולקולות הפולימר נוטים רבים ממעכבי הבעירה ה"מוספים" לנדוד אל שטח הפנים של המוצר, להצטבר כאבקה ועם הזמן להתפזר. תופעה זו נקראת "פריחה" (bloom) והיא גורמת לירידה ביעילותם של מעכבי בעירה אלו עם הזמן וגם למראה לא נאה של המוצר הסופי הפוסל את השימוש בו. בנוסף לכך עלול השימוש בחומרים אלו לגרום לפגיעה בתכונות המכניות של המוצר (לדוגמא: ירידה בחוזק המכני). בשנים האחרונות נעשה מאמץ למצוא מעכבי בעירה "מוספים" שתופעת ה"פריחה" אצלם מזערית. חומרים אלו יוצרים קשרים בין-מולקולריים חזקים עם הפולימר וכך הם נשארים לאורך זמן בתוך החומר הפלסטי.

אלומינה שלוש הידראט ומגנזיום הידרוקסיד, בהם עסקנו קודם, הם דוגמאות למעכבי בעירה "מוספים" שאינם מכילים ברום. נהוג להוסיף אותם למוצרים פלסטיים רבים כדוגמת צינורות בידוד לחשמל, חומרי בנייה שונים ועוד.
אמון ברומי, NH_4Br , והקסא-ברומו ציקלודודקאן (HBCD) הם דוגמאות למעכבי בעירה "מוספים" המכילים ברום.

תמיסת אמון ברומי מוספגת בדרך כלל במוצרי עץ וטקסטיל. האמון הברומי מתפרק בחימום לאמוניה ולמימן ברומי, אשר פועל לעיכוב הבעירה כפי שהסברנו לעיל.



הקסא-ברומו ציקלודודקאן (HBCD) משמש כמעכב בעירה "מוסף", שכן אין לו קבוצות פונקציונליות שיכולות להיות מקושרות לשרשרת הפולימר. הוא משמש כמעכב בעירה במוצרים פולימריים שונים, ובעיקר בשרפים סטירניים (המבוססים על סטירן או נגזרת שלו כמונומר) ובעיקר בפוליסטירן ובפוליסטירן מוקצף (קלקר), שהם פולימרים המשמשים כלוחות בידוד לבנייה, למוצרי חשמל, למוצרי אלקטרוניקה ועוד.

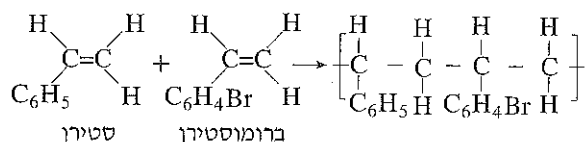
מעכבי בעירה "פעילים"

מעכבי בעירה פעילים משולבים כחלק בלתי נפרד משרשרות הפולימר, בדרך כלל על ידי קופילמור¹⁷, כאשר אחד המונומרים היא תרכובת ברום או כלור מתאימה. מעכבי בעירה אלו נקשרים לשרשרות הפולימר בקשרים קוולנטיים ומהווים חלק ממנו. מעכבי הבעירה ה"פעילים" חייבים להתאים בתכונותיהם לתכונותיו של הפולימר, והמולקולות שלהם חייבות להכיל קשרים מתאימים לאלו הקיימים במונומרים שממנו מורכב הפולימר, או לקבוצות פונקציונליות החופשיות הנמצאות על שרשרותיו.

נמחיש זאת על-ידי מספר דוגמאות:

בייצור פולימרים דוגמת פוליאתן (פוליאתילן), $(\text{C}_2\text{H}_4)_n$, הנוצרים בתהליך סיפוח ממונומרים כדוגמת אתן, $\text{C}=\text{C}$, ניתן להשתמש במעכב שגם במולקולות שלו ישנם קשרים כפולים.

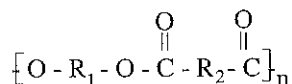
במקרים אלו מולקולות המעכב יכולות להחליף חלק מהמונומרים בעת תהליך הפילמור. כך משמש הברומו סטירן כמונומר מעכב בעירה במספר תגובות קופילמור. דוגמא לכך היא יצירת הקופולימר עם סטירן:



- PVC, פוליוויןיל כלורי, הוא פולימר המשמש למטרות שונות:
- ציין שימושים שונים של PVC הידועים לך.
- מאיזה מונומר הוא בנוי?
- האם לדעתך ה-PVC דליק מאוד? הסבר

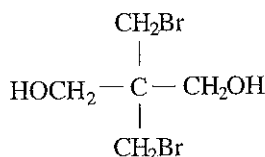
17 פילמור על ידי שילוב מונומרים שונים באופן שהפולימר המתקבל אינו מכיל יחידה חוזרת אחידה.

גם בפילמור על-ידי **זחיסה**, כמו למשל בייצור פוליאסטרים, ניתן להשתמש במעבכי בעירה כתחליף חלקי למונומרים. נציג נוסחה כללית של פוליאסטר באופן הבא:

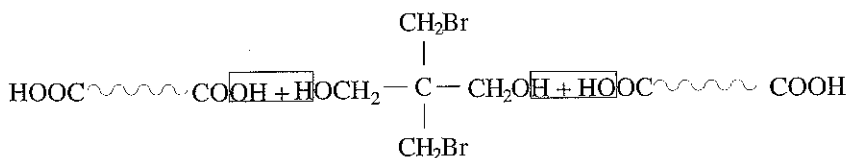


- מהם המונומרים מהם מורכב פולימר זה?
- אילו קבוצות פונקציונליות יכול להכיל מעבכ הבעירה כדי שיתאים לפוליאסטר זה? פרט ורשום נוסחות.

התרכובת די ברומו ניאופנטיל גליקול¹⁸ (DBNPG):



שהוא דו-כוהל יכול לבוא במקום המונומר המתאים המתקשר עם מונומר הדו-חומצה ליצירת הפוליאסטר:

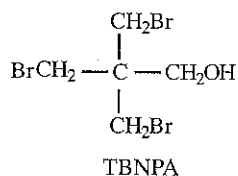


באופן כזה מהווה המעבכ חלק משלד הפולימר. מולקולת המעבכ יכולה להחליף את המונומר הדו-כוהלי באופן חלקי או מלא, בהתאם לכמות הברום הנדרשת לעיכוב הבעירה המתוכנן ובאופן שלא יפגע בתכונות הפולימר. גם במקרים בהם על הפולימר קיימות קבוצות קרבוכסליות חופשיות יכול מעבכ בעירה זה להתקשר אליהן וליצור קשר אסטרי צדדי.

- הצג קטע של פולימר מסוג זה.
- לאילו פולימרים יכול לדעתך להתאים מעבכ בעירה כמו טרי ברומו ניאופנטיל אלכוהול¹⁹ (TBNPA)?

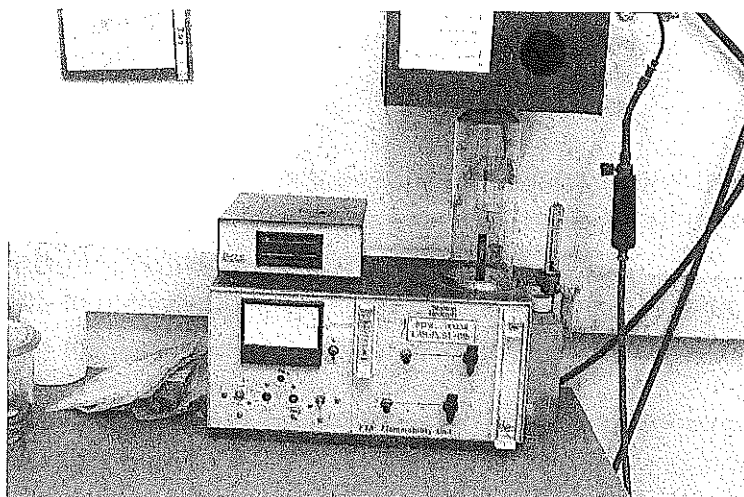
18 דו-ברומו ניאופנטיל גליקול - 2,2 di-bromo methyl propyl glycol

19 טרי-ברומו ניאופנטיל אלכוהול - 3 bromo 2,2 di-bromo methyl propanol



המעבדה היישומית לפלסטיקה

במעבדה היישומית לפלסטיקה של קבוצת הברום נבדקות תכונות שונות של פולימרים וחומרים פלסטיים שונים עם מעכבי בעירה ובלעדיהם. במעבדה זו מצוי ציוד לעיבוד חומרים פלסטיים אשר מאפשר ביצוע תרכובים בתנאים זהים לתנאי העיבוד התעשייתיים. כמו כן מצויים מכשירי מדידה העומדים באמות המידה של התקינה הבינלאומית, אשר באמצעותם ניתן לבדוק תכונות שונות של חומרים פלסטיים: מכניות, תרמיות, איקלומיות, אופטיות, בעירה וכימיות. לצורך הבדיקות מכינים דוגמיות של פולימרים שונים עם ריכוזים שונים של מעכבי בעירה שונים או בלעדיהם ובודקים, תכונות מכניות, תכונות של דליקות, פליטת עשן תוך כדי בעירה. הבדיקות מתבצעות באופן שוטף תוך כדי שיתוף פעולה עם הלקוחות עבור כל מוצרי קבוצת הברום וכך ניתן לבדוק את השפעתם של מעכבי הבעירה על חומרים פלסטיים שונים ואת יעילותם.

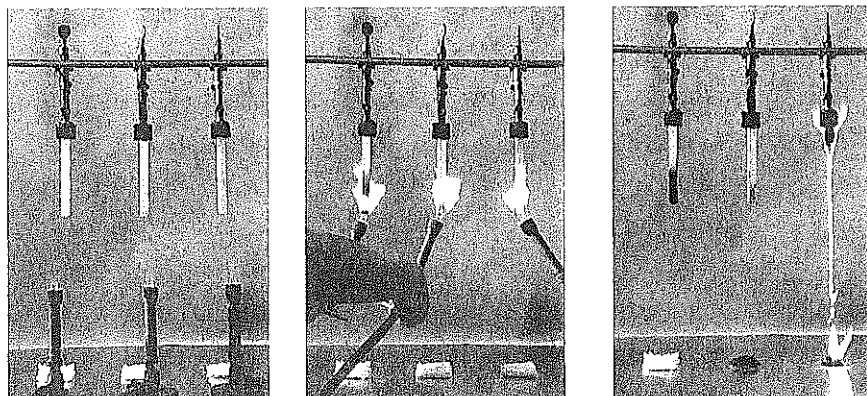


מכשיר לבדיקת LOI במעבדה היישומית לפלסטיקה

ניסוי 206: המחשת השפעתו של מעכב בעירה על מוצר פלסטי (ראה צילומים)

- א. בתוך המנדף חבר בצורה אנכית באמצעות תופסן מתכתי כל אחד משלושת מקלוני הפוליפרופן (פוליפרופילן) אל מעמד מתכת אחר²¹.
- ב. קרב בו זמנית ולמשך זמן זהה של 10 שניות את שלושת מבערי הבונון הדולקים למקלוני הפוליפרופן.
- ג. צפה במקלונים לפני חשיפתם ללהבת הבונון, בעת החשיפה ללהבה ולאחר מכן.
- ד. חזור על שלבים ב ו-ג פעם נוספת.

- הסבר את המתרחש בעת ניסוי.
- זהה את סוגי המקלונים השונים: ללא מעכב בעירה, עם אחוז נמוך של מעכב בעירה ועם אחוז גבוה של מעכב בעירה.



שרפת שלושה מקלוני פוליפרופן (תצלום ניסוי)

חידעת:

אחת הסכנות בתקריות פלסטיות היא סכנת הטיפטוף. כאשר החומר הפלסטי מתחיל לבעור ולהנתך מטפטפות טיפות החומר הפלסטי המותך כלפי מטה ועוללות להבעיר כל עצם דליק שנמצא מתחתיו. המטרה היא למצוא חומרים שבנוסף לתכונת עיכוב הבעירה יימנעו את טיפטוף הנתך. נמצא כי קיימים מעכבי בעירה, כמו DECA, הממלאים דרישה זו עבור פוליפרופן.

20 ניתן לחילופין לצפות בסרטון העוסק במעכבי בעירה מתוך הקלטת "הברום ותרכובותיו", הוצאת מכון ויצמן למדע, רחובות.

21 ישנם תקנים שונים לבדיקות דליקות. בדיקה זו היא רק דוגמא לאחת מהבדיקות המקובלות.

שיקולים בבחירת מעכבי בעירה

מהן התכונות ההכרחיות הנדרשות ממעכב בעירה? אילו מעכבי בעירה הם היעילים ביותר? כיצד בוחרים מעכב בעירה מתאים לפולימרים השונים? לשימושים השונים? שאלות אלו ואחרות מעסיקות הן את החוקרים של קבוצת הברום והן חוקרים ויצרני מוצרים פלסטיים במקומות שונים בעולם.

העלייה במודעות הציבור, ובמיוחד במדינות המפותחות, לסכנות השרפות ולנוזקהן, גרמו לקביעת תקנים הכוללים תכונות של עיכוב בעירה למוצרים שונים. חשיבות מיוחדת ניתנה לאכיפת החוק במבני ציבור. כתוצאה מכך גדל השימוש במעכבי בעירה במוצרים פולימריים רבים המשמשים לבנייה, בצידוד חשמל ואלקטרוניקה ועוד.

ראינו כי תרכובות שונות יכולות לשמש מעכבי בעירה ולמדנו על תרכובות ברום המשמשות למטרה זו ביעילות רבה. כצפוי, לא כל תרכובות הברום האורגניות מתאימות לשמש כמעכבי בעירה. חומר צריך לקיים מספר דרישות נוספות לפני שניתן יהיה לשקול אם יתאים ליישום כמעכב בעירה בפולימר ספציפי.

לעיתים קרובות יש השוכחים שהפולימר עצמו הוא רק אחד מהמרכיבים של המוצר הפלסטי. כל מוצר פלסטי מכיל חומרים רבים נוספים, כמו מלאנים (שתפקידם לרכך או להקשיח את החומר הפלסטי), מייצבי קרינת U.V (קרינה אולטרא סגולה) וחומרים מונעי חמצון (שתפקידם למנוע את "קילקולו" של החומר הפלסטי כתוצאה מחשיפה לאור או חמצן בהתאמה), צבעים (שאמורים לשפר את צורתו החיצונית של המוצר), תוספים אנטיסטטיים (שתפקידם לדאוג לתכונותיו החשמליות של המוצר הפלסטי) וכמובן מעכבי הבעירה.

בחירת המעכב המתאים מתבססת על **שיקולים כימיים, שיקולים טכנולוגיים, שיקולים כלכליים ושיקולי איכות הסביבה**.

התאמת המעכב למטרתו תלוייה במבנהו המולקולרי, בתכונותיו, בעלויות ייצורו ובדרישות הבטיחותיות והסביבתיות:

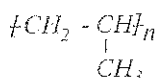
סוג הפולימר (מבנה, קבוצות פונקציונליות)
טמפרטורת העיבוד של הפולימר
הטמפרטורה בה הפולימר מתחיל להתפרק
התאמה למכלול התכונות הנדרשות מהמוצר הסופי (תכונות מכניות, צבע, ועוד)
עלות החומר ויעילותו היחסית
"ידידות" לאדם ולסביבה

יעילותו של מעכב הבעירה ותכונות העיכוב הנדרשות מהמוצר הסופי
התכונות האחרות הנדרשות מהמוצר הסופי (תכונות מכניות ואחרות)

הדרישה העיקרית מכל מעכבי הבעירה היא כמובן להקטין במידה משמעותית ויעילה את הקצב והעוצמה של בעירת המוצר הפלסטי. כתוצאה מכך יקטנו הקצב והכמות של יצירת CO וחומרים מסוכנים אחרים הנוצרים בהתאם לתנאי הבעירה וההרכב של החומר הפלסטי (כמו למשל פחמימנים דליקים או HCN הנוצר בעת בעירה של מוצרי פוליאוריתן) ומשתחררים לשכבה הגזית.

דרישה נוספת וחשובה ביותר עבור כל מעכב בעירה היא התאמתו המבנית והטכנולוגית לפולימר, או ביתר דיוק, למוצר הפלסטי בו הוא משתלב. מעכב "מוסף" צריך לחדור בין שרשרות הפולימר ולהשאר "קשור" אליהן חזק ככל האפשר כדי שלא ינדוד לשטח הפנים של הפולימר ויתפזר. דרישה נוספת היא שהמעכב יוכל ליצור בקלות תערובת עם הפולימר. משמעותה של דרישה זו היא שהמעכב והפולימר יהיה בערך בעלי אותה צמיגות במצב מותך. מעכב "פעיל" צריך להכיל קבוצות פונקציונליות מתאימות כך שיוכל להתקשר אל שרשרות הפולימר (בזמן הפילמור או אחרי הפילמור). דרישות נוספות הקיימות, הן לגבי מעכב "מוסף" והן לגבי מעכב "פעיל", קשורות לטמפרטורה בה מתיכים את תערובת הפולימר והתוספים²² בשלב העיבוד של המוצר הפלסטי לצורתו הרצויה (טמפרטורת ההיתוך של הפולימר) ולטמפרטורה בה הוא מתחיל להתפרק כאשר מחממים אותו. כדי שהמעכב יהיה יעיל, הוא צריך להתפרק בטמפרטורה הדומה להתחלת הפרוק של הפולימר הבסיסי (שהיא בדרך כלל בין 200°C-300°C), אך אסור שהמעכב יתפרק בזמן עיבוד הפולימר (שלב זה נקרא גם תרכוב).

פוליפרופן הינו פולימר המשמש בין השאר להכנת צינורות פלסטיים שתפקידם לבדוד כבלי חשמל עבור תעשיית הבנייה. נוסחת הפוליפרופן היא:



- פוליפרופן ניתן בטמפרטורה של 180°C ומתחיל להתפרק בערך ב- 250°C.
- האם ניתן להשתמש עבור פולימר זה במעכב בעירה "מוסף"? "פעיל"? נמק.
 - האם מעכב בעירה שטמפרטורת ההיתוך שלו היא 70°C וטמפרטורת הפרוק שלו היא 180°C מתאים לשימוש בפולימר זה? נמק את תשובתך.
 - האם מעכב בעירה שטמפרטורת ההיתוך שלו היא 180°C וטמפרטורת הפרוק שלו היא 200°C מתאים לשימוש בפולימר זה? נמק את תשובתך.

22 לקריאה נוספת: הכימיה-אתגר, פולימרים, מאת נאוה מילנר, הוצאת מכון ויצמן למדע (עמ' 127-129).

לכל פולימר יש "חלון עבודה" על פיו נבחר המעכב המתאים לו. חלון זה צריך להיות בין טמפרטורת העיבוד שלו לבין טמפרטורת הפרוק שלו. המטרה היא לבחור מעכב בעירה אשר מצד אחד לא ינוק בעת עיבוד החומר הפלסטי ומצד שני יתחיל להתפרק בערך באותה טמפרטורה בה מתחיל להתפרק החומר הפלסטי. רק כך יוכל לפעול כאשר הוא נדרש.

לסיכום, כדי שחומר מסויים יתאים לשמש כמעכב בעירה צריכים להתקיים לגביו התנאים הבאים:

- לא מתפרק בטמפרטורה בה מיוצר הפולימר או מעובד.
- לא מוזק לצידו בו מיוצר או מעובד הפולימר.
- לא מתפרק בטמפרטורה ובתנאים בהם משתמשים בפולימר.
- לא פוגע באופן משמעותי בתכונות העיקריות של הפולימר (למשל: שקיפות, חוזק מכני, עמידות לחומרים כימיים וכד').
- מתפרק בטווח טמפרטורת הפרוק של הפולימר.
- מחיר סביר (מתאים לתוספת המחיר שהלקוח מוכן לשלם עבור אותו מוצר עם תכונות טובות יותר של עמידות בפני בעירה).

דרישה נוספת ולא פחות חשובה היא "הידידותיות" לסביבה:

- רעילות תוצרי הפרוק של מעכב הבעירה הינה קריטית והדרישה היא שמעכב הבעירה עצמו לא ישחרר חומרים רעילים העלולים להיות מסוכנים בטווח קצר או בטווח ארוך.

הבט סביבתי זה הפך לחשוב במיוחד אחרי "תקרית Seveso" שהתרחשה ב-1976 בעיר Seveso שבאזור לומברדיה, באיטליה. התאונה קרתה כאשר תערובת של חומרים הכוללת חומרים הנקראים דיאוקסינים, הנחשבים בדרך כלל מאד רעילים, השתחררה ממכל תגובה שחומם ביתר במפעל Icmesa לייצור חומרי הדברה והתפזר באזורים רחבים של Seveso ובסביבתה.

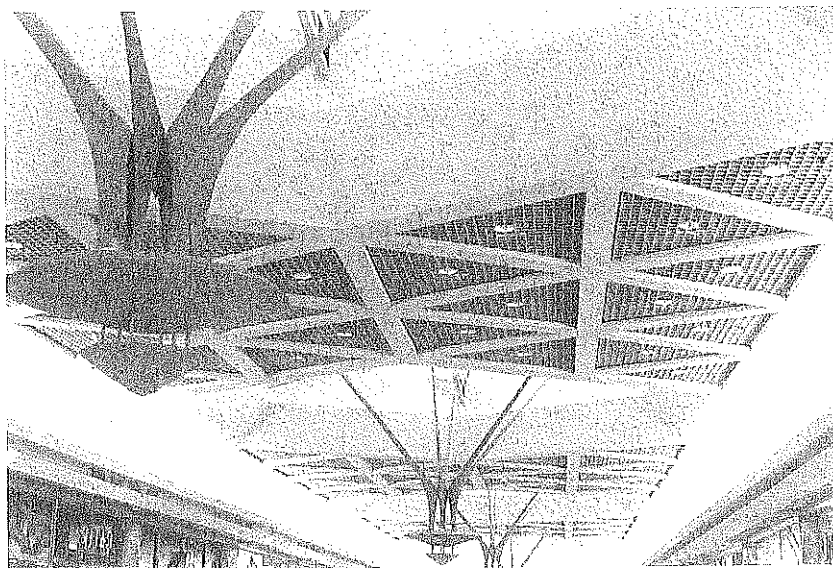
כיום ידוע, כי בתנאים מסויימים יכולים להיווצר דיאוקסינים וחומרים נוספים הנקראים בנזופורנים במהלך בעירה של תרכובות אורגניות מסוימות המכילות כלור. בשריפות בהן מעורבות תרכובות ברום אורגניות מסוימות עלולים להיווצר גם כן דיאוקסינים ובנזופורנים המכילים ברום. בעיה זו של הוצרות דיאוקסונים ובנזופורנים של הלוגנים צריך לקחת בחשבון לא רק בעת התרחשותן של תאונות או תקלות במתקני ייצור, אלא גם כאשר שורפים פסולת ביתית או תעשייתית. ב-20 השנה האחרונות קיים דיון רחב על בעית הדיאוקסינים והבנזופורנים הנחשדים כרעילים. אירגון ה-EPA פירסם ב-1987 חוק הדורש לעשות בדיקה של שמונה מעכבי בעירה מכילי ברום נפוצים לנוכחות דיאוקסינים ובנזופורנים.

בדיקות אלו צריכות להיעשות הן במעבדי בעירה והן בחומר הפלסטי המכיל אותם. גם הרשויות בגרמניה הוציאו חוק המגביל את נוכחות הדיאוקסינים והבנזופורנים במוצרים הפלסטיים.

הידעת?

הבעייה שנוצרה עם חקיקה זו קשורה ביכולת טכנולוגית. היה צורך לפתח שיטות למדידת כמויות זעירות מאד של חומרים אלו ברמה של 23 ppb . לשם כך פיתחו במיוחד מיכשור מורכב ושיטות מדידה מדוייקות ביותר. בעולם קיימות היום מספר קטן של מעבדות המסוגלות לבצע מדידות אלו.

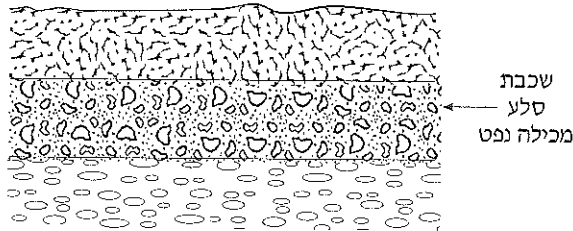
כפני הרשויות עומדת דילמה קשה. מצד אחד קיים הרצון להקטין נזקים בנפש וברכוש כתוצאה משריפות, ומצד שני חייבים למנוע נזקים אפשריים לאדם ולסביבה כתוצאה מפליטתם של חומרים רעילים. דון בקבוצה על ההבטים השונים של הנושא והצע דרכים באמצעותן ניתן לפתור דילמה זו.



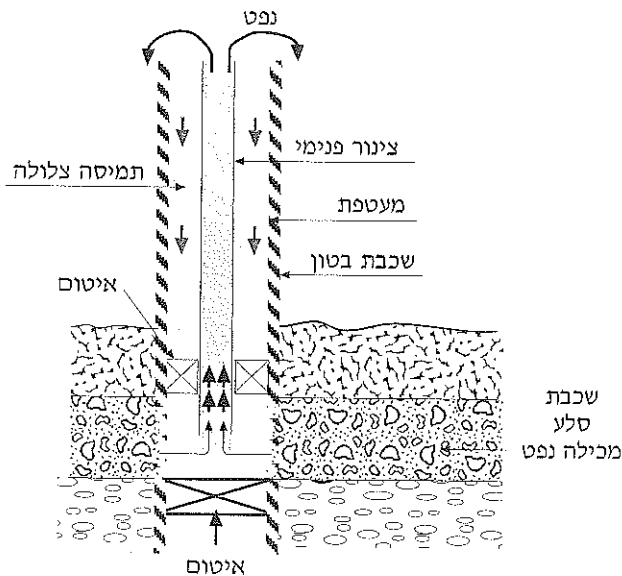
תקרה אקוסטית במרכז "שלום" בת"א. התקרה עשויה מחומר פלסטי על בסיס פוליפרופן עם שילוב מיוחד של תרכובות ברום מעכבות בעירה ומגנזיום הידרוקסיד.

4.1 - תרכובות ברום בקידוחי נפט

הנפט מצוי בדרך כלל בשכבות סלע עמוקות והוא לכוד בתוך חללים קטנים המצויים בהן. הסכימה הבאה מתארת שכבת סלע המכילה חללים בהם מצוי הנפט:



כדי להפיק נפט יש לקדוח ולהגיע אל שכבת הסלע בה הוא מצוי ולגרום לכך שהנפט יזרום החוצה בקצב מבוקר. לצורך זה פותחה טכנולוגיה המתוארת באופן כללי ביותר על ידי הסכימה הבאה:



בזמן הקידוח נהוג להזרים לתוך בור הקידוח דרך חלל המצוי בתוך המקדח תערובת חומרים בוצית (הנקראת בוך הקידוח)²⁴. מטרתה העיקרית לאזן את

²⁴ תערובת זו יכולה להיות מימית או על בסיס אורגני והמאפיין אותה שהיא מכילה מוצקים המקנים לה את הצפיפות הנדרשת.

הלחצים ולמנוע פריצת נפט בלתי מבוקרת לפני שנעשים הסידורים המתאימים להפקה בטוחה וכלכלית. הבוץ (הזורם במעגל סגור דרך דפנות הקידוח) משמש למספר מטרות נוספות, כמו קירור המקדח, שמירה על דפנות הבור מפני התמוטטות, והוצאת מוצקים וגושים שנוצרים כתוצאה מהקידוח.

עם סיום שלב הקדיחה ולקראת הכנת הקידוח להפקת הנפט, מחליפים את תערובת הבוץ בתמיסה צלולה המונעת (או לפחות מקטינה) את הנוזקים העלולים להגרם לשכבת הסלע כתוצאה מסתימת החללים בהם מצוי הנפט על-ידי המוצקים המצויים בה. התמיסה צריכה להיות בעלת צפיפות המתאימה ללחץ הצפוי של הנפט (ו/או הגז) בקידוח.

על ידי השימוש בתמיסות אלו מעלים את התפוקה ומנצלים באופן מיטבי את מאגר הנפט.

התכונות החשובות ביותר הנדרשות מתמיסות אלו הן:

- צלולות (ללא מוצקים)

- צפיפות גבוהה

- נדיפות נמוכה

- יכולת שיתוך נמוכה

- חוסר רעילות

- אדישות כימית (אינרטיות)

לצורך זה משתמשים בתמיסות המכילות הרכבים שונים של מלחי כלור וברום.

מלחי הכלור המשמשים למטרה זו הם נתרן כלורי, NaCl , וסידן כלורי, CaCl_2 ,

מלחי הברום המשמשים למטרה זו הם נתרן ברומי, NaBr , סידן ברומי, CaBr_2 ,

(שאת תכונותיו ותהליך הייצור שלו תארנו בפרק ה') ואבץ ברומי, ZnBr_2 .

שם החומר: אבץ ברומי, ZnBr_2

מ/מ

מוצק חסר צבע וריח

מסה מולרית: 225.38 גר"/מול

טמפרטורת היתוך: מוצק - 394°C

טמפרטורת גיבוש: תמיסה (כ-75%) - -8°C

טמפרטורת רתיחה: מוצק - 650°C

תמיסה - 135°C

צפיפות: מוצק - 4.2 גר' לסמ"ק

תמיסה - 2.3-2.6 גר' לסמ"ק

מסיסות במים: מצויינת. 447 גר' ב-100 סמ"ק מים (20°C).

מסיסות בממסים אחרים: טובה באתר, בכוהל, באצטון ובאמוניה.

דליקות: התמיסה המימית לא דליקה ולא מתפוצצת.

רעילות: התמיסה המימית גורמת לגירוי של העיניים והעור.

תגובות אופייניות:

* בחימום מעל 690°C משתחררים אדי ברום.

* התמיסה המימית והמוצק מגיבים עם חומרים מחמצנים חזקים.

שימושים: לקידוחי נפט, לתעשיית הסוללות והמצברים, כתוסף

בתעשיית הזכוכית.

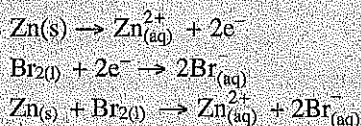
הידעת:

אבץ ברומי משמש גם לייצור מצברים.

בשנים האחרונות פותחו מצברי אבץ-ברום שהם בעלי צפיפויות אנרגיה גבוהות ולפיכך מסוגלים לצבור כמות רבה של אנרגיה ולשמש לאגירת אנרגיה עבור מיתקנים הדורשים כמות גדולה יותר של אנרגיה חשמלית, כמו מכונות חשמליות ובתי מגורים.

מצברים חדישים אלו יכולים לאגור אנרגיה בשעות השפל בצריכת האנרגיה ולשחרר אותה בשעות השיא, ובכך לשמש לאיזון עומסים מצד אחד ולחיסכון בעלויות מצד שני. המצברים עשויים כמעט בשלמותם מחומרים פלסטיים ובכלל זה גם האלקטרודות. השימוש בחומרים פלסטיים מקנה להם משקל נמוך יחסית. הם זולים יותר ממצברי עופרת חומצה המשמשים למטרה זו כיום, ודורשים תחזוקה פשוטה יותר. כמו כן הם משתלבים במגמה העולמית של חשיבה אקולוגית, שכן הם בנויים מחומרים חניתנים למיחזור.

פעולת המצבר מבוססת על תגובות החיזור של אבץ ותגובת החמצון של הברום.



כאלקטרוליט משמשת תמיסת אבץ ברומי המשמשת להזנת המגיבים, להוצאת תוצרים, לוויסות אנרגיה ולשמירה על האחידות של תמיסת האלקטרוליט.

בטעינת המצבר הופכת תמיסת האבץ הברומי בחזרה לאבץ ולברום:

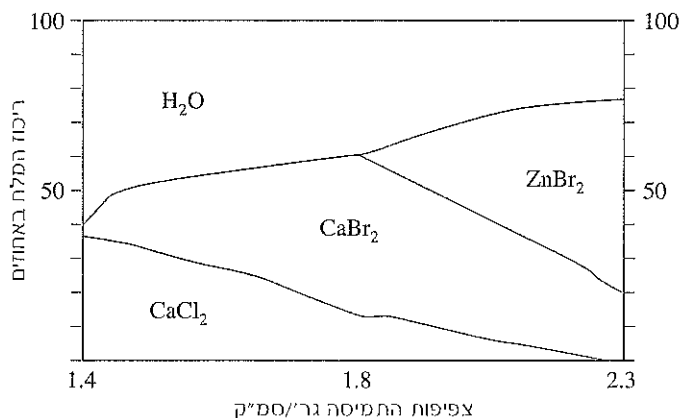


האבץ מצפה את האלקטרודה השלילית והברום משתחרר לתמיסת הברומיד ונשמר שם כיון מורכב, $\text{Br}_{2(\text{aq})}^-$. התמיסה נשמרת רחוק מהאבץ ורק כאשר יש צורך להפעיל את המצבר פותחים שסתום המזין את התמיסה המכילה ברום למערכת האלקטרוכימית בה נמצא האבץ. האבץ והברום מגיבים תוך כדי שחרור האנרגיה החשמלית שנאגרה במערכת בעת הטעינה.

עיין ב"כרטיסים" של סידן ברומי (עמ' 158), אבץ ברומי (עמ' 237) וענה על השאלות הבאות:

- מהם המאפיינים הדומים של תמיסות של אבץ ברומי וסידן ברומי?
- במה שונות תמיסות אלו זו מזו?
- מדוע לדעתך מכינים תמיסות המכילות מספר מרכיבים ולא רק אחד מהם?
- מדוע לדעתך משלבים בהרכבים אלו גם תמיסות נתון ברומי?

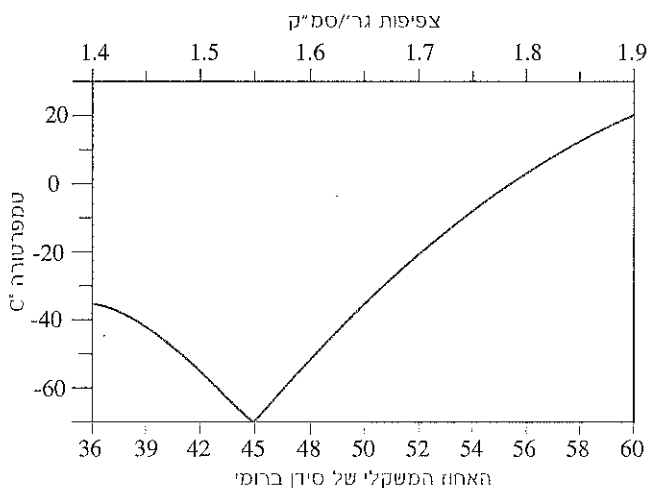
בחירת הרכב התמיסה נעשית על פי שלוש אמות מידה:
 א. הצפיפות הדרושה לפי הלחצים בבאר. בעזרת הרכב מתאים של התמיסות ניתן להשיג צפיפויות של 1.0-2.6 גר' לסמ"ק. ניתן לראות דוגמה לכך בדיאגרמה הבאה המתארת את צפיפותן של תמיסות בעלות הרכבים שונים של סידן ברומי, אבץ ברומי וסידן כלורי.



תמיסות בעלות הרכבים שונים

הסבר מדוע טווח הצפיפויות הוא 1.0-2.6 גר' לסמ"ק!

ב. טמפרטורת הגיבוש של התמיסה (הטמפרטורה בה התמיסה נעשית רווייה ביחס למלח אחד או יותר המרכיבים אותה ומתחילה בה שקיעת גבישי מוצק) צריכה להתאים לתנאי הטמפרטורה השוררים באזור הקידוח.



טמפרטורות גיבוש של תמיסות סידן ברומי

באזורי אקלים שונים ידרשו תמיסות בעלות נקודות גיבוש שונות. כך למשל, לבאר באלסקה תדרש תמיסה בעלת טמפרטורת גיבוש מתחת ל-0°C, והיא תהיה בעלת הרכב שונה מהתמיסה הדרושה לבאר באזור חם כמו מקסיקו.

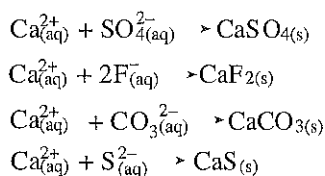
מהו טווח הטמפרטורות בו עשוייה להתאים תמיסת סידן ברומי בריכוז 52%?

ג. דרישות מיוחדות של התאמת הרכב התמיסה לתכולת היונים והגזים²⁵ בשכבות הסלע כדי למנוע תגובות שיקוע העלולות לגרום לבעיות בשאיבה או בזרימת התמיסות.

העזר בטבלת המסיסויות כדי לקבוע אילו תגובות שיקוע עלולות להתרחש כאשר משתמשים בתמיסות המכילות:

- סידן ברומי
- אבץ ברומי

במידה ושכבת הסלע מכילה יונים כמו SO_4^{2-} , F^- , CO_3^{2-} ו- S^{2-} יש לקחת בחשבון את האפשרויות לתגובות השיקוע הבאות:

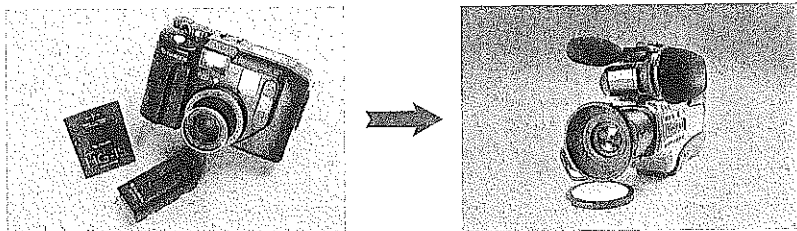


השימוש בתרכובות ברום לקידוחי נפט החל להתפתח בתחילת שנות ה-70 וצבר תאוצה במהלך שנות ה-90, עם ההתפתחות שחלה בטכנולוגיה של קידוחי הנפט. בעבר התרכז עיקר השימוש בתמיסות אלו בארה"ב ובאיזור הים הצפוני על-ידי אנגליה ונורווגיה. עם הזמן התפשט השימוש בהן גם לאזורים נוספים כמו מערב אפריקה, מזרח אירופה, דרום מזרח אסיה ועוד.

הביקוש לתרכובות ברום אלו איננו קבוע ותלוי בתנודתיות בשוק הפקת הנפט: במחירי הנפט, בהיקף הפקת הנפט במדינות השונות ועוד. בשנים בהן מחירי הנפט גבוהים, הרצון לנצל את יכולת התפוקה המקסימלית של שדות הנפט והאפשרות להשקיע בעלויות תפוקה גבוהות יותר מגבירים את הביקוש לתמיסות הקידוח. בשנים האחרונות, כאשר מחירי הנפט בירידה חלה ירידה בביקוש לתמיסות אלו.

25 יש בארות המכילות יחד עם גז טבעי גם מימן גופרי

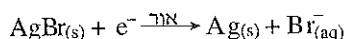
5.1 - תרכובות ברום בתעשיית הצילום



לברום חשיבות רבה בכל שיטות הצילום המבוססות על תהליך פוטוכימי ומקובלות החל מהמצאת הצילום, בשנת 1840, ועד לימינו אלו. שלושת המלחים כסף כלורי, כסף ברומי וכסף יודי רגישים לאור, אך כסף ברומי הוא המתאים ביותר מביניהם להכנת תחליבי (אמולסיות) צילום²⁶, שהם בעלי חשיבות רבה בטכנולוגית הצילום.

תחליב (אמולסיה) גבישים קטנים ביותר (בסדר גודל של 5-270.05 nm מפוזרים באופן אחיד בתמיסה.

את התחליב המכיל כסף ברומי (לפעמים מוסיפים גם כמויות קטנות של מלחי כסף של הלוגנים אחרים המשנים את הרגישות לאור) מורחים על בסיסים שונים שעליהם רוצים לצלם: פילם פלסטי שקוף, לוחות מתכת, לוחות זכוכית, נייר ועוד. גבישי הכסף הברומי שנחשפים לאור עוברים שינוי פוטוכימי, אשר גורם להם להתנהג באופן שונה מאלו שלא נחשפו לאור. רק גבישי הכסף הברומי שנחשפו לאור חלה בתהליך הפיתוח תגובה עם החומר המחזר ומהם מתקבל הכסף המתכתי שנראה כהשחרה.

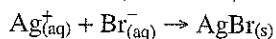


גבישי הכסף הברומי עוברים חיזור (חלקי או מלא) בהתאם לעוצמת האור אליה נחשפו. הדמות תהיה כהה ביותר (כתוצאה מהווצרות הכסף המתכתי) במקום בו עוצמת האור היתה מרבית. הכסף הברומי שלא נחשף לאור ולא עבר חיזור לכסף מורחק באמצעות שטיפה בתהליך הנקרא קיבוע. השטיפה נעשית בדרך כלל באמצעות תמיסת אמון ברומי, בה מתמוסס הכסף הברומי. לאחר ייבוש מתקבל התשליל (הנגטיב).

²⁶ אמולסית צילום-תחליב של גבישים קטנים ביותר של כסף ברומי בתוך גילטין המכיל אחוז מסוים של מים.

²⁷ נאנומטר, nm - 10^{-9} .

לייצור הכסף הברומי משתמשים באשלגן ברומי או בנתרן ברומי המגיב עם כסף חנקתי בנוכחות זרז חומצי בתגובת שיקוע המוכרת לך מלימודיך:



שם החומר: כסף ברומי, AgBr

גבולות

מוצק לבן, חסר ריח ואבקתי או גבישי.
 מסה מולרית: 187 גר"/מול.
 טמפרטורת היתוך: 419°C.
 טמפרטורת רתיחה: מתפרק ב- 900°C ליסודות.
 צפיפות: מוצק - 6.48 גר' לסמ"ק.
 מסיסות במים: נמוכה.
 מסיסות בממסים אחרים:
 דליקות: לא דליק.
 רעילות: מסוכן בבליעה ובנשימה. גורם לגירוי בעור, בעיניים וברקמות ריריות.
 תגובות אופייניות:
 * רגיש לאור.
 * מתמוסס בחומצה גופרתית תוך שחרור ברום.
 * מתמוסס בתמיסות מימיות של מלחים אנאורגניים מסויימים (אשלגן תיוציאנט, נתרן תיו סולפט, אמוניום תיוסולפט ועוד)
 תוך כדי יצירת יונים מורכבים מסיסים (קומפלקסים).
 שימושים: לצילום, לזרז תגובות המשמשות להכנה של תרכובות אורגניות מסויימות.

לעיתים קיימות דרישות מיוחדות לגבי טיב התחליב ואז משתמשים בברומיד אחר. בצילומי רנטגן, למשל, יש חשיבות רבה ל"נקיון" מרבי של התחליב, ולכן משתמשים להכנת כסף ברומי באמון ברומי אשר תהליך ייצורו מבטיח דרגת ניקיון גבוהה יותר ואי-נוכחות של זיהומי מתכות אחרות (ראה שאלה 7 בעמ' 191) את כל החומרים הללו משווקים בדרך כלל כאבקות ותהליך ההמסה במים נעשה בארץ היעד. לקוחות מסויימים דורשים אספקה של תמיסות מימיות מוכנות. שיווק בצורה כזאת מייקר מאוד את מחיר החומר וזאת עקב עלות הובלה גבוהה יותר.

מעניין לבחון את "סיפורו של ה-AgBr" בדיוק כפי שבחנו את "סיפורו של ה-EDB" או "סיפורו של המתיל ברומיד" וכפי שניתן לבחון גם את "סיפורם" של חומרים נוספים. הדינמיות בשימושים הנעשים בחומרים השונים מושפעת לא רק משיקולי איכות הסביבה אלא גם מהתפתחויות טכנולוגיות. החל מהמצאת הצילום ועד היום, התרחשו ומתרחשים שינויים טכנולוגיים בכל תחומי הצילום. שינויים אלו משפיעים על הביקוש לכסף ברומי ולברומידים האחרים שהוזכרו.

החל מ-1840, השנה בה הומצא הצילום, ובמשך שנים רבות אחר כך היה השימוש בצילום נחלתם של מעטים. הביקוש לברומידים השונים היה קטן. מאוחר יותר החלו להתפתח תחומים נוספים בצילום, כגון צילומי רנטגן, גרפיקה אומנותית, סרטים (35 מ"מ) וצילום חובבני. ככל שתחומים אלו התפתחו והפכו לנפוצים יותר הביקוש לברומידים הלך וגדל.

עם כניסתן של טכניקות צילום חדשות ברפואה כמו, אולטרא סאונד ותהודה מגנטית גרעינית (Nuclear Magnetic Resonance N.M.R.), שיתרון בכך שאין בהן סכנת קרינה, חלה ירידה בשימוש בצילומי הרנטגן לצרכים רפואיים. לעומת זאת השימוש בצילומי רנטגן לתעשייה הלך וגדל (למשל בבדיקות ריתוכים ואטימות, במיוחד בתעשיית המטוסים והחלליות). כתוצאה מכך נשארה צריכת הברום לשוק צילומי הרנטגן כמעט קבועה.

תעשיית הסרטים שהלכה והתפתחה ויחד עימה תחום הצילום וההסרטה הביתי העלו את הדרישה לכמויות הולכות וגדלות של כסף ברומי. אך שוב חל מפנה עם המצאת הווידאו וכניסתן של מצלמות הווידאו לשימוש חובבני. התפתחות טכנולוגית זו גרמה לירידה עצומה בשימוש במצלמות הסרטה. לכאורה היתה צריכה לחול ירידה בשימוש בחומרי הצילום, אולם הגידול המשמעותי שחל בצילום החובבני, שנעשה זול יותר, עממי ונפוץ, גרם לכך שנשמרה רמה קבועה בביקוש לחומרי צילום. יתר על כן, עם ההתפתחות העצומה שחלה בשנים האחרונות בתחום האומנות הגרפית, ההתפתחות הרבה בתחום העיתונות, המגזינים והספרים, חלה למעשה עלייה בדרישה לחומרי הצילום בערך ממוצע של 8-10% לשנה.

...ושוב מהפך! בשנים האחרונות הצליחו חברות האלקטרוניקה, הודות להתקדמות העצומה שחלה בעולם המחשבים, לפתח מצלמות דיגיטליות. מצלמות דיגיטליות אלו מבוססות על שימוש בתקליטורי מחשב במקום בסרטי צילום והתמונות עצמן יכולות להאגר בזיכרון המחשב.

המצלמות הדיגיטליות עדיין יקרות ואיכות הצילומים שלהן אינה משתווה לאיכות הצילומים המתקבלים במצלמות הרגילות, כך שבשלב זה אינן מחליפות את המצלמות הרגילות. במידה ותחול התפתחות נוספת ומצלמות אלו תהיינה זולות יותר ואיכות צילומיהן טובה יותר יתכן והשימוש בהן יתפוס תאוצה ושוב יושפע הביקוש לכסף ברומי. ומי יודע מה יהיה הצעד הבא?...

לצלם בלי פילם

במלאת 150 שנה לחולדת הצילום הוצאה לשוק המצלמה האלקטרונית העממית הראשונה, המאפשרת צילום תמונות וידאו-נייחות להקרנה במקלט בטלוויזיה

בדיוק לפני 100 שנה, בסוף 1888, הוציאה חברת "קודאק" לשוק את מצלמת ה"קופסא" הראשונה שלה שהכילה המצאה היסטורית-לראשונה תכילה המצלמה גליל נייר ועליו חומרים כימיים רגישים לאור, שיאפשרו צילום מספר תמונות, זו אחר זו על גבי אותו גליל. עד אז צולמו התמונות על גבי אותן תמיסות כימיות, שהיו מרוחות על פלטות של זכוכית. ה"קופסא" נחשבה אז כ"פלא טכנולוגי" והפכה את המצלמה למיתקן עממי ואת הצילום לתחביב המוני.

המצלמה החדשה שיצאה לשוק לרגל יובל ה-150 לחולדת הצילום פועלת על עקרון השימוש באמצעי מגנטי ולא על פילם המצופה בשכבה של כימיקלים. פירוש הדבר הוא, ששום תהליך כימי אינו מעורב יותר בקליטת התמונה ובפיתוחה.

במקום בסרט מגנטי, דוגמת זה בו משתמשים במצלמת סרטי הווידאו, קולטת המצלמה החדשה את הצילום ומשמרת אותו על גבי דיסקט קטן...

את הצילום ניתן לראות מיד בתוך המצלמה עצמה וכן להקרין את התמונה הצבעונית מיד על מסך מקלט הטלוויזיה, כתמונה קפואה בודדת... ניתן לומר כי צילום הווידאו הקפוא הוא עדיין בחיתוליו... אולם ההיסטוריה של הצילום מוכיחה, כי ההתקדמות בתחום זה מהירה מאד...

הגיע הזמן לעבור לפיקסלים

מאת כריס או'מאלי

קטע מתוך מאמר שפורסם ב"מדע פופולרי", יולי 1998

הסקרנות שמעוררות מצלמות דיגיטליות בקרב כל מי שנהנה לעלם, או פשוט לשתף אחרים בזכרונותיו, מובנת. המצלמות הללו מאפשרות להציג את התמונות לצפייה מוקדמת על גבי מסך צג גביש נוזלי לפני העברתן לזיכרון אלקטרוני, ולמחוק אותן באותה מהירות אם אינך מרוצה מהתוצאות. תוכל ליצור תצוגת שקופיות מיידית על גבי המסמכים הצבעוניים שלהן, או לעשות זאת על גבי מרקע טלוויזיה. בעזרת מחשב PC תוכל גם לערוך את התמונות הדיגיטליות שצילמת ולשלוח אותן בדואר אלקטרוני לחברים ולבני משפחה.

תחילת עידן

אלבום תמונות אלקטרוני

מאת 'וסי' חרסונסקי

קטע מתוך כתבה שהתפרסמה ב"מעריב", עסקים 13.11.98

מי שחזה את סוף עידן אלבום התמונות המסורתי, רואה היום עדנה. אתם כבר יכולים להתחיל לתכנן את אלבום התמונות הדיגיטלי שלכם שכולו יודחס לכמה דיסקטים... המכשיר מאפשר חיבור פשוט ונוח לכל מקלט טלוויזיה וכן צפייה בתמונות מהדיסקט על גבי מסך הטלוויזיה הרגיל.

6.1 – שימוש בליתיום ברומי, LiBr, למערכות קירור

מערכות הקירור בהם השתמשו החל משנות ה-50 היו מבוססות על אידיוי מים באמצעות חימום בזרם חשמלי וספיגת האדים על ידי תמיסות המסוגלות לספוג אותם במהירות.

- האם תהליך ספיגת אדי המים על-ידי התמיסה הוא אנדותרמי או אקסותרמי? נמק.
- כיצד ניתן להסביר את הקרור הסביבה באמצעות תהליך זה.

כבר בשנות ה-60 השתמשו לצורך זה בתמיסות המכילות ליתיום ברומי, הסופגות במהירות את אדי המים. תמיסות הליתיום הברומיד נבחרו מכיוון שהן בעלות לחץ אדים נמוך בטמפרטורת העבודה ואינן מתגבשות.

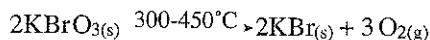
תוך כדי ספיגת אדי המים בתמיסת הליתיום ברומיד מתרחשים שני שינויים: ריכוז התמיסה יורד וגם הטמפרטורה יורדת. התמיסה הקרה מחליפה אנרגיה עם מים הזורמים בצינורות הבאים עימה במגע ומקררת אותם. עקרון הפעולה של החלפת האנרגיה דומה לעקרון פעולתו של "מחליף חום", אותו תארנו בסעיף 7.2. כאשר מחממים לאחר מכן את התמיסה גורמים לאידיוי מים וכתוצאה מכך מתקבלת בחזרה תמיסה מרוכזת המסוגלת לספוג שוב אדי מים וחוזר חלילה. שיטה זו נזנחה עם השנים לטובת השימוש בטכנולוגיה אחרת של דחיסת גזים באמצעות אנרגיה חשמלית. שיטה זו מבוססת על שימוש בפריאונים, שהם תרכובות פחמן המכילות פלואור (CFC's), אותם הזכרנו בסעיף 7.2. כאשר נמצא כי הפריאונים גורמים לדילול שכבת האוזון הסטטוספרית והוחלט להוציאם משימוש, החלו להתעניין מחדש בטכנולוגיה הישנה שהתבססה על תמיסות הליתיום ברומי.

לתמיסות הליתיום ברומי מספר יתרונות בולטים:

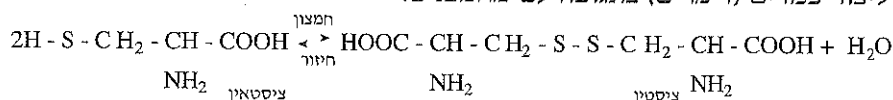
- הליתיום ברומי איננו נדיף ונשאר מומס במים הן בעת ספיגת אדי המים בתמיסה והן כאשר מחממים אותה אחר כך כדי לאייד את המים.
 - הן אינן רעילות ואינן גורמות נזק כלשהו לסביבה.
- תהליך הייצור תוכנן בשיתוף עם חברה יפנית המייצרת מערכות קירור ומיזוג אוויר. תכנון התהליך כלל הכנת הרכבים שונים (פורמולציות) המתאימים לדרישות הלקוח. שוב אנו רואים דוגמא לשינוי טכנולוגי נובע מאילוצים סביבתיים מצד אחד ושיתוף הייצור האחראי על המוצר הסופי בתכנון התהליך מצד שני.

7.7 - השימוש בברומטים

נתרן ברומטי, NaBrO_3 , (ראה כרטיס בעמ' 165) ואשלגן ברומטי KBrO_3 (ראה כרטיס בעמ' 171) מיוצרים ב"תרכובות ברום" בשיטות אשר פורטו בפרק ה. התכונה הבולטת ביותר של הברומטים היא היותם חומרים מחמצנים. תכונה זו עושה אותם לשימושיים למטרות שונות ומגוונות, שחלק מהן נתאר בסעיף זה. השימוש בברומטים בתעשיית **חומרי הנפץ** מבוסס על תגובת פרוק בה נוצר חמצן. לדוגמא:



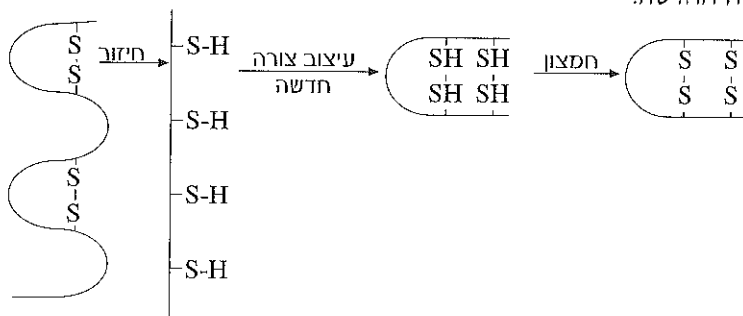
השימוש העיקרי בנתרן ברומטי הוא לקוסמטיקה (בעיקר לעיצוב שער) ולתעשיית הטקסטיל. שני השימושים מבוססים על תגובת הנתרן הברומטי כחמצן. **עיצוב השער** מבוסס על פתיחת קשרי גפרית-גפרית (S-S) הקיימים בחלבון הקראטין המצוי בו. אחד המונומרים המרכיב חלבון זה הוא החומצה האמינית ציסטאין, בה קיימות קבוצות S-H. תכונה המייחדת את הציסטאין היא היכולת ליצור צמידים (דימרים) בתגובה עם מחמצנים:



את הציסטין ניתן לחזר ולקבל שוב שתי מולקולות של ציסטאין. סילסול השער מתאפשר בגלל פיתולים הנוצרים בו כתוצאה מקשרי גפרית-גפרית, S-S, וקשרי המימן בין שרשרות החלבון. כדי לעצב שער יש צורך במספר שלבים:

- תהליך חיזור** בו נפתחים קשרי ה-S-S והשיער מקבל צורה פלסטית הניתנת לעיצוב.

- עיצוב השער** בפיתולים הרצויים על-ידי עזרים טכניים.
- תהליך חמצון** הבונה מחדש את קשרי ה-S-S בצירופים החדשים כך שתישמר הצורה החדשה.



כחומר מחמצן נהוג היה להשתמש במימן על-חמצני ("מי-חמצן"), $H_2O_2(aq)$. מסתבר שמימן על-חמצני מלבין תוך כדי פגיעה בחוזק שערם של כהי עור ואנשי המזרח הרחוק. התחליף אשר נמצא כיעיל ולא מזיק במקרים אלה הוא נתרן ברומטי.

בתעשיית הטקסטיל משמש נתרן ברומטי לטיפול בצמר ולתהליכי צביעה שונים, וגם כאן מבוססת פעולתו על יכולת החמצון שלו. כך לדוגמא משתמשים בחומר זה להלבנת בדי ג'ינס, לקבלת ג'ינס משופשף וכמו כן לחמצון צבעים מסוימים (לאחר שהתקשרו לסיבי הבד) כדי להפוך אותם לבלתי מסיסים במים.

בתעשיית המזון משמש אשלגן ברומטי כחומר מחמצן. השימוש העיקרי הוא כחומר מחמצן ומשמר בתעשיית הבירה, להלבנת קמח ולאפייה, בתעשיית הגבינות ועוד. גם באפייה עיקר תפקידו של הברומט הוא ליצור קשרי S-S בין שרשרות של חלבונים הנמצאים בבצק. זאת על מנת ליצור מעין רשת של קשרים אשר "יכולת" את הגזים המשתחררים בשלבי התפיחה והאפייה ולא מאפשרת להם "לברוח".

כתוסף לאפייה משתמשים באשלגן ברומט ולא בנתרן ברומטי. מהי הסיבה?

בארץ ובמדינות מסוימות הגבילו את השימוש באשלגן ברומט לתעשיית המזון.

משרד הבריאות לא יתיר השימוש בפוסטיום 28 ברומאט לאפייה

מאת עדנה ארידור סופרת "הארץ"
לעניי בריאות
"הארץ" 3.8.93

החל מה-1 בספטמבר לא יתיר משרד הבריאות את השימוש בפוסטיום ברומאט לצורך אפיית לחם, אף על פי שמינהל המזון והתרופות של ארצות הברית (F.D.A) מתיר שימוש בחומר זה. שירות המזון של המשרד העביר הנחיות בנושא לכל המאפיות בארץ. בהודעה שפרסם אתמול משרד הבריאות נאמר, כי למרות חילוקי דעות בין אירגון הבריאות העולמי הממליץ לאסור שימוש

בפוסטיום ברומאט, לבין החלטת המינהל למזון ולתרופות של ארצות הברית, המתיר להשתמש בחומר לאפיית לחם, החליט המשרד לאסור על השימוש. החלטתו נתקבלה כמקדם ביטחון גבוה לבריאות הציבור בישראל, גם בשל העובדה שיש חלופה לחומר זה הנמצאת בשימוש בחלק מהמאפיות. עוד נאמר, כי הניסויים בחומר פוסטיום ברומאט נעשו על חיות מעבדה, ולא הוכח קיומו של חומר מסרטן בחיות שניזונו מלחם שכלל את החומר. עד כה לא נעשו ניסויים בבני אדם. גם בכמה ארצות באירופה, כמו גרמניה וצרפת, הוחלט לאסור על השימוש בפוסטיום ברומאט.

8.ד - תרכובות ברום כחומרי ביניים, לשימושים רפואיים ואחרים

תרכובות ברום המשמשות כחומרי ביניים אינן מהוות מוצרים בפני עצמם אלא משמשות כאחד מחומרי הגלם או חומרי העזר להכנת תרכובות אחרות המשמשות מוצרים סופיים. חלק מחומרי הביניים מכילי הברום מהווים חלק מהרכב הסופי של המוצר, חלק מהן משמשות להכנסת אטומי ברום במולקולות הסופיות וחלק משתתפות בתהליכי הכנה של חומרים, אשר במולקולה הסופית שלהן לא מצוי ברום. אמנם הברום רק "נכנס" ו"יוצא", אך יש לו חשיבות בשלבים מסויימים בתהליכי הייצור כאשר לעיתים מדובר בהגברת מהירות התגובה, לעיתים בהכוונת ההתמרה וכיוצא בזה.

כך למשל קיימים חומרי ביניים המשמשים לייצור חומרי הדברה, לתרופות ועוד. חשיבותן של תרכובות הברום כחומרי עזר בתהליכי ההכנה של חומרים שונים הולכת וגדלה ויש הצופים לשטח זה של שימוש בתרכובות ברום עתיד "מבטיח".

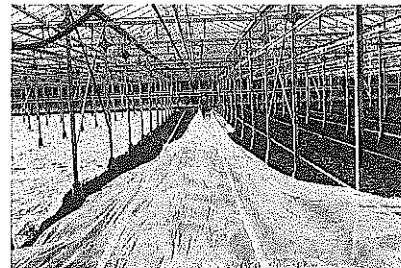
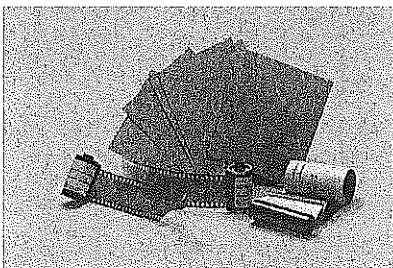
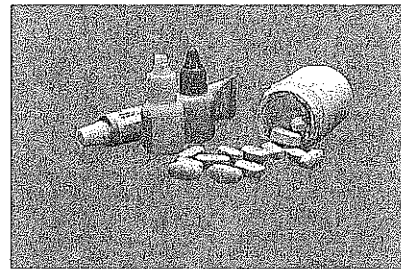
הידעת?

ראינו כי הכנסת אטומי ברום למולקולות של חומרים מסויימים גורמת ליצירתם של חומרים רעילים, כמו למשל מתיל ברומיד CH_3Br ו-EDB. מצד שני ראינו כי נוכחות הברום מקנה לחומרים אחרים תכונות שניתנות לניצול ברפואה.

הברומידים השונים שימשו ברפואה כבר מ-1835, כתשע שנים לאחר גילוי הברום. עד 1950 לא היתה ידועה השפעתם על מערכת העצבים. כאשר מצאו כי יוני הברומיד פועלים להפחתת רגישותה של מערכת העצבים המרכזית, גדל השימוש בהם ובמיוחד לחולי מחלת הנפילה: להרגעה, למניעת התכווצות ולהרדמה. שימושים נוספים להרגעה קיימים במחלות לב מסויימות, במצבים של פעילות יתר של בלוטת התריס, במצבי היסטריה ועוד. כמו כן משמשות תרכובות ברום אורגניות מסויימות כחומרים מרדימים. דוגמאות לכך הם ה- $\text{C}_2\text{H}_5\text{Br}$ והחלולין $\text{CBBr}_2\text{CH}_2\text{OH}$ המכונה אורטין, האתיל הברומי $\text{C}_2\text{H}_5\text{Br}$ והחלולין $\text{F}_3\text{CCHClBr}$. שימוש קבוע וממושך בברומידים עלול לגרום לתופעות של הרעלה כרונית הנקראת "ברומיום".

לסיכום:

אין באפשרותנו לספר על כל עשרות תרכובות ברום נוספות אשר מיוצרות על-ידי קבוצת הברום²⁹. תארנו את השימושים העיקריים, אך גם לשימושים הפחות נפוצים יש חשיבות. תרכובות ברום רבות מיוצרות עבור תעשיות נוספות שונות כמו: חומרי ההדברה, צבעים, חומרים לכיבוי אש ועוד. במקומות שונים בעולם מפיקים על בסיס התרכובות משמשות בחברת הברום, חומרים מורכבים ביותר לשימושים שונים ומגוונים. תכונותיהן של כל התרכובות הללו מבוססות על אותם עקרונות בהם עסקנו בפרקים ובסעיפים הקודמים. ייחודו של הברום, היא הרב-גוניות של תרכובותיו השונות, הן בתכונותיהן וכמובן גם בשימושיהן. ככל שתחקרנה יותר תכונות של הברום ותרכובותיו כן תתרחבה אפשרויות השימוש בהם למטרות נוספות.



שימושים שונים של תרכובות ברום

29 ניתן למגוון שימושים של תרכובות נוספות רבות באתר האינטרנט של קבוצת הברום:

<http://www.deadseabromine.com> (applications)

מושגים של מדת בפרק 1

ביוצידים: חומרים קוטלי מיקרואורגניזמים.

פעולה סינרגטית: פעולתם של החומרים הפועלים יחד גדולה מסכום פעולם של החומרים כשהם בנפרד.

פולימר: מקרומולקולה (מולקולת ענק) הבנויה מאלפי אטומים קשורים זה לזה בקשרים קוולנטיים. כל מקרומולקולה בנויה מיחידות מבנה החוזרות על עצמן בצורה סדירה (מיונית: פולי-הרבה, מר-יחידה).

משולש ה"אש": שלושת הגורמים הדרושים לבעירה, שהם חומר מחמצן (בדרך כלל חמצן), חומר דליק וחום (אנרגית שפעול).

טמפרטורת ההצתה: (נקראת לפעמים גם טמפרטורת ההצתה העצמית) הטמפרטורה הנמוכה ביותר שבה עשוייה להתרחש בעירת החומר באופן ספונטני בתנאים מוגדרים.

טמפרטורת ההבזק: הטמפרטורה הנמוכה ביותר שבה האדים שמעל חומר דליק נדיף יוצתו באוויר בעת חשיפתם ללהבה.
רדיקלים חופשיים: חלקיקים בעלי אלקטרון לא מזווג.

תחליב (אמולסיה): גבישים קטנים ביותר (בסדר גודל של 0.05-5 μm מפוזרים באופן אחיד בתמיסה.

מעכבי בעירה "מוספים": אינם מתקשרים לשרשרות הפולימר בקשרים קוולנטיים אלא משלבים אותם בתוך המוצרים השונים בשתי צורות:
(א) מספיגים את תמיסות החומרים בתוך המוצר. בדרך כלל מתייחסת שיטה זו לעץ ולמוצרי או לתעשיות הטקסטיל.
(ב) מערבים את מעכבי הבעירה הללו יחד עם הפולימר ויחד עם תוספים אחרים. בדרך כלל נעשה הערבוב תוך כדי התכלתם, בשלב העיבוד של המוצר הפלסטי.

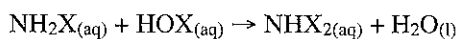
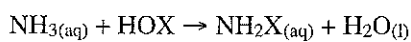
מעכבי בעירה "פעילים": משולבים כחלק בלתי נפרד לשרשרות הפולימר, בדרך כלל על ידי קופולימריזציה. מתאימה. מעכבי בעירה הנקשרים לשרשרות הפולימר בקשרים קוולנטיים ומהווים חלק ממנו.

שאלות לפרק 1

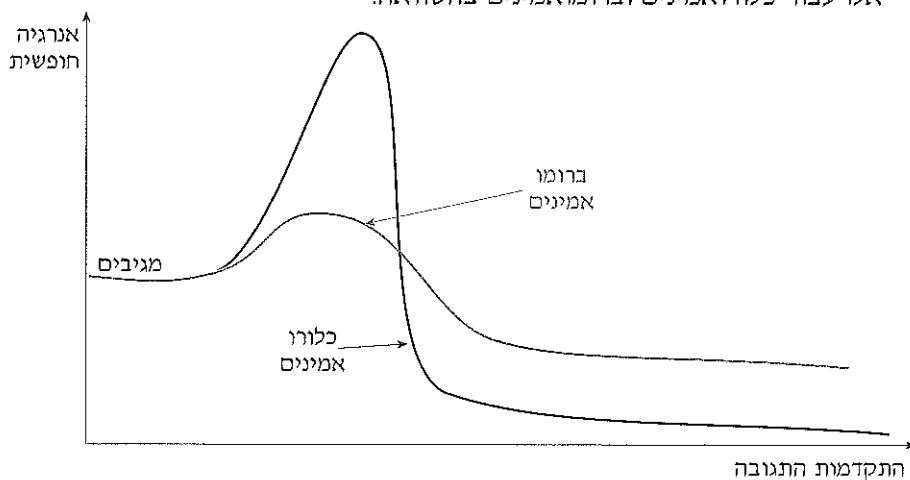
1. השווה בין התכונות של 1, 2 דו-ברומו אתאן (EDB) לבין תכונות הברומו מתאן (מתיל ברומיד) על פי אמות המידה הבאות:

התכונה	EDB	מתיל ברומיד
החומר		
נדיפות		
יציבות		
דליקות		
כושר דיפוזיה		
מסיסות במים		
רעילות		
נזק לסביבה		
מחיר		

2. בתגובה של כלור וברום עם אמינים נוצרים כלורואמינים וברומואמינים בהתאמה. הניסוח הכללי של תגובות אלו הוא:



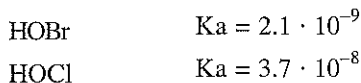
לפניך גרף המתאר באופן סכמטי את השינוי באנרגיה החופשית בתהליכים אלו עבור כלורואמינים וברומואמינים בהשוואה.



א) כיצד תסביר את ההבדל בין העקומות המתארות את השינוי באנרגיה החופשית של היווצרות ברומו אמינים לעומת כלורו אמינים?

ב) העזר בגרף זה והסבר מהו היתרון של השימוש בברום בהשוואה לשימוש בכלור.

3. נתונים קבועי החומצות:



א) איזו השפעה (אם בכלל) עשויה להיות לעובדה זו על כושר החיטוי של התמיסות המימיות של $Cl_2(aq)$ ושל $Br_2(aq)$?
 ב) נמצא שעל-ידי שילוב שתי תרכובות, לדוגמה NaBr ו-NaOCl חל שיפור בכושר החיטוי של תמיסת הביוציד. הסבר.

4. להלן "כרטיס" של ליתיום ברומי המיוצר ב"תרכובות ברום" כתמיסה מימית בריכוז 55%:

שם החומר: ליתיום ברומי, $LiBr$

מזהה:

מוצק לבן

תמיסה צלולה חסרת ריח בריכוז 55%

מסה מולרית: של המוצק - 86.85 גר'/מול

טמפרטורת היתוך: מוצק - $547^\circ C$

טמפרטורת רתיחה: מוצק - $1265^\circ C$

תמיסה (55%) - $146^\circ C$

צפיפות: מוצק - 3.46 גר' לסמ"ק

תמיסה (55%) - 1.627 גר' לסמ"ק

מסיסות במים: מצויינת 145 גר' ב- 100 גר' מים ($4^\circ C$)

254 גר' ב- 100 גר' מים ($90^\circ C$)

מסיסות בממסים אחרים: מסיס במתאנול, באתאנול נקי וב-n-פרופאנול

דליקות: לא דליק

רעילות (של התמיסה): גורם לגירוי חריף בעיניים. גורם לגירוי בעור. בחשיפה ממושכת בבליעה עלולה לגרום לנוק למערכת העצבים.

תגובות אופייניות:

* מתפרק במצב מותך

* חומר היגרוסקופי

שימושים: למערכות קירור ומיזוג אוויר, לתרופות.

א) תמיסות ליתיום ברומי הן בעלות לחץ אדים נמוך וסופגות במהירות אדי מים. אילו תכונות נוספות של החומר מאפשרות את השימוש בו למערכות קירור ומיזוג אוויר.

ב) באילו תנאים יש, לדעתך, לאחסן מוצר זה?

ג) מהם היתרונות הקיימים בטכנולוגיות הקירור המבוססות על השימוש בתמיסות ליתיום ברומי בהשוואה לטכנולוגיות המבוססות על השימוש בפריאונים? האם קיימים גם חסרונות להחלפת הטכנולוגיות?

5. נתון ברומי הוא מוצר חשוב ב"תרכובות ברום" ומשמש למטרות שונות ומגוונות. לפניך "כרטיס" של נתון ברומי:

שם החומר: נתון ברומי $NaBr$

א/א

מוצק לבן חסר ריח (אבקתי או גבישי).
 מסה מולרית: 102.9 גר'/מול.
 טמפרטורת היתוך: $755^{\circ}C$.
 טמפרטורת רתיחה: $1390^{\circ}C$.
 צפיפות: מוצק - 3.2 גר' לסמ"ק.
 תמיסה - 1.51 - 1.46 גר' לסמ"ק ($20^{\circ}C$).
 מסיסות במים: טובה מאוד.
 90.5 גר' ב-100 גר' מים ($20^{\circ}C$).
 121 גר' ב-100 גר' מים ($100^{\circ}C$).
 מסיסות בממסים אחרים: זניחה (פרט למתאנול ולאתנול 95%).
 דליקות: לא דליק ולא מתפוצץ.
 רעילות: רעיל בבליעה ובנשימה. גורם לגירוי קל בעיניים.
 חשיפה ממושכת בבליעה עלולה לגרום לנוק במערכת העצבים המרכזית.
 תגובות אופייניות:
 * בחימום חזק (מעל $800^{\circ}C$) משחרר אדי ברום.
 * חומר היגרוסקופי.
 * מגיב עם חומצות חזקות תוך שחרור ברום.
 * מגיב עם חומרים מחמצנים חזקים ומלחים של מתכות כבדות.
 שימושים: להפקת $AgBr$ עבור תרחיפי צילום ותמיסות פיתוח, לתעשיית התרופות, לקידוחי נפט, לתעשיית הדטרגנטים ולחיסוי מים (בבריכות שחייה ומגדלי קירור).

א) מאילו חומרי מוצא ניתן לייצר נתון ברומי? רשום ניסוח לתגובה.
 ב) במהלך הפרק נתקלת בשימושים שונים של נתון ברומי. ציין מהם השימושים ומהן הדרישות הקיימות ממוצר זה עבור כל אחד מהשימושים.

ג) האם תושפע דרגת הניקיון של המוצר משימוש במקורות שונים של חומרי גלם הנדרשים לייצורו. הסבר ותן דוגמאות.
 שימוש חדש של נתון ברומי הוא להכנת תמיסות אלקטרוליט עבור מצברים תעשייתיים. מצברים אלו הם גדולים במיוחד (נעשויים להגיע לגודל של בנין רב-קומות) ומיועדים למספר מטרות:

- גיבוי לתקלות של נפילת רשת החשמל עבור מיתקנים תעשייתיים.
- צבירת עודפי חשמל לשימוש בעת הצורך.

- צבירת חשמל "זול" לשימוש בשעות בהם תעריפי החשמל גבוהים יותר.
(ד) האם נדרשת, לדעתך, דרגת ניקיון גבוהה של המוצר לצורך שימוש זה?
נמק.

(ה) אם כן, כיצד ניתן לדעתך להשיג דרגת ניקיון גבוהה במקרה זה? פרט.

5. אמון ברומי, NH_4Br , משמש כמעכב בעירה למוצרי סיבית ועץ.

(א) מדוע לא משתמשים למטרה זו ב- KBr , NaBr או CaBr_2 ?

(ב) כיצד ניתן לשלב את האמון הברומי במוצרים אלו?

(ג) כיצד פועל האמון הברומי כמעכב בעירה?

(ד) מדוע לדעתך משתמשים למטרה זו באמון ברומי ולא במעכב בעירה אחר?

6. פוליפרופן הינו פולימר המשמש לייצור צינורות פלסטיים שתפקידם לבודד כבלי חשמל בתעשיית הבנייה. פוליפרופן ניתן ב- 180°C ומתחיל להתפרק ב- 250°C בערך. בטבלה הבאה נתונים של מספר חומרים המשמשים כמעכבי בעירה.

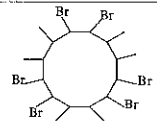
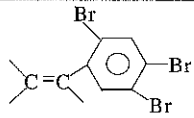
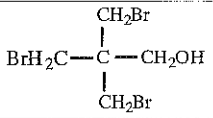
(א) איזה/אילו חומר/ים בטבלה ניתכים בזמן תרכוב הפוליפרופן?

(ב) איזה/אילו חומר/ים יכולים לשמש כמעכבי בעירה עבור פוליפרופן? נמק.

(ב) מהם החומרים היכולים לשמש כמעכבי בעירה עבור פוליפרופן? נמק.

- ציין עבור כל חומר האם ניתן לשלבו כמעכב בעירה "מוסף" או "פעיל"?

- ציין עבור כל חומר כיצד פועל כמעכב בעירה?

נוסחת החומר	שם החומר	טמ' ההיתוך	טמ' הפירוק
	HBCD	$180-190^\circ\text{C}$	החל מ- 200°C
	טרי ברומו סטירן	$65-67^\circ\text{C}$	מעל 250°C
$\text{Mg}(\text{OH})_2$	מגנזיום הידרוקסיד	לא ניתן מתחת לטמ' הפירוק	320°C
NH_4Br	אמון ברומי	לא ניתן מתחת לטמ' הפירוק	452°C
NaHCO_3	נתרן מימן פחמתי	לא ניתן מתחת לטמ' הפירוק	$50-100^\circ\text{C}$
	TBNPA	$62-67^\circ\text{C}$	החל מ- 180°C

(ג) הציעו להשתמש בחומר הדומה ל-HBCD, אלא שהוא מכיל אטומי כלור במקום אטומי ברומ. תן יתרון אחד וחסרון אחד להחלפה זו.

פרק סיכום עבר, הווה ועם הפנים לעתיד

עבר, הווה ועתיד

במהלך הספר עקבת אחר התפתחותה של תעשיית הברום ותרכובותיו בארץ. נפגשת בנושאים שונים ומגוונים, החל מצעדיה הראשונים של תעשייה זו בשנות השלושים של המאה, ועד לפתחה של המאה ה-21.

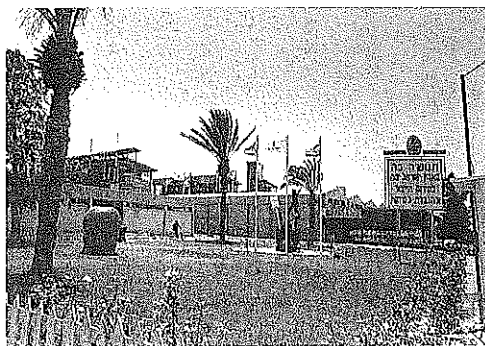
ההתפתחות העצומה שחלה בתעשייה זו מאז הווסדה נובעת משילוב של מספר מאפיינים, שחלקם קשורים בפיתוח מדעי וטכנולוגי, חלקם קשורים בפיתוח המבנה האירגוני והשיווקי וחלקם בפיתוח הגורם האנושי.

ממפעל קטן בסדום התפתחה חברה גדולה, הכוללת מספר חברות בת ומרכזי שיווק במדינות רבות בעולם, ויחד הם מהווים כיום קבוצה הנקראת קבוצת הברום.

באופן טבעי בכל תקופה של חיי החברה והתפתחותה מעסיקות את מנהליה בעיות שונות ועומדות בפניהם מטרות בהתאם.

בשנים הראשונות לקיומה של החברה הוצבו מטרות בסיסיות כמו:

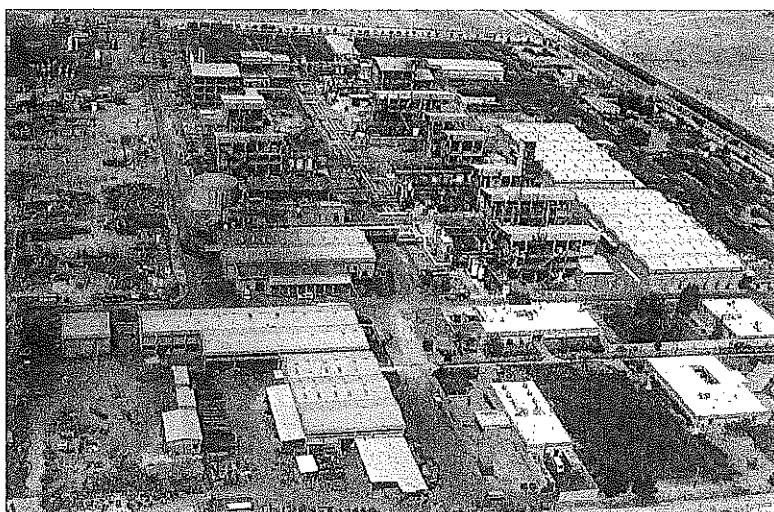
- הקמת מיתקנים ותשתיות.
- פיתוח מערכות הובלה ושינוע.
- מציאת כח אדם מתאים והכשרתו.
- אבטחת ייצור תקין וללא תקלות.
- התמקדות במוצרים שתהליכי הייצור שלהם אינם מורכבים מדי וניתנים לשיווק בכמויות גדולות.



הכניסה למפעל "תרכובות ברום"

בשנים שלאחר מכן, כאשר החברה גדלה ונעשתה בשלה יותר, הוצבו מטרות מתקדמות יותר כמו:

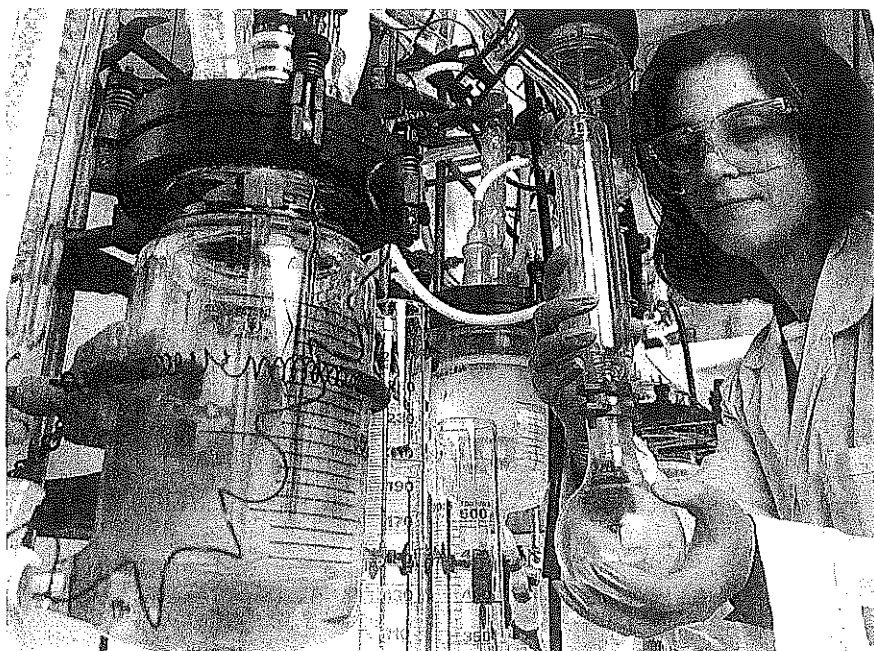
- הגדלת כושר הייצור של הברום (הן על ידי הגדלת כושר הייצור של הכלור והן על ידי הכנסת שיפורים במיתקני הברום והרחבתם).
- בנייה מודולרית של יחידות ייצור הניתנות להסבה בהתאם לצורך והתאמתם לתהליכים שונים.
- שיפור הומרי המבנה במיתקנים במטרה לעשותם עמידים יותר בפני שיתוך.
- שיפור הבקרה על תהליכים על ידי שילוב מערכות ממוחשבות, מיכשור משוכלל ושיטות מדידה מדוייקות.
- שיפור שיטות האחסון והשינוע כדי להשיג יתר בטיחות ואמינות.
- פתרון בעית השפכים ובעיות אחרות בתחום איכות הסביבה.
- חיסכון באנרגיה על ידי שיפורים שונים בתהליכי הייצור.
- הרחבת סל המוצרים.
- אירגון המחקר והפיתוח כך שילוו גם את כל שלבי הייצור.
- אירגון יעיל של השיווק.
- יצירת קשר ישיר בין יחידות השיווק, המחקר הפיתוח ויחידות הייצור.
- הטמעת התורה הניהולית של הבטחת איכות כדי להשיג איכות גבוהה של מוצרים ושרות ללקוחות.
- פיתוח כוח אדם מיומן על ידי הדרכה שוטפת ומעודכנת.
- דאגה לפרט, היוצרת הרגשת שייכות ואכפתיות.



מבט על מפעל "תרכובות ברום" כיום

כיום, בפתח המילניום הבא, יש כמובן להציב מטרות מסוג אחר. מצד אחד העולם התעשייתי התפתח ונהייה מתוחכם יותר, ומצד שני הוא נתון יותר לתחרותיות וגם להשפעה של שיקולי איכות הסביבה ולתחרותיות. בהתאם לכך הוצבו יעדים כמו:

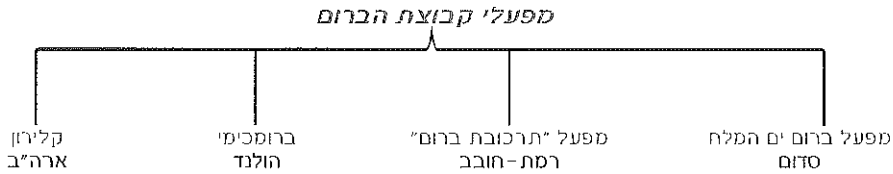
- מאמצים בלתי פוסקים לצמיחה ולשיפור של מערכות השיווק, המכירות והשרות ללקוחות.
- תיכנון לטווח ארוך, הרואה את הצרכים העתידיים של הלקוחות והגדלת מספר הלקוחות על ידי התאמת המוצרים לשימושים הייחודיים של כל לקוח.
- הרחבת השימושים של מוצרים ישנים.
- הרחבת סל המוצרים למוצרים בעלי ערך מוסף גבוה.
- מציאת שימוש לטכנולוגיות יחודיות שפותחו.
- מחקר ופיתוח לשיפור תהליכים קיימים ולפיתוח תהליכים, חומרים ושימושים חדשים.



במעבדת מחקר

מבנה ואירגון

קבוצת הברום כוללת כיום הנהלה ראשית וארבעה מפעלים:



מרכז הקבוצה וההנהלה הראשית נמצאים ב"בית מקלף" בבאר-שבע, ממנו חולשים על כל שלוחות הקבוצה בארץ ובחו"ל. מבנה הקבוצה ואירגונה אינם קבועים אלא משתנים בהתאם לצרכים ולתפיסות הניהוליות. יש להניח שגם בעתיד יחולו שינויים אירגוניים, שכן עם השינויים החלים במטרות, משתנים גם הכלים להגשמתן.



מפעל "ברומכימי" בהולנד

כיום מורכבת הנהלת החברה מענפים ומחטיבות. ארבעה ענפים נותנים שירותים שונים לחטיבות:

ענף כספים

ענף טכני

ענף משאבי אנוש

ענף מחקר ופיתוח והבטחת איכות.

בקבוצת הברום קיימות כיום ארבע חטיבות שונות הנחלקות על פי המוצרים:

חטיבת מעכבי בעירה

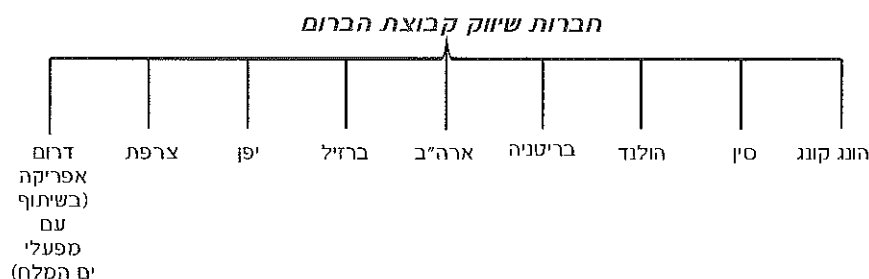
חטיבת מוצרים תעשייתיים

חטיבת ביוצידים (חומרים לטיהור מים)

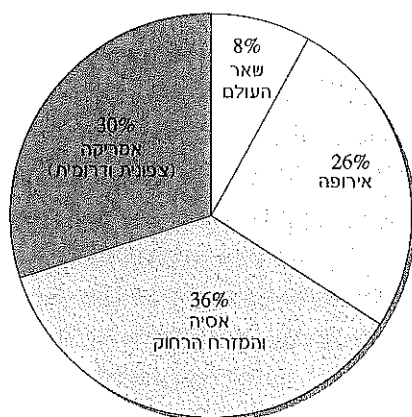
חטיבת כימיקלים עדינים

בכל חטיבה קיים קשר ישיר וקבוע בין המחקר והפיתוח, הייצור והשיווק, להגדרת יעדים, תכנון משימות ופתרון בעיות.

הקבוצה משווקת את מוצריה בכל רחבי העולם. לצורך זה הוקמו תשע חברות שיווק.



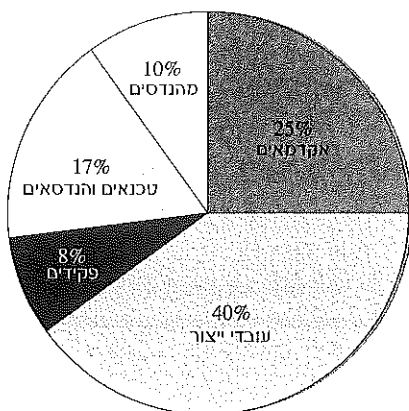
כל אחת מחברות השיווק אחראית באיזורה על הפעולות השיווקיות, המכירות והקשר עם הלקוחות. כיום משווקת "קבוצת ברום ים המלח" את מוצריה בכ-100 מדינות בכמות כוללת של מעל 400,000 טון בשנה. יותר מ-95% מהתוצרת מיועדת לייצוא, בעיקר לאסיה, המזרח הרחוק ולאמריקה.



חלוקת המכירות בעולם

כח אדם

ב-1998 כללה קבוצת הברום כ-1580 עובדים בארץ ובח"ל.
בסכימה הבאה נתונים כלליים על כח האדם בקבוצה:



חלוקת כוח אדם בקבוצת הברום

עובדי מפעל "תרכובות ברום" הם חלק הארי בקבוצה, והחתך המקצועי שלהם מלמד על פילוח המקצועות הנדרשים:

מנהלי עבודה - 5%	מהנדסים - 10%
עובדים מקצועיים (אנשי אחזקה) - 10%	אקדמאים - 25%
מפעילים - 25%	טכנאים - 17%
פועלים - 1%	פקידים - 8%

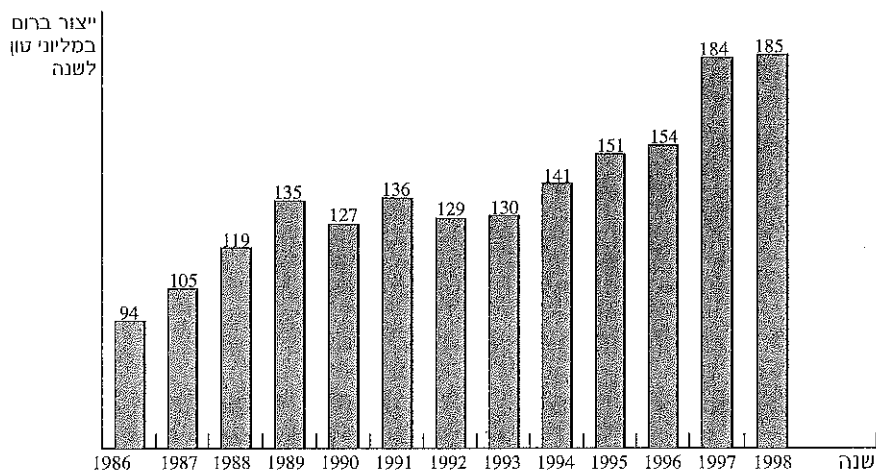
במיתקני הייצור מועסקים מפעילים, טכנאים, הנדסאים ומהנדסים בתחומי הכימיה, המכונות, החשמל, האלקטרוניקה וכד'. צוותים אלה מאפשרים הפעלה שוטפת של המיתקנים ותורמים להתפתחות הטכנולוגית על-ידי התייעלות והכנסת שיפורים. במעבדות המחקר והפיתוח ובמעבדות לביקורת איכות עובדים עשרות לבורנטים, טכנאים, כימאים (בעלי תואר ראשון, שני ושלישי) ומהנדסי כימיה שלהם תפקידים רבים ומגוונים. במינהלה עובדים כלכלנים, רואי חשבון, אנשי מינהל עסקים ואפילו עורכי דין, יחד עם מהנדסים, כימאים, אנשי אבטחת איכות, אנשי מחשבים, אנשי מזכירות ואחרים.

עבודת השיווק נעשית לא רק על ידי אנשי מקצוע בתחומי השיווק, הכלכלה ומנהל העסקים אלא גם על ידי מומחים בתחומי הכימיה, הביולוגיה, החקלאות ועוד, זאת על פי הצרכים היחודיים בכל תחום.

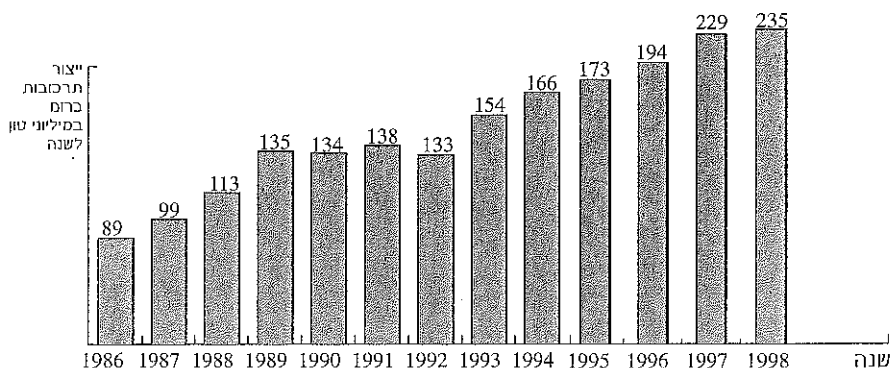
בנושאים רבים נעשית העבודה בצוותים, תוך שיתוף פעולה המשלב התייחסות רב כיוונית לנושאים השונים ולבעיות העומדות על הפרק.

נתונים כלכליים

קבוצת הברום ייצרה ב-1998 כ-185 אלף טון ברום, שהם כ-30% מכלל צריכת הברום בעולם, והיא כיום יצרנית הברום הגדולה ביותר בעולם. ייצור תרכובות הברום ב-1998 הגיע ל-235,000 אלף טון. הגרפים הבאים מתארים את ייצור הברום ותרכובותיו בקבוצת הברום בתקופה שבין 1986-1998.

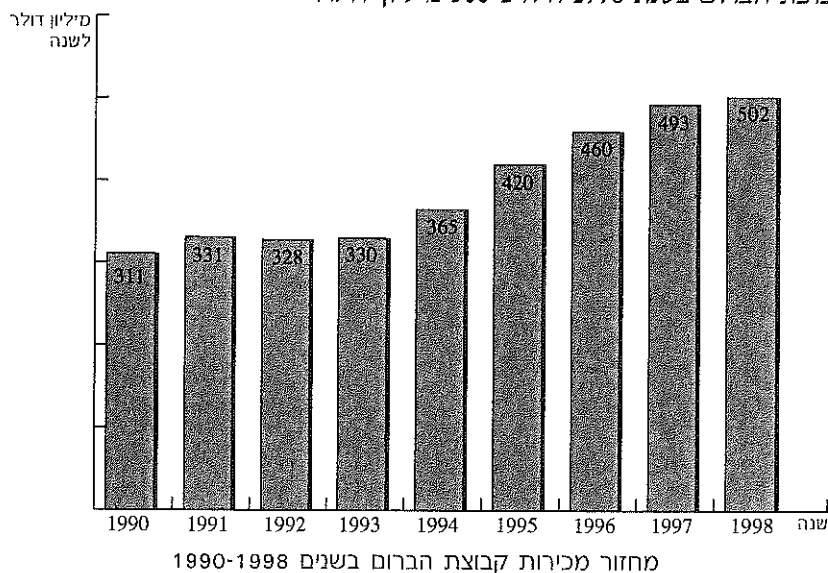


ייצור ברום בשנים 1986-1998

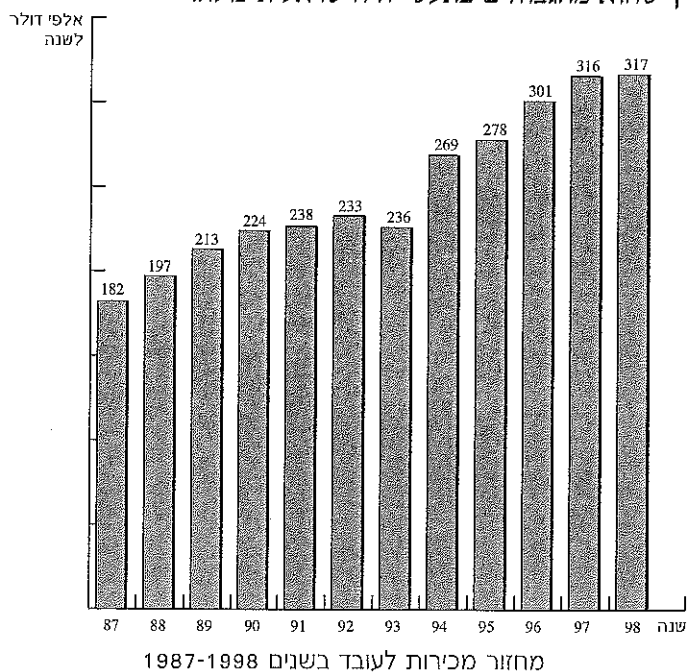


ייצור תרכובות ברום בשנים 1986-1998

משנת 1976 גדל מחזור המכירות בשיעור של 10%-15% לשנה. מחזור המכירות של קבוצת הברום בשנת 1998 היה כ-500 מיליון דולר.



מחזור המכירות לעובד¹ עלה במהלך השנים במהירות והגיע לכ-317 אלף דולר לשנה, ערך שהוא מהגבוהים בתעשייה הישראלית כולה.

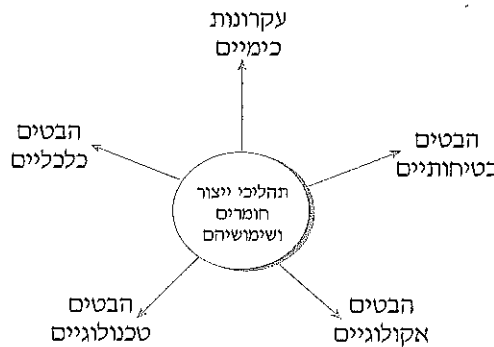


1 סך הכל המכירות מחולק במספר העובדים.

בספר זה התוודעתם לתעשיית הברום ותרכובותיו, שהיא אחת מהתעשיות הכימיות החשובות בארץ, המתבססת על אוצר טבע יחודי - ים המלח. יחד עם האפשרות להכיר מקרוב תעשייה מעניינת זו, יכולתם ללמוד ולקבל גם תמונה כללית יותר על עולם התעשייה הכימית.

במהלך הלימוד נפגשתם במושגים ועקרונות תעשייתיים בסיסיים וראיתם כיצד מיישמים אותם במפעל הלכה למעשה. כמו כן ראיתם כיצד ניתן לנצל את אוצרות הטבע להפקת חומרים מגוונים לרווחת האדם. למדתם, כי הכימאים, מהנדסי הכימיה ואנשי מדע וטכנולוגיה בתחומים נוספים אחרים, רותמים יחד את הידע המקצועי שלהם. בעבודה משותפת ורבת אתגר הם מביאים לכך שרעיונות מדעיים מתממשים במפעל רווחי, המייצר חומרים לשימושים שונים וחשובים. יכולתם גם להתרשם מהחיפוש המתמיד אחר פתרונות לבעיות שונות בתחומי הכימיה, הטכנולוגיה, איכות הסביבה, הבטיחות ועוד, ובמקביל לראות את מכלול הדרכים המיושמות כדי לשפר וליעל תחומים אלה.

נחזור לסכימה שהצגנו בתחילת הפרק העוסק בתהליכי ייצור במפעל:



בסכימה זו תוכלו להשתמש לניתוח תהליכי ייצור נוספים במפעלי קבוצת הברום או בכל מפעל אחר. כמו כן ניתן להעזר בה לניתוח התכונות של החומרים והמוצרים השונים המיועדים ליישום בתחומים רבים ומגוונים. סכימה זו מדגישה את הרב-תחומיות של התעשייה הכימית. אין די בידע מדעי כדי לפתח חומר חדש, יישום חדש או תהליך חדש. כל אחת ממטרות אלו צריכה להיבחן מזוויות שונות. לא רק מחקר ופיתוח בתחום המדעי, אלא גם בניית מערכות ופיתוח טכנולוגיות בתחום ההנדסי. לא רק פיתוח כלכלי ועיסוקי, אלא גם מחויבות לשמירה על הבטיחות ואיכות הסביבה.

תפקיד חשוב לא פחות יש להבטים הכלכליים, האירגוניים והניהוליים; פיתוח עסקים, פיתוח המבנה הארגוני והתרבות האירגונית, בניית מערכות מתקדמות משולבות מחשב לניהול ולבקרה ועוד.

המפעל הכימי הוא מערכת דינמית המתפתחת באופן תמידי. גם לאחר סיום השלבים הראשונים של המחקר והפיתוח, הקמת המפעל, הפעלת מיתקני הייצור והבאתם לתפוקה מלאה, לא מסתיימת המלאכה. מאמצים מתמשכים ובלתי נלאים נעשים לפתרון בעיות, לשיפור תהליכים, לחיסכון בתשומות, להגברת הבטיחות, לשמירה על איכות הסביבה, לפיתוח מוצרים חדשים וטכנולוגיות חדשות, למציאת שימושים ושווקים חדשים למוצרים קיימים, להגדלת המכירות ופיתוח מערכת השיווק, להתייעלות ולהעלאת הרווחיות. בכל שלב של התפתחות המפעל חייבים מנהלי לפתור בעיות אחרות ולכוון את מאמציהם לכיוונים אחרים. התפתחותם של מפעלי כימיה, שמרבית תוצרתם מיועדת ליצוא, מושפעת ממגמות ושינויים כלל עולמיים. באופן טבעי תלוי בכך גם סל המוצרים של קבוצת הברוס. עלייה או ירידה בביקוש למוצרים בתחום אחד עשויה להשפיע על הביקוש למוצרים בתחום אחר. כך למשל, עלייה בביקוש למוצרי אלקטרוניקה ומחשבים עשויה להגדיל את הביקוש למעכבי בעירה, והצורך במזון עשוי להגדיל את השימוש בחומרי הדברה.

בספר זה פגשנו בחומרים כמו כסף ברומי, שהביקוש להם ירד בגלל התפתחות טכנולוגיה חלופית שגרמה להקטנת השימוש בהם. לעומת זאת ראינו חומרים וכמו הלוברום וליתיום ברומיד, שהביקוש להם עלה, כתוצאה מעלייה ברמת החיים בעיקר במדינות המפותחות. מעל כל אלו עומדת בשנים האחרונות המלחמה לסביבה "ירוקה" יותר והחקיקה בתחום נושאי איכות הסביבה. עסקנו בסיפורם של מספר חומרים, אשר מפאת שיקולים של פגיעה (או חשד לפגיעה) באיכות הסביבה השימוש בהם דעך או שייצורם הוקפא. כך נוצר הצורך למצוא לחומרים אלו תחליפים, ובמקביל לחפש אחר חומרים אחרים שיתפסו את מקומם בסל המוצרים. זאת, כדי שהקבוצה תמשיך לייצר ולצמוח.

גם לגבי מוצרים אחרים אין ערובה כי זמן חייהם ימשך לנצח. אולי ימצאו להם תחליפים? אולי יפסק השימוש בהם מסיבות אחרות? לכל מוצר מחזור חיים משלו ותמיד צריך לחשוב קדימה. זהו תהליך דינמי ומתמשך שחייב להתקיים בתעשייה מתקדמת הרוצה להמשיך להתקיים, לעמוד כנגד חברות מתחרות, לצמוח ולא ל"קפוא על שמריה".

בפרקים הקודמים למדנו, כי גם בייצור חומרים חיוניים וידידותיים לסביבה אי אפשר לעיתים להמנע מהצורך להשתמש בחומרים העלולים להיות מסוכנים. ישנם קיצוניים שיגידו שיש להפסיק את הייצור או השימוש בחומרים מסוכנים.

מתוך מגמה זו יש חשיבות רבה למציאת פתרונות של מיחזור והשבת חומרים. בפרקים קודמים בספר ראית כיצד פותחו במפעל "תרכובות ברום" מערכות להשבת ממסים. מערכות אלו נועדו מלכתחילה לפתרון בעיות סביבתיות, אך בעקבות הפעלתן נחשכים גם משאבים כלכליים. ראית גם כיצד לתוצר לוואי הדורש טיפול נמצא שימוש כחומר מוצא למוצר אחר המיוצר במפעל. במקרה אחר משמש מוצר לוואי כחומר גלם במפעל אחר. ככל שירבו פתרונות מסוג זה, ההשקעות תוכלנה בסופו של דבר להסתיים ברווחים.

כדי להביא את המפעל הכימי להצלחה, נדרש ידע בתחומים רבים ומגוונים ועל כן מועסקים בו בעלי מקצוע שונים: כימאים, מהנדסי כימיה, מהנדסי מכונות, מהנדסי חשמל, כלכלנים, מהנדסי איכות הסביבה, ביולוגים, מומחי חקלאות, ממוני בטיחות, מפעילי מיתקנים, עובדי מעבדות עובדי מינהלה ועוד. כל אלה יכולים למלא תפקידים שונים ומגוונים, מתפקידים המוגדרים על פי הרקע המקצועי שלהם ועד לתפקידים שאינם מוגדרים על פי הכשרתם המקצועית הבסיסית, כמו ניהול, שיווק ומכירות.

בעבר התמקדה ההצלחה הכלכלית של המפעל ביתרון היחסי שיש לקבוצת הברום בהשוואה למתחריה, בעיקר בייצור הברום עצמו הנובע מהריכוז הגבוה של הברומידים במי ים המלח. בעתיד תהייה תלויה ההצלחה בפיתוח מוצרים בעלי "ערך מוסף" גבוה. המגמה היא לפתח מוצרים עתירי ידע, שאינם דווקא "עשירים" בברום, או אפילו חומרים שאינם מכילים כלל ברום, אשר הברום משתתף במהלך ייצורם. כמו כן מושקע מאמץ בפיתוח תהליכים המשתמשים בטכנולוגיות ייחודיות שפותחו בתעשייה זו.

במקביל חייבים לפתח רשת שיווק מתאימה, אשר תידאג לפיתוח שווקים לקליטת התוצרת. המאמצים השיווקיים מלווים במחקרים בתחומים השונים להם מיועדים המוצרים. במסגרת זו נעשים מחקרים בתחומי החקלאות, הפלסטיקה, חומרי החיטוי ועוד. השימוש במוצרים מסויימים צריך להיות מלווה במערכת של שירותי הדרכה ללקוחות: באיזה חומר או הרכב יש לבחור לשימוש הייחודי? איך להשתמש בחומר? מתי להשתמש בחומר? וכד'.

הצלחתו של מפעל נמדדת ברווחיותו. הרווחיות גדלה ככל שהמוצרים מתוחכמים יותר, בעלי ערך מוסף כלכלי גבוה יותר ונמכרים במחיר גבוה יותר. בנוסף לכך, הרווחיות גדלה ככל שהתהליכים מתייעלים והעלויות יורדות. כל אלו תוך שמירה על איכות המוצרים מצד אחד ועל איכות הסביבה מצד שני.

מגמות אלו ואחרות ניכרות בדבריו של מנכ"ל "קבוצת ברום ים המלח" בראיון¹ שנעשה במרץ 1998:

*מהם, ארסנק, השוניים וההתפתחויות
בזירה לקראת העשור הבא?*

התשובה לשאלה זו חייבת להתייחס למספר תחומים התחום הראשון הוא **גודלה של החברה והיקף המכירות שלה**

במונחים של מחזור מכירות תופסת כיום קבוצת הברום מקום שני בעולם בייצור הברום ותרכובותיו. אנו מקווים שתוך חמש שנים נהפוך למובילים בעולם בתחום זה. מחזור המכירות של קבוצת הברום בשנת 1998 היה כ-500 מיליון דולר לשנה יחד עם זאת, כבר היום כושר ייצור הברום של קבוצת הברום הינו הגבוה בעולם והמטרה שלנו היא להגיע בעוד עשר שנים למחזור מכירות של 1.5 מיליארד דולר.

התחום השני הוא **סל המוצרים**. היעד הוא להמשיך לחיות המובילים בעולם בתחום של **הכימיקלים המיוחדים** על בסיס בריום. בתחום זה פועלת החברה מאז אמצע שנות השבעים והיא התמחתה בייצור ובשיווק של מייגון מוצרים המשמשים בתחומים שונים. עיכוב בעירה, הדברת מזיקים בחקלאות, בתעשיית הצילום, תעשיית הקוסמטיקה, חומרי ביניים לתעשיית הצבעים והתרופות, לחיטוי מים (ביוצידים) וחומרים לקידוחי נפט בשנים הקרובות יש בכוונתנו להרחיב את סל המוצרים באותם תחומים הנראים כבעלי פוטנציאל של גידול בביקוש. גישת ההרחבה תהיה הן ביחס לחומרים

המתבססים על בריום והן ביחס לחומרים נוספים שאינם מתבססים על בריום.

תחום חשוב נוסף אליו שואפת להכנס קבוצת הברום הוא **תחום הכימיקלים העדינים**. תחום זה מתאפיין מצד אחד בגידול מספר שלבי הייצור (יותר משלושה) ומצד שני במכירה של כמויות קטנות יותר. באופן טבעי, הערך המוסף של חומרים אלו גבוה יותר ולכן מחיריהם גבוהים יותר. בעוד שהכימיקלים המיוחדים נמכרים בכמויות של אלפי טונות ויותר ומחירים כ-2-3 דולר לק"ג, הכימיקלים העדינים נמכרים בעיקר בכמויות של עשרות עד מאות טונות ומחירים גבוה מ-10 דולר לק"ג. בייצור מוצרים אלו יהיה לידע הכימי יתרון גדול יותר מאשר למחיר. חומרי הגלם הברום יפסיק להיות המרכיב המרכזי בחישוב עלות המוצרים, כפי שקורה בסל המוצרים כיום. לעומת זאת, הטכנולוגיות המיוחדות והשיטות שפותחו במשך שנים רבות לייצור הברום ומוצריו, ימשיכו להיות חשובות גם בעתיד.

*מה יקרה ביום אחרונים העשורים
אניאוקים טאקסידוליים ואקולאזיים?*

באופן כללי, חולפת קבוצת הברום כבר היום **לקראת ייצור מוצרים "ירוקים"**, שאינם פוגעים באדם ובסביבה. החברה

בעתיד נראה את **הלקוח יותר כשותף אסטרטגי**, השותף בפיתוח המוצר ובתכנון היישומים המתאימים לו. כך נוכל להשיג שתי מטרות: מצד אחד שיפור האיכות, שהוא התאמת המוצר לדרישות הלקוח, ומצד שני העלאת הערך המוסף של המוצר. כמו כן תהיה מחויבות שלנו כיצון לקחת את המוצר בחזרה לאחר תום השימוש מהלקוח (או מהלקוח של הלקוח וכן הלאה) ולמחזר את החומרים. כל התעשייה הכימית תיראה אחרת ותעסוק יותר במיחזור של חומרים פלסטיים ואחרים.

יחד עם הטכנולוגיות ההולכות ומתקדמות וחדרישות המקצועיות ההולכות וגדלות ידרשו עובדים בעלי רמה גבוהה יותר בכל התחומים. התחרות בין החברות השונות תביא לצורך בהתייעלות וגמישות.

בעתיד יחולו שינויים בעולם התעשייתי כולו ובכלל זה גם בתעשייה הכימית. חברות "תבלענה" אחת את השנייה ורק הגדולות והחזקות תוכלנה לשרוד.

1 הראיון המלא מופיע ב"קשר לתעשייה הכימית", עיתון למורי הכימיה, ספטמבר 1999.

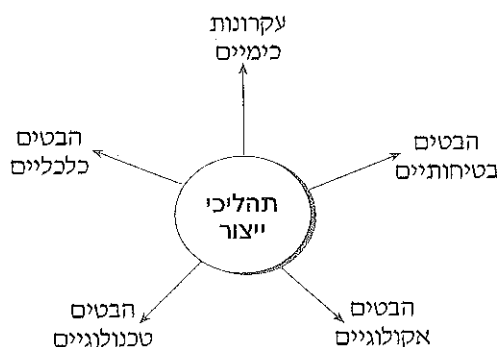
משקיעה מאמצים ומשאבים רבים בתחום זה. מגמה זו של "תעשייה ירוקה" תלך ותתחזק בעתיד. במסגרת זו תמשיך החברה ותחזק את המגמה של הקפדה על סביבת עבודה נקייה, שמירה על בריאות העובדים, מניעת פליטה של חומרים מזהמים לאוויר, לקרקע ולמקורות המים, ושיפור הטיפול הביולוגי בשפכים. החברה תיקח אחריות על המוצרים מתחילת הפיתוח שלהם ועד לגמר השימוש בהם. אחד הנושאים שיעשו חשובים ביותר בעתיד הוא **רישום ורישוי מוצרים**, או כפי שנהוג לקרוא לו: **הגנת מוצרים**. בלעדי זאת לא ניתן יהיה למכור מוצרים.

*האם יואל ארסגן שיוויס ביגס אלל
השיווקי?*

כל מערך השיווק הולך לכיוון של התמקצעות רבה. מוצרים רבים סופקו עד היום ללקוחות כנתון קטלוגי לעומת זאת, ההצלחה בשיווק ובמכירות בעידן שנות ה-2000 תקבע על פי השרות שניתן ללקוחות. המוצר ימכר ללקוח יחד עם המיפרטים המתאימים לשימושים היחודיים או יחד עם השרות ואספקת הטכנולוגיה לשימוש.

נושאים לדיון ולהעשרה במהלך ההוראה ולסיכום

1. התייחס לקטע הראיון עם מנכ"ל חברת הברוס והתבסס של הפרקים הקודמים כדי לענות על השאלות הבאות:
(א) על מה מתבסס לדעתך מנכ"ל הברוס באומרו כי המטרה היא שבעוד כ-10 שנים תהייה קבוצת הברוס ההחברה הגדולה בעולם בהפקת ברום ותרבותיו?
(ב) מה לדעתך צריך לעשות כדי להפוך את התעשייה הכימית ל"תעשייה ירוקה"? פרט.
(ג) הלקוח כשותף איסטרטגי, מה דעתך על גישה זו. מהם יתרונותיה ומהם חסרונותיה. כיצד יכולה לדעתך חברה להעריך למדיניות זו?
 2. כיצד השפיעה ההתפתחות הטכנולוגית בתחום המחשבים על התעשייה הכימית?
 3. "התעשייה הכימית היא דוגמא לשילוב של תגליות מדעיות וטכנולוגיות לצורך הגשמת צרכים שונים של האנושות". חווה את דעתך על משפט זה ונמק.
 4. שרטט על ציר זמן את נקודות הציון החשובות בהתפתחותה של קבוצת ברום ים המלח.
 5. העזר בספרי הלימוד ובמקורות מידע נוספים כדי להראות נקודות ציון חשובות בהתפתחות התעשייה הכימית:
(א) בעולם
(ב) בארץ
- ניתן להתייחס לפיתוח תהליכים, לפיתוח טכנולוגיה, לפיתוח חומרי מבנה, לפיתוח שימושים של חומרים שונים וכד'.
- הערה: מומלץ להעזר בשרטוט ציר זמן עבור נקודות הציון החשובות שמצאת.
6. מצא או בקש מהמורה קטעי עיתונות הנוגעים לקבוצת הברוס ונתח אותם בעזרת הסכימה הכללית הבאה:



7. התייחס למוצרים השונים של קבוצת הברום על פי הסכימה הבאה:

מבנה — תכונות — שימושים

תן דוגמאות של מוצרים במפעל ונתח את הקשר בין: מבנה, תכונות ושימושים.
8. כיצד עשויים האוטומציה והמיחשוב להשפיע על כח האדם הנדרש במפעלים
ועל ההכשרה המקצועית הנדרשת?

9. האם, לדעתך, התעשייה הכימית יכולה להחשב כתעשיית הייטק? הסבר.

10. לפניך כתובת אתר האינטרנט של קבוצת הברום:

website: <http://www.deadseabromine.com>

גלוש באתר וחפש נושאים המעניינים אותך. ציין בראשי פרקים את הנושאים
החדשים בהם נתקלת ודווח לכיתה.

נספחים:

נספח א' - המרה וניצולת

נספח ב' - דף מידע בטיחותי-ברום

נספח ג' - מהו פטנט?

נספח א'

המרה וניצולת

המרה (Conversion)

(%) היחס בין כמות המגיב שתגיבה לבין כמות המגיב שהוכנסה למכל התגובה (מבלי לקחת בחשבון תהליכי מיחזור).

$$\text{אחוז המרה} = \frac{\text{כמות המגיב שהגיבה}}{\text{כמות המגיב שהוכנסה לתגובה}} \times 100$$

ההמרה תלויה, בערכו המספרי של K. כאשר K גבוה מ- 10^{10} נהוג לומר שבאופן מעשי התגובה מתרחשת עד תום ואז ההמרה קרובה ל-100%.
ההמרה מתייחסת לתגובה מסוימת ולמגיב מסוים. בדרך כלל מחשבים את ההמרה על פי המגיב המצוי בכמות המגבילה, שהוא לרוב המגיב היקר יותר.

דוגמאות:

א. הכניסו למכל התגובה 1000 ק"ג חומר A ובסוף התגובה נותרו 600 ק"ג חומר A שלא הגיבו. אחוז ההמרה הוא:

$$\frac{1000 - 600}{1000} \times 100 = 40\%$$

ב. במכל מתרחשת התגובה: $A + B \rightleftharpoons 2C$.

למכל התגובה הכניסו 100 מול A ו-100 מול B. בסופו של התהליך נמצא כי כמות התוצר במכל היא 180 מול.

$$\text{אחוז ההמרה הוא: } \frac{180}{200} \times 100 = 90\%$$

ניצולת התגובה (ללא מיחזור)

(%) היחס בין כמות התוצר המבוקש המתקבלת בתגובה לבין הכמות שהיתה צריכה להתקבל על פי המקדמים בניסוח התגובה, הכמות ההתחלתית של המגיבים ואחוז ההמרה.

ניצולת התגובה תלויה באובדן מגיבים או תוצרים ובתהליכים מתחרים.

$$\% \text{ ניצולת} = \frac{\text{כמות התוצר שהתקבלה}}{\text{כמות התוצר שהיתה מתקבלת עפ"י הכמות ההתחלתית של המגיבים, עפ"י הניסוח ועפ"י אחוז ההמרה}} \times 100$$

דוגמאות:

א. במכל התגובה מתרחשת התגובה $A + B \rightarrow 2C$ עבורה $K > 10^{10}$.
 למכל התגובה הכניסו 120 מול A ו-100 מול B. בסופו של התהליך (כתוצאה מאובדנים שונים) התקבלו 180 מול C.
 אחוז הניצולת הוא:

$$\frac{180 \text{ מ"ל}}{200 \text{ מ"ל}} \times 100 = 90$$

ב. במכל מתרחשת התגובה: $A + B \rightleftharpoons 2C$
 למכל התגובה הוכנסו 100 מול A ו-90 מול B. עם תום התגובה ולאחר ההפרדה נמצא כי התקבלו 120 מול C ונותרו, בין היתר, 10 מול B שלא הגיבו.
 i חישוב % ההמרה.
 אחוז ההמרה, מחושב לפי מספר מולים של B, שהוא המגיב הנמצא בכמות המגבילה.
 השתתפו בתגובה 80 מול B ולכן:

$$\% \text{ ההמרה} = \frac{80 \text{ מול}}{90 \text{ מול}} \times 100 = 88.9\%$$

ii חישוב % הניצולת.
 אילו היו מגיבים 80 מול B היו צריכים להתקבל 160 מול C. מכיוון שהתקבלו רק 120 מול C, אחוז הניצולת הוא:

$$\% \text{ הניצולת} = \frac{120 \text{ מול}}{160 \text{ מול}} \times 100 = 75\%$$

ג. במכל התגובה מתרחשת התגובה המבוקשת: $A + B \rightarrow 2C$ עבורה $K > 10^{10}$.
 בתנאים מסויימים עלולה להתרחש גם התגובה המתחרה: $A + B \rightarrow 2D$ שגם עבורה $K > 10^{10}$.
 כאשר הכניסו למכל התגובה 100 מול A ו-100 מול B התקבלו 160 מול C וכמו כן 40 מול D. מהו אחוז הניצולת בתגובה?
 אם הניצולת היתה 100% היו צריכים להתקבל 200 מול C. מכיוון שהתרחש כאן תהליך מתחרה התקבלו רק 160 מול C ואחוז הניצולת הוא:

$$\% \text{ הניצולת} = \frac{120 \text{ מול}}{160 \text{ מול}} \times 100 = 80\%$$

נספח ב'

דף מידע בטיחותי – ברום



דף מידע

החומר: ברום		Br ₂ Bromine		קוד פעילת חרום 2XE	קב סיכון קוד סיכון מס' אר"ם – 1744
7726-95-6					
1	תאור החומר	נוזל מעשן בעל צבע חום אדמדם המעלה אדים צהובים-חומים בעלי ריח צורב אופייני.			
2	מכונות פזיקליות	מצב צבירה ב-20°C: נוזל צפיפות: 3.12 נקודת חמצת: -7.3°C נקודת תיתחת: 58.8°C מסיסות במים: אינו מסיס, שוקע			
3	תגובות מסוכנות/סיכונים מיוחדים	☐ ברום יבש מגיב בחזקה עם מתכות רבות. ☐ בנכחות מים מגיב בחזקה עם פטלים, אמינים, תחמוצות אורגניות, תחמוצות אורגניות, וקטונים אדומטיים ואליפטיים.			
4	סיכונים אש/פיצוץ	☐ נולד מעשן זה עלול להדליק חומרים דליקים. ☐ נולד מעשן זה עלול להדליק חומרים דליקים.		נקודת הבזוקה: אין תחומי דליקות/פצצות באוויר: לא דליק נקודת התלקחות: לא מתלקח	
5	סיכונים בריאותיים/עקב חשיפה לחומר	☐ גורם לכוויות בעור, בעיניים ובקמחות ריריות. ☐ סימני התרעלה: ☐ במקרה של נשימה – גירוי חזק של האף והלוע, שיעול, דימום מהאף, סתירות וכאבי ראש. כעבור מספר שעות כאבי בטן ושילשולים ולפעמים פריחה בעור. במקרים חמורים – קשיי נשימה, נחלון והלם. ☐ במקרה של בליעה – כמו במקרה של נשימה.			
6	ציוד מגן אישי	מגפיים כפפות לאומדן בגד פורסי מסכת פנים			
7	הוראות אחסון	יש לאחסן במכלים המיועדים לכך, הרחוק מנקורות הצתה וחומרים דליקים ובנפרד מחומרים בלתי מתאימים (ראה סעיף 3 דלעיל).			

הוראות לטיפול במקרה חרום

האירוע	אמצעי עזר		דרך הטיפול
	ציוד מגן	אמצעים נוספים	
דליפה/שפיכת	– חליפה אטומה + מ"פ אינטגרלי – סיד – אמוניה גזית – קע וסות לחץ – מים	☐ ברום נוזלי: יש לכסות הנוזל בסיד ולהרטיב בדס דק של מים. יש לערבב כדי להבטיח ניטרול הכרום בשכבה התחתונה עד תום. ☐ אדי ברום: יש לנטרל באמוניה גזית בלחץ נמוך ובכמויות קטנות. יש למנוע כניסת זרם של אמוניה גזית או נוזלית לתוך ברום נוזלי.	
שריפה	– מ"פ – בגד אלומיניום	מ"פ אבק מ"פ מ"פ אזהרה: החומר אינו דליק. אזהרה: החומר אינו דליק.	
עורה ראשונה במקרה של מגיעה באדם	☐ מגיעה בעור – שטוף במים זורמים תוך כדי הסרת בגדים ונעליים ספוגים. המשיך לרחוץ בהרבה במים במשך 20 דקות לפחות. ☐ מגיעה בעיניים – שטוף מיד במים זורמים, במשך 20 דקות לפחות, תוך מישוק העפעפים. ☐ מגיעה בדרכי הנשימה – הרחק את הנפגע מהאזור המזוהם, השכב אותו באוויר חצו ודאג לשמור על חום ושקט. בצע הנשמה מלאכותית במידת הצורך ודאג מיד לעזרה רפואית. ☐ מגיעה עקב בליעה – שטוף היטב את הפה בהרבה מים ותן מים לשתייה. דאג מיד לעזרה רפואית.	שטוף במים זורמים תוך כדי הסרת בגדים ונעליים ספוגים. המשיך לרחוץ בהרבה במים במשך 20 דקות לפחות. שטוף מיד במים זורמים, במשך 20 דקות לפחות, תוך מישוק העפעפים. הרחק את הנפגע מהאזור המזוהם, השכב אותו באוויר חצו ודאג לשמור על חום ושקט. בצע הנשמה מלאכותית במידת הצורך ודאג מיד לעזרה רפואית. שטוף היטב את הפה בהרבה מים ותן מים לשתייה. דאג מיד לעזרה רפואית.	אין לתת שתיה לנפגע חסר הכרה!!

מדיד אקולוגי ראה מעבר לדף 20 IS-8740

תאריך עדכון: פברואר 1997

כאמור חלק מתהליכי הייצור בקבוצת הברום רשום כפטנטים. מהו פטנט? מה חשיבותו? במה כרוך תהליך רישום הפטנט? על שאלות אלו נשתדל לענות בשורות הבאות.

פטנט הוא זכות בלעדית הניתנת לממציא כדי למנוע מכל אדם זולתו להשתמש באמצאה שלא כדין. בעל הפטנט מקבל מהרשות הממשלתית (רשם הפטנטים) תעודה רשמית המעידה על בעלותו על הפטנט ומקנה את הזכות למנוע מאחרים כל שימוש באמצאה למטרות מסחריות כלשהן. יחד עם זאת בעל הפטנט אינו יכול למנוע שימוש כלשהו אחר כמו למשל לצורכי מחקר.

הפטנט הוא רכושו של בעליו והוא יכול לעשות בו עסקות קנין שונות כמו: מכירה, הורשה, העברת תמלוגים וכו'. תוקף הפטנט הוא עשרים שנה מתאריך הגשת הבקשה לרשם הפטנטים (שייד למשרד המשפטים). בתום תקופה זו האמצאה הופכת לנחלת הכלל וכל אדם רשאי להשתמש בה.

הפטנט חייב למלא אחר הדרישות הבאות:

לעסוק בתחום המדע והטכנולוגיה ולהיות מועיל ובר יישום מעשי.

להוות התקדמות המצאתית ולא לסתור את חוקי הטבע.

להוות חידוש משמעותי ולא פיתוח מובן מאליו (על-פי מדדים של בעל מקצוע ממוצע באותו תחום).

אסור שיפורסם בכל צורה שהיא לפני הגשתו (הרצאה, מאמר, דיון, כתבה וכיוצא בזה). כל בקשה לפטנט חייבת לכלול תיאור מפורט של: הידע הקודם להמצאה, ההמצאה עצמה והיקף ההגנה המבוקש.

חשוב לציין כי אישור הפטנט על-ידי הרשויות אינו מהווה היתר לכך שהממציא יכול לייצר ולשווק את המצאתו. לשם כך עליו לקבל אישור מיוחד מהרשויות המתאימות (למשל: עבור תרופות יש לקבל אישור ממשרד הבריאות). תהליך אישור הפטנט הוא לעיתים ממושך ויכול להמשך כשנה או יותר¹. לעיתים נערכים מאבקים משפטיים על הזכות לפטנט כאשר מפתחים שונים טוענים לבעלות על אותה המצאה. מספר הבקשות לפטנטים הוא רב מאד ורק חלק מהן זוכות לאישור.

1 הערה: לעיון נוסף ולהרחבה קרא בקשר הכימי, כרך 8, מס' 3, תשמ"ד פטנטים בתחום הכימיה: סיפורה של בקשה 49686 מאת יואל צור ומאיר נועם.

