הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
המחלקה להוראת הטכנולוגיה והמדעים
קבוצת הכימיה

מטה מל"מ
המרכז הישראלי לחינוך מדעי טכנולוגי
על שם עמוס דה-שליט

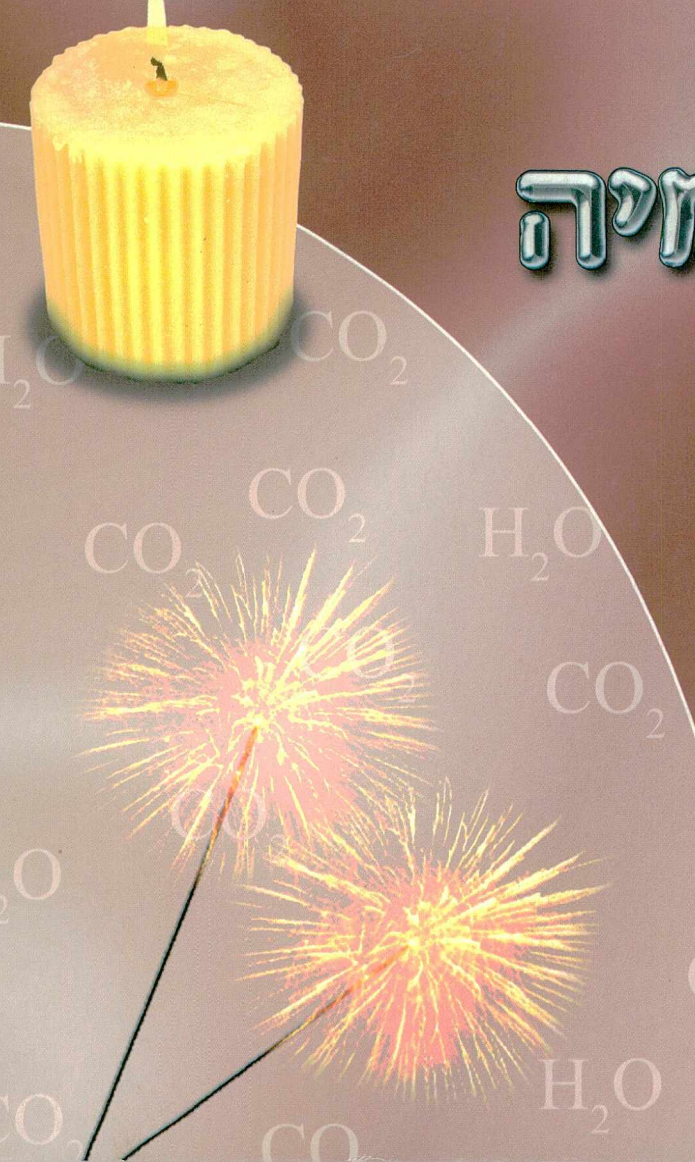
משרד החינוך
המזכירות הפדגוגית
האגף לתכנון ולפיתוח תוכניות לימודים

אנרגיה בקצב הכימיה

ד"ר מרים כרמי
אדית וייסלברג

ראש הפרוייקט:
פרופ. יהודית דורי

ייעוץ מדעי:
פרופ. נעם אדיר
פרופ. אלי קולודני



הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
המחלקה להוראת הטכנולוגיה והמדעים
קבוצת הכימיה

מטה מל"מ
המרכז הישראלי לחינוך מדעי טכנולוגי
על-שם עמוס דה-שליט

משרד החינוך
האגף לתכנון ולפיתוח תוכניות לימודים

אנרגיה בקצב הכימיה

ד"ר מרים כרמי
אדית וייסלברג

ראש הפרויקט: פרופ. יהודית דורי
ייעוץ מדעי: פרופ. נעם אדיר
פרופ. אלי קולודני

עריכה לשונית:

אבשלום גינוסר

עיצוב וגרפיקה:

נועם שושן

עיצוב כריכה ואיורים:

טל הרשקוביץ

עריכה:

ד"ר מרים כרמי

אדית וייסלברג

שותף בהוצאה לאור: יואל אייזנברג, הוצאת אח

©

כל הזכויות שמורות, משרד החינוך

אין לשכפל, להעתיק, לצלם, להקליט, לתרגם, לאכסן 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 מהמחברים.

מהדורה ראשונה ספטמבר 2007

אישור מס' 4184

ברצוננו להודות:

- למורות לכימיה אשר לקחו חלק בסדנת חשיבה לקראת כתיבת היחידה: **אהרוני הדס** (הגמנסיה העברית "הרצליה", תל אביב); **גורליק אלנה**, **רן עירית** (תיכון חוגים - חיפה); **יערים רונית** (תיכון יגור); **שטנגר רותי** (תיכון עירוני ג', חיפה).

- למורות לכימיה אשר קראו את פרקי היחידה והעירו הערות חשובות: **אהרוני הדס**, **רן עירית**, **גורליק אלנה ושטנגר רותי**.

- **לד"ר ניצה ברנע** מפמ"ר הוראת הכימיה, משרד החינוך, על תמיכתה ועידודה במהלך הכתיבה והיישום של היחידה.

- **לד"ר רחל טסה** מפקחת על תחום הכימיה, האגף לתוכניות לימודים, משרד החינוך, על העידוד, הקריאה וההארות החשובות.

- **לד"ר אורית הרשקוביץ** אשר קראה והעירה הערות בונות במהלך הכתיבה ובמהלך העיצוב הסופי של הספר.

- **לד"ר דליה עובדיהו** (תיכון הראל, מבשרת ציון) החלוצה שהחלה בהפעלת היחידה בכיתתה, על הערותיה והארותיה החשובות.

- **לד"ר איתן קריין**, חמד"ע, ת"א, אשר קרא, העיר, האיר, ועזר למקד ולהבהיר מושגים רבים.

- **ליוסף ליבנה** אשר קרא והעשיר את הספר בהערותיו המשמעותיות.

- **לד"ר דליה צ'סנובסקי ולעדנה פרידמן** אשר קראו והעירו.

למורים הנסיינים של התוכנית החדשה אשר לימדו את היחידה בכיתותיהם בשנה"ל תשס"ז ותרמו בהערותיהם לשיפור המהדורה הניסויית: **אברג'יל שירלי**, **ארז לבנת**, **אלוש אמירה**, **בר דורית**, **יונתן משה**, **יקנה אושרית**, **כהן עדנה**, **ד"ר ליפשיץ אלה**, **פייס רונית**, **פרחי חגית**, **פרידמן אורנה**, **ד"ר צ'רקי דורותה**, **קדמי ירדן**, **קינן סילבי**, **ד"ר רווה אוסנת**, **שיינפלד עדינה**, **תמיר מירה ותמם נאווה**.

- למורי הכימיה אשר השתתפו בהשתלמויות על היחידה, על הערותיהם ושאלותיהם אשר האירו ותרמו לעיצוב הסופי של היחידה.

- ללבורנטיות **אביבה ברנס**, הגמנסיה העברית "הרצליה" ו**לנה מרגוליין**, תיכון עירוני ד', תל אביב, על עזרתן בביצוע ובצילום ניסויים.

תוכן העניינים

פרק א - אנרגיה וקצב בתגובות כימיות - מה ואיך?

מבוא 8
אנרגיה - מושגים בסיסים 11
אנרגיה, טמפרטורה ומה שביניהן 18
סיכום ביניים ראשון 24
שאלות 25
מעברי אנרגיה 27
שינויי אנתלפיה בתגובות כימיות 33
סיכום ביניים שני 37
רמות ההבנה בכימיה 38
שאלות 40
בקצב התגובות 43
פעילות לסיכום הפרק 46

פרק ב - שינויי אנרגיה בתגובות כימיות - כמה?

מבוא 48
חישוב השינוי באנתלפיה התקנית של תגובה בעזרת חוק הס 50
שינויי אנתלפיה במהלך שינויים במצב הצבירה של חומרים 56
חישוב השינוי באנתלפיה התקנית של תגובה בעזרת אנתלפיות קשר 58
חישוב השינוי באנתלפיית תגובה באופן ניסוי 68
חישוב השינוי באנתלפיה התקנית של תגובה בעזרת אנתלפיות התהוות (העשרה) .. 74
שאלות לסיכום פרקים א ו-ב 77

פרק ג - מקצב תגובות ועד לשיווי משקל כימי - מה ואיך?

מבוא 80
קצב תגובה 81
הגורמים המשפיעים על קצב תגובה 85
אנרגיית שפעול וקצב תגובות 99
מודל ההתנגשויות בין חלקיקים 100

הסבר תלות קצב התגובה בטמפרטורה 102
סיכום ביניים ראשון 104
שאלות 105
זרזים 107
מנגנון תגובה 111
סיכום ביניים שני 114
שאלות 114
הצגת מצב של שיווי משקל כימי 115
קבוע שיווי משקל 121
שאלות סיכום 125

פרק ג - שינוי התנאים במערכת שיווי משקל - עד כמה זה משפיע?

מבוא 128
כיצד מחשבים את ערכו של קבוע שיווי משקל 128
תלות ערכו של קבוע שיווי משקל בניסוח התגובה 136
מנת ריכוזים 137
שינוי התנאים במערכת שיווי משקל 139
סיכום: שינוי התנאים במערכת שיווי משקל 149
שאלות בנושא שיווי משקל 151
שאלות לסיכום פרקים ג ו-ד 153

פרק ה - מדוע מתרחשות תגובות כימיות?

מבוא 156
ספונטניות 156
אנטרופיה ומשמעותה 158
פעילות סיכום לפרק ולספר 168
שאלות לסיכום הפרק והספר 169

תשובות לשאלות כמותיות בספר 170
רשימת מקורות 173
הטבלה המחזורית של היסודות 175

הקדמה

ספר הלימוד שלפניכם, "אנרגיה בקצב הכימיה", עוסק בהיבטים אנרגטיים ודינמיים של תגובות כימיות. הספר עוסק בהיבטים אנרגטיים הקשורים לפליטה או לקליטה של אנרגיה במהלך התרחשותם של שינויים בחומרים וכן בהיבטים דינמיים הקשורים לקצב התרחשותן של תגובות ולאופן התחלתן. במהלך הלימוד, נכיר את המצב הייחודי של תגובות שיווי משקל וגם נבין מהם החוקים והעקרונות על פיהם מתרחשות תגובות כימיות בכלל.

המושגים הכלולים בספר יאפשרו הבנה טובה יותר של תופעות יומיומיות מוכרות. אנו מקוות, כי הבנת הקשר בין המושגים הנלמדים לבין תופעות מוכרות מחיי היום-יום, תציג את הקשר שבין הכימיה לבין תחומים רבים בחיינו ותעורר את העניין להעמיק ולהרחיב את הידע המדעי-הכימי.

הספר כולל ניסויים רבים, אשר ביצועם יאפשר הבנה ולימוד של תכנים שונים מחד, ופיתוח מיומנויות חקר מאידך. ההתנסות בביצוע הניסויים תאפשר המחשה של התכנים הנלמדים, תוך הבנת משמעותה של הכימיה כמדע מדויק וניסוי.

יחידת הלימוד משלבת הכרת מושגים מדעיים חדשים עם פיתוח מיומנויות חשיבה שונות, שיאפשרו לכם העמקה והתמודדות עם המשך לימודי הכימיה. מיומנויות החשיבה מבוססות על ארבע רמות הבנה של הכימיה ועל מעבר בין ייצוגים שונים, כמו מעבר בין ייצוג חזותי למילולי או בין חזותי לכמותי, וכן שרטוט והבנה של גרפים.

בספר שזורים קטעי קריאה רבים, המרחיבים ומעשירים את החומר הנלמד. הם נועדו להגביר את העניין בלמידה, להרחיב את האופקים ולשמש נקודות התחלה ללימוד וחקר של נושאים חדשים.

בספר תמצאו שאלות רבות מאוד וכן דוגמאות פתורות רבות. השאלות נועדו לבדיקת ההבנה של המושגים הנלמדים, לתרגול, ולהתמודדות עם החומר הנלמד. בסוף הספר תמצאו פתרונות לשאלות הכמותיות.

מקוות שיהיה לכם מאתגר, מעניין וחווייתי

מרים, אדית, ויהודית

פרק א

אנרגיה וקצב בתגובות כימיות - מה ואיך?

- מהי אנרגיה?
- מהם מקורות אנרגיה? מהם מקורות אנרגיה חלופיים?
- כיצד קשור המושג אנרגיה אלי באופן אישי ולחברה בה אני חי?
- כיצד מבחינים במעברי אנרגיה?
- כיצד קשורה אנרגיה לתגובות כימיות?
- כיצד תלויה התחלתה של תגובה באנרגיה?

על שאלות אלו ועל שאלות רבות אחרות תוכלו לענות

לאחר לימוד הפרק הראשון

מבוא

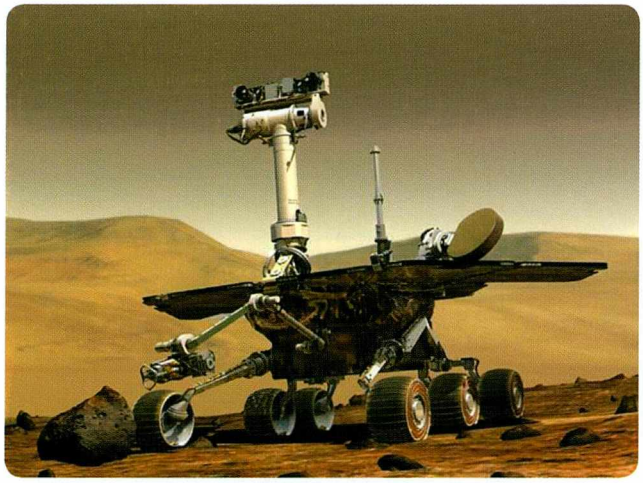
תופעות טבע שונות המתרחשות על פני כדור הארץ, כגון סופות ברקים, התפרצויות הרי געש, גלי צונאמי או שריפת יערות, הן ביטויים שונים לשיחרור אנרגיה. מעברי אנרגיה אלו באים לידי ביטוי בפליטה של גלי הדף ולהבות אש, הגורמים לחימום הסביבה, וכן באור, ובקול.

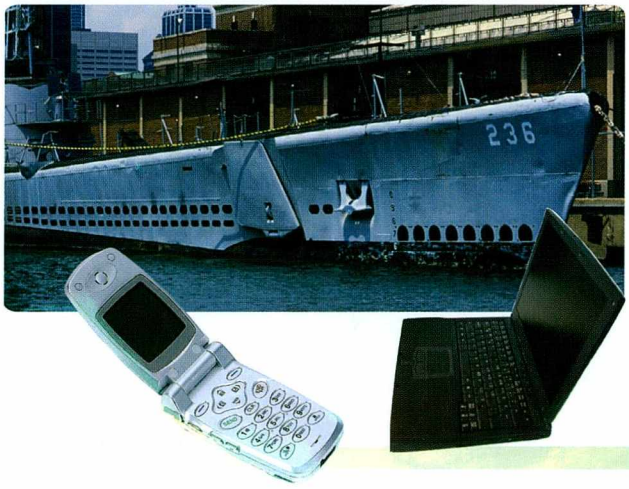
מאז ומתמיד, הייתה התקדמות האנושות תלויה במקורות האנרגיה שעמדו לרשותה ובידע אשר איפשר את ניצולם של מקורות אלו. שריפת יערות התרחשה גם בתקופה קדומה ביותר, אולם השליטה באש, שהחלה בשמירה על אש שמקורה טבעי שלא תכבה והמשיכה במציאת דרכים להדלקת אש, היוותה נקודת מפנה בהתפתחות האדם. מאז "גילוי" האש, מחפש האדם דרכים חדשות לניצול ולשימוש במקורות האנרגיה העומדים לרשותו.

בימינו, האדם המודרני נעזר במוצרים מגוונים, אשר נועדו לרווחתנו והעושים שימוש מושכל במקורות אנרגיה שונים. הנה כמה דוגמאות לשימוש באנרגיה בחברה המודרנית: טלפונים סלולאריים ומכשירי מיקרו גל העושים שימוש באנרגיית קרינה, מחשבים ניידים העושים שימוש באנרגיה שמקורה בסוללות, צוללות השוהות מתחת למים מספר רב של חודשים בזכות ניצול אנרגיה שמקורה בגרעיני האטום, ורובוטי מחקר המשוטטים ואוספים נתונים על פני כוכב הלכת מאדים תוך ניצול אנרגיית הקרינה של השמש.

שימוש במקור אנרגיה:

בזמן קדום ← בימינו





מושג **האנרגיה** הוא מרכזי להבנת תופעות רבות המתרחשות בחיי היום יום, הן ברמה החברתית והן ברמה האישית (כגון הבנת התהליכים המתקיימים בגופנו), ולכן מקומו בתחומי המדעים השונים, כפי שבוודאי למדתם בשיעורי המדע, הוא חשוב ביותר.

הפרק שלפניכם מתאר את ההיבטים האנרגטיים ומקצת הקינטיים (הקשורים לקצב התגובה), שיש לקחת בחשבון בעת חקירת התרחשותן של תגובות כימיות.

פעילות 1

קראו את הקטע הבא:

"....מאז שנות השישים, כמות האנרגיה שהאנושות צורכת מכפילה את עצמה בכל עשור. למשל, ארה"ב, שבה חיים כ-6% מאוכלוסיית העולם, צורכת כ-25% מהאנרגיה המיוצרת בעולם, יותר מהודו וסין, שבשתיהן יחד חיים כ-30% מאוכלוסיית העולם. תיעושן של השתיים הוא גורם נוסף בזיהום וניצול הדלקים באופן מהיר מן הצפוי. דבר זה מחזק את החשיבות שיש לתת למקורות אנרגיה חלופיים. חלק מהמומחים בעולם מאמינים, כי הצורך המיידי בחיפוש אחר מקורות אנרגיה מתחדשים, שאינם מתכלים, חשוב לא פחות מהמלחמה בטרור העולמי ואולי אף יותר מכך". עיתון "הארץ", 20.11.2005 . מתוך: "הדור הבא של מקורות האנרגיה", שרון קדמי.

שאלות למחשבה ולדיון בעקבות הקריאה:

- מהי הבעיה המועלית בקטע הנ"ל?
- מהי ההצעה המועלית לפיתרון הבעיה הנ"ל?
- חשבו על פעולותיכם במהלך היום, אלו מהן קשורות לצריכת אנרגיה?
- אלו תופעות הקשורות לאנרגיה נגרמות על ידי תגובות כימיות?

ניסוי 1 - ניסוי עם זיקוקים

חומרים וציוד לכל קבוצת תלמידים או להדגמה

זיקוק קטן (של יום הולדת), קופסת גפרורים, משקפי מגן.

מהלך הניסוי

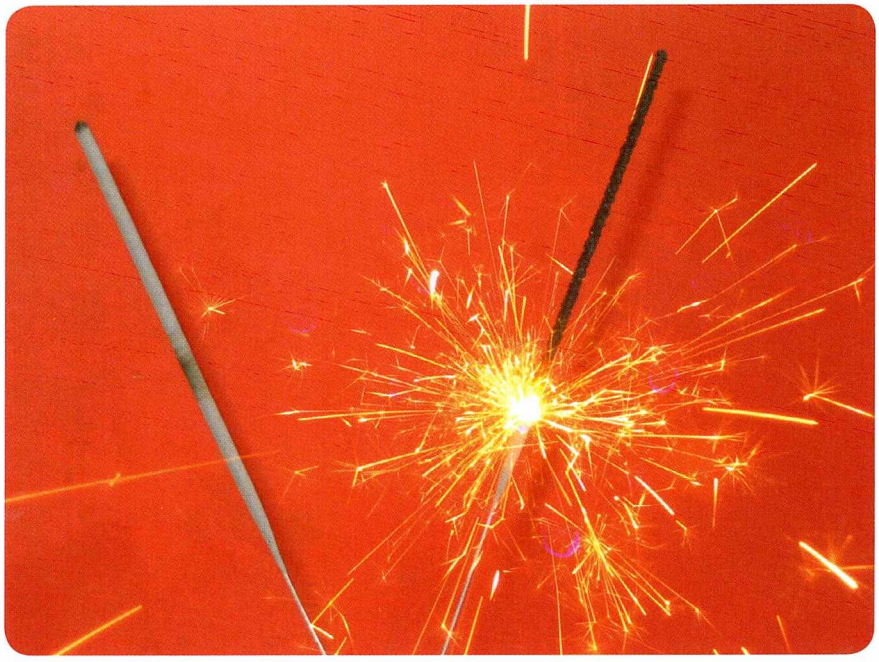
1. שלב התחלתי - תארו את הזיקוק שקיבלתם.
2. שלב **הדלקת** הזיקוק- הדליקו גפרור וקרבו אותו אל קצה הזיקוק.
   מדדו את משך הזמן בשניות מרגע נגיעת הגפרור בזיקוק ועד אשר הוא נדלק.
3. שלב **בעירת** הזיקוק - תארו את תצפיותיכם במהלך בעירת הזיקוק ומדדו את משך זמן הבעירה של הזיקוק.
4. שלב סופי - תארו את הזיקוק בתום הבעירה.

שאלות בסקבות הניסוי

1. כמה זמן עבר מקירוב הגפרור הבוער ועד להדלקת הזיקוק?
2. מהו משך הבעירה של הזיקוק?
3. האם במהלך בעירת הזיקוק נפלטת אנרגיה או מושקעת אנרגיה?
4. אם אכן נפלטה אנרגיה במהלך בעירת הזיקוק, מהו מקורה?
5. מדוע יש צורך לקרב גפרור בוער לזיקוק על מנת להדליקו?
6. מדוע נמשכת שריפת הזיקוק לאחר שהחלה?
7. מה תוכלו לומר על קצב הבעירה, האם היא איטית או מהירה?
8. אלו שאלות מהנ"ל מתייחסות לשלב הדלקת הזיקוק ואלו לשלב בעירת הזיקוק?
9. האם אתם יכולים לענות על כל השאלות?
10. אלו שאלות נוספות הקשורות לניסוי עולות בדעתכם? רשמו אותן.

בוודאי גיליתם, כי לחלק מהשאלות עדיין אין לכם תשובה. יתכן גם שתתעורר מחלוקת בכיתה לגבי תשובות לחלק מהשאלות. מטרת היחידה שלפניכם היא לימוד ודיון במושגים הקשורים להיבטי אנרגיה שונים במהלך תגובות כימיות, כגון אלו הבאים לידי ביטוי בזמן בעירת הזיקוק. הדיונים והלימוד במהלך היחידה יאפשרו לכם בסופה לחזור אל השאלות הללו ולתת להן מענה מלא.

זיקוק לפני ואחרי בעירה



אנרגיה - מושגים בסיסים

פסק זמן לחשיבה

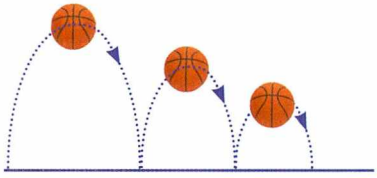
1. מהו הגיל שלכם?
2. מהו הגובה שלכם?
3. מהי מידת הנעליים שאתם נועלים?
4. כמה אנרגיה יש לכם?
5. מהי המסה שלכם?
6. האם אתם יכולים לענות על כל השאלות? מדוע?

מהי אנרגיה?

האנרגיה של מערכת (גוף כגון כדור או חומר כגון מים) היא גודל שאינו ניתן למדידה פשוטה וישירה על ידי החושים, אך זהו גודל המאפיין תכונה חשובה של מערכת. אין מכשיר המאפשר מדידת אנרגיה של חומר מסוים כפי שמודדים גדלים אחרים הקשורים לחומר או לגוף, כגון מסה או אורך. הבנתנו את מושג האנרגיה מתבססת בעיקר על הבנת מעברי אנרגיה המלווים תופעות רבות.

יש המגדירים אנרגיה **כיכולת לבצע עבודה.** עבודה מוגדרת כמכפלת כוח בדרך שלאורכה הוא מופעל ולכן ניתן לומר, כי אם לחומר יש אנרגיה יש לו יכולת לבצע עבודה. מקור המילה אנרגיה הוא מלטינית ומשמעותה "עבודה מבפנים".

יש המגדירים אנרגיה **כיכולת לספק חום**. חום היא דרך להעברת אנרגיה בין גופים או חומרים בעלי טמפרטורה שונה וכן במהלך התרחשות של תגובה כימית. מבחינה מדעית, עדיף השימוש בשם הפעולה - חימום, במקום השימוש במילה חום, שהיא שם עצם. חימום של מערכת הוא דרך להעברת אנרגיה אל המערכת, דבר העשוי לגרום בה לשינויים כגון שינויים במצבי צבירה או בהרכב החומרים.



בשיעורי הפיזיקה אולי למדתם על האנרגיה של **גופים גדולים**.
כשדנים בגופים אלה מקובל להבדיל בין שני סוגים בסיסים של אנרגיה: אנרגיה קינטית ואנרגיה פוטנציאלית.

אנרגיה קינטית היא אנרגיית התנועה של הגוף כולו והיא תלויה במסתו ובמהירותו של הגוף. לדוגמה, אנרגיה קינטית של כדור בתנועה.

האנרגיה הפוטנציאלית של גוף תלויה במיקומו ובכוחות הפועלים עליו. לדוגמה, כשגוף מצוי בגובה מסוים מעל פני כדור הארץ יש לו אנרגיה פוטנציאלית גבוהה יותר מגוף הנמצא נמוך יותר. דוגמה נוספת, לקפיץ מתוח יש אנרגיה פוטנציאלית גבוהה יותר מאשר לקפיץ רפוי.

איך מתרגמים את המושגים האלה לעולם **החלקיקים** המעניין את הכימאים?

מוקד העניין שלנו בכימיה הוא החומר, כלומר מדגם של חלקיקים, ולכן נדון בסוגי האנרגיה הקיימים בו. נתייחס בדיוננו אל חומרים מולקולריים, בהם קיימים קשרים קוולנטים בין האטומים ואינטראקציות בין מולקולות.

אם ניקח כמות מסוימת של חומר, בכל מצב צבירה, המכיל כמות מסוימת של חלקיקים, נוכל לומר

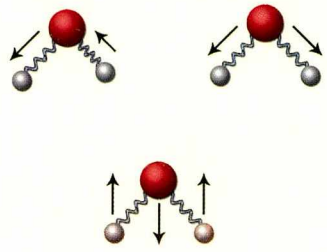
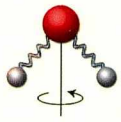
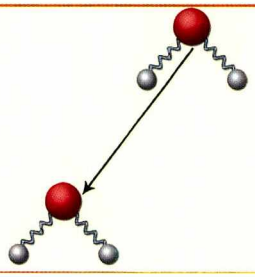
כי יש לו אנרגיה הנקראת **אנרגיה פנימית**. מבחינים בין שני סוגים של אנרגיה הכלולים באנרגיה פנימית: **אנרגיה קינטית** (אנרגיית תנועה) **ואנרגיה פוטנציאלית** (אנרגיה אצורה).

אנרגיה קינטית נובעת מתנועתם של החלקיקים, כגון מולקולות של חומר במצב גזי בכלי סגור. המולקולות נעות באופן אקראי ובעת התנגשותן זו בזו, מועברת אנרגיה ביניהן. על פי המודל הגזי, האנרגיה הקינטית של מולקולה במצב גזי נקבעת על ידי מסת המולקולה (m) ומהירותה (v).

ניתן להתייחס לאנרגיה קינטית כוללת של מדגם חלקיקים כשווה לסך-כל האנרגיה הקינטית של כל החלקיקים במדגם. היות ובמדגם גזי יש לחלקיקים מהירויות שונות, נוכל להתייחס גם לאנרגיה קינטית **ממוצעת** של החלקיקים. נמצא, כי האנרגיה הקינטית הממוצעת של מדגם חלקיקים באה לידי ביטוי בטמפרטורה הנמדדת של אותו מדגם.

לחלקיקים המרכיבים כל חומר יש אפשרויות תנועה שונות. הטבלה הבאה מראה את סוגי התנועה השונים של החלקיקים במצבי צבירה שונים.

אופני התנועה הקיימים בחומר

סוג התנועה	תיאור	ייצוג סוג התנועה של מולקולת H_2O	סוגי תנועה במצבי צבירה
תנודה (ויברציה)	בחומר מולקולרי האטומים במולקולות מתקרבים ומתרחקים אחד מהשני[1] בסריג אטומרי האטומים נדים במקום		קיים במוצק, בנוזל ובגז
סיבוב (רוטציה)	סיבוב המולקולה סביב צירי סיבוב[2]		קיים בנוזל ובגז
מעתק (טרנסלציה)	תזוזת מרכז המולקולה במרחב[3]		קיים בגז ובמידה מוגבלת בנוזל

1 מבחינים בתנודות סימטריות, אסימטריות וכיפוף.

2 למולקולה קווית 2 צירי סבוב ולמולקולה שאינה קווית 3 צירי סבוב (z,y,x)

3 תיאור המיקום ייעשה ע"י ציון 3 קואורדינטות (z,y,x)

בנוסף לאנרגיה הקינטית, יש לחומר **אנרגיה פוטנציאלית (אנרגיה אצורה).** האנרגיה הפוטנציאלית של מדגם חלקיקים נובעת מכוחות המשיכה והדחייה בין החלקיקים המרכיבים אותו. כוחות אלו מהווים את סך האינטראקציות בין המולקולות, אינטראקציות בין אטומים, ואינטראקציות בין האלקטרונים לבין גרעין האטום. ככל שבמדגם יש מספר חלקיקים רב יותר, גם מספר האינטראקציות המתקיימות גדול יותר, והאנרגיה הדרושה להפרדה מוחלטת של החלקיקים גדולה יותר.

לדעת יותר על אנרגיה פוטנציאלית

אנרגיה פוטנציאלית היא גודל יחסי הנקבע על פי הכוחות הפועלים על הגוף או החלקיק. מתייחסים לאנרגיה פוטנציאלית של מצב נתון יחסית למצב אחר בו כוחות אלו אינם פועלים. כאשר דנים בחלקיקים המהווים את החומר, כוחות המשיכה והדחייה הם חשמליים ומשווים בין מצב בו כלל אין משיכה בין החלקיקים לבין מצב בו מתקיימות אינטראקציות בין החלקיקים. נתייחס למולקולה דו אטומית. במצב בו כלל אין כוחות משיכה או דחייה בין האטומים, האנרגיה הפוטנציאלית מוגדרת כאפס, ואילו במצב בו כוחות המשיכה והדחייה בין האטומים שווים אלו לאלו (כלומר מתקיים קשר בין האטומים), האנרגיה הפוטנציאלית של המולקולה נמוכה יותר. ככל שהאנרגיה של המולקולה נמוכה יותר, דרושה אנרגיה רבה יותר על מנת לפרקה לאטומים בודדים, ולכן נהוג לומר, כי האנרגיה הפוטנציאלית של המולקולה גדולה יותר (בערך מוחלט).

כל האנרגיה בחומר - האנרגיה הפוטנציאלית והאנרגיה הקינטית - נקראת האנרגיה הפנימית של החומר.

האנרגיה של מערכת היא גודל המאפיין מצב נתון ואין זה משנה כיצד הגיעה המערכת למצב זה. לדוגמה, כמות נתונה של מים בטמפרטורה מסוימת מאופיינת על ידי אנרגיה מסוימת ואין זה משנה באיזו דרך הגיעו המים לאותה טמפרטורה.

פסק זמן לחשיבה

1. לאיזה מדגם מים יש אנרגיה פנימית גבוהה יותר: למול אחד של מים במצב גזי או לשני מול מים במצב גזי (באותה טמפרטורה)? מדוע?
2. א. מה תעשו על מנת להפוך קובייה של קרח לנוזל ולגז?

   ב. דרגו את החומרים: $H_2O_{(l)}$, $H_2O_{(s)}$, $H_2O_{(g)}$ לפי סדר עולה של אנרגיה פנימית.

   נמקו את דירוגכם.

פעילות העשרה: לדעת יותר על מקורות אנרגיה

קראו את הקטע וענו על השאלות

לחומרים שונים יש אנרגיה פנימית שונה. מה מקורה של אנרגיה זו? מקורות האנרגיה על פני כדור הארץ מבוססים על הכוחות הקיימים בו ועל החומרים המצויים והנוצרים בו מאז ומתמיד. הידע והיכולת של האדם לנצל מקורות אנרגיה אלו לתועלתו התפתחו במהלך ההיסטוריה וממשיכים להתפתח כל העת.

מקור האנרגיה העיקרי והראשוני המשפיע על חיינו על פני כדור הארץ הוא השמש. רוב מקורות האנרגיה המצויים כיום על פני כדור הארץ ואשר נעשה בהם שימוש, אינם אלא גילגול ותולדה של אנרגיה שמקורה בשמש.

השמש פולטת כמויות אדירות של אנרגיה, שרק חלק קטן ממנה (פחות ממיליארדית) מגיע לכדור הארץ. הצמחים "יודעים" כיצד לנצל חלק מאנרגיה זו וליצור תרכובות מורכבות מחומרים פשוטים, כגון פחמן דו חמצני ומים, בתהליך הפוטוסינטיזה. אנרגיית השמש נקלטת על ידי הצמחים ויוצרת תרכובות שונות הבונות אותם. התרכובות המורכבות, הנוצרות בתהליך הפוטוסינטיזה, כדוגמת מולקולות הגלוקוז $C_6H_{12}O_6$, מועברות דרך שרשרת המזון לבעלי החיים השונים. הצמחים ובעלי חיים אחרים מהווים את מזוננו ומספקים לגופנו את האנרגיה הדרושה לקיומו. צמחים אשר נרקבו בקרקע במשך מיליוני שנה לפני היות האדם, יצרו את הפחם, חומר המכיל אחוז גבוה של היסוד פחמן. השימוש בפחם, הניתן לניצול על ידי שריפתו, החל בתקופות קדומות מאוד ומהווה עד היום מקור אנרגיה עיקרי בתחנות כוח לייצור חשמל.

חלק מהאנרגיה המצויה בתרכובות הבונות את הצמחים ובעלי החיים, נצבר במשך השנים בתהליכים שונים במעמקי הים, בצורת נפט. מקור השם במילה השומרית "נפטן" שפירושו "מתלקח". השימוש בנפט הוא קדום מאוד אולם מאז התחילו בקידוחי נפט תעשייתיים (1848), מהווים הנפט ותוצריו מקור אנרגיה לשימושים רבים. בעת השריפה של תרכובות אלו, נפלטת חלק מהאנרגיה שהייתה בהן וגורמת להארה וחימום של הסביבה. תוצרי זיקוק הנפט הגולמי מהווים דלקים ששריפתם מניעה את כלי התחבורה של ימינו ומספקים אנרגיה לצרכי בישול (למשל הבנזין והבוטאן).

הצורך הגדל והולך של חברת השפע באנרגיה ושיקולים פוליטיים שונים, חייבו חיפוש מקורות אנרגיה חלופיים לנפט, המהווה מקור מתכלה, כיוון שהוא אינו נוצר מחדש במהלך תקופת חיינו. המחקר בתחום גרעין האטום איפשר את פיתוחם של כורים גרעינים, בהם מנצלים אנרגיה הקיימת בגרעיני אטומים. כיוון נוסף במחקר, הבוחן דרכים חדשות לניצול אנרגיה, הוא הרחבה ושכלול הניצול של פליטת אנרגיה שמקורה מהשמש הנחשבת כמקור אנרגיה שאינו תורם לזיהום הסביבה.

1. האם אתם מכירים מקורות אנרגיה נוספים בהם נעשה שימוש כיום? בחרו מקור אנרגיה שלא הוזכר בספר, וכתבו על השימוש בו: מתי החל, מהו מקור הרעיון, מהו עיקרון הפעולה, היכן משתמשים בו?
2. לשימוש במקורות אנרגיה שונים יש תרומה רבה לבעיות אקולוגיות שונות. התייחסו לטענה זו ובחנו כיצד השימוש במקורות אנרגיה שונים עלול לפגוע באיכות חיינו.

היעזרו ב:

http://science.cet.ac.il/science/electricity/energy/rolling.asp
http://index.ort.org.il/?Cat_Code=713940209
http://wis-wander.weizmann.ac.il/site/he/weizman.asp?pi=357

מערכת וסביבה

לא ניתן להבחין בעזרת החושים באנרגיה פנימית של חומרים או למדוד גודל זה בעזרת מכשירים, אולם ניתן להבחין במעברי אנרגיה שונים ולמדוד את גודלם. על מנת להבין כיצד מבחינים ומודדים את גודלם של מעברי האנרגיה, עלינו להגדיר שני מושגים: מערכת וסביבה.

מערכת היא אותו חלק ביקום שהוא מוקד התעניינותנו. מערכת יכולה להיות כלי ממשי, כגון כוס המכילה חומר, או חלק ביקום שאנחנו קבענו את גבולותיו. כל מה שאינו מוגדר כמערכת מוגדר כ**סביבה**. מבחינים בשלושה סוגים של מערכות:

מערכת פתוחה

לדוגמה: כוס זכוכית פתוחה המכילה קפה חם.

במערכת זו מתקיימים חילופי אנרגיה וחומר עם הסביבה: הקפה מתקרר (מאבד אנרגיה) בפרק זמן קצר, ואדי מים נפלטים לאוויר (יש איבוד חומר).

מערכת סגורה

לדוגמה: בקבוק זכוכית סגור עם פקק ובו קפה חם.

במערכת זו מתקיימים חילופי אנרגיה עם הסביבה, אך **אין** חילופי חומר. הקפה מתקרר (מאבד אנרגיה) בפרק זמן קצר, אך אדים לא יוצאים מהבקבוק.

מערכת מבודדת

לדוגמה: תרמוס סגור המכיל קפה חם.

אין חילופי אנרגיה (בטווח זמן מסוים, הקפה אינו מתקרר. אם הבידוד היה מושלם, הקפה לא היה מתקרר לעולם), ו**אין** חילופי חומר עם הסביבה, אדים אינם עוזבים את התרמוס.

מערכת וסביבה בתגובה כימית

המערכת מוגדרת על פי מוקד העניין שלנו וכוללת את המגיבים לפני התרחשות התגובה ואת החומרים החדשים, התוצרים, לאחר התרחשות התגובה. הדגש הוא על החלקיקים המרכיבים את המגיבים והתוצרים.

הסביבה מוגדרת כ"כל מה שאינו מערכת".

לדוגמה, נדון בתהליך המסת מוצק בנוזל, המתרחש בכלי זכוכית ומלווה בשינוי אנרגיה.

בעת המסת המוצק נתרן הידרוכסידי $NaOH_{(s)}$ במים, המוצק כביכול "נעלם" ויש תחושה כי הכוס מתחממת. היות ומוקד העניין שלנו הוא תהליך ההמסה, נוכל לומר כי המערכת כוללת את המוצק לפני התגובה ואת היונים הממוימים שלו אחרי ההמסה (התוצרים). רוב מולקולות המים שבכוס אינן חלק מהמערכת, אלא מהוות חלק מהסביבה. היות והתגובה התרחשה בכלי זכוכית שאינו מבודד, הרי שהסביבה כוללת מלבד הממס שלא השתתף בהמסה, את כוס הזכוכית, היד הנוגעת בו, האוויר מסביבו וכו'.

כאשר נחזור ונבצע את תהליך ההמסה בכלי מבודד, כגון בכוס העשויה קלקר, נוכל לטעון שהגדרת המערכת זהה, אולם בגלל בידוד הכלי, **הסביבה** היא כעת **מוגדרת** ומתייחסת לרוב מולקולות המים הנמצאות בתוך הכלי ואינן לוקחות חלק במיום היונים.

? היזכרו בשלב הבעירה של ניסוי הזיקוקים בתחילת הפרק. מהי המערכת ומהי הסביבה בניסוי זה? בבעירת הזיקוק, המערכת כוללת את מרכיבי הזיקוקים לפני הבעירה (המגיבים) ולאחריה (התוצרים). הסביבה, במקרה זה, אינה מוגדרת, כיוון שהיא כוללת את היד המחזיקה את הזיקוק, את חלל הכיתה בו התרחש הניסוי, ואת כל הכלים שנמצאים קרוב לזיקוק.

הרכיבו משקפי מגן והקפידו על חדר נקי

ניסוי 2 - מערכת וסביבה בתגובות

חומרים וציוד לכל קבוצת תלמידים או להדגמה

תמיסת $CuCl_{2(aq)}$ 0.5M, רדיד אלומיניום (ריבוע של 3×3 ס"מ), 10 גרם הידראט[1] באריום הידרוכסידי, $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O_{(s)}$, 20 גרם אמון תיוציאנאט $NH_4SCN_{(s)}$, 2 כוסות כימיות של 100 מ"ל, 2 מקלות זכוכית, 4 כוסות קלקר, 2 מכסים המתאימים לכוסות הקלקר.

מהלך הניסוי:

שלב א. לתוך כוס כימית בנפח 100 מ"ל, הכניסו 40 מ"ל תמיסה של נחושת כלורית $CuCl_{2(aq)}$ בריכוז 0.5M. הכניסו לתוך התמיסה את נייר האלומיניום וערבבו בעזרת מקל זכוכית. מהן תצפיותיכם במהלך הניסוי? געו בכוס. מהי תחושתכם?

שלב ב. לתוך כוס כימית בנפח 100 מ"ל, הכניסו כ-5 גרם הידראט של באריום הידרוכסידי $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O_{(s)}$ וכ-10 גרם של אמון תיוציאנאט $NH_4SCN_{(s)}$. ערבבו בעזרת מקל זכוכית וצפו במתרחש. געו בכוס. מהי תחושתכם?

שלב ג. חזרו על שלבי הניסוי א ו-ב, כאשר הפעם כל ניסוי מתבצע בתוך 2 כוסות קלקר המונחות אחת בתוך השנייה ומכוסות במכסה. געו בכל אחת מהכוסות במהלך הניסוי.

שאלות בסקבות ניסוי

1. סכמו את תצפיותיכם בכל אחד מהשלבים בניסוי.
2. סכמו את תחושותיכם בעת הנגיעה בכלי התגובה בכל שלב בניסוי.
3. הגדירו מערכת וסביבה לגבי כל אחד משלבי הניסוי.
4. התייחסו להיבט המיקרוסקופי (החלקיקי) והסבירו אלו חלקיקים מרכיבים את כל אחד מהחומרים בהם השתמשתם.
5. מהם ההבדלים בין שלב ג בניסוי לשלבים א ו-ב? רשמו מסקנותיכם מניסוי זה.

---

1 הידראט הוא תרכובת בה מולקולות מים כלואות בתוך גביש יוני. נוסחת ההידראט מציינת את היחס בין מול חומר יוני למול מולקולות המים. לדוגמה, נוסחת ההידראט של נחושת גפרתית היא $CuSO_4 \cdot 5H_2O$.

האנרגיה הפנימית של מערכת יכולה לעלות או לרדת כתוצאה ממעברי אנרגיה בין המערכת לסביבה. שינוי באנרגיה הפנימית של המערכת בא לידי ביטוי באחת, או בכמה צורות יחד, מבין הבאות: חימום (או קירור), ביצוע עבודה ופליטת קרינה אלקטרומגנטית.

הנה כמה דוגמאות לשינויים באנרגיה הפנימית של המערכת:

- מעבר אנרגיה הגורם לחימום - חימום מים הנמצאים בכלי המונח על כיריים דולקים.
- מעבר אנרגיה הגורם לקירור - קירור מים ע"י הכנסת קוביות קרח למים המצויים בטמפרטורת החדר בתוך תרמוס. אנרגיה מהמים מועברת להיתוך קוביות הקרח, ולכן המים מתקררים.
- מעבר אנרגיה הגורם לחימום וביצוע עבודה – מבחנה המכילה תמיסת חומצה מחוברת לבלון רפוי. הכנסת שבבי אבץ לתמיסת החומצה[1] גורמת לפליטת גז מימן, לחימום התמיסה ולניפוח הבלון (ביצוע עבודה).
- מעבר אנרגיה הגורם לפליטת קרינה - פליטת אור לבן ובוהק בעת שריפת מגנזיום.

? התייחסו לדוגמאות הנ"ל וציינו בכל מקרה מהי המערכת, מהו סוג המערכת, ומהי הסביבה.

חוק שימור האנרגיה

ניסויים רבים הראו, כי במעברי האנרגיה השונים, לא ניתן להפחית מכמות האנרגיה הכוללת או ליצור אנרגיה חדשה שלא הייתה קיימת קודם לכן. הדבר הביא לניסוח עיקרון הידוע בשם החוק הראשון של התרמודינמיקה,[2] או בשמו המוכר יותר – **חוק שימור האנרגיה**, הקובע כי:

האנרגיה הכללית של היקום היא ערך קבוע.

חוק זה ניתן ליישום גם **במערכת מבודדת וגם במערכת המוקפת סביבה מוגדרת**, כמו המערכת והסביבה בשלב ג של ניסוי 2 אשר ביצעתם קודם. בניסוי זה, כוס העשויה קלקר, שהוא חומר מבודד, יוצרת מעין "מיני יקום" המורכב ממערכת לצד סביבה מוגדרת. במיני יקום זה מתקיים חוק שימור האנרגיה, כלומר **אין שינוי באנרגיה הפנימית הכוללת**. אם מתרחש **שינוי באנרגיה** הפנימית של **המערכת**, הרי שהוא יהיה **זהה בגודלו אך הפוך בסימנו מהשינוי באנרגיה** הפנימית **של הסביבה** המוגדרת.

לדוגמה: קוביית קרח שהוכנסה למים קלטה אנרגיה באותה כמות שאותה איבדו המים שבכוס שאליה הוכנסה הקובייה.

זה דומה ל...

הבגדים שאינם בארון מפוזרים בחדר.

על מנת להבין את מעברי האנרגיה המתקיימים בעת התרחשות של תגובות כימיות, עלינו להבחין בין המושגים אנרגיה וטמפרטורה.

1 חומצה, חומר עליו תלמדו בפרקי הלימוד הבאים.

2 תרמודינמיקה – שם לענף בכימיה העוסק בשינויי אנרגיה הקשורים במספר גדול מאוד של חלקיקים. חוקי התרמודינמיקה הם בסיס להבנת מעברי אנרגיה והתרחשותן של תגובות.

משחר ילדותנו, אנו נחשפים לתופעות שונות הקשורות לתחושות חום וקור. הנה כמה דוגמאות: אנו יודעים להיזהר ממים רותחים; אנחנו לובשים סוודר "מחמם" כאשר קר לנו כי "מעלות החום" בחוץ ירדו; בימים "חמים" אנו מקפידים לסגור את הדלת של חדר ממוזג על מנת שה"קור לא ייצא"; לעיתים, כאשר אנו חשים ברע, מדידה מתאימה מראה כי טמפרטורת הגוף שלנו גבוהה מ-37 מעלות, ואז אנו אומרים כי יש לנו "חום".

כל הביטויים הנ"ל שגורים בפינו וקשורים לתחום האנרגיה, אולם הם פרי שימוש לא מדויק במושגים. בשימוש יום יומי, המילה "חום" משמשת לעתים מילה נרדפת ל"טמפרטורה" ולעתים מילה נרדפת ל"אנרגיה". בעבר, אף האמינו כי חום הוא חומר העשוי לעבור מגוף לגוף. במקביל, משתמשים במילה "קור" כדי לציין מצב בו יש חוסר באנרגיה.

בהקשר מדעי, רצוי לדבר על פעולת **החימום**, המהווה דרך להעברת אנרגיה ולא על "חום" כשם עצם.

נוכל להשתמש במילים קר וחם כדי לתאר **תחושות**, כאשר:

"קר" היא תחושה המתארת איבוד אנרגיה מהגוף, "חם" היא תחושה המתארת קבלת אנרגיה אל הגוף.

את השוני ואת הקשר שבין המושגים "אנרגיה" ו"טמפרטורה", נוכל להדגים בעזרת ניסויים.

ניסוי 3 - שב א- אנרגיה וטמפרטורה

חומרים וציוד לכל קבוצת תלמידים או להדגמה

שלוש כוסות כימיות בנפח 250 מ"ל מסומנות באותיות א,ב,ג, מי ברז, פלטת חימום, אמבט מי קרח המתאים לכוס, מד טמפרטורה.

מהלך הניסוי:

מזגו לכל אחת מהכוסות 200 מ"ל מים. את כוס א הניחו על פלטת חימום והפעילו בעוצמה מקסימאלית למשך 5 דקות. את כוס ב הניחו על השולחן ואת כוס ג הכניסו לתוך אמבט מי הקרח. לאחר 5 דקות, הורידו את כוס א מעל הפלטה והוציאו את כוס ג מאמבט מי הקרח.

הכניסו יד ימין לכוס א ויד שמאל לכוס ב. על פי תחושתכם, באיזו כוס המים "קרים"?

הכניסו יד ימין לכוס ב ויד שמאל לכוס ג. על פי תחושתכם, באיזו כוס המים "חמים"?

דיון בתוצאות:

הניסוי מראה לנו, כי טבילת היד במים אשר בכוס ב נתנה לנו פעם תחושה של נוזל "חם" ופעם תחושה של נוזל "קר". ברור לנו, כי תחושות אלו נותנות מידע סובייקטיבי ולא מדויק.

כיצד נקבל מידע אובייקטיבי? נטבול מד טמפרטורה בכל כוס ונבדוק את הטמפרטורה הנמדדת.

תוצאות מדידה לדוגמה: כוס א - 32°C, כוס ב - 23 °C , כוס ג - 8 °C .

מסקנה משלב א:

דרך מדעית להשוואת הטמפרטורה של נוזלים לאחר חימום היא שימוש במד טמפרטורה.

האם הכוס עם הנוזל החם ביותר מכילה את כמות האנרגיה הגדולה ביותר?

למדנו, כי אנרגיה פנימית = אנרגיה פוטנציאלית + אנרגיה קינטית של החלקיקים.

מכיוון שבכל הכוסות כמות המים הייתה זהה, נוכל להניח כי האנרגיה הפוטנציאלית של הנוזלים בכל כוס היא זהה. כלומר תחושת ה"חום" שאנחנו מקבלים מהמים קשורה ל**אנרגיה הקינטית הממוצעת השונה** של מולקולות המים. האנרגיה הקינטית הממוצעת שלהן תלויה במהירותן ובמסה שלהן. במקרה הנ"ל נוכל לומר, כי המהירות הממוצעת של מולקולות המים בכוס א היא גבוהה מהמהירות הממוצעת של מולקולות המים בכוס ב ומהמהירות הממוצעת של מולקולות המים בכוס ג.

ניסויים דומים אשר נערכו גם בחומרים גזיים הביאו **למסקנה** כי:

הטמפרטורה הנמדדת של חומר היא מדד לאנרגיית התנועה הממוצעת של החלקיקים המרכיבים את החומר.

ניסוי 3 - שלב ב - אנרגיה וטמפרטורה

מהלך הניסוי:

מדדו את הטמפרטורה של המים בכוסות א, ב, ג לאחר סיום שלב א,

או התייחסו לתוצאות המוצגות בטבלה הבאה, וענו על השאלות.

הכלים בהם עבדנו בשלב א הושארו על השולחן ונמדדה הטמפרטורה בפרקי זמן קצובים. טמפרטורת הסביבה בעת ביצוע הניסוי הייתה 23 °C להלן חלק מהתוצאות.

זמן	כוס א	כוס ב	כוס ג
0 - בתום שלב א	32°C	23 °C	8 °C
5 דקות	27 °C	23 °C	12 °C
15 דקות	25 °C	23 °C	14 °C
30 דקות	23 °C	23 °C	23 °C

שאלות בעקבות הניסוי

1. מהו שינוי הטמפרטורה המתרחש בכוס א?
2. מהו שינוי הטמפרטורה המתרחש בכוס ג?
3. מהי המערכת ומהי הסביבה בניסוי?
4. מהו כיוון מעבר האנרגיה? מהמערכת לסביבה או מהסביבה למערכת בכל כוס?
5. מה נוכל להסיק מתוצאות הניסוי ?

הסבר התוצאות

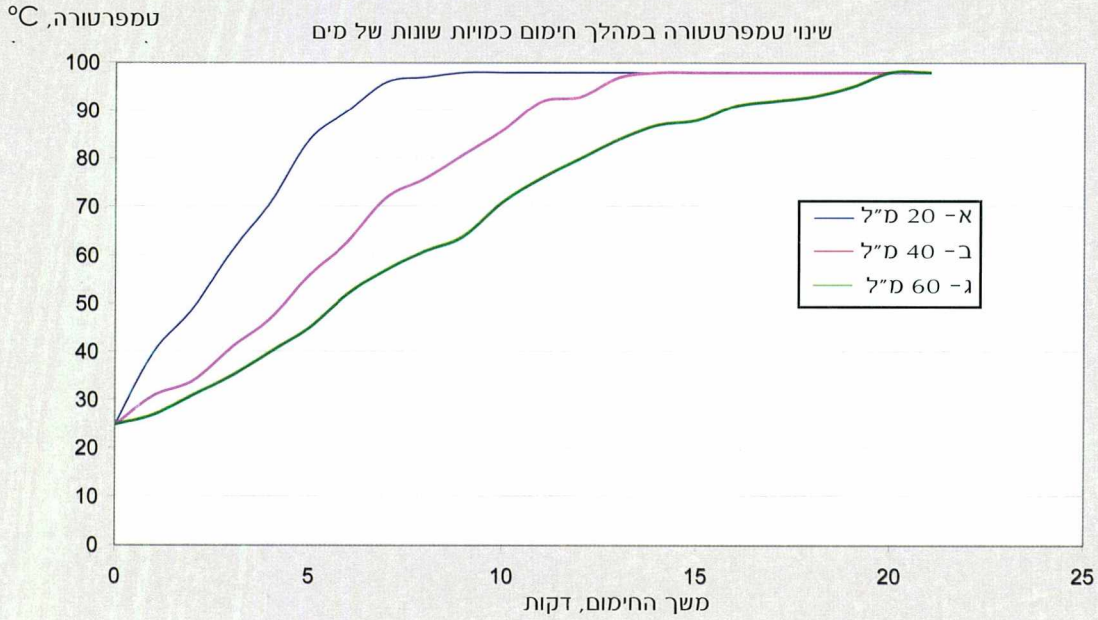
לאחר זמן מסוים, טמפרטורת המים בכל הכוסות הייתה שווה לטמפרטורת הסביבה. הטמפרטורה של המים בכוס ג עלתה עד לטמפרטורת הסביבה ואילו הטמפרטורה של המים בכוס א ירדה עד לטמפרטורת הסביבה. טמפרטורת המים של כוס ב, שהייתה זהה לזו של הסביבה, לא השתנתה.

מסקנה משלב ב - טמפרטורת המים בכוסות מגיעה בסופו של דבר לטמפרטורת הסביבה

ניסוי 3 - שלב ג - אנרגיה וטמפרטורה

מהלך ניסוי ותוצאות לדוגמה:

נתונות שלוש כוסות, בהן כמויות שונות של מים מזוקקים בטמפרטורת החדר:
בכוס א 20 מ"ל, בכוס ב 40 מ"ל, בכוס ג 60 מ"ל. הניחו את שלוש הכוסות על פלטה חשמלית וחממו עד לרתיחת המים. מדדו את טמפרטורת המים בכל כוס בפרקי זמן קצובים.
עיינו בגרף הבא, המתאר את תוצאות הניסוי, וענו על השאלות.



שאלות בעקבות הניסוי

1. מהו הגודל אשר שונה במהלך הניסוי? (המשתנה הבלתי תלוי)
2. מהו הגודל אשר נבדק במהלך הניסוי? (המשתנה התלוי)
3. מהם הגדלים אשר נשמרו קבועים במהלך הניסוי הנ"ל?
4. מהי שאלת החקר שנשאלה לפני ביצוע ניסוי זה?
5. מהן הנקודות המשותפות לעקומות המתוארות? מהי הסיבה לכך?
6. במה שונות העקומות זו מזו? מהי הסיבה לכך?
7. מה ניתן להסיק על הקשר בין כמויות המים בכוסות לבין טמפרטורת הרתיחה של המים?
8. מה ניתן להסיק על הקשר בין כמות המים לבין כמות האנרגיה המועברת אליהם עד לרתיחה? (לפי משך זמן החימום).

דיון בתוצאות

לאחר חימום במשך פרקי זמן שונים, טמפרטורת המים בכל הכוסות מגיעה לאותה רמה 98 °C. כאשר הטמפרטורה זהה בשלוש הכוסות ויש בהן אותו חומר (מים), האנרגיה הקינטית הממוצעת של החלקיקים זהה. מדוע נדרש חימום במשך פרקי זמן שונים? מכיוון שבכוס ג יש חלקיקים רבים יותר (מסת המים היא הגדולה ביותר), נדרשה העברה של אנרגיה רבה יותר ולכן זמן החימום של כוס ג היה הארוך ביותר.

אם בודקים את הטמפרטורות של המים בשלוש הכוסות לאחר 7 דקות חימום, רואים, כי הן שונות: המים בכוס א - 98°C, המים בכוס ב - 75°C והמים בכוס ג - 60°C. למרות שהשינוי באנרגיה הפנימית בכל כוס הוא זהה (הועברה אותה כמות אנרגיה), האנרגיה הקינטית הממוצעת של המים שונה. ההסבר הוא, שכמות האנרגיה הזהה "חולקה" בין כמות שונה של חלקיקים בכל אחת מהכוסות ולכן האנרגיה הקינטית הממוצעת שלהם שונה.

מסקנות משלב ג

- *על מנת להגיע לאנרגיה קינטית ממוצעת זהה של מולקולות בכמויות שונות של מים, יש צורך בהעברת כמויות שונות של אנרגיה.*
- *העברת כמות אנרגיה זהה לכמויות שונות של מים תגרום לאנרגיה קינטית ממוצעת שונה של מולקולות המים.*

ניסוי 3 - שלב ד - אנרגיה וטמפרטורה

מהלך הניסוי

חממו כוס כימית א, המכילה 50 מ"ל מים מזוקקים בטמפרטורת החדר, על פלטת חימום המופעלת בעוצמה בינונית. לאחר 3 דקות של חימום הכוס, הניחו על הפלטה כוס כימית ב המכילה אותה כמות מים בטמפרטורת החדר. המשיכו את החימום של שתי הכוסות למשך 3 דקות נוספות. בינתיים, הכינו מערכת מבודדת של שתי כוסות קלקר (אחת בתוך השנייה) ומכסה המתאים לכוסות הקלקר עם חור עבור מד טמפרטורה, לשלב הבא בניסוי. בתום חימום המים בכל כוס מדדו את הטמפרטורה.

שאלות בעקבות הניסוי

1. מהי שאלת החקר אשר נשאלה בתחילת הניסוי?
2. באיזו כוס הטמפרטורה גבוהה יותר? מדוע?
3. באיזו כוס האנרגיה הפנימית גבוהה יותר? מדוע?
4. שערו מה תהיה הטמפרטורה כאשר נערבב את הנוזלים משתי הכוסות א ו-ב.
5. מהו כיוון מעבר האנרגיה - מכוס א לכוס ב, או להיפך?

המשך הניסוי

שפכו את המים מהכוסות א ו-ב אל כוס הקלקר שהכנתם מראש ומדדו את הטמפרטורה המקסימאלית לאחר ערבוב קצר.

- מהי הטמפרטורה שנמדדה לאחר הערבוב? האם היא תואמת את השערתכם?

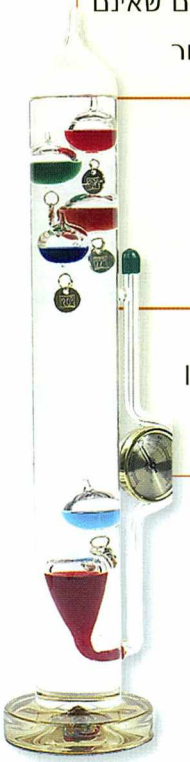
מסקנה משלב ד - בערבוב מים בטמפרטורה גבוהה עם מים בטמפרטורה נמוכה יותר, נקבל מים בטמפרטורת ביניים.

על בסיס ניסויים רבים כמו אלה שביצעתם, הגיעו המדענים להבנה של המושגים אנרגיה וטמפרטורה תוך כדי ניסוח מספר עקרונות.

- *כאשר שני גופים שהטמפרטורות שלהם אינן זהות באים במגע זה עם זה, הטמפרטורות שלהם ישתנו עד לשוויון. (מצב הנקרא גם שיווי משקל תרמי, חוק האפס של התרמודינמיקה)*
- *פעולת החימום היא דרך להעברת אנרגיה מגוף בעל טמפרטורה גבוהה יותר לגוף בעל טמפרטורה נמוכה ממנה.*

השוואה בין המושגים אנרגיה וטמפרטורה

	אנרגיה פנימית של מדגם חלקיקים	טמפרטורה של מדגם חלקיקים
משמעות	כלל האנרגיה האצורה במדגם חלקיקים = אנרגיה פוטנציאלית + אנרגיה קינטית	מדד לאנרגיה הקינטית הממוצעת של החלקיקים באותו מצב צבירה. בטמפרטורה גבוהה יותר של חומר תנועת החלקיקים מהירה יותר מאשר בטמפרטורה נמוכה של אותו חומר
תלות בכמות החומר	אנרגיה פנימית היא גודל התלוי בכמות החומר. ככל שכמות החומר גדולה יותר, כך גדולה יותר כמות האנרגיה הפנימית	טמפרטורה היא גודל **שאינו תלוי** בכמות החומר
ערך מצטבר	אנרגיה היא גודל הניתן לחיבור. כאשר נערבב כמויות שונות של מים, כמות האנרגיה הפנימית הכוללת שווה לחיבור האנרגיה הפנימית של כמויות המים	טמפרטורה היא גודל **שאינו** ניתן לחיבור. לאחר ערבוב מים בטמפרטורה גבוהה עם מים בטמפרטורה נמוכה, טמפרטורת המים אינה סכום הטמפרטורות אלא טמפרטורת ביניים
דוגמאות לגדלים אחרים	מס' המולים תלוי בכמות החומר וניתן לחיבור	צפיפות, ריכוז (של תמיסות), מקדם התפשטות, מוליכות חשמלית של מתכות - הם גדלים שאינם תלויים בכמות החומר ואינם ניתנים לחיבור
דרך המדידה	אנרגיה לא ניתנת למדידה ישירה. ניתן להבחין או למדוד מעברי אנרגיה בלבד	טמפרטורה ניתנת למדידה בעזרת מד טמפרטורה. קיימים מדי טמפרטורה הפועלים על פי עקרונות שונים
יחידות מידה	ג'אול, קלוריה, קוט"ש (קילו וואט שעה) ועוד	מעלות לפי סולם: צלזיוס, פרנהייט, קלווין



מד טמפרטורה של גלילאו

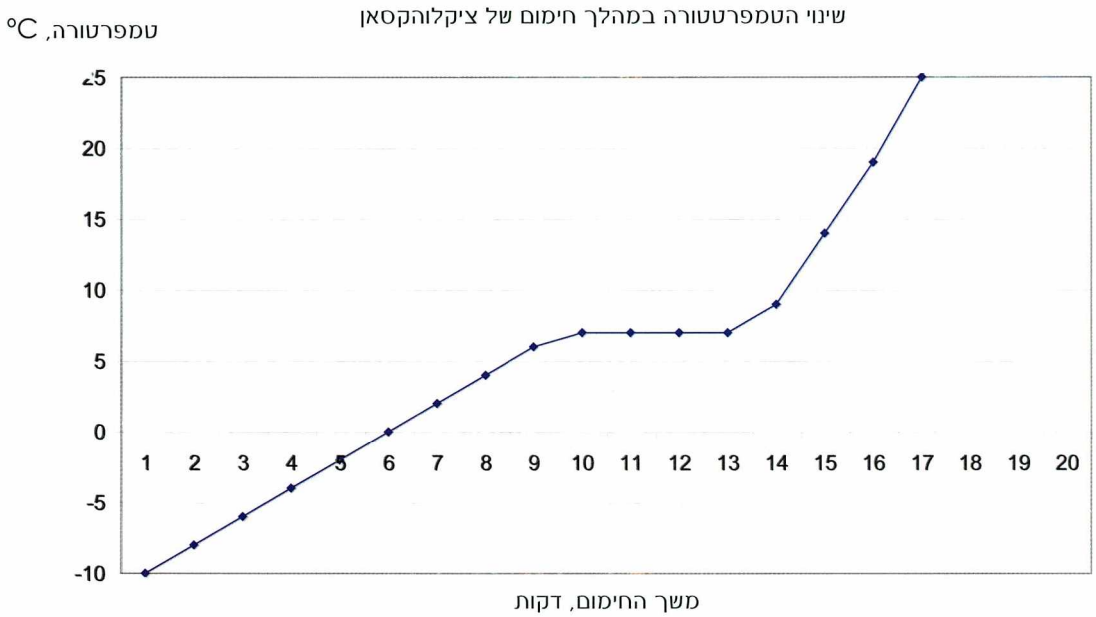
סיכום ביניים ראשון

סיכום מושגים ועקרונות

- **אנרגיה קינטית** של חלקיק (אנרגיית תנועה) - תלויה במסה, בסוג התנועה ובמהירות התנועה של החלקיק.
- **אנרגיה פוטנציאלית של מדגם חלקיקים** (אנרגיה אצורה) - תלויה בחוזק האינטראקציה בין חלקיקים ובמספר האינטראקציות.
- **אנרגיה פנימית** - סך כל האנרגיה הפוטנציאלית והקינטית של מדגם החלקיקים בחומר.
- **טמפרטורה** - גודל המהווה מדד לאנרגיה הקינטית הממוצעת של מדגם החלקיקים. אינה תלויה במסת המדגם ואינה ניתנת לחיבור. ניתנת למדידה על ידי מד טמפרטורה.
- **מערכת** - הגדרה למוקד העניין בו דנים. בתגובה כימית כוללת מגיבים ותוצרים.
- **סביבה** - כל מה שאינו מוגדר כמערכת.
- **סביבה מוגדרת** - סביבה התחומה בכלי מבודד, שאינו מאפשר מעבר חומר או אנרגיה.
- **חוק שימור האנרגיה** - האנרגיה הכללית של היקום היא ערך קבוע. האנרגיה הכללית של מערכת מבודדת או מערכת הנמצאת בסביבה מוגדרת היא ערך קבוע.
- **שיווי משקל תרמי** - כאשר שני גופים שהטמפרטורות שלהם אינן זהות באים במגע זה עם זה, הטמפרטורות שלהם ישתנו עד לשיוויון טמפרטורות וזהו שיווי משקל תרמי.
- **חימום** היא דרך להעברת אנרגיה מגוף או חומר בעל טמפרטורה גבוהה לגוף או חומר בעל טמפרטורה נמוכה.

שאלות

1. עשרה גרם ציקלוהקסאן נוזלי הוכנסו למבחנה. מד טמפרטורה הוכנס לחומר ואחר כך המבחנה כולה הוכנסה למקפיא (-18°C), יום לפני הניסוי. במהלך הניסוי, המבחנה הכוללת את הציקלוהקסאן הקפוא ובו מד הטמפרטורה, הוצאה מהמקפיא והונחה על משטח בטמפרטורת החדר (25°C). נערך מעקב אחר השינוי בטמפרטורה של ציקלוהקסאן. הגרף הבא מתאר את תוצאות המעקב.



על פי המתואר בגרף ניתן לראות כי בטמפרטורה של 7.5°C (לערך) הטמפרטורה של החומר נשארת קבועה, למרות שמתרחש חימום. הסבירו את השינויים המתרחשים בציקלוהקסאן במהלך הניסוי, ברמה מאקרוסקופית וברמה מיקרוסקופית.

2. כוסית כימית ובתוכה 18 גרם קרח בטמפרטורה של 20°C - הונחה על פלטה חשמלית פועלת ותוך כדי כך נמדדה הטמפרטורה בכוס. (קצב החימום היה קבוע). במהלך הניסוי חושבו שינויי האנרגיה המתרחשים עד אשר כל המים הפכו לאדים. (על הדרכים לחישוב תלמד בפרק הבא).
בעת התחממות הקרח עד לטמפרטורת ההיתוך הושקעו 0.75 kJ, בעת היתוך הקרח הושקעו 6 kJ, בעת חימום המים עד לרתיחה הושקעו 7.5 kJ ובעת אידוי המים הושקעו 40.7 kJ. ציירו עקומה (סכמטית), המבוססת על הנתונים הנ"ל והמתארת את שינוי הטמפרטורה במהלך החימום של הקרח כתלות בכמות האנרגיה שהושקעה.

3. לפניכם שאלה שהופנתה לעיתון ותשובת המומחה אשר ענה לפונה:
השאלה: "מדוע אריגי הפליס[1] כל כך מחממים?"
התשובה: "פליס הוא סריג. הוא עשוי מחוטי פוליאסטר מקורזלים וארוכים ומבנה הסריגה הוא נפחי.

1 לא להתבלבל עם פליז (Brass) שהיא סגסוגת נחושת ואבץ.

השילוב בין הסריגה וסלסול החוט יוצר בידוד תרמי. מכאן נובע חומו של הפליס, וכן גם קלילותו" (עיתון "העיר" 25.2.2005)

נסחו מחדש את תשובת המומחה בשפה מדעית נכונה, תוך התייחסות להיבטי האנרגיה. ענו תוך כדי התייחסות לרמה המאקרוסקופית ולרמה המיקרוסקופית.

4. כתבו את המשפטים הבאים בשפה מקובלת מבחינה מדעית.
   א. "השארת את הדלת פתוחה וכל הקור נכנס פנימה!"
   ב. "אני חולה. יש לי חום!"
   ג. הקריין הודיע, כי "מעלות החום במישור החוף הן ....."
   ד. "קניתי סוודר חדש ממש מחמם!"

5. נתונים שני בקבוקי מים: בקבוק עם 1.5 ליטר מים ובקבוק עם 0.5 ליטר מים. הבקבוקים נמצאים בטמפרטורת החדר.
   א. האם למים בשני הבקבוקים יש אותה אנרגיה פנימית? נמקו.
   שני הבקבוקים הוכנסו בו זמנית למקפיא והוצאו כעבור כשעה.
   ב. מהו הכיוון בו התקיים מעבר האנרגיה: מהבקבוקים אל המקפיא או להיפך? נמקו.
   ג. האם השינוי באנרגיה הפנימית של שני הבקבוקים, בשהותם במקפיא, שווה? נמקו.

6. על מנת להכין מרק חם עבור 10 סועדים, יש להשקיע אנרגיה רבה יותר מאשר בעת הכנת מרק ל-2 סועדים, בהנחה שלכל סועד מנה זהה.
   כיצד תסבירו עובדה זו בעזרת המושגים "אנרגיה" ו"טמפרטורה"?

7. במהלך טיסה מגיע מטוס נוסעים לגובה של כ-10 ק"מ. בגובה זה הטמפרטורה החיצונית היא -55°C. אחד האמצעים להגנה על הנוסעים הוא שימוש בחלונות כפולי שמשות. הסבירו את היעילות של אמצעי זה בשפה מדעית מקובלת.

ניסוי בית

הניחו שלוש כוסות על השיש במטבח. לאחת הכוסות הכניסו מי ברז עד למחציתה.
הוציאו שלוש קוביות קרח מהמקפיא. קובייה אחת הכניסו לכוס ריקה. קובייה שנייה הכניסו לכוס המכילה מי ברז. את הקובייה השלישית עטפו היטב במפית נייר והכניסו אותה לכוס הריקה השלישית. צפו בכל אחת מהכוסות במשך 15 דקות.

1. תארו מה התרחש בכל כוס.
2. מהו התהליך אשר עבר הקרח בניסוי זה? באיזו כוס הוא התרחש ראשון?
3. מדוע התהליך התרחש בכוס זו ולא בכוסות אחרות? נמקו.

מעברי אנרגיה בחיי היום יום

הזכרנו את העובדה, כי מעברי אנרגיה יכולים להתרחש בדרכים שונות: חימום, עבודה, פליטת קרינה. תופעות שונות בחיי היום יום קשורות למעברי אנרגיה שונים.

מעבר אנרגיה הגורם לחימום מתרחש כאשר יש מגע בין גוף בעל טמפרטורה גבוהה לבין גוף בעל טמפרטורה נמוכה. מודלים שונים מראים, כי יש סיכוי גבוה ביותר למעבר אנרגיה מגוף בעל טמפרטורה גבוהה לגוף בעל טמפרטורה נמוכה מאשר הסיכוי (האפסי) למעבר אנרגיה בכיוון הפוך, כלומר מגוף בעל טמפרטורה נמוכה לגוף בעל טמפרטורה גבוהה יותר.[1]
ניסיוננו היום יומי מלמד אותנו, כי סיר מרק חם הנשאר במטבח יתקרר ויגיע בסופו של דבר לטמפרטורת הסביבה. כמו כן, הניסיון מלמד, כי כלי שהיה במקפיא והוצא ממנו - יתחמם ויגיע לטמפרטורת הסביבה.

מעבר אנרגיה הגורם לעבודה מתרחש כאשר חל שינוי בכיוון ובמהירות התנועה של גופים וחלקיקים שונים. לדוגמה, כאשר אנו מנפחים גלגל על ידי הפעלת משאבה, האוויר הנוסף הנכנס לגלגל גורם לניפוחו, מתרחשת עבודה. בתגובה כימית, אשר בה התוצרים הם גזים, נעשית עבודה בהזזת מולקולות מרכיבי האוויר הצידה ופינוי המקום לתוצרים הגזים. אם התגובה מלווה בשיחרור אנרגיה לסביבה, מתרחש תמיד, גם חימום של הסביבה. פיצוץ של חומרי נפץ הוא דוגמה לתגובה כימית מלווה במעבר אנרגיה על ידי עבודה, כגון הזזת סלעים והזזת אוויר בצורה פתאומית, המתבטאת ברעש הפיצוץ, בנוסף לאנרגיה הגורמת לחימום הסביבה.

מעבר אנרגיה הגורם לפליטת קרינה - המקור העיקרי לפליטת אנרגיה על ידי קרינה אלקטרומגנטית[2] מסוגים שונים, הוא השמש (בהתייחס למערכת השמש שלנו ולא ליקום כולו). אולם מעברי אנרגיה מסוג זה מתרחשים גם בעת הפעלת מכשירים שונים, כגון מיקרוגל, טלפון נייד או נורה ביתית.
שריפת יערות, המתרחשת לעיתים קרובות על פני כדור הארץ, היא דוגמה לתגובה בה מתרחשים מעברי אנרגיה של חימום והארה גם יחד. בתגובות אלו, התאית, המרכיב העיקרי של העצים, מגיבה עם חמצן. מתקבלות תרכובות חדשות של פחמן דו חמצני ומים. תוך כדי כך, משתחררת כמות גדולה של אנרגיה הגורמת לחימום הסביבה וכן כמות של אנרגיה בצורת אור.

לסיכום: *בתהליכים רבים ובתופעות רבות מתרחשים מעברי אנרגיה הגורמים לחימום ו /או לעבודה ו / או לפליטת אור.*

1 המודלים מוצגים בספר "הכימיה אתגר" פרק י"א - רות בן צבי ויהודית זילברשטיין, מכון ויצמן למדע, רחובות

2 קרינה אלקטרומגנטית היא טווח רחב של אנרגיה המתפשטת בצורה גלית. עבור בני האדם תחום האור הנראה הוא החשוב ביותר, כי בעזרת קרינה זו אנו רואים את עולמנו. נושא זה מורחב ביחידת לימוד מאוחרת יותר.

פעילות העשרה: לדעת יותר על מעברי אנרגיה

על מנת להמחיש מעברי אנרגיה שונים המתרחשים יחד, נערוך השוואה בין שריפת גז בישול בכיריים לבין שריפת דלק במנוע המכונית. בשני מקרים אלו, מתרחשת העברת אנרגיה על ידי עבודה ועל ידי חימום גם יחד. השוני הוא השימוש השונה באנרגיה הנעשה בשני התהליכים.

בטבלה הבאה רשומים נתונים שונים הקשורים לשריפה בכיריים ולשריפה במכונית.

השלימו את המשבצות הריקות והוסיפו הסברים המתאימים לכל מקרה.

השוואה בין שריפת גז בישול בכיריים לבין שריפת דלק במנוע המכונית

	שריפת גז בישול	שריפת דלק
המכשיר בשימוש	כיריים גז	מכונית
חומר הדלק הנשרף	גז בישול (תערובת פרופאן ובוטאן [1]) C_3H_8 / C_4H_{10}	דלק מכוניות תערובת פחמימנים המכילה בעיקר תרכובות בנות 5-9 אטומי פחמן כגון אוקטאן, C_8H_{18}.
המגיבים	C_3H_8 / C_4H_{10} ו-חמצן	למשל C_8H_{18} (אוקטאן) ו -חמצן
התוצרים	$CO_2 + H_2O$	$CO_2 + H_2O$ (נפלטים גזים נוספים, כגון CO וכן תחמוצות שונות, היות והדלק אינו נקי לחלוטין)
מערכת	פתוחה - לחץ קבוע אטמוספרי	סגורה - בתוך בוכנה נעה במנוע המכונית
מעבר אנרגיה בצורת עבודה	מתקיים	
מעבר אנרגיה בצורת חימום		
מטרת השימוש		
תוצרים שלא מתאימים למטרות השימוש (התייחסו לחומרים ואנרגיה)		

1 היות ולתערובת גזים זו אין ריח והדבר לא יאפשר זיהוי גז במקרה דליפה, מוסיפים גז בעל ריח חריף.

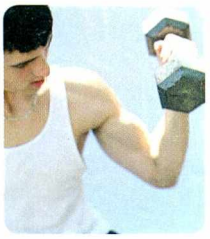
מהן יחידות המידה של אנרגיה?

יחידות המדידה של אנרגיה, נגזרות ממעברי אנרגיה שונים. מכיון שאי אפשר למדוד אנרגיה באופן ישיר, אלא מעברי אנרגיה כמו חימום או עבודה, יחידות המידה של אנרגיה מוגדרות בהתאם לתהליכים כאלה. יש יחידות רבות לאנרגיה אך המקובלת בעולם המדע היא היחידה הנגזרת מהעבודה:

עבודה

מקובל למדוד אנרגיה ביחידות של ג'אול שמסמנים ב- J, או בקילו ג'אול kJ.

1000 J =1 kJ



שם היחידה ג'אול היא על שמו של ג'יימס ג'אול,(James Prescott Joule 1818-1889) מדען אנגלי אשר חקר מעברי אנרגיה ויצר בסיס לניסוח חוק שימור האנרגיה.

כאשר אדם מרים משקולות של כ-100 ק"ג לגובה של 1 מטר הוא משקיע בכך אנרגיה של 1 קילו ג'אול. יחידות האנרגיה המקובלות בעולם הן יחידות הג'אול והקילו ג'אול.

חימום

יחידה נוספת שהייתה בשימוש הכימאים בעבר וכעת משמשת בעיקר למדידת ערך קלורי של מזון היא יחידת האנרגיה קלוריה.

כמות האנרגיה הדרושה לחימום 1 גרם מים במעלה אחת נקראת קלוריה (cal). כמות אנרגיה זו היא קטנה מאוד ולכן מקובל להשתמש ביחידת אנרגיה הגדולה פי 1000 ממנה, הנקראת קילו קלוריה 1 kcal

1000 cal = 1 kcal

על אריזות המזון שאנו אוכלים מצוינים ערכי האנרגיה העשויים להתקבל בעת שריפה מלאה של כמות נתונה של מזון ביחידות של קלוריות. הכוונה היא ליחידות של קילו קלוריה (kcal) המכונה גם Calorie ומסומנת ב-C והיא המידה אליה מתכוונים בשפה יומיומית כאשר מדברים על קלוריות.

הקשר בין יחידות האנרגיה הנ"ל הוא: 1cal =4.184 J או 1 kcal = 4.184 kJ

לדעת יותר על יחידות אנרגיה

עבודה הנעשית על ידי גזים

כאשר גזים מתפשטים נעשית עבודה כנגד הלחץ החיצוני.

יחידות אנרגיה מתאימות הן: ליטר X אטמוספירה

הקשר בין יחידה זו לבין יחידות ג'אול: 1 ליטר אטמוספירה = 101 ג'אול

עבודה חשמלית[1]

כאשר אלקטרונים עוברים במעגל חשמלי בו המתח הוא 1 וולט, בזרם אשר עוצמתו 1 אמפר במשך 1 שנייה, מתבצעת עבודה השווה ל-1 ג'אול

אנרגיית קרינה[2] אנרגיה של פוטון נמדדת אף היא ביחידות של ג'אול. אנרגיה של פוטון בתחום האור הנראה היא בסדר גודל של 10^{-19} ג'אול

---

1 עבודה חשמלית מתקיימת בתאים אלקטרו כימים, סוללות.

2 על קרינה אלקטרומגנטית תוכלו ללמוד ביחידת הלימוד הבאה.

מעברי אנרגיה בתגובות כימיות

נדון כעת במעברי אנרגיה במהלך התרחשותן של תגובות כימיות. כאמור, לחומרים שונים יש אנרגיה פנימית הכוללת את האנרגיה הפוטנציאלית ואת האנרגיה הקינטית של החלקיקים המרכיבים את החומר. כאשר מתרחשת תגובה, חל שינוי בהרכב החומרים ולכן יכול לחול שינוי גם באנרגיה הפנימית שלהם, כלומר באנרגיה הפנימית של המערכת.

קיימות שתי אפשרויות עיקריות של שינוי:

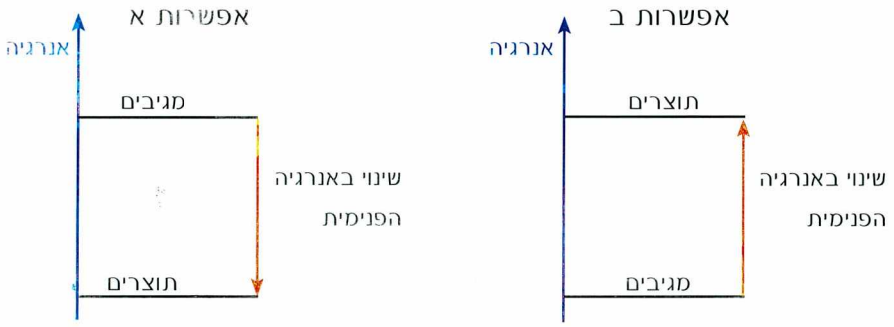
אפשרות א - ירידה באנרגיה הפנימית של המערכת, הנובעת מכך שלתוצרים תהיה אנרגיה פנימית נמוכה מהאנרגיה הפנימית של המגיבים.

אפשרות ב - עליה באנרגיה הפנימית של המערכת, הנובעת מכך שלתוצרים תהיה אנרגיה פנימית גבוהה מהאנרגיה הפנימית של המגיבים.

הסיכוי שלחומרים שונים (גם למגיבים וגם לתוצרים) תהיה אנרגיה פנימית זהה, הוא נמוך ביותר.

ניתן להציג את המידע הנ"ל באופן גרפי, ראו איור 1. בגרף מסוג זה ציר אחד (ציר Y) מתאר את האנרגיה של החומרים השונים בצורה יחסית, אחד לשני. החץ באדום מתאר את השינוי באנרגיה במהלך התקדמות התגובה, מהמגיבים לתוצרים.

איור 1 - שינויים באנרגיה הפנימית של מערכת



כיצד נדע מהו השינוי באנרגיה הפנימית של מערכת בעת התרחשות התגובה?

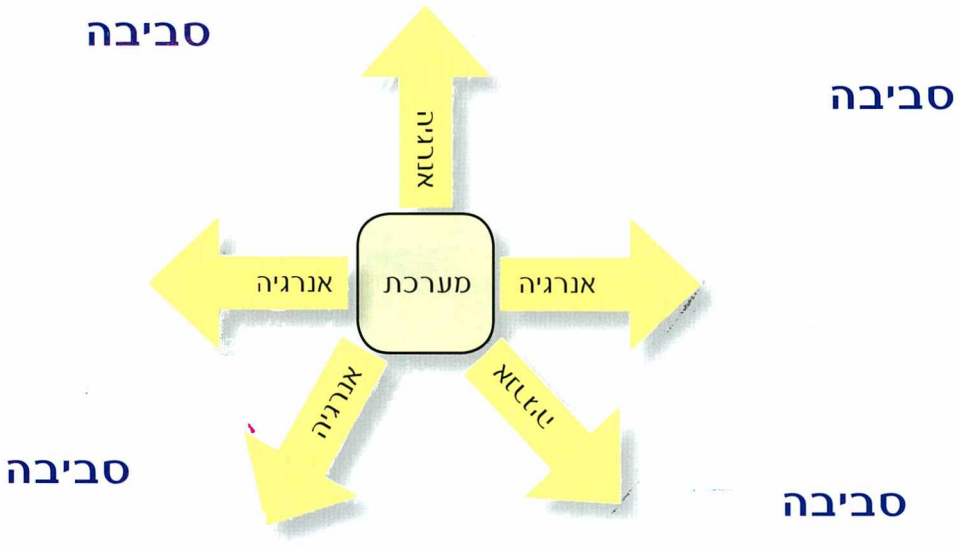
כפי שכבר למדתם, איננו יכולים למדוד אנרגיה פנימית של חומרים. אולם, ניתן להבחין במעברי אנרגיה החלים בעת התרחשות של תגובה ואף למדוד ערכים כמותיים, כפי שתלמדו בהמשך.

ניזכר בניסוי 1, שריפת זיקוקים. ראינו, כי המגיבים (חומר אפור המכסה חוט תיל) עברו שינוי והפכו לחומר שחור. בנוסף, ראינו להבה ופליטת גיצים מאירים. הלהבה התקדמה לאורכו של הזיקוק וכאשר קרבנו את היד אליה הרגשנו שחל חימום.

אנו יכולים להסיק, כי בעת התרחשותה של שריפת הזיקוק **נפלטה אנרגיה**. אנרגיה זו הועברה אל הסביבה **בחימום** (אנו חשנו כי חם) **ובפליטת אור** (האור המופץ מהזיקוק). שריפת הזיקוק מהווה דוגמה המתאימה לאפשרות א: חלה ירידה באנרגיה הפנימית של המערכת. הפרש האנרגיה בין המגיבים לתוצרים **ניפלט** אל הסביבה המקיפה את הזיקוק.

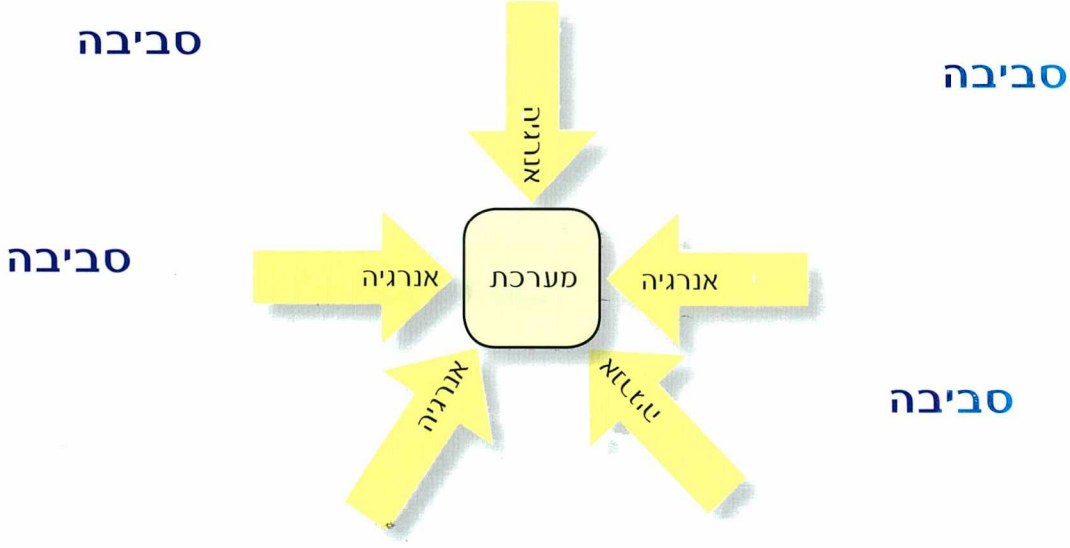
נתייחס אל הזיקוק כאל **מערכת**; המכילה בתחילת הניסוי את המגיבים ולאחריו את התוצרים. **לסביבה** בניסוי הזיקוק **אין גבולות מוגדרים**, היא כוללת את האוויר מסביב, את היד המחזיקה את הזיקוק, את הנייר והיד שמקרבים אל הזיקוק.

איור 2א - פליטת אנרגיה בתגובה כימית בסביבה לא מוגדרת



אפשרות אחרת היא שאנרגיה נקלטת מהסביבה אל המערכת

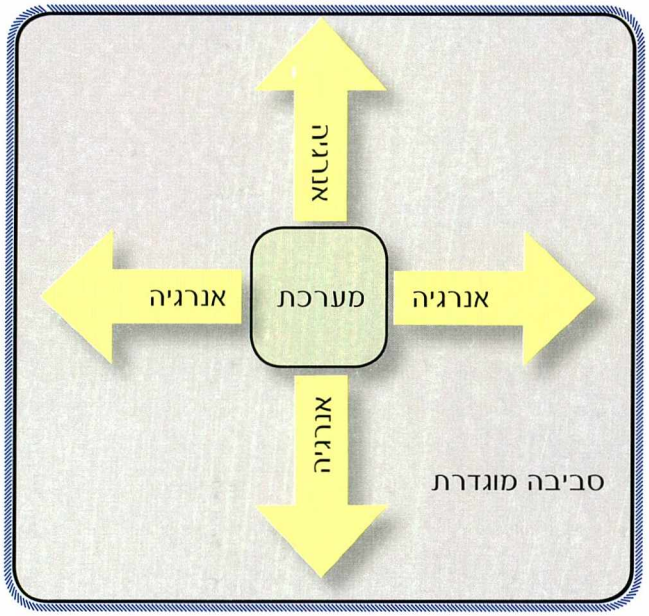
איור 2ב: קליטת אנרגיה בתגובה כימית בסביבה לא מוגדרת



אם נגדיר בצורה ברורה את הסביבה, על ידי יצירת גבול מבודד בין הסביבה הקרובה של המערכת לבין שאר היקום, נוכל להתבסס על חוק שימור האנרגיה כדי לדעת מהו השינוי באנרגיה הפנימית של המערכת בעת התרחשותה של תגובה, דבר שאיננו יכולים לעשות כאשר הסביבה אינה מוגדרת. כאמור, קיימות שתי אפשרויות:

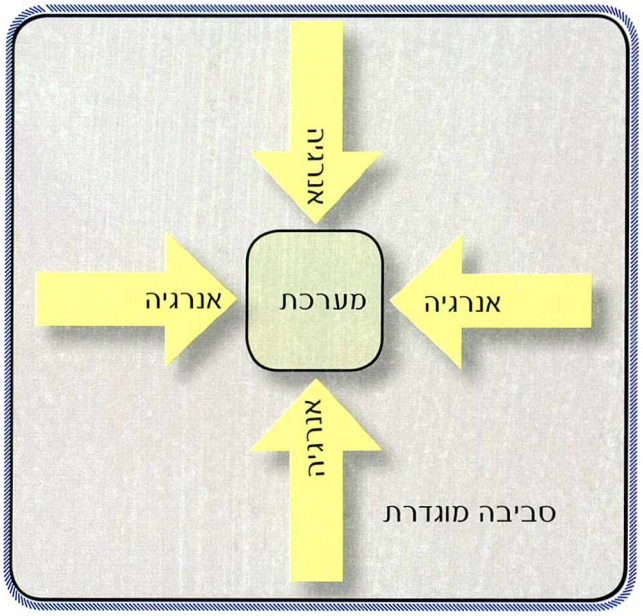
אפשרות א: אנרגיה שמקורה באנרגיה הפנימית של המערכת נפלטת אל הסביבה. הפרש האנרגיה הפנימית בין התוצרים למגיבים שווה לאנרגיה אשר נקלטה על ידי הסביבה. (איור 3א).

איור 3א – תגובה כימית בסביבה מוגדרת (פליטת אנרגיה)



אפשרות ב: כאשר מתרחשת תגובה בה לתוצרים יש אנרגיה פנימית גבוהה מזו של המגיבים, הפרש האנרגיה ניקלט מהסביבה. כלומר הירידה באנרגיית הסביבה שווה לעלייה באנרגיה הפנימית של המערכת. נוכל לתאר זאת באיור 3ב.

איור 3ב – תגובה כימית בסביבה מוגדרת (קליטת אנרגיה)



לסיכום, במהלך ההתרחשות של תגובה כימית מתרחש שינוי באנרגיה הפנימית של המערכת, השווה לכמות האנרגיה המשתחררת אל הסביבה או ניקלטת על ידי הסביבה.

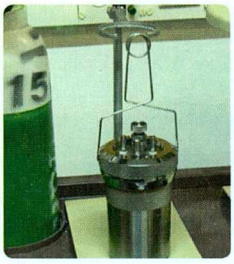
שינויי אנתלפיה בתגובות כימיות

דנו עד כה בהפרשי אנרגיה פנימית בין תוצרים למגיבים של תגובה כימית ובמעבר האנרגיה בין המערכת לסביבה הקשור להתרחשות התגובה.

אם בתגובה כימית נוצרים גזים יש משמעות לתנאים בהם התגובה מתרחשת.

אם התגובה מתרחשת **בלחץ קבוע**, כפי שמתרחשות רוב התגובות במעבדה ובגוף האדם, כימאים נוהגים להשתמש בגודל **אנתלפיה** במקום אנרגיה פנימית. אנתלפיה מסומנת באות H .

לדעת יותר על אנתלפיה ואנרגיה פנימית



נתייחס לדוגמה, לשריפת פחמימן כגון C_8H_{18}. נניח, שהתגובה מתרחשת בתא המצוי בתוך מים בכלי סגור, בעל דפנות קשיחים (הכלי קרוי קלורימטר פצצה, ראו תמונה)[1]. במהלך השריפה, האנרגיה הפנימית של המערכת קטנה. כתוצאה מכך, משתחררת אנרגיה לסביבה אשר גורמת לחימום בלבד של המים שסביב תא התגובה. לא נעשית עבודה, כי שיחרור התוצרים הגזים במהלך התגובה אינו גורם לשינוי בנפח הכלי, אלא להגדלת הלחץ בתוך הכלי.

מאידך, כאשר שריפת פחמימן מתרחשת בכלי פתוח, בו הלחץ קבוע ושווה ללחץ האטמוספרי, התוצרים הגזים הנוצרים בתגובה נפלטים ומתפשטים מחוץ לכלי התגובה. הגזים הללו צריכים להזיז את האוויר הנמצא סביבם על מנת לתפוס נפח משלהם. התפשטות כזו של גז גורמת לביצוע עבודה. כאשר התגובה מתרחשת בכלי פתוח, האנרגיה הנפלטת בתגובה שווה לסכום האנרגיה אשר גרמה לחימום הסביבה וכן לאנרגיה אשר נדרשה לעבודה בגלל התפשטות הגזים. אנרגיה זו נקראת אנתלפיה והיא מסומנת באות H.

H_2 - מוגדרת כאנתלפיה במצב הסופי, כלומר אנתלפיית התוצרים לאחר התרחשות התגובה.

H_1 - מוגדרת כאנתלפיה במצב ההתחלתי, כלומר אנתלפיית המגיבים בהתחלת התגובה.

שינוי האנתלפיה החל בתגובה מסומן על ידי ΔH ומוגדר באופן הבא:

$$\Delta H = H_2 - H_1$$

היות ורוב התגובות הכימיות נערכות במערכות בהן הלחץ קבוע (אטמוספרי), נתייחס בהמשך דיוננו לשינוים באנתלפיית התגובה ולא לשינויים באנרגיה הפנימית, למרות שההבדלים בין שני הגדלים אינם גדולים ויחידות המידה זהות.

מבחינת שינויי אנתלפיה בתגובה, ניתן להבחין **בשני סוגים של תגובות**:

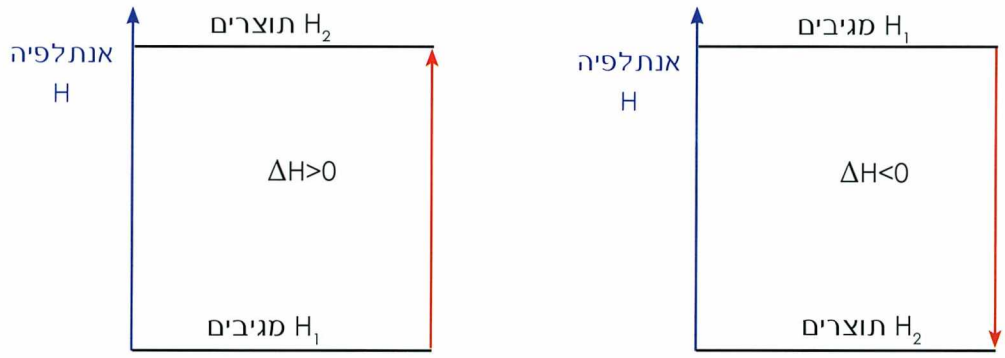
1. **תגובה אקסותרמית** - תגובה, אשר במהלך התרחשותה חלה ירידה באנתלפיה של המערכת, כיוון שהאנתלפיה של התוצרים נמוכה מזו של המגיבים. הפרש האנתלפיה בין מרכיבי המערכת ניפלט לסביבה. כתוצאה מכך, אנרגיית הסביבה עולה. (איור 4).

---

1 קלורימטר פצצה-באדיבות חמד"ע, המרכז לחינוך מדעי, ת"א.

2. **תגובה אנדותרמית** - תגובה, אשר במהלך התרחשותה חלה עליה באנתלפיה של המערכת, כיוון שהאנתלפיה של התוצרים גבוהה מזו של המגיבים. הפרש האנתלפיה בין מגיבים לתוצרים ניקלט מהסביבה. כתוצאה מכך, אנרגיית הסביבה יורדת. (איור 4).

איור 4 - תיאור גרפי לתגובה אקסותרמית ותגובה אנדותרמית



תגובה-אנדותרמית תגובה-אקסותרמית

יש לשים לב לסימנו של ΔH. הסימן מורה על כיוון מעבר האנרגיה.

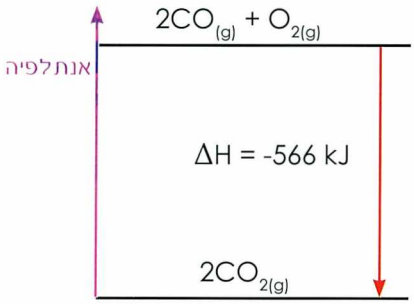
כאשר הסימן הוא שלילי (ΔH<0), הדבר מלמד על ירידה באנתלפיה של המערכת, עקב מעבר אנרגיה מהמערכת אל הסביבה.

כאשר הסימן הוא חיובי (ΔH>0), הדבר מלמד על עליה באנתלפיה של המערכת, עקב מעבר אנרגיה מהסביבה אל המערכת.

ΔH מתייחס לתגובה על פי ניסוחה (בתגובות רבות למול מגיב).

בעיה לדוגמה

נתון התיאור הגרפי של התגובה הבאה:



שאלות

1. מה ניתן ללמוד מהגרף הנתון?
2. מה תהיה כמות האנרגיה אשר תיפלט כאשר 1 מול פחמן דו חמצני יתקבל?
3. מה תהיה כמות האנרגיה שתיפלט כאשר יגיבו 16 גרם חמצן ?
4. מה תהיה כמות האנרגיה שתיפלט כאשר 5 ליטר פחמן חד חמצני יגיבו עם מספיק חמצן בטמפרטורת החדר? (נפח מולרי 25 ליטר) .

תשובות

1. א. מתרחשת התגובה הבאה: $2CO_{(g)} + O_{2(g)} \rightarrow 2CO_{2(g)}$

ב. סימנו של ΔH הוא שלילי כלומר נפלטת אנרגיה במהלך התרחשות התגובה, כיוון שהאנרגיה הפנימית של התוצרים נמוכה משל המגיבים.

ג. האנרגיה הנפלטת שווה ל- 566 kJ. פליטת אנרגיה זו מתייחסת לתגובה בין מול אחד של חמצן ל-2 מול של פחמן חד חמצני CO לקבלת 2 מול של פחמן דו חמצני CO_2.

2. 283 kJ

3. היות ונתון כי הגיבו חצי מול חמצן תתקבל מחצית מכמות האנרגיה הנתונה.

4. נתון כי הגיבו 0.2 מול פחמן דו חמצני, ולכן תיפלט אנרגיה השווה ל-56.6 kJ.

ניסוי 4 - תהליכי המסה ושינויי אנרגיה

חומרים וציוד לכל קבוצת תלמידים או להדגמה

כ-2 גרם נתרן הידרוכסידי $NaOH_{(s)}$, כ-2 גרם נתרן חנקתי $NaNO_{3(s)}$, מים מזוקקים, 2 כוסות כימיות של 100 מ"ל, 2 מקלות זכוכית, 2 מדי טמפרטורה

שימו לב לא לגעת בחומרים בידיים חשופות!! זהירות מיוחדת בשימוש בנתרן הידרוכסידי! עלול לגרום כוויות! הקפידו על שטיפת ידיים בסוף הניסוי.

מהלך הנסוי

לפניכם שני מוצקים לבנים. מוצק A, נתרן הידרוכסידי NaOH, ומוצק B, נתרן חנקתי $NaNO_3$. מה המשותף לשני החומרים הנתונים? התייחסו לרמה מיקרוסקופית.

מזגו כ-50 מ"ל מים מזוקקים לשתי כוסות כימיות נפרדות. מדדו את הטמפרטורה ההתחלתית של המים. הכניסו חצי כפית של המוצק A לכוס א, ערבבו בזהירות עם מקל הזכוכית. מדדו את הטמפרטורה של התמיסה עד שהשינוי מגיע לשיאו (טמפרטורה מקסימאלית או מינימאלית).

הכניסו חצי כפית של המוצק B לכוס ב, ערבבו בזהירות עם מקל הזכוכית. מדדו את הטמפרטורה של התמיסה עד שהשינוי מגיע לשיאו (טמפרטורה מקסימאלית או מינימאלית).

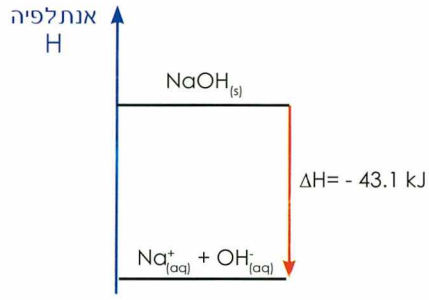
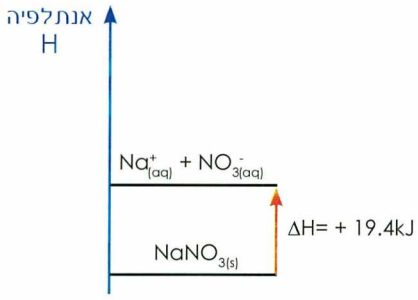
שאלות בסקבות הניסוי

1. מה התרחש בכל אחת מהכוסות? תארו תצפיותיכם.
2. הסבירו את תצפיותיכם ברמה המיקרוסקופית.
3. נסחו את התגובות אשר התרחשו בכל כוס.
4. מהו השינוי בטמפרטורה אשר התרחש בכל אחת מהכוסות?
5. התייחסו לתגובה המתרחשת בכל אחת מהכוסות. האם היא אקסותרמית או אנדותרמית?
6. שרטטו תיאורים גרפיים סכמטיים, המתארים את שינוי האנתלפיה בכל אחת מהתגובות.
7. כיצד ניתן לשפר את ביצוע הניסוי? התייחסו לדיוק במדידות.
8. אלו שאלות נוספות עולות בדעתכם לאחר ביצוע הניסוי הנ"ל?
9. הציעו חומרים נוספים איתם ניתן לבצע ניסוי דומה.

ייצוג שינוי אנתלפיה בתגובות

קיימות דרכים שונות לייצוג השינוי באנתלפיה והן מסוכמות בטבלה הבאה.

ייצוג מידע על שינוי האנתלפיה בתגובות

ייצוג מידע	תגובה אקסותרמית	תגובה אנדותרמית
סוג התגובה	המסה של חומר יוני במים	
כתיבת סימנו של ΔH	$NaOH_{(s)} \xrightarrow{H_2O_{(l)}} Na^+_{(aq)} + OH^-_{(aq)}$ $\Delta H<0$	$NaNO_{3(s)} \xrightarrow{H_2O_{(l)}} Na^+_{(aq)} + NO^-_{3(aq)}$ $\Delta H>0$
כתיבת ערכו וסימנו של ΔH	$NaOH_{(s)} \xrightarrow{H_2O} Na^+_{(aq)} + OH^-_{(aq)}$ $\Delta H= - 43.1$ kJ	$NaNO_{3(s)} \xrightarrow{H_2O} Na^+_{(aq)} + NO^-_{3(aq)}$ $\Delta H= + 19.4$ kJ
תיאור גרפי של התגובה		
ציון כמות האנרגיה יחד עם הניסוח	$NaOH_{(s)} \xrightarrow{H_2O} Na^+_{(aq)} + OH^-_{(aq)} + 43.1$ kJ	19.4 kJ $+ NaNO_{3(s)} \xrightarrow{H_2O} Na^+_{(aq)} + NO^-_{3(aq)}$
ייצוג מילולי	הכנסנו כמות נתרן הידרוכסידי לכוס עם מים מזוקקים, ערבבנו וחשנו כי לאחר שכל החומר התמוסס התמיסה התחממה. או: במהלך המסת החומר היוני במים, טמפרטורת התמיסה עלתה.	הכנסנו כמות של נתרן חנקתי לכוס עם מים מזוקקים וחשנו כי לאחר שכל החומר התמוסס התמיסה התקררה. או: במהלך המסת החומר היוני במים, טמפרטורת התמיסה ירדה.

סיכום ביניים שני

מושגים ועקרונות

- בין מערכת (מוקד התייחסותנו) לבין סביבתה (כל היתר) עשויים להתקיים מעברי אנרגיה שונים.
- מעברי אנרגיה המתקיימים בין מערכת לסביבה יכולים לבוא לידי ביטוי על ידי: חימום, עבודה, קרינה, או צירוף של מעברים אלו.
- בתגובה כימית, האנרגיה הפנימית של מערכת עשויה לעלות או לרדת תוך כדי מעברי אנרגיה מסוגים שונים.
- כאשר תגובה כימית מתרחשת בתנאים בהם הלחץ הוא קבוע (כגון כלי פתוח), מעברי האנרגיה נקראים שינויי אנתלפיה ומסומנים ב-ΔH.
- יחידות המידה המקובלות של אנרגיה הן ג'אול וקילו ג'אול.
- במהלך ההתרחשות של תגובה כימית, השינוי באנרגיה פנימית של המערכת שווה לכמות האנרגיה המשתחררת אל הסביבה או הנקלטת ממנה.
- **תגובה אקסותרמית** - תגובה אשר במהלכה חלה ירידה באנתלפיה של המערכת, כי האנתלפיה של התוצרים נמוכה מזו של המגיבים. הפרש האנתלפיה בין מרכיבי המערכת ניפלט לסביבה.
- **תגובה אנדותרמית** - תגובה אשר במהלכה חלה עלייה באנתלפיה של המערכת, כי האנתלפיה של התוצרים גבוהה מזו של המגיבים. הפרש האנתלפיה בין מרכיבי המערכת ניקלט מהסביבה.
- לשינוי האנתלפיה ΔH המתרחש בעת תגובה כימית יש דרכי ייצוג שונות.
- בתיאור גרפי של תגובה, הציר האנכי (↑) מציין את האנרגיה. משרטטים שני קווים אופקיים (—) המייצגים את האנרגיה הפנימית (האנתלפיה) של המגיבים והתוצרים. כותבים על הקווים את נוסחאות החומרים על פי הנתונים. חץ המחבר בין הקווים מסמן מעבר מהמגיבים אל התוצרים ולידו כותבים את ערכו או סימנו של ΔH.

רמות ההבנה בכימיה

כדי להבין היטב כימיה ולהצליח לענות נכון על שאלות, מומלץ לתת תשובות הכוללות רמות הבנה רבות ולקשור ביניהן. מבחינים בין ארבע רמות הבנה שונות בכימיה בעזרתן ניתן להסביר תופעות שונות.

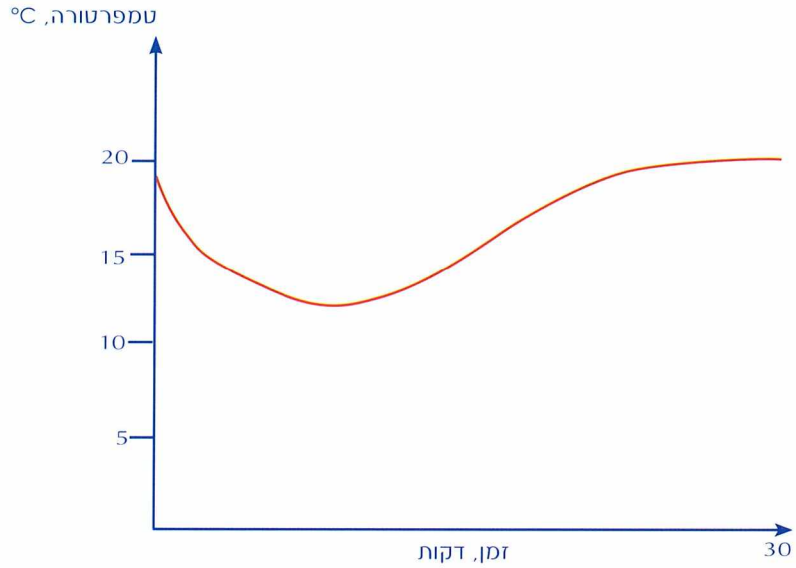
- **רמה מאקרוסקופית** – ברמה זו מתארים תכונות אשר ניתן להבחין בהן בעזרת חושינו או בעזרת שימוש במכשירי מדידה שונים. לדוגמה: זיהוי מוליכות חשמלית, שינוי צבע, שינוי טמפרטורה, שינוים בדרגת חומציות (pH), קבלת משקעים, שמיעת קול נפץ, ריח חריף וכו'.
- **רמה מיקרוסקופית (החלקיקית)** – ברמה זו מסבירים את התכונות והשינויים השונים המתרחשים תוך כדי התייחסות אל החלקיקים המיקרוסקופים אשר מרכיבים את החומרים. לדוגמה: מולקולות, יונים, אטומים, אלקטרונים וכו'.
- **רמת הסמל** – ברמה זו משתמשים בייצוגים המהווים את שפת הכימאים. לדוגמה: ניסוח תגובות ואיזונן, סמלים כימיים, שרטוט גרפים, ציור מודלים.
- **רמת התהליך** – ברמה זו קושרים את מכלול השינויים תוך כדי שילוב הרמות הקודמות ומוסיפים היבטים אנרגטיים או קינטיים.

שאלה ותשובה על פי רמות ההבנה בכימיה

מתוארת התופעה הבאה:

חמישה גרם נתרן חנקתי $NaNO_3$ מוצק הוכנסו לתוך 100 מ"ל מים המצויים בכוס כימית. נמדדה הטמפרטורה של המים מרגע הכנסת המוצק למשך 30 דקות. התמיסה עורבבה והמוצק התמוסס כולו.

הגרף שלפניכם מתאר את השתנות הטמפרטורה כתלות בזמן הניסוי.



שאלה

מהו התהליך אשר התרחש במהלך הניסוי? התייחסו בתשובתכם לארבע רמות ההבנה בכימיה – מאקרוסקופית, מיקרוסקופית, סמל ותהליך.

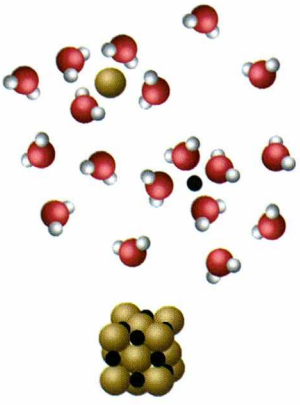
תשובה מפורטת

תיאור התהליך על פי ארבע רמות הבנה בכימיה

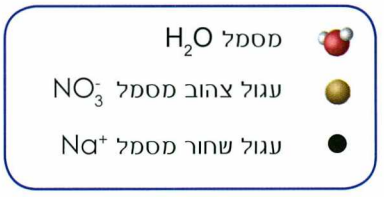
I. ברמה **מאקרוסקופית** – אנו רואים, כי החומר המוצק כביכול "נעלם". כמו כן, ניתן לראות מהגרף שהטמפרטורה הנמדדת בתמיסה יורדת ואחר כך חוזרת לטמפרטורה ההתחלתית.

II. ברמה **מיקרוסקופית** – נוכל לומר, כי המוצק שהוכנס הוא חומר יוני המכיל יונים חיובים של נתרן Na^+ ויונים חנקתיים שליליים NO_3^- הקשורים אלה לאלה בקשרים חזקים, תוך כדי יצירת סריג בעל מבנה ענק של קטיונים מוקפים אניונים וההיפך. לאחר הכנסת המוצק למים, שהם נוזל הבנוי ממולקולות קוטביות, מתקבלת תמיסה המכילה את היונים הנ"ל כאשר הם ממוימים, כלומר מוקפים מולקולות מים.

III. ברמת **הסמל** – ניתן להשתמש בניסוח בעזרת סמלים כימיים וכן אפשר להוסיף גם ציור המתאר את שינוי המבנה הגבישי ליונים ממוימים.



$$NaNO_{3(s)} \xrightarrow{H_2O} Na^+_{(aq)} + NO^-_{3(aq)}$$



IV. ברמת **התהליך** – התשובה כוללת שילוב של מספר רמות ומתבססת על מושגים הקשורים למבנה החומר.[1] התרחש תהליך המסה של החומר היוני נתרן חנקתי, בו התפרקו הקשרים הקיימים בין היונים החיוביים והשליליים כיון שנוצרים קשרים חדשים של משיכה חשמלית בין היונים לבין מולקולות המים המקיפות אותם. יצירת קשרים חדשים אלו משפיעה גם על מערך קשרי המימן בין מולקולות המים. מירידת הטמפרטורה הנמדדת בתמיסה, אנו מסיקים כי תהליך ההמסה צורך אנרגיה. כלומר שסך כל האנרגיה הדרושה לפירוק הקשרים בחומר המוצק, גדולה יותר מהאנרגיה הנפלטת ביצירת קשרים חדשים בין היונים למולקולות המים. אנרגיה הנקלטת מהסביבה מאפשרת את התרחשותו של התהליך. אנרגיה זו נלקחה מהסביבה ולכן האנרגיה הפנימית של המים ירדה וזה התבטא בירידה באנרגיה הקינטית הממוצעת של המולקולות, כלומר ירידה בטמפרטורה. התגובה התרחשה בכוס העשויה זכוכית, שהיא מערכת לא מבודדת הנמצאת בסביבה בעלת טמפרטורה גבוהה יותר. עקב כך, אנרגיה מהסביבה מועברת לתמיסה וטמפרטורת התמיסה תחזור ותעלה ולאחר זמן יהיה שוויון בין טמפרטורת הסביבה והתמיסה. טמפרטורת התמיסה ירדה בצורה הדרגתית עד לגמר ההמסה ולאחר מכן שבה ועלתה עד לטמפרטורה ההתחלתית של התמיסה ולא השתנתה יותר.

---

1 ניתן להרחיב את ההסבר לתגובת ההמסה תוך שימוש במושג האנטרופיה, מושג אשר תלמדו בשלב מאוחר יותר.

שאלות

השאלות 1-5 קשורות לתגובה המתארת את פירוק סידן פחמתי $CaCO_{3(s)}$ לסידן חמצני $CaO_{(s)}$ ולפחמן דו חמצני $CO_{2(g)}$:

$$CaCO_{3(s)} \rightarrow CaO_{(s)} + CO_{2(g)} \quad \Delta H = +177\ kJ$$

1. הציגו את הרשום לעיל בשלושה ייצוגים נוספים כמפורט בטבלה 3.
2. כמה אנרגיה תיפלט או תיקלט (החליטו!) כאשר 50 גרם סידן פחמתי יתפרקו לסידן חמצני ולפחמן דו חמצני?
3. האם בתגובה הנ"ל, האנרגיה הפנימית של המגיבים גדולה/קטנה מהאנרגיה הפנימית של התוצרים?
4. מהו שינוי האנרגיה בסביבה כאשר 500 גרם סידן פחמתי יתפרקו לתוצרים הנ"ל?
5. *[1]האם לדעתכם יתקבלו ערכים שונים לחישוב השינוי באנתלפיית התגובה לעומת חישוב השינוי באנרגיה הפנימית של התגובה?
6. קראו את הקטע הבא וענו על השאלות בעקבותיו.

דלק ירוק? כדאי לבדוק!

מקורות הנפט המתכלים והולכים ומחירי הדלק המאמירים ברחבי העולם, גרמו להפניית משאבים לחיפוש תחליפים זולים וזמינים יותר. אחד מהכיוונים החדשים, הוא שימוש בדלקים המופקים מצמחים כגון תירס או קנה סוכר המהווים מקור לגלוקוז.

נמצא, כי כאשר מפיקים אתאנול מקנה סוכר לעומת הפקת האתאנול מתירס, מקבלים כמות גדולה יותר של אתאנול מקנה הסוכר.

ניתן להפיק אתאנול C_2H_5OH בתהליך תסיסה המתואר בניסוח הבא:

$$C_6H_{12}O_{6(aq)} \rightarrow 2C_2H_5OH_{(l)} + 2CO_{2(g)} \quad \Delta H^o>0$$

את האתאנול ניתן לערבב עם בנזין המכיל בעיקר דלק אוקטאן C_8H_{18} ולמכור לצרכנים.

בארה"ב פועלות כיום כ-500 תחנות דלק (מתוך כ-180,000 תחנות בכל המדינה), המספקות דלק מסוג זה ורובן ממוקמות במדינות עשירות בשדות תירס, כגון מינסוטה.

דלק אחר, ביו-דיזל, הנמכר כבר בארצות אירופה, מופק משמן תירס בתהליך בו הוא מגיב עם כוהל בנוכחות נתרן הידרוכסידי. הדלק הנוצר מעורבב עם סולר ביחס 1 ל-20. הדבר מוזיל את מחיר הדלק לליטר ומוריד את זיהום האוויר הנגרם משריפת דלק העשוי רק סולר. הדלק המתקבל מתאים למנועי דיזל המניעים משאיות, טרקטורים ואוטובוסים.

1 שאלת רשות מסומנת ב-*

א. מדוע נחשבים צמחים למקורות אנרגיה זמינים ואילו נפט נחשב מקור אנרגיה מתכלה?

ב. מדוע הפקת אתאנול מקנה סוכר עדיפה על פני הפקת אתאנול מתירס?

ג. נסחו את תגובות השריפה המלאה של אתאנול C_2H_5OH ושל אוקטאן C_8H_{18}.

ד. הסבירו מדוע מתערבב אתאנול עם אוקטאן?

ה. האם השינוי באנתלפיית התגובה של שריפת הדלק, חיובי או שלילי? נמקו.

ו. האם טמפרטורת הסביבה בעת שריפת דלק תעלה, תרד, או לא תשתנה?

ז. הראו באמצעות גרף את השינוי החל בטמפרטורה של הסביבה.

7. קראו את הקטע הבא וענו על השאלות בעקבותיו.

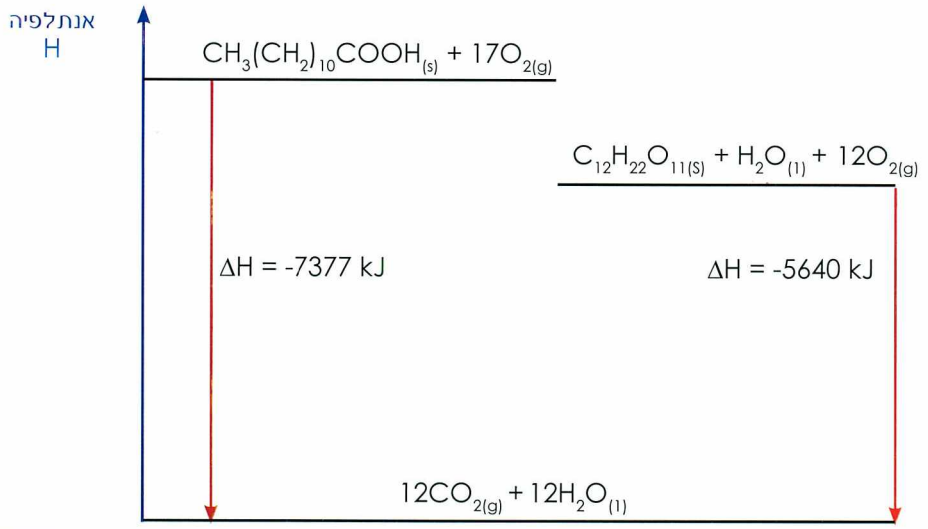
כימיה וחדר הכושר - מה הקשר?

רבים מאיתנו עוסקים בספורט. תרגול אירובי, ספינינג, משחקי טניס, הרמת משקולות וריצה, הם כמה דוגמאות. מהיכן אנו לוקחים את האנרגיה הדרושה לכך? חלקה נלקחת מהשומנים בגוף, המהווים את מאגר האנרגיה שלנו. במהלך העיסוק בספורט, מולקולות שומן מתפרקות לתרכובות הקרויות חומצות שומן, כגון החומצה הפלמיתית $CH_3(CH_2)_{14}COOH$. חומצות שומן אלו הופכות במהלך סדרה של תגובות, לפחמן דו חמצני ולמים. האנרגיה המשתחררת במהלך תגובות אלו, מאפשרת את פעולת השרירים הנחוצה לשיפור הכושר הגופני.

נתון כי: $CH_3(CH_2)_{14}COOH_{(s)} + 23O_{2(g)} \rightarrow 16CO_{2(g)} + 16H_2O_{(l)}$ $\Delta H = -9977$ kJ

א. תארו באופן גרפי את שינוי האנרגיה במהלך ההתרחשות של התגובה הנ"ל.

כאשר משווים תגובות שריפה של תרכובות שונות, המכילות מספר פחמנים שווה, כגון חומצת שומן לאורית ($CH_3(CH_2)_{10}COOH$), או פחמימה כגון דו סוכר ($C_{12}H_{22}O_{11}$), מתקבל הגרף הבא:



ב. באיזה מקרה תשתחרר אנרגיה רבה יותר: בשריפת 1 מול חומצת שומן לאורית או בשריפת 1 מול דו סוכר? נמקו.

ג. הנתונים בספרות מראים, כי הערך הקלורי של 1 גרם סוכר הוא כ-4 קק"ל. הסתמך על הנתונים בשאלה ובדוק נתון זה.

ד. אנרגיה זמינה מתקבלת בגוף כאשר אנו צורכים פחמימות. אולם, מאגר האנרגיה בגוף לטווח ארוך כולל מולקולות של שומן ומהווה כ- 17% ממשקל הגוף. כיצד היה משתנה משקל גופנו, לו מאגר האנרגיה בגוף היה מכיל מולקולות סוכר בלבד? נמקו תשובתכם.

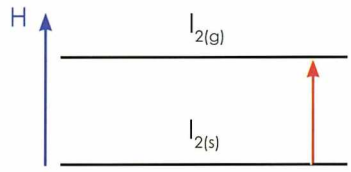
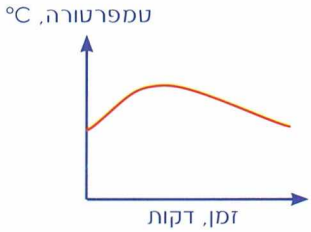
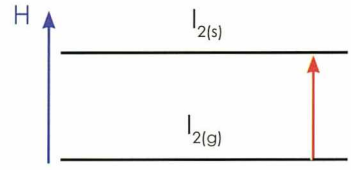
8. השאלה דנה בתגובת השריפה המלאה של סוכרוז $C_{12}H_{22}O_{11\,(s)}$.

א. נסחו את תגובת השריפה המלאה של סוכרוז (תוצרי השריפה הם פחמן דו חמצני גזי ומים במצב צבירה נוזלי).

ב. *כיצד יש לבצע את הניסוי על מנת לחשב את השינוי באנרגיה הפנימית של התגובה וכיצד יש לבצע את הניסוי על מנת לחשב את השינוי באנתלפיה של התגובה?

ג. *לגבי התגובה הנ"ל נמצא כי אין הבדל כמותי בין השינוי באנרגיה הפנימית והשינוי באנתלפיית התגובה. הסבירו מדוע.

9. לפניכם טבלה הכוללת מידע עבור תהליכים בייצוגים שונים. התאימו מידע הנתון בטור אחד (1-6) למידע הנתון בטור שני (א-ג).

1	$H_2O_{(s)} \rightarrow H_2O_{(l)}$ $\Delta H>0$	א	$I_{2(s)} \rightarrow I_{2(g)}$
2	$KOH_{(s)} \xrightarrow{H_2O} K^+_{(aq)} + OH^-_{(aq)}$ $\Delta H<0$	ב	במהלך תהליך הקיפאון של מים במקפיא הביתי נפלטת אנרגיה.
3		ג	במהלך המסת אשלגן הידרוכסידי $KOH_{(s)}$ במים נמדדה הטמפרטורה. הגרף הבא מתאר את השינוי בטמפרטורה: 
4	$KOH_{(s)} \xrightarrow{H_2O} K^+_{(aq)} + OH^-_{(aq)}$ $\Delta H>0$		
5	$H_2O_{(l)} \rightarrow H_2O_{(s)}$ $\Delta H<0$		
6			

בקצב התגובות

נחזור וניזכר בניסוי הזיקוקים, איתו התחלנו את הפרק, ונקרא את השאלות שנשאלו. חלקן התייחס לשלב **בעירת** הזיקוק ועליהן אנו יכולים לענות כעת. למדנו, שתהליך הבעירה של הזיקוק הוא תהליך אקסותרמי, במהלכו קיים מעבר אנרגיה לסביבה בצורה של אור הלהבה שעל הזיקוק וגיצים מאירים וכן מתרחש חימום של הסביבה. היבטים אלו נקראים היבטים אנרגטיים והם קשורים לשינוי באנתלפיה שחל במהלך התרחשותה של תגובה, כפי שלמדתם בפרק זה.

נתייחס כעת לשאלה הקשורה לשלב **הדלקת** הזיקוק:

- מדוע לא התחילה בעירת הזיקוק אלא לאחר הדלקת הקצה בגפרור (או באמצעי הדלקה אחר)?

נוכל להרחיב ולשאול באופן דומה לגבי תגובות כימיות באופן כללי:

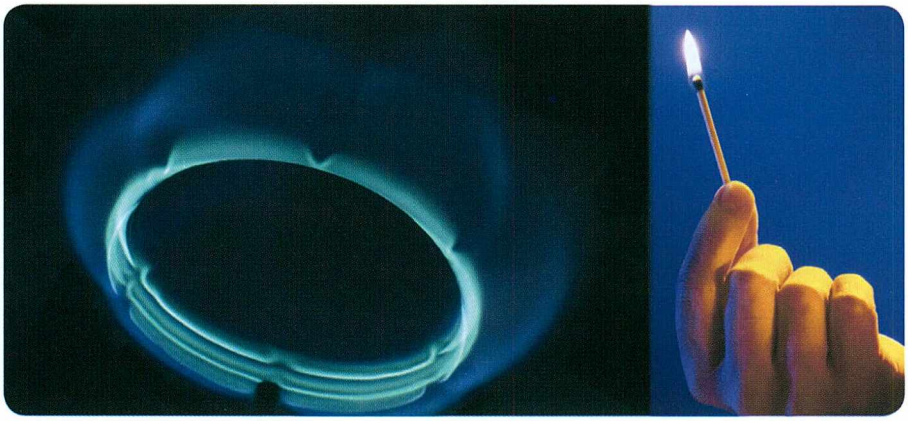
- כיצד מתחילה תגובה כימית?
- מדוע יש תגובות המתחילות להתרחש רק לאחר השקעת אנרגיה?

היבטים, הקשורים לאופן בה תגובה **מתחילה** להתרחש, קשורים לתחום הנקרא קינטיקה כימית ועל כך נלמד כעת.

תגובות כימיות שונות מתחילות להתרחש בתנאים שונים. יש תגובות המתרחשות מיד כאשר המגיבים באים במגע. לדוגמה, ערבוב שתי תמיסות המכילות יונים ממוימים, היוצרים חומר חדש, חומר יוני בעל מסיסות נמוכה במים (תגובת שיקוע).

יש תגובות כימיות בהן דרושה השקעה של אנרגיה התחלתית על מנת שהתגובה תתרחש. לדוגמה, תערובת הגזים מימן וחמצן, הנמצאת במיכל בטמפרטורת החדר, אינה משתנה לאורך זמן, אך אם יועבר ניצוץ חשמלי במיכל, התערובת תגיב תוך כדי התפוצצות בה תיפלט אנרגיה ויתקבלו מים. אנו יכולים להבין מנתונים אלו, שהתגובה בין מימן לחמצן היא תגובה אקסותרמית. אולם עובדה זו אינה מסבירה את העובדה שבתנאים מסוימים התגובה לא התרחשה כלל ובתנאים אחרים התגובה התרחשה תוך כדי התפוצצות (במהירות וב"עוצמה").

דוגמה נוספת, החומרים המצויים בכרית אוויר במכונית אינם מגיבים ביניהם אלא כאשר ניצוץ מועבר אליהם במקרה והמכונית ספגה מכה חזקה בעת תאונה. העברת הניצוץ גורמת להתרחשות תגובה, שבמהלכה נפלט גז המנפח את הכרית וזו מונעת פגיעה בנוסעים.



איך מתחילה תגובה?

נוכל לשאול עצמנו:

- מדוע הזיקוק לא בער לפני שהדלקנו אותו עם הגפרור?
- מדוע הגזים מימן וחמצן אינם מגיבים אלא לאחר העברת ניצוץ חשמלי בתערובת?

גם תגובות שהן אקסותרמיות בעת התרחשותן לא **יתחילו** להתרחש אם לא תסופק אנרגיה מסוימת התחלתית, הנקראת **אנרגיית שפעול** (Activation Energy), כלומר, האנרגיה הגורמת לתגובה לפעול, להתרחש.

לתגובות המתרחשות באותה טמפרטורה, יש אנרגיות שפעול שונות ולכן השקעת האנרגיה ההתחלתית הדרושה שונה במקרים שונים.

לדוגמה, התגובות של שריפת גפרור, נייר או עץ הן כולן דוגמאות לתגובות אקסותרמיות, הגורמות בעת התרחשותן לפליטת אנרגיה אל הסביבה. אולם אף לא אחת מהתגובות הנ"ל מתרחשת ללא השקעת אנרגיה התחלתית שהיא אנרגיית השפעול.

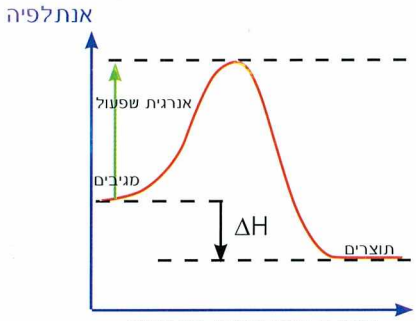
אנרגיית השפעול של הדלקת החומר המצוי בראש הגפרור היא נמוכה. מספיק שפשוף חזק הגורם לחיכוך והגפרור נדלק ובוער. אנרגיית השפעול של שריפת גוף הגפרור גבוהה יותר והוא יידלק רק לאחר שראש הגפרור יבער. נייר יידלק אם נקרב אליו גפרור בוער ומדורה תידלק אם נקרב לעצים ניירות בוערים. בכל מקרה, נדרשה אנרגיה התחלתית שונה על מנת לגרום לתגובה להתרחש.

כדי להסביר זאת עלינו להבין מהי אנרגיית שפעול.

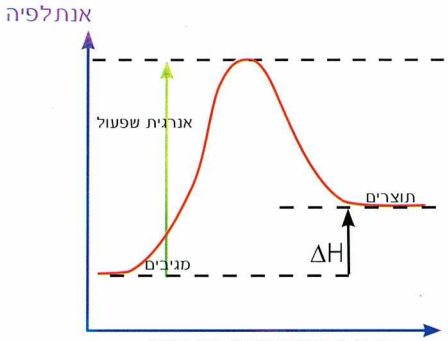
בשלב זה, נסתפק בהסבר קצר אשר יורחב בהמשך לימודיכם. נאמר, כי אנרגיית השפעול היא מחסום אנרגטי שיש להתגבר עליו. על מנת שתגובה תתרחש, דרושה קירבה גדולה בין חלקיקי החומר, אולם ככל שהקירבה בין החלקיקים גדולה יותר, גדלה גם הדחייה בין החלקיקים.[1] על מנת להתגבר על דחייה זו, יש לספק אנרגיה למגיבים. אם המגיבים הם גזים, נוכל לומר כי אנרגיית השפעול היא האנרגיה הקינטית המינימאלית הדרושה להתחלת התגובה.

ככל שאנרגיית השפעול של תגובה היא גבוהה יותר דרושה השקעת אנרגיה התחלתית רבה יותר על מנת שתתחיל להתרחש תגובה ונוכל להבחין בתוצרים.

ניתן להמחיש באופן גרפי סכמטי את השילוב בין האנרגיה שיש להשקיע (אנרגיית השפעול) על מנת שתגובה תצא לפועל, לבין שינוי האנרגיה הכרוך בהתרחשותה של התגובה. איור 5 מתייחס לתגובה אקסותרמית ואיור 6 מתייחס לתגובה אנדותרמית.



איור 5 התקדמות התגובה



איור 6 התקדמות התגובה

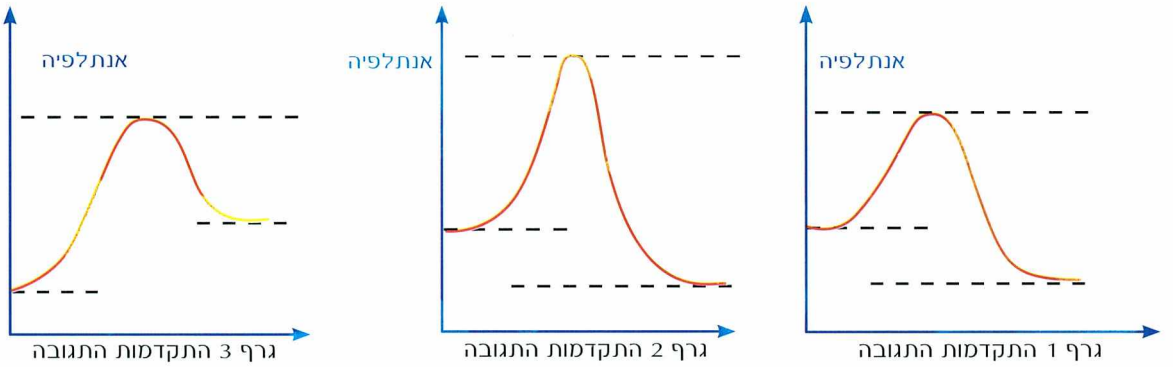
1 יוצא דופן הוא המצב בו מתרחשת תגובה בין יונים בעלי מטען חשמלי מנוגד. שם הקרבה אינה מגדילה את הדחייה.

שאלות בנושא קצב התגובות

1. ניסוי בית - קרבו גפרור דולק לפתיל של נר ולקיסם. בשני המקרים מתרחשת תגובה אקסותרמית. באיזה מהמקרים אנרגיית השפעול גבוהה יותר?

2. בעת השימוש בכיריים גז במטבח הביתי, או במבער במעבדה, מתקיימת שריפת גז הבישול.
   א. האם תוכלו לומר על סמך ניסיונכם אם התגובה הנ"ל היא אקסותרמית או אנדותרמית? נמקו.
   ב. על מנת שגז הבישול יבער בכיריים, עלינו להשתמש באמצעי הדלקה כלשהו. מדוע?
   ג. הראו תיאור גרפי סכמטי המתאר את האנרגיה בתהליך שריפת גז הבישול.

3. נתונים שלושה גרפים (1,2,3), המתארים היבטים אנרגטיים במהלך התקדמותן של שלוש תגובות כימיות (היחידות על הצירים זהות).



מהו ההיגד הנכון?

א. תגובות 1 ו-3 הן אקסותרמיות ויש להן אותה אנרגיית שפעול.

ב. אנרגיית השפעול של תגובה 2 גדולה מאנרגיית השפעול של תגובה 1.

ג. לתגובות 1 ו-3 אותו שינוי באנתלפיה.

ד. התגובות 1 ו-2 הן תגובות אנדותרמיות.

פעילות לסיכום הפרק

קראו את הקטע הבא וענו על השאלות בעקבותיו:

דינמיט במלחמה ושלום

אלפרד נובל, מייסד פרס נובל לשלום, עסק בפיתוח וייצור של חומרי נפץ.

בזמנו, הניטרוגליצרין היה מוכר כנוזל לא יציב, כלומר כחומר שעלול להתפוצץ מכל זעזוע קטן.

כדי לשלוט במועד התפוצצות החומר, בלי לפגוע בעוצמת הפיצוץ, הוסיף נובל לניטרוגליצרין $C_3H_5N_3O_{9(l)}$ אבקה על בסיס סיליקון והחליפה אחר כך בנסורת עץ. כך יצר נובל ב-1867 את הדינמיט, חומר נפץ שאפשר לשלוט בו. מאז, נעשה בחומר זה שימוש רב בעתות שלום, אך גם במלחמה.

הדינמיט שהוזכר וטרינטרוטולואן (T.N.T) שנוסחתו $C_6H_2CH_3(NO_2)_3$, הם דוגמאות של חומרי נפץ. לכל הפיצוצים יש דפוס משותף: התפרקות תוך כדי שיחרור מהיר של אנרגיה רבה מתוך מקור בעל נפח מצומצם. בנוסף לכך, התפוצצותו של חומר כימי, מלווה לרוב גם בהתפשטות מהירה של חומרים במצב גזי. כלומר, לחומר נפץ כימי (תערובת או חומר יחיד) יש מאפיינים מסוימים, שמודגמים בתגובת הפירוק של ניטרוגליצרין:

$$4C_3H_5N_3O_{9(l)} \rightarrow 6N_{2(g)} + 12CO_{2(g)} + 10H_2O_{(g)} + O_{2(g)} \quad \Delta H<0$$

כאשר חומר הנפץ הוא תערובת של מספר חומרים, ערבוב טוב שלהם, יזרז את הפיצוץ. לעומת זאת, בחומרי נפץ כמו ניטרוגליצרין ואחרים, מיושם רעיון הערבוב בצורה משוכללת יותר: מולקולות החומר האחד, מכילות את כל "הרכיבים" השונים הדרושים באותה מולקולה. ממציא הדינמיט, אלפרד נובל, אשר הצטער על השימוש המלחמתי אשר נעשה בדינמיט, הותיר בצוואתו חלק ניכר מהונו לציון תרומות משמעותיות לטובת האנושות. הוקמה קרן על שמו, שמחלקת כל שנה פרסים על הישגים בולטים בחמישה תחומים: כימיה, פיסיקה, ספרות, רפואה ושלום. פרסים אלה מקנים כבוד רב למקבליהם.

מעובד לפי המקורות הבאים:

chemmatters פברואר 2003

חומרי נפץ - www.globalsecurity.org

http://nobelprize.org/index.html

יוסף אלמוג, "מדע" עיתון מדעי לכל, כרך ל"ג מספר 1: "זיהוי חומרי נפץ".

ענו על השאלות:

1. מהו חומר לא יציב על פי הכתוב בקטע?
2. מדוע התגובה הנתונה מתאימה לתהליך בו מתרחש פיצוץ?
3. כיצד הוספת מוצק, כגון נסורת עץ, משפרת את השליטה בחומר הנפץ שנובל פיתח?
4. מהו סוג התגובה המתרחשת בעת הפיצוץ (אקסותרמית או אנדותרמית)? תארו באופן גרפי את התגובה.
5. אלו היבטים אנרגטיים והיבטים קינטיים מוזכרים בקטע הנ"ל?

פרק ב

שינויי אנרגיה בתגובות כימיות - כמה?

- כמה אנרגיה נפלטת במהלך התרחשות של תגובה כימית?
- איך מחשבים את שינוי האנרגיה בתגובה שלא ביצענו?
- מה הקשר בין הקשרים הניתקים והנוצרים במהלך תגובה לשינויי האנרגיה?
- כמה אנרגיה דרושה להיתוך קרחון?
- כמה חמצן נוזלי דרוש לשיגור מעבורת?
- להיכן ולמה "נעלמת" האטמוספירה של מאדים בחורף?

על שאלות אלו ועל שאלות רבות אחרות תוכלו לענות לאחר לימוד הפרק השני

מבוא

בסיומו של פרק א, קראתם קטע המספר על גילוי הדינמיט על ידי אלפרד נובל. בעקבות קריאת הקטע, מתעוררות שאלות נוספות, כגון: מהי כמות הדינמיט הדרושה לפריצת דרך באזור הרר', לשם בניית כביש מהיר? כמה אנרגיה תיפלט במהלך הפיצוץ?

הניסיון שלנו מלמד, כי שריפת גפרור ושריפת עצים במדורה הם תהליכים אקסותרמים. אולם, האנרגיה הנפלטת משריפת גפרור היא נמוכה בהרבה מהאנרגיה הנפלטת ממדורה למרות שבשני המקרים נשרף אותו חומר.

בפרק זה נדון בשאלה הכללית: מהי **כמות** האנרגיה הנפלטת או הנקלטת במהלך התרחשותה של תגובה כימית ונציג שיטות שונות לחישוב השינוי באנתלפיה, ΔH, במהלך התרחשותה של תגובה.

הרכיבו משקפי מגן והקפידו על חדר מאוורר

ניסוי 1 - ניסוי עם שקיות חימום*

חומרים וציוד לכל קבוצת תלמידים או להדגמה

שקיות חימום חד- פעמיות בגדלים שונים.

מהלך הניסוי - אם אתם פותחים את השקית הפנימית עבדו במנדף והימנעו משאיפת החומר!

- לפניכם שתי שקיות חימום. ערכו השוואה בין שתי השקיות הפנימיות, על פי הנתונים הכתובים עליהן,

  וסכמו זאת בטבלה.
- קראו את הכתוב על השקיות ופעלו על פי ההוראות.
- הוסיפו תצפיותיכם לטבלה.

שאלות בעקבות הניסוי

1. מהו סוג התגובה (אנדותרמית או אקסותרמית) אשר התרחשה בכל שקית?
2. היעזרו בנתונים הרשומים על השקית והעלו השערה לגבי מרכיבי התגובה המתרחשת בשקית.
3. מהי המערכת ומהי הסביבה בניסוי ?
4. מהם הגורמים המשפיעים על כמות האנרגיה המועברת?
5. חישבו האם וכיצד נוכל לדעת/לחשב כמה אנרגיה הועברה במהלך הניסוי?

* להרחבה בנושא ראו חקר אירוע "שקית מחממת - תגובה כימית מהממת!" בספר, מעבדות חקר ממוחשבות והדמייה מולקולרית בכימיה, הרשקוביץ א. קברמן, צ. ששון ע. - הטכניון.

דרכים למדידת שינוי באנתלפיה

שינויי אנתלפיה תקנית

בעת החישוב של שינוי האנתלפיה, נוהגים להתייחס לתגובות בהן החומרים המשתתפים נמצאים בתנאי תקן, כלומר החומרים הם חומרים טהורים והגזים מתנהגים כגזים אידיאלים. מתייחסים לחומרים גזים הנמצאים בלחץ של 1 אטמוספירה, ותמיסות המצויות בריכוז 1M.

תגובות בהן החומרים בתנאי תקן יכולות להתקיים בטמפרטורות שונות. הטמפרטורה המקובלת היא טמפרטורת החדר (298K) 25°C והנתונים השונים מתייחסים בדרך כלל לטמפרטורה זו אלא אם צוין אחרת.

השינוי באנתלפיה כאשר החומרים במצב תקני נקרא: שינוי אנתלפיה **תקנית**. שינוי באנתלפיה תקנית יסומן כך: ΔH^{o}.

מדידת שינויי אנתלפיה

ניתן למיין את דרכי החישוב של שינוי האנתלפיה התקנית, ΔH^{o} של תגובה כימית, לשיטות עיוניות ולשיטות ניסוייות.

שיטה עיונית היא שיטה המתבססת על נתונים אשר מופיעים בספרות המדעית. נציג בפרק זה את חוק הס וכמה שימושים שלו.

- שימוש בחוק הס (כללי).
- שימוש בחוק הס בהקשר לשינויים במצבי צבירה.
- שימוש בחוק הס בהקשר לאנתלפיות קשר
- שימוש בחוק הס בהקשר לאנתלפיות התהוות (העשרה)
- שימוש בחוק הס בהקשר לאנתלפיות שריפה (העשרה)

שיטה ניסויית היא שיטה המתבססת על ביצוע התגובה המבוקשת, איסוף נתונים במהלך הניסוי, ועריכת חישובים המבוססים על ממצאי הניסוי.

חישובים מראים, כי ההבדל בין שינויים באנתלפיה (ΔH^{o}) של אותה תגובה המתרחשת בטמפרטורות שונות, הוא זניח, וניתן לקבל את ערכו של ΔH^{o} כערך קבוע שאינו משתנה עם הטמפרטורה, כל עוד מצבי הצבירה של החומרים אינם משתנים.

חישוב השינוי באנתלפיה התקנית של תגובה בעזרת חוק הס

היות ואנתלפיה H היא גודל התלוי במצב, כלומר גודל התלוי בחומרים הנדונים, הרי שההפרש בין האנתלפיה של תוצרים לבין האנתלפיה של מגיבים יהיה **קבוע**, ואין חשיבות לדרך שבה הפכו המגיבים לתוצרים.

נסביר זאת כך:

נניח, שנתונה התגובה הבאה, בה מסומנים חומרים על ידי אותיות: A+B → G+M

ואנו מעוניינים לדעת מהו ערכו של ΔH° לתגובה זו. אמנם ניתן לקבל את התוצרים G+M ישירות מהמגיבים A+B, כפי שנוסח לעיל, אך אפשר לקבל אותם גם בסדרה אחרת של תגובות. בתגובות אלו נוצרים תוצרי ביניים כגון E+F - ו C+D היוצרים לבסוף G+M.

ידועים לנו ערכי ΔH° עבור התגובות האחרות:

$$A+B \rightarrow \cancel{C}+\cancel{D} \qquad \Delta H^{\circ}_1$$
$$\cancel{C}+\cancel{D} \rightarrow \cancel{E}+\cancel{F} \qquad \Delta H^{\circ}_2$$
$$\cancel{E}+\cancel{F} \rightarrow G+M \qquad \Delta H^{\circ}_3$$

ניתן לסכם את החומרים הרשומים על ידי חיבור המגיבים הרשומים באגף שמאל וחיבור התוצרים באגף ימין. כאשר עושים זאת, חומרים המופיעים בשני האגפים נמחקים. פירוש המחיקה הוא שהחומר נוצר והתפרק ולכן אינו מופיע בניסוח הסופי.

כאשר מסכמים את ניסוחן של שלוש התגובות הנ"ל, מקבלים את ניסוח התגובה המבוקשת:

$$A+B \rightarrow G+M$$

לכן, הסכום של ערכי ΔH° של שלוש התגובות הנתונות, שווה לערכו של ΔH° עבור התגובה המבוקשת. כלומר:

$$\Delta H^{\circ} = \Delta H^{\circ}_1 + \Delta H^{\circ}_2 + \Delta H^{\circ}_3$$

נוכל להכליל ולטעון כי:

*אם נוכל לחבר, לחסר או להכפיל ניסוחים של תגובות נתונות, כדי לקבל ניסוח של תגובה חדשה מבוקשת, הרי שצריך לבצע את **אותן פעולות חשבון** עם ערכי ΔH° של אותן תגובות כדי לקבל את ערכו של ΔH° עבור התגובה המבוקשת.*

ניתן לנסח זאת גם באופן הבא:

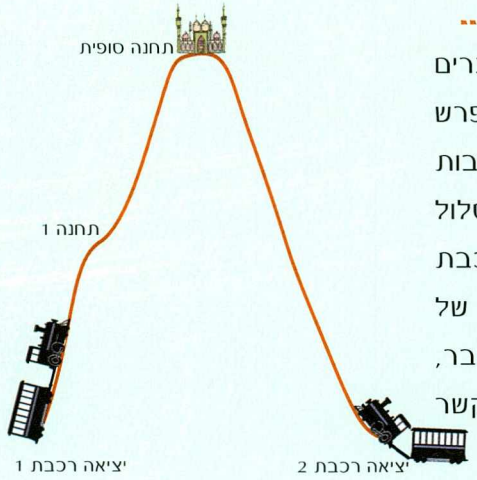
ההפרש באנתלפיית התגובה הוא קבוע ואינו תלוי במספר השלבים בהם התגובה מתבצעת.

עיקרון זה נקרא **חוק הס**, על שמו של Germain Henry Hess כימאי רוסי יליד שוויץ, אשר חקר כיצד ניתן למדוד את האנרגיה הנפלטת במהלכן של תגובות כימיות ובשנת 1840 ניסח את החוק הנ"ל.

השימוש בחוק הס, מאפשר לחשב את ערכו של ΔH° עבור תגובה חדשה, שלא ניתן לבצעה או שבביצועה יש סיכון. החישוב נעשה באמצעות שימוש בניסוח תגובות נתונות ובערכי ΔH° שלהן, כפי שמשתמשים במערכת של משוואות אלגבריות.

זה דומה ל.....

אפשר לדמות את הפרש **האנתלפיה** שבין המגיבים לתוצרים בתגובה כימית, ללא תלות בתגובות שהתרחשו, להפרש **הגובה** בין תחנה ראשונה ותחנה אחרונה של שתי רכבות הרים, ללא תלות בתחנות שבדרך. לשתי הרכבות, מסלול נסיעה העולה מתחתית ההר אל פסגתו. מסלולה של רכבת הרים אחת הוא ישיר ותלול אל הפסגה ואילו מסלולה של הרכבת השנייה שונה וכולל תחנת ביניים. בסופו של דבר, **הפרש הגובה** אשר כל רכבת עלתה הוא זהה, ללא קשר למסלול אשר היא עברה.



דוגמאות פתורות

דוגמה 1

חשבו את השינוי באנתלפיה ΔH° של התגובה.

1. $\frac{1}{2}N_{2(g)} + O_{2(g)} \rightarrow NO_{2(g)}$

בעזרת ערכי ΔH° עבור שתי תגובות אחרות:

2. $\frac{1}{2}N_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow NO_{(g)} \quad \Delta H_2^{\circ} = +90.4\ kJ$

3. $NO_{(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow NO_{2(g)} \quad \Delta H_3^{\circ} = -57.2\ kJ$

פיתרון

כאשר מחברים את שתי התגובות 2 ו-3, מתקבלת תגובה 1, המבוקשת. חומר ביניים $NO_{(g)}$ נוצר בתגובה 2 ומתפרק בתגובה 3, ולכן בעת חיבור הנוסחים 2-3. נוכל למחוק אותו

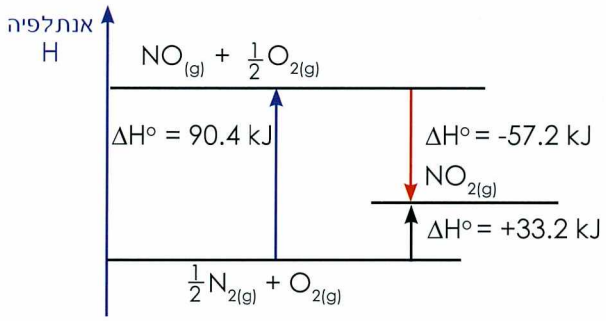
חישוב ערכו של ΔH° לתגובה 1 ייעשה על ידי **סיכום** ערכי ΔH° הנתונים לתגובות 2 ו-3 כפי שרואים להלן:

2. $\frac{1}{2}N_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow \cancel{NO}_{(g)}$ $\Delta H_2^\circ = +90.4\ kJ$

3. $\cancel{NO}_{(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow NO_{2(g)}$ $\Delta H_3^\circ = -57.2\ kJ$

1. $\frac{1}{2}N_{2(g)} + O_{2(g)} \rightarrow NO_{2(g)}$ $\Delta H_1^\circ = +33.2\ kJ$

ניתן להציג את הפיתרון הנ"ל גם בצורה גרפית:



דוגמה 2

נתון מידע על שתי תגובות:

1. $N_2O_{4(g)} \rightarrow 2NO_{2(g)}$ $\Delta H^\circ_1 = +57.2\ kJ$

2. $NO_{(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow NO_{2(g)}$ $\Delta H^\circ_2 = -57.2\ kJ$

חשבו ΔH° עבור התגובה:

3. $2NO_{(g)} + O_{2(g)} \rightarrow N_2O_{4(g)}$ $\Delta H^\circ_3 = ?$

פיתרון

מסתכלים על ניסוח **התגובה 3**, עבורה יש לחשב את ΔH°. החומר $NO_{(g)}$ רשום במגיבים ולפניו מקדם 2. מחפשים את החומר בתגובות האחרות הנתונות. חומר זה רשום במגיבים בתגובה 2, אך ללא מקדם 2. לפיכך, אנו נשתמש בניסוח של תגובה 2, אך נכפיל את כל החומרים הרשומים בה פי 2. גם ערכו של ΔH_2° יוכפל פי 2.

נקבל: 2a. $2NO_{(g)} + 1O_{2(g)} \rightarrow 2NO_{2(g)}$ $\Delta H^\circ_{2a} = -57.4 \times 2 = -114.4\ kJ$

נחזור ונסתכל בתגובה 3. החומר $N_2O_{4(g)}$ מופיע בה כתוצר ומופיע בתגובה 1 כמגיב. המקדם זהה בשני המקרים והוא שווה לאחד. נהפוך את כיוון הרישום של התגובה 1, כך שהחומר שהיה מגיב יהיה רשום כתוצר ובהתאם לכך נהפוך גם את סימנו של ΔH°_1 (זה דומה להכפלה של משוואה אלגברית ב- 1-),

נקבל: $\Delta H^\circ_{1a} = -57.2\ kJ$ $2NO_{2(g)} \rightarrow N_2O_{4(g)}$ .1a זהו ניסוח לתגובה שהיא הפוכה לתגובה 1

כעת, נחבר את ניסוחי שתי התגובות 1a ו-2a שהתקבלו לאחר ביצוע השינויים, ונמחק את החומרים המופיעים גם כמגיבים וגם כתוצרים.

פירוש המחיקה הוא, שהחומר NO_2 נוצר בתגובה אחת והגיב אחר כך בתגובה אחרת, לכן החומר לא נמצא בתגובה הסופית. ניתן למחוק חומרים זהים הנמצאים באותו מצב צבירה ובעלי אותם מקדמים[1].

2a. $2NO_{(g)} + O_{2(g)} \rightarrow \cancel{2NO_{2(g)}}$ $\Delta H^\circ_{2a} = -114.4\ kJ$

1a. $\cancel{2NO_{2(g)}} \rightarrow N_2O_{4(g)}$ $\Delta H^\circ_{1a} = -57.2\ kJ$

מתקבל ניסוח **התגובה 3** וערך ΔH°_3 מבוקש

3. $2NO_{(g)} + O_{2(g)} \rightarrow N_2O_{4(g)}$ $\Delta H^\circ_3 = \Delta H^\circ_{2a} + H^\circ_{1a}$

$\Delta H^\circ_3 = -171.6\ kJ$

שאלות בנושא חוק הס

1. חשבו את ערכו של ΔH° עבור התגובה:

3. $N_2H_{4(g)} + H_{2(g)} \rightarrow 2NH_{3(g)}$

בעזרת התגובות הבאות:

1. $N_{2(g)} + 2H_{2(g)} \rightarrow N_2H_{4(g)}$ $\Delta H^\circ = +50.6\ kJ$

2. $N_{2(g)} + 3H_{2(g)} \rightarrow 2NH_{3(g)}$ $\Delta H^\circ = -92.2\ kJ$

2. קבעו האם התהליך 3. $CH_{4(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow CH_3OH_{(l)}$

הוא תהליך אקסותרמי או אנדותרמי על פי הנתונים הבאים:

1. $C_{(s)} + 2H_{2(g)} \rightarrow CH_{4(g)}$ $\Delta H^\circ = -74.8\ kJ$

2. $C_{(s)} + 2H_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow CH_3OH_{(l)}$ $\Delta H^\circ = -238.9\ kJ$

3. היעזרו בערכי ΔH° לתגובות הנתונות על מנת לחשב את ΔH° לתגובה:

4. $4NH_{3(g)} + 5O_{2(g)} \rightarrow 4NO_{(g)} + 6H_2O_{(g)}$

---

1 אנו מניחים כי החומרים נמצאים גם באותה טמפרטורה, אחרת לא ניתן למחוק אותם.

התגובות הנתונות.

1. $N_{2(g)} + O_{2(g)} \rightarrow 2NO_{(g)}$ $\Delta H^\circ = 180.8\ kJ$

2. $H_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow H_2O_{(g)}$ $\Delta H^\circ = -241.8\ kJ$

3. $N_{2(g)} + 3H_{2(g)} \rightarrow 2NH_{3(g)}$ $\Delta H^\circ = -92.0\ kJ$

קשרים בחומר ושינוי באנתלפיה - מה הקשר?

שני הניסויים הבאים מראים את הקשר בין הסימן של שינוי האנתלפיה לתגובות הפוכות זו לזו.

ניסוי 2 - ממחישים לתלמידים ואת בכיוון הפוך!

הרכיבו משקפי מגן והקפידו על חדר מאוורר!

חומרים וציוד לקבוצת תלמידים או להדגמה

4 מבחנות מסומנות בספרות 1-4, פיפטת פסטר, מים מזוקקים, ספטולה דקה, אטב עץ, בונזן, גפרורים.

1 גרם $CuSO_{4(s)}$

1 גרם $CuSO_4 \cdot 5H_2O$

מהלך הניסוי -(הקפידו לא לשאוף את האבקה!)

קבלו מהמורה ארבע מבחנות. במבחנות 1 ו-2 מצוי החומר היוני $CuSO_{4(s)}$.

במבחנות 3-4 מצוי ההידראט. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ הידראט הוא חומר יוני מוצק אשר בין היונים שלו כלואות מולקולות מים.

שלב א. החזיקו בתחתית מבחנה 1 וטפטפו מים באופן הדרגתי.

1. תארו את התצפיות. השוו את התוצר עם החומרים המצויים במבחנות 2 ו - 3.
2. מה חשתם כאשר החזקתם את המבחנה?
3. מה התרחש במבחנה 1? התייחסו לארבע רמות ההבנה בכימיה.

שלב ב. החזיקו את מבחנה 3 עם אטב וחממו **בזהירות** מעל להבת המבער כ-4 דקות. במהלך החימום, ערבבו מדי פעם בעזרת ספטולה.

1. תארו את תצפיותיכם.
2. השוו את התוצר הנשאר במבחנה 3 עם מבחנה 4 ועם החומר המצוי במבחנה 2.
3. האם התקבל בחימום תוצר נוסף? הציעו שיטה לזיהויו.
4. מה התרחש במבחנה 3? התייחסו לארבע רמות ההבנה.
5. מה תוכלו להסיק מניסוי זה על שינויי אנתלפיה בתגובות הפוכות?
6. הגישו דו"ח הכולל תשובות לשאלות הנ"ל.

הרכיבו משקפי מגן והקפידו על חדר נקי

ניסוי 3 - השקיית המפתיעה

חומרים וציוד לקבוצת תלמידים או להדגמה

בידיכם אריזה סגורה המכילה נוזל צבעוני. בתוך האריזה יש דיסקית קטנה. כופפו בעדינות את הדסקית ותארו את כל תצפיותיכם.

להלן צילומים המתארים חלק מהתצפיות.

א.

ב.

ג.

ד.

התגובה המתרחשת היא קבלת מוצק יוני הנקרא נתרן אצטאט $NaCH_3CO_{2(s)}$ מתוך תמיסה רוויה ביתר[1], המכילה יוני נתרן $Na^+_{(aq)}$ ויוני אצטאט $CH_3CO_2^-{}_{(aq)}$

ניסוח התגובה המתרחשת:

$$Na^+_{(aq)} + CH_3CO_2^-{}_{(aq)} \rightarrow NaCH_3CO_{2(s)}$$

שאלות בעקבות הניסוי

1. האם במהלך התרחשות התגובה: נוצרו קשרים, התפרקו קשרים או גם נוצרו וגם התפרקו קשרים? נמקו
2. מהי המערכת ומהי הסביבה בניסוי זה?
3. האם במהלך התרחשות התגובה נפלטה אנרגיה על ידי המערכת או נקלטה אנרגיה על ידי המערכת?
4. האם במהלך התרחשות התגובה ההפוכה: $NaCH_3CO_{2(s)} \rightarrow Na^+_{(aq)} + CH_3CO_2^-{}_{(aq)}$ תיפלט או תיקלט אנרגיה? נמקו.

   האריזה ניתנת להפעלה מחודשת.
5. מה יש לעשות על מנת להכין את האריזה לפעולה מחודשת?
6. הציגו את סימנו של ΔH^o בכל תגובה.
7. מה עשוי להשתנות אם תקבלו אריזה גדולה יותר? נמקו.

---

1. תמיסה רוויה ביתר- תמיסות המכילות יותר מומס מהדרוש לתמיסה רוויה. (איקן, ר. וזקבך. י. 1991) לקסיקון דביר, כימיה. דביר הוצאה לאור.

שינויי אנתלפיה במהלך שינויים במצב הצבירה של חומרים

פסק זמן לחשיבה

1. מהם השינויים המתרחשים כאשר אנו מוציאים קוביית קרח מהמקפיא ומכניסים אותה לכוס ריקה המצויה ב-25°C? התייחסו בתשובתכם לרמות ההבנה השונות בכימיה: מאקרוסקופית (מה תראה), מיקרוסקופית (מה קורה מבחינה חלקיקית), סמל (ניסוח התגובה), ותהליך (שילוב כל השינויים כולל היבטי אנרגיה).
2. כמות מסוימת של מים הוכנסה לקומקום חשמלי וחוממה עד לרתיחה מה קורה כאשר המים רותחים? התייחסו בתשובתכם לארבע רמות ההבנה בכימיה

תהליכי התכה

תהליכי התכה הם תהליכים בהם חומר משנה את מצב הצבירה ממוצק לנוזל. כאשר, באמצעות חימום, מועברת אנרגיה למוצק, גדלה האנרגיה הקינטית של החלקיקים ומהירות תנועתם גדלה. הצורה הקבועה של המוצק נעלמת והחומר הופך לנוזל. נהוג להגדיר:

אנתלפיית היתוך היא השינוי באנתלפיה המלווה הפיכת מול מוצק למול נוזל. בדרך כלל, נמדד שינוי אנתלפיה זה בטמפרטורה בה המוצק ניתך. נהוג לסמן אנתלפיית היתוך: ΔH°_m. האות m מסמלת היתוך m-melting.

לדוגמה, נתונים ערכי אנתלפיית התכה בטמפרטורת ההיתוך של מים ובטמפרטורת ההיתוך של אמוניה.

$$H_2O_{(s)} \rightarrow H_2O_{(l)} \qquad \Delta H^\circ_m = 6.01\ kJ$$
$$NH_{3(s)} \rightarrow NH_{3(l)} \qquad \Delta H^\circ_m = 5.65\ kJ$$

תהליכי אידוי

כאשר חל שינוי במצב הצבירה של חומר, מנוזל לגז, נדרשת השקעת אנרגיה. אנרגיה זו נחוצה על מנת לפרק את הקשרים הקיימים בין החלקיקים המרכיבים את הנוזל וליצור מצב בו חלקיקים אלו לא קשורים אחד לשני ורחוקים זה מזה.

אנתלפיית אידוי היא השינוי באנתלפיה המלווה הפיכת מול נוזל למול גז. בדרך כלל נמדד שינוי אנתלפיה זה בטמפרטורה בה הנוזל רותח. נהוג לסמן אנתלפיית אידוי:

ΔH°_b או ΔH°_v כאשר האותיות מסמלות: v-vaporization, b-boiling.

לדוגמה: שינוי האנתלפיה בהפיכת מים לאדים בטמפרטורת הרתיחה שלהם הוא:

$$H_2O_{(l)} \rightarrow H_2O_{(g)} \qquad \Delta H^\circ_b = 40.7\ kJ$$

ואילו שינוי האנתלפיה בהפיכת אתאנול נוזלי לאתאנול גזי בטמפרטורת הרתיחה שלו הוא:

$$C_2H_5OH_{(l)} \rightarrow C_2H_5OH_{(g)} \qquad \Delta H^\circ_b = 38.5\ kJ$$

כימיה בהקשר אחר - תהליך ההזעה בגופנו

אידוי הזיעה הנפלטת מעורנו הוא תהליך אנדותרמי בעזרתו הגוף מאבד אנרגיה, מתקרר. במהלך פליטת הזיעה, מים במצב נוזל הופכים לאדי מים, נלקחת אנרגיה מעורנו ולכן אנו מרגישים תחושה של קור. תחושה דומה נחוש כאשר אנו יוצאים רטובים ממקלחת או מבריכה, כיוון שהמים ה**מתאדים** קולטים אנרגיה מהגוף.

תהליכי המראה (סובלימציה)

תהליכי המראה הם תהליכים בהם מתרחש מעבר בין מצב צבירה מוצק למצב צבירה גז. ניתן לחשב את אנתלפיית ההמראה של חומרים, תוך שימוש בחוק הס, כאשר ידועות אנתלפיות ההיתוך והאידוי של החומר באותה טמפרטורה.

נחשב לדוגמה את אנתלפיית ההמראה של נתרן בטמפרטורת החדר 25°C.

נתונה אנתלפיית ההיתוך של נתרן בטמפרטורה זו: 2.6 kJ/mol

וכן נתונה אנתלפיית האידוי של נתרן בטמפרטורה זו: 98 kJ/mol

$$Na_{(s)} \rightarrow \cancel{Na}_{(l)} \qquad \Delta H^\circ_m = 2.6\ kJ$$
$$\cancel{Na}_{(l)} \rightarrow Na_{(g)} \qquad \Delta H^\circ_b = 98.0\ kJ$$
$$Na_{(s)} \rightarrow Na_{(g)} \qquad \Delta H^\circ_s = 100.6\ kJ$$

כימיה בהקשר אחר - המראה במאדים

האטמוספרה של כוכב הלכת מאדים מכילה פחמן דו חמצני במצב צבירה גז. עם ירידת הטמפרטורות בחורף (הטמפרטורה הממוצעת במאדים היא -63°C), חלק מהפחמן הדו חמצני הופך למוצק ומצטבר בכיפות הקטבים של הכוכב. מוצק זה חוזר ועובר **המראה** בקיץ.

שאלות בנושא שינויי אנתלפיה במהלך שינוים במצבי צבירה

1. הציעו הסבר לכך שאנתלפיית האידוי של מים גבוהה מאנתלפיית ההיתוך של מים.
2. כמה אנרגיה דרושה על מנת להתיך 36 גרם מים בטמפרטורה של 0°C, בלחץ 1 אטמוספרה?
3. מהו השינוי באנתלפיה ΔH° לתגובה $H_2O_{(l)} \rightarrow H_2O_{(s)}$?
4. הציעו הסבר לכך שאנתלפיית האידוי של אתאנול נמוכה מזו של מים.
5. *אדי מים גורמים לכוויה קשה יותר מזו שגורמים מים רותחים כאשר הם באותה מסה. האם תוכלו להסביר זאת? כיצד מתקשרת תופעה זו לאנתלפיית האידוי של מים?

חישוב השינוי באנתלפיה התקנית של תגובה בעזרת אנתלפיות קשר

ניתן ליישם את העיקרון של חוק הס לחישוב השינוי **באנתלפיה התקנית של תגובה** על ידי שימוש בערכים של אנתלפיות קשר המופיעים בספרי נתונים. חישוב אנתלפיית התגובה ΔH° בעזרת אנתלפיות קשר היא שיטה המתאימה רק לתגובות בהן המרכיבים הם חומרים מולקולריים במצב גזי. חומרים אלו בנויים ממולקולות ולרוב אין ביניהן אינטראקציות. לכן, ניתן להתייחס אל השינוי באנתלפיה בתגובה כאל סיכום כולל של פירוק ויצירה של קשרים קוולנטים.

לדוגמה, נבחן את התגובה בה מתקבלים מים במצב גזי, מהיסודות מימן וחמצן, שגם הם במצב גזי, תוך ציון רמות ההבנה בכימיה.

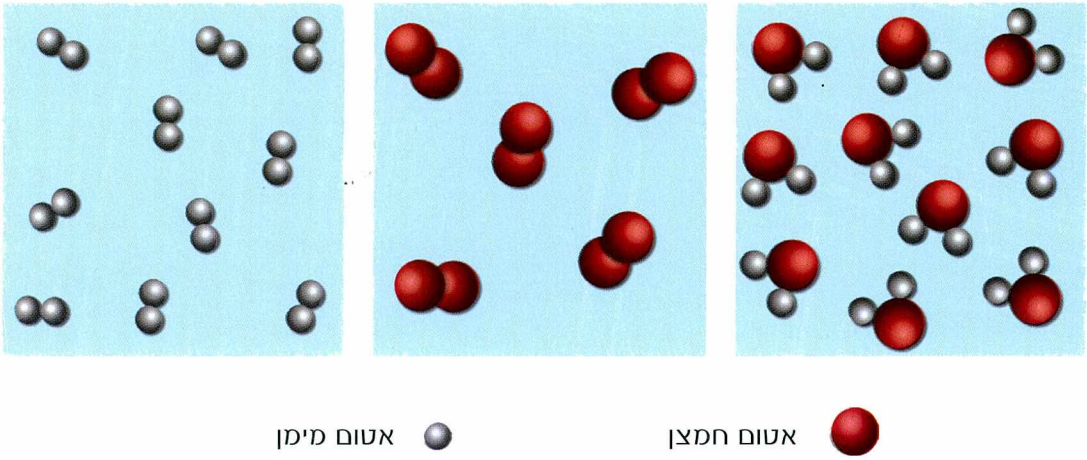
הגזים מימן וחמצן שבכלי מגיבים והופכים למים לאחר שהועבר בכלי ניצוץ חשמלי ונשמע קול נפץ. (רמה **מאקרוסקופית** של התגובה).

נתון ניסוח התגובה שהתרחשה (רמת **הסמל**):

$$2H_{2(g)} + O_{2(g)} \rightarrow 2H_2O_{(g)}$$

באיור 1 אנו רואים תיאור מיקרוסקופי של החומרים המשתתפים בתגובה.

איור 1 - מודל מיקרוסקופי לתגובה בין מימן וחמצן



הכדורים באיורים מייצגים אטומים והצמדת הכדורים מייצגת קיום קשרים בין האטומים. (התיאור הוא סכמטי ואינו תואם את מספר החלקיקים, גודלם והמרחקים במציאות).

פסק זמן לחשיבה

1. הסבירו מהם הקשרים המתקיימים בין האטומים?
2. אלו היבטים כמותיים מיוצגים באיור?
3. אלו פרטים ידועים לכם על החומרים הנ"ל אשר אינם באים לידי ביטוי באיור זה?
4. אלו תכונות הידועות לכם על החומרים הנ"ל אינן באות לידי ביטוי באיור זה?

כיצד הופכים המגיבים לתוצרים?

לא תמיד אנו יודעים מהם השלבים המתרחשים בפועל בעת התרחשותה של תגובה. על סמך ממצאי ניסויים שונים, כימאים יכולים לשער מהם השלבים השונים ולבנות מנגנון של תגובה. זהו נושא הנבחן בתחום הקינטיקה הכימית, עליו תלמדו בפרק הבא.

נתמקד כאן בהיבטי אנרגיה ונציג שני שלבים תיאורטיים, הנדרשים כאשר מגיבים הופכים לתוצרים.

שלב ראשון - פירוק מולקולות המגיבים לאטומים בודדים במצב צבירה גזי. בשלב זה, מתפרקים כל הקשרים הקוולנטיים אשר מצויים במולקולות **המגיבים**.

שלב שני - יצירת מולקולות התוצרים מהאטומים הבודדים כשהם במצב צבירה גזי. בשלב זה, נוצרים כל הקשרים הקוולנטים אשר מצויים במולקולות **התוצרים**.

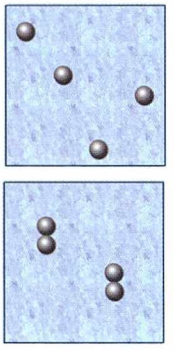
נמשיך לבחון את התגובה בה מתקבלים מים מהיסודות מימן וחמצן.

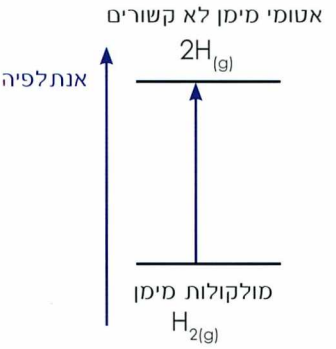
השלב הראשון כולל את ניתוק הקשרים הקוולנטים במולקולות החמצן והמימן לקבלת אטומים בודדים, לא קשורים, של מימן וחמצן. כפי שלמדתם בפרקים קודמים, במולקולות קיים איזון בין כוחות המשיכה וכוחות הדחייה הקיימים בין האטומים. זהו מצב המאופיין באנרגיה פנימית נמוכה. על מנת להפריד בין האטומים ולהביאם למצב בו לא מתקיימים כוחות משיכה ביניהם, יש להשקיע אנרגיה כלומר: **שלב ניתוק קשרים הוא תמיד אנדותרמי.**

נתאר זאת באיור סכמטי, איור 2. (מספרי החלקיקים הם רק להמחשה ולהדגשת היחס הסטויכיומטרי במהלך התגובה ואינם מייצגים את המספר האמיתי של החלקיקים).

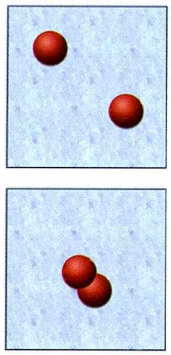
איור 2 - פירוק מולקולות המגיבים לאטומים בודדים

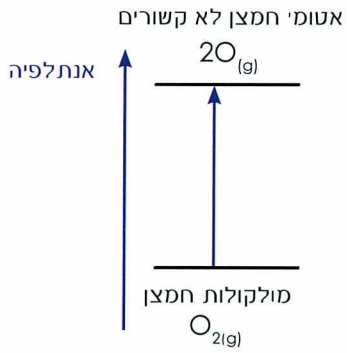
א. פירוק מולקולות המימן





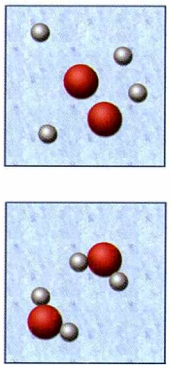
ב .פירוק מולקולות החמצן

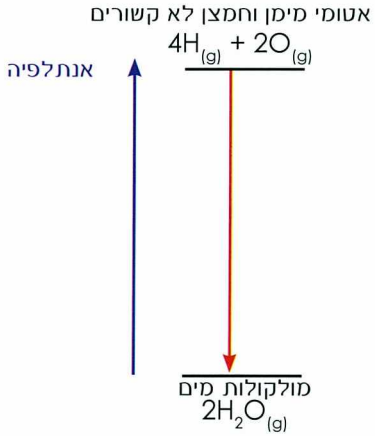




השלב השני הוא השלב בו נוצרים קשרים קוולנטים חדשים, קשרים המרכיבים את מולקולות המים, H_2O, מאטומי המימן והחמצן הלא קשורים שלב זה מאופיין בפליטת אנרגיה לסביבה מפני שהאטומים מגיעים למצב יציב, בו מתקיים איזון בין כוחות המשיכה והדחייה מצב המאופיין על ידי אנרגיה נמוכה (איור 3). **שלב יצירת קשרים הוא תמיד אקסותרמי.**

איור 3 - יצירת מולקולות התוצר





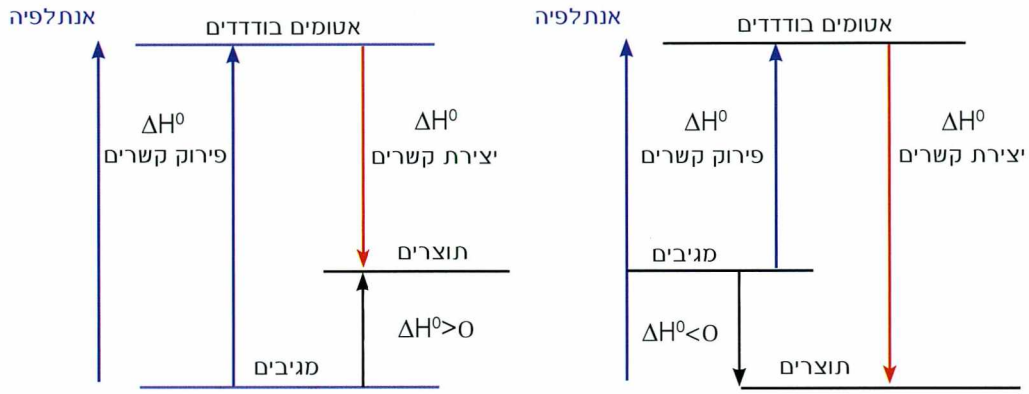
על מנת לדעת מהו שינוי האנתלפיה ΔH^o לתגובה הכוללת, עלינו לסכם את שינויי האנתלפיה במהלך פירוק הקשרים הקוולנטים המצויים במגיבים ואת שינויי האנתלפיה במהלך יצירת הקשרים הקוולנטים החדשים המצויים בתוצרים.

סיכום האנרגיה הדרושה לפירוק הקשרים במגיבים (בסימן +) והאנרגיה הנפלטת ביצירת הקשרים בתוצרים (בסימן -) שווה לשינוי האנתלפיה בתגובה כולה.

ייתכנו שני מקרים:

1. האנרגיה הדרושה לפירוק הקשרים במגיבים **קטנה** מהאנרגיה הנפלטת ביצירת קשרים בתוצרים. במקרה זה, סה"כ יש ירידה באנתלפיית המערכת. כלומר, התגובה היא אקסותרמית $\Delta H^0<0$.
2. האנרגיה הדרושה לפירוק הקשרים **גדולה** מהאנרגיה הנפלטת ביצירת קשרים בתוצרים. במקרה זה, סה"כ יש עלייה באנתלפיית המערכת. כלומר, התגובה היא אנדותרמית $\Delta H^0>0$.

איור 4- פירוק ויצירת קשרים בתגובות כימיות



***אנתלפיית קשר** היא האנרגיה שיש להשקיע בפירוק מול קשרים קוולנטים במולקולות חומר במצב גזי, לקבלת אטומים בודדים.*

בטבלה הבאה מוצגים נתונים על מספר סוגים של קשרים.

	סוג הקשר	אנתלפיית קשר (kJ/mol)
1	H-H	436
2	O=O	497
3	O-H	463

מהי משמעות הנתונים הנ"ל?

שורה 1 בטבלה - על מנת לפרק מול קשרים קוולנטים מהסוג H-H יש להשקיע 436 kJ. מכיוון שהקשר H-H מתקיים במולקולה דו-אטומית, ניתן להציג מידע זה גם על ידי ניסוח תגובה מתאימה:

$$H_{2(g)} \rightarrow 2H_{(g)} \qquad \Delta H^{O} = 436\ kJ$$

שורה 2 בטבלה - על מנת לפרק מול קשרים קוולנטים מהסוג O = O יש להשקיע 497 kJ. מכיוון שהקשר O=O מתקיים במולקולה דו אטומית, ניתן להציג מידע זה גם על ידי ניסוח תגובה מתאימה:

$$O_{2(g)} \rightarrow 2O_{(g)} \qquad \Delta H^{O} = 497\ kJ$$

שורה 3 בטבלה - על מנת לפרק את הקשר O-H יש להשקיע 463 kJ. קשר זה לא מתקיים במולקולה דו אטומית, אלא הוא מופיע פעמיים במולקולת מים. במקרה זה, אנתלפיית הקשר הנתונה היא ערך

ממוצע, הלוקח בחשבון את מספר הקשרים בכל מולקולה.

ניעזר בנתונים שבטבלה ונחשב את ערכו של ΔH° לתגובה הנתונה

$$2H_{2(g)} + O_{2(g)} \rightarrow 2H_2O_{(g)}$$

נוכל להשתמש בחוק הס

שלב פירוק הקשרים במולקולות המגיבים (אנדותרמי)

פירוק מול מולקולות המימן $H_{2(g)} \rightarrow 2H_{(g)}$ $\Delta H^\circ = 436$ kJ

מכיוון שהמקדם של המימן הוא 2, נרשום $2H_{2(g)} \rightarrow 4H_{(g)}$ $\Delta H^\circ = 436 \times 2 = 872$ kJ

פירוק מול מולקולות החמצן $O_{2(g)} \rightarrow 2O_{(g)}$ $\Delta H^\circ = 497$ kJ

שלב יצירת הקשרים במולקולות התוצר (אקסותרמי)

במול מולקולות מים יש 2 מול קשרי O-H וב-2 מול מולקולות מים יש 4 מול קשרי O-H

לכן נרשום: $4H_{(g)} + 2O_{(g)} \rightarrow 2H_2O_{(g)}$ $\Delta H^\circ = -1852$ kJ

מחיבור התגובות הנ"ל ומחיבור ערכי אנתלפיות התגובה נקבל:

$2H_{2(g)} + O_{2(g)} \rightarrow 2H_2O_{(g)}$ $\Delta H^\circ = 872 + 497 - 1852 = -483$ kJ

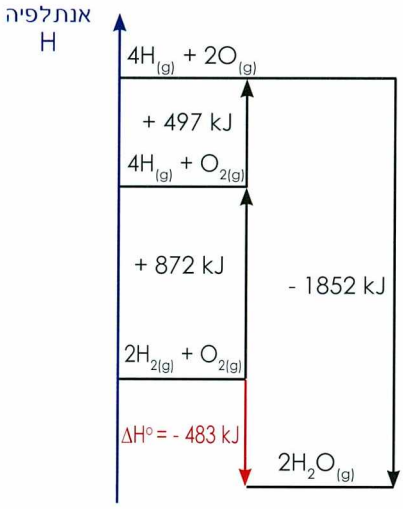
נוכל לומר כי שינוי האנתלפיה ΔH° הוא סכום של: אנתלפיות הקשר של פירוק הקשרים במגיבים (תהליכים אנדותרמים ולכן מסומנים בסימן +) עם אנתלפיות הקשר של הקשרים הנוצרים בתוצרים (תהליכים אקסותרמיים ולכן מסומנים בסימן -).

$$\Delta H^\circ = 2(H\text{-}H) + (O{=}O) - 4(O\text{-}H)$$

$$\Delta H^\circ = 2 \times 436 \text{ kJ} + 497 \text{ kJ} - 4 \times 463 \text{ kJ}$$

$$\Delta H^\circ = -483 \text{ kJ}$$

איור 5- ייצוג גרפי לחישוב ΔH° בעזרת אנתלפיות קשר



במקרה הנ"ל, שינוי האנתלפיה בעת יצירת הקשרים הקוולנטים בתוצרים, הוא גדול יותר משינוי האנתלפיה בעת פירוק הקשרים הקוולנטים במגיבים ולכן התגובה כולה היא אקסותרמית, $\Delta H^\circ < 0$ ומשתחררת אנרגיה לסביבה.

נוכל להציג את הפיתרון הנ"ל גם באופן גרפי, כפי שמתואר באיור 5:

שאלות בנושא אנתלפיות קשר

נתונה טבלה המכילה נתונים על מספר סוגי קשרים

אנתלפיית קשר (kJ/mol)	סוג הקשר
391	N-H
945	N≡N
163	N-N

היעזרו בטבלאות הנתונים על אנתלפיות קשר וענו על השאלות הבאות:

1. א. נסחו ואזנו את התגובה בה מקבלים אמוניה $NH_{3(g)}$ מחנקן ומימן.
   ב. נסחו ואזנו את התגובה בה מקבלים הידראזין $N_2H_{4(g)}$ מחנקן ומימן.
2. רשמו את נוסחאות המבנה לאמוניה והידראזין.
3. חשבו את ערכו של ΔH° לקבלת אמוניה.
4. חשבו את ערכו של ΔH° לקבלת הידראזין.
5. תארו באופן גרפי את שינוי האנתלפיה לשתי התגובות הנ"ל. השתמשו באותם צירים.

אנתלפיית אטומיזציה

אם בין החומרים המשתתפים בתגובה נתון יסוד שבמצב תקני **אינו** גז, לא מספיקה ידיעת אנתלפיות הקשר בלבד כדי לחשב את כמות האנרגיה המושקעת בפירוקו לאטומים בודדים. הסיבה לכך היא, שביסודות שאינם גזים קיימים קשרים נוספים על הקשרים הקוולנטים שבין האטומים. במקרה זה, נשתמש בנתון אחר, הנקרא **אנתלפיית אטומיזציה** ומסומן ΔH_a

***אנתלפיית אטומיזציה** היא כמות האנרגיה הדרושה כדי להעביר מול אחד של אטומי יסוד, **ממצבו התקני** של היסוד, למול אחד של אטומים במצב גזי, ב- 25°C.*

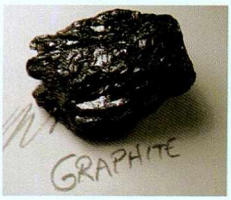
יסודות במצב תקני

מצב תקני של יסוד הוא המצב בו נמצא היסוד בטמפרטורת החדר והוא מוצג על ידי נוסחה מתאימה.

להלן נוסחות כמה יסודות במצב תקני

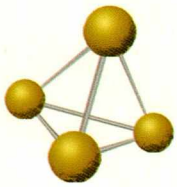
$C_{(s)}$, $P_{4(s)}$, $S_{8(s)}$, $H_{2(g)}$ $N_{2(g)}$, $O_{2(g)}$, $F_{2(g)}$, $Cl_{2(g)}$, $Br_{2(l)}$, $I_{2(s)}$, $Mg_{(s)}$

לדעת יותר על צורות אלוטרופיות של יסודות



ישנם יסודות להם מבנה שונה, המופיעים בצורות שונות הנקראות צורות אלוטרופיות. לדוגמה, היסוד פחמן מצוי בכמה צורות, כגון גרפיט, יהלום ועוד. גרפיט היא הצורה האלוטרופית המוגדרת כמצב תקני. דוגמה נוספת היא חמצן המצוי בשתי צורות אלוטרופיות. האחת, תקנית כ- $O_{2(g)}$ והשנייה לא תקנית כ- $O_{3(g)}$ (אוזון).

השוואת אנתלפיית קשר לאנתלפיית אטומיזציה

המושג	אנתלפיית קשר	אנתלפיית אטומיזציה
ההקשר	המושג מתייחס למול קשרים קוולנטים הקיימים ביסודות או בתרכובות במצב צבירה גזי	המושג מתייחס ליסודות במצב תקני בלבד
משמעות	האנרגיה שיש להשקיע בפירוק מול קשרים קוולנטים לאטומים בודדים	האנרגיה שיש להשקיע על מנת לקבל מול אטומים של יסוד במצב גזי מן היסוד במצבו התקני
הסבר מיקרוסקופי	פירוק קשרים קוולנטים בין אטומים של חומר במצב גזי	פירוק קשרים בין מולקולריים (או אחרים) בנוסף לפרוק קשרים קוולנטים
תיאור מיקרוסקופי	מעבר מזרחן במצב צבירה גזי הכולל מולקולות P_4 לאטומים בודדים של זרחן על ידי פירוק המולקולות לאטומים בודדים 	מעבר מזרחן **מוצק** הבנוי ממולקולות P_4 לזרחן גזי הבנוי מאטומים בודדים: 1. הפרדת מולקולות 2. פירוק המולקולות לאטומים בודדים
נתונים	אנתלפיית קשר P-P היא 201 קג'אול /מול	אנתלפיית אטומיזציה (לזרחן לבן) 316 קג'אול /מול אטומים
ניסוח התגובה	$P_{4(g)} \rightarrow 4P_{(g)}$	$\frac{1}{4}P_{4(s)} \rightarrow P_{(g)}$
ΔH לתגובה	201 kJ כפול שש (ראה מבנה מולקולה)	316 kJ
יש לשים לב	למספר מול **קשרים** אשר מפרקים	למספר מול **אטומים** אשר נוצרים

שאלות בנושא אנתלפיית קשר ואנתלפיית אטומיזציה

התייחסו לכל אחת מהתגובות הבאות וחשבו את ערכי אנתלפיית התגובה ΔH°. היעזרו בנתונים.

1. $Cl_{2(g)} \rightarrow 2Cl_{(g)}$
2. $4Br_{(g)} \rightarrow 2Br_{2(l)}$
3. $\frac{1}{2}I_{2(s)} \rightarrow I_{(g)}$
4. $2Br_{2(g)} \rightarrow 4Br_{(g)}$
5. $2O_{(g)} + 4H_{(g)} \rightarrow 2H_2O_{(g)}$
6. $2H_2S_{(g)} \rightarrow 4H_{(g)} + 2S_{(g)}$
7. $C_{(\text{גרפיט})} \rightarrow C_{(g)}$
8. $P_{4(s)} \rightarrow 4P_{(g)}$

היסוד / הקשר	אנתלפיית אטומיזציה	אנתלפיית קשר
פחמן	715 קג'אול למול אטומים	
זרחן / P-P	316.3 קג'אול למול אטומים	201 קג'אול למול
כלור / Cl-Cl	121 קג'אול למול אטומים	242 קג'אול למול
ברום / Br-Br	112 קג'אול למול אטומים	193 קג'אול למול
יוד / I-I	106.6 קג'אול למול אטומים	151 קג'אול למול
O-H במולקולת מים		463 ק'גאול למול
S-H במולקולת H_2S		368 קג'אול למול

חישוב ערכו של ΔH° לתגובה 1

ניסוח התגובה מראה על הפיכת מולקולות כלור במצב תקני לאטומי כלור במצב גזי. על מנת שתהליך זה יתרחש, יש להשקיע אנרגיה בשבירת קשרים קוולנטים הקיימים בין האטומים במולקולות המגיבים. ניתן לחשב את שינוי האנתלפיה ΔH° בשתי דרכים.

א. שימוש באנתלפיות קשר- בתגובה יש לפרק מול מולקולות של כלור (על פי המקדם של המגיבים). לכן, על פי הגדרת אנתלפיית קשר, יש להשקיע 242 kJ כפי שרשום בטבלה.

ב. שימוש באנתלפיית אטומיזציה- המצב התקני של כלור הוא מצב גזי. מהסתכלות בתוצרים אפשר להבחין, כי בתגובה נוצרים 2 מול אטומים בודדים. כלומר, יש להכפיל את אנתלפיית האטומיזציה המתייחסת למול אטומים אחד ב- 2. נסתמך על הנתונים בטבלה ונקבל 121 kJ ×2 = 242 kJ

לסיכום: $\Delta H^\circ = 242$ kJ עבור התגובה $Cl_{2(g)} \rightarrow 2Cl_{(g)}$

אנתלפיית האטומיזציה של יסודות, הערוכים במולקולות דו-אטומיות, אשר במצבם התקני הם במצב גזי, שווה למחצית ערכה של אנתלפיית הקשר.

שאלה נוספת ופתרון

חשבו את שינוי האנתלפיה ΔH° של התגובה הבאה:

$$C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)}$$ (גרפיט)

בשלב ראשון, נתייחס לפירוק המגיבים לאטומים בודדים - שלב בו מושקעת אנרגיה: האנרגיה הדרושה לפירוק מול מולקולות חמצן, על פי אנתלפיית הקשר O=O, שווה ל- 497 kJ האנרגיה הדרושה לפירוק מול פחמן (גרפיט) לקבלת מול אטומים בודדים במצב גזי, על פי אנתלפיית האטומיזציה של פחמן, שווה ל- 715 kJ.

סה"כ שינוי אנתלפיה בשלב פירוק המגיבים לאטומים בודדים, שווה ל- +1212 kJ.

בשלב שני, נתייחס ליצירת התוצרים מאטומים בודדים - שלב בו נפלטת אנרגיה.

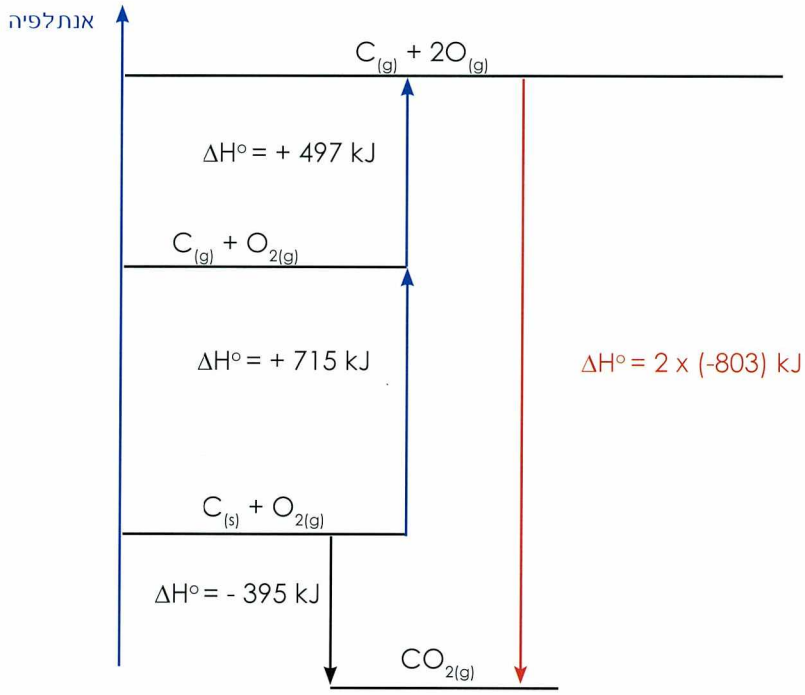
אנתלפיית הקשר C=O בחומר $CO_{2(g)}$ שווה ל- 803 kJ. מבנה מולקולת CO_2 הוא: O=C=O. סה"כ שינוי האנתלפיה בשלב יצירת התוצרים מאטומים בודדים שווה ל - 1606 kJ-.

לסיכום, שינוי האנתלפיה בתגובה שווה סכום שלב ראשון ושלב שני

$$\Delta H^\circ = + 1212 - 1606 = -394 \text{ KJ}$$

ניתן להציג פיתרון זה גם באופן גרפי, כפי שרואים באיור 6

איור 6- ייצוג גרפי לחישוב ΔH° בעזרת אנתלפיות קשר ואטומיזציה



שאלות נוספות בנושא אנתלפיית קשר ואנתלפיית אטומיזציה

1. נתונה אנתלפיית אטומיזציה של חנקן:

$$\frac{1}{2}N_{2(g)} \rightarrow N_{(g)} \qquad \Delta H^{\circ} = 472.5\ kJ$$

היעזרו במידע הנ"ל וחשבו מהו ΔH° עבור התגובה הבאה:

$$4N_{(g)} \rightarrow 2N_{2(g)}$$

2. נתונה התגובה: $S_{8(s)} \rightarrow 8S_{(g)} \quad \Delta H^{\circ} = 2240\ kJ$

מהי אנתלפיית האטומיזציה של גופרית?

3. ידוע כי אנתלפיית האטומיזציה של פלואור $F_{2(g)}$ היא 101.4 kJ. חשבו מהי אנתלפיית הקשר של F-F?

4. ידוע כי אנתלפיית הקשר Br-Br היא 193 kJ. האם תוכלו לחשב בעזרת נתון זה את אנתלפיית האטומיזציה של $Br_{2(l)}$? הסבירו תשובתכם.

5. זרחן P_4 עשוי להתקיים במצבים שונים:

זרחן במצב צבירה מוצק, זרחן במצב צבירה נוזל, זרחן במצב צבירה גזי ואטומי זרחן בודדים.

1. מהם הקשרים הניתקים, כאשר זרחן מוצק הופך לאטומי זרחן בודדים?
2. דרגו את ארבעת המצבים הנ"ל על פי אנרגיה פנימית עולה. תארו זאת באופן גרפי.

6. האם אנתלפיית אטומיזציה של $N_{2(g)}$ גדולה / קטנה / השווה לאנתלפיית הקשר חנקן חנקן בחומר? נמקו.

7. א. ידוע כי אנתלפיית הקשר C=C שווה ל-610 kJ. האם אנתלפיית הקשר C-C תהיה גדולה /קטנה / שווה לערך הנ"ל? נמקו.

ב. נתונה התגובה: $C_2H_{4(g)} + H_{2(g)} \rightarrow C_2H_{6(g)} \quad \Delta H^{\circ} = -126\ kJ$

כמו כן ידוע כי: אנתלפיית הקשר C-H היא 413 kJ ואנתלפיית הקשר H-H היא 436 kJ.

היעזרו בנתוני השאלה ומצאו מהי אנתלפיית הקשר C-C.

8. א. נסחו ואזנו את התגובה לקבלת מימן גופרי $H_2S_{(g)}$ מהיסודות במצב גזי.

ידוע כי: אנתלפיית הקשר S-S שווה ל- 265 kJ אנתלפיית הקשר H-H שווה ל-435 kJ ואנתלפיית הקשר H-S שווה ל-368 kJ. גופרית S_8 בנויה ממולקולות טבעתיות.

ב. חשבו את ערכו של ΔH° לתגובה שניסחתם בסעיף הקודם.

ג. חשבו מהי כמות האנרגיה אשר תיפלט לסביבה, או תיקלט ממנה, כאשר 2.56 גרם גופרית במצב **גזי** מגיבים עם כמות מתאימה של מימן ויוצרים מימן גופרי $H_2S_{(g)}$.

ד. האם כמות האנרגיה אשר תיפלט לסביבה, או תיקלט ממנה, כאשר 2.56 גרם גופרית במצב **מוצק** מגיבים עם כמות מתאימה של מימן ויוצרים מימן גופרי $H_2S_{(g)}$, היא גדולה, קטנה או שווה לכמות האנרגיה אשר חישבתם בסעיף ג? נמקו.

חישוב השינוי באנתלפיית תגובה באופן ניסויי

אנרגיה וטמפרטורה

בפרק הקודם למדתם על ההבדלים בין המושגים אנרגיה וטמפרטורה ובפרק זה נתרכז בקשר הקיים בין שני המושגים. למדתם, כי אם יש הפרש טמפרטורה בין גופים סמוכים, יתרחש תהליך חימום של הגוף בעל הטמפרטורה הנמוכה על ידי מעבר אנרגיה מהגוף בעל הטמפרטורה הגבוהה. כמו כן, הכרתם תגובות כימיות אקסותרמיות, שבמהלכן ופלטות אנרגיה העשויה לחמם את הסביבה, וכן תגובות אנדותרמיות, שבהן מועברת אנרגיה מהסביבה [illegible]

נדון כעת בדרך המאפשרת [illegible] חשב את **כמות** [illegible] העברת.

לדוגמה, נדון בחישוב כמות האנרגיה שיש להשקיע בחימום נוזל כלשהו. מהם הגורמים המשפיעים על כמות האנרגיה הדרושה?

הגורם הראשון הוא מסת הנוזל, המסומנת באות m. אם נרצה לחמם מים להכנת קפה עבור שישה אנשים, נצטרך להשקיע אנרגיה רבה יותר לעומת חימום מים לקפה עבור שני אנשים בלבד. נוכל לומר, כי קיים יחס ישר בין כמות האנרגיה הדרושה לבין כמות הנוזל שיש לחמם. ככל שכמות הנוזל גדולה יותר, האנרגיה הדרושה לחימומו גדולה יותר.

הגורם השני הוא סוג הנוזל שנרצה לחמם. כאשר מחממים באותם תנאים אותה כמות של מים ושל שמן, ניתן להיווכח כי טמפרטורת השמן עולה הרבה יותר מהר. לכל חומר יש קיבול אנרגיה סגולי משלו, המסומן באות c. **קיבול האנרגיה הסגולי הוא כמות האנרגיה הדרושה לחימום 1 גרם של אותו חומר ב- 1°C**[1] קיבול האנרגיה הסגולי של מים הוא 4.184 [2] ג'אול לגרם מעלה ואילו קיבול האנרגיה הסגולי של שמן הוא 1.670 ג'אול לגרם מעלה. כלומר, לחימום מים במעלה אחת צריך להשקיע אנרגיה רבה יותר (פי 2.5 לערך) מאשר לחימום אותה כמות שמן במעלה אחת. או בניסוח אחר, כאשר מועברת אותה כמות אנרגיה לאותה כמות של מים ושמן, הטמפרטורה של השמן עולה פי 2.5 מאשר זו של המים.

הגורם השלישי הוא מספר המעלות שאנו מעוניינים להעלות את הטמפרטורה של הנוזל. ככל ש**השינוי** בטמפרטורה של הנוזל יהיה גדול יותר, נצטרך להשקיע אנרגיה רבה יותר בחימומו. השינוי בטמפרטורה מסומן ב- ΔT. שינוי זה שווה להפרש בין הטמפרטורה הסופית של הנוזל T_2 לטמפרטורה ההתחלתית של הנוזל $\Delta T = T_2 - T_1$

לסיכום: האנרגיה, אשר נסמנה באות Q, הדרושה לחימום נוזל אשר מסתו m, בעל קיבול אנרגיה סגולי c, המצוי בטמפרטורה T_1, עד לטמפרטורה T_2, ניתנת לחישוב על ידי הנוסחה:

$$Q = m \times c \times \Delta T$$

1 למרות העובדה כי מדובר בהעברת אנרגיה, יש המשתמשים במושג קיבול חום סגולי.

2 במהלך חישובנו נשתמש בערך 4.18.

שאלה 1

עלינו להביא לרתיחה 2 ליטר מים הנמצאים בטמפרטורת החדר. מהי האנרגיה שיש להשקיע לשם כך?

פתרון

נתון: נפח המים = 2 ליטר, 2 ליטר = 2000 סמ"ק. מסת המים = 2000 גרם (צפיפות המים בטמפרטורה של 25°C היא קרובה ל-1 גרם לסמ"ק, ולכן מספר הגרמים שווה למספר סמ"ק).

קיבול אנרגיה סגולי של מים = 4.18 ג'אול / גרם מעלה

$\Delta T = 75°C$

$$Q = 2000\ gr \times 4.18 \frac{J}{gr \times {}^{o}C} \times 75^{o}C = 627{,}000J = 627\ kJ$$

ניתן להשתמש בקשר זה על מנת לחשב את שינוי האנתלפיה, ΔH^{o}, בעת התרחשותה של תגובה כימית. האיור הבא מתאר את הקשר התיאורטי בין המערכת, בה מתרחשת התגובה והיא מקור התעניינותנו, לבין הסביבה המוגדרת והתחומה בגבול מבודד של אותה מערכת.

המערכת

תגובה כימית במערכת מלווה בשינוי אנתלפיה תקנית, ΔH^{o}, המוגדר בתגובות רבות למול מגיב. כאשר מספר המולים המגיבים אינו 1 אלא n, כמות האנרגיה הנפלטת או הנקלטת במהלך התגובה מסומנת ב- Q. מתקיים הקשר:

$Q = \Delta H^{o} \times n$

סימנים הפוכים

הסביבה

בעת התרחשות תגובה במערכת, אנרגיה Q נקלטת על ידי הסביבה או נפלטת מהסביבה. אנרגיה זו גורמת לשינוי הטמפרטורה (ΔT) של סביבה בעלת מסה m, וקיבול אנרגיה סגולי c. מתקיים הקשר:

$Q = m \times c \times \Delta T$

- כאשר מתרחשת תגובה אקסותרמית, האנרגיה הנפלטת על ידי המערכת נקלטת על ידי הסביבה וגורמת להעלאת הטמפרטורה שלה. לעומת זאת, כאשר מתרחשת תגובה אנדותרמית, האנרגיה הנקלטת על ידי המערכת נפלטת מהסביבה וגורמת להורדת הטמפרטורה של הסביבה.
- האנרגיה הנפלטת או הנקלטת במהלך תגובה, תלויה במספר המולים של החומרים המגיבים. ככל שמספר המולים המגיבים גדול יותר, כך יהיה השינוי ב- Q גדול יותר. מצד שני, ניתן לחשב את ערכו של Q אם ידועה מסת הסביבה, קיבול האנרגיה הסגולי שלה ושינוי הטמפרטורה אשר חל בה.

במיוחד, נהוגה שיטה זו בתהליכי המסה, המתרחשים במערכת מבודדת, בהם הממס שלא השתתף בתגובה מהווה את הסביבה המוגדרת.

- על פי ההגדרה, ΔH° הוא שינוי האנתלפיה במהלך תגובה על פי הניסוח הנתון (בתגובות רבות מתייחסים למול אחד של מגיב), ואילו Q מתייחס למספר המולים שהגיבו **בפועל** בניסוי מסוים.
- סימנם של Q סביבה ושל ΔH° הם סימנים הפוכים, היות והאחד מציין את כמות האנרגיה אשר המערכת פלטה או קלטה, ואילו השני מציין את כמות האנרגיה אשר הסביבה קלטה או פלטה, בהתאמה.

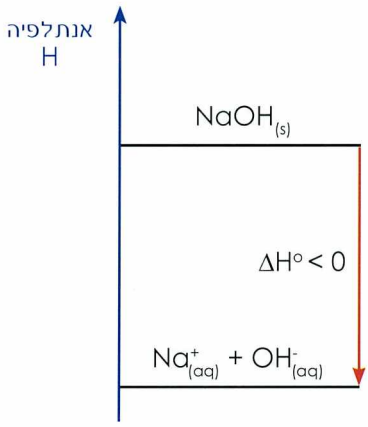
שאלה 2 שלב א

תלמיד המיס 2 גרם $NaOH_{(s)}$ ב- 80 מ"ל מים מזוקקים אשר הוכנסו לכלי מבודד. כתוצאה מכך, עלתה טמפרטורת התמיסה ב-$6.5^\circ C$. ענו על השאלות הבאות:

1. מהי המערכת ומהי הסביבה בניסוי זה?
2. האם התגובה שהתרחשה היא אקסותרמית או אנדותרמית?
3. נסחו את התגובה אשר התרחשה.
4. תארו באופן גרפי את שינוי האנתלפיה בתגובה.
5. חשבו מהו ערכו של Q בניסוי.
6. חשבו את ערכו של ΔH° לתגובה שרשמתם.

פתרון - לשלב א

1. הסביבה היא המים המצויים בכוס המבודדת. המערכת היא המגיבים, $NaOH_{(s)}$ בתחילת התגובה, והיונים הממוימים שבתמיסה, בסופה של התגובה.
2. התרחשה תגובה אקסותרמית, כיוון שטמפרטורת המים, המהווים סביבה, עלתה. כלומר, היה מעבר אנרגיה מהמערכת אל הסביבה אשר גרם לחימום המים.
3. $NaOH_{(s)} \xrightarrow{H_2O_{(l)}} Na^+_{(aq)} + OH^-_{(aq)}$
4.



5. על מנת לחשב את ערכו של Q, נשתמש בגדלים הידועים לנו על הסביבה. מסת הסביבה - (gr) 80 גרם = m (צפיפות של תמיסה מימית בטמפרטורה של $25^\circ C$ היא קרובה ל-1 גרם/סמ"ק

ולכן ניתן בקירוב להניח כי המסה של 80 מ"ל מים או 80 מ"ל תמיסה היא 80 גרם) קיבול האנרגיה הסגולי של מים הוא: (J/gr×°C) ג'אול לגרם מעלה c = 4.18 (נוכל להניח, בקירוב, כי קיבול האנרגיה הסגולי של מים ושל תמיסה המכילה יונים הוא זהה) השינוי בטמפרטורת התמיסה $\Delta T = 6.5°C$ על פי הנתונים הנ"ל, נוכל לחשב את כמות האנרגיה Q אשר המים קלטו בעת התרחשות התגובה.

$$Q = m \times c \times \Delta T$$
$$Q = 80\ gr \times 4.18\ J/gr \times °C \times 6.5°C = 2173.6\ J$$

החישוב מתבסס על ההנחה, כי כל כמות האנרגיה (Q), אשר הועברה מהמערכת כתוצאה מהתגובה, נקלטה על ידי המים.

6. על מנת לחשב את ערכו של ΔH^o, עלינו לחשב את מספר המולים אשר הגיבו בניסוי.

נתון, כי הגיבו 2 גרם $NaOH_{(s)}$ המהווים 0.05 מול מגיב. כלומר, כאשר הכמות הנ"ל התמוססה, נפלטה אנרגיה של 2173.6 J. כאשר מתמוסס 1 מול מגיב, נפלטת אנרגיה בכמות גדולה פי 20, (1/0.05) כלומר 43,472 J שהם 43.5 kJ בקירוב.

מכיוון שהתגובה היא אקסותרמית, כותבים סימן - (מינוס) לפני ערכו של ΔH^o. כאמור, הסימן השלילי מורה כי יש ירידה באנרגיה הפנימית של המערכת כתוצאה ממעבר אנרגיה לסביבה. בקירוב, $\Delta H^o = -43.5\ kJ$

שאלה 2 - שלב ב

תלמיד אחר המיס 4 גרם $NaOH_{(s)}$ לתוך 75 מ"ל מים מזוקקים המצויים בכלי מבודד. כתוצאה מכך עלתה טמפרטורת המים ב-13.5°C.

השווה בין הניסויים אשר ערכו שני התלמידים על ידי השלמת הטבלה הבאה:

		ניסוי של תלמיד א	ניסוי של תלמיד ב
סוג התגובה - אקסותרמית / אנדותרמית			
מערכת / סביבה			
ניסוח התגובה המתרחשת			
נתוני הסביבה:	מסת הסביבה m		
	אנתלפיה סגולית c		
	שינוי טמפרטורה ΔT		
נתוני המערכת:	מספר המולים המגיבים n		
חשבו	Q		
חשבו	ΔH^o		

1. כיצד תסבירו את תוצאות החישוב של Q בשני הניסויים?
2. כיצד תסבירו את תוצאות החישוב של ΔH^o בשני הניסויים?

ניסוי 4 - מאיכותי לכמותי

חומרים וציוד לקבוצת תלמידים או להדגמה

נתרן הידרוכסידי $NaOH_{(s)}$, נתרן חנקתי $NaNO_{3(s)}$, וציוד על פי הביקוש בעקבות התכנון.

מהלך הניסוי

בפרק א בניסוי 4 ערכתם ניסוי, בו המסתם במים שני מוצקים $NaOH_{(s)}$ ו- $NaNO_{3(s)}$ בשני כלים נפרדים. גיליתם, כי תהליך המסת $NaOH_{(s)}$ במים הוא תהליך אקסותרמי ואילו תהליך המסת $NaNO_{3(s)}$ במים הוא תהליך אנדותרמי. בניסוי זה התבססתם על השינוי בטמפרטורה על מנת לקבוע את **סימנו** של ΔH^{o}.

מטרת הניסוי כאן, היא לחשב את **ערכו** של ΔH^{o} בעת ההתרחשות של תגובות ההמסה הנ"ל.

בטבלה שלפניכם מאפיינים שונים של הניסויים שערכתם.

השלימו את הטור בטבלה, הכולל את המאפיינים המתייחסים לניסוי **כמותי**.

מאפיינים	ניסוי איכותי	ניסוי כמותי
הממס	כמות מים לא מדודה	כמות **מדודה** של מים מזוקקים
המומס	מסת המוצק לא מדודה	
הסביבה	הסביבה לא מוגדרת ולא מבודדת (מתקיימים חילופי אנרגיה עם המערכת)	
אמצעי המדידה	שימוש בחושים על מנת לקבוע מה קורה -חשנו כי הכוס התחממה או התקררה	

1. תכננו ניסוי **כמותי**, בעזרתו תוכלו לחשב את ערכו של ΔH^{o} עבור אחת מתגובות ההמסה.
2. בצעו את הניסוי שתכננתם.
3. חשבו את ערכו של ΔH^{o} לכל אחת מהתגובות הנ"ל.

העשרה

ניסוי בית

הוציאו מהמקפיא 3 קוביות קרח זהות ככל האפשר.

הניחו קובייה אחת על השיש במטבח, קובייה שנייה על ריבוע קטן של נייר אלומיניום וקובייה שלישית על קרש חיתוך.

שערו האם יהיה שוני בזמן ההיתוך (המלא) של כל אחת מהקוביות?

מדדו את זמן ההיתוך המלא של כל קוביית קרח.

האם תוכלו לשער את הסיבה להבדלים?

ניסוי 5 - חישוב קיבול אנרגיה סגולי של בדיל

הרכיבו משקפי מגן והקפידו על חדר מאוורר!

ניסוי זה מורכב משלב **מכין** ומשלב **ביצוע**. הקפידו על:

- מילוי מדויק אחר ההנחיות לביצוע הניסוי.
- חלוקת תפקידים בקבוצה.
- איסוף תצפיות רבות ככל האפשר.
- הגשת דו"ח ברור ומאורגן, הכולל: תצפיות, תוצאות, עיבוד נתונים ותשובות לשאלות בסוף הניסוי.
- שימוש בשפה מדעית נכונה ומדויקת בכתיבת הדו"ח.

שלב מכין - חימום בדיל לטמפרטורה גבוהה

חומרים וציוד

מאזניים, פלטה חשמלית, כוס כימית בנפח 250 מ"ל, מבחנה גדולה, מד טמפרטורה, מעמד ועליו אוחז מתאים למבחנה הגדולה, כ-40-45 גרם גרגרי בדיל, מים רותחים.

מהלך נסוי

שקלו כ-40 גרם גרגרי בדיל והכניסו למבחנה גדולה. רשמו את המסה המדויקת של הבדיל.

הכניסו מים רותחים לכוס הכימית הגדולה (לקיצור זמן החימום) והניחו אותה על הפלטה.

הכניסו לכוס את המבחנה עם גרגרי הבדיל, כאשר היא מחוברת למעמד. הקפידו שהמבחנה עם הבדיל תהיה שקועה במים הנמצאים בכוס הגדולה.

הדליקו את הפלטה וחממו את המים עד לרתיחה. המשיכו את חימום המים למשך כ-10 דקות נוספות. במהלך החימום, מדדו את טמפרטורת הבדיל T^*_1 תוך כדי ערבוב הגרגרים. רשמו את הטמפרטורה המקסימאלית של הבדיל.

שלב ביצוע - קביעת קבול האנרגיה הסגולי של הבדיל

חומרים וציוד

שתי כוסות קלקר, מכסה פלסטיק התואם את הכוסות ובו חור למעבר מד טמפרטורה, משורה בנפח 50 מ"ל, מד טמפרטורה, מים מזוקקים.

מהלך נסוי

הכינו מערכת מבודדת, הכוללת שתי כוסות קלקר, אחת בתוך השנייה, ועליהן המכסה המחורר.

הכניסו 50 מ"ל מים מזוקקים לכוסות הקלקר ומדדו את טמפרטורת המים (T_1).

לאחר שהבדיל חומם למשך כ-10 דקות בכוס עם המים הרותחים, העבירו **במהירות ובזהירות** את גרגרי הבדיל אל תוך המים במערכת המבודדת. סגרו את המכסה ומדדו את הטמפרטורה המקסימלית של המים (T_2) תוך כדי ערבוב .

בתום הניסוי יש לייבש את הבדיל על נייר לשימוש חוזר.

עיבוד התוצאות

1. חשבו את קיבול האנרגיה הסגולי של בדיל תוך שימוש בתוצאות הניסוי.

2. חפשו במקורות שונים את הערך הידוע של קיבול האנרגיה הסגולי[1] של בדיל.
3. השוו את הערך הנמדד לערך הספרותי והציעו אפשרויות לשגיאה בניסוי הנ"ל.

חישוב השינוי באנתלפיה התקנית של תגובה בעזרת אנתלפיות התהוות העשרה

כפי שלמדתם בפרק הראשון, השינוי באנתלפיית התגובה ΔH° הוא ההפרש בין האנתלפיה (האנרגיה הפנימית) של התוצרים, לבין האנתלפיה של המגיבים: $\Delta H = H_2 - H_1$ כידוע לנו, לא ניתן למדוד או לחשב את האנתלפיה המוחלטת של חומרים שונים וחישובי ΔH° מתבססים על מדידת הפרש באנתלפיה בדרכים שונות. אחת השיטות לחישוב השינוי באנתלפיה מתבססת על אנתלפיית התהוות, תקנית.

אנתלפיית התהוות, תקנית, מסומנת ΔH°_f (f-formation).

אנתלפיית התהוות תקנית היא שינוי האנתלפיה במהלך ההתהוות של 1 מול חומר מהיסודות המרכיבים אותו כאשר הם במצב תקני.

על פי הגדרה זו, נובע, כי אנתלפיית ההתהוות התקנית של יסודות במצב תקני שווה לאפס, ולכן זו יכולה להוות נקודת ייחוס לתרכובות המורכבות מאותם יסודות.

דוגמה:

בוצעו התגובות בהן נוצרות שתי תרכובות מהיסודות במצב תקני ונמדדו שינויי האנתלפיה:

$$C_{(s)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow CO_{(g)} \quad \Delta H^\circ_f = -110.5\ kJ$$

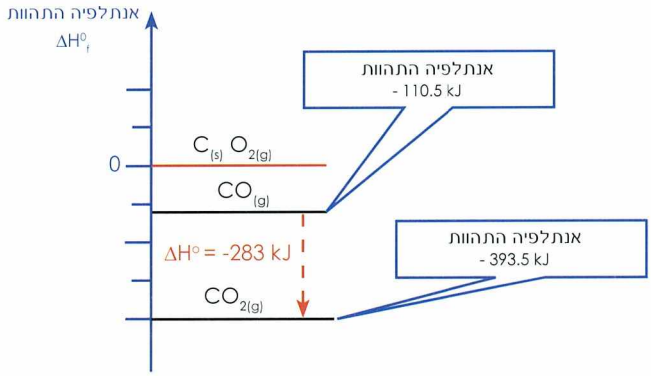
$$C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)} \quad \Delta H^\circ_f = -393\ kJ$$

נוכל להשתמש בנתונים אלו כדי לחשב את שינוי האנתלפיה בתגובה הבאה:

$$CO_{(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)}$$

השינוי באנתלפיית התגובה הוא ההפרש בין אנתלפיית ההתהוות של התוצרים לבין אנתלפיית ההתהוות של המגיבים. איור 1 מתאר את אנתלפיית ההתהוות של שתי תרכובות, פחמן חד חמצני $CO_{(g)}$ ופחמן דו חמצני, $CO_{2(g)}$ יחסית לאנתלפיית ההתהוות של היסודות התקניים המרכיבים אותן. איור 7 מתאר את הפיתרון באופן גרפי.

איור 7



1 חפשו קיבול אנרגיה סגולי על פי ההגדרה: Specific Heat Capacity

להלן נתונים על אנתלפיות ההתהוות של מספר תרכובות וניסוח התגובות המתאימות להיווצרותן.

ניסוח התגובה ליצירת התרכובת המתאימה	התרכובת	ΔH° kJ בטמפרטורה 25°C
1. $H_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow H_2O_{(l)}$	$H_2O_{(l)}$	-285.8
2. $C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)}$	$CO_{2(g)}$	-393.5
3. $C_{(s)} + 2H_{2(g)} \rightarrow CH_{4(g)}$	$CH_{4(g)}$	-74.8

בהסתמך על הנתונים הנ"ל, ניתן לחשב את השינוי באנתלפיית התגובה הבאה:

$$CH_{4(g)} + 2O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)} + 2H_2O_{(l)}$$

כאמור $\Delta H = H_2 - H_1$

ובתנאי תקן $\Delta H^\circ = H^\circ_2 - H^\circ_1$

H°_2 - האנתלפיה של התוצרים יחסית ליסודות. כלומר, סכום אנתלפיות ההתהוות של התוצרים $\Sigma\Delta H^\circ_{f2}$

H°_1 - האנתלפיה של המגיבים יחסית ליסודות. כלומר, סכום אנתלפיות ההתהוות של המגיבים $\Sigma\Delta H^\circ_{f1}$

נוכל למצוא את השינוי באנתלפיה התקנית של התגובה, על ידי הצבה בנוסחה:

$$\Delta H^\circ = \Sigma\Delta H^\circ_{f2} - \Sigma\Delta H^\circ_{f1}$$

נחזור לתגובה הנתונה ונחשב את השינוי באנתלפיה התקנית:

$$\Delta H^\circ = 2\times(-285.8)\ kJ + (-393.5)\ kJ - (-74.8)\ kJ = -890.3\ kJ$$

השיטה המוצגת לעיל היא למעשה יישום של חוק הס. ניתן להראות, כי בעזרת התגובות הנתונות (1,2,3) ניתן לחשב את התגובה המבוקשת.

פיתרון על פי חוק הס - הכפלת תגובה 1 פי 2 וחיבור לתגובות 1, 1-3.

$$\cancel{2H_{2(g)}} + O_{2(g)} \rightarrow 2H_2O_{(l)} \qquad \Delta H^\circ = 2\times(-285.8)\ kJ$$

$$\cancel{C_{(s)}} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)} \qquad \Delta H^\circ = -393.5\ kJ$$

$$CH_{4(g)} \rightarrow \cancel{C_{(s)}} + \cancel{2H_{2(g)}} \qquad \Delta H^\circ = +74.8\ kJ$$

$$CH_{4(g)} + 2O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)} + 2H_2O_{(l)} \qquad \Delta H^\circ = -890.3\ kJ$$

כימיה בהקשר אחר - סולם טמפרטורות צלזיוס

סולם צלזיוס למדידת טמפרטורה הוא סולם **שרירותי**. גובה עמוד הכספית בצינור אשר הוכנס לתערובת מים וקרח נקבע כ-אפס, וגובה עמוד הכספית באותו צינור אשר הוכנס למים רותחים (בלחץ 1 אטמוספרה) נקבע כ-100. המרווח בין הסימונים חולק ל-100 שנתות וכל שנת מסמן מעלת צלזיוס אחת.

אנתלפיית שריפה (העשרה)

תגובה כימית, אשר במהלכה מגיב חומר עם חמצן, נקראת תגובת שריפה.

ΔH° לתגובה הנ"ל נקראת גם אנתלפיית שריפה ומסומנת כך: ΔH°_c (c-combustion).

ΔH°_c היא אנתלפיית השריפה של מול חומר בתנאים תקניים בטמפרטורה של 25°C. כלומר, זו האנרגיה הנפלטת במהלך שריפת 1 מול חומר. בתגובת השריפה מתקבלות התחמוצות של כל היסודות המרכיבים את החומר הנשרף ולכן תוצרי השריפה של תרכובת המכילה פחמן ומימן (וגם חמצן) הם: $CO_{2(g)} + H_2O_{(l)}$.

תגובות שריפה של תרכובות פחמן שונות משמשות להפקת אנרגיה, כגון השימוש בגז בישול (פרופאן) $C_3H_{8(g)}$, או נפט. לכן, להכרת אנתלפיית השריפה של תרכובות אלה יש חשיבות מעשית רבה הקשורה לשימוש התרכובות כחומרי דלק.

כמו כן, ניתן להשתמש בערכים ידועים של אנתלפיות שריפה ובחוק הס, על מנת לחשב שינויי אנתלפיה ΔH° של תגובות.

דוגמה

אנתלפיית השריפה המסומנת כ- ΔH°_c של פרופאן $C_3H_{8(g)}$ שווה ל -2220 kJ.

אנתלפיית השריפה של פחמן $C_{(s)}$ היא -394 kJ.

אנתלפיית השריפה של מימן $H_{2(g)}$ היא -286 kJ

היעזרו בנתונים הנ"ל וחשבו את ΔH° לתגובה הבאה: $3C_{(s)} + 4H_{2(g)} \rightarrow C_3H_{8(g)}$

הדרכה לפיתרון ותשובה

נציג את הנתונים בעזרת ניסוח תגובות מתאימות ונחשב על פי העיקרון של חוק הס:

1. $C_3H_{8(g)} + 5O_{2(g)} \rightarrow 3CO_{2(g)} + 4H_2O_{(l)}$ $\Delta H^\circ = -2220$ kJ
2. $C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)}$ $\Delta H^\circ = -394$ kJ
3. $H_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow H_2O_{(l)}$ $\Delta H^\circ = -286$ kJ

על מנת לקבל את ניסוח התגובה המבוקש, יש להפוך את תגובה 1, להכפיל את תגובה 2 ב-3, להכפיל את תגובה 3 ב-4 ולחבר את כולן. אותן פעולות יש לעשות עם ערכם של ΔH°.

התשובה הסופית היא: -106 kJ

שאלות לסיכום פרקים א ו- ב

1. א. השלימו בטבלה את ניסוחי התגובות.

החומר	תגובה מס'	ניסוח תגובת השריפה המלאה	ΔH_c השינוי באנתלפיה בתגובת השריפה המלאה
מימן $H_{2(g)}$	1		-285.5 kJ/mol
פרופילן $C_3H_{4(g)}$	2		-1937 kJ/mol
פרופאן $C_3H_{8(g)}$	3		-2219 kJ/mol

ב. תארו באופן גרפי את שינוי האנרגיה הפנימית באחת מהתגובות הנ"ל.

ג. בעזרת המידע שבטבלה, כתבו תיאור מילולי לאחת התגובות 1-3.

ד. חשבו את ערכו של ΔH° לתגובה הבאה: $C_3H_{4(g)} + 2H_{2(g)} \rightarrow C_3H_{8(g)}$

ה. הגזים המופיעים בטבלה הם גזים דליקים, אולם דרוש ניצוץ חשמלי על מנת שהתגובה תתחיל להתרחש. האם מדובר בתגובה אקסותרמית או אנדותרמית? נמקו.

2. בשני מיכלים מקלקר עבה נמצאת כמות זהה של חנקן נוזלי $N_{2(l)}$ המצוי בטמפרטורת הרתיחה שלו, -196°C.

למיכל אחד A, הוסיפו 10 מ"ל מים בטמפרטורה של 95°C ולמיכל שני B הוסיפו 42 מ"ל מי קרח המצויים ב-0°C.

כתוצאה מהוספת המים לשני המיכלים, נפלט חנקן גזי מכל מיכל. **בתום** הניסוי, נמדדה מסת החנקן הנוזלי. נמצא, כי המסה של החנקן הנוזלי אשר נותרה במיכל B אליו הוכנסו מי הקרח, **קטנה** ממסת החנקן הנוזלי שנותר במיכל אליו הוכנסו המים הרותחים, מיכל A.

א. באיזה מהחומרים יש לחלקיקים אנרגיה קינטית ממוצעת גבוהה יותר: למים שהוכנסו למיכל A או למים שהוכנסו למיכל B? נמקו.

ב. מהו התהליך שעבר החנקן הנוזלי בכלי A? ובכלי B? ענו תוך שימוש בארבע רמות ההבנה בכימיה.

ג. מהי המערכת ומהי הסביבה בכל אחד מהמקרים? האם המערכת פתוחה, סגורה או מבודדת?

ד. מהם מעברי האנרגיה שהתקיימו בכל אחד מהמיכלים?

ה. על סמך תוצאות הניסוי, לאיזה נוזל יש אנרגיה פנימית גדולה יותר: ל-10 מ"ל מים כמעט רותחים או ל-42 מ"ל קרח? מהן ההנחות שהונחו על מנת לענות על שאלה זו?

ו. חשבו את אנתלפיית האידוי של החנקן אם ידוע כי במהלך אידויו עברו 10 kJ והתקבלו 40 ליטר חנקן גזי בתנאי S.T.P.

עיבוד השאלה מבוסס על המאמר המופיע ב-
Journal of Chemical Education Vol. 82 No. 6 June 2005

3. לתוך כוס מבודדת המכילה 100 מ"ל מים מזוקקים בטמפרטורת החדר 25°C, הוכנסו 10 גרם קרח בטמפרטורה של 0°C.

א. הסבירו את המתרחש בכוס כאשר הקרח ניתך, תוך פרוט 4 רמות ההבנה: מאקרוסקופית, מיקרוסקופית, סמל ותהליך.

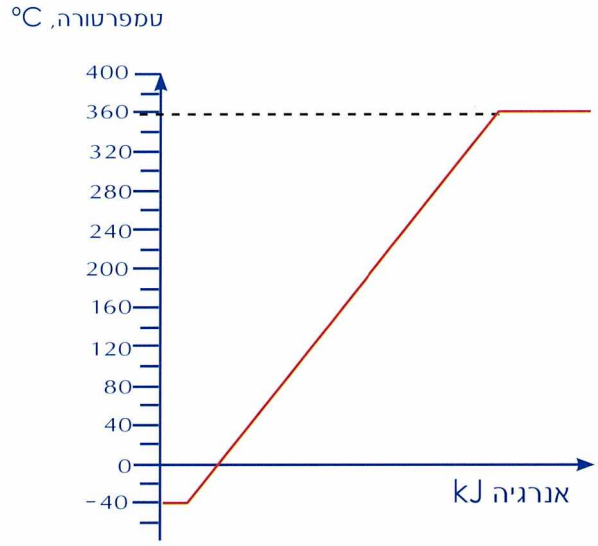
ב. מהי המערכת ומהי הסביבה בניסוי המתואר? האם יתכנו מספר תשובות?

ג. מהו כיוון מעבר האנרגיה במהלך הניסוי?

ד. האם טמפרטורת המים תעלה או תרד בתום היתוך הקרח? נמקו.

ה. ידוע כי אנתלפיית ההיתוך של קרח היא 333.2 J/gr. מהי הטמפרטורה **הסופית** של המים לאחר היתוך קוביות הקרח. פרטו חישוביכם.

4. לחומר A טמפרטורת היתוך של 39°C - וטמפרטורת רתיחה של 357 °C. נערך ניסוי בו חומם מדגם חומר A שמסתו 1 גרם מטמפרטורת ההיתוך שלו עד אשר כל החומר הפך לגז. הגרף הסכמטי שלפניכם מתאר את שינוי הטמפרטורה כתלות באנרגיה המושקעת במהלך תהליך החימום.



א. על פי הגרף, האם אנתלפיית האידוי של החומר A גבוהה / שווה / קטנה מאנתלפיית ההיתוך של חומר A? נמקו.

ב. מהו מצב הצבירה של החומר בחלק הניסוי בו טמפרטורת המדגם עולה? מהי הסיבה לעליה זו? נמקו.

ג. האם וכיצד תשתנה צורת הגרף כאשר נחמם מסה של 2 גרם חומר A?

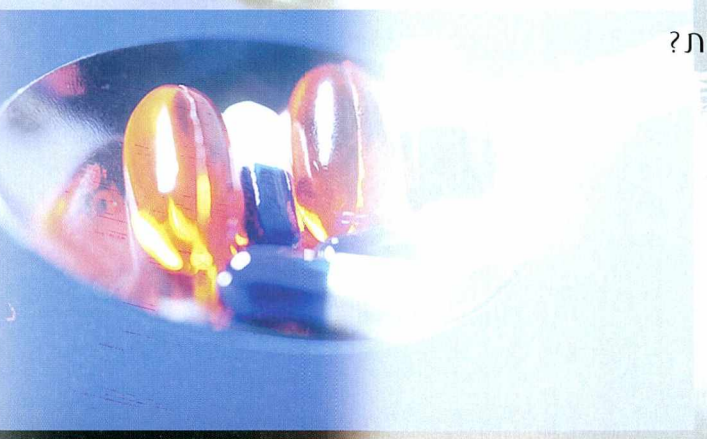
ד. האם וכיצד תשתנה צורת הגרף כאשר נחמם מסה זהה של חומר אחר, B?

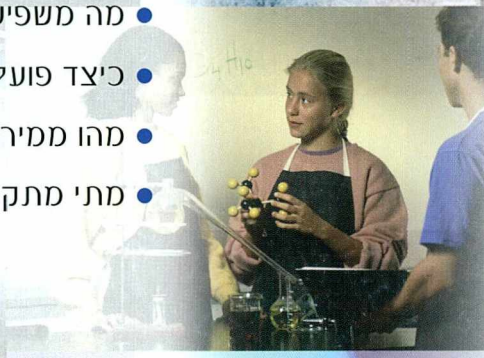
ה. *מהם הנתונים הנחוצים לציור גרף מדויק עבור חומר אחר, B?

פרק ג

מקצב תגובות ועד לשיווי משקל כימי - מה ואיך?

- מהו קצב תגובה?
- כיצד קשור מימד הזמן לתגובות כימיות?
- מה משפיע על קצב התגובה?
- כיצד פועלים זרזים?
- מהו ממיר קטליטי?
- מתי מתקיימות תגובות הפוכות?





על שאלות אלו ועל שאלות רבות אחרות תוכלו לענות לאחר לימוד הפרק השלישי

מבוא

בפרקים הקודמים עסקנו בהיבטים האנרגטיים הקשורים להתרחשותן של תגובות כימיות, בעיקר בהיבט המתייחס **להבדל באנרגיה** הקיים בין חומרים. למדנו על הקשר שבין השינויים במבנה החומרים לבין שינויים באנרגיה הפנימית של החומרים, הכרנו תגובות אקסותרמיות ואנדותרמיות ודרכים שונות לחישוב השינוי באנתלפיה שמתלווה לתגובות.

היבט אנרגטי נוסף, אשר הוצג בפרק הראשון, קשור ל**אופן** שבו מתחילה להתרחש תגובה כימית ומתייחס למושג "אנרגיית שפעול", האנרגיה שיש להשקיע על מנת שתגובה תתחיל להתרחש.

תגובות כימיות מסוימות, כמו תגובות של חומרי נפץ, מתרחשות מהר מאוד. לעומתן, יש תגובות איטיות, כגון **תהליך ההחלדה** של ברזל. מדוגמאות אלה ניתן להסיק, שיש חשיבות לגורם הזמן בכל מקרה בו מתרחשת תגובה כימית. כאשר האדם הוא יוזם התגובה, חשוב לו לדעת אם התוצר נוצר תוך חודשים, ימים, או דקות. בתעשייה, למשל, חשוב לדעת זאת כשמדובר בתהליכי הפקת חומרים בקנה מידה גדול. במעבדות מחקר, יש חשיבות לגורם הזמן ביצירת חומרים חדשים. גם במקומות בהם יוצרים מוצרים לצריכה ביתית - כגון מאפיה או מטבח פרטי - יש לזמן משמעות. בכל המקרים הללו, מייחסים תשומת לב ליצירת התנאים שיאפשרו הפקת המוצר הרצוי בקצב הרצוי. לשם כך, דרוש ידע על מהירותן של תגובות ועל אפשרויות ההשפעה על מהירויות אלה.

קינטיקה היא ענף בכימיה, אשר עוסק **באופן** בו הופכים מגיבים לתוצרים, תוך התייחסות **למימד הזמן**. השאלות בהן עוסק תחום זה הן:

- כיצד מתחילה תגובה כימית?
- מהו הקצב בו מגיבים הופכים לתוצרים?
- אילו גורמים משפיעים על קצב התגובה וכיצד?
- מהו רצף השלבים - המנגנון - בו מגיבים הופכים לתוצרים?

לפרק שלפניכם שני חלקים. החלק הראשון ימשיך לעסוק בהיבטים הקינטיים של תגובה כימית תוך עיסוק בשאלות הנ"ל . על בסיס העקרונות שיילמדו בחלק הראשון, יעסוק חלקו השני של הפרק בהיבט נוסף של חקר תגובות כימיות: הגעתן למצב ייחודי, שנקרא שיווי משקל כימי.

קצב תגובה

מהירות תגובה היא **קצב** התרחשותה של תגובה כימית.

קצב הוא שינוי החל בגודל מסוים ביחידת זמן.

דוגמאות:

- מהירות היא שינוי במרחק ביחידת זמן. כלומר, היא מייצגת את הדרך אשר נעשתה ביחידת זמן מסוימת. למשל, לאמצעי תחבורה שונים יש מהירויות שונות: מהירותו של מטוס נוסעים - 900 קמ"ש ואילו מהירות אופני מרוץ היא 60 קמ"ש.
- קצב הגדילה של ילד מבטא בכמה ס"מ גבה הילד בפרק זמן מסוים (שנה או חודש).

הציעו דוגמאות נוספות מחיי היום יום למדידת קצב .

ניתן לכתוב:

$$\text{קצב} = \frac{\Delta X}{\Delta t}$$

כאשר X הוא הגודל הנמדד, t מציין זמן, Δ מציין שינוי.

כאשר עוסקים בתגובות כימיות, מתעניינים גם בקצב שלהן. כלומר, בוחנים בכמה זמן מתרחשים השינויים בחומר. כיצד מודדים את קצב התרחשותה של תגובה?

נניח שנתונה התגובה: A→B

במהלך התקדמות התגובה, מולקולות של החומר A מגיבות. כלומר, הן נעלמות ונוצרות מולקולות חדשות של חומר B. נוכל לבחון את התקדמות התגובה על פי מספר המולים של A הנעלמים ליחידת זמן (דקה, שעה), או על פי מספר המולים של B הנוצרים באותה יחידת זמן. מכיוון שעל פי ניסוח תגובה זו, על כל מולקולה שנעלמת נוצרת אחת חדשה, נוכל לומר כי **קצב ההיעלמות** של A שווה ל**קצב ההיווצרות** של B.

מגדירים את קצב התגובה על פי **השינוי בריכוז** החומרים, שהוא גודל **הלוקח בחשבון** גם את **מספר המולים** וגם את **נפח הכלי** בו התגובה מתרחשת.

קצב התגובה הוא יחס בין שינוי בריכוז החומר לבין הזמן של השינוי.

לתגובה A→B הקצב הוא:

$$\text{קצב} = -\frac{\Delta[A]}{\Delta t} = +\frac{\Delta[B]}{\Delta t}$$

קצב תגובה ניתן להגדרה על ידי קצב הירידה בריכוזו של מגיב (בסימן שלילי), או על ידי קצב העלייה בריכוזו של תוצר (בסימן חיובי).

מקובל לסמן **ריכוז** של חומר על ידי כתיבת נוסחתו של החומר בתוך סוגריים מרובעים. לדוגמה, ריכוז של חומר A מוצג כ-[A]. ריכוז של חנקן דו חמצני מוצג על ידי $[NO_2]$.

קביעת קצב של תגובה מבוססת על ניסויים בהם נערך מעקב אחר התקדמות תגובה.
אפשר לעקוב אחרי התקדמות תגובה על ידי מדידת תכונה מאקרוסקופית של אחד החומרים המשתתפים בתגובה בפרקי זמן שווים. תכונה מאקרוסקופית היא תכונה הנראית לעין. דוגמאות של תכונות המאפשרות מעקב: נפח של גז ולחץ של גז הנמדד על ידי מד לחץ. אפשר לעקוב אחר התקדמות תגובה גם בעזרת מכשיר מדידה של תכונה כלשהי המהווה מדד לריכוז החומר המשתתף בתגובה

? הציעו תכונות מאקרוסקופיות נוספות הניתנות למעקב ופרטו כיצד מתבצע המעקב.

ניסוי 1 - מדידת קצב תגובה

שלב א - פירוק של מימן על חמצני H_2O_2, המכונה מי חמצן

חומרים וציוד לכל קבוצת תלמידים או להדגמה

5 מ"ל תמיסת מימן על חמצני 6% בטמפרטורת החדר, MnO_2, קיסם עץ, גפרורים.

החומר מימן על חמצני H_2O_2 מתפרק.

1. שערו מהם תוצרי הפירוק האפשריים.
2. כיצד תבדקו מהם התוצרים המתקבלים? לרשותכם קיסם עומם.

מהלך הנסוי

לתוך מבחנה עם תמיסת מימן על חמצני 6%, הוסיפו בעזרת ספטולה מעט MnO_2. (חומר זה מסייע לפירוק מימן על חמצני ועל תפקידו תלמדו מאוחר יותר בפרק זה.)

תארו את המתרחש ונסו לגלות מהם התוצרים.

הציעו ניסוח לתגובה המתרחשת.

שלב ב - קצב הפירוק של מימן על חמצני H_2O_2

חומרים וציוד

מזרק זכוכית בנפח 100 מ"ל, ארלנמייר של 250 מ"ל, 50 מ"ל תמיסת מי חמצן 6%.

הכינו מערכת המורכבת מארלנמייר פקוק בפקק, דרכו עובר צינור זכוכית המחובר בצינור גומי אל המזרק, שעון המודד זמן בשניות.

מהלך הנסוי

לתוך הארלנמייר הכניסו כמות של 0.25 גרם MnO_2. שפכו מעל המוצק 50 מ"ל תמיסת מי חמצן וסיגרו מייד את הפקק.

מדדו את נפח הגז הנפלט כל 20 שניות.

שאלות בעקבות הניסוי

1. רכזו את תוצאותיכם בטבלה הבאה:

זמן המדידה	נפח הגז הנפלט (סמ"ק)	השינוי בפח הגז

2. מה למדתם מניסוי זה?
3. רשמו ביטויים לקצב הופעת התוצר ולקצב הפירוק של מימן על חמצני.
4. האם קצב קבלת התוצר, גדל או קטן במהלך הניסוי? נמקו.

לקביעת קצב של תגובה, ניתן להתייחס אל השינוי שחל בריכוז המגיב (כלומר, לקצב היעלמות המגיב), או אל השינוי שחל בריכוז אחד התוצרים (כלומר, לקצב הופעת אחד התוצרים).
ערכים אלה אינם שווים, אך יש ביניהם קשר, כפי שנראה בהמשך.

נציג תחילה את קצב התגובה שמתרחשת בניסוי 1 באמצעות השינוי שחל בריכוז המגיב ביחידת זמן:

$$\text{קצב תגובה} = -\frac{\Delta[H_2O_2]}{\Delta t}$$

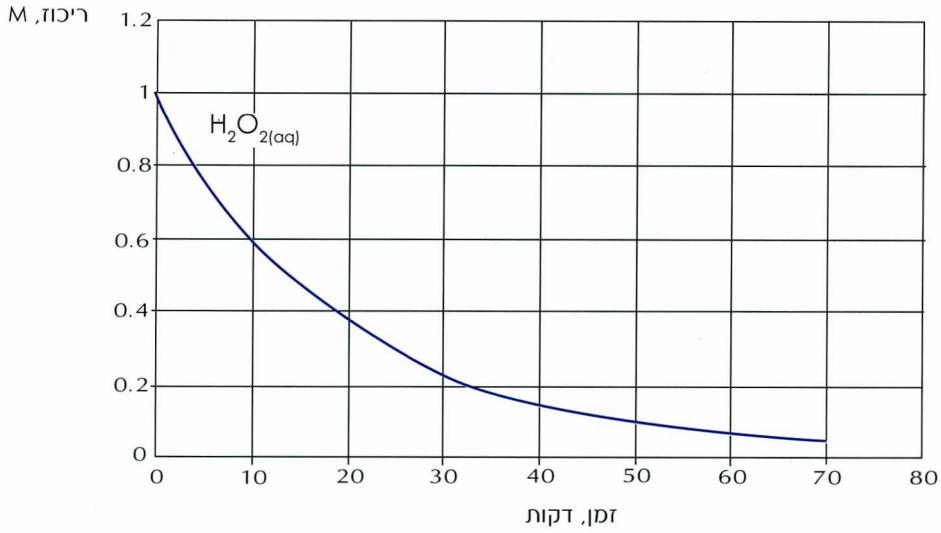
בוצע ניסוי אחר של פירוק של מימן על חמצני, כפי שבוצע בכיתה.
בטבלה הבאה מופיע חלק מהתוצאות שהתקבלו בניסוי וכן החישובים הדרושים לקביעת קצב פירוק המגיב

הזמן - t - שעבר מתחילת הניסוי, בדקות	פרק הזמן - Δt - שנבחר, בדקות	ריכוז H_2O_2 בזמן t, במול לליטר	ההפרש בריכוזים בפרק הזמן שנבחר, במול לליטר	קצב התגובה = $\Delta[H_2O_2]/\Delta t$ (הפרש בריכוזים ביחס לפרק זמן שנבחר) במול לליטר לדקות
0	10	1.00	?	?
10	10	0.59	0.59-0.37 = 0.22	0.22: 10 = 0.022
20	10	0.37	0.37-0.22 = 0.15	0.15:10 = 0.015

1. השלימו את המשבצות הריקות בטבלה.
2. האם קצב הפירוק של מימן על חמצני גדל/קטן/קבוע במהלך התגובה? הציעו הסבר .

נתבונן **בתיאור גרפי של תוצאות הניסוי** הנ"ל של פירוק של מימן חמצני.

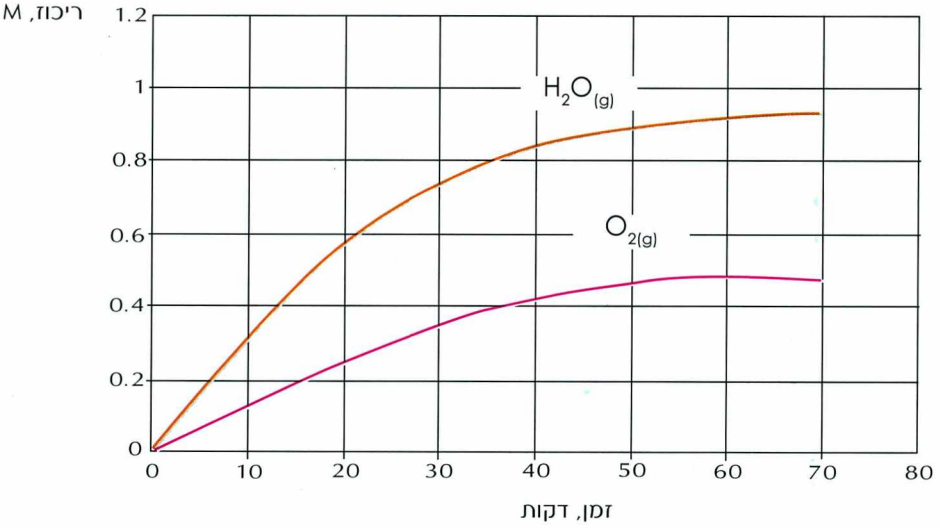
איור 1 א - תיאור גרפי של השתנות ריכוז מימן על חמצני כתלות בזמן



מהתבוננות באיור 1 א אפשר להסיק כי:

- ריכוזו של המגיב $H_2O_{2(aq)}$ קטן במהלך התגובה.
- ניתן לחשב את קצב ההיעלמות של המגיב $H_2O_{2(aq)}$ על ידי בחינת השינוי שחל בריכוזו במשך פרק זמן נבחר (רצוי קצר יחסית). בגרף, הקצב מיוצג על ידי שיפוע הקו בזמן מסוים.
- קצב ההיעלמות של המגיב, $H_2O_{2(aq)}$ משתנה - קטן במשך התגובה. נסו להסביר זאת!

איור 1 ב - תיאור גרפי של השתנות ריכוזי החמצן והמים כתלות בזמן.



מהתבוננות באיור 1-ב אפשר להסיק כי:

- ריכוזו של כל אחד מהתוצרים גדל במהלך התגובה.
- ניתן לחשב את קצב ההופעה של כל אחד מהתוצרים בשיטה דומה לזו שהוצגה עבור המגיב בתגובה - בנקודה השניה לעיל.
- קצב הופעתם של התוצרים משתנה (קטן), כמו קצב היעלמות המגיב. נסו להסביר את הירידה בקצב הופעת התוצרים.
- קצב הופעתו של התוצר $O_{2(g)}$ שונה מקצב הופעתו של התוצר מים ומקצב היעלמות המגיב. נסו להסביר ממה נובע השוני.

הגורמים המשפיעים על קצב תגובה

כדי לברר אלו גורמים משפיעים על קצב התגובות, נבצע מספר ניסויים.

הרכיבו משקפי מגן והקפידו על תדר ואוורור

ניסוי 2- מה משפיע על קצב התגובה (1)?

חומרים וציוד לקבוצת תלמידים או להדגמה:

תמיסת נחושת גופרתית $0.5MCuSO_{4(aq)}$, תמיסת נתרן פחמתי 0.5M $Na_2CO_{3(aq)}$, מהדק משרדי עשוי Fe.

מהלך הניסוי

חלק א

א. לכוס כימית מכניסים 20 מ"ל תמיסת נחושת גופרתית $0.5M\ CuSO_{4(aq)}$ ומוסיפים 20 מ"ל של תמיסת נתרן פחמתי $0.5M\ Na_2CO_{3(aq)}$.

ב. התבוננו ורשמו תצפיות על מה שמתרחש.

ג. איזה סוג של תהליך מתרחש?

חלק ב

א. לכוס כימית מכניסים 50 מ"ל תמיסת נחושת גופרתית $0.5M\ CuSO_{4(aq)}$ וטובלים בתוכה מהדק משרדי, העשוי ברובו ברזל Fe.

ב. התבוננו ורשמו תצפיות במשך כ-5 דקות.

ג. היעזרו בטבלה הבאה להשוואת שני התהליכים והשלימו את החסר.

רמת הבנה בכימיה	היבט נבחן	חלק א	חלק ב
	שינויים נראים לעין		
	החלקיקים בתחילת התגובה		
סמל			
			תגובה בין מתכת לתמיסה

נוכל להסיק מניסוי זה כי: סוגי החומרים משפיעים על קצב התגובה

ניסוי 3 - מה משפיע על קצב התגובה (2)?

חומרים וציוד לקבוצת תלמידים או להדגמה:

תמיסת 2 M HCl, תמיסת 0.15 M $Na_2S_2O_3$, מים מזוקקים, משורה בנפח 5 מ"ל, שתי משורות בנפח 50 מ"ל, שלוש כוסות של 100 מ"ל מסומנות באותיות א-ג ושעון עצר או שעון עם מחוג לשניות.

בניסוי תתבצע התגובה:

$$S_2O_3^{2-}{}_{(aq)} + 2\,H_3O^+{}_{(aq)} \rightarrow \frac{1}{8}\,S_{8(s)} + SO_{2(g)} + 3H_2O_{(l)}$$

בפועל נמדוד את הזמן הדרוש עד להופעת המוצק גופרית, הגורם להופעת עכירות של הנוזל.

מהלך הניסוי:

א. הניחו את הניירות המסומנים באותיות א-ג מתחת לשלוש הכוסות.

ב. i. הכניסו לכוס א 50 מ"ל תמיסת $Na_2S_2O_3$.

ii. הכניסו לכוס ב 30 מ"ל תמיסת $Na_2S_2O_3$ ועוד 20 מ"ל מים.

iii. הכניסו לכוס ג 10 מ"ל תמיסת $Na_2S_2O_3$ ועוד 40 מ"ל מים.

ג. הוסיפו 5 מ"ל תמיסת HCl לכל אחת מהכוסות א-ג, התחילו למדוד זמן ולהתבונן במתרחש בכוסות.

ד. מדדו את משך הזמן העובר עד שמופיעה לראשונה עכירות בכל אחת מהכוסות א-ג.

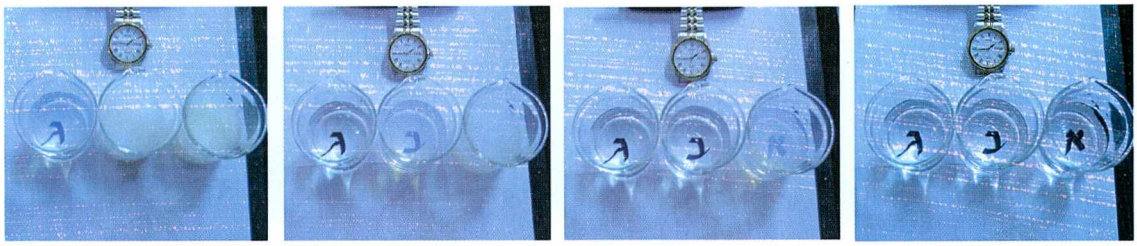
השלימו בטבלה הבאה את ריכוז יוני התיוסולפט $S_2O_3^{2-}{}_{(aq)}$ ואת הזמן שעבר עד להופעת עכירות בכל אחת משלוש הכוסות א-ג, על פי תצפיות הניסוי שביצעתם, או על פי הצילומים המופיעים באיור 2 בהמשך.

כלי	ריכוז התלתי של יוני $S_2O_3^{2-}{}_{(aq)}$	זמן בשניות
א		
ב		
ג		

ה. בחנו את הקשר בין הריכוז ההתחלתי של תמיסת התיוסולפט $S_2O_3^{2-}{}_{(aq)}$ לבין קצב התגובה. כיצד משפיע שינוי בריכוז המגיב על הזמן הדרוש לתגובה?

* הניסויים 3 ו-4 מבוססים על ניסוי 1 בספר תעשיית האמוניה, הכימיה אתגר, רות בן צבי ויהודית זילברשטיין. מכון ויצמן למדע.

איור 2 - השפעת ריכוז מגיב על קצב התגובה.



0 - התחלת הניסוי, 1 - הופעת עכירות בכוס א אחרי 24 שניות, 2 - הופעת עכירות בכוס ב אחרי 39 שניות, 3 - הופעת עכירות בכוס ג אחרי 130 שניות.

מניסוי 3 ניתן להסיק, שלעתים קיים קשר בין ריכוז החומר המגיב לבין קצב התגובה.
נוכל להרחיב לגבי תגובות אחרות ולומר כי:

- *בתגובות רבות, ריכוז החומר המגיב משפיע על קצב התגובה, אך מידת ההשפעה יכולה להיות שונה בין תגובות שונות.*
- *ישנן תגובות, בהן ריכוז החומר המגיב אינו משפיע על קצב התגובה.*

כימיה בהקשר אחר - חוקי הקצב ואוקיינוסים

לאוקיינוסים יש תפקיד חשוב במערכת האקלימית של כדור הארץ: הם קולטים, מעבירים ומחליפים אנרגיה, מים נקיים, וגם גזים שונים (ביניהם פחמן דו חמצני) שנקלטו מהאוויר. כיצד עוקבים אחרי תזוזתם של המים, כלומר אחר תכולת החומרים המומסים בהם ואחר השינויים הכמותיים החלים בחומרים אלה? יסודות רדיואקטיביים אשר נמצאים במים משמשים כ"סמנים" שניתן לעקוב אחריהם, גיאוגרפית וכמותית. המעקב מתאפשר בזכות הכרת **חוק הקצב** של התפרקות היסודות הרדיואקטיביים השונים, המאפשר לדעת כמה חומר היה בזמן עבר לפי ריכוזו העכשווי.

חוקי קצב

ניקח פסק זמן מסקירת הגורמים המשפיעים על קצב של תגובה, כדי לפרט מעט על אחד הגורמים, ריכוז המגיבים.

בניסוי 3 מצאנו, כי ריכוזו ההתחלתי של המגיב- יוני התיוסולפאט $S_2O_3^{2-}{}_{(aq)}$ - משפיע על קצב התגובה.

האם ריכוזי המגיבים משפיעים באופן זהה על מהירויות התגובות השונות?

התשובה היא: לא. האופן שבו ריכוז המגיבים משפיע על קצב התגובה משתנה בין התגובות השונות. כלומר, **לתגובות שונות יש "חוקי קצב" שונים**. חוק הקצב מבטא קשר בין קצב התגובה לבין ריכוז התחלתי של מגיב/ים.

נדגיש, כי **כל המאפיינים שנקראים קינטיים**, ביניהם קצב התרחשותה של תגובה וחוק הקצב שלה, נקבעים **באופן ניסוי**. כפי שראינו בניסוי 1, קצב התגובה נקבע בפועל על ידי מדידת תכונה כלשהי של אחד החומרים והוא משתנה בעקבות השינוי בריכוזו של אותו חומר במהלך התגובה.

כאשר יש במערכת מגיבים בלבד ומחשבים קצב התחלתי של תגובה, ריכוזו ההתחלתי של מגיב עשוי להשפיע על קצב השינוי בריכוזו, כלומר על קצב התגובה (כפי שראינו בניסוי 3). נמצא, שמידת התלות בין קצב התגובה לבין ריכוז התחלתי של מגיב, **שונה** בתגובות השונות.

נניח, שבוחנים את מידת התלות של קצב תגובה בריכוזו ההתחלתי של אחד המגיבים בה, שנסמנו באות A.

ברוב התגובות נמצא את אחד מסוגי התלות המופיעים בטבלה הבאה. לכן ממינים את סוג התגובות לתגובה מסדר אפס, תגובה מסדר ראשון או תגובה מסדר שני - בהתאם לסוג התלות בין ריכוזו של A לבין קצב התגובה.

מאפיין	סוג התגובה - **סדר התגובה**		
	אפס	**ראשון**	**שני**
תלות קצב התגובה **בריכוז** המגיב A	**אינו תלוי** בריכוז **המגיב**	**תלוי** בריכוז **המגיב**	
	קצב התגובה קבוע ואינו תלוי בריכוז A	קצב התגובה תלוי ביחס ישר בריכוז A	קצב התגובה תלוי בריבוע הריכוז של A
ביטוי מתמטי - **חוק הקצב**	קצב $=k[A]^0$	קצב $=k[A]^1$	קצב $=k[A]^2$

כאשר קצב התגובה תלוי בריכוזו ההתחלתי של A בחזקה אחת, מכנים זאת: תגובה מסדר ראשון במגיב A.

כאשר קצב התגובה גדל לפי ריכוזו ההתחלתי של A בחזקה שתיים, מכנים זאת: תגובה מסדר שני במגיב A. וכך הלאה.

בנוסף לתלות בריכוז המגיב, קצב התגובה תלוי גם בגורם קבוע, אשר מאפיין תגובה מסוימת בטמפרטורה נתונה, ונקרא **קבוע הקצב**. את קבוע הקצב מסמנים k.

חוק הקצב - הינו הביטוי המתמטי אשר מפרט את סוג התלות בין ריכוזו ההתחלתי של המגיב A לבין קצב התגובה, כאשר שאר הגורמים קבועים:

חוק הקצב של מגיב A: קצב תגובה = $k\,[A]^n$

כאשר בתגובה יש מספר מגיבים, **נבחנת בנפרד השפעת הריכוז של כל מגיב** על קצב התגובה. מבצעים את התגובה בריכוזים שונים של מגיב A, כשריכוזי שאר המגיבים נשארים קבועים, וקובעים חוקיות של קצב התגובה כתלות במגיב A. אחר כך, משנים רק ריכוזים של מגיב B ומודדים שוב את קצב התגובה, וכך הלאה. ייתכן, כי התלות בין הריכוזים לבין הקצב תהיה שונה במגיבים שונים.

מתקבל ביטוי כללי של קצב התגובה, שמכונה גם "חוק הקצב של התגובה" - בהתאם למספר המגיבים A, B .... בביטוי זה, n או m, או מעריכים נוספים, יכולים להיות מספר שלם (כולל אפס), או שבר, ונקרא **סדר התגובה**.

סדר תגובה נקבע עבור כל מגיב בנפרד, אך ניתן להתייחס לכל המגיבים בתגובה בחוק קצב כולל:

***חוק הקצב הכולל של התגובה**, הוא: קצב = $k\,[A]^n\,[B]^m\ldots$*

פעילות 1: סדר התגובה והצלחה בתחום הרפואה

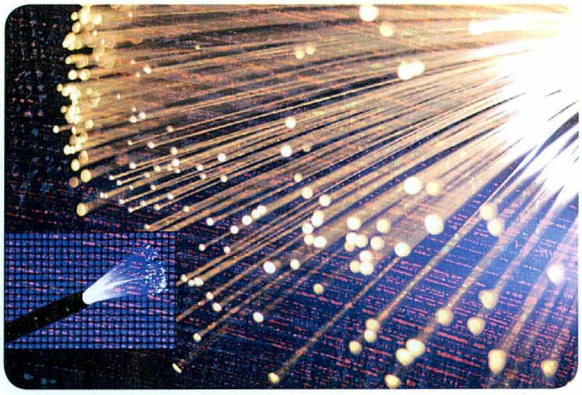
קראו את הקטע הבא וענו על השאלות שלאחריו .

השיטה הפוטודינמית

השיטה הפוטודינמית הינה שיטת טיפול בתאים סרטניים, המבוססת על תכונותיהם הייחודיות של חומרים מסוימים המצויים בתאים אלה: א. החומרים הופכים להיות הרסניים לתא בו הם נמצאים כאשר כמותם גדולה; ב. הקרנה[1] באור מגבירה את ייצורם של חומרים אלה.

כלומר, הקרנת תאי סרטן יכולה לגרום להריסתם וזו, כמובן, תוצאה רצויה לחולה.

Pp9 (פרוטופורפירין 9) הוא דוגמה לחומר שתכונותיו תוארו קודם. נמצא, ש- Pp9 נוצר בתאים סרטניים מהמגיב 5-aminolevulunic acid, המכונה ALA.



כדי להבטיח תוצאה רפואית רצויה, יש צורך בכמויות מספיקות של Pp9 בתאים. לכן, חשוב לדעת מהו קצב תגובת ההיווצרות של Pp9 מהמגיב ALA ואת ריכוזי ה ALA (5-aminolevulunic acid) שיש ליצור בתוך תאים אלה.

מחקרים הראו, כי בתאים סרטניים מסוימים, התגובה היא מסדר שני ב- ALA. כלומר, קצב ההיווצרות של Pp9 תלוי בריבוע ריכוזו של ALA בתא הסרטני.

בניסיון לבסס ממצאים אלה, נעשה מחקר נוסף, שהשתמש בטכניקות ניסוי משופרות. אך הפעם, החוקרים הגיעו למסקנות חדשות לגבי השלבים בהם מתרחש התהליך.

קטע מעובד על פי Wolun Cholewa & Warchol (2004). Folia Histochemica & Cytobiologica 42, 2, 131-135.

שאלות

1. מהו תפקיד ההקרנה של התאים?
2. בקטע מוזכרים שני חומרים. מהי התגובה בה הם מעורבים?
3. מהו סדר התגובה כפי שנקבע תחילה? נסחו את חוק הקצב שהוצע
4. מדוע חשובה לחוקרים קביעת סדר התגובה? פרטו תשובתכם.

1 ההקרנה נעשית בעזרת סיב אופטי.

נביא מספר דוגמאות להמחשת הסוגים השונים של חוקי קצב של תגובות.

תגובות בהן הקצב תלוי בריכוז ההתחלתי של המגיבים

1. **תגובה מסדר ראשון**: תגובת הפירוק של מימן על-חמצני: $2H_2O_{2(aq)} \rightarrow 2H_2O_{(g)} + O_{2(g)}$

בטבלה הבאה מובאים חלק מהנתונים הניסויים אשר שימשו לשרטוט הגרף שבאיור 1:

הזמן- t שעבר מתחילת הניסוי, בדקות	פרק הזמן - Δt שנבחר, בדקות	ריכוז H_2O_2 בזמן t, במול לליטר	ההפרש בריכוזים בפרק הזמן שנבחר, במול לליטר	קצב התגובה = $\Delta[H_2O_2]/\Delta t$ (הפרש בריכוזים ביחס לפרק זמן), במול לליטר לדקות
10	10	0.59	0.59-0.37 = 0.22	0.22: 10 = 0.022
20	10	0.37	0.37-0.22 = 0.15	0.15: 10 = 0.015
30	10	0.22	0.22-0.13 = 0.09	0.09: 10 = 0.009
40		0.13		

ניעזר בנתונים הניסויים אשר בטבלה, כדי לבחון **כיצד** משפיע הריכוז ההתחלתי של מימן על - חמצני על קצב התגובה:

כאשר הריכוז קטן פי *1.60 = 0.59:0.37, קצב התגובה קטן פי *1.46 = 0.022:0.015

כאשר הריכוז קטן פי *2.68 = 0.59:0.22, קצב התגובה קטן פי *2.44 = 0.022:0.009

*מדידות ניסוייות כוללות, לעיתים, שגיאות שונות.

החישובים הנ"ל מצביעים על קשר מתמטי בין הריכוז של מימן על-חמצני לבין קצב התגובה:

כאשר ריכוזו ההתחלתי של מימן על-חמצני גדול יותר, קצב התגובה גדול יותר באותו שיעור, כלומר מתקיים הקשר: קצב = ריכוז מגיב בחזקה אחת.

על פי טבלת סוגי התגובות אשר הוצגה קודם, ניתן לראות שפירוק המימן העל-חמצני הינו תגובה מסדר ראשון: קצב תגובה = $k[H_2O_2]$

2. **תגובה מסדר שני**: עבור התגובה: $2C_4H_{6(g)} \rightarrow C_8H_{12(g)}$

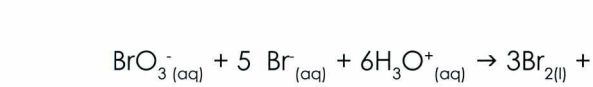
נמצא, באופן ניסויי, כי. קצב = $k[C_4H_6]^2$

כאשר קצב התגובה תלוי בריבוע הריכוז של המגיב $C_4H_{6(g)}$, התגובה היא **מסדר שני**.

תגובה מסדר אפס - בה הקצב אינו תלוי בריכוז ההתחלתי של המגיבים

שריפת הזיקוק - ניסוי 1 בפרק א, כמו תגובות שריפה של חומרים מוצקים אחרים, אינה תלויה כלל בריכוז המגיב, זו תגובה **מסדר אפס**. שריפת הזיקוק הינה תגובה הטרוגנית. הקצב של תגובות הטרוגניות רבות, ואף של תגובות הומוגניות המתרחשות על פני מוצק, הן מסדר אפס, כי בפועל לא נמדדת תלות בריכוז המגיבים.

תגובה מסדר כולל: כאשר בתגובה יש מספר מגיבים, ייבדק קצב התגובה ביחס לכל אחד מהמגיבים בנפרד. נביא דוגמה:



$BrO_3^-{}_{(aq)} + 5\ Br^-_{(aq)} + 6H_3O^+_{(aq)} \rightarrow 3Br_{2(l)} + 9\ H_2O_{(l)}$

קצב = $k\ [BrO_3^-]\ [Br^-]\ [H_3O^+]^2$

תגובה זו היא מסדר **ראשון** ביוני ברומט, מסדר **ראשון** ביוני ברום, מסדר **שני** ביוני הידרונים. **בסך הכל, סדר התגובה הוא רביעי:** 1 + 1 + 2 = 4.

סיכום חוקי הקצב של תגובות

1. *הסוגים העיקריים של סדר תגובה הינם: אפס, ראשון, שני, או סכום שלהם.*
2. *קובעים את חוק הקצב על פי תוצאות של ניסוי, על ידי חישוב קצב התגובה בעקבות מדידת השינויים בריכוזי המגיבים.*
3. *חוק הקצב אינו נובע ממקדמים סטויכיומטריים של הניסוח המאוזן, אלא ממדידת קצב התרחשותה של התגובה.*
4. *כאשר יש מספר סוגים של מגיבים בתגובה, נקבע סדר התגובה עבור כל מגיב בנפרד והוא עשוי להיות שונה ממגיב למגיב. חוק הקצב של התגובה כולל את כל מרכיבי סדר התגובה אשר שונים מאפס.*

שאלות בנושא קצב תגובה

1. נמצא, כי פירוק אמוניה ליסודות מתרחש על חוט פלטינה לוהט בקצב קבוע, עד להיעלמות האמוניה:

$2NH_{3(g)} \rightarrow N_{2(g)} + 3H_{2(g)}$

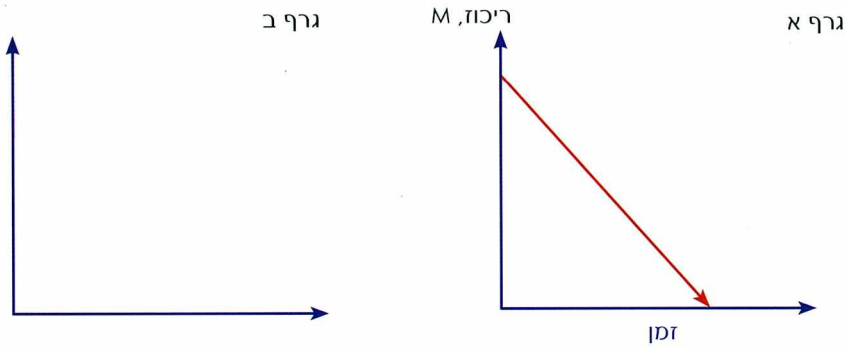
השתמשו במידע שהובא בדוגמה זו ובטבלת סוגי התגובות שהוצגה קודם, כדי לענות על השאלות הבאות:

א. מהו חוק הקצב של התגובה?

ב. איור 2 מורכב מגרף א ומגרף ב ומתייחס לתגובה מסדר אפס.

i. תארו במילים את גרף א.

ii. שרטטו בעצמכם את גרף ב, אשר יתאר את התלות בזמן של קצב התגובה מסדר אפס. התאימו את גרף ב לנתונים המופיעים בגרף א. הסבירו את קביעותיכם ואת **ההבדלים** בין שני הגרפים.



2. מהו הסדר של כל אחת מהתגובות הבאות, בהתייחס לכל מגיב ולסך הכל:

א. קצב = $k\cdot[N_2O]$ $\quad 2\,N_2O_{(g)} \rightarrow 2\,N_{2(g)} + O_{2(g)}$

ב. קצב = $k\cdot[H_2]\,[I_2]$ $\quad H_{2(g)} + I_{2(g)} \rightarrow 2HI_{(g)}$

3. עבור פירוק חנקן דו חמצני : $2NO_{2(g)} \rightarrow 2NO_{(g)} + O_{2(g)}$

נמצא באופן ניסוי כי: קצב = $k\,[NO_2]^2$

השלימו את החסר בטבלה הבאה:

ניסוי	ריכוז התחלתי של NO_2 (mol/L)	קצב התחלתי (mol/L·min)
1	$1.0\cdot 10^{-2}$	$4\cdot 10^{-6}$
2	$2.0\cdot 10^{-2}$	?
3	$3.0\cdot 10^{-2}$	?

4. אם NO_2 מתפרק בקצב $6.5\cdot 10^{-3}$ mol/L·s בתגובה $2NO_{2(g)} \rightarrow 2NO_{(g)} + O_{2(g)}$

מהו קצב היווצרות החמצן?

5. עבור התגובה: $2ClO_{2(aq)} + 2OH^-_{(aq)} \rightarrow ClO_2^-{}_{(aq)} + ClO_3^-{}_{(aq)} + H_2O_{(l)}$

נמדד קצב התגובה קצב = $-\frac{\Delta[ClO_2]}{\Delta t}$

בשלושה ניסויים שונים. התוצאות מופיעות בטבלה הבאה:

קצב התחלתי mol/L·s	ריכוז התחלתי של OH^- mol/L	ריכוז התחלתי של ClO_2 mol/L
$5.75 \cdot 10^{-2}$	0.100	0.050
$2.30 \cdot 10^{-1}$	0.100	0.100
$1.15 \cdot 10^{-1}$	0.050	0.100

א. קבעו את חוק הקצב עבור $ClO_{2(aq)}$

ב. קבעו את חוק הקצב עבור $OH^-_{(aq)}$.

ג. קבעו את חוק הקצב של התגובה הכוללת.

6. ניזכר בניסוי 1 בפרק א, ניסוי הזיקוקים. הציעו דרך למדוד את קצב התגובה של בעירת הזיקוק.

הגורמים המשפיעים על קצב תגובה - המשך

למדנו כי:

1. סוג החומרים משפיע על קצב התגובה
2. בתגובות רבות, ריכוז החומר המגיב משפיע על קצב התגובה.

נמשיך כעת, בסקירת גורמים נוספים אשר משפיעים על קצב תגובה. לשם כך, יש לבצע את ניסוי 4 או להסיק מסקנות מניסוי אשר בוצע ושתוצאותיו צולמו ומובאות באיורים 3א ו-3ב בהמשך.

ניסוי 4 - מה משפיע על קצב התגובה (3)?

חומרים וציוד לקבוצת תלמידים או להדגמה

בקבוק שבו תמיסת 0.5 M HCl, בקבוק שבו תמיסת 0.15 M $Na_2S_2O_3$, שלוש משורות בנפח 25 מ"ל. שתי כוסות של 100 מ"ל, ארבעה ארלנמיירים ממוספרים של 50 מ"ל, כוס של 250 מ"ל, מים רותחים, נייר שעליו רשומה האות א, נייר שעליו רשומה האות ב, מד טמפרטורה ושעון עצר או שעון עם מחוג לשניות.

מהלך הניסוי:

1. לכל אחד מהארלנמיירים, 1 ו-2, הכניסו 10 מ"ל תמיסת $Na_2S_2O_3$ ו-20 מ"ל מים.
2. לכל אחד מהארלנמיירים, 3 ו-4, הכניסו 20 מ"ל תמיסת HCl ו-5 מ"ל מים.

חלק א

הניחו כוס של 100 מ"ל מעל הנייר עם אות א הכניסו לכוס את תכולת הארלנמיירים 1 ו-3, מדדו טמפרטורה והפעילו את שעון העצר.

שאלה: מהו הזמן העובר עד שהאות א הרשומה על הנייר אינה נראית יותר?

חלק ב

הכניסו מים רותחים לתוך הכוס של 250 מ"ל הניחו את ארלמאיירים 2 ו-4 לתוך המים ומדדו את הטמפרטורה בתוך אחת התמיסות. הניחו כוס שנייה של 100 מ"ל מעל הנייר עם אות ב. כאשר טמפרטורת התמיסה מגיעה לכ- 50°C, הכניסו לכוס את תכולת הארלנמיירים 2 ו-4, מדדו טמפרטורה והפעילו את שעון העצר.

מהו הזמן העובר עד שהאות ב הרשומה על הנייר אינה נראית יותר?

השלימו בטבלה הבאה את הטמפרטורות בהן התבצעו שני חלקי הניסוי, ובהתאמה, את הזמנים שנמדדו.

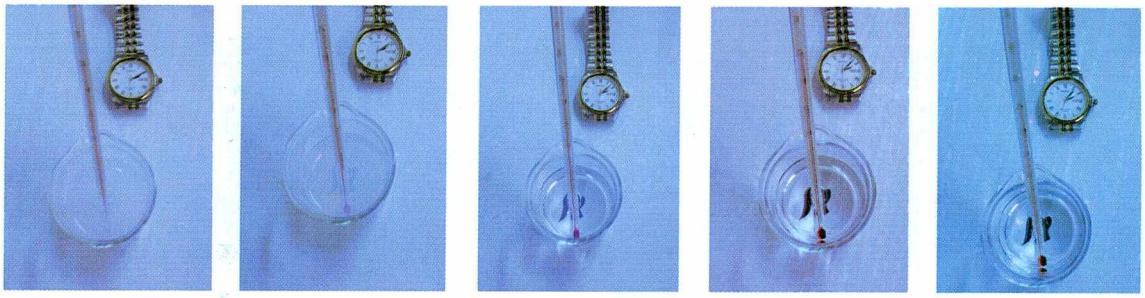
כלי	טמפרטורה, ב- °C	זמן, בשניות
א		
ב		

שאלות בסקבות הניסוי

1. על סמך התוצאות בניסוי 4, כיצד משפיעה הטמפרטורה על קצב התגובה?
2. כיצד אפשר להסביר ברמה מיקרוסקופית את השפעת הטמפרטורה על קצב התרחשותן של תגובות?

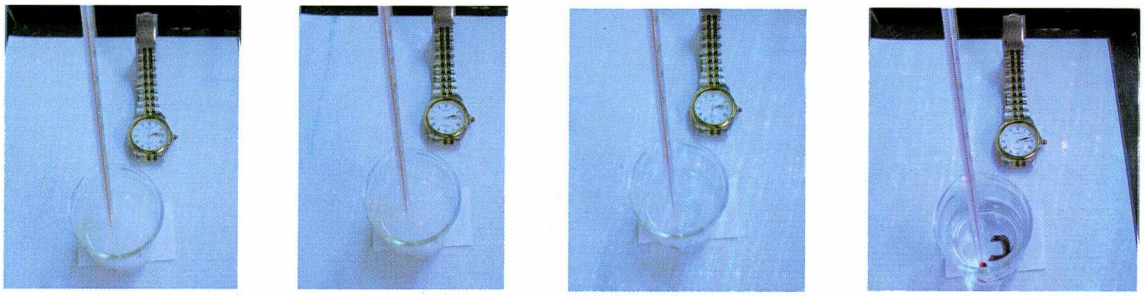
צילום של תוצאות לדוגמה באיור 3א ו-3ב.

איור 3 א- צילומים של כלי א, בטמפרטורה של 50°C בניסוי 4.



תחילת הניסוי | לאחר 1 דקות | לאחר 2 דקות | לאחר 3 דקות | לאחר 4 דקות

איור 3 ב- צילומים של כלי ב, בטמפרטורה של 22°C, בניסוי 4.



תחילת הניסוי | לאחר 25 דקות | לאחר 40 דקות | לאחר 55 דקות

הקשר בין הטמפרטורה שבה מתרחשת תגובה לבין קצב התרחשותה מיושם במקרים המוכרים לכם מחיי היום- יום. התייחסו לכל אחד מהמקרים הבאים:

- מזון העומד במשך כמה שעות במטבח חם, לעומת מזון העומד אותו פרק זמן במקרר.
- בישול על פלטת שבת - הטמפרטורה שלה כ 100°C, לעומת בישול רגיל - טמפרטורת הלהבה כ-600°C מעלות.
- ייבוש כביסה בחוץ ביום קיץ לעומת ייבוש כביסה ביום חורף (ללא רוח).

פסק זמן לחשיבה

1. באיזה שינוי דנים בכל אחד מהמקרים?
2. כיצד משפיעה הטמפרטורה בכל אחד מהמקרים?

מביצוע ניסוי 4 ומהדיון בעקבותיו ניתן להסיק כי:

הטמפרטורה הינה גורם המשפיע על קצב התרחשותן של תגובות כימיות.
במרבית המקרים, העלאת הטמפרטורה גורמת להאצת קצב התגובה.

ניסוי 5: מה משפיע על קצב התגובה (4)?

חומרים וציוד לקבוצת תלמידים או להדגמה

2 כדורי אלקא זלצר[1], 2 כוסות בנפח 250 מ"ל, 2 משורות בנפח 200 מ"ל, מכתש ועלי, מים מזוקקים, שעון למדידת שניות.

מהלך הניסוי

א. פוררו כדור אחד בעזרת עלי ומכתש לאבקה דקה.

ב. הכניסו לכוס אחת כדור אלקא זלצר שלם ולכוס שנייה את האבקה שפוררתם.

ג. מלאו שתי משורות ב- 200 מ"ל מים מזוקקים.

ד. הכניסו, בו זמנית, 200 מ"ל מים מזוקקים לכל אחת מהכוסות ומדדו את משך הזמן הלוקח עד לסיום ההמסה.

שאלות בעקבות ניסוי

1. תארו את תצפיותיכם.
2. האם קצב ההמסה של שני הכדורים זהה?
3. האם תהליך ההמסה הסתיים לאחר אותו פרק זמן?
4. מהו הגורם המשתנה בניסוי?
5. מהי שאלת החקר אותה בחנתם בניסוי זה?
6. הציעו תשובה לשאלת החקר.

דיון בתוצאות

כאשר מתרחשת תגובה בין מגיבים הנמצאים במצבי צבירה שונים, כגון בין מוצק לנוזל או בין מוצק לגז, חלקיקי המוצק המגיבים נמצאים רק בחלק החיצוני שלו, על פניו. לפיכך, קצב התגובה מושפע **משטח הפנים של המוצק**, מכיוון שהמגע בין שני המגיבים מתרחש שם. נוכל להסיק כי:

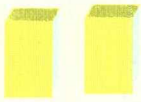
תגובה בין מוצק לגז, או בין מוצק לנוזל, מתרחשת מהר יותר ככל ששטח הפנים של המוצק גדול יותר.

1 כדורי אלקא זלצר משמשים כתרופה לטיפול בכאבי ראש וצרבת. הם נבלעים לאחר המסתם במים.

פעילות העשרה 1 - לדעת יותר על שטח פנים

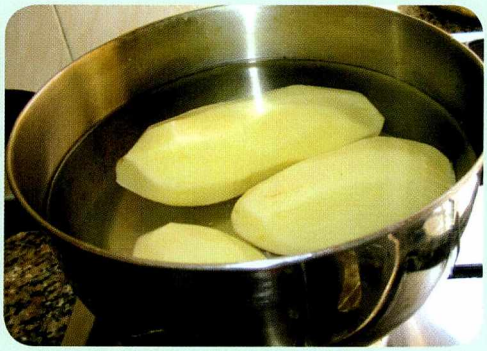
שטח הפנים הכולל של מוצק יגדל ככל שיחולק לחלקים אשר נפחם יהיה קטן יותר.
נדגים את השפעת שטח הפנים, על ידי השוואת הנפח ושטח הפנים של קובייה בעלת מסה מסוימת לנפח ולשטח הפנים של הקובייה כאשר היא מחולקת לגופים קטנים יותר.

שינוי שטח הפנים כתלות בנפח הגוף

צורת הגוף	ממדי הגוף בס"מ	נפח כולל - סמ"ק	שטח פנים כולל - סמ"ר
	1 קובייה 1 x 1 x 1	1	6 x (1 x 1) = 6
	2 תיבות 0.5 x 1 x 1	2 x 0.5 = 1	2 x (0.5 x 1 x 4 + 1 x 2) = 8
	4 תיבות 0.25 x 1 x 1	4 x 0.25 = 1	4 x (0.25 x 1 x 4 + 1 x 2) = 12

1. חשבו פי כמה גדל שטח הפנים כאשר הקובייה חולקה ל-4 גופים שווים בנפחם?
2. חשבו פי כמה יגדל שטח הפנים, כאשר אותה קובייה תחולק ל- 10 גופים שווים בנפחם.
3. חשבו פי כמה יגדל שטח הפנים, כאשר אותה קובייה תחולק ל- 20 גופים שווים בנפחם.

תארו לעצמכם פי כמה עולה שטח הפנים כאשר גוש אשר נפחו 0.5 סמ"ק מפורר לאבקה.....



סיכום הגורמים המשפיעים על קצב תגובה

- *סוג החומרים ותכונות מאפיינות של תגובות (כמו אנרגיית שפעול, שתידון בהמשך)*
- *הריכוזים ההתחלתיים של המגיבים (מלבד תגובות מסדר אפס)*
- *טמפרטורה*
- *שטח מגע (בתגובות הטרוגניות)*

אנרגיית שפעול וקצב תגובות

בסוף פרק א למדנו, כי לתגובות יש אנרגיית שפעול, המסומנת E_a. אנרגיית השפעול הינה גודל קבוע, שאינו תלוי בטמפרטורה ו**שמאפיין** תגובה מסוימת. קצב תגובה בטמפרטורה נתונה מושפע מגודלה של אנרגיית השפעול: תגובה בעלת אנרגיית שפעול גדולה איטית יותר מתגובה בעלת אנרגיית שפעול נמוכה, אם שתיהן אכן מתרחשות באותה טמפרטורה. הסיבה, פחות מולקולות עוברות את הסף של אנרגיית השפעול.

ניתן לקבוע באופן ניסויי את גודלה של אנרגיית השפעול עבור תגובות רבות.

להכרת ערכה של אנרגיית השפעול של תגובה יש חשיבות מעשית, הקשורה לקצב התגובה:

1. אנרגיית השפעול מאפשרת חיזוי קצב תגובה בטמפרטורות שונות - כאשר יודעים את גודלה של אנרגיית השפעול, אפשר לחזות את הקצב ההתחלתי של אותה תגובה בטמפרטורה אחרת, בלי לבצע בפועל את התגובה באותה טמפרטורה. לשם כך, יש למדוד את קצב התגובה בטמפרטורה אחת ולעשות חישוב מתאים עבור טמפרטורה אחרת. דרך החישוב לא תילמד כאן.
2. אנרגיית השפעול מאפשרת חיזוי של מידת ההשפעה של הטמפרטורה על קצב התגובה - כאשר לתגובה יש אנרגיית שפעול גדולה, קצב התרחשותה תלוי במידה רבה בטמפרטורה, לעומת קצב התגובה של תגובה בעלת אנרגיית שפעול נמוכה, אשר פחות רגיש לאותו שינוי בטמפרטורה.

דוגמה להשפעה של אנרגיית שפעול על מידת ההשפעה של הטמפרטורה:

נערכו ניסויים לבחינת השפעת השינוי בטמפרטורה על קצב התרחשותן של תגובות:

לתגובה: $2NO_{2(g)} \rightarrow N_{2(g)} + 2O_{2(g)}$ יש אנרגיית שפעול השווה ל: 33.4 kJ.

נמצא, שבטמפרטורה 116°C קצב התגובה גדול פי 10, לערך, מקצב התגובה בטמפרטורה 46°C עבור אותו ריכוז התחלתי של מגיב.

לתגובה: $H_{2(g)} + I_{2(g)} \rightarrow 2HI_{(g)}$ יש אנרגיית שפעול השווה ל: 150 kJ.

נמצא, שבטמפרטורה 375°C קצב התגובה גדול פי 33 לערך, לעומת קצב התגובה בטמפרטורה 302°C, עבור אותם ריכוזים התחלתיים של מגיבים.

אפשר להסיק, כי הבדל דומה בטמפרטורה (כ-70 מעלות) גרם לשינוי גדול יותר בקצב התגובה עם אנרגיית שפעול גדולה יותר.

מודל ההתנגשויות בין חלקיקים

כדי להסביר היבטים קינטיים של תגובות (מה מאפשר לתגובות להתחיל להתרחש, באיזה קצב הן מתרחשות ומה עשוי להשפיע על קצב התרחשותן), נפנה לרמה המולקולרית ונציג מודל שנקרא מודל ההתנגשויות בין חלקיקים. על פי מודל זה, המתבסס על חומרים גזיים, מולקולות נמצאות בתנועה מתמדת, הן בעלות אנרגיות שונות והן מתנגשות ביניהן. כתוצאה מכך, עשויים להתרחש שינויים בהרכב המולקולות ובאנרגיה הפנימית שלהן. לכן, התנאי הראשון להתרחשות שינוי בהרכב החומרים, כלומר להתרחשות תגובה כימית, הוא קיום התנגשויות בין מולקולות.

פסק זמן לחשיבה

1. כיצד תסבירו את השפעת ריכוז המגיבים על קצב התגובה, בהסתמך על מודל ההתנגשויות שהוצג?
2. בהסתמך על מודל ההתנגשויות, כיצד תסבירו את השפעת הטמפרטורה על קצב התגובה?

מענה לשאלות:

1. בניסוי 3 ראינו, כי ריכוז גדול יותר של מגיב גורם לקצב התחלתי גדול יותר של אותה תגובה. על פי מודל ההתנגשויות, ריכוז גדול יותר של מגיב מגדיל את הסיכוי להתנגשויות בין החלקיקים. לכן, עשויים להתקבל יותר תוצרים באותו פרק זמן.
2. כבר למדנו, כי הטמפרטורה קשורה לאנרגיה הקינטית הממוצעת של המולקולות. לכן, בטמפרטורה גבוהה יותר מהירות התנועה הממוצעת של החלקיקים גבוהה יותר וצפויות להתרחש יותר התנגשויות באותו פרק זמן.

עבור תגובות שמתרחשות בין מולקולות של חומרים במצב גז, ניתן לחשב את קצב ההתנגשויות. כמו כן, ניתן למדוד את הקצב של אותן תגובות. מהשוואה בין נתונים אלה עולה, שקצב ההתרחשות של תגובות (אפילו של תגובות מהירות) הוא איטי בהרבה מן המצופה על פי קצב ההתנגשויות בין המולקולות. ניתן להסיק מכך, ש**לא כל** ההתנגשויות בין מולקולות מובילות לשינוי בהרכב המולקולות, כלומר לשינוי בהרכב החומרים.

ברמה המאקרוסקופית למדנו שלתגובות יש **אנרגיית שפעול**, שהיא כמות האנרגיה הדרושה כדי שתגובה תתחיל להתרחש, כלומר שייווצרו תוצרים. כעת נדון בכך ברמה המיקרוסקופית. כדי להסביר מדוע לא כל התנגשות בין מולקולות מובילה לשינוי, מוצע **מודל התנגשויות מורחב**. במודל זה, אנרגיה משפיעה גם על קצב ההתנגשויות וגם על תוצאותיהן של ההתנגשויות - האם וכיצד הן עשויות לגרום לשינויים בהרכבן של המולקולות. המודל מניח היווצרות של חלקיקי ביניים בעלי אנרגיה גבוהה, הנקראים **תצמידים משופעלים**. מתצמידים משופעלים עשויות להיווצר מולקולות בעלות הרכב חדש, אלה הם התוצרים.

את התוצאות השונות של היווצרות תצמיד משופעל, או של היעדר היווצרותו, נדגים באיור 4 עבור התגובה:

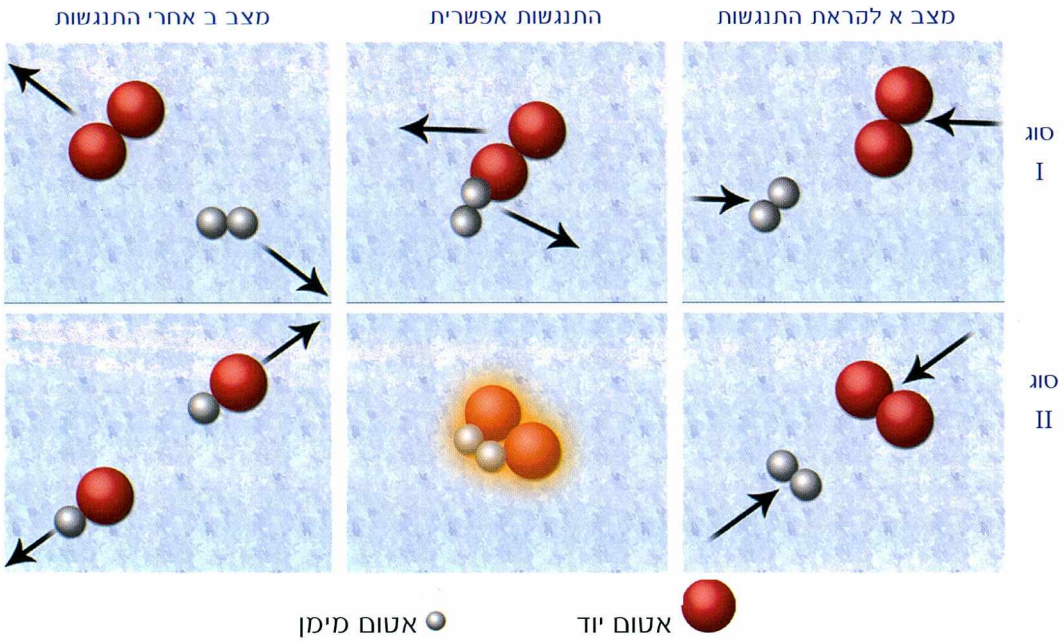
$$H_{2(g)} + I_{2(g)} \rightarrow 2HI_{(g)}$$

האטומים השונים מוצגים ככדורים בצבעים ובגדלים שונים, בצמדים שמייצגים מולקולות.

אטומי המימן מוצגים בצבע אפור ואטומי היוד מוצגים בצבע אדום. החיצים מייצגים את כיוון התנועה של

המולקולות. האיור מציג התנגשות אחת בלבד מכל סוג, למרות שמתרחשות הרבה התנגשויות בין מספר רב של מולקולות.

איור 4 - שני סוגים של התנגשויות בין מולקולות



כל שורה מייצגת סוג אחר של התנגשות:

- סוג I, מסביר היעדר התרחשות של תגובה: ממצב א - של מולקולות מגיבים, חלה התנגשות המובילה למצב ב - של מולקולות מאותו סוג שהיה לפני ההתנגשות.
- סוג II, מסביר התרחשות של תגובה: ממצב א - של מולקולות מגיבים, חלה התנגשות המובילה למצב ב - של מולקולות מסוג חדש - מולקולות תוצר.

איור 4 מתאר שני סוגים של התנגשויות בין מולקולות מגיבים **על פי תוצאותיהן השונות**: תוצאה אפשרית אחת היא היווצרות תוצרים ואילו תוצאה אפשרית שנייה היא אי היווצרות של תוצרים. לכן, שני הסוגים המתוארים הינם החשובים ביותר מתוך המיגוון הרחב של התנגשויות אפשריות. קיימים **שני** גורמים שאחראים לתוצאות שהוצגו.

1. גורם האנרגיה

א. גורם אנרגיה אחראי ליצירה, או אי יצירה, של תצמידים משופעלים:

כאשר מולקולות מגיבים מתנגשות כשהן בעלות אנרגיה גדולה מסף מסוים, נוצר תצמיד בין המולקולות, הנקרא תצמיד משופעל (באיור 4: בשורה תחתונה, מולקולה דו- אטומית מסוג אחד מתנגשת במולקולות דו-אטומית מסוג שני ונוצר תצמיד בעל אנרגיה גבוהה, ואילו בשורה עליונה, לא נוצר תצמיד משופעל).

ב. האנרגיה אחראית למעברי אנרגיה בתוך התצמיד המשופעל:

אנרגיה קינטית הופכת לאנרגיה פוטנציאלית כלומר, נוצרים קשרים חדשים ומתרופפים קשרים קיימים. אם הקשרים החדשים לא ניתקים עקב תנודות האטומים בתוך התצמיד המשופעל, נוצרים מהתצמיד המשופעל מולקולות מסוג חדש, עם קשרים חדשים. כלומר, נוצר תוצר.

ג. האנרגיה אחראית למעברי אנרגיה בין תצמידים משופעלים לבין מולקולות אחרות: בעקבות הפסד אנרגיה בהתנגשות התצמיד עם מולקולות אחרות, יתכן גם שייווצרו מהתצמיד המשופעל מולקולות מסוג המגיבים, בחזרה. (איור 4 אינו מראה אפשרות זו, בה נוצר תצמיד משופעל, אשר מתפרק בחזרה למולקולות מסוג המגיבים).

לסיכום, גורם האנרגיה הוא בעל השפעה מכרעת על תהליך היווצרות של מולקולות מסוג חדש, הוא התוצר.

2. **גורם מרחבי** הוא רכיב נוסף של המודל המולקולרי המורחב של התנגשויות בין חלקיקים. מולקולות המתנגשות עם אנרגיה קינטית מספקת, צריכות להתנגש ב**זווית מתאימה בין מרכזי המולקולות** כדי שההתנגשות תגרום לשינויים במבנה המולקולות המקוריות. גורם זה מודגם באיור 5, בשורה השנייה, כהתנגשות מסוג II.

סיכום המתרחש בתגובה, ברמה מיקרוסקופית, על פי המודל החלקיקי המורחב:

א. המולקולות נעות ומתנגשות, עם אנרגיות שונות ובזוויות שונות.

ב. אם הן מתנגשות באנרגיה נמוכה מדי, או בזווית לא מתאימה, לא קורה דבר לבד משינוי כיוון.

ג. אם האנרגיה מתאימה והזווית מתאימה, עשוי להיווצר חלקיק בלתי יציב שנוצר לשבריר שנייה ונקרא תצמיד משופעל.

*ד. תצמיד משופעל מתפרק למולקולות שיצרו אותו, או למולקולות חדשות. במקרה של היווצרות מולקולות חדשות, נהוג לומר כי **ההתנגשות** של מולקולות המגיב הייתה **פורייה**.*

ה. אם מתרחשות התנגשויות פוריות רבות, מתרחשת תגובה הניתנת למדידה ברמה מאקרוסקופית.

הסבר תלות קצב התגובה בטמפרטורה

בניסוי 4 ראינו, כי בטמפרטורה גבוהה יותר, התגובה התרחשה מהר יותר. כמו כן, הזכרנו דוגמאות מוכרות מחיי היום יום, בהן קצב התגובה גדול יותר בטמפרטורה גבוהה, לעומת קצב איטי בטמפרטורה נמוכה: קילקול מזון במקרר איטי יותר מאשר ללא קירור; אידוי מים בקיץ מהיר לעומת אידוי איטי בחורף ועוד.

כעת ננסה לתת הסבר ברמה המיקרוסקופית לתלות הקיימת בין קצב התגובה לבין הטמפרטורה.

בהסתמך על מודל ההתנגשויות בין מולקולות:

1. בטמפרטורה גבוהה יותר, **תדירות ההתנגשויות** בין מולקולות גדולה יותר מאשר בטמפרטורה נמוכה ולכן יש יותר סיכויים להיווצרות של תצמידים משופעלים. בעקבות כך, גדלים הסיכויים לשינויים

במבנה המולקולות, כלומר להיווצרות מולקולות של תוצר. מכאן, שבטמפרטורה גבוהה יותר גדל הסיכוי להיווצרות מולקולות התוצר באותה יחידת זמן, כלומר קצב התגובה גדול יותר.

2. בטמפרטורה גבוהה יותר, **יש יותר מולקולות בעלות אנרגיה קינטית גדולה יותר** מהאנרגיה המינימלית הדרושה להתנגשות פורייה, מאשר בטמפרטורה נמוכה יותר.

נקודות א ו-ב לעיל מסבירות מדוע בטמפרטורה גבוהה, קצב התגובה גדול יותר מאשר בטמפרטורה נמוכה.

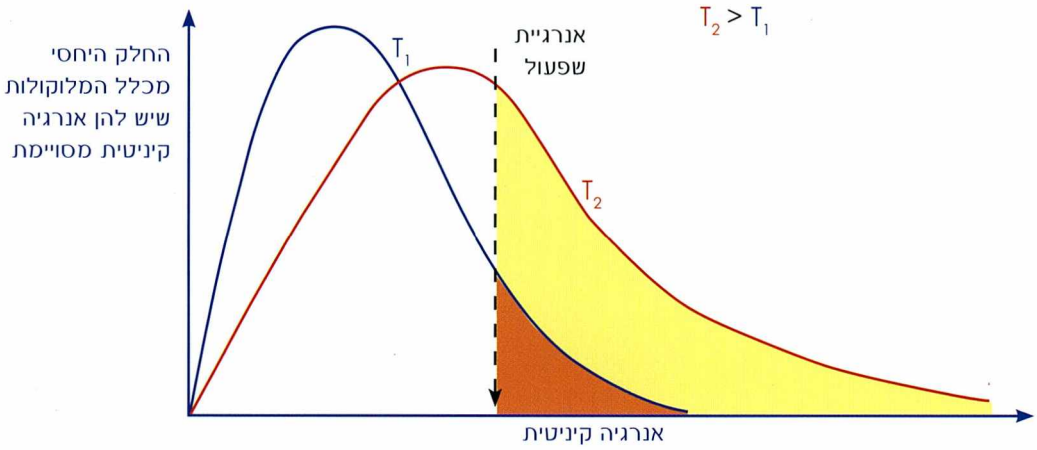
למדנו, כי הטמפרטורה של חומר הינה ביטוי לאנרגיה הקינטית ה**ממוצעת** של המולקולות. מתייחסים לאנרגיה הקינטית הממוצעת כיוון שבכל טמפרטורה האנרגיה של החומר מתחלקת באופן לא שווה בין המולקולות: לחלק מהמולקולות אנרגיה נמוכה מאוד, לחלק אחר יש אנרגיה גבוהה, ולחלק אחר יש אנרגיה גבוהה יותר. חלוקת האנרגיה בין המולקולות נקראת התפלגות אנרגיה.

איור 5 מראה את התפלגות האנרגיה של אותם מגיבים בשתי טמפרטורות שונות.

ניתן לראות, כי בטמפרטורה גבוהה התפלגות האנרגיה בין סך כל המולקולות הינה **שונה** מהתפלגות האנרגיה בטמפרטורה נמוכה.

בטמפרטורה גבוהה T_2, העקומה רחבה בהשוואה לעקומה בטמפרטורה נמוכה T_1. כלומר, בטמפרטורה גבוהה T_2, יש אחוז גדול יותר של מולקולות בעלות אנרגיות גבוהות. נתייחס לשטח שמתחת לשתי העקומות, מימין לערך של אנרגיית שפעול E_a. שטח זה מייצג את סך כל המולקולות בעלות אנרגיה קינטית גבוהה מסף אנרגיית השפעול. אם משווים את השטחים שמתחת לשתי העקומות, רואים, כי בטמפרטורה גבוהה, T_2 השטח גדול יותר מהשטח שמתחת לעקומה השנייה. כלומר, שבטמפרטורה גבוהה יותר יש יותר מולקולות בעלות אנרגיה גבוהה מאנרגיית השפעול. לכן, בטמפרטורה גבוהה, קצב התגובה גדול יותר מאשר בטמפרטורה נמוכה.

איור 5 - פיזור אנרגיה קינטית של גז בטמפרטורות שונות



בנוסף, בעזרת איור זה ניתן להבין כי, ככל שאנרגיית השפעול של תגובה היא גבוהה יותר, (ציינו על הגרף) יש פחות מולקולות בעלות אנרגיה קינטית גבוהה ולכן קצב התגובה יקטן.

סיכום ביניים ראשון

- קצב תגובה הינו השינוי בריכוזו של אחד המשתתפים בתגובה, ביחידת זמן.

הביטוי לקצב התגובה $A \rightarrow B$ הוא: $\text{קצב} = -\frac{\Delta[A]}{\Delta t} = +\frac{\Delta[B]}{\Delta t}$

- בדרך כלל, קצב התגובה אינו קבוע במהלך התרחשותה.

- הגורמים המשפיעים על קצב תגובה:

1. סוג החומרים ואנרגיית השפעול של התגובה: אנרגיית שפעול גבוהה גורמת לקצב איטי של תגובה.
2. ריכוזי החומרים: ריכוז התחלתי גדול יותר של מגיב גורם לקצב תגובה גדול יותר.
3. הטמפרטורה בה מתרחשת התגובה: טמפרטורה גבוהה גורמת לקצב תגובה מהיר.
4. שטח הפנים של מוצקים - אם מוצקים מעורבים בתגובה, שטח פנים גדול של המוצק גורם לקצב תגובה מהיר.

- סוגים שונים של תלות בין ריכוזי המגיבים לבין קצב התגובה:

1. תגובה מסדר אפס - הקצב אינו תלוי בריכוז המגיב.
2. תגובה מסדר ראשון - הקצב תלוי בריכוז התחלתי בחזקה אחת של מגיב.
3. תגובה מסדר שני - הקצב תלוי בריכוז התחלתי בחזקה שתיים של מגיב.

- אנרגיית שפעול קובעת את:

1. התחלת התרחשותה של תגובה.
2. קצב התגובה: כאשר אנרגיית השפעול גדולה, התגובה איטית.
3. תלות קצב התגובה בשינוי בטמפרטורה: כאשר אנרגיית השפעול גדולה, קצב התגובה משתנה הרבה בעקבות שינוי בטמפרטורה.

- מודל ההתנגשויות בין חלקיקים:

1. החלקיקים נמצאים בתנועה מתמדת. כאשר מתרחשות התנגשויות בזווית מתאימה בין חלקיקים (כגון מולקולות) בעלי אנרגיה שהיא מעל למינימום האופייני לתגובה (אנרגיית שפעול), נוצרים חלקיקים של תוצרים.
2. מאפשר להסביר את מכלול התופעות הקשורות לקצב תגובה.

שאלות

1. לכוס א, המכילה 50 מ"ל תמיסה מימית של נתרן כלורי $NaCl_{(aq)}$, מוסיפים טיפות של תמיסת עופרת חנקתית $Pb(NO_3)_{2(aq)}$ מתקבל משקע של עופרת כלורית $PbCl_{2(s)}$. לכוס ב, המכילה 50 מ"ל תמיסת נתרן כלורי $NaCl_{(aq)}$, מוסיפים טיפות של תמיסת כסף חנקתי $AgNO_{3\,(aq)}$ ושוקע כסף כלורי $AgCl_{(s)}$.

השוו בין שתי התגובות. **האם** תוכלו לומר אם התגובות הנ"ל שונות ב:

א. סוג התגובה בכל מקרה?

ב. קצב הופעת המשקע?

ג. סדר התגובה ביחס ליוני כלור?

ד. אנרגיית השפעול של התגובה? פרטו ונמקו את תשובותיכם.

2. התייחסו ליצירת אמוניה בתגובה הבאה: $N_{2(g)} + 3\,H_{2(g)} \rightarrow 2NH_{3(g)}$

והשלימו את החסר בהיגדים הבאים:

א. קצב ההיעלמות של חנקן N_2 הוא _____ לעומת קצב ההיעלמות של מימן H_2.

ב. קצב היווצרות האמוניה NH_3 הוא _____ לעומת קצב ההיעלמות של חנקן N_2.

3. רשמו ביטוי לקצב יצירת אמוניה (בתגובה המופיעה לעיל).

4. עבור התגובה: $A + B \rightarrow C$ ניתן להגדיר את הקצב כ- $\frac{\Delta[C]}{\Delta t}$ + או כ - $-\frac{\Delta[B]}{\Delta t}$.

הסבירו את המשמעות של הסימנים + ו -.

5. קליטת חנקן בקרקע מתרחשת במספר שלבים, שסיכומם הוא: $N_2 \rightarrow\rightarrow\rightarrow NH_4^+{}_{(aq)}$.

התגובה הינה מסדר ראשון: קצב התגובה = $k[N_2]$.

קבוע הקצב k תלוי בטמפרטורה בקרקעות שונות A-C, כפי שמופיע בטבלה הבאה:

סוג הקרקע	ריכוז חנקן (טבעי) בקרקע, בק"ג ליחידת שטח בשנה	קבוע הקצב (k)
A	1000	0.01
B	2000	0.03
C	2000	0.06

א. חשבו את קצב קליטת החנקן ליחידת שטח, במשך שנה, בכל אחד מסוגי הקרקע השונים A-C.

ב. הסבירו למה בקרקע C הנמצאת באקלים טרופי (חם ולח) יש קצב גבוה של קליטת חנקן, בהשוואה לסוגי קרקע אחרים.

6. נמצא כי תגובה מסוימת הינה מסדר ראשון ב- A, מסדר שני ב- B ומסדר אפס ב- C.

א. רשמו את הביטוי של חוק הקצב לתגובה הנ"ל.

ב. כיצד תשתנה מהירות התגובה כאשר:

1. ריכוזיהם של A ושל B יוכפלו פי 2, כל אחד בנפרד?

2. ריכוזיהם של B ושל C יוכפלו? נמקו תשובתכם.

7. לתגובה $2NO_{(g)} + O_{2(g)} \rightarrow 2NO_{2(g)}$ נקבע חוק הקצב הבא: קצב = $k[NO]^2$
הסבירו את משמעות העובדה שחמצן אינו מופיע בחוק הקצב.

8. שרטטו באופן סכמטי גרף אנרגיה של שתי תגובות 1 ו- 2 עבורן נתון:

$\Delta H_1 = 15kJ/mol$ $E_{a1} = 20kJ/mol$
$\Delta H_2 = -15kJ/mol$ $E_{a2} = 20kJ/mol$

9. חשבו עבור התגובה **ההפוכה** לכל אחת מהתגובות 1 ו- 2 שבשאלה הקודמת:
א. מהו השינוי באנתלפיה? האם התגובה הינה אנדותרמית או אקסותרמית?
ב. מהו ערכה של אנרגיית השפעול? פרטו תשובתכם (אפשר על ידי שרטוט מתאים).

10. לתגובה $2N_2O \rightarrow 2N_2 + O_2$ יש $E_a = 40\ kJ/mol$,
$k_{727°C} = 0.76s^{-1}$
$k_{757°C} = 0.87s^{-1}$
א. לפי הנתונים, העלאת טמפרטורה של 30 מעלות, מגדילה את קבוע הקצב של התגובה הראשונה פי 1.14. הסבירו מדוע זה קורה.
לתגובה cyclopropane → propene יש $E_a = 272\ kJ/mol$,
$k_{577°C} = 0.03s^{-1}$
$k_{627°C} = 0.26s^{-1}$
ב. לפי הנתונים, העלאת טמפרטורה של 50 מעלות, מגדילה את קבוע הקצב של התגובה השנייה פי 8.67. הסבירו מדוע העלאת טמפרטורה בתגובה השנייה גורמת להגדלה יחסית רבה יותר בקצב התגובה (גם אם לוקחים בחשבון את ההבדל בעליית הטמפרטורה) לעומת התגובה הראשונה?

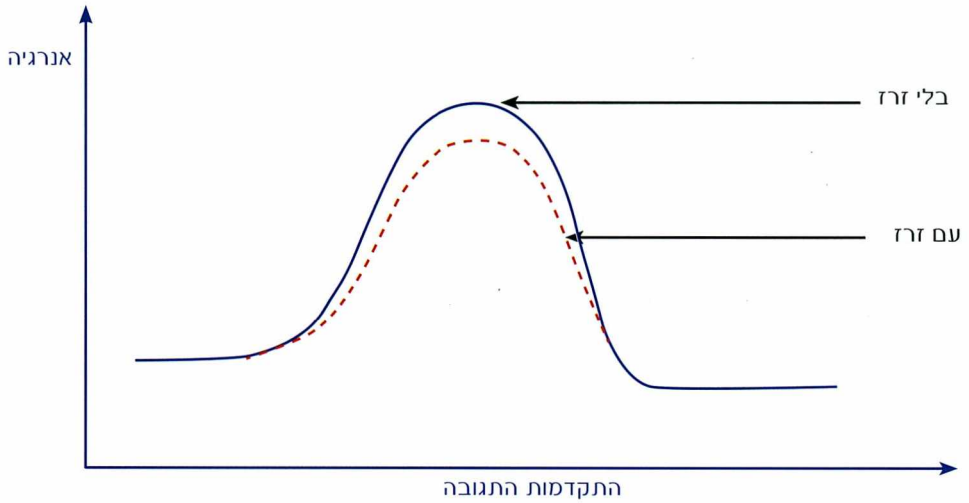
ידועה לכם העובדה, כי יש תגובות מהירות ויש תגובות איטיות. כאשר תוצר צפוי להתקבל בתגובה איטית, מחפשים דרכים לזירוזה של התגובה. למדנו, שעל ידי העלאת טמפרטורה אפשר להגדיל קצב של תגובה, אך לפעמים הדבר אינו רצוי או אינו מספיק. שימוש בחומר הנקרא זרז הוא אמצעי נוסף להגדלת קצב של תגובה. כאשר זרז בא במגע עם המגיבים, הוא מאפשר לתגובה להתרחש בצורה שונה - מהירה יותר. הזרז אינו מוגדר כמגיב, מכיוון שכמותו כמעט ואינה פוחתת בזמן התרחשות התגובה. זרז מאפשר התרחשות תגובה **במסלול חלופי**, עם אנרגיית שפעול נמוכה יותר מאנרגיית השפעול של התגובה ללא זרז, כפי שניתן לראות באיור 6.

למשל, בניסוי 1 בפרק ג, הוספנו מעט $MnO_{2(s)}$ לתמיסת המימן העל-חמצני. התרחשה התגובה:

$$2H_2O_{2(aq)} \rightarrow 2H_2O_{(g)} + O_{2(g)}$$

החומר MnO_2 אינו מגיב בתגובה זו, לכן הוא אינו מופיע בניסוחה. הוא מהווה בה זרז.

איור 6 - פרופיל אנרגיה של תגובה עם ובלי זרז



מחלקים את התגובות המתרחשות בנוכחות זרז לשני סוגים: כאשר הזרז הוא חומר במצב צבירה שבו נמצאים המגיבים, מכנים את סוג פעולת הזירוז (**קטליזה**) **הומוגנית**. דוגמה לקטליזה כזו היא תגובה שמתרחשת בתמיסה מימית ומזורזת על ידי חומר שמומס בה. לעומת זאת, כאשר הזרז הוא מוצק ונמצא במגע עם חומרים במצבי צבירה שונים - גזים או חומרים בתמיסה מימית - פעולת הזירוז מכונה **קטליזה הטרוגנית**.

פירוק מימן על-חמצני בנוכחות $MnO_{2(s)}$ הוא דוגמה לקטליזה הטרוגנית.

תגובות רבות, בהן האדם עושה שימוש בזרז, הן מסוג הטרוגני.

הזרזים המוצקים הם בדרך כלל מתכות מעבר, או תחמוצות של מתכות מעבר. מנגנון פעולתם של

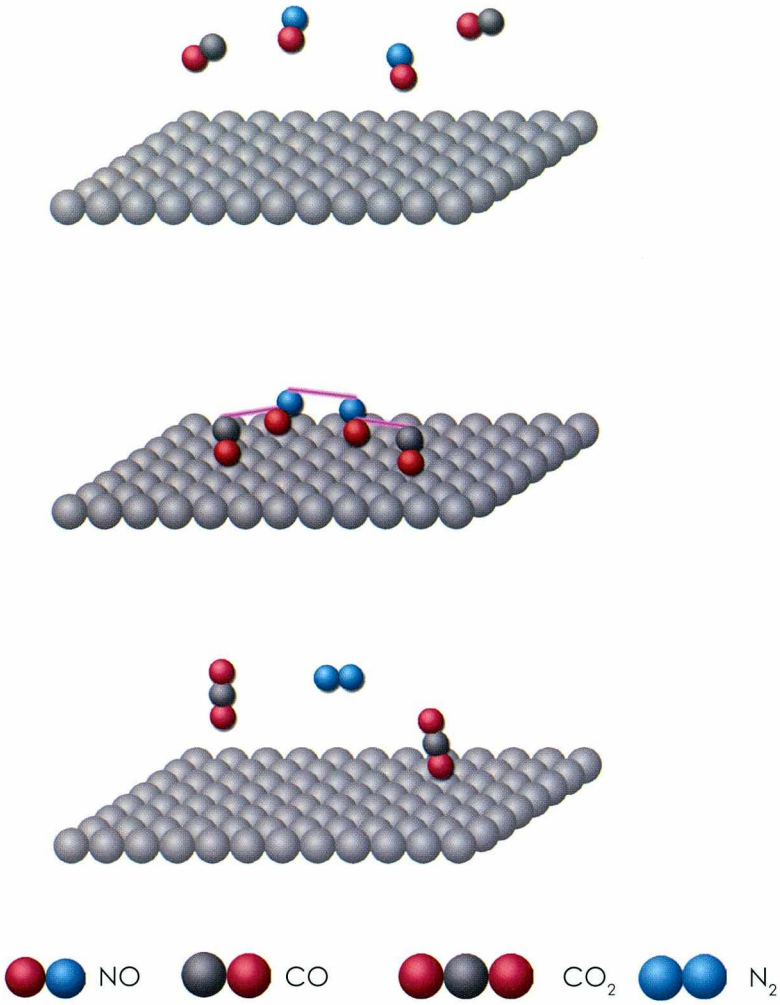
הזרזים לא תמיד מובן. משערים, כי ההיערכות האלקטרונית הייחודית באטומים של מתכות מעבר מאפשרת לחומרים אלה לשמש זרזים.

באופן כללי, על פני זרז מוצק נוצרים קשרים חדשים בין האטומים (כפי שניתן לראות באיור 7) ומתרופפים קשרים קיימים (לא מומחש באיור 7).

דוגמה לקטליזה הטרוגנית על פני זרז מוצק

איור 7 ממחיש את התרחשות התגובה הבאה: $2CO_{(g)} + 2NO_{(g)} \rightarrow N_{2(g)} + 2CO_{2(g)}$ על המתכת רודיום.

איור 7 – קטליזה הטרוגנית על זרז מוצק.



קטליזה על פני משטח דק של **מתכת** מתאפשרת על ידי היווצרות מסלול חדש לתגובה. מסלול זה תלוי

באיזון העדין שנוצר בין היצמדות המגיבים למשטח הזרז, לבין תגובה בין המגיבים והשתחררות התוצרים ממשטח הזרז.

משטח הזרז הינו נקבובי, בעל שטח פנים גדול. ברמה המיקרוסקופית, המתכת הינה צבר של חלקיקים, אליו "נתפסות" מולקולות המגיבים. כאשר גודלם של חלקיקי המתכת מתאים למולקולות המגיבים, מתאפשרת אינטראקציה מתאימה בין מולקולות המגיבים ונוצרות מולקולות מסוג שונה, של תוצרים. כלומר, היצמדות המגיבים לפני המתכת מזרזת את היווצרות התוצרים.

דוגמאות ליסודות מעבר שמשמשים כזרזים: ברזל $Fe_{(s)}$ מזרז בתהליך להפקת אמוניה, ניקל $Ni_{(s)}$ מהווה זרז בסיפוח מימן לשמנים צמחיים - ליצירת מרגרינה, תערובת של פלטינה $Pt_{(s)}$, פלדיום $Pd_{(s)}$ ורודיום $Rh_{(s)}$ מהווה זרז בממיר קטליטי שבמפלט (אגזוז) של מכוניות - ראו הסבר בהמשך.

כימיה בהקשר אחר - זרזים מסייעים, אך גם קצת מסבכים...

בתהליך שריפת דלק במנוע של מכוניות נוצרים גם פחמן חד-חמצני CO וגם חנקן חד-חמצני NO, שהם גזים רעילים. כדי לצמצם את הכמויות הנפלטות לאוויר של חומרים אלה, מתקינים בצינור פליטת הגזים ממנוע המכונית מכשיר הנקרא ממיר קטליטי. התקן זה מכיל תערובת של **זרזים** לתגובות שונות: הפחמן החד-חמצני הופך לפחמן דו- חמצני והחנקן החד- חמצני מתפרק לחמצן ולחנקן. כך הופכים תוצרי שריפת הדלק לגזים לא מזיקים.

השימוש בממיר קטליטי מאפשר אומנם פעילות מנועים תוך שמירה על איכות האוויר, אך גם מחייב ביצוע שינויים, כגון שימוש בדלק שונה (נטול עופרת) והתאמת מנוע המכונית לשימוש בדלק זה.

ממיר קטליטי מחייב שימוש בדלק נטול עופרת, כי נוכחות יוני עופרת עלולה לגרום לפגיעה בזרזים שבממיר, תהליך המוכר כ"הרעלת" הזרז - התקשרות בלתי הפיכה אליו עד כדי צמצום תפקודו.

דלק נטול עופרת

מדוע בעבר הוסיפו תרכובות עופרת לדלק ואיך מתגברים כיום על היעדרן בדלק? הוספת תרכובות עופרת לדלק איפשרה למנוע לעבוד ללא רעשים אשר נשמעים כמו "נקישות".

אך תרכובות העופרת גרמו לשחרור תוצרים גזיים רעילים. כיום, משתמשים בהרכב שונה של דלק, שמאפשר פעולת מנוע ללא "נקישות" נילוות, ללא צורך בהוספת תרכובות של עופרת. דלק כזה נקרא "נטול עופרת", כדי לציין כי תוצרי השריפה שלו במנוע אינם כוללים תרכובות עופרת רעילות.

http://www.snunit.k12.il/heb_journals/mada/343126.html

כימיה בהקשר אחר - זרזים ופולימרים

ב-1953 Ziegler Karl Waldemar, כימאי גרמני, אשר חקר **זרזים** אורגנו מתכתיים (כלומר תרכובות פחמן המכילות יוני מתכות), מצא, כי העברת אתן בלחץ אטמוספרי דרך תמיסת פחמימן נוזלי המכילה כמויות קטנות של $TiCl_4 + (C_2H_5)_3Al$ גרמה להיווצרות מיידית של פולימר של אתן, שונה מזה שנוצר בהיעדרן של אותן תוספות. לפולימר החדש יש תכונות משופרות, המכשירות אותו לשימושים רבים. הכימאי איטלקי Giulio Natta, השתמש ב-1954 **בזרז** של ציגלר ליצירת פולימר אחר, פוליפרופן. Natta איפיין את ההבדל במבנהו של הפולימר שנוצר בנוכחות זרז, לעומת מבנהו של הפולימר שנוצר ללא זרז. ה**זרזים** שפיתח מכונים כיום זרזי ציגלר- נטה ומשמשים ליצירת פולימרים בעלי מבנה ייחודי, המקנה להם תכונות רצויות.

Ziegler ו- Natta קיבלו במשותף פרס נובל לכימיה ב- 1963.

אנזימים

באורגניזמים חיים קיימים אלפי סוגים של מולקולות ענק אשר משמשות כזרזים למיגוון עצום של תגובות. זרזים אלה נקראים אנזימים והם זרזים הומוגניים.

לרוב, האנזימים הם בעלי מבנה כימי המשייך אותם לקבוצת החלבונים - על חלבונים יורחב ביחידת לימוד אחרת.

בשונה מהזרזים שעליהם דיברנו עד כה, כל אנזים ייחודי לחומר מסוים ולתגובה מסוימת. ייחודיות זו של אנזימים מוסברת באופן הבא: חלק, או מספר חלקים, במולקולת האנזים - הנקראים האתר הפעיל, הם בעלי מבנה המאפשר יצירת קשרים עם חומר בעל מבנה מסוים. החומר שעליו "פועל" האנזים נקרא מצע (סובסטראט). עם התקשרות אנזים לסובסטראט, מתחיל תהליך של שינויי קשרים ומבנה בתוך הסובסטראט, אשר מסתיים בהיווצרות חומר חדש, כלומר מתרחשת תגובה. בסוף התהליך, משתחרר אנזים מהסובסטראט כשהוא במבנה זהה למקורי ולכן הוא יכול לחזור על פעולתו שוב ושוב.

דוגמה: לקטאז ואי סבילות לחלב

בחלב ובמוצריו נמצא החומר לקטוז. לקטוז מפורק בגוף האדם בנוכחות אנזים בשם לקטאז לשני חומרים בעלי מולקולות פשוטות יותר: גלוקוז וגלקטוז. אגב, שלושת החומרים - לקטוז, גלוקוז וגלקטוז - הינם בעלי מבנה כימי המשייך אותם לקבוצת הסוכרים, עליהם תלמדו בהמשך השנה. כמות הלקטאז בגופם של חלק מהתינוקות ואצל חלק מהאנשים הבוגרים אינה מספקת. לכן, הלקטוז בגופם אינו מתפרק כראוי ולכן לאנשים אלה יש תחושות לא נעימות במעיים (גזים, כאבים ועוד). התופעה מוכרת כ"אי סבילות" לחלב. פתרונות למצב זה הם הימענות מצריכת מוצרי מזון שמכילים לקטוז, או נטילת תכשירים המכילים את האנזים לקטאז.

מנגנון תגובה

למדנו שחלק מהתגובות הן מסדר ראשון, תגובות אחרות הן מסדר שני, וכדומה. סדר התגובה מהווה חלק מהתשובה לשאלה **כיצד מגיבים הופכים לתוצרים**?

כדי להשלים את התשובה לאותה שאלה נתמקד כעת במה שקורה ברמת החלקיקים.

כל אירוע בין מולקולות, שבמהלכו חל שינוי כלשהו: באנרגיה של מולקולות, בהיערכות המרחבית שלהן, בכך שנוצרות מולקולות מסוג חדש, מהווה "שלב" אחד מתוך סידרה של שלבים.

***מנגנון תגובה הוא** תיאור מפורט של כל השלבים המסבירים כיצד מגיבים הופכים לתוצרים.*

מנגנון של תגובה צריך לענות על שתי הדרישות הבאות:

1. התאמה ליחסים הסטויכיומטרים בתגובה הכוללת.

2. הסבר לחוק הקצב אשר נקבע באופן ניסוי לתגובה.

מאפייני שלב במנגנון:

- שלב חד-מולקולרי - שיש בו סוג אחד של מולקולות של מגיבים, או שלב דו-מולקולרי - שיש בו שני סוגים של מגיבים (שלבים בהם יש שלושה סוגים של מגיבים הינם נדירים).
- קצב אופייני: אם שלב אחד איטי יותר מהאחרים, אז הוא מכתיב את קצב התרחשותה של התגובה הכוללת ולכן את הסדר שלה. שלב איטי זה נקרא "שלב קובע מהירות" של התגובה.
- חלק מסוגי החלקיקים אשר נוצרים בשלב אחד, מהווים מגיבים בשלב אחר. צורות ביניים אלה אינן מופיעות בניסוח הכולל של התגובה, לכן גם אינן מופיעות בחוק הקצב הכולל של התגובה.
- בחוק הקצב של השלב מופיעים מעריכי ריכוזים אשר זהים למקדמים בניסוח המאוזן של השלב.

רוחב המעבר קובע את קצב התקדמות האנשים

דוגמאות של מנגנוני תגובה

דוגמה 1

עבור התגובה: $2H_2O_{2(aq)} \rightarrow 2H_2O_{(l)} + O_{2(g)}$

מוצע המנגנון:

1. שלב איטי $H_2O_2 \rightarrow 2OH$
2. שלב מהיר $H_2O_2 + OH \rightarrow H_2O + HO_2$
3. שלב מהיר $HO_2 + OH \rightarrow H_2O + O_2$

ניתן לראות, כי בשלבים המוצעים כמנגנון לתגובה עשויים להשתתף חלקיקים **שאינם מולקולות ניטרליות או יונים**. חלקיקים אלה הינם מצבי ביניים ועשויים להתקיים רק לפרקי זמן קצרים.

פסק זמן לחשיבה

1. חברו את סך כל השלבים במנגנון הנ"ל. האם קיבלתם את התגובה הכוללת? כיצד זה תואם את הדרישות ממנגנון תגובה?
2. כמה סוגים של חלקיקים מגיבים בכל שלב? פרטו כיצד זה מתאים למאפייני שלב במנגנון.
3. אילו צורות ביניים מופיעות במנגנון, אך אינן מופיעות בניסוח הכולל? הסבירו מדוע לא מופיעות צורות אלה בניסוח הכולל של התהליך.
4. תגובת הפירוק של מימן על- חמצני למים ולחמצן היא מסדר ראשון. רשמו את חוק הקצב המתאים. כיצד מסביר המנגנון המוצע את חוק הקצב של התגובה הכוללת?

מענה לשאלות

1. בסיכום שלושת השלבים, מתקבלת התאמה ליחסים הסטויכיומטרים בתגובה הכוללת - בהתאם לדרישה ראשונה ממנגנון לתגובה.
2. בשלב ראשון יש סוג אחד של חלקיקים - שלב חד-מולקולרי; בשלב שני ובשלב שלישי יש שני סוגי חלקיקים בכל אחד - הם שלבים דו-מולקולריים - כל שלב במנגנון הוא חד או דו-מולקולרי.
3. במנגנון מופיעים חלקיקי ביניים OH ו- HO_2 שנוצרים ומיד מגיבים.
4. קצב התגובה = $k\,[H_2O_2]$. השלב הראשון הוא איטי כלומר, הוא שלב קובע המהירות עבור התגובה כולה. בשלב הראשון משתתפים חלקיקים מסוג אחד בלבד, ולכן, סדר שלב זה הוא סדר ראשון. זה אכן מתאים לממצא הניסוי, שלפיו התגובה כולה היא מסדר ראשון.

דוגמה 2

עבור התגובה: $CHCl_{3(g)} + Cl_{2(g)} \rightarrow CCl_{4(g)} + HCl_{(g)}$

מוצע המנגנון:

1. שלב מהיר $Cl_2 \rightarrow 2Cl$
2. שלב איטי $CHCl_3 + Cl \rightarrow CCl_3 + HCl$
3. שלב מהיר $CCl_3 + Cl \rightarrow CCl_4$

כפי שניתן לראות בשתי דוגמאות המנגנונים, שלב אחד איטי יכול להתקיים במקום כלשהו ברצף שלבי המנגנון. כלומר, כשלב ראשון, כשלב אמצעי, או כשלב אחרון.

אומנם שני המנגנונים המופיעים לעיל כוללים כל אחד שלושה שלבים, אך זה מקרי ומספר השלבים יכול לנוע בין אחד לבין כל מספר אחר.

כאמור, קינטיקה חוקרת **את התנאים והמהירויות** בהם משתנים החומרים, כלומר, את **האופן שבו** הופכים המגיבים לתוצרים. אחת המטרות החשובות של הקינטיקה הינה הכרת המנגנון של תגובה, כדי לאפשר שליטה והתערבות בה. כתוצאה מהבנת הקינטיקה של תגובות אפשר:

1. לשפר תהליך מוכר להפקת חומר: לזרז, לשפר תפוקה, לבצע בתנאים פשוטים ו/או זולים יותר;
2. להשפיע על תהליך בכיוון הרצוי לנו;
3. להתערב בתהליכים ביולוגיים או אחרים.

דוגמאות להישגים של מחקרים קינטיים:

- שכלול תהליכים תעשייתיים על ידי גילוי ושימוש בזרזים מתאימים בכלל וייצור אמוניה בפרט (האמוניה הייתה חומר גלם חשוב ליצירת חומרי נפץ במלחמת העולם הראשונה והיום היא עדיין חומר גלם חשוב לתעשיית הדשנים ולמטרות נוספות).
- התמודדות עם בעיית הרס כמות האוזון אשר בשכבות הגבוהות של האטמוספרה: תרכובות פחמן, כלור ופלואור, אשר שימשו כגזי קירור וכדוחפי תרסיסים, נמצאו מתפרקות לחלקיקים **שמזרזים** את פירוק האוזון. הפסקת השימוש בחומרים אלה תקטין את הרס האוזון החיוני.
- שיפור הטיפול בבעיות רפואיות על ידי התערבות מתאימה בתהליכים ביולוגיים: הכרת מנגנוני תגובות אשר מתרחשות בגוף האדם מאפשרת להתערב בתגובה ולעודד את היווצרותו של תוצר ביניים רצוי, או לחלופין, לעכב את היווצרותו של תוצר לא רצוי; כמו כן, פותחו תרופות בעלות קצב פעילות מבוקר, אשר מאפשר שיפור של תוצאות השימוש בתרופה ויתר נוחות למשתמש.

כימיה בהקשר אחר - טוב לענבים וגם לאנשים

רסוורטרול (resveratrol) הוא חומר הנמצא בצמחים שונים, אך בעיקר בגפנים. גפנים עלולות להיות מותקפות על ידי פטרייה. הגפן מייצרת רסוורטרול כחלק ממערך התגוננות נגד הפטרייה, כאשר זו תוקפת אותה. נמצא שבזני הענבים הגדלים באזורים קרירים, יש אחוזים גבוהים יותר של רסוורטרול. התופעה נובעת מהעובדה, שהידבקות בפטרייה מתרחשת יותר באקלים קריר. דרך פעילותו של רסוורטרול היא עיכוב אנזים שמופרש על ידי הפטרייה. כלומר, נוכחותו מנטרלת זרז, וכך נמנעת תגובה לא רצויה לגפן.

מחקרים אשר בדקו אם החומר פועל באופן דומה גם ברקמות של בעלי חיים ובני אדם, מצאו כי רסוורטרול מעכב גם תגובה לא רצויה של שומנים בדם (שגורמת למחלת עורקים ולכן להתקפי לב) וגם יצירת חומרים המעודדים גידולים סרטניים.

לסיכום, רסוורטרול מפגין פעילות "רפואית" בגפנים להבטחת המשך קיומן, ובדומה לכך, עשוי לאפשר פעילות "רפואית" בבעלי חיים, לצמצום מחלות לב וסרטן.

מעובד על פי: British Journal of Cancer, 2002, 86, 774-778. ; Current Biology ,2006 16(3): 296-300

שאלות

1. מהי הפעילות ה"רפואית" של רסוורטרול בגפנים וברקמות של בעלי חיים? פרטו תשובתכם.
2. נסו לתאר ברמה החלקיקית את הפעילות של רסוורטרול.

סיכום ביניים שני

בחלק זה של הפרק למדתם את המושגים הבאים בנושא קצב תגובות:

- **זרז** הינו חומר אשר אינו מופיע כמשתתף בניסוח התגובה, אך נוכחותו גורמת לתגובה להתרחש בקצב מהיר יותר מאשר בהיעדרו.
- **אנזים** הינו זרז במערכות ביולוגיות.
- **מנגנון תגובה** הינו תיאור מפורט של סך כל השלבים בהם מתרחשת תגובה.

בדרך כלל, יש שלבים מהירים ושלב אחד איטי. השלב האיטי הוא זה המכתיב את קצב התגובה הכוללת ואת הסדר שלה.

שאלות

1. בתגובה בין $NO_{2(g)}$ לבין $F_{2(g)}$ נוצר $NO_2F_{(g)}$. נמצא כי מנגנון התגובה הוא:

שלב ראשון איטי: $NO_2 + F_2 \rightarrow NO_2F + F$

ושלב שני מהיר: $NO_2 + F \rightarrow NO_2F$

רשמו את ניסוח התגובה ואת חוק הקצב שלה.

2. כאשר מוסיפים חתיכת לפת (שורש של צמח) לתמיסת מימן על-חמצני, $H_2O_{2(aq)}$ מהירות הפירוק שלו גדלה פי עשרות מיליונים.

א. איזה תפקיד ממלאת חתיכת הלפת?

ב. שרטטו (בצורה כללית) תרשים של התקדמות פירוק מימן על-חמצני בנוכחות ובהיעדר הלפת.

3. התייחסו לתגובה ולמנגנון המפורט בדוגמה 2 בפרק וענו על השאלות הבאות:

א. חברו את סך כל השלבים במנגנון הנ"ל. האם קיבלתם את התגובה הכוללת? כיצד זה תואם את הדרישות ממנגנון תגובה?

ב. כמה סוגים של חלקיקים מגיבים בכל שלב? פרטו כיצד זה מתאים למאפייני שלב במנגנון.

ג. אילו צורות ביניים מופיעות במנגנון, אך אינן מופיעות בניסוח הכולל? הסבירו מדוע לא מופיעות צורות אלה בניסוח הכולל של התהליך.

ניסוי 6 - מפתיע!

הרכיבו משקפי מגן והקפידו על חדר נקי!

חומרים וציוד לקבוצת תלמידים או להדגמה

תמיסת $MgCl_{2(aq)}$ 1M תמיסת נתרן פחמתי $Na_2CO_{3(aq)}$ 1M, תמיסת נתרן הידרוכסידי $NaOH_{(aq)}$ 1M, תמיסת נחושת כלורית $CuCl_{2(aq)}$ 1M, שתי פיפטות של 10 מ"ל, משאבה לפיפטה, כוס זכוכית 50 מ"ל, 3 מבחנות, משפך המתאים למבחנה, נייר סינון מתאים.

מהלך הניסוי

שלב א

הכניסו לתוך כוס כימית בנפח 50 מ"ל, 10 מ"ל תמיסת $MgCl_{2(aq)}$ בריכוז 1M. השתמשו בפיפטה של 10 מ"ל ובמשאבה להעלאת התמיסה. והוסיפו 10 מ"ל תמיסת $Na_2CO_{3(aq)}$ בריכוז 1M. השתמשו בפיפטה אחרת. א. צפו במתרחש בכוס ותארו את תצפיותיכם.

ב. ערבבו קלות עם מקל זכוכית והניחו את הכוס ללא תזוזה למשך 5 דקות. מתקבל המשקע מגנזיום פחמתי $MgCO_3$.

1. נסחו את התגובה אשר התרחשה בכוס.
2. מהו מספר המולים ההתחלתי של כל אחד מהמגיבים?
3. מהם החלקיקים המרכיבים את המוצק?
4. מהם החלקיקים המצויים בנוזל?
5. שרטטו גרף המתאר את שינוי הריכוזים של כל אחד מהחלקיקים המצויים בכלי התגובה.

שלב ב

א. הכינו שלוש מבחנות מסומנות באותיות א, ב, ג.

ב. הפרידו משקע מנוזל באמצעות משפך ונייר סינון. חלקו את הנוזל לשלוש המבחנות.

ג. לתוך מבחנה א הוסיפו 2 טיפות של תמיסת $NaOH_{(aq)}$ בריכוז 1M.

שאלות בעקבות הניסוי

1. תארו את תצפיותיכם.
2. הוסיפו 2 טיפות של תמיסת $CuCl_{2(aq)}$ בריכוז 1M. לתוך מבחנה ב.
3. על פי טבלת המסיסות, מגנזיום הידרוכסידי $Mg(OH)_2$ ונחושת פחמתית $CuCO_3$ הם חומרים יונים, אשר מידת מסיסותם במים קטנה ביותר.
4. האם תוצאות הניסוי תואמות את הגרף ששרטטתם בסעיף 5? הסבירו.
5. אלו שאלות עולות בעקבות הניסוי?

מסקנה: לאחר התרחשות תגובת שיקוע, נוכחים במערכת, בנוסף לתוצרים, גם מגיבים מכל הסוגים.

הניסוי שביצעתם מדגים מצב שאליו הגיעה תגובת השיקוע. זהו מצב של שיווי משקל כימי.
שיווי משקל כימי הינו מצב ייחודי שאליו עשויות להגיע תגובות בתנאים מסוימים ולא באחרים. במצב זה, כמות התוצרים לא גדלה יותר, למרות שעדיין נוכחים כל המגיבים הדרושים להיווצרותם.
מצב שיווי משקל כימי הינו היבט נוסף של תגובות כימיות רבות. מה שלמדנו עד כה: הגורמים המשפיעים על קצב תגובות ומודל ההתנגשויות בין חלקיקים, יאפשר לנו להבין מצבים של קיומו, או היעדרו של שיווי משקל במערכת.
בהמשך הפרק נציג כיצד מושג מצב של שיווי משקל כימי ומהם מאפייניו.

דוגמאות נוספות של תגובות אשר לא מתרחשות עד שנגמרים כל המגיבים:

1. ניסוי בית - מלאו מים עד למחצית כוס. הוסיפו באופן הדרגתי שמונה כפיות גדושות של סוכר. לאחר הוספת כל כפית, ערבבו היטב, התבוננו וטעמו.
תוכלו להבחין, כי חלק מהסוכר אינו נראה יותר והנוזל הופך ליותר ויותר מתוק. לאחר זמן, תראו שנשארת כמות סוכר מוצק שאינה מתמוססת יותר.
2. מכניסים לכלי סגור שלושה מול מימן $H_{2(g)}$ ומול אחד חנקן, $N_{2(g)}$ בתנאים המאפשרים את התרחשות התגובה: $N_{2(g)} + 3H_{2(g)} \rightarrow 2NH_{3(g)}$. לאחר זמן, מבחינים בקיום אמוניה בכלי, אך כמותה קטנה בהרבה מ-2 מול וכמות האמוניה שנוצרה אינה גדלה, גם לאחר זמן.

כיצד נסביר את הממצאים? מדוע התהליכים שהוזכרו **אינם מתרחשים עד שנגמרים המגיבים?**
האם יש דרך להשפיע על מידת התרחשותה של תגובה, על ידי שינוי התנאים בהם היא מתרחשת? כיצד?
ננסה למצוא תשובות לשאלות אלה בהמשך.

תגובות הפוכות זו לזו

התייחסו לתיאור הבא: בחדר אמבטיה פותחים את ברז המים החמים. החלל מתמלא באדים ועל המראה נוצרות טיפות מים זעירות.
איזה/ אילו מהתהליכים הבאים מתרחש/ים בחדר האמבטיה? נמקו תשובתכם:

1. $H_2O_{(s)} \rightarrow H_2O_{(g)}$
2. $H_2O_{(l)} \rightarrow H_2O_{(g)}$
3. $H_2O_{(g)} \rightarrow H_2O_{(l)}$

כעת התייחסו לזוג התהליכים הבאים:

1. א. $H_2O_{(g)} \rightarrow H_2O_{(l)}$ ב. $H_2O_{(l)} \rightarrow H_2O_{(g)}$

תהליכים **אלה הפוכים זה לזה**. הם יכולים להתרחש כל אחד בנפרד, אך **יכולים להתרחש גם בו זמנית באותו כלי**. תארו מקרה נוסף, שמוכר לכם מחיי היום יום, ושבו התהליכים של אידוי ועיבוי מתרחשים בו זמנית באותו כלי (או בחלל סגור).
מערכת סגורה הינה מערכת שחומרים אינם יוצאים ממנה או נכנסים אליה, כפי שלמדנו בפרק א.
דוגמאות למערכות סגורות: בקבוק משקה תוסס סגור היטב; תגובה שמתרחשת בתמיסה - כאשר כל

המגיבים והתוצרים מומסים בה. דוגמה למערכת פתוחה: שריפת גז בישול בכיריים - תוצרים במצב גזי חופשיים לצאת מהמערכת.

? בחדר אמבטיה בו יש חלון גדול פתוח, תופעת העיבוי כמעט ולא מתרחשת. הסבירו, גם ברמה מאקרוסקופית וגם ברמה מיקרוסקופית, מדוע יש פחות עיבוי?

כעת התייחסו לזוג נוסף של תגובות:

2. א. $Na^+_{(aq)} + Cl^-_{(aq)} \rightarrow NaCl_{(s)}$ ב. $NaCl_{(s)} \rightarrow Na^+_{(aq)} + Cl^-_{(aq)}$

גם התהליכים 2א ו-2ב הפוכים אחד לשני. ניסוח א הינו ניסוח נטו של תגובת שיקוע בתמיסת נתרן כלורי מאוד מרוכזת. כלומר, הניסוח מתאר קבלת חומר יוני מוצק בסביבה מימית; ניסוח ב הינו של המסת חומר יוני במים.

תהליכים א ו-ב הנ"ל יכולים להתרחש בו זמנית אם מתקיימים תנאים מתאימים.

התנאים להתרחשות בו זמנית של תגובות הפוכות זו לזו:

- המערכת סגורה - אין חילופי חומר עם הסביבה
- נוכחים כל החומרים הדרושים להתרחשות שתי התגובות

התייחסנו לאפשרות קיומן של שתי תגובות הפוכות זו לזו, אך טרם התייחסנו למהירויות שלהן.

בהמשך, בחינת **קצב ההתרחשות** של תגובה ישירה לעומת קצב ההתרחשות של תגובה הפוכה, תבהיר כיצד מושג מצב של שיווי משקל כימי.

פעילות 2 - אנלוגיה לתגובות הפוכות

לביצוע הפעילות דרושים שני מתנדבים. תלמידי הכיתה אוספים תצפיות ומתעדים אותן בכתב.

א. קחו שני כלים שקופים בנפח של 2-3 ליטר, שווים בגודלם ובצורתם. שימו בכלי א מים בכמות גדולה וסמנו בחזית הכלי את גובה המים.

ב. כל מתנדב מקבל כוסית כימית זהה בצורה, בנפח של 50 מ"ל. מתנדב אחד אחראי על העברת המים מכלי א לכלי ב ומתנדב שני אחראי על העברת המים מכלי ב לכלי א.

ב. שני המתנדבים צריכים להעביר **בו זמנית**, מים מכלי א לכלי ב ולהיפך. שימו לב לכמויות המים שניתן להעביר כל פעם, מכלי אחד למשנהו!

ג. כעבור 10 העברות מכלי אחד למשנהו, רשמו שוב את גובה המים בכל אחד משני הכלים.

ד. חיזרו מספר פעמים על הפעולות שמתוארות בסעיף ג.

שאלות

1. האם כמות המים שמעבירים בכל פעם, בתחילת הפעילות, מכלי א לכלי ב קטנה/ שווה/ גדולה מכמות המים שמעבירים בכיוון ההפוך?
2. האם כמות המים שמעבירים מכלי א לכלי ב פוחתת/ ללא שינוי/ גדלה במהלך הפעילות? פרטו.
3. האם כמות המים שמעבירים מכלי ב לכלי א קטנה/ קבועה/ גדלה במהלך הפעילות? פרטו.

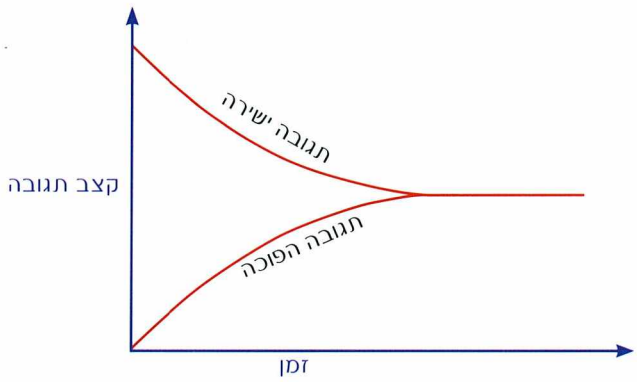
4. איך משתנה גובה המים בכלי א כעבור 10, 20, 30 העברות? ענו על אותה שאלה לגבי כלי ב.
5. האם יש משהו משותף בין מפלסי המים שבשני הכלים א ו -ב, לאחר 30 העברות? אם כן, פרטו.

פעילות העברת המים אינה תגובה כימית. אך יש בפעילות זו מרכיבים שמאפשרים יצירת **אנאלוגיה** לתגובות הפוכות זו לזו, לקצב התרחשותן של התגובות ההפוכות, להשפעת ריכוז החומר על קצב התגובה ואף לתוצאה שמתקבלת כעבור זמן.
נסו למצוא הקבלות בין מרכיבי הפעילות לבין ההיבטים שהזכרנו קודם והמתייחסים לתגובות הפוכות זו מזו.

קשר בין קצב תגובות הפוכות לבין ריכוזי חומרים

למדנו שקצב התרחשותן של רוב התגובות תלוי בריכוזים ההתחלתיים של המגיבים. כלומר, עבור אותה תגובה: אם הריכוזים ההתחלתיים גבוהים יותר - הקצב של התגובה מהיר יותר ואם הריכוזים נמוכים יותר- הקצב של התגובה איטי יותר. מכאן נובע, שקצב התגובה הולך וקטן ככל שהתגובה מתקדמת, מפני שריכוזי המגיבים הולכים ופוחתים.
בכלי סגור, שבו מתקיימים התנאים הדרושים להתרחשותן בו-זמנית של תגובות הפוכות זו לזו, מתרחשות תגובות אלה **בקצב לאו דווקא שווה**. כאשר יש בכלי מגיבים בלבד, קצב התגובה הישירה בה נוצרים תוצרים, הינו גדול. עם התקדמות התגובה, ריכוזי המגיבים יורדים והתגובה הישירה מואטת. אך במקביל, ככל שריכוזי התוצרים עולים, עולה קצב התגובה ההפוכה. באופן כזה, שתי התגובות ההפוכות זו לזו מגיעות למצב ייחודי, בו **משתווה קצב התרחשותן**. מצב זה נקרא **מצב שיווי משקל** כימי. כתוצאה מהתרחשות **תגובות הפוכות בקצב שווה, במצב שיווי משקל, ריכוזי החומרים נשארים קבועים לאורך זמן** .
באיור 8 מופיע תיאור גרפי של קצב התגובה הישירה והתגובה ההפוכה בזמן התקדמות תגובה: בהתחלה, קצב התגובה בין מגיבים (הישירה) גדול ואין תגובה בין תוצרים; בהמשך, קצב התגובה בין מגיבים יורד וקצב התגובה בין תוצרים (ההפוכה) עולה, עד ששני הקצבים משתווים.

איור 8 - קצב תגובות עד לשיווי משקל



כיצד **נשמר ריכוז קבוע** של כל אחד מהחומרים, מגיבים ותוצרים, **במצב שיווי משקל**?
נדגים תוך התייחסות לתוצר: כאשר קצב התרחשות התגובה הישירה שווה לזה של התגובה ההפוכה, כמות החומר שנוצר (התוצר) בפרק זמן מסוים שווה לכמות התוצר שמתפרק למגיבים באותו פרק זמן, וכך ריכוזו נשאר קבוע.

במצב שיווי משקל כימי: ריכוזי החומרים נשארים קבועים לאורך זמן ,
כי מתרחשות תגובות הפוכות בקצב שווה.

שיווי משקל דינמי

במצב של שיווי משקל, שתי התגובות ההפוכות ממשיכות להתרחש, אך ריכוזי כל החומרים אינם משתנים יותר.
התרחשותן של תגובות הוסבר קודם באמצעות מודל התנגשויות בין מולקולות. לפי מודל זה, במצב שיווי משקל, המולקולות ממשיכות לנוע ולהתנגש ביניהן. אם ההתנגשויות מתרחשות בין מולקולות עם אנרגיה מספקת ובאופן מרחבי מתאים, נוצרים תצמידים משופעלים ועשויים להתרחש שינויים בהרכביהן של המולקולות המתנגשות. אם מגיבים הופכים לתוצרים ותוצרים הופכים למגיבים בקצב זהה, לא ניכר שינוי מאקרוסקופי, כלומר ריכוזי החומרים נשארים קבועים לאורך זמן.
לסיכום:

מצב שיווי משקל כימי הוא דינמי, כלומר ממשיכים לחול שינויים ברמה מיקרוסקופית: מולקולות מתנגשות, נוצרים ומתפרקים תצמידים משופעלים, נוצרים ומתפרקים תוצרים.

ציון של תגובה בה מתקיים מצב שיווי משקל דינמי ייעשה על ידי שמוש בחץ כפול ⇄ בניסוח התגובה.

סיכום המאפיינים של מצב שיווי משקל

ברמה מאקרוסקופית:

1. מתרחש במערכת סגורה.
2. ניתן להגיע למצב זה ממגיבים בלבד, או מתוצרים בלבד, או מכל הרכב של חומרים שמאפשר את יצירת שאר המשתתפים במערכת.
3. ריכוזי כל החומרים קבועים (אינם משתנים) לאורך זמן וגם התכונות המאקרוסקופיות - ללא שינוי.

ברמה מיקרוסקופית:

4. מתקיימות שתי תגובות הפוכות זו לזו, בו זמנית ובקצב שווה.
5. קיימת דינמיות: חלקיקים (מולקולות ותצמידים) ממשיכים להתנגש ולהשתנות ללא הרף, למרות שנשמר לאורך זמן מספר המולקולות מכל סוג .

לדעת יותר על שיווי משקל דינמי

בסעיף הקודם נטען, כי במצב שיווי משקל ממשיכות להתרחש שתי התגובות ההפוכות זו לזו. טענה זו נתמכת על ידי תוצאות של ניסויים שנערכו. הנה תיאור ניסוי מסוג זה.

בכלי א מצויה המערכת: $CH_3I_{(g)} + I_{2(g)} \rightleftarrows CH_2I_{2(g)} + HI_{(g)}$ במצב שיווי משקל, כלומר ריכוזי כל החומרים קבועים לאורך זמן. מודדים את ריכוזי החומרים במצב שיווי משקל.

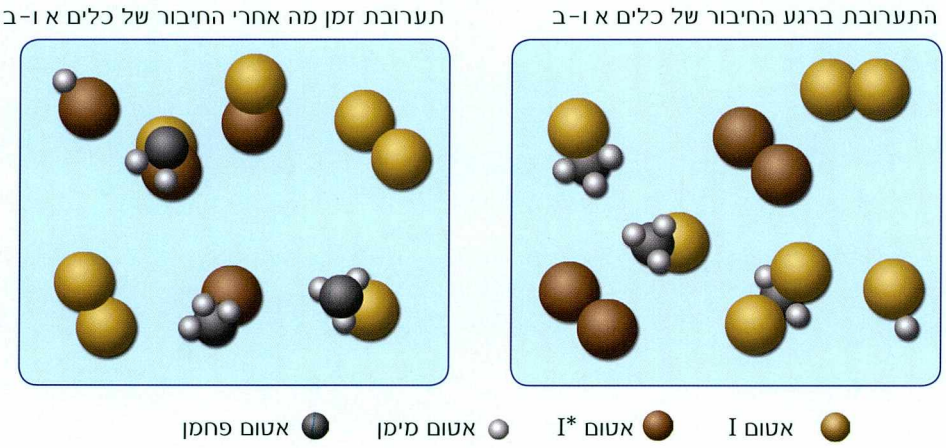
לכלי ב, זהה בנפחו לכלי א, מכניסים תערובת של ארבעה חומרים: - $HI_{(g)}$, $CH_2I_{2(g)}$, $CH_3I_{(g)}$ $I_2^*{}_{(g)}$ בריכוזים שווים לריכוזי השיווי משקל בכלי א ומחברים מיד את כלי ב לכלי א. היוד בכלי ב רדיואקטיבי, לכן מסומן $I^*_{2(g)}$. אטומים רדיואקטיביים של יוד פולטים קרינה (מהגרעין), הניתנת לזיהוי, וכך ניתן להבחין בינם לבין אטומי יוד לא רדיואקטיביים. מלבד זאת, יוד רדיואקטיבי ויוד לא רדיואקטיבי מגיבים באופן זהה.

זמן מה לאחר החיבור, בודקים אילו חומרים פולטים קרינה, כלומר מכילים אטומי יוד רדיואקטיביים. כמו כן, בודקים את ריכוזיהם של החומרים. התוצאות שמתקבלות הן: **כל התרכובות במערכת מכילות גם אטומי יוד רדיואקטיביים**, קרי קיימים $CH_2I^*I_{(g)}$ $HI^*_{(g)}$, וגם $CH_3I^*_{(g)}$ וריכוזי כל החומרים **זהים** לריכוזים שהיו לפני ביצוע החיבור.

הסבר: מצב שיווי משקל אינו מצב שבו מפסיקות התגובות להתרחש! במצב שיווי משקל ממשיכות מולקולות היוד הרדיואקטיבי והלא רדיואקטיבי לנוע ולהתנגש עם מולקולות מגיב $CH_3I_{(g)}$. נוצרים תצמידים משופעלים המכילים אטומי *I, מהם נוצרים תוצרים המכילים *I, לצד תצמידים משופעלים המכילים אטומי I שמהם נוצרים תוצרים עם I.

כמו כן, מהתוצרים נוצרים "מגיבים" עם *I לצד "מגיבים" עם אטומי I. כעבור זמן, יש בכלי גם מולקולות *HI, גם CH_2I^*I וגם CH_3I^*. קצב התגובה הישירה ממשיך להיות שווה לקצב התגובה ההפוכה. לכן, הריכוזים של CH_3I^* / CH_3I יחד, של I_2^*/ I_2 יחד, של CH_2I^*I/ CH_2I_2 יחד, ושל *HI /HI יחד, נשארים ללא שינוי.

איור 9 - דינמיות של מצב שיווי משקל



קבוע שיווי משקל

אחד המאפיינים הנוספים של מצב שיווי המשקל הוא **קשר כמותי** מיוחד, המתקיים **בין ריכוזי החומרים** שנמצאים במערכת. קשר זה התגלה ב-1864 על ידי שני מדענים נורווגיים, הכימאי Waage Peter והמתמטיקאי Guldberg Cato Maximilian.

נדגים את החוק הכמותי בעזרת **דוגמה:**

לארבעה כלים הנמצאים בטמפרטורה 800°C, הוכנסו כמויות שונות של החומרים: SO_2 ו- O_2 ונשמרו סגורים באותה טמפרטורה. בכל הכלים התרחשה התגובה:

$$2\,SO_{2(g)} + O_{2(g)} \rightleftarrows 2\,SO_{3(g)}$$

הריכוזים של שלושת החומרים נבחנו לאורך זמן. כאשר נמצא כי הריכוזים אינם משתנים יותר, כלומר נשארים קבועים לאורך זמן, הוחלט כי הושג מצב של שיווי משקל בכל אחד מהכלים.

ריכוזי החומרים שנמצאו בכלים השונים, במצב שיווי משקל, מופיעים בטבלה הבאה:

כלי מספר	$SO_{3(g)}$	$O_{2(g)}$	$SO_{2(g)}$
1	0.084	0.390	0.660
2	0.180	0.880	0.950
3	0.410	1.980	1.440
4	0.0036	0.220	0.038

? כפי שניתן לראות, היחסים בין הריכוזים ההתחלתיים שונים מהיחס המופיע בניסוח המאוזן. הסבירו את ההבדל.

ביטוי של קבוע שיווי משקל

כאשר מציבים בביטוי הבא: $K_c = \frac{[SO_3]^2}{[SO_2]^2[O_2]}$

את ערכי ריכוזי החומרים כפי שנמדדו במצב של שיווי משקל, בכל כלי בנפרד, מתקבל הערך המופיע בעמודה השמאלית ביותר בטבלה הבאה. ניתן לראות שבכל הניסויים מתקבל, למעשה, אותו ערך, למרות הריכוזים ההתחלתיים השונים בכל ניסוי. ערך זה מכונה **קבוע** שיווי משקל של ריכוזים, ומסמנים אותו כ- K_c (באנגלית, ריכוז = concentration).

שימו לב: K_c קבוע שיווי משקל **אינו** קבוע קצב k, אשר מופיע בהקשר של קצב תגובה ושל סדר תגובה!

כלי מספר	$SO_{3(g)}$	$O_{2(g)}$	$SO_{2(g)}$	K_C
1	0.084	0.390	0.660	0.0415
2	0.180	0.880	0.950	0.0408
3	0.41	1.98	1.44	0.0409
4	0.0036	0.220	0.038	0.0406

לכל תגובה בטמפרטורה מסוימת, יש קבוע שיווי משקל K_c המאפיין את התגובה.

קבוע זה מבטא את היחס הקיים בין ריכוזי התוצרים לבין ריכוזי המגיבים במצב שיווי משקל. הקבוע מתאים לניסוח של אותה תגובה.

להצגת ביטוי הקבוע, נתייחס לניסוח תגובה, באופן הכללי הבא:

$$aA_{(g)} + bB_{(g)} \rightleftarrows cC_{(g)} + dD_{(g)}$$

כאשר A ו- B מייצגים מגיבים, C ו- D מייצגים תוצרים, האותיות הקטנות a-d מייצגות את המקדמים הסטויכיומטריים המופיעים בניסוח, בהתאמה.

הביטוי לחישוב קבוע של ריכוזים, הוא:

$$K_c = \frac{[C]^c[D]^d}{[A]^a[B]^b}$$

חשוב לציין, **כי לתגובה מסוימת בטמפרטורה מסוימת, יש רק קבוע שיווי משקל אחד**, אך ייתכנו **אין סוף מצבי שיווי משקל שונים** (בהם ריכוזי המרכיבים הם שונים, אך מנתם זהה).

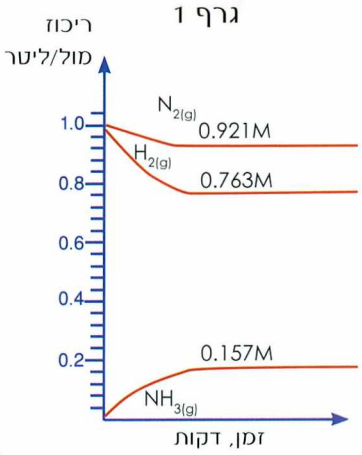
לאותה התגובה יש קבועי שיווי משקל שונים בטמפרטורות שונות.

נביא **דוגמה נוספת** של קבוע שיווי משקל, המאפיין תגובה בטמפרטורה מסוימת, אך הפעם נציג את הנתונים באופן גרפי.

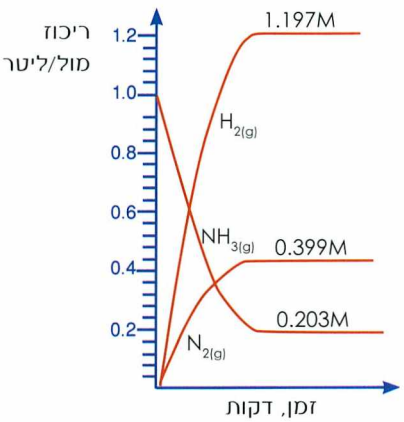
התגובה: $N_{2(g)} + 3\,H_{2(g)} \rightleftarrows 2\,NH_{3(g)}$ בוצעה בשלושה ניסויים שונים, אך באותה טמפרטורה.

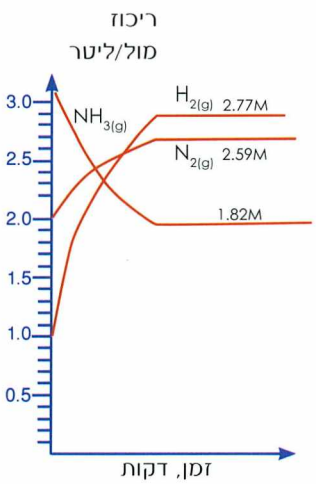
בגרפים הבאים מופיעים נתוני הריכוזים בשלושת הניסויים:

גרף 1



גרף 2





גרף 3

על פי הגרפים הנ"ל (גרף 1, גרף 2, גרף 3):

1. רשמו בטבלה בהמשך את ריכוזי המשתתפים בתגובה.
2. השוו בין הריכוזים בשלושת הניסויים השונים: מה שונה ומה דומה ביניהם?
3. רשמו את הביטוי המתאים לקבוע שיווי משקל.
4. חשבו את הקבוע המתאים לכל אחד מהניסויים. השוו בין התוצאות והסיקו מסקנות.

	גרף 1		גרף 2		גרף 3	
ריכוז של	במצב התחלתי	במצב שיווי משקל	במצב התחלתי	במצב שיווי משקל	במצב התחלתי	במצב שיווי משקל
$N_{2(g)}$						
$H_{2(g)}$						
$NH_{3(g)}$						
ביטוי של K_c						
ערך של K_c						

ביטוי קבוע שיווי משקל בתגובות הטרוגניות

עד כה התייחסנו לקבועי שיווי משקל של מערכות שבהן כל החומרים הם במצב צבירה גזי, כלומר מערכות הומוגניות (כל החומרים במערכת נמצאים באותו מצב צבירה).

כעת נתייחס לקבוע שיווי משקל של תגובות הטרוגניות (החומרים אינם באותו מצב צבירה), שבהן יש נוזל או מוצק יחד עם גז או עם תמיסה. בתגובות מסוג זה, הביטוי של קבוע שיווי משקל **אינו מכיל ריכוז של חומר טהור** שמצב הצבירה שלו מוצק או נוזל.

דוגמאות:

- בכלי פתוח גיר מתפרק בחימום לסידן חמצני ולפחמן דו-חמצני, לפי הניסוח:

$$CaCO_{3(s)} \rightarrow CaO_{(s)} + CO_{2(g)}$$

בכלי סגור, מתקבל מצב של שיווי משקל, שבו נמצאים שני סוגים של מוצקים וגז אחד.

$$CaCO_{3(s)} \rightleftarrows CaO_{(s)} + CO_{2(g)}$$

הביטוי של קבוע שיווי המשקל במערכת זו, הינו: $K_c = [CO_{2(g)}]$

הביטוי אינו מכיל ריכוזים של החומרים המוצקים, שריכוזם איננו יכול להשתנות!

- בכלי סגור שיש בו מים, מתקיים שיווי המשקל: $H_2O_{(g)} \rightleftarrows H_2O_{(l)}$

הביטוי של קבוע שיווי המשקל במערכת זו, הינו: $K_c = \frac{1}{[H_2O_{(g)}]}$, כלומר ללא ריכוז של נוזל.

משמעות ערכו של קבוע שיווי המשקל

הצגנו את קבוע שיווי המשקל כמאפיין של תגובה מסוימת בטמפרטורה נתונה, גודל הקשור לריכוזי החומרים השונים במצב שיווי משקל.

הזכרנו בינתיים שני ערכים של קבועי שיווי משקל, שקרובים ביניהם בגודלם (במקרה):

עבור $2\,SO_{2(g)} + O_{2(g)} \rightleftarrows 2\,SO_{3(g)}$ בטמפרטורה $K_c = 0.041$ 723°C

עבור $N_{2(g)} + 3\,H_{2(g)} \rightleftarrows 2\,NH_{3(g)}$ בטמפרטורה $K_c = 0.060$ 500°C

כעת נברר איזה סוג של מידע מספק קבוע שיווי משקל של תגובה - מהי משמעות ערכו של הקבוע?

ערך מספרי גדול מאוד של הקבוע מתאים למצב שיווי משקל שבו יש ריכוזים גדולים של תוצרים, ביחס לריכוזי המגיבים. כלומר, בטמפרטורה בה נמדד קבוע התגובה, **יש הרבה יותר תוצרים ממגיבים**. במקרה כזה, **באופן מעשי, מבחינים בעיקר בתוצרים ולא במגיבים**, שריכוזיהם קטנים.

נביא דוגמאות של תגובות מסוג זה:

לתגובות שיקוע רבות, המוכרות לכם, יש קבועים גדולים מאוד בטמפרטורת החדר. כך גם לתגובת סתירה בין חומצה לבסיס[1] יש קבוע גדול, $K_c=1 \cdot 10^{14}$. המשמעות היא, שבמצב שיווי משקל של תגובות אלה, יש ריכוזים גדולים של תוצרים וריכוזים נמוכים של מגיבים. ניזכר שביחידה קודמת (בה למדתם על מולים, ריכוז מולרי וכדומה) ביצענו חישובים כמותיים בתגובות, בהתבסס על ההנחה ש"כל" המגיבים הופכים לתוצרים. כעת אנו מבינים שהנחה זו הייתה **קירוב מוצדק**.

לתגובות בעלות קבועי שיווי משקל גדולים מ- 10^{10}, נוהגים להתייחס כאל תגובות ש"מתרחשות עד תום".

ערך מספרי קטן מאוד של הקבוע, מתאים למצב שיווי משקל שבו יש ריכוזים גדולים של מגיבים, ביחס לריכוזי התוצרים. פירוש הדבר הוא **שיש הרבה יותר מגיבים מתוצרים** באותם התנאים (באותה טמפרטורה). ריכוזי התוצרים כה קטנים, עד **שבאופן מעשי, מבחינים בעיקר בקיום מגיבים ולא בתוצרים**, כלומר שלא מבחינים בהתרחשות התגובה.

בהתאם לכך, תגובות בעלות קבועי שיווי משקל הקטנים מ- 10^{-10}, נוהגים לסווג כ"לא מתרחשות".

הנה כמה דוגמאות:

עבור יינון מים: $2\,H_2O_{(l)} \rightleftarrows H_3O^+_{(aq)} + OH^-_{(aq)}$ $K_c=1 \cdot 10^{-14}$ ב- 25°C

קבוע התגובה קטן מאוד, כלומר במצב שיווי משקל יש ריכוזים נמוכים של תוצרים - יונים. לכן באופן מעשי, קשה לזהות את קיומם של היונים (למים מזוקקים מוליכות זניחה).

לעומת זאת, בתגובה אחרת בה נוצרים יונים מחומרים מולקולריים:

$H_2SO_{3\,(l)} + H_2O_{(l)} \rightleftarrows H_3O^+_{(aq)} + HSO^-_{3(aq)}$ $K_c=1.6 \cdot 10^{-2}$ ב- 25°C.

קבוע התגובה הרבה יותר גדול מהקבוע הקודם, כלומר במקרה זה, במצב שיווי משקל יש ריכוזים גבוהים של תוצרים - יונים. בהתאם לכך, קיומם של היונים ניתן לזיהוי (התמיסה מוליכה חשמל).

ערך מספרי ביניים (לא גדול מאוד ולא קטן מאוד) של הקבוע מאפיין תגובות אשר במצב שיווי משקל שלהן יש ריכוזים משמעותיים גם של תוצרים וגם של מגיבים.

---

1 על חומצות ובסיסים תלמדו בהמשך.

לסיכום: ערכו המספרי של קבוע שיווי משקל מעיד על היחס בין ריכוזי תוצרים לבין ריכוזי המגיבים בתערובת החומרים במצב שיווי משקל.

קבוע שיווי משקל גדול מעיד על נוכחות תוצרים בריכוזים גדולים ואילו קבוע ש"מ קטן מעיד על נוכחות מגיבים בריכוזים גדולים.

לכן, קבוע שיווי משקל מהווה מעין מדד למידת ההתרחשות של תגובה ישירה, בהשוואה להפוכה, עד להגעה לשיווי משקל.

עד כה עסקנו בסוג המידע שקבוע שיווי משקל מביע ועכשיו נציין גם את סוג המידע שהוא **אינו מספק**. אם ידוע כי תגובה מתרחשת, ניתן לצפות שיהיו הרבה תוצרים ביחס למגיבים, או להיפך, על פי קבוע שיווי המשקל. אך **לא ניתן לדעת אם התגובה מתרחשת במהירות סבירה**. הדבר תלוי באנרגיית השפעול של התגובה, כפי שלמדנו קודם.

נמחיש בעזרת דוגמה. לתגובה: $2H_{2(g)} + O_{2(g)} \rightleftarrows 2H_2O_{(l)}$ יש קבוע גדול מאוד בטמפרטורת החדר. כלומר, כאשר היא מתרחשת, כמעט ולא נותרים מגיבים, אך התגובה לא מתרחשת ללא העברת ניצוץ בתערובת הגזים. אנרגיית השפעול הגדולה שלה קובעת שהתגובה איטית מכדי שתורגש התרחשותה ב-25°C.

הפרק הבא יעסוק בהיבטים כמותיים של מצב שיווי משקל כימי.

שאלות סיכום

1. האם חוק הקצב של תגובה מנבא משהו על היחס בין ריכוזים של תוצרים לבין ריכוזים של מגיבים במצב שיווי משקל? הסבירו תשובתכם.

2. התייחסו לנתונים הבאים:

$CaCO_{3(s)} \rightleftarrows CaO_{(s)} + CO_{2(g)}$ $\quad K_c = 5.9 \cdot 10^{-25}$ $\quad$ ב- 25°C

$CaCO_{3(s)} \rightleftarrows CaO_{(s)} + CO_{2(g)}$ $\quad K_c = 9.4 \cdot 10^{-3}$ $\quad$ ב- 827°C

א. רשמו את הביטוי לקבוע שיווי המשקל של התגובה.

ב. האם נוכל להשתמש בתגובת פירוק הגיר להפקה של כמויות משמעותיות של פחמן דו-חמצני בטמפרטורת החדר? נמקו קביעתכם.

3. השאלה עוסקת בתגובה: $N_{2(g)} + 3H_{2(g)} \rightarrow 2NH_{3(g)}$, אשר עשויה להגיע למצב שיווי משקל.

א. אילו תנאים דרושים כדי שיושג מצב שיווי משקל?

ב. הכניסו לכלי סגור חנקן ומימן בלבד. הסבירו מדוע קיים קשר בין השינוי שחל במספר המולים של חנקן לבין השינוי במספר המולים של מימן, עד להשגת מצב שיווי משקל.

ג. אחת התשובות הלא נכונות לסעיף ב, היא שעד להשגת שיווי משקל, השינוי בריכוז החנקן גדול פי שלושה מהשינוי בריכוז המימן. הסבירו מה שגוי בתשובה זו וענו תשובה נכונה.

4. האם הקביעות הבאות נכונות או לא? אם הקביעה אינה נכונה, הסבירו במה.

א. בשיווי משקל, הקצב של התגובה הישירה שווה לקצב של התגובה ההפוכה.

ב. העלאת טמפרטורה מקטינה את אנרגיית השפעול.

ג. הפסקת השתנות ריכוזים מעידה על הפסקת התרחשות התגובה.

5. להלן נתונים למערכת: $2A \rightleftarrows B + C$

לתגובה הישירה יש אנרגיית שפעול 39.7 קילוגאול למול.

לתגובה ההפוכה יש אנרגיית שפעול 25.4 קילוגאול למול.

א. האם התגובה הישירה אנדותרמית או אקסותרמית? הסבירו באופן מילולי או גרפי.

ב. כיצד תשפיע הורדת טמפרטורה על מהירות:

I. התגובה הישירה?

II. התגובה ההפוכה? נמקו.

ג. אם מורידים טמפרטורה של מערכת זו כאשר היא במצב שיווי המשקל, האם יישמר מצב שיווי המשקל? הסבירו.

ד. כיצד תשפיע נוכחות זרז מתאים על מהירותן של התגובות הישירה וההפוכה?

6. אילו מהגדלים הבאים יושפעו מהוספת זרז לתגובה?

א. ערכו של קבוע שיווי משקל.

ב. קצב התגובה הישירה.

ג. קצב התגובה ההפוכה.

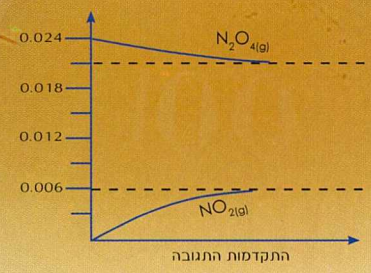
ד. השינוי באנתלפיית התגובה ΔH.

פרק ד

שינוי התנאים במערכת שיווי משקל - עד כמה זה משפיע?

- כיצד מתארים מערכת הנמצאת בשיווי משקל באופן גרפי?
- מה מתרחש במערכת שיווי משקל כאשר חלים בה שינויים?
- האם ניתן לחזות מה יקרה במערכת בשיווי משקל לאחר שינוי?

על שאלות אלו ועל שאלות רבות אחרות תוכלו לענות לאחר לימוד הפרק הרביעי



מבוא

בפרק הקודם הכרתם את מצב שיווי המשקל, שהוא מצב מיוחד המאפיין תגובות כימיות רבות. במצב זה מתקיים שיווי משקל דינמי, בו מתרחשות בו זמנית שתי תגובות בעלות קצב תגובה זהה. בפרק זה נתמקד בהיבטים כמותיים הקשורים למצב שיווי משקל ונתייחס לשני נושאים עיקריים:

- חישובים הקשורים לקבוע שיווי משקל K_c.
- השפעת שינוי התנאים במערכת שיווי משקל על ריכוזי החומרים.

פעילות מתוקשבת

להלן כתובות של כמה אתרים בהם סימולציות של מצבי שיווי משקל. היכנסו לאחד האתרים, ובחנו את המצב המתואר. אילו מהמאפיינים של מערכת בשיווי משקל באים לידי ביטוי בסימולציה שראיתם?

http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/run.cgi?ChemicalEquilibrium.678.441
http://www.chem.iastate.edu/group/Greenbowe/sections/projectfolder/animationsindex.htm
http://mc2.cchem.berkeley.edu/Java/equilibrium/index.html

כיצד מחשבים את ערכו של קבוע שיווי משקל?

כפי שלמדתם בפרק הקודם, מאפיין חשוב של תגובה כימית המצויה בשיווי משקל הוא קביעות בריכוזי המרכיבים במערכת וקיום **יחס קבוע** בין הריכוזים, הנקרא קבוע שיווי משקל K_c. ניסויים רבים הראו, כי ערכו של K_c עבור תגובת שיווי משקל מסוימת הוא קבוע, **כל עוד הטמפרטורה של המערכת אינה משתנה.**

ראינו כי עבור תגובה כימית בניסוח הכללי הבא:

$$aA_{(g)} + bB_{(g)} \rightleftarrows cC_{(g)} + dD_{(g)}$$

מגיבים ⇄ תוצרים

הביטוי לערכו של K_c הוא:

$$K_c = \frac{[C]^c[D]^d}{[A]^a[B]^b}$$

נזכור כי:

ניתן להגיע למערכת המצויה בשיווי משקל בדרכים שונות:

נתייחס לתגובה הכללית $aA_{(g)} + bB_{(g)} \rightleftarrows cC_{(g)} + dD_{(g)}$

- כאשר לכלי תגובה סגור יוכנסו ריכוזים שונים של הגזים המגיבים A ו- B, תתרחש תגובה ישירה עד ליצירת מצב של שיווי משקל דינמי.
- כאשר לכלי תגובה סגור יוכנסו ריכוזים שונים של הגזים התוצרים C ו- D, תתרחש תגובה הפוכה עד ליצירת מצב של שיווי משקל דינמי.
- כאשר לכלי התגובה יוכנס **רק אחד** מהמגיבים (A או B) או אחד מהתוצרים (C או D) המערכת **לא תגיע** לשיווי משקל.

? איזו תגובה תתרחש כאשר נכניס לכלי התגובה ריכוזים שונים של הגזים, A,B ו- C?

נדון כעת בדרכים לחישוב ערכו של K_c עבור מערכות בשיווי משקל, על סמך ממצאים ניסויים.
נתייחס בדוגמאות הבאות **לשלושה ניסויים שונים** עם אותם חומרים.

דוגמה 1

לתוך כלי בנפח 10 ליטר, המצוי בטמפרטורה של 210°C, הוכנסו 1 מול פחמן חד-חמצני $CO_{(g)}$, ו-1 מול מימן $H_{2(g)}$. לאחר זמן, הושג בכלי מצב שיווי משקל, של התגובה:

$$CO_{(g)} + 2H_{2(g)} \rightleftarrows CH_3OH_{(g)}$$

הסבירו מה קרה בכלי עד לקבלת מצב של שיווי משקל. התייחסו להיבט המיקרוסקופי.
השתמשו בביטוים: קצב תגובה, תגובה ישירה, תגובה הפוכה.

כאשר המערכת הגיעה למצב של שיווי משקל נמצא כי כמות התוצר מתאנול $CH_3OH_{(g)}$ הייתה 0.089 מול.

1. חשבו את ריכוזי החומרים במצב שיווי משקל.
2. רשמו את הביטוי לקבוע שיווי משקל.
3. חשבו את ערכו של קבוע שיווי משקל, K_C.

פיתרון לדוגמה 1

ראשית, עלינו לדעת את ריכוזיהם של כל אחד מהחומרים במצב שיווי משקל ולאחר מכן נוכל לחשב את ערכו של K_C.
פירוט החישוב ייעשה בעזרת טבלה על פי השלבים המתוארים.
התגובה הנתונה היא:

$$CO_{(g)} + 2H_{2(g)} \rightleftarrows CH_3OH_{(g)}$$

שלב א. מכניסים את הנתונים לטבלה

המרכיב במערכת	$CO_{(g)}$	$H_{2(g)}$	$CH_3OH_{(g)}$
מס' מולים התחלתי - על פי הנתונים	1.000	1.000	0
השינוי במולים - על פי נתונים ועל פי			
היחסים בניסוח	1	2	1
מס' מולים בשיווי משקל - על פי הנתונים או על פי סכום הכמות ההתחלתית והשינוי			0.089
ריכוז בשיווי משקל =מס' המולים/נפח הכלי ב- M			

שלב ב. קובעים את השינוי באחד החומרים

נחשב מהו **השינוי** אשר התרחש במספר מול מתאנול עד למצב שיווי משקל. במצב ההתחלתי לא היה מתאנול בכלי. מתאנול נוצר בתהליך ולכן כמותו גדלה ב-0.089 מול. נרשום זאת בטבלה.

המרכיב במערכת	$CO_{(g)}$	$H_{2(g)}$	$CH_3OH_{(g)}$
מס' מולים התחלתי - על פי הנתונים	1.000	1.000	0
השינוי במולים - על פי נתונים ועל פי			+0.089
היחסים בניסוח	1	2	1
מס' מולים בשיווי משקל - על פי הנתונים או על פי סכום הכמות ההתחלתית והשינוי.			0.089
ריכוז בשיווי משקל =מס' המולים/נפח הכלי ב- M			

שלב ג. מחשבים את השינויים בשאר החומרים.

ידוע כי השינוי בריכוז המתאנול הוא 0.089+. לכן השינוי במס' המולים של הפחמן החד-חמצני הוא 0.089 - (כיון שהיחס הסטויכיומטרי הוא 1:1). השינוי במספר המולים של המימן גדול פי שנים מזה של הפחמן-החד חמצני, כלומר 0.178- (כיוון שהיחס הסטויכיומטרי הוא 1:2) נרשום זאת בטבלה.

המרכיב במערכת	$CO_{(g)}$	$H_{2(g)}$	$CH_3OH_{(g)}$
מס' מולים התחלתי - על פי הנתונים	1.000	1.000	0
השינוי במולים - על פי נתונים ועל פי	-0.089	-0.178	+0.089
היחסים בניסוח	1	2	1
מס' מולים בשיווי משקל - על פי הנתונים או על פי סכום הכמות ההתחלתית והשינוי.			0.089
ריכוז בשיווי משקל =מס' המולים/נפח הכלי ב- M			

שלב ד. מחשבים את כמות החומרים במצב שיווי משקל

מסכמים את שתי השורות הראשונות ורושמים בטבלה: 0.911 מול פחמן חד חמצני ו-0.822 מול מימן.

המרכיב במערכת	$CO_{(g)}$	$H_{2(g)}$	$CH_3OH_{(g)}$
מס' מולים התחלתי - על פי הנתונים	1.000	1.000	0
השינוי במולים - על פי נתונים ועל פי	-0.089	-0.178	+0.089
היחסים בניסוח	1	2	1
מס' מולים בשיווי משקל - על פי הנתונים או על פי סכום הכמות ההתחלתית והשינוי	0.911	0.822	0.089
ריכוז בשיווי משקל = מס' המולים/נפח הכלי ב- M			

שלב ה. חישוב **ריכוזו** של כל אחד מהחומרים

הדבר נעשה על ידי חילוק מס' המולים של החומר בנפח הכלי הנתון. בשאלה זו נתון כי נפח הכלי הוא 10 ליטר. נרשום את התוצאות בשורה אחרונה.

המרכיב במערכת	$CO_{(g)}$	$H_{2(g)}$	$CH_3OH_{(g)}$
מס' מולים התחלתי - על פי הנתונים	1.000	1.000	0
השינוי במולים - על פי נתונים ועל פי	-0.089	-0.178	+0.089
היחסים בניסוח	1	2	1
מס' מולים בשיווי משקל - על פי הנתונים או על פי סכום הכמות ההתחלתית והשינוי	0.911	0.822	0.089
ריכוז בשיווי משקל =מס' המולים/נפח הכלי ב- M	0.0911	0.0822	0.0089

במקרה זה, מצב שיווי משקל דינמי ישרור בכלי התגובה כאשר ריכוזי המרכיבים תואמים את הערכים הנ"ל. נחשב את ערכו של K_c על ידי הצבה בביטוי של K_c

הביטוי של K_c לתגובה הנ"ל הוא: $K_c = \frac{[CH_3OH]}{[CO][H_2]^2}$

חישוב ערכו של K_c $K_c = \frac{0.0089}{0.0911 \times (0.0822)^2} = 14.458$

דוגמה 2

בניסוי אחר, הוכנסו לתוך כלי בנפח 10 ליטר, המצוי בטמפרטורה של 210°C, 1 מול מתאנול $CH_3OH_{(g)}$. התגובה במערכת זהה לתגובה הקודמת. במצב שיווי משקל נמצא שיש בכלי התגובה 0.753 מול פחמן חד-חמצני.

1. אלו שינויים התרחשו בכלי עד לקבלת מצב של שיווי משקל? התייחסו להיבט מיקרוסקופי.

2. מהם ריכוזי המרכיבים במצב שיווי משקל ומהו קבוע שיווי משקל לתגובה הנתונה?

התגובה היא:

$$CO_{(g)} + 2H_{2(g)} \rightleftarrows CH_3OH_{(g)}$$

א. מכניסים הנתונים לטבלה:

כאשר במצב נתון התחלתי לא מוזכרים חלק ממרכיבי התגובה, מניחים כי ריכוזם ההתחלתי הוא אפס (0).

המרכיב במערכת	$CO_{(g)}$	$H_{2(g)}$	$CH_3OH_{(g)}$
מס' מולים התחלתי - על פי הנתונים	0	0	1.000
השינוי במולים - על פי נתונים ועל פי			
היחסים בניסוח	1	2	1
מס' מולים בשיווי משקל - על פי הנתונים או על פי סכום הכמות ההתחלתית והשינוי.	0.753		
ריכוז בשיווי משקל =מס' המולים/נפח הכלי ב- M			

ב. משלימים את הטבלה על פי הנתונים.

שימו לב! הביטוי של הקבוע ייכתב על פי ניסוח התגובה ולא על פי הכנסת החומרים לכלי.

פיתרון לדוגמה 2

השלמת הטבלה:

המרכיב במערכת	$CO_{(g)}$	$H_{2(g)}$	$CH_3OH_{(g)}$
מס' מולים התחלתי - על פי הנתונים	0	0	1.000
השינוי במולים - על פי נתונים ועל פי	+ 0.753	+1.506	- 0.753
היחסים בניסוח	1	2	1
מס' מולים בשיווי משקל - על פי הנתונים או על פי סכום הכמות ההתחלתית והשינוי.	0.753	1.506	0.247
ריכוז בשיווי משקל =מס' המולים/נפח הכלי ב- M	0.0753	0.1506	0.0247

חישוב ערכו של K_c על פי ריכוזי שיווי משקל $K_c = \frac{0.0247}{0.0753 \times 0.1506^2} = 14.462$

החישובים מראים, כי ערכו של K_c נשאר קבוע גם בניסוי 1 וגם בניסוי 2.

דוגמה 3

בניסוי אחר, הוכנסו 1 מול מתאנול $CH_3OH_{(g)}$, 1 מול פחמן חד חמצני $CO_{(g)}$ ו-1 מול מימן $H_{2(g)}$ לכלי בנפח 10 ליטר, שמצוי בטמפרטורה של 210°C. בכלי התרחשה התגובה:

$$CO_{(g)} + 2H_{2(g)} \rightleftarrows CH_3OH_{(g)}$$

נמצא כי במצב שיווי משקל **ריכוז** המימן הוא 0176M.

1. הסבירו, לאיזו תגובה הייתה עדיפות עד אשר המערכת הגיעה לשיווי משקל.
2. הכינו טבלה, וחשבו את ערכו של K_c במקרה זה.

פיתרון לדוגמה 3

המרכיב במערכת	$CO_{(g)}$	$H_{2(g)}$	$CH_3OH_{(g)}$
מס' מולים התחלתי - על פי הנתונים	1.000	1.000	1.000
השינוי במולים - על פי נתונים ועל פי	+0.380	+0.760	-0.380
היחסים בניסוח	1	2	1
מס' מולים בשיווי משקל - על פי הנתונים או על פי סכום הכמות ההתחלתית והשינוי.	1.380	1.760	0.620
ריכוז בשיווי משקל = מס' המולים/נפח הכלי ב- M	0.138	0.176	0.062

חישוב ערכו של K_c $\quad K_c = \frac{0.062}{0.138 \times 0.176^2} = 14.503$

שלוש הדוגמאות שהוצגו כאן מראות, כי ניתן להגיע לאותה תגובה הנמצאת במצב שיווי משקל מנתונים התחלתיים שונים.

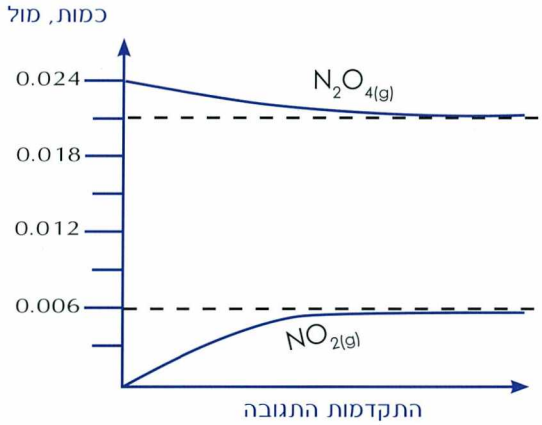
כל עוד הטמפרטורה בה התרחשה התגובה לא שונתה, למרות ריכוזי שיווי משקל שונים, ערכו של קבוע שיווי משקל K_c יישאר קבוע.

ניתן להציג מידע על מערכת המגיעה לשיווי משקל גם על ידי תיאור גרפי.

דוגמה

לתוך כלי אשר נפחו 400 מ"ל הוכנסו 0.024 מול של הגז N_2O_4. בטמפרטורה T המערכת הגיעה לשיווי משקל והתרחשה התגובה: $N_2O_{4(g)} \rightleftarrows 2NO_{2(g)}$

הגרף הבא מתאר את שינוי מספר המולים של מרכיבי המערכת.



א. מהם ריכוזי המרכיבים כאשר המערכת נמצאת בשיווי משקל? מלאו טבלה מפורטת.

ב. מהו ערכו של קבוע שיווי משקל לתגובה הנ"ל בטמפרטורה הנתונה?

שאלות בנושא קבוע שיווי משקל

1. לתוך כלי שנפחו 1 ליטר הנמצא בטמפרטורה T , הוכנסו 0.5 מול חנקן $N_{2(g)}$, ו-0.8 מול מימן $H_{2(g)}$. בעזרת מדידת הלחץ בכלי, נקבע כי המערכת הגיעה לשיווי משקל. מדידות נוספות הראו כי במצב שיווי משקל יש בכלי 0.15 מול אמוניה $NH_{3(g)}$.

א. הסבירו כיצד מדידת הלחץ בכלי מאפשרת לקבוע כי המערכת הגיעה לשיווי משקל.

ב. תארו את מצב שיווי משקל מבחינה מיקרוסקופית.

ג. נסחו ואזנו את תגובת שיווי משקל.

ד. רישמו את הביטוי לקבוע שיווי משקל K_c.

ה. שרטטו טבלה בה רשומים ריכוזי כל המרכיבים לפני ההגעה לשיווי משקל ולאחריה.

ו. חשבו את ערכו של קבוע שיווי משקל K_c.

ז. שרטטו גרף סכמטי המתאר את השתנות הריכוזים של המרכיבים עד למצב של שיווי משקל.

2. לתוך כלי בנפח 1 ליטר הוכנסו 0.02 מול מימן $H_{2(g)}$ ו-0.02 מול יוד $I_{2(g)}$. במצב שיווי משקל התגובה היא:

$$H_{2(g)} + I_{2(g)} \rightleftarrows 2HI_{(g)}$$

ריכוז המימן במצב שיווי משקל היה 0.01M

א. מהו הביטוי של קבוע שיווי משקל K_c?

ב. מהו ערכו של K_c?

3. נתונה מערכת בשיווי משקל בטמפרטורה של 210°C. התגובה המתרחשת היא:

$$CO_{(g)} + 2H_{2(g)} \rightleftarrows CH_3OH_{(g)}$$

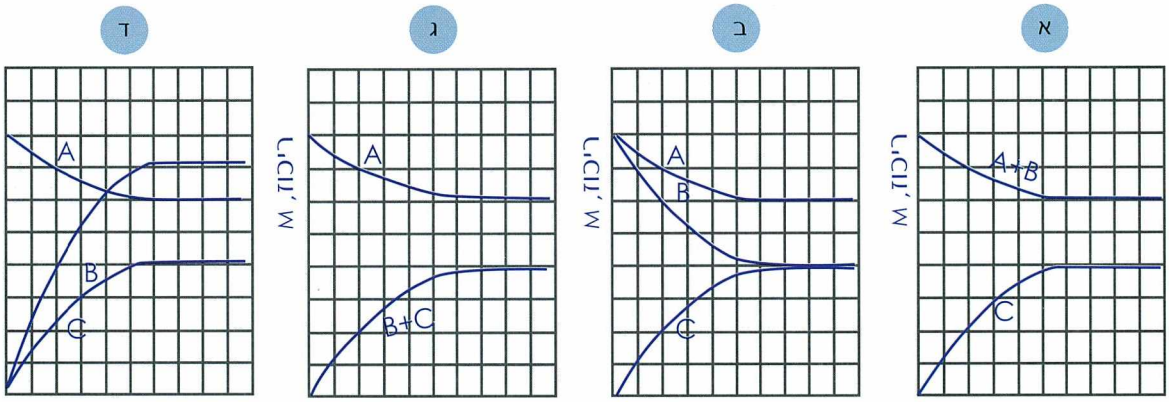
ידוע כי ערכו של קבוע שיווי משקל הוא 14.5 וכן ידועים הריכוזים הבאים במצב שיווי משקל:

$$[CO]=1.03M \quad [CH_3OH]=1.56M$$

מהו ריכוז המימן הנמצא בכלי במצב שיווי משקל?

4. לתוך כלי בנפח 1 ליטר, הנמצא בטמפרטורה של 210°C, הוכנס 1 מול פחמן חד-חמצני. האם המערכת תגיע למצב שיווי משקל המתואר בנוסחה הבאה: $CO_{(g)} + 2H_{2(g)} \rightleftarrows CH_3OH_{(g)}$
אם כן, מהו ריכוזו של פחמן - חד חמצני במצב שיווי משקל? אם לא, נמק מדוע.

5. נתונה התגובה: $A_{(g)} + 2B_{(g)} \rightleftarrows 2C_{(g)}$
מהו הגרף המתאר נכון את השינויים בריכוזי המרכיבים עד להגעה לשיווי משקל?



6. **(רשות) מדגם של 0.5 מול $PCl_{5(g)}$ הוכנס לכלי בנפח 500 מ"ל וחומם לטמפרטורה של 250°C. התרחשה התגובה:

$$PCl_{5(g)} \rightleftarrows PCl_{3(g)} + Cl_{2(g)}$$

בתנאים אלו $K_c=1.80$. חשבו מהו הרכב המערכת (מהו הריכוז של כל אחד מהחומרים) במצב שיווי משקל? הדרכה: הכניסו הנתונים לטבלה המוכרת וסמנו בתור נעלם X את השינוי שחל באחד המרכיבים. רשמו משוואה ריבועית ופתרו. כמה פיתרונות לשאלה?

תלות ערכו של קבוע שיווי משקל בניסוח התגובה

הביטוי של קבוע שיווי משקל עבור תגובה מסוימת תלוי בניסוח שנבחר לתגובה. ניסוח אותה תגובה בצורה שונה, יוביל לרישום ביטוי שונה וערך שונה של K_c.

נדגים זאת בעזרת התגובה שהכרתם:

$$CO_{(g)} + 2H_{2(g)} \rightleftarrows CH_3OH_{(g)}$$

הביטוי לקבוע שיווי משקל הוא: $K_c = \frac{[CH_3OH]}{[CO][H_2]^2}$

וערכו של קבוע שיווי משקל K_c בטמפרטורה של 210°C שווה ל-14.5

א. ניסוח התגובה בצורה הפוכה

כאשר ניסוח התגובה הנ"ל יירשם כך: $CH_3OH_{(g)} \rightleftarrows CO_{(g)} + 2H_{2(g)}$

הביטוי של קבוע שיווי משקל החדש, K_{c1} יהיה:

$$K_{c1} = \frac{[CO][H_2]^2}{[CH_3OH]} = \frac{1}{\frac{[CH_3OH]}{[CO][H_2]^2}} = \frac{1}{K_c}$$

וערכו של קבוע שיווי משקל K_{c1} יהיה: $K_{c1} = \frac{1}{K} = \frac{1}{14.5} = 0.069$

שימו לב!

כאשר מכניסים לכלי התגובה את החומרים המופיעים בניסוח כתוצרים,

אין להפוך את הביטוי של קבוע שיווי משקל.

ב. ניסוח תגובה עם מקדמים שונים

אם ננסח את התגובה הנ"ל בעזרת מקדמים אחרים, לדוגמה:

$$2CH_3OH_{(g)} \rightleftarrows 2CO_{(g)} + 4H_{2(g)}$$

הביטוי של קבוע שיווי משקל החדש, K_{c2} יהיה: $K_{c2} = \frac{[CO]^2[H_2]^4}{[CH_3OH]^2} = [\frac{[CO][H_2]^2}{[CH_3OH]}]^2 = K_{c1}^2$

וערכו של קבוע שיווי משקל K_{c2} יהיה: $K_{c2} = (K_{c1})^2 = 0.069^2 = 4.756 \times 10^{-3}$

פסק זמן לחשיבה

1. רשמו את הביטוי לקבוע שיווי משקל K_c לתגובה $N_{2(g)} + 3H_{2(g)} \rightleftarrows 2NH_{3(g)}$
2. רשמו את הביטוי לקבוע שיווי משקל K_c לתגובה $\frac{1}{2}N_{2(g)} + \frac{3}{2}H_{2(g)} \rightleftarrows NH_{3(g)}$
3. מהו הקשר בין שני הביטויים הנ"ל?

מנת ריכוזים

נתייחס לתגובה כללית במצב שיווי משקל $aA_{(g)} + bB_{(g)} \rightleftarrows cC_{(g)} + dD_{(g)}$.

מה יתרחש אם תוכנס לכלי התגובה תערובת המכילה את כל המרכיבים: A,B, C ו- D? האם המערכת נמצאת בשיווי משקל? אם לא, איזו תגובה מועדפת עד למצב של שיווי משקל? התגובה הישירה או ההפוכה?

על מנת לענות על שאלות אלו יש לחשב את מנת הריכוזים Q. הביטוי עבור Q זהה לביטוי של K_c.

Q מציין את יחס הריכוזים ברגע נתון כלשהו.

$$Q = \frac{[C]^c[D]^d}{[A]^a[B]^b}$$

כאמור K_c מציין את יחס הריכוזים המאפיין מערכת בשיווי משקל (עם כל המאפיינים המתאימים למצב זה: תכונה מאקרוסקופית קבועה, דינמיות בין שתי תגובות הפוכות וכו') והוא ערך קבוע בטמפרטורה מסוימת.

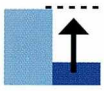
על ידי השוואת ערכו של Q, שיסומן במלבן כחול Q לערכו של K_c אשר יסומן במלבן תכלת K_c ניתן להחליט מהו הכיוון המועדף עד למצב שיווי משקל.

מחשבים את ערכו של Q על פי הנתונים בשאלה. משווים ערך זה לערך נתון של K_c בטמפרטורה נתונה. ייתכנו שלושה מקרים:

1. אם $Q = K_c$

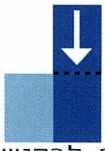
הרי שתערובת החומרים הנתונה נמצאת כבר בשיווי משקל.

2. אם $Q < K_c$



הרי שעל מנת שערכו של Q יגדל (כדי להגיע לערך של K_c) ריכוזי התוצרים צריכים לגדול. הדבר יקרה אם תתגבר התגובה בה ריכוזי התוצרים יגדלו וריכוזי המגיבים יקטנו. כלומר, תתגבר התגובה הישירה.

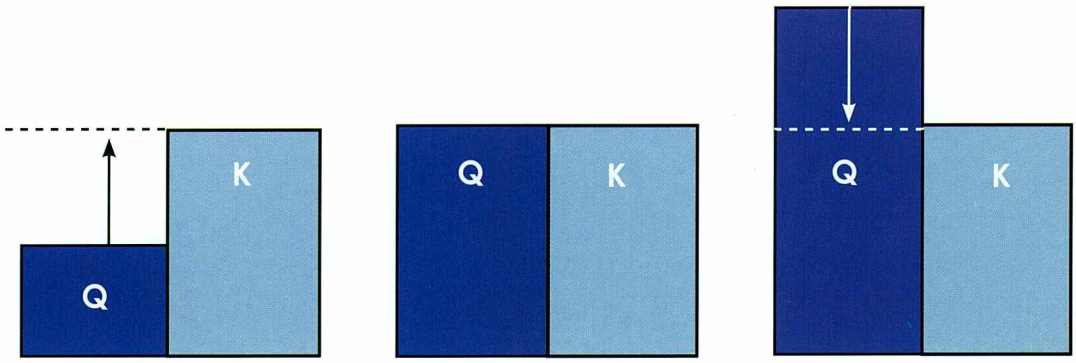
3. אם $Q > K_c$



הרי שעל מנת להקטין את Q (כדי להגיע לערך של K_c), ריכוזי התוצרים צריכים לקטון. הדבר יקרה אם תתגבר התגובה בה ריכוזי התוצרים יקטנו וריכוזי המגיבים יגדלו. כלומר, תתגבר התגובה ההפוכה.

איור 1 מסכם את האמור לעיל.

איור 1 - כיוון התקדמות תגובה על פי השוואת Q ל-K



ג. קצב התגובה ההפוכה גדול מקצב התגובה הישירה עד למצב שיווי משקל

א. קיים שיווי משקל במערכת קצב תגובה ישירה שווה לקצב תגובה הפוכה

ב. קצב התגובה הישירה גדול מקצב התגובה ההפוכה עד למצב שיווי משקל

שאלות בנושא מנת הריכוזים Q

1. השאלה דנה בתגובה: $2NO_{2(g)} \rightleftarrows 2NO_{(g)}+O_{2(g)}$

נתון שבטמפרטורה של 827°C, קבוע שיווי משקל K_c הוא 20.

נתונים שני כלים הנמצאים ב- 827°C ונפח כל אחד מהם הוא 1 ליטר.

לכלי A: הכניסו 0.05 מול $NO_{2(g)}$, 0.4 מול $NO_{(g)}$ ו-0.4 מול O_2.

לכלי B: הכניסו 0.08 מול $NO_{2(g)}$, 0.8 מול $NO_{(g)}$ ו- 0.2 מול O_2.

האם וכיצד ישתנה ריכוזו של $NO_{2(g)}$ בכל אחד מהכלים? נמקו.

2. לתגובה הנתונה: $A_{(g)} \rightleftarrows B_{(g)}$

קבוע שיווי משקל השווה ל-10 בטמפרטורה T1. לתוך כלי הוכנסו 0.05 מול A ו-0.8 מול B.

א. איזו תגובה מתרחשת בקצב גדול יותר עד להגעה למצב של שיווי משקל בכלי התגובה?

ב. האם הלחץ בכלי עד להגעה לשיווי משקל, עולה, יורד או נשאר ללא שינוי? נמקו.

שינוי התנאים במערכת שיווי משקל

במערכת הנמצאת במצב שיווי משקל, קצב התגובה הישירה וקצב התגובה ההפוכה שווים זה לזה. כל גורם העשוי לשנות את קצב אחת התגובות ולהפר את האיזון, מהווה הפרעה למצב שיווי משקל. גורמים המשנים את קצב התגובה, כמו ריכוז וטמפרטורה, עשויים להשפיע על מערכת בשיווי משקל. שינוי התנאים גורם לשינוי בהרכב המערכת עד ליצירת מצב של שיווי משקל חדש.

שינוי בריכוז אחד החומרים

קיימת אפשרות להגדיל או להקטין את הריכוז של אחד החומרים במערכת הנמצאת בשיווי משקל:

- **הגדלת** הריכוז של חומר מסוים תיעשה על ידי הוספת אותו חומר.
- **הקטנת** הריכוז של חומר מסוים תיעשה על ידי הוספת חומר אשר מגיב איתו באופן ספציפי או על ידי הוצאתו ממכל התגובה.

נמצא כי שינוי ריכוז לא משנה את ערכו של K_c למרות שנגרם שינוי זמני בערכה של מנת הריכוזים (Q).

פעילות 1 – מה קורה במערכת בעת שינוי בריכוז ולאחריו?

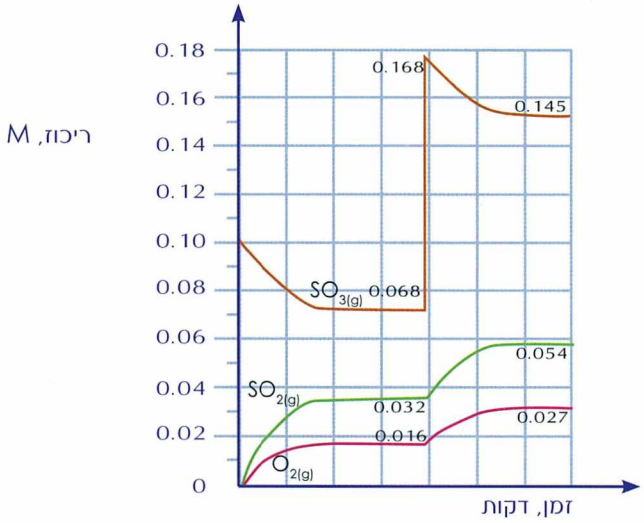
לתוך כלי שנפחו 10 ליטר ומצוי בטמפרטורה של 727°C הכניסו 1 מול גופרית תלת-חמצנית $SO_{3(g)}$.

התרחשה התגובה: $2SO_{3(g)} \rightleftarrows 2SO_{2(g)} + O_{2(g)}$.

לאחר שהמערכת הגיעה לשיווי משקל, הוכנס 1 מול נוסף של החומר $SO_{3(g)}$ לכלי התגובה.

איור 2 מתאר את השתנות ריכוזי המרכיבים במערכת עד ההגעה לשיווי משקל, ברגע השינוי ולאחריו. הטמפרטורה בכלי לא השתנתה במהלך התרחשות התגובה.

איור 2 – ריכוזי החומרים במערכת לפני ואחרי הוספת $SO_{3(g)}$.



1. מהו ערכו של K_c לפני הוספת עוד $SO_{3(g)}$ על פי הנתונים בגרף?
2. מהו השינוי אשר התרחש במערכת לאחר שהגיעה לשיווי משקל?
3. כיצד השתנו ריכוזי כל המרכיבים לאחר השינוי?
4. מהו ערכו של K_c בשיווי המשקל החדש?

כפי שחישוביכם הראו, ערכו של K_c לא השתנה לאחר השינוי במערכת. הדבר תואם את הקביעה הקודמת שלפיה קבוע שיווי משקל משתנה רק בעקבות שינוי בטמפרטורה.

הסבר למתרחש במערכת בעת השינוי בריכוז ואחריו

לפני הוספת $SO_{3(g)}$, קצב התגובה הישירה וקצב התגובה ההפוכה היו זהים. עם הכנסת כמות נוספת של החומר $SO_{3(g)}$ לתוך הכלי, עלה ריכוזו ועקב כך עלה קצב התגובה הישירה, כיוון שמספר ההתנגשויות הכללי בין החלקיקים עלה ולכן עלה מספר ההתנגשויות האנרגטיות **המובילות לתגובה** בין מולקולות $SO_{3(g)}$. הדבר גרם לחוסר איזון בין מהירויות התגובה הישירה וההפוכה והמערכת לא נמצאת יותר בשיווי משקל.

עם התקדמות התגובה הישירה, ריכוזו של $SO_{3(g)}$ קטן וריכוזיהם של התוצרים $SO_{2(g)}$ ו- $O_{2(g)}$ גדלים. בעקבות זאת, קצב התגובה ההפוכה, התלויה בריכוזי התוצרים, גדל עד אשר נוצר מצב בו מהירויותיהן של שתי התגובות שוב שוות וזהו מצב שיווי משקל חדש.

במצב שיווי המשקל החדש ריכוזי כל המרכיבים (המגיבים והתוצרים) שונים, בהשוואה למצב ההתחלתי, אולם היחס ביניהם - קבוע שיווי משקל K_c-נשאר קבוע.

שינוי ריכוז במערכת הנמצאת בשיווי משקל - סיכום

- *שינוי בריכוז אחד המגיבים משנה את קצב התגובה הישירה.*
- *שינוי בריכוז אחד התוצרים משנה את קצב התגובה ההפוכה.*
- *שינוי קצב אחת התגובות גורר שינוי קצב התגובה השנייה עד ליצירת מצב שיווי משקל חדש שבו יש איזון מחודש בין מהירויות שתי התגובות ההפוכות.*
- *במצב שיווי משקל החדש, ריכוזי המרכיבים שונים מהמצב ההתחלתי, אולם K_c אינו משתנה.*

חיזוי תוצאות של שינוי בריכוז על פי השוואת Q ו-K_c

על מנת לחזות את תוצאות השינוי נוכל להשוות את מנת הריכוזים, Q, ברגע נתון, למשל ברגע השינוי במערכת, לערכו של קבוע שיווי משקל, K_c, לתגובה הנתונה בטמפרטורה מסוימת. השוואה כזו תוכל לעזור להבין איזו תגובה-הישירה או ההפוכה - מתרחשת יותר לאחר השינוי.

בפעילות 1, הגדלת ריכוז המגיב $SO_{3(g)}$ גרמה לכך שערכו של Q יהיה קטן מערכו של K_c (ריכוז המגיב $SO_{3(g)}$ מופיע בביטוי של Q במכנה). לכן על מנת לחזור ליחס ריכוזים קודם, תועדף התגובה הישירה, בה ריכוז התוצרים יגדל וריכוז המגיב יקטן, כפי שרואים באיור 2.

המדען הצרפתי **הנרי לה שטליה** (Henri-Louis Le Châtelier 1850-1936) חקר רבות את הנושא של שיווי משקל וביצע תצפיות על מספר רב של מערכות שיווי משקל ועל האופן בו הן מגיבות על שינוי תנאים. בסיכום תצפיותיו הוא ניסח עיקרון, הקרוי על שמו, העוזר לחזות את תוצאות ההתרחשות במערכות שיווי משקל בעקבות שינויים חיצוניים.

עיקרון לה שטליה- *כאשר גורם חיצוני מפר מצב שיווי משקל דינמי, תתגבר התגובה אשר תקטין את השינוי עד להשגת שיווי משקל חדש.*

חיזוי תוצאות של שינוי בריכוז על פי עיקרון לה שטליה

הוספת $SO_{3(g)}$ מעלה את ריכוז המגיב. לפיכך, על פי עיקרון לה-שטליה, תועדף התגובה הישירה הגורמת להקטנת ריכוזו של $SO_{3(g)}$ (אך לא עד לריכוזו ההתחלתי) ולהעלאת ריכוז התוצרים, עד הגעה לשיווי משקל חדש.

יש לזכור כי עיקרון לה שטליה אינו מהווה הסבר למתרחש במערכת דינמית, אלא דרך לחזות את התוצאות של שינוי החל במערכת בשיווי משקל.

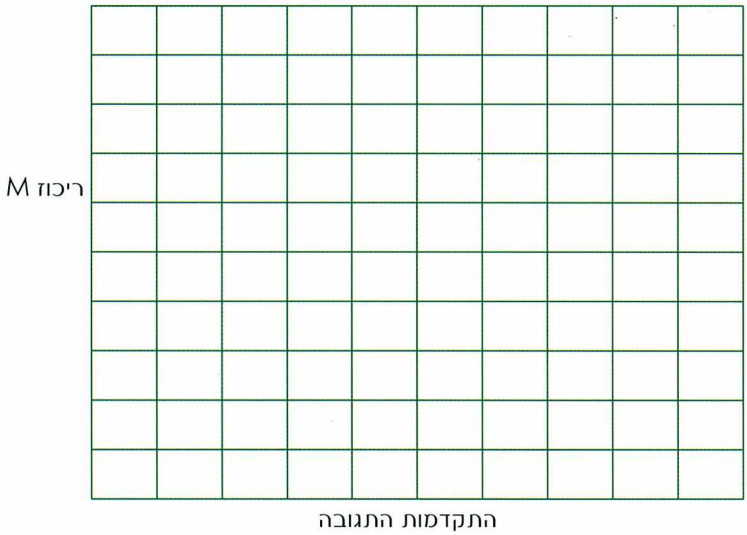
פעילות 2

לתוך כלי שנפחו 1 ליטר הנמצא בטמפרטורה T, הוכנסו 0.5 מול חנקן, $N_{2(g)}$ ו-0.8 מול מימן $H_{2(g)}$. במצב שיווי משקל היו בכלי 0.15 מול אמוניה $NH_{3(g)}$.

1. שרטטו גרף סכמטי המתאר את השתנות הריכוזים של המרכיבים עד למצב של שיווי משקל.

התרחשה התגובה: $N_{2(g)} + 3H_{2(g)} \rightleftarrows 2NH_{3(g)}$

2. רשמו את הביטוי לקבוע שיווי משקל, K_c וחשבו את ערכו.



לאחר שהמערכת הגיעה לשיווי משקל הוכנסו לכלי התגובה מעט מים $H_2O_{(l)}$. כתוצאה מכך, ירדה כמות האמוניה הגזית בכלי.

3. כיצד ישפיע שינוי זה על קצב התגובה הישירה?
4. האם השינוי מהווה הפרעה לשיווי משקל?
5. כיצד ישתנו ריכוזי המרכיבים השונים לאחר השינוי? מהו ההסבר לכך?
6. המשיכו את שרטוט הגרף (באופן סכמטי) לאחר השינוי שחל במערכת.
7. האם תשובותיכם לסעיפים הקודמים תואמות את עיקרון לה שטליה? אם כן, פרטו כיצד.
8. מהו ערכו של K_c לאחר השינוי במערכת?

כימיה בהקשר אחר - "קרוב" לשיווי משקל בתעשייה...

אמוניה היא חומר גלם בתעשייה הכימית לייצור חומרי דשן, החשובים לחקלאות. את התהליך שהכרתם להפקת אמוניה $NH_{3(g)}$ מחנקן $N_{2(g)}$ וממימן $H_{2(g)}$ גילה המדען היהודי פריץ הבר (Fritz Haber) ב-1908. מקורם של המגיבים הוא מהאוויר ומזיקוק של נפט גולמי. אחת השיטות להעלאת תפוקת האמוניה המתקבלת היא להוציא את התוצר הנוצר (האמוניה) מכלי התגובה ובצורה זו לגרום להגברת הקצב של התגובה הישירה. בתנאי תגובה אלה, המערכת לא מגיעה **לשיווי משקל**, שהרי אז התוצר המבוקש חוזר ומתפרק.

ניסוי 1 - שינוי תנאי התגובה

מהלך הניסוי

נתונות שלוש המערכות הבאות:

א. בקבוק משקה מוגז סגור.

ב. כוס כימית המכילה תערובת של תמיסה המכילה $Fe^{3+}_{(aq)}$ ותמיסה המכילה $SCN^-_{(aq)}$

ג. שני מזרקי זכוכית בנפח 100 מ"ל פקוקים ובהם תערובת של הגזים $NO_{2(g)}$ ו- $N_2O_{4(g)}$.

1. תארו את המערכות. האם הן נמצאות בשיווי משקל? נמקו.
2. לחצו על הבקבוק המוגז. מהי תחושתכם? פתחו את הבקבוק המוגז ולאחר 5 שניות סגרו אותו שוב. לחצו על הבקבוק מייד לאחר הסגירה. מהו השינוי אשר התרחש במערכת בעת הפתיחה?
3. הוסיפו למערכת בגביש $KSCN_{(s)}$. מהו השינוי אשר מתרחש במערכת בעת הוספת החומר?
4. דחפו את הבוכנה של אחד המזרקים במהירות, כך שנפח הגזים בו יקטן. מהו השינוי הנראה במערכת? החזירו את הבוכנה למצב קודם.
5. מישכו את הבוכנה במהירות, כך שנפח הגזים במזרק יגדל. מהו השינוי הנראה במערכת? בטבלה הבאה מופיע סיכום חלקי של הניסוי שביצעתם. השלימו את החסר בטבלה.

	תאור מאקרוסקופי	הסבר מיקרוסקופי	ניסוח התגובה	השינוי שנעשה	התרחשות במערכת ברגע השינוי	התרחשות במערכת לאחר השינוי
א	בתוך הבקבוק מצוי נוזל ומעליו גז.לחיצה על הבקבוק אינה גורמת לשינוי	מולקולות פחמן דו חמצני מומס במים עוברות למצב הגזי ולהיפך.	$CO_{2(aq)} \rightleftarrows CO_{2(g)}$	פתיחת הבקבוק	יציאת גז מהפזה הגזית לחלל הבקבוק	יציאת גז מהתמיסה המימית לחלל הבקבוק - הגברה של התגובה הישירה
ב	[1]		$Fe^{3+}_{(aq)} + SCN^{-}_{(aq)} \rightleftarrows Fe(SCN)^{2+}_{(aq)}$	הוספת $KSCN_{(s)}$		
ג	[2]		$2NO_{2(g)} \rightleftarrows N_2O_{4(g)}$	הקטנת הנפח -הגדלת הלחץ		
ג				הגדלת הנפח- הקטנת הלחץ		

שינוי נפח המערכת

שינוי בנפח של מערכת הנמצאת בשיווי משקל אפשרי אם חל שינוי בנפח הכלי בו נמצאת תערובת הגזים. מכיוון שריכוז חומרים מוגדר כמול ליחידת נפח, **ברגע** השינוי של נפח הכלי משתנים הריכוזים של **כל** החומרים המצויים בו.

שינוי בריכוז המגיבים משפיע על קצב התגובה הישירה ושינוי בריכוז התוצרים משפיע על קצב התגובה ההפוכה. כאשר השינוי בקצב התגובה הישירה שונה מהשינוי בקצב התגובה ההפוכה, מצב שיווי המשקל מופר ותתרחש יותר התגובה שמהירותה גדולה יותר, עד ליצירת מצב שיווי משקל חדש, שבו יהיה שוב **איזון** בין המהירויות. במצב שיווי משקל החדש יתקיימו ריכוזים חדשים של כל המרכיבים, אולם היחס ביניהם יישאר קבוע על פי הביטוי של קבוע שיווי משקל.

פעילות 3 -שלב א

נחזור לדוגמה הקודמת, המתייחסת לתגובה $2SO_{3(g)} \rightleftarrows 2SO_{2(g)} + O_{2(g)}$

לאחר שהמערכת הגיעה לשיווי משקל, שונה נפח הכלי מ-10 ליטר ל- 1 ליטר.

1. האם שינוי זה מהווה הפרעה לשיווי משקל? מדוע?
2. מה יקרה במערכת לאחר השינוי?

1 יוני $Fe(SCN)^{2+}_{(aq)}$ מעניקים גוון אדום לתמיסה ואילו היונים האחרים חסרי צבע.

2 לגז NO_2 גוון חום ואילו הגז N_2O_4 חסר צבע.

חיזוי תוצאות של שינוי נפח על פי השוואת Q ל- K_c

ברגע הקטנת הנפח, ריכוזי כל המרכיבים במערכת גדלים, באותו יחס. הצבת הריכוזים החדשים במנת הריכוזים Q המתייחסת לרגע השינוי תתן ערך גבוה מערכו של K_c. על מנת להגיע לשיווי משקל, ערכו של Q צריך לקטון. כלומר, צריכה להתרחש התגובה ההפוכה, בה ריכוזי התוצרים יקטנו וריכוז המגיב יעלה.

במקרה זה, שינוי הנפח מפר את מצב שווי המשקל

חיזוי תוצאות של שינוי נפח על פי עיקרון לה שטליה

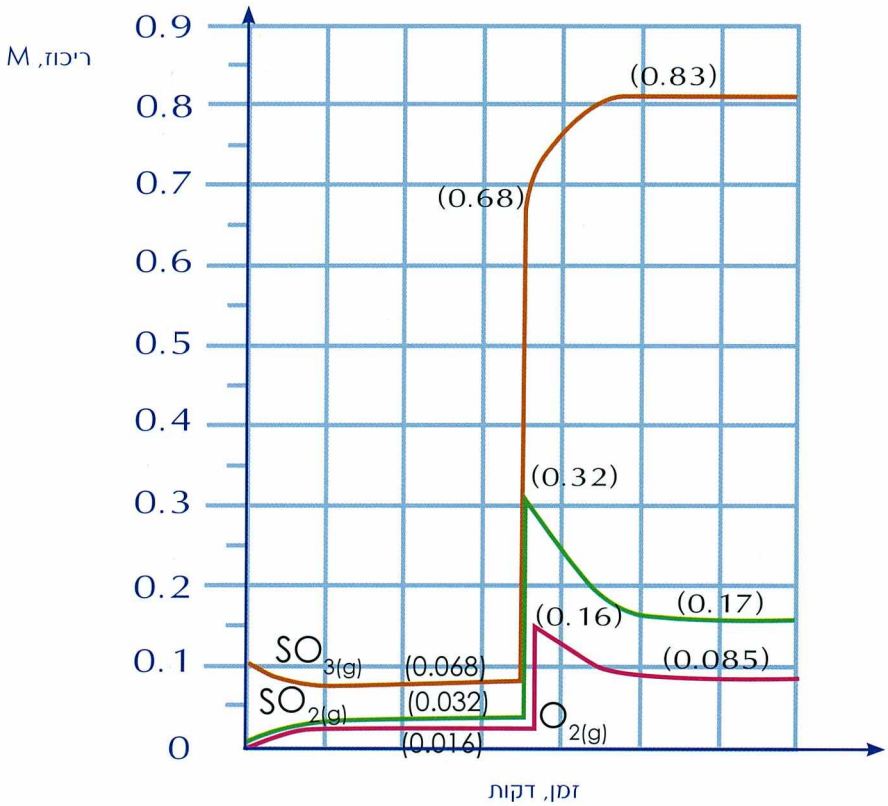
בטמפרטורה קבועה, הקטנת נפח גורמת להגדלת הלחץ על פי משוואת הגזים, כפי שלמדתם בפרקים קודמים.

על פי עיקרון לה שטליה, נוכל לומר כי אם השינוי החיצוני הוא הקטנת הנפח, כלומר הגדלת הלחץ בכלי, תועדף התגובה שגורמת להורדת הלחץ בכלי, כלומר **התגובה ההפוכה** שבה נוצרות שתי מולקולות מגיבים מכל שלוש מולקולות תוצרים. בעקבות כך, מספר החלקיקים בכלי יפחת והלחץ ירד.

פעילות 3 - שלב שני

איור 3 מתאר את ריכוז החומרים במצב שיווי משקל, בעת השינוי בנפח ולאחר מכן.

איור 3 - שינוי ריכוזים בעת שינוי נפח המערכת



1. כיצד רואים, על פי הגרף, כי חל שינוי בנפח הכלי?

2. כיצד ניתן לראות על פי הגרף מהו השינוי בנפח הכלי?

3. כיצד היה נראה הגרף (באופן סכמאטי), לו הקטנת נפח הכלי, הייתה פי שתיים?

האם שינוי נפח משנה תמיד את מצב שיווי משקל?

נדון בתגובה: $A_{(g)} + B_{(g)} \rightleftarrows 2C_{(g)}$

כאשר נפח הכלי בו מתרחשת התגובה קטן פי שתיים, ריכוזי כל החומרים גדלים פי שתים. כאשר נציב במנת הריכוזים Q את הריכוזים החדשים ברגע השינוי, נמצא כי מנת הריכוזים שווה לערכו של K_C.

$$K_c = \frac{[C]^2}{[A][B]}$$

$$Q = \frac{[2C]^2}{[2A][2B]} = \frac{\cancel{4}[C]^2}{\cancel{4}[A][B]} = K_C$$

כלומר במקרה הנ"ל שינוי הנפח לא מהווה הפרעה לשיווי משקל.

כאשר בוחנים את עיקרון לה שטליה למצב הנ"ל, ניתן לומר כי הקטנת הנפח גרמה להגדלת הלחץ בתוך הכלי ויועדף מצב בו הלחץ בכלי ירד. אולם היות ומספר החלקיקים הנוצרים והמגיבים הוא זהה, לא תוטה המערכת לכיוון התגובה הישירה או ההפוכה, ומצב שיווי המשקל יישאר ללא שינוי.

העלאת לחץ שאינה משפיעה על שיווי המשקל

שינוי לחץ שאינו משפיע על מערכת הנמצאת בשיווי משקל, מתרחש כאשר לתוך כלי התגובה מוכנס גז שאינו זהה לאחד ממרכיבי המערכת ואינו מגיב עם אף אחד מהמרכיבים. דוגמה לגז כזה הוא ניאון, שהוא גז אציל. הכנסת הגז לכלי תגרום להעלאת הלחץ, כיוון שיש עוד חלקיקים באותו נפח ומספר ההתנגשויות ביניהם יגדל, אולם הדבר אינו משפיע על ריכוזם של החומרים המשתתפים בתגובה ולכן אין הפרה של האיזון הקיים בין המהירויות. במילים אחרות, שיווי המשקל לא מושפע וערכו של K_C אינו משתנה.

ניסוי 2 - השפעת הטמפרטורה

חומרים וציוד לקבוצות תלמידים או להדגמה

200 גרם סוכר, מים מזוקקים, 2 כוסות, בקבוקים קטנים, זהים של משקה מוגז.

מהלך הניסוי

שלב א

1. הכניסו לכוס אחת 80 מ"ל מי ברז ולכוס שנייה 80 מ"ל מים רותחים.
2. הוסיפו לכל כוס, כפיות סוכר באופן הדרגתי עד אשר נוצר משקע בתחתית הכוס.
3. ערבבו וחזרו על הפעולה עד לקבלת תמיסה רוויה בכל אחת מהכוסות.
4. א. תארו תצפיותיכם.

   ב. השוו בין כמות המשקע הנמצא בכל אחת מהכוסות.

   ג. שערו את הסיבה לשוני בין שתי הכוסות.

שלב ב

בידיכם שני בקבוקי משקה מוגז זהים. האחד, הוחזק במקרר, והשני הוחזק מחוץ למקרר.

1. פיתחו את שני הבקבוקים בו זמנית, והחזיקו את הפקק בידכם למשך 10 שניות. תארו את תצפיותיכם.
2. סיגרו את הפקקים ולחצו על הבקבוקים.
3. לחצו שוב על הבקבוקים לאחר 10 שניות.
4. א. תארו תצפיותיכם.

   ב. השוו בין כמות הגז בתמיסה בכל מקרה.

   ג. שערו את הסיבה לשוני בשני הבקבוקים.

עיבוד תוצאות

סכמו את תוצאות הניסוי בצורת טבלה.

על מנת לדון בהשפעה של שינוי טמפרטורה על מערכת הנמצאת בשיווי משקל, עלינו לדעת האם התגובה הישירה היא אקסותרמית או אנדותרמית. מידע זה נקבל מידיעת סימנו של ΔH°.

לדוגמה: כאשר נתון

$$2SO_{2(g)} + O_{2(g)} \rightleftarrows 2SO_{3(g)} \qquad \Delta H^{\circ} = -197.8kJ$$

ΔH° הנתון לצד תגובות הנמצאות בשיווי משקל, מתייחס תמיד **לתגובה הישירה**.

כיצד תושפע מערכת הנמצאת בשיווי משקל **משינויים בטמפרטורה** של כלי התגובה?

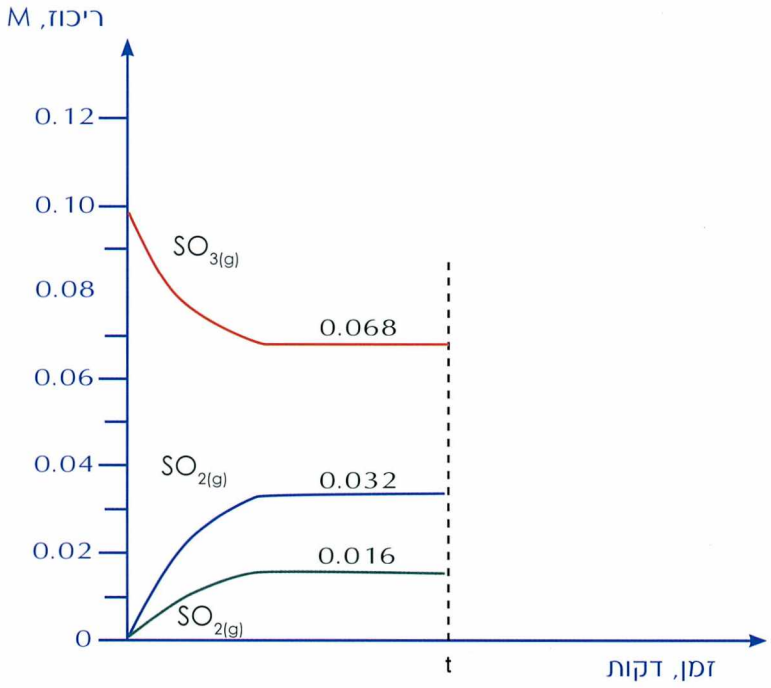
חיזוי תוצאות של שינוי טמפרטורה על פי עיקרון לה-שטליה

קירור, כלומר איבוד אנרגיה מכלי התגובה, יגרום להטיית המערכת לכיוון התגובה האקסותרמית, הפולטת אנרגיה ובכך מקטינה את השינוי החיצוני. במקרה הנ"ל זוהי התגובה הישירה, לכן K_c חדש יהיה גדול יותר. חימום, כלומר הוספת אנרגיה לכלי התגובה, יגרום להטיית המערכת לכיוון התגובה האנדותרמית, אשר תקלוט אנרגיה ובכך תקטין את השינוי החיצוני. במקרה הנתון זוהי התגובה ההפוכה, לכן Kc חדש יהיה קטן יותר.

לסיכום: חימום מערכת הנמצאת בשיווי משקל יגרום להעדפת התגובה האנדותרמית.
קירור מערכת הנמצאת בשיווי משקל יגרום להעדפת התגובה האקסותרמית.

שינוי הטמפרטורה משפיע גם על משך הזמן הלוקח למערכת להגיע לשיווי משקל. חימום מערכת הנמצאת בשיווי משקל יגרום לקיצור משך הזמן עד להגעה לשיווי משקל מחודש, ואילו קירור המערכת יגרום להארכת משך הזמן עד להגעה לשיווי משקל.

פעילות 4



? בזמן t חיממו את כלי התגובה. השלימו את העקומות המתארות את שינויי הריכוז באיור הנ"ל.

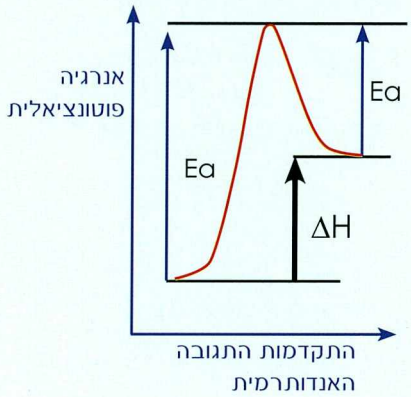
לדעת יותר על השפעת הטמפרטורה על ערכו של K_c על פי קצב התגובה

למדתם בפרק הקודם, כי ככל שאנרגיית השפעול של תגובה גדולה יותר, קצב התגובה מושפע במידה רבה יותר משינוי הטמפרטורה.

במערכת בשיווי משקל, אחת התגובות היא תמיד אקסותרמית ואילו התגובה השנייה היא אנדותרמית.

אנרגיית השפעול של התגובה האנדותרמית גבוהה תמיד מאנרגיית השפעול של התגובה האקסותרמית (ההפוכה לה), כפי שאנו רואים באיור 4.

איור 4 - אנרגיה במהלך התקדמות תגובה



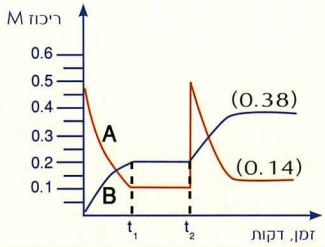
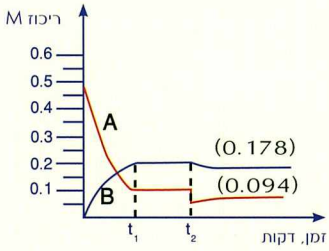
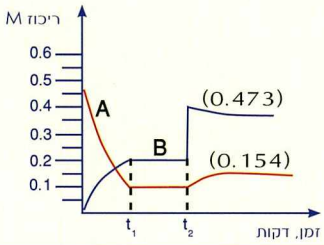
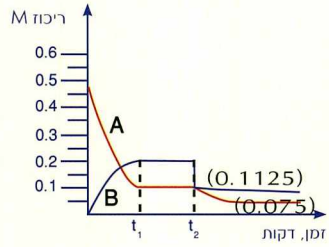
קצב התגובה אשר לה אנרגיית שפעול גדולה יותר, הוא זה התלוי יותר בשינוי הטמפרטורה, ולכן כאשר משתנה הטמפרטורה בכלי, קצב התגובה האנדותרמית משתנה חזק יותר מקצב התגובה האקסותרמית. כתוצאה משינוי זה ישתנה יחס הריכוזים וערכו של קבוע שיווי משקל **ישתנה**.

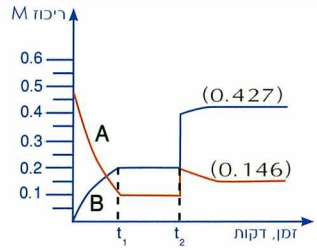
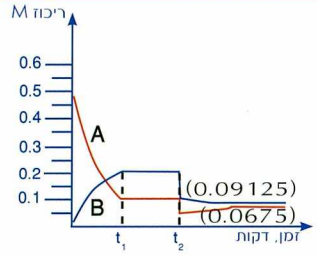
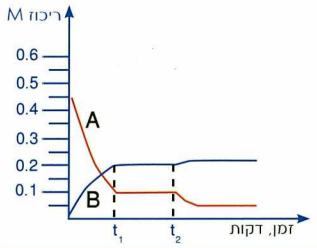
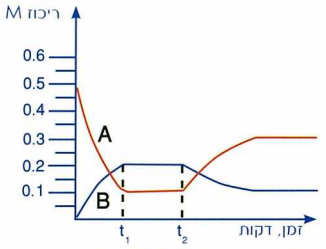
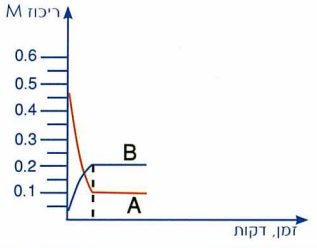
בדוגמה הנתונה, התגובה האנדותרמית היא התגובה ההפוכה ולכן בטמפרטורה גבוהה יותר התגובה ההפוכה תתרחש מהר יותר מהתגובה הישירה ולכן ריכוז המגיבים עולה וריכוז התוצר קטן. במקרה זה, ערכו של K קטן יותר מערך שיווי משקל בטמפרטורה נמוכה יותר.

השפעת זרז על מערכת בשיווי משקל

כפי שלמדתם בפרק הקודם, זרזים הם חומרים המאפשרים התרחשות תגובה במסלול חלופי, בו אנרגיית השפעול נמוכה יותר. הוספת זרז לתערובת חומרים שאינה במצב שיווי משקל תגרום להגדלת הקצב הן של התהליך הישיר והן של התהליך ההפוך באותה מידה. המערכת תגיע מהר יותר למצב שיווי משקל. אולם, הרכב המערכת יהיה זהה להרכבה ללא הוספת זרז ולכן ערכו של קבוע שיווי משקל K_c לא ישתנה.

סיכום: שינוי התנאים במערכת שיווי משקל

סוג השינוי	פירוט שינוי המבוצע בזמן t_2	כיוון ההטיה של המערכת עד למצב שיווי משקל חדש (על פי לה שטליה)	השפעה על ערכו של Kc	ביטוי גרפי לשינוי הגרפים מתייחסים לתגובה: $2A_{(g)} \rightleftarrows B_{(g)}$ $\Delta H^{o}>0$
שינוי ריכוז אחד ממרכיבי המערכת בטמפרטורה קבועה	העלאת ריכוז מגיבים	תגובה ישירה (להורדת ריכוז מגיבים)	אין השפעה	
	הקטנת ריכוז מגיבים	תגובה הפוכה (להעלאת ריכוז מגיבים)	אין השפעה	
	הגדלת ריכוז תוצרים	תגובה הפוכה (להורדת ריכוז תוצרים)	אין השפעה	
	הקטנת ריכוז תוצר	תגובה ישירה (להעלאת ריכוז תוצרים)	אין השפעה	

סוג השינוי	פירוט שינוי המבוצע בזמן t_2	כיוון ההטיה של המערכת עד למצב שיווי משקל חדש (על פי לה שטליה)	השפעה על ערכו של Kc	ביטוי גרפי לשינוי הגרפים מתייחסים לתגובה: $2A_{(g)} \rightleftarrows B_{(g)}$ $\Delta H^{o}>0$
שינוי נפח כלי התגובה בטמפרטורה קבועה	הקטנת הנפח גורמת להגדלת הלחץ בכלי	התגובה בה ייוצרו פחות חלקיקים (להורדת הלחץ)	אין השפעה	
	הגדלת הנפח גורמת להקטנת הלחץ בכלי	התגובה בה ייוצרו יותר חלקיקים (להגדלת הלחץ)	אין השפעה	
	הקטנה או הגדלה של נפח המשנה לחץ בהתאם	כאשר מספר המולים שווה במגיבים ובתוצרים אין הטייה	אין השפעה	
שינוי טמפרטורה	העלאת הטמפרטורה	התגובה האנדותרמית, המערכת תגיע לשיווי משקל חדש מהר יותר	K_c משתנה	
	הורדת הטמפרטורה	התגובה האקסותרמית, המערכת תגיע לשיווי משקל חדש לאט יותר	K_c משתנה	
הוספת זרז	עד להגעה לשיווי משקל	אין הטייה של תגובה מסוימת. המערכת תגיעה לשיווי משקל מהר יותר	אין השפעה	

שאלות בנושא שיווי משקל

1. נתונה התגובה: $N_2O_{4(g)} \rightleftarrows 2NO_{2(g)}$ $\Delta H^o = 57.2kJ$

א. מה יגרם לעליה בריכוז $NO_{2(g)}$ במערכת, חימום או קירור? נמקו

ב. בטמפרטורה של, 25°C $K_C = 4.61 \times 10^{-3}$ האם כאשר נעלה את טמפרטורת הכלי, ערכו של K_C יגדל, יקטן או לא ישתנה? נמקו.

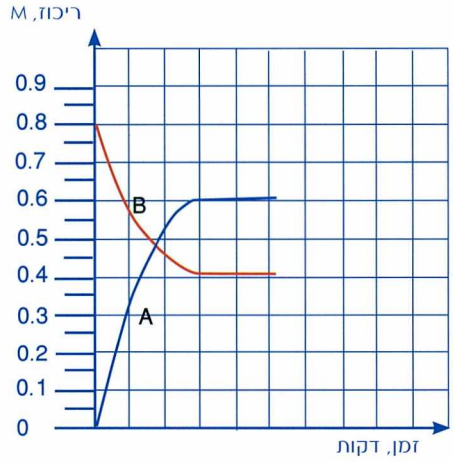
2. נתונה התגובה $N_{2(g)} + 2O_{2(g)} \rightleftarrows 2NO_{2(g)}$ בטמפרטורה של 25°C $K_C = 4.7 \times 10^{-17}$

בטמפרטורה של 1527°C. $K_C = 1.3 \times 10^{-4}$

א. מהי התגובה (הישירה או ההפוכה) אשר הועדפה בחימום?

ב. מהו סימנו של ΔH^o לתגובה הנ"ל?

3. הגרף הבא מתאר את השתנות הריכוזים של שני חומרים A ו-B הנמצאים בכלי סגור.

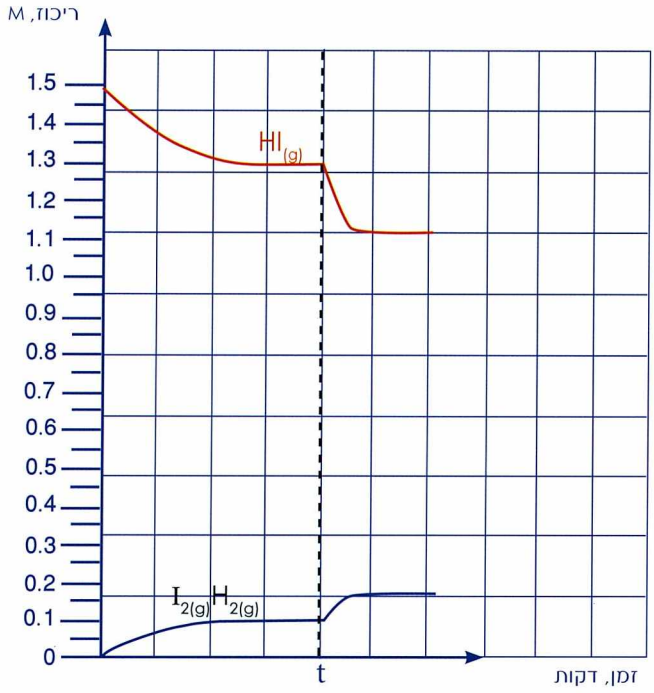


א. נסחו את התגובה המתרחשת בכלי.

ב. על פי הנתונים בגרף, מהו K_c שיווי משקל לתגובה שניסחתם?

ג. כיצד ייראה בגרף שינוי הריכוזים של A ו- B ברגע הקטנת נפח הכלי פי 2 ולאחריו?

4. לתוך כלי שנפחו 1 ליטר, הנמצא בטמפרטורה של 227°C הוכנס 1.5 מול מימן יודי גזי $HI_{(g)}$.
הגרף הבא מתאר את שינוי הריכוזים של המרכיבים עד למצב שיווי משקל.
לאחר שהמערכת הגיעה לשיווי משקל,בזמן t שונה אחד התנאים וכתוצאה מכך השתנו ריכוזי החומרים, כפי שמתואר בגרף.



א. מה התרחש במערכת עד לזמן t? ענו ברמה מאקרוסקופית ומיקרוסקופית
ב. חשבו את ערכו של K_c. בטמפרטורה של 227°C לתגובה: $2HI_{(g)} \rightleftarrows H_{2(g)} + I_{2(g)}$
ג. מהו השינוי במערכת אשר התרחש בזמן t?
ד. מהו סימנו של ΔH° לתגובה הנ"ל?

5. לתוך כלי הנמצא בטמפרטורה של 200°C שנפחו 1 ליטר הוכנס 1 מול $N_2O_{4(g)}$. התרחשה התגובה
$N_2O_{4(g)} \rightleftarrows 2NO_{2(g)}$
נתון כי במצב שיווי משקל ריכוז $N_2O_{4(g)}$ הוא 0.1M ואילו ריכוז $NO_{2(g)}$ הוא 1.8M .
א. שרטט גרף המתאר את שינויי הריכוזים עד למצב שיווי משקל.
ב. התייחסו להיגדים הבאים וציינו אם הם נכונים או לא. נמקו בכל מקרה:
1. בעת הקטנת נפח הכלי פי 2 ריכוזי החומרים גלדים פי שתים
2. לאחר הקטנת נפח הכלי ריכוזו של $NO_{2(g)}$ קטן וערכו של K_c קטן אף הוא
3. במצב שיווי משקל מהירות הפירוק של $N_2O_{4(g)}$ גדולה ממהירות ההיווצרות של $NO_{2(g)}$
4. לאחר חימום הכלי מהירות התנועה של מולקולות NO_2 גדולה ממהירות תנועת מולקולות N_2O_4.

שאלות לסיום פרק ג ו-ד

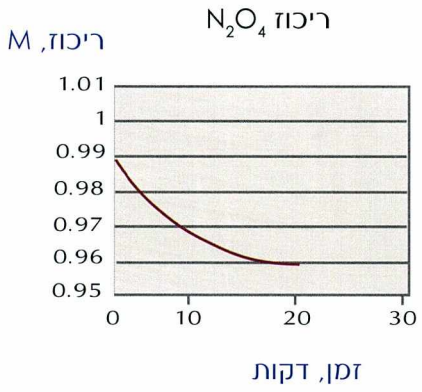
שאלה 1

לתוך כלי שנפחו 1 ליטר, הוכנס 1 מול גז חסר צבע, $N_2O_{4(g)}$. בתנאים מסוימים, הגז מתפרק ונוצר $NO_{2(g)}$, שהוא חומר בעל גוון חום.

א. 1. רשמו ביטוי המגדיר את קצב התגובה הנ"ל.

2. הציעו שתי דרכים אשר מאפשרות מעקב אחרי קצב התגובה הנ"ל.

הגרף שלפניכם מתאר השתנות ריכוז חומר לאורך זמן.



ב. 1. איך מיוצג בגרף מצב שיווי משקל? הסבירו את המשמעות.

2. תארו את המתרחש בכלי במצב שיווי משקל ברמות השונות: מאקרו, מיקרו וסמל.

3. רשמו ביטוי לקבוע שיווי משקל, K_C וחשבו את ערכו.

בדקה ה-20 הכניסו לתוך הכלי כמות נוספת של $N_2O_{4(g)}$.

ג. האם וכיצד משפיע שינוי זה על:

1. קצב הפירוק של $N_2O_{4(g)}$?

2. מצב שיווי משקל ?

3. ריכוזו של $NO_{2(g)}$?

4. ערכו של קבוע שיווי משקל.

ד. 1. האם בעזרת עיקרון לה שטליה, תוכלו לחזות את השפעת הקטנת נפח הכלי על ריכוז התוצר? אם כן, כתבו כיצד ישפיע השינוי. אם לא נמקו מדוע.

2. האם בעזרת עיקרון לה שטליה, תוכלו לחזות את השפעת חימום הכלי על ערכו של הקבוע? אם כן, כתבו כיצד ישפיע השינוי. אם לא, נמקו מדוע.

שאלה 2

נתונה התגובה $4NH_{3(g)} + 5O_{2(g)} \rightleftarrows 4NO_{(g)} + 6H_2O_{(g)}$ $\Delta H^{\circ}>0$

בכל שורה בטבלה הבאה מצוין שינוי שנערך בכלי התגובה. קבעו את השפעת השינוי על הגודל הנבחן בעמודה השנייה על ידי סימון התוצאה: גדל/קטן/ללא שינוי . התייחסו לתוצאה ברגע השינוי ולאחריו. רשמו הסבר קצר לכל תשובה. כל שינוי מתרחש בנפרד. בטבלה יש תשובה לשינויים 1+2 .

	שינוי	הגודל הנבחן	ברגע השינוי-בשורה ראשונה ולאחריו-בשורה השנייה		
			גדל	קטן	לא משתנה
1	הקטנת הנפח	ריכוז החמצן *	+		
			+		
2	הקטנת הנפח	קבוע שיווי משקל	מנת הריכוזים גדלה		
					+
3	הגדלת נפח	ריכוז NO*			
4	חימום הכלי	K_c			
5	הוספת חמצן	K_c			
6	הוספת NO	ריכוז החמצן*			
7	הוספת HCl	ריכוז החמצן*			
8	קירור הכלי	ריכוז האמוניה			
9	הוספת זרז	K_c			
10	הוספת גז אציל Ne	ריכוז החמצן			

* התייחסו בנפרד לשני מצבים: למצב שברגע השינוי - בשורה ראשונה

למצב ש"מ שיושג לאחר השינוי - בשורה שנייה

הסברים

1+2 הקטנת הנפח גורמת להגדלת הלחץ בכלי. על פי עיקרון לה שטליה, תהיה הטייה לתגובה אשר תגרום להקטנת הלחץ. זו תהיה התגובה שבה נוצרים פחות חלקיקים. על פי הניסוח ניתן לראות, כי זו התגובה ההפוכה. לפיכך, ריכוז החמצן יגדל אולם ערכו של קבוע שיווי משקל לא ישתנה.

פרק ה

מדוע מתרחשות תגובות כימיות?

- מדוע מתרחשות תגובות כימיות?
- כיצד מתקיימות תגובות הפוכות בו זמנית?
- מהו החוק השני של התרמודינמיקה?
- מהם תהליכים צמודים?

על שאלות אלו ועל שאלות רבות אחרות תוכל לענות לאחר לימוד הפרק החמישי

מבוא

בפרקים הקודמים של מבנית זו למדתם על היבטים שונים של תגובות כימיות. הכרתם את ההיבטים האנרגטיים, הקובעים אם תגובות כימיות הן אקסותרמיות או אנדותרמיות ואת ההיבטים הקינטיים המבהירים מהן תגובות איטיות או מהירות. למדתם שיש תגובות המגיעות לשיווי משקל לעומת אחרות אשר מתרחשות עד תום, כלומר עד שכל המגיבים הופכים לתוצרים, כגון בשרפת דלק.

עדיין נותרו שאלות רבות פתוחות.

- מדוע, באותם תנאים, מתרחשות תגובות כימיות מסוימות ואחרות אינן מתרחשות?
- כיצד יתכן ששתי תגובות הפוכות זו לזו מתרחשות בו זמנית?
- האם ניתן לחזות את קיומה של תגובה מסוימת?

בפרק זה נבהיר מושגים ועקרונות חשובים אשר יתנו מענה לשאלות הנ"ל.

ספונטניות

אפשר להבחין כי יש שינויים המתרחשים "מעצמם" ואילו שינויים אחרים אינם מתרחשים כלל. לדוגמה, כדור הנמצא בראש גבעה יתגלגל במורד "מעצמו", ואילו כדור שנמצא בתחתית הגבעה לא ינוע לראש הגבעה, אלא אם יופעל כוח להעלותו. קפיץ מתוח בצעצוע, יגרום להפעלתו עד אשר יהפוך לרפוי, אולם הוא לא יחזור ויימתח "מעצמו". גוף בטמפרטורה גבוהה (כמו סיר בתום הבישול) יתקרר לטמפרטורת החדר, ואילו הטמפרטורה של סיר המצוי בטמפרטורת החדר לא תעלה "מעצמה".

תגובה ספונטנית היא תגובה שיש לה יכולת להתרחש. תגובה ספונטנית תתחיל להתרחש כאשר תושקע אנרגיית שפעול מתאימה, ולאחר שתתחיל - התגובה תמשיך מעצמה.

החלדת הברזל (תגובה בין הברזל לחמצן) היא דוגמה לתגובה ספונטנית, המתרחשת בטמפרטורות שכיחות ללא השקעת אנרגיה נוספת. דוגמה נוספת לתגובה ספונטנית הינה שריפה של קוצים בשדה, או של יערות בקיץ. בתנאי יובש, שריפות כאלה עשויות להימשך ימים ועלולות להתפשט על פני שטחים רחבים, למרות שכל שריפה מתחילה מגורם חיצוני (טבעי או אנושי), כגון ברק או גפרור בוער, אשר מעניק לתגובה אנרגיית שפעול התחלתית.

לסיכום, תגובה ספונטנית היא תגובה שיש לה יכולת להתרחש וכן תגובה אשר מרגע שהתחילה, היא תמשיך להתרחש ללא שום התערבות חיצונית.

תגובה שאינה ספונטנית לא תתרחש אלא אם תהיה התערבות חיצונית ***מתמדת***.

1. לפניכם רשימה של תהליכים שונים. קראו את הרשימה ומיינו לתהליכים ספונטניים ולא ספונטניים.
   א. התייבשות של שלולית מים בקיץ.
   ב. קיפאון מים בתוך המקפיא.
   ג. דבש הנשפך מצנצנת הפוכה.
   ד. שריפת מתכת מגנזיום.

ה. קירור האוויר בחדר במהלך הקיץ.

ו. בעירת זיקוקים (היזכרו בניסוי 1 בפרק א)

ז. השחרת כלי כסף.

ח. מתיחת גומייה

2. תארו תהליכים ההפוכים לאלו הרשומים לעיל ומיינו אותם לתהליכים ספונטנים ולא ספונטנים.
מהו הקשר בין תשובתכם לשאלה זו לבין תשובתכם לשאלה 1?

3. הוסיפו 2 דוגמאות משלכם לתהליכים ספונטניים.

נוכל להסיק מהתרגיל הנ"ל כי אם תהליך מסוים הוא ספונטני הרי שבאותם תנאים התהליך ההפוך אינו ספונטני וההיפך. אם תהליך מסוים אינו ספונטני התהליך ההפוך באותם התנאים, הוא ספונטני.

ספונטניות בהקשר אחר - וספונטניות בכימיה

משתמשים במילה "ספונטני" הן בשפת היום-יום והן בכימיה, אך במשמעויות מעט שונות.
בשפת יום-יום, פירוש המילה ספונטניות הוא די רחב: התרחשות המתחילה מעצמה, או ללא הכנה ומחשבה מוקדמת. למשל, התפרצות ספונטנית של צחוק; החלטה ספונטנית להזמין חברים.
לעומת זאת, בכימיה המושג "ספונטניות" מוגדר **כיכולת** של תגובה להתרחש ללא קשר לדרך התחלתה. ספונטניות של תגובה נובעת משיקולי אנרגיה, וכימאים יודעים לחשב אם תגובה עשויה להיות ספונטנית בטמפרטורה נתונה.
לדוגמה, משיקולי אנרגיה נמצא כי חמצון של יהלומים והפיכתם לפחמן דו חמצני, היא תגובה ספונטנית. כלומר, לתגובה זו יש יכולת להתרחש. אולם, התגובה תתחיל רק בטמפרטורה גבוהה ביותר (ואז היא תמשיך ללא השקעת אנרגיה נוספת). היות ויהלומים (בדרך כלל) לא מגיעים לטמפרטורות גבוהות, הם אינם נשרפים.

האם תגובות ותהליכים ספונטניים הם בהכרח תהליכים אקסותרמים?

כאשר בוחנים את השינויים המתרחשים בכדור שמתגלגל במורד, או בקפיץ מתוח אשר משתחרר, נוכל לומר כי האנרגיה הפוטנציאלית שלהם הולכת וקטנה כלומר תוך כדי השינוי הספונטני משתחררת אנרגיה אל הסביבה. הנכם מכירים תגובות ספונטניות רבות שהן תגובות אקסותרמיות לדוגמה, תגובות שריפה שונות.

שני מדענים, כימאי דני בשם ג'וליוס תומסן, (1854) Julius Thomsen וכימאי צרפתי בשם מרסלין ברטלוט, (1864) Marcellin Berthelot, התבססו על כך שתגובות אקסותרמיות רבות הן ספונטניות וקבעו כי: תגובה היא ספונטנית אם היא אקסותרמית.

אולם, בניגוד לקביעה זו, התברר כי קיימות תגובות ספונטניות רבות שאינן אקסותרמיות או שבעת התרחשותן לא מתקיים כל שינוי באנתלפיה. להלן כמה דוגמאות:

1. בפתיחת בקבוק בושם במקום מסוים בחדר, יתנדף הנוזל ויתפזר ברחבי החדר באופן ספונטני כפי שנחוש בעזרת חוש הריח, (תהליך האידוי - אנדותרמי).
2. המראת יוד בטמפרטורת החדר היא תהליך ספונטני - אנדותרמי.
3. מעבר גז מכלי סגור אחד לכלי שני הוא מעבר ספונטני - ללא שינויים באנתלפיה.
4. תהליכי המסה של חומרים יונים רבים במים הם ספונטניים. חלקם אמנם אקסותרמיים (כגון המסת נתרן הידרוכסידי NaOH), אך חלקם אנדותרמיים (כגון המסת ליתיום כלורי).

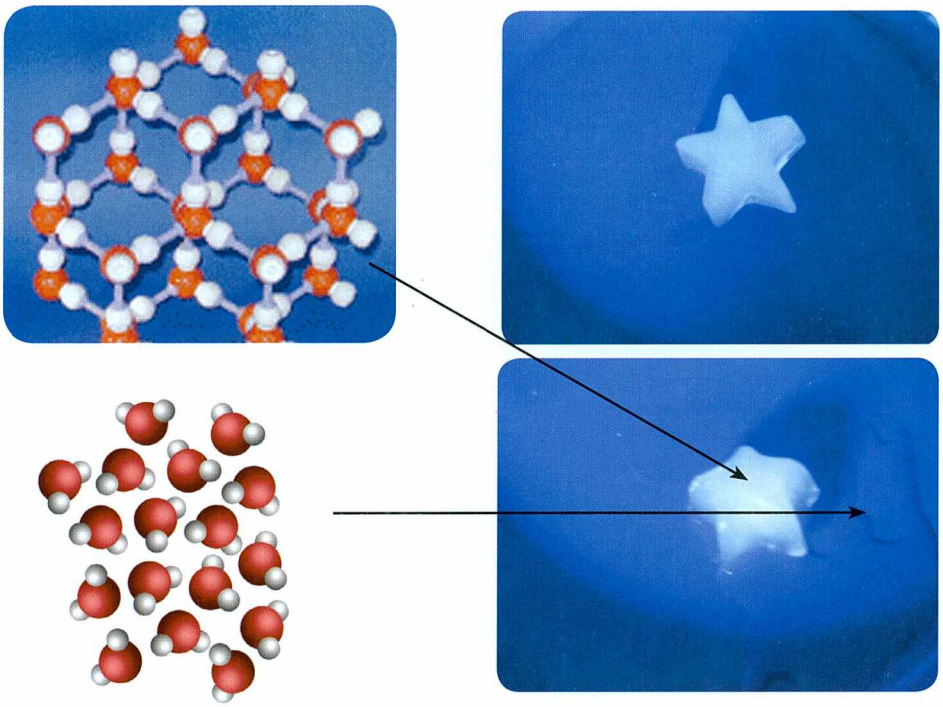
לפיכך, נוצר הצורך בחיפוש הסבר נוסף לספונטניות של תגובות, מלבד הירידה באנתלפיה.

אנטרופיה ומשמעותה

נבחן כמה תגובות ספונטניות תוך התמקדות בהיבטים המיקרוסקופיים. לפניכם צילומים של תופעות הנראות לעינינו והמתארות מערכות מאקרוסקופיות. לכל מערכת מאקרוסקופית כזו, יש מספר גדול ביותר של מצבים מיקרוסקופיים המתאימים לה. האיורים ותמונות המודלים להלן, מציגים בצורה חלקית (ומוגבלת) תיאור מיקרוסקופי **אחד** רגעי, עבור כל מערכת.

הייצוג המיקרוסקופי מראה אפשרות אחת של פיזור החלקיקים בכלי, אך אינו יכול להראות את אופני התנועה השונים של החלקיקים ואת העובדה שהחלקיקים נעים כל הזמן במהירויות שונות ובכיוונים שונים המשתנים אף הם מרגע לרגע.

1. התכת קרח

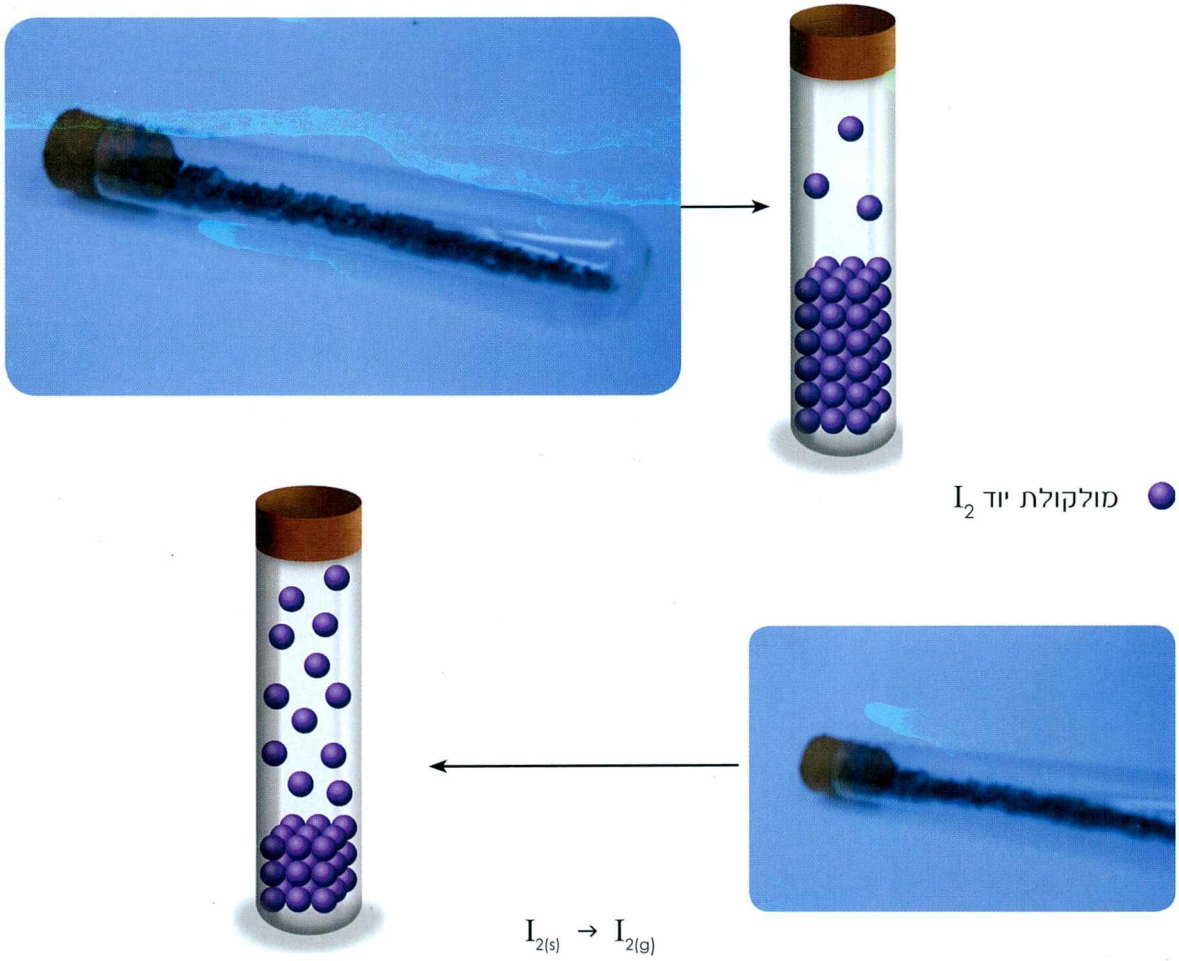


$H_2O_{(s)} \rightarrow H_2O_{(l)}$

התמונות הנ"ל מתארות היתוך של גוש קרח (בצורת כוכב) בטמפרטורת החדר. הצילומים מציגים את התופעה באופן מאקרוסקופי, כפי שאנו רואים אותה. תמונות המודלים מציגים אפשרות אחת של תאור

מיקרוסקופי של המערכת במצב מוצק, ואפשרות אחת של תאור מיקרוסקופי במצב נוזל. אנו רואים, כי חל שינוי בהיערכות החלקיקים: ממצב בו ההיערכות של המולקולות בקרח (מוצק) היא מסודרת ואופני התנועה מצומצמים לתנודה בלבד (לא ניתן לראות, רק לתאר!), מתקבל מצב בו לחלקיקים יש יכולת תנועה רבה יותר, הבאה לידי ביטוי בריבוי אופני התנועה, הן בצורת תנודה, סיבוב ואפילו מעתק. המרחק בין החלקיקים גדול יותר[1] והם פחות מסודרים מאשר במוצק. האנרגיה הפנימית של המערכת גדלה, בעקבות קליטת אנרגיה מהסביבה. לכן נאמר שגם פיזור האנרגיה גדל, כיון שכעת ייתכן מספר גדול יותר של תיאורים מיקרוסקופיים של המערכת.

2. המראת יוד

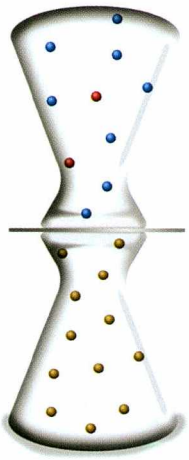


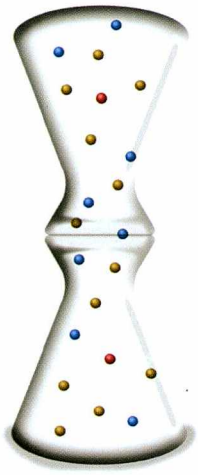
המצב המאקרוסקופי ההתחלתי של המערכת כולל יוד מוצק ומעט גז כפי שמופיע בתמונה העליונה. מצב זה מאופיין במספר רב של אפשרויות תיאור מיקרוסקופי שבעזרתן ניתן לתאר את מצבם של חלקיקי המוצק כמסודרים וכבעלי אופני תנועה של תנודה בלבד, ואת חלקיקי הגז המפוזרים בכלי כבעלי אופני תנועה רבים יותר ואפשרויות רבות של פיזור בכלי. האיורים הנ"ל מייצגים אפשרות אחת מבין

1 במים הדבר מתרחש מעל לטמפרטורה של 4°C

האפשרויות הרבות. במצב ההתחלתי, כמות הגז במבחנה הייתה מועטה. עקב חימום קל הבחנו בהתכהות הצבע הסגול, כלומר גדלה כמות הגז. האנרגיה הפנימית של המערכת גדלה ויחד איתה גדל גם פיזור האנרגיה במערכת, מכיוון שעכשיו יותר חלקיקים יכולים לנוע באופני תנועה רבים יותר (תנודה, סיבוב ואף מעתק) מאשר במצב ההתחלתי. כמו כן, מספר האפשרויות בהן חלקיקים אלו יכולים להימצא גדל בהרבה. כלומר, כאשר היוד הופך ממוצק לגז עולה מאוד מספר האפשרויות לתיאור המערכת מבחינה מיקרוסקופית במקביל לפיזור האנרגיה במערכת.

3. התפשטות של הגז חנקן דו חמצני לכלי שני המכיל אוויר

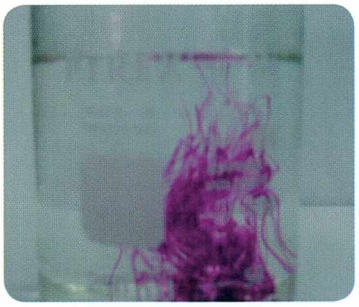




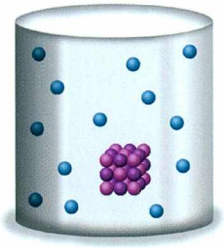
הגזים אשר היו בשני הכלים הנפרדים התערבבו באופן ספונטני, כך שכעת הם תופסים את נפח שני הכלים והיערכותם שונה. מה השתנה תוך כדי התפשטות הגז? בחינת הטמפרטורה מאפשרת לקבוע, כי האנרגיה הפנימית של הגז לא השתנתה, אולם ניתן לומר כי פיזור האנרגיה במערכת השתנה. פיזור הגזים בשני הכלים גרם לכך, שכעת לכל חלקיק יש אפשרויות רבות יותר למיקום שונה. אם היינו יכולים לתאר את המערכת מבחינה מיקרוסקופית בצורה מדויקת, היינו מגיעים למסקנה כי כאשר החלקיקים מצויים בשני הכלים יש להם אפשרויות רבות יותר לסידור ולתנועה מאשר בתחילת הניסוי, בעקבות הגדלת מספר המצבים המיקרוסקופיים האפשריים.

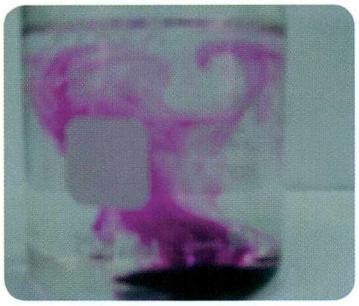
4. המסת חומר יוני

תהליך ההמסה של החומר אשלגן על מנגנתי $KMnO_{4(s)}$ במים מזוקקים הוא ספונטני. התהליך הוא מהיר ואנדותרמי. המספרים מצד שמאל לתמונות מציינים את שעת הצילום. האיורים בצד השמאלי של העמוד מייצגים תיאור מיקרוסקופי יחיד (חלקי, ללא תנועה!) מבין סך כל המצבים המיקרוסקופיים האפשריים.

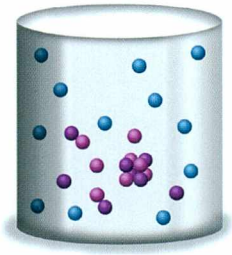


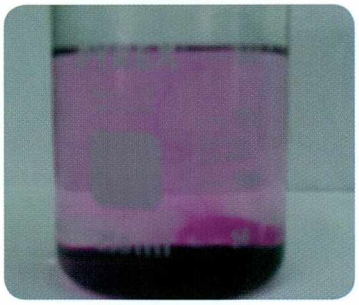
08.24



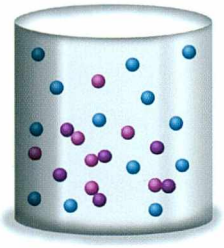


08.24

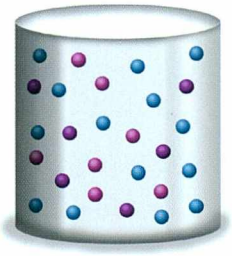




08.25



08.30



09.50

מולקולות של H_2O

יונים של K^+, MnO_4^-

במוצק ובתמיסה

$$KMnO_{4(s)} \xrightarrow{H_2O} K^+_{(aq)} + MnO^-_{4(aq)}$$

פסק זמן לחשיבה

1. האם חלים שינויים בפיזור החלקיקים במהלך ההמסה ?אם כן, אילו?
2. האם חלים שינויים בתיאור המצבים המיקרוסקופיים האפשריים במהלך ההמסה? אם כן, אילו? חשבו על אופני התנועה בכל מצב.

נוכל להסיק מניתוח התופעות הנ"ל, כי לכל מערכת יש מספר רב של תיאורי מצב מיקרוסקופיים, המתייחסים הן למיקומם והן לאנרגיה השונה של החלקיקים במערכת. ככל ש**מספר תיאורי המצב המיקרוסקופים רב** יותר, יש במערכת **פיזור אנרגיה גדול** יותר.
מדענים מגדירים במושג אנטרופיה, את פיזור האנרגיה הקיים בחומר. לכן, אנטרופיה היא תכונה של חומר. סימונה של האנטרופיה הוא S (מקור המילה מיוונית, טרפאין -שינוי).
אנטרופיה של חומר גדולה יותר ככל שרב יותר מספר התיאורים המיקרוסקופיים האפשריים של חלקיקי החומר.

אנטרופיה S, היא מדד לפיזור האנרגיה בחומר, הבא לידי ביטוי במספר התיאורים המיקרוסקופיים האפשריים.

במהלך היחידה למדתם על השינוי המתרחש באנרגיה הפנימית של המגיבים והתוצרים (ΔH°). ככימאים, אנו רוצים לדעת גם מהו השינוי בתכונה עליה למדנו עתה. כלומר, מהו השינוי באנטרופיה המתלווה לתגובה כימית. השינוי באנטרופיה נובע משינוי במספר התיאורים המיקרוסקופיים האפשריים במערכת בסופה של התגובה לעומת התחלתה.
השינוי באנטרופיה של תגובה מוגדר כהפרש בין האנטרופיה של התוצרים לבין האנטרופיה של המגיבים:

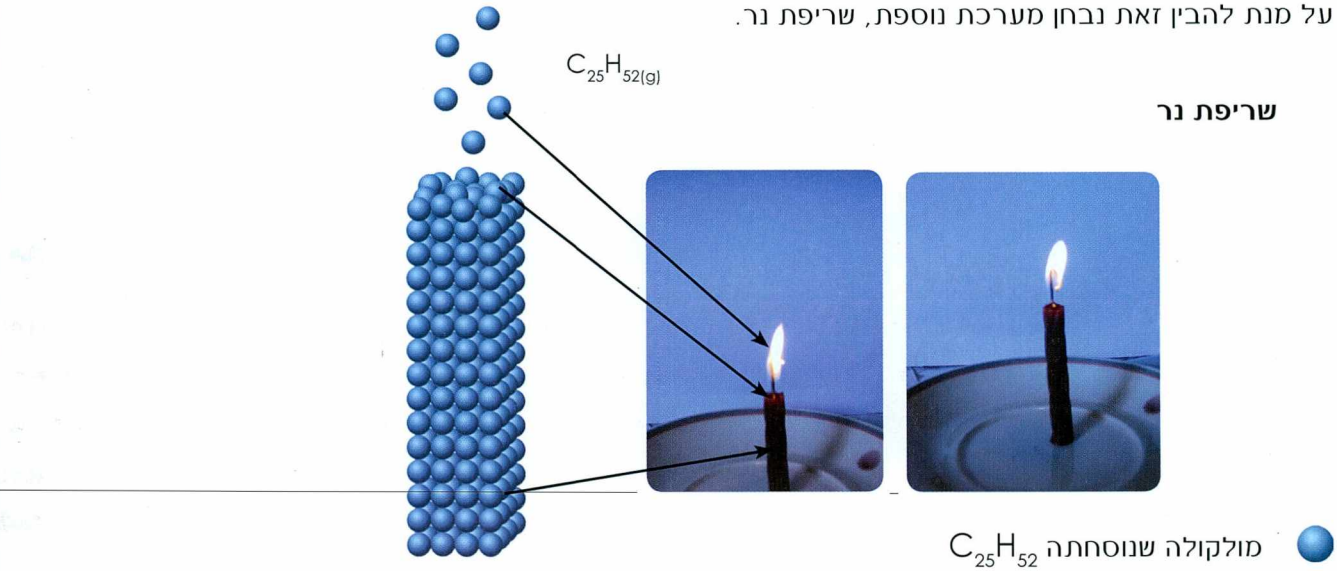
$$\Delta S_{\text{מערכת}} = S_{\text{תוצרים}} - S_{\text{מגיבים}}$$

לתהליכים הבאים יש מאפיין משותף והוא השינוי באנטרופיה של המערכת $\Delta S_{\text{מערכת}}$ גדול מאפס. כלומר, במהלך התגובה עולה האנטרופה, כי נוצרים חומרים אשר האנטרופיה שלהם גדולה מזו של המגיבים:

1. כאשר נוזלים נוצרים ממוצקים (תהליכי היתוך של חומרים טהורים).
2. כאשר תמיסות נוזליות נוצרות ממוצקים (תהליכי המסה).
3. כאשר גזים נוצרים ממוצקים או מנוזלים (תהליכי אידוי או המראה).
4. כאשר מתרחשת תגובה כימית בה נוצרים חומרים גזיים רבים יותר מאשר היו במגיבים.
5. כאשר עולה הטמפרטורה של חומר.

בכל המקרים הנ"ל נוכל לומר, כי **עלה** מספר התיאורים המיקרוסקופיים בהם ניתן לתאר את המערכת לאחר התגובה.

התהליכים 1 - 5 הם ספונטניים וראינו כי בעת התרחשותם גדלה האנטרופיה של המערכת.
התהליכים הנ"ל היו אנדותרמיים או ללא שינוי באנתלפיית התגובה. ניתן להסיק כי מה שמאפשר את ההתרחשות הספונטנית של תגובה אנדותרמית היא העלייה באנטרופיית המערכת.
ומה לגבי תגובות שהן אקסותרמיות? האם הגדלת האנטרופיה מהווה גורם גם להתרחשותן של תגובות אקסותרמיות?
כפי שלמדתם בפרק א, ניתן לבחון תגובה תוך התמקדות בתהליך עצמו תוך הגדרת "מערכת" באופן שרירותי, כאשר כל מה שמחוץ למוקד התעניינותנו יוגדר כ"סביבה". סה"כ המערכת והסביבה מהווים את היקום.
בדיוננו עד כה, בחנו את שינויי האנטרופיה המתרחשים במערכת בלבד במהלך תגובות כימיות.
מה קורה כאשר מכלילים את הדיון גם לסביבה?
על מנת להבין זאת נבחן מערכת נוספת, שריפת נר.



התמונות, האיורים והנוסחאות מתארים את תהליך שריפתו של נר. מרגע שהנר החל לדלוק מתרחשת תגובת השריפה של שעוות הנר, אשר אחד ממרכיביה הוא $C_{25}H_{52(s)}$
ניסוח תגובת השריפה:

$$C_{25}H_{52(s)} + 38O_{2(g)} \rightarrow 25CO_{2(g)} + 26H_2O_{(g)}$$

תגובה זו היא אקסותרמית (טמפרטורת הסביבה עולה).

כאשר בוחנים את שינוי האנטרופיה במערכת זו, יכולים לומר כי היא גדלה, כיוון שנוצרו חומרים במצב צבירה גזי ובהם חלקיקים בעלי אופני תנועה רבים יותר מאשר היו במגיבים. לכן, פיזור האנרגיה במערכת גדל ואיתו גדלו גם מספר התיאורים המיקרוסקופיים האפשריים.
כמו כן, ידוע כי התגובה היא אקסותרמית - נפלטה אנרגיה לסביבה, לאוויר. כתוצאה מכך, המולקולות המצויות באוויר ואשר קלטו אנרגיה זו, נעו מהר יותר. האנרגיה הקינטית הממוצעת שלהן גדלה:

הטמפרטורה עלתה ויחד עם זאת עלתה גם האנטרופיה של האוויר, כיון שיש כעת יותר אפשרויות לתיאור החלקיקים בסביבה מאשר לפני בעירת הנר.

ניתן לקבוע, כי בתגובה ספונטנית זו, שריפת הנר, האנטרופיה של היקום עלתה כי **גם** האנטרופיה של המערכת **וגם** האנטרופיה של הסביבה גדלו.

אם ידוע, על פי הגדרה, כי: מערכת + סביבה = יקום

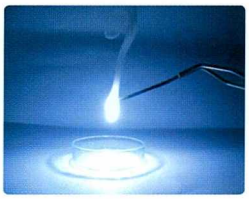
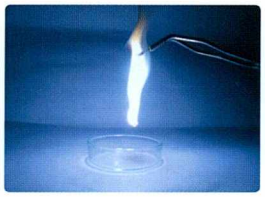
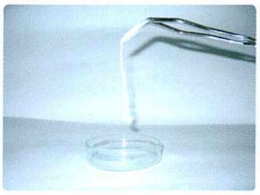
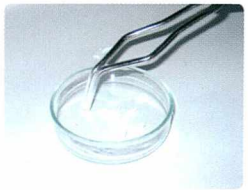
נוכל לכתוב:

השינוי באנטרופיה של מערכת + השינוי באנטרופיה של סביבה = השינוי באנטרופיה של היקום

$$\Delta S_{\text{יקום}} = \Delta S_{\text{סביבה}} + \Delta S_{\text{מערכת}}$$

נוכל לקשור בין התרחשותה של תגובה ספונטנית לבין עלייה באנטרופיה הכוללת, של מערכת וסביבה ביחד.

נבחן מקרה נוסף - שריפת מגנזיום

בתגובה זו מתרחשת שריפה ספונטנית של מגנזיום (להזכירכם, תגובה ספונטנית מוגדרת כתגובה אשר מרגע התחלתה ממשיכה להתרחש ללא מעורבות חיצונית). בעת ההתרחשות של תהליך זה, נוצר מגנזיום חמצני ממגנזיום וחמצן. המגנזיום החמצני הוא מוצק יוני בו אופני התנועה של החלקיקים מצומצמים מאוד לעומת המגנזיום המתכתי, ובמיוחד לעומת החמצן הגזי בו למולקולות יש אופני תנועה רבים, כלומר אנטרופיה גבוהה. ניתן לומר, כי בתהליך זה חלה ירידה באנטרופיה של המערכת. ממגיבים בעלי אנטרופיה גבוהה, מתקבל תוצר בעל אטרופיה נמוכה יחסית. אולם, אם נבחן את המתרחש **בסביבה** בעת שריפת המגנזיום, נבין כי האנרגיה הרבה הנפלטת מתפזרת לחומרים אשר בסביבה וגורמת להגדלת האנטרופיה שלהם. חישובי אנטרופיה (בהם לא נעסוק כאן) מלמדים, כי סה"כ השינוי באנטרופיה של המערכת והסביבה כלומר אנטרופיית היקום גדלה.

ניסויים רבים נוספים הובילו למסקנה הקרויה החוק השני של התרמודינמיקה הקובע כי:

כל תהליך ספונטני גורם לעליה באנטרופיה של היקום

מושג האנטרופיה הוא גודל חשוב ביותר בכימיה ומדענים מצאו דרך לתת לו ביטוי כמותי בהתבסס על תיאוריות שונות. על דרכים שונות לחישוב שינוי האנטרופיה של מערכת או שינוי האנטרופיה בסביבה תלמדו בהמשך לימודיכם בכימיה.

לדעת יותר על אנטרופיה באפס המוחלט

למדתם כי הגדלת הטמפרטורה של חומר גורמת לעלייה באנטרופיה שלו. מה קורה כאשר מתרחשת ירידה בטמפרטורה? ככל שהטמפרטורה של חומר יורדת, תרד האנטרופיה שלו.
פיזור האנרגיה המינימלי בחומר יתרחש כאשר החומר יהיה במצב מוצק, בהיערכות מסודרת אידיאלית ובטמפרטורה של האפס המוחלט, 0K. בתנאים אלו, האנטרופיה של החומר תוגדר כאפס, כלל זה נקבע כחוק התרמודינמיקה השלישי.

האם כל תהליך ספונטני אכן מתרחש בפועל?

החוק השני של התרמודינמיקה קובע, כי בעת ההתרחשות של תגובה ספונטנית, האנטרופיה של היקום עולה. על פי חישובים, או על פי הערכה של גודל השינוי באנטרופיה, ניתן לקבוע מראש אם תהליך **יכול להיות** ספונטני או לא. אולם שיקולי אנטרופיה אינם קובעים אם תהליך ספונטני אכן יתחיל להתרחש בתנאים מסוימים או באיזו מהירות זה יקרה.
רק היבטים קינטיים, עליהם למדתם במהלך היחידה, כגון אנרגיית שפעול ומהירות תגובה, הם הגורמים הנותנים תשובה לגבי התרחשות התגובה בפועל .

כדי להבהיר נקודה זו, נזכיר לדוגמה כמה תהליכים ספונטניים הדומים מבחינה כימית: תגובת יסודות עם חמצן ליצירת תחמוצות.

א. תגובת מימן עם חמצן ליצירת מים: $2H_{2(g)} + O_{2(g)} \rightarrow 2H_2O_{(l)}$

חישובים מראים, כי השינוי באנטרופיית היקום עבור התגובה האקסותרמית הנ"ל הוא חיובי, כלומר זוהי תגובה ספונטנית, התגובה יכולה להתרחש.
אולם, ניתן לשמור בכלי תערובת של מימן וחמצן ללא שינוי לאורך זמן רב. כלומר, למרות שהתהליך הוא ספונטני הוא אינו מתרחש. שיקולי השינוי באנטרופיה (החוק השני), מלמדים אותנו שהתהליך יכול להתרחש, אך אינם מגדירים באלו תנאים יתחיל להתרחש. רק אם יועבר ניצוץ בתערובת הנ"ל, כלומר תהיה השקעת אנרגיה אשר תספיק להתגבר על אנרגיית השפעול של התגובה, התגובה אכן תתרחש והתרחשותה תהיה מהירה ביותר תוך כדי פיצוץ!

ב. תגובת מגנזיום עם חמצן $2Mg_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow 2MgO_{(s)}$

חישובים מראים כי בתגובה זו חלה ירידה באנטרופיית המערכת אך היא קטנה מהעלייה שחלה באנטרופיית הסביבה. כך שסה"כ אנטרופיית היקום גדלה. על פי שיקולי השנוי באנטרופיה (החוק השני) זוהי תגובה ספונטנית. אולם, בטמפרטורת החדר מגנזיום נשמר במחסן החומרים לאורך זמן ולמרות הנטייה להגדלת האנטרופיה של היקום, התהליך אינו מתרחש, כפי שהיה בדוגמה הקודמת. רק לאחר שנחמם מגנזיום לטמפרטורה גבוהה ביותר בעזרת להבת הבונזן יתחיל התהליך להתרחש

ומהירותו תהיה גבוהה. כמו בדוגמה הקודמת, בטמפרטורות החדר התגובה לא מתחילה מעצמה מסיבות קינטיות.

ג. תגובת ברזל עם חמצן $4Fe_{(s)} + 3O_{2(g)} \rightarrow 2Fe_2O_{3(s)}$

חישובים מראים, כי בתגובה זו השינוי באנטרופיית היקום גדל, כלומר תגובה זו ספונטנית. ואכן, בחיי היום יום אנו נתקלים בגופים העשויים ברזל ה"מעלים" חלודה. כלומר, תהליך ספונטני זה אכן מתרחש. ההסבר הוא קינטי: כלומר אנרגיית השפעול לתהליך זה היא נמוכה בהרבה מזו הדרושה לשרפה של מגנזיום ולכן התהליך מתחיל להתרחש בתנאים בהם מגנזיום לא מגיב עם חמצן.

האם תהליכים לא ספונטניים עשויים להתרחש?

קיומו של תהליך בו אנטרופיית היקום יורדת (תהליך לא ספונטני) הוא בלתי אפשרי ולא יתרחש.

אולם, אם תהליך לא ספונטני יהיה **צמוד** לתהליך ספונטני ובסה"כ סכום השינויים באנטרופיית היקום גדול מאפס, הרי שגם תהליך מסוג זה, יתרחש.

דוגמה לתהליך כזה היא תגובת הפוטוסינטיזה.

תהליך הפוטוסינטיזה הוא תהליך אנדותרמי שניסוחו:

$$6CO_{2(g)} + 6H_2O_{(g)} \rightarrow C_6H_{12}O_{6(s)} + 6O_{2(g)}$$

הנתונים הנ"ל מורים, כי האנטרופיה של היקום אמורה לרדת בעת התרחשות תהליך זה. הסיבה לכך היא שאנטרופיית המערכת יורדת (קבלת חומרים בהם האנרגיה מרוכזת יותר ולא מפוזרת, מוצקים ופחות גזים) והאנטרופיה של הסביבה אף היא יורדת, כיון שנלקחת ממנה אנרגיה (תהליך אנדותרמי).

אולם, תהליך הפוטוסינתזה מתקיים על פי כדור הארץ מזה כ-3 מיליארדי שנים. כיצד? תהליך הפוטוסינתזה הוא מורכב וכולל שלבים שונים. אולם, שלב אחד ועיקרי בתהליך, הוא צמוד ותלוי בתהליך פליטת האנרגיה המתרחש בשמש, שהוא תהליך ספונטני. כאשר בוחנים את שינוי האנטרופיה ביקום בעת התרחשותם של שני התהליכים הצמודים הללו, אכן יש ירידה באנטרופיה בגלל תהליך הפוטוסינתזה, אולם במקביל יש עליה באנטרופיה עקב התהליכים המתרחשים בשמש. לכן, בסה"כ, התהליך מקיים את החוק השני, האנטרופיה של היקום עולה.

שינויים באנטרופיה במערכת שיווי משקל

בפרקים ג,ד של יחידה זו הכרתם מערכות הנמצאות בשיווי משקל, מערכות שיוצאות משיווי משקל או מערכות שמגיעות לשיווי משקל אחר, כתוצאה משינוי התנאים. כמו כן, למדתם כי בכל מערכת הנמצאת בשיווי משקל יש ערך של קבוע שיווי משקל, K_c, התלוי בטמפרטורה. דיון בשיקולי אנטרופיה מאפשר להסביר מצבים אלו.

במערכת שיווי משקל מתקיימות שתי תגובות, האחת היא אנדותרמית והשנייה, ההפוכה לה, היא אקסותרמית. על פי ההסברים הקודמים, ניתן להבין כי קיום התגובה האנדותרמית אפשרי בגלל עליה

באנטרופיית המערכת ואילו קיום התגובה האקסותרמית אפשרי בגלל עלייה באנטרופיית הסביבה. במצב של שיווי משקל, השינוי באנטרופיית היקום, השווה לסכום השינוי באנטרופיית הסביבה ולשינוי באנטרופיית המערכת, מגיע לערך **מקסימאלי**.

שינוי בטמפרטורה בכלי גורם לשינוי האנטרופיה של המערכת ולכן גם לשינוי בערך של אנטרופיית היקום. לפיכך, בכל טמפרטורה תתקיים תערובת שונה של מרכיבים, אשר בה יתקיים הכלל של אנטרופיה מקסימאלית. בכל מערכת כזו, קיים יחס שונה בין תוצרים למגיבים כלומר - ערך שונה של קבוע שיווי משקל K_c.

לדעת יותר על יציבות של חומרים

פירוש המושג **יציבות של חומר** הוא, שבתנאים נתונים, החומר מתקיים ללא שינוי לאורך זמן.

יציבות של חומר הוא מושג תרמודינמי, הנובע משני גורמים שונים: אנרגטי ואנטרופי.

יציבות מבחינה תרמודינמית פירושה, שחומר, שהוא תוצר של תגובה ספונטאנית, יציב יותר מהמגיבים באותה תגובה. לדוגמה, התגובה שבמהלכה נוצר מגנזיום חמצני ממגנזיום, היא תהליך ספונטני בטווח טמפרטורות מסוים. לכן נאמר, כי מגנזיום חמצני **יציב יותר** מבחינה תרמודינמית ממגנזיום, בטווח טמפרטורות זה.

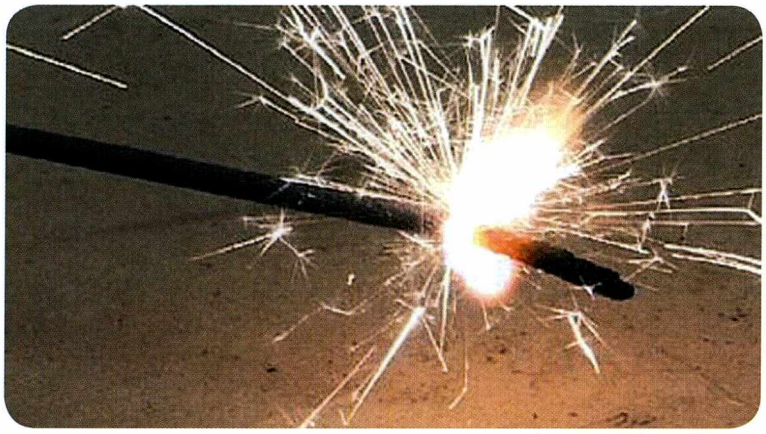
למרות יציבותם התרמודינמית, חומרים מסוימים לא נוצרים כיוון שאנרגיית השפעול של התהליך גבוהה. בדוגמה שהזכרנו, אנרגיית השפעול לקבלת מגנזיום חמצני היא גבוהה ולכן בטמפרטורת החדר, המגנזיום לא יגיב עם חמצן. כלומר, הוא יישאר ללא שינוי.

פעילות סיכום לפרק ולספר

לפניכם המושגים העיקריים אותם למדתם ביחידה זו.

אנרגיה פנימית, אנרגיה פוטנציאלית, אנרגיה קינטית, טמפרטורה, תגובה אקסותרמית, תגובה אנדותרמית, אנתלפיה, מהירות תגובה, אנרגיית שפעול, תצמיד משופעל, מערכת בשיווי משקל, תהליך ספונטני, אנטרופיה של מערכת, אנטרופיה של סביבה, החוק השני של התרמודינמיקה.

1. נסו לקשור מושגים רבים מהרשימה הנ"ל אל בעירת הזיקוק, כפי שהכרתם בניסוי הראשון ביחידה.



2. חזרו וקראו את השאלות אשר הוצגו לאחר ביצוע הניסוי (עמוד 10). האם כעת תוכלו לענות עליהן?

שאלות לסיכום הפרק והספר

1. לאיזה מהחומרים הבאים יש מספר רב יותר של תיאורים מיקרוסקופיים: $CCl_{4(l)}$ או $CCl_{4(g)}$. נמקו.
2. ציינו באילו מהתגובות הבאות שינוי האנטרופיה במערכת גדל. נמקו.

   א. $Mg_{(l)} \rightarrow Mg_{(s)}$

   ב. $CO_{2(s)} \rightarrow CO_{2(g)}$

   ג. $LiCl_{(s)} \rightarrow Li^{+}_{(aq)} + Cl^{+}_{(aq)}$

3. לאחר הכנסת מים נוזלים למקפיא, המים קופאים לקרח.

   א. האם התהליך הוא ספונטני?

   ב. האם במהלך התרחשות התהליך אנטרופיית היקום עולה?

   ג. האם אנטרופיית המערכת עולה או יורדת?

   ד. האם אנטרופיית הסביבה עולה או יורדת? נמקו כל אחד מהסעיפים.

4. א. האם תהליך בו נורה דולקת הוא תהליך ספונטני או לא ספונטני? נמקו.

   ב. מהי הסיבה שנורות דולקות בבתינו מידי יום?

   ג. כיצד קשורה תופעה זו לחוק השני של התרמודינמיקה?

5. א. בעת ניגוב העור בכוהל, אנו מרגישים תחושת "קור". מהו התהליך המתרחש על פני העור?

   ב. מה גורם לתחושת ה"קור"? האם התהליך הוא אנדותרמי או אקסותרמי? האם התהליך ספונטני?

   ג. כיצד משתנה האנטרופיה של המערכת והסביבה במהלך התרחשות התהליך הנ"ל?

פרק ב

חוק הס - עמוד 53

1. -142.8 kJ
2. -164.1 kJ
3. -905.4 kJ

שינויי מצב צבירה- עמוד 57

2. 12.02 kJ
3. $\Delta H < 0$ (- 6.01kJ/mol)

אנתלפיות קשר -עמוד 63

3. ΔH = -46.5 kJ/mol
4. ΔH = -90.0 kJ/mol

אנתלפיות קשר ואנתלפיות אטומיזציה -עמוד 67

1. ΔH = -1890 kJ
2. ΔH = +280 kJ
3. 202.8 kJ
7. ב. אנתלפיית קשר C-C היא 346 kJ
8. ב. ΔH = -280 kJ

ג. תיפלט אנרגיה שערכה 2.8 kJ

סיכום - עמוד 77

1. ד. -289 kJ
3. ה. 17.1°C

פרק ג

קצב תגובות - עמוד 105

2. א. פי 3 קטן יותר

   ב. פי 2 גדול יותר
5. א. קצב = $k[N_2]$ ולכן:

   A: 10 ק"ג לשנה

   B: 60 ק"ג לשנה

   C: 120 ק"ג לשנה
6. א. קצב = $k [A] [B]^2$

ב. 1. מהירות התגובה תגדל פי 8 ($2^2 \cdot 2$)

2. מהירות התגובה תגדל פי 4 (2^2 וללא השפעה של ריכוזו של C)

9. א. עבור ההפוכה של 1 (אקסו): $\Delta H_{1*} = -15\ kJ$
עבור ההפוכה של 2 (אנדו): $\Delta H_{2*} = +15\ kJ$

ב. עבור ההפוכה של 1: $E_{a1*} = 5\ kJ$
עבור ההפוכה של 2: $E_{a2*} = 35\ kJ$

טבלה - עמוד 123

$K_{c1} = 0.0603$ $K_{c2} = 0.0602$ $K_{c3} = 0.0602$

פרק ד

עמוד 134 דוגמה סעיף ב $Kc = 0.00428$

קבוע שיווי משקל - עמוד 135

1. סעיף ו $Kc = 0.278$
2. $Kc = 4$
3. $[H_2] = 0.323M$
5. $[PCl_3] = [Cl_2] = 0.714M$

מנת ריכוזים - עמוד 138

1. בכלי A ריכוזו של $NO_{2(g)}$ יגדל
בכלי B לא יהיה שינוי בריכוז $NO_{2(g)}$
2. א. תועדף תגובה ישירה.
ב. אין שינוי

עמוד 140

4. $Kc = 0.00374$

שיווי משקל - עמוד 151

3. ב. $Kc = 1.35$
4. ב. $Kc = 0.0059$

רשימת מקורות

- בן צבי, ר. וזילברשטיין, י.(1988). אנרגיה ותגובות כימיות (הכימיה אתגר פרק י"א), מכון ויצמן.
- היואיט, פ.ג' (1997). פיסיקה לכל הוצאת מכון ברנקו וייס, ירושלים
- הקורס, דרכים בכימיה (1978). האוניברסיטה הפתוחה, יחידות 7, 8, 10.
- כהן, א. (1984). אנרגיה כימית, מכון ויצמן, גסטליט חיפה בע"מ
- כהן, א.(1992). שיווי משקל כימי, מכון ויצמן, דפוס מאירי בע"מ
- מנזורלה, ע. (1996). כימיה לבית הספר התיכון כרכים א,ב,ג. הוצאה לאור, קווים חברה לפרסום בע"מ.
- מנזורלה, ע. (1997). עקרונות הכימיה, כרך ב. הוצאה לאור קווים, חברה לפרסום בע"מ
- צ'סנובסקי. ד. (2002). כימיה עולם החומר. הוצאת רכגולד ושו' חברה בע"מ

- Atkins, P.W., (1994). The 2nd Law. W.H.Freeman and Company, New-York
- Jones, L., Atkins. P. (1999). Chemistry-Molecules, Matter, and Change. W.H.Freeman and Company, New-York
- Petrucci, R.H., Harwood, W.S., & Herring, F.G.(2002) General Chemistry 8th edition. Prentice-Hall, New Jersey.
- Zumdahl, S. S. (1993). Chemistry 3rd edition. D.C. Heath and Company, Lexington, Massachusetts, Toronto

הטבלה המחזורית של היסודות

1 H ..00794																	2 He 4.00260
3 Li 6.941	4 Be 9.01218											5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.0067	8 O 15.9994	9 F 18.9984	10 Ne 20.1797
11 Na 22.9898	12 Mg 24.3050											13 Al 26.9815	14 Si 28.0855	15 P 30.9738	16 S 32.066	17 Cl 35.4527	18 Ar 39.948
19 K 39.0983	20 Ca 40.078	21 Sc 44.9559	22 Ti 47.88	23 V 50.9415	24 Cr 51.9961	25 Mn 54.9381	26 Fe 55.847	27 Co 58.9332	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.39	31 Ga 69.723	32 Ge 72.61	33 As 74.9216	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.80
37 Rb 85.4678	38 Sr 87.62	39 Y 88.9059	40 Zr 91.224	41 Nb 92.9064	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.906	46 Pd 106.42	47 Ag 107.868	48 Cd 112.411	49 In 114.818	50 Sn 118.710	51 Sb 121.757	52 Te 127.60	53 I 126.904	54 Xe 131.29
55 Cs 132.905	56 Ba 137.327	57 *La 138.906	72 Hf 178.49	73 Ta 180.948	74 W 183.84	75 Re 186.207	76 Os 190.23	77 Ir 192.22	78 Pt 195.08	79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.383	82 Pb 207.2	83 Bi 208.980	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
87 Fr (223)	88 Ra 226.025	89 Ac 227.028	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (263)	107 Bh (262)	108 Hs (265)	109 Mt (266)	110 (269)	111 (272)	112 (272)		114 (287)		116 (289)		118 (293)

58 Ce 140.115	59 Pr 140.908	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.965	64 Gd 157.25	65 Tb 158.925	66 Dy 162.50	67 Ho 164.930	68 Er 167.26	69 Tm 168.934	70 Yb 173.04	71 Lu 174.967
90 Th 232.038	91 Pa 231.036	92 U 238.029	93 Np 237.048	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (260)

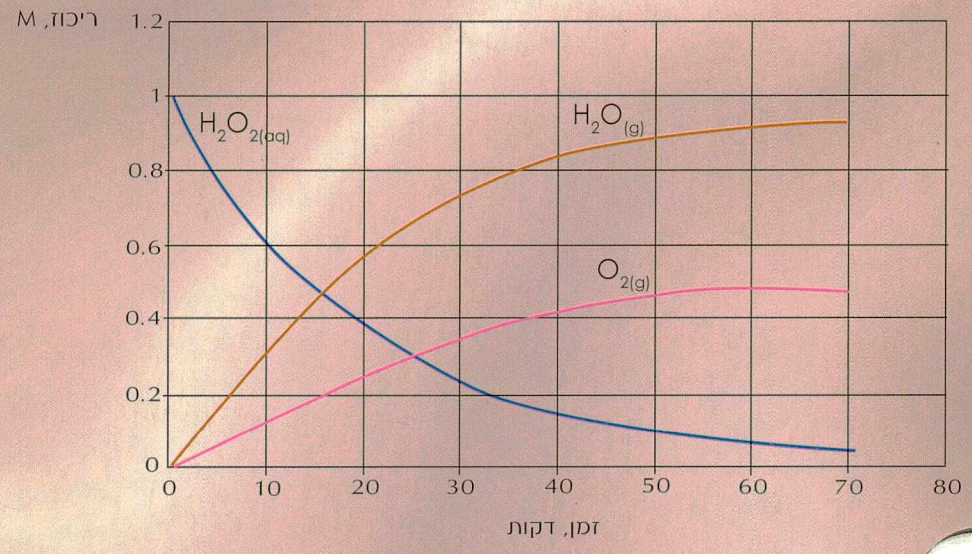
אנרגיה וקצב בתגובות כימיות - מה ואיך?

שינויי אנרגיה בתגובות כימיות - כמה?

מקצב תגובות ועד לשיווי משקל כימי - מה ואיך?

שינוי התנאים במערכת שיווי משקל - עד כמה זה משפיע?

מדוע מתרחשות תגובות כימיות?



באישור
גף אישור ספרי לימוד
אישור מספר 4184

0 00510880980 7
51-880980 דאנאקוד

הוצאת ספרים יסוד www.yesod.co.il