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

הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה לחינוך למדע וטכנולוגיה
קבוצת הכימיה

אגף א' למדעים
המזכירות הפדגוגית משרד החינוך

משרד החינוך
אגף א' למדעים

אנרגיה בקצב הכימיה

מהדורה שניה ומעודכנת

עדינה שינפלד, ד"ר צביה קברמן, ירדן קדמי

ריכוז: ד"ר אורית הרשקוביץ

ראש הפרויקט: פרופ. יהודית דורי

הוצאה: משרד החינוך

מהדורה ראשונה

ד״ר מרים כרמי

ד״ר אדית וייסלברג

ראש הפרויקט: פרופ. יהודית דורי

ייעוץ מדעי: פרופ. נעם אדיר

פרופ. אלי קולודני

הוצאה: יסוד

עריכה לשונית: אבשלום גינוסר

עיצוב וגרפיקה: נועם שושן

עיצוב כריכה ואיורים: טל הרשקוביץ

©

כל הזכויות שמורות, משרד החינוך

מהדורה ראשונה, ספטמבר 2007, תשס״ז

מהדורה שניה מעודכנת, יוני 2019, תשע״ט

תודות למורים שתרמו למהדורה הראשונה:

- 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 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'שנובסקי 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**, **ד"ר 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**, **שינפלד 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 בתגובות כימיות - מה ואיך?

מבוא 8
אנרגיה - מושגים בסיסים 11
אנרגיה, טמפרטורה ומה שביניהן 21
סיכום ביניים ראשון 27
שאלות 28
מעברי אנרגיה 29
שינויי אנתלפיה בתגובות כימיות 35
סיכום ביניים שני 41
רמות ההבנה בכימיה 42
שאלות 44
פעילות לסיכום הפרק 47

פרק ב - שינויי אנרגיה בתגובות כימיות - כמה?

מבוא 50
חישוב השינוי באנתלפיה התקנית של תגובה בעזרת חוק הס 52
שינויי אנתלפיה במהלך שינויים במצב הצבירה של חומרים 59
חישוב השינוי באנתלפיה התקנית של תגובה בעזרת אנתלפיות קשר 62
חישוב השינוי באנתלפיית תגובה באופן ניסוי - העשרה 71
שאלות לסיכום פרקים א ו-ב 77

פרק ג - קצב תגובות - מה ואיך?

מבוא 84
מהו קצב תגובה 89
אנרגיית שפעול וקצב תגובות 92
שאלות בנושא אנרגיית שפעול וקצב תגובה 93
מודל ההתנגשויות בין חלקיקים 94
הסבר תלות קצב התגובה בטמפרטורה 98
סיכום 103

שאלות רב ברירה 104
שאלות פתוחות 106
שאלות מסכמות לפרקים א', ב' ו-ג' 108

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

הצגת מצב של שיווי משקל כימי 114
קבוע שיווי משקל 120
תרגילים 124
כיצד מחשבים את ערכו של קבוע שיווי משקל? 125
מנת ריכוזים - Q 132
שינוי הלחץ החלים במערכת מתחילת התגובה עד הגעה לשיווי משקל 134
שינוי התנאים במערכת שיווי משקל 135
סיכום: שינוי התנאים במערכת שיווי משקל 142
שאלות מסכמות 143

פרק ה - מדוע מתרחשות תגובות כימיות?

מבוא 150
ספונטניות של תגובה 150
חקירה של תגובות ספונטניות 153
אנטרופיה ומשמעותה 155
אנטרופיה - היבטים כמותיים 162
שאלות 168
שאלות לסיכום הפרק 182

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.

בספר משולבים מושגים מדעיים עם 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.

למידה מאתגרת ומסקרנת

צוות פיתוח הספר

פרק א

אנרגיה בתגובות כימיות

- 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?

על שאלות אלו ועל שאלות רבות אחרות תוכלו לענות

לאחר לימוד הפרק הראשון

מבוא

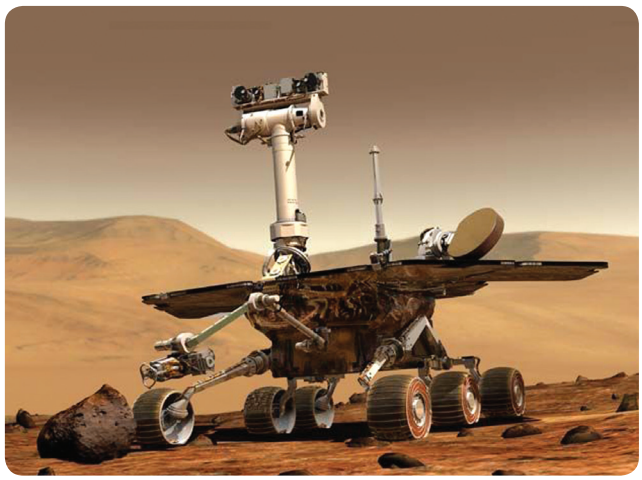
תופעות טבע שונות המתרחשות על פני כדור הארץ, כגון סופות ברקים, התפרצויות הרי געש, גלי צונאמי או שריפת יערות, הן ביטויים שונים לשיחרור אנרגיה. מעברי אנרגיה אלו באים לידי ביטוי בפליטה של גלי הדף ולהבות אש, הגורמים לחימום הסביבה, וכן לפליטת אור וקול.

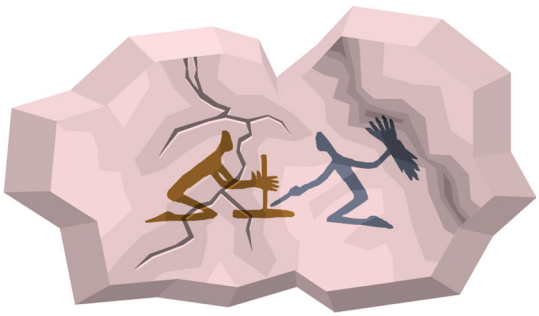
מאז ומתמיד, הייתה התקדמות האנושות תלויה במקורות האנרגיה שעמדו לרשותה ובידע אשר איפשר את ניצולם של מקורות אלו. שריפת יערות התרחשה גם בתקופה קדומה ביותר, אולם השליטה באש, שהחלה בשמירה על אש שמקורה טבעי שלא תכבה והמשיכה במציאת דרכים להדלקת אש, היוותה נקודת מפנה בהתפתחות האדם. מאז "גילוי" האש, מחפש האדם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

הרכיבו משקפי מגן והקפידו על חדר נקי ומאוורר

ניסוי 1 - ניסוי עם ציקוקים

חומרים וציוד לכל קבוצת תלמידים או להדגמה

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

מהלך הניסוי

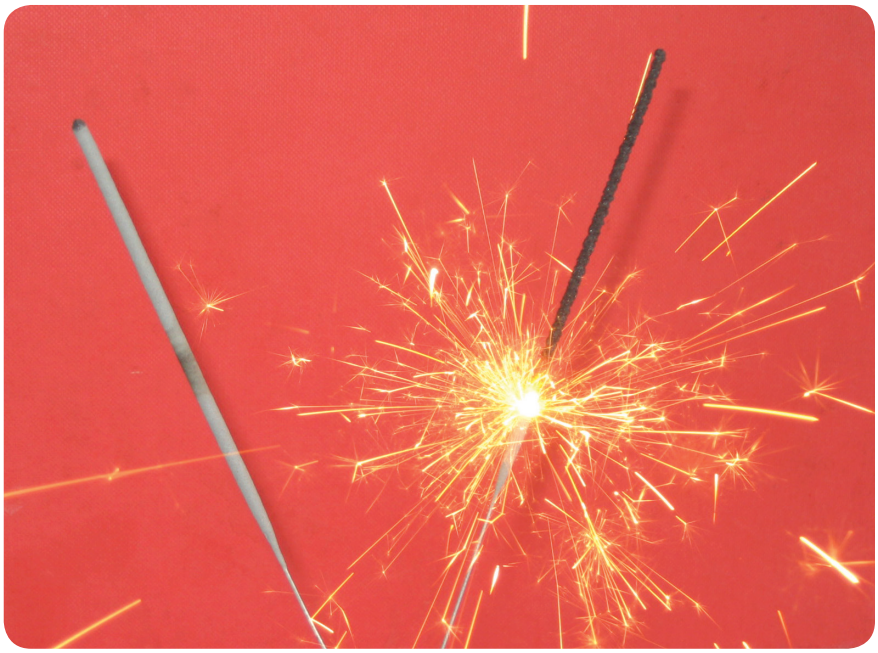
1. שלב התחלתי - תארו את הזיקוק שקיבלתם.
2. שלב **הדלקת** הזיקוק- הדליקו גפרור וקרבו אותו אל קצה הזיקוק.
   מדדו את משך הזמן בשניות מרגע נגיעת הגפרור בזיקוק ועד אשר הוא נדלק.
3. שלב **בעירת** הזיקוק - תארו את תצפיותיכם במהלך בעירת הזיקוק ומדדו את משך זמן הבעירה של הזיקוק.
4. שלב סופי - תארו את הזיקוק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

שאלות בעקבות 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. אילו 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

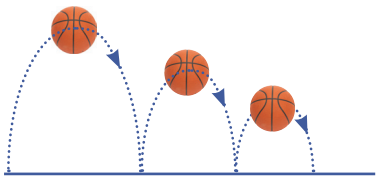
1. מהו הגיל שלכם?
2. מהו הגובה שלכם?
3. מהי מידת הנעליים שאתם נועלים?
4. כמה אנרגיה יש לכם?
5. מהי המסה שלכם?
6. האם אתם יכולים לענות על כל השאלות? מדוע?

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 בסיסיים 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, המכילה מספר מסוים של חלקיקים, נוכל לומר כי

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

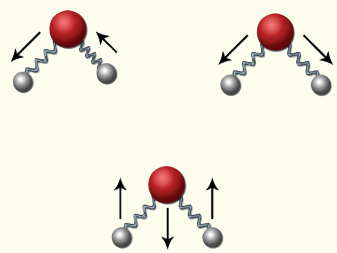
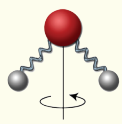
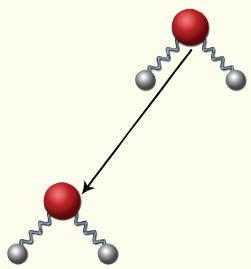
אנרגיה קינטית נובעת מתנועתם של החלקיקים, כגון מולקולות של חומר במצב גזי בכלי סגור. המולקולות נעות באופן אקראי ובעת התנגשותן זו בזו, מועברת אנרגיה ביניהן. על פי המודל הגזי, האנרגיה הקינטית של מולקולה במצב גזי נקבעת על ידי מסת המולקולה (m) ומהירותה (v).

ניתן להתייחס לאנרגיה קינטית כוללת של מדגם חלקיקים כשווה לסך-כל האנרגיה הקינטית של כל החלקיקים במדגם. היות שבמדגם גזי יש לחלקיקים מהירויות שונות, נוכל להתייחס גם לאנרגיה קינטית **ממוצעת** $\bar{E}_k$ של החלקיקים. $\bar{E}_k = \frac{E_k \text{ כוללת}}{\text{מספר חלקיקים בכלי}}$

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.

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, מסה נתונה של מים בטמפרטורה מסוימת מאופיינת על ידי אנרגיה מסוימת ואין זה משנה באיזו דרך הגיעו המים לאותה טמפרטורה.

פסק זמן לחשיבה

1. נתונים שני זוגות כלים:

זוג 1: כלי א׳ מכיל 1 מול מים בטמפרטורה של 30 °C וכלי ב׳ מכיל 1 מול מים בטמפרטורה של 10 °C.

זוג 2: כלי ג׳ מכיל 1 מול מים בטמפרטורה של 0 °C, וכלי ד׳ מכיל 1 מול קרח בטמפרטורה של 0 °C.

קבעו עבור כל אחד מזוגות הכלים ונמקו:

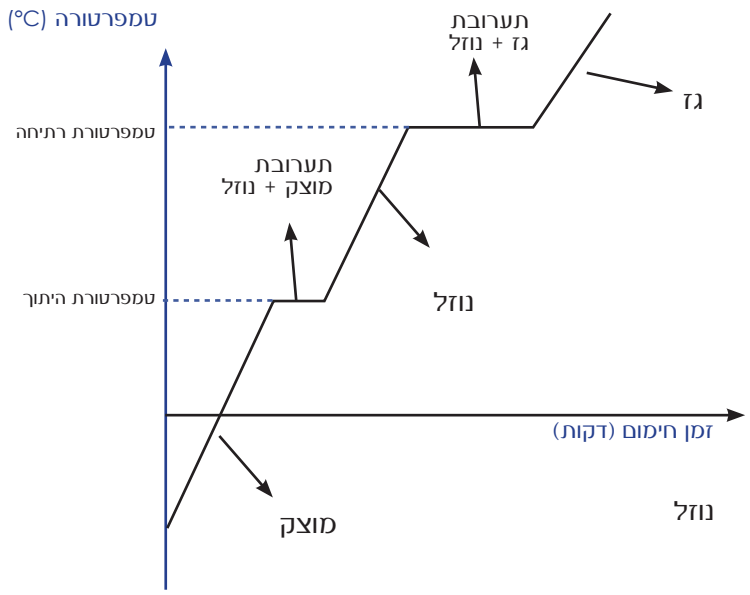
- איזה מבין הכלים מכיל חומר שיש לו אנרגיה קינטית ממוצעת גבוהה יותר?
- איזה מבין הכלים מכיל חומר שיש לו אנרגיה קינטית כוללת גבוהה יותר?
- איזה מבין הכלים מכיל חומר שיש לו אנרגיה פוטנציאלית גבוהה יותר?
- איזה מבין הכלים מכיל חומר שיש לו אנרגיה פנימית גבוהה יותר ?

2. א. מה תעשו על מנת להפוך קובייה של קרח לנוזל ולגז?

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

נמקו את דירוגכם.

שינוי הטמפרטורה כתלות בזמן החימום של חומר, המלווה בשינוי מצבי צבירה (גרף מעבר מצבי צבירה).



כאשר מחממים חומר מוצק, תוספת האנרגיה מנוצלת להגדלת התנודות של החלקיקים, ולכן האנרגיה הקינטית הממוצעת של החלקיקים גדלה והטמפרטורה עולה.

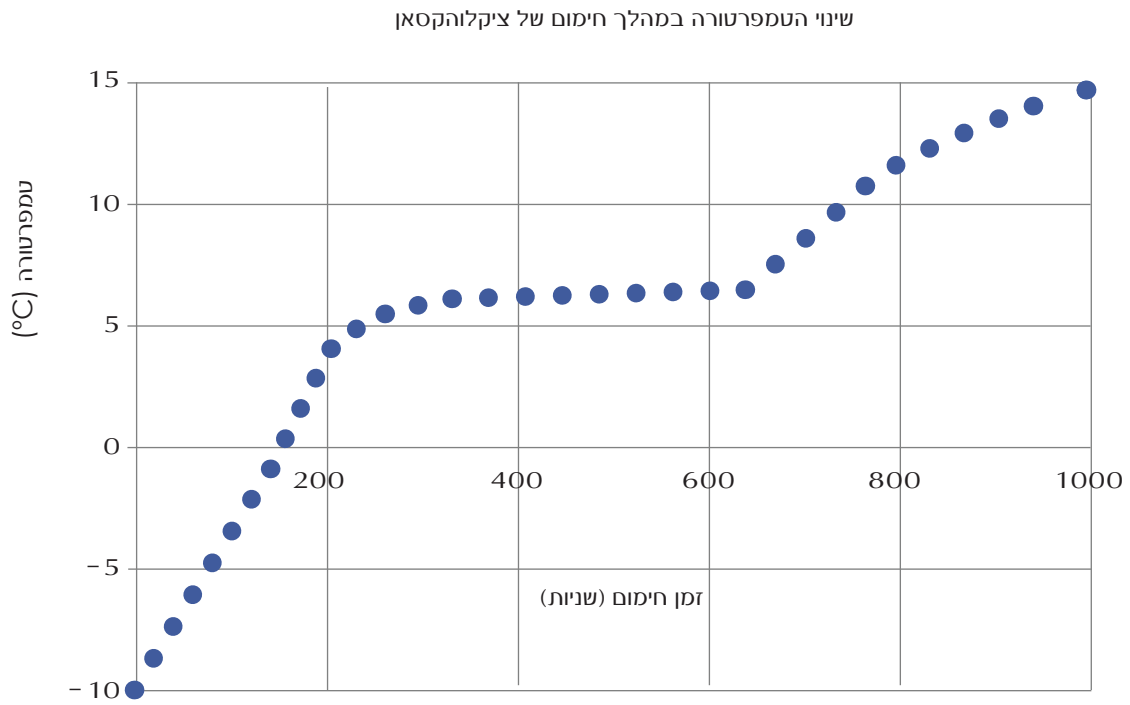
כאשר הטמפרטורה מגיעה לטמפרטורת ההיתוך של החומר, האנרגיה מושקעת בשבירת חלק מן הקשרים שבין החלקיקים והוספת תנועת סיבוב, לכן הטמפרטורה של החומר אינה משתנה.

לאחר שכל החומר ניתך והפך לנוזל, השקעת אנרגיה נוספת בצורת חימום תגרום להגדלת מהירות התנועה התנודתית והסיבובית. תהיה עלייה באנרגיה הקינטית הממוצעת של המדגם אשר תבוא לידי ביטוי בעליה בטמפרטורה עד לטמפרטורת הרתיחה. בטמפרטורת הרתיחה, המשך השקעת אנרגיה לא יגרום לשינוי טמפרטורה מכיוון שכל האנרגיה המושקעת מנוצלת לצורך שבירת הקשרים שבין החלקיקים והוספת תנועת מעתק. לאחר שכל החומר הפך לגז, המשך החימום יגרום להגדלת מהירות התנועה של החלקיקים, עלייה באנרגיה הקינטית הממוצעת ולכן לעלייה נוספת בטמפרטורה (החומר ימשיך להתחמם).

חשוב! בטמפרטורת ההיתוך והרתיחה אין עלייה בטמפרטורה למרות שמושקעת אנרגיה. זאת מכיוון שהאנרגיה המושקעת בתהליכים אלו מנוצלת לשבירת הקשרים בין החלקיקים, והוספת אופני תנועה.

שאלות

1. עשרה גרם ציקלוהקסאן נוזלי הוכנסו למבחנה. מד טמפרטורה הוכנס לחומר ואחר כך המבחנה כולה הוכנסה למקפיא ($-18^{o}C$), יום לפני הניסוי. במהלך הניסוי, המבחנה הכוללת את הציקלוהקסאן הקפוא ובו מד הטמפרטורה, הוצאה מהמקפיא והונחה על משטח בטמפרטורת החדר ($25^{o}C$). 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. היעזרו בקישור הבא:

https://www.youtube.com/watch?v=EEPGc5St-HM

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 תלמדו 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.

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 ונוצרות 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, הצטבר 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 מקורות אנרגיה לשימושים רבים. בתהליך השריפה של תרכובות אלו בנוכחות חמצן נפלטת אנרגיה, שבה ניתן להשתמש להארה וחימום של הסביבה. תוצרי זיקוק הנפט הגולמי מהווים דלקים ששריפתם מניעה את כלי התחבורה של ימינו ומספקת 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

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**. כאשר מתייחסים למערכות שהן כלים, מבחינים בין שלושה סוגים של כלים:

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), **ואין** חילופי חומר עם הסביבה, אדים אינם עוזבים את התרמוס.

מערכת וסביבה בתגובה כימית

המערכת **בתגובה כימית** 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 שמוקד 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 שהתגובה התרחשה בכלי זכוכית שאינו מבודד, הרי שהסביבה כוללת מלבד הממס שלא השתתף בהמסה, את כוס הזכוכית, היד הנוגעת בכוס, האוויר מסביבה 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. כאשר כלי אינו מבודד **הסביבה אינה מוגדרת**.

? 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.

? קבעו עבור כל אחד מהמקרים הבאים אם המערכת פתוחה, סגורה או מבודדת, והאם הסביבה מוגדרת או לא מוגדרת:

1. קפה חם בתוך תרמוס
2. בעירת דלק במנוע מכונית
3. אח סגור בדלת זכוכית
3. צמח שצומח
4. קופסת שימורים סגורה במקרר סגור
5. כספית במד טמפרטורה
6. בקבוק קרח נתון בצידנית סגורה

הרכיבו משקפי לבשו כפפות מגן והקפידו על חדר מאוורר

ניסוי 2 - מערכת וסביבה בתגובות

חומרים וציוד לכל קבוצת תלמידים או להדגמה

40 מ"ל תמיסת $CuCl_{2(aq)}$ 0.5M, רדיד אלומיניום (ריבוע של 3×3 ס"מ), 1 כוס כ'

100 מ"ל, 2 מקלות זכוכית, 2 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. להלן הקישור לסרטון המציג את הניסוי: https://youtube/GQkJl-Nq3Os

צפו בסרטון.

שלב ג. חזרו על שלב א של הניסוי כאשר הפעם הניסוי יתבצע בשתי כוסות קלקר המונחות אחת בתוך השנייה ומכוסות במכסה. געו בכוסות במהלך הניסוי.

שאלות בעקבות 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 אילו חלקיקים מרכיבים כל אחד מהחומרים בהם השתמשתם.
5. מהם ההבדלים בין שלב ג בניסוי לשלב א? רשמו מסקנותיכם מניסוי זה.

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:

שינוי באנרגיה התרמית (חימום או קירור), ביצוע עבודה ופליטת קרינה אלקטרומגנטית.

הנה כמה דוגמאות לשינויים באנרגיה הפנימית של המערכת:

- מעבר אנרגיה תרמית הגורם לחימום - חימום מים הנמצאים בכלי המונח על כיריים דולקים.

  מעבר אנרגיה תרמית הגורם לחימום: המסת NaOH במים.

- מעבר אנרגיה תרמית הגורם לקירור - קירור מים על ידי הכנסת קוביות קרח למים המצויים בטמפרטורת החדר בתוך תרמוס. אנרגיה מהמים מועברת להיתוך קוביות הקרח, ולכן המים מתקררים.

- מעבר אנרגיה הגורם לחימום (אנרגיה תרמית) וביצוע עבודה - מבחנה המכילה תמיסת חומצה מחוברת לבלון רפוי.

הכנסת שבבי אבץ לתמיסת החומצה גורמת לפליטת גז מימן, לחימום התמיסה ולניפוח הבלון (ביצוע עבודה). https://www.youtube.com/watch?v=oQz5YEsx7Fo

- מעבר אנרגיה הגורם לפליטת קרינה – פליטת אור לבן ובוהק בעת שריפת מגנזיום.
https://www.youtube.com/watch?v=23aHxMfRKvU&vl=iw

? התייחסו לדוגמאות הנ"ל וציינו בכל מקרה מהי 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[1], 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.

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

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

אנרגיה, טמפרטורה ומה שביניהן

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 צלזיוס, 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 - שאב 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 2 דקות. את כוס ב הניחו על השולחן ואת כוס ג הכניסו לתוך אמבט מי הקרח.
לאחר 2 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 כוללת של החלקיקים.

מכיוון שבכל הכוסות נפח המים היה זהה, נוכל להניח כי האנרגיה הפוטנציאלית של הנוזלים בכל כוס היא זהה. האנרגיה הקינטית הממוצעת היא המנה של האנרגיה הקינטית הכוללת חלקי מספר החלקיקים במדגם. 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. לכן למים שבכוס א שבהם נמדדה הטמפרטורה הגבוהה ביותר יש אנרגיה קינטית ממוצעת הגבוהה ביותר.

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 (דקות)	טמפרטורה בכוס א' (°C)	טמפרטורה בכוס ב' (°C)	טמפרטורה בכוס ג' (°C)
0	32	23	8
5	27	23	12
15	25	23	14
30	23	23	23

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 בכל כוס? מהמערכת לסביבה או מהסביבה למערכת?
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 טמפרטורת הסביבה ואילו הטמפרטורה של המים בכוס א ירדה עד טמפרטורת הסביבה. טמפרטורת המים בכוס ב, שהייתה זהה לזו של הסביבה, לא השתנתה.

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

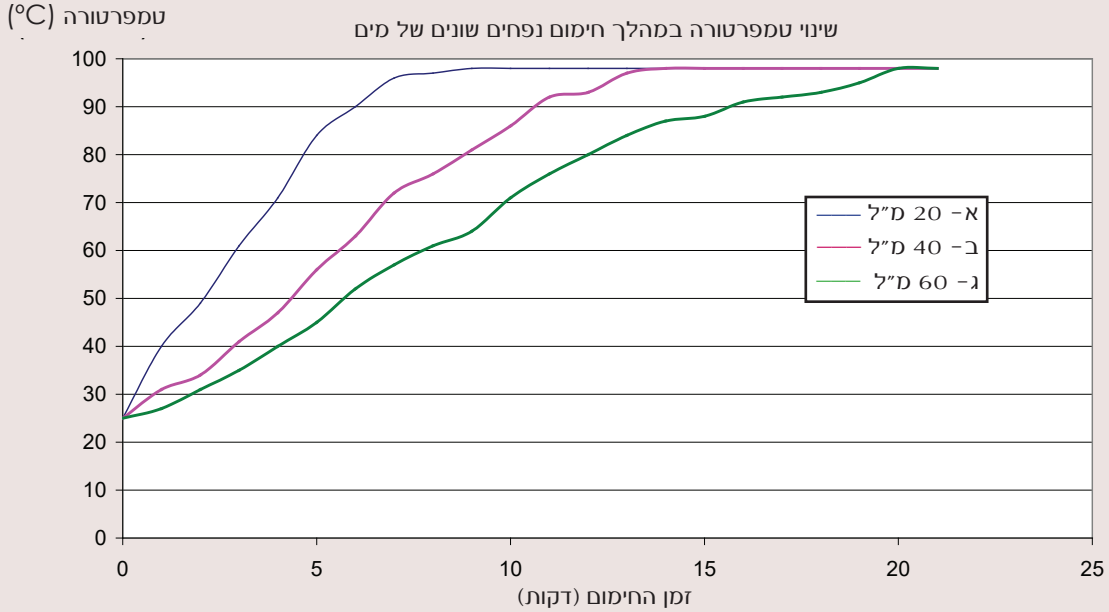
ניסוי 3 - שלב ג - אנרגיה וטמפרטורה

מהלך ניסוי ותוצאות לדוגמה:

נתונות שלוש כוסות, בהן נפחים שונים 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. מה משותף לעקומות המתוארות? מהי הסיבה לכך?
6. במה שונות העקומות זו מזו? מהי הסיבה לכך?
7. מה ניתן להסיק על הקשר בין הנפחים של המים לבין טמפרטורת הרתיחה של המים?
8. מה ניתן להסיק על הקשר בין **נפח** 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 (נפח המים הוא הגדול 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 מספר שונה של חלקיקים בכל אחת מהכוסות ולכן האנרגיה הקינטית הממוצעת שלהם שונה.

מסקנות משלב ג

- *על מנת להגיע לאנרגיה קינטית ממוצעת זהה של מולקולות בנפחים שונים של מים, יש צורך בהעברת כמויות שונות של אנרגיה.*
- *כאשר מועברת כמות זהה של אנרגיה לנפחים שונים של מים, כל חלקיק יקבל בממוצע כמות אנרגיה שונה. ולכן השינוי באנרגיה הקינטית הממוצעת של כל חלקיק יהיה שונה.*

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 נפח זהה של 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 יותר.*

השוואה בין המושגים אנרגיה וטמפרטורה

	אנרגיה פנימית של מדגם חלקיקים	טמפרטורה של מדגם חלקיקים
משמעות	כלל האנרגיה האצורה במדגם חלקיקים = אנרגיה פוטנציאלית + אנרגיה קינטית (כוללת)	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	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 השונות.	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	מספר 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 האינטראקציות בין החלקיקים 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 המערכת כוללת את התגובה עצמה, כלומר את המגיבים שהופכים לתוצרים.
- **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. 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. 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.

2. 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!"

3. נתונים שני בקבוקי מים: בקבוק המכיל 1.5 ליטר מים ובקבוק המכיל 0.5 ליטר מים. הבקבוקים נמצאים בטמפרטורת החדר. שני הבקבוקים הוכנסו בו זמנית למקפיא והוצאו כעבור שעה.לא היה שינוי במצב הצבירה של המים בבקבוקים.

א. מהו הכיוון בו התקיים מעבר האנרגיה: מהבקבוקים אל המקפיא או להיפך? נמקו.

ב. האם השינוי באנרגיה הפנימית של שני הבקבוקים, בשהותם במקפיא, שווה? נמקו.

4. 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"?

5. 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.

---

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

מעברי אנרגיה

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 קיים סיכוי גבוה יותר 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 הגזיים. 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. https://www.youtube.com/watch?v=oQz5YEsx7Fo

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]) $C_3H_{8\,(g)}$ / $C_4H_{10(g)}$	דלק מכוניות תערובת פחמימנים המכילה בעיקר תרכובות בנות 5-9 אטומי פחמן כגון אוקטאן, C_8H_{18}.
המגיבים	$C_3H_{8(g)}$ / $C_4H_{10(g)}$ ו-חמצן	למשל C_8H_{18} (אוקטאן) ו -חמצן
התוצרים	$CO_{2(g)} + H_2O_{(g)}$	$CO_{2(g)} + H_2O_{(g)}$ (נפלטים גזים נוספים, כגון CO וכן תחמוצות שונות, היות שהדלק 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 שלתערובת גזים זו אין ריח והדבר לא יאפשר זיהוי גז במקרה דליפה, מוסיפים גז בעל ריח חריף.

מהן יחידות המידה של אנרגיה?

יחידות המידה 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 צלזיוס נקראת קלוריה (cal). כמות אנרגיה זו היא קטנה מאוד ולכן מקובל להשתמש ביחידת אנרגיה הגדולה פי 1000 ממנה, הנקראת קילו קלוריה (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 (במקרה שאין המרה של האנרגיה החשמלית לקרינה ו/או לחום)

אנרגיית קרינה 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 כימיים, סוללות.

מעברי אנרגיה בתגובות 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:

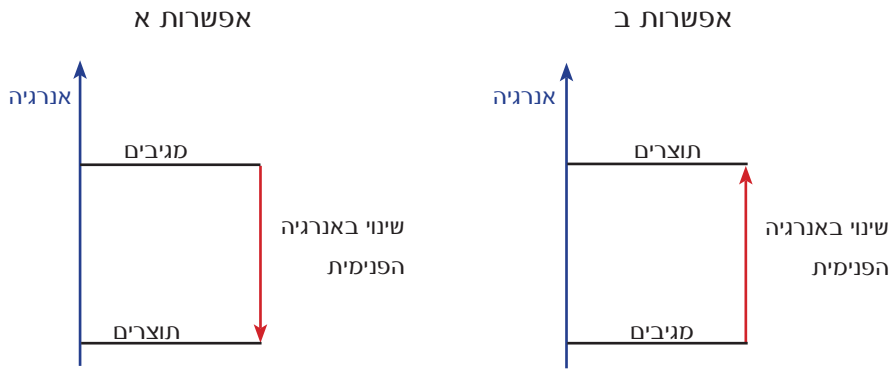
אפשרות א – **ירידה באנרגיה הפנימית של המערכת**, הנובעת מכך שלתוצרים תהיה אנרגיה פנימית נמוכה מהאנרגיה הפנימית של המגיבים.

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.

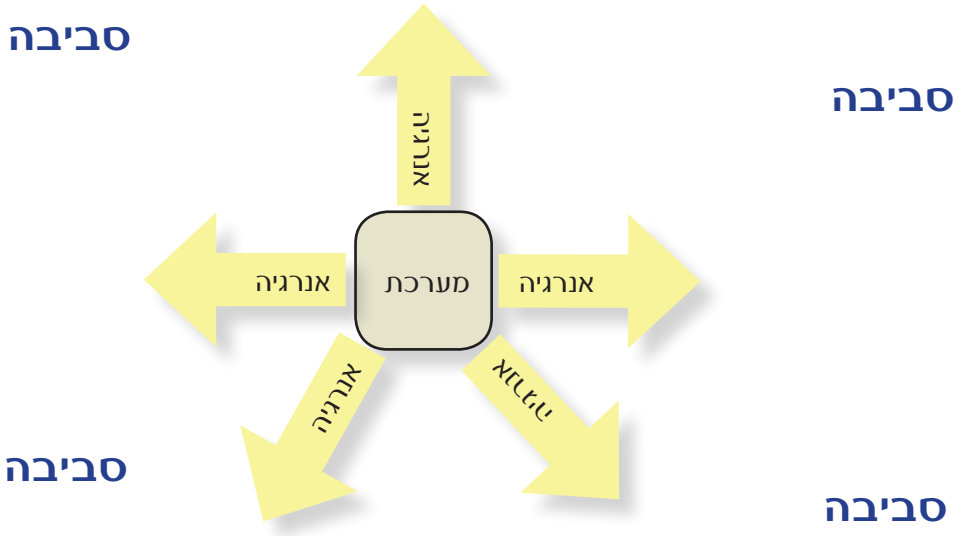
ניזכר בניסוי 1, שריפת זיקוקים. ראינו, כי המגיבים (חומר אפור המכסה חוט תיל) עברו שינוי והפכו לחומר שחור. בנוסף, ראינו להבה ופליטת גיצים מאירים. הלהבה התקדמה לאורכו של הזיקוק וכאשר קרבנו את היד אליה הרגשנו שחל חימום.

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 **נפלט** אל הסביבה המקיפה את הזיקוק.

נתייחס אל הזיקוק כאל **מערכת**, המכילה בתחילת הניסוי את המגיבים ולאחריו את התוצרים. **לסביבה**

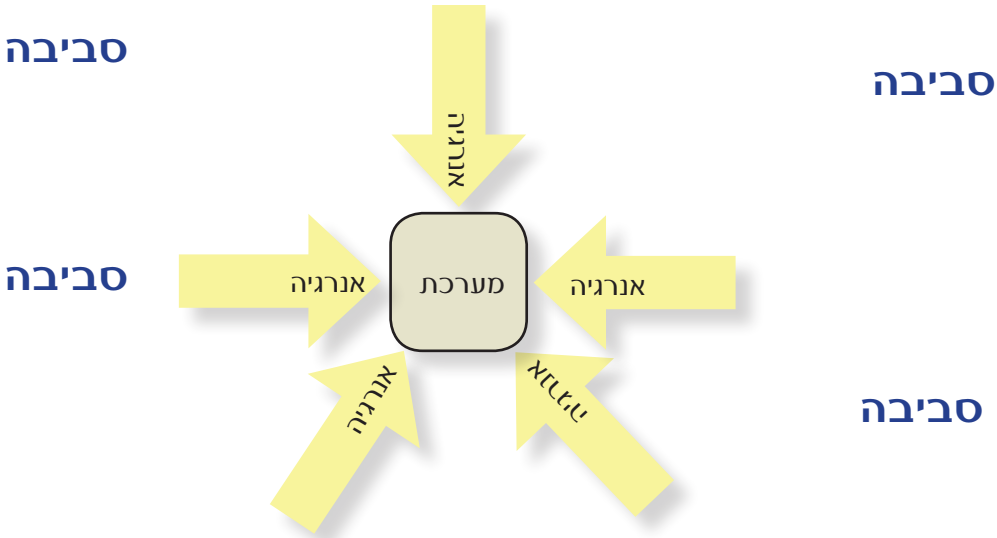
בניסוי הזיקוק אין גבולות מוגדרים והיא אינה מבודדת (כלומר הסביבה אינה מוגדרת) היא כוללת את האוויר מסביב, את היד המחזיקה את הזיקוק, את הנייר והיד שמקרבים אל הזיקוק.

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

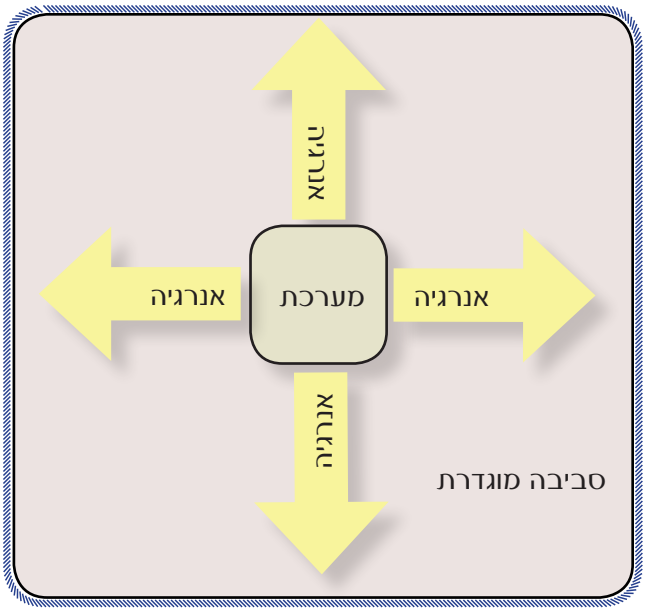


אם נגדיר בצורה ברורה את הסביבה, על ידי יצירת גבול מבודד בין הסביבה הקרובה של המערכת לבין

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:

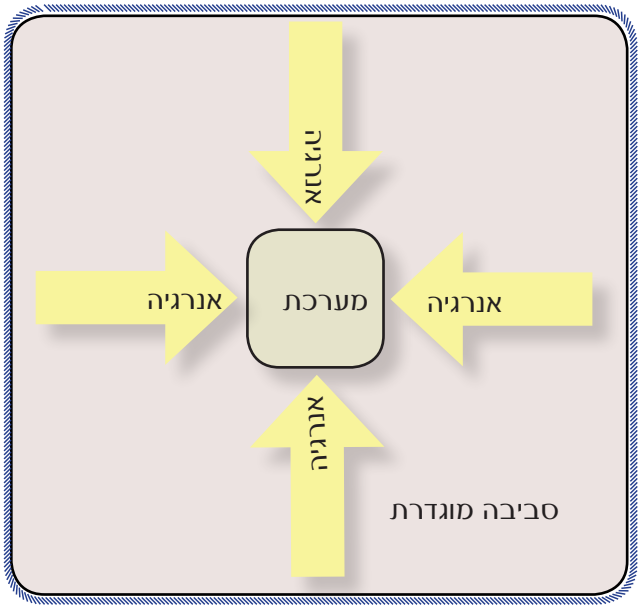
אפשרות א: אנרגיה שמקורה באנרגיה הפנימית של המערכת נפלטת אל הסביבה. הפרש האנרגיה הפנימית בין התוצרים למגיבים שווה לאנרגיה אשר נקלטה על ידי הסביבה. (איור 3א).

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 נקלטת מהסביבה.

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 $C_8H_{18(l)}$. 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. סכום זה נקרא 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 שרוב 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**:

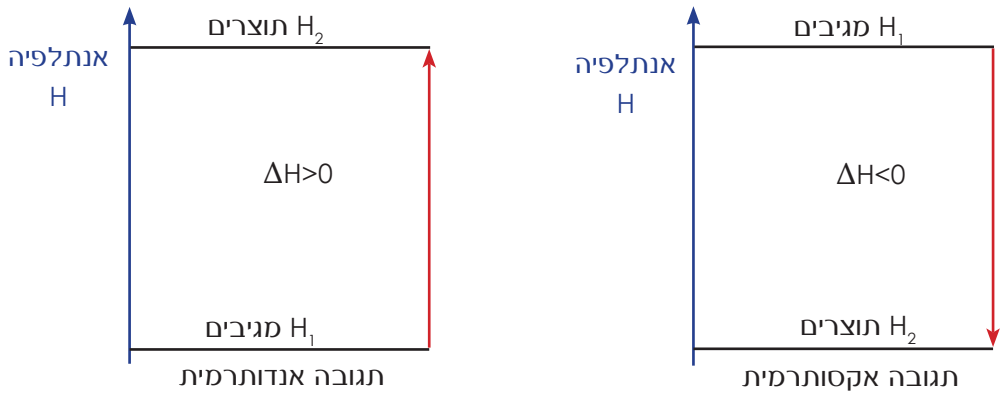
1. **תגובה אקסותרמית** – תגובה, אשר במהלך התרחשותה חלה ירידה באנתלפיה של המערכת, כיוון שהאנתלפיה של התוצרים נמוכה מזו של המגיבים. הפרש האנתלפיה בין מרכיבי המערכת נפלט לסביבה. כתוצאה מכך, אנרגיית הסביבה עולה. (איור 4).

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 נקלט מהסביבה. כתוצאה מכך, אנרגיית הסביבה יורדת. (איור 4).

שימו לב שבשני האיורים, החץ האדום המסמן את השינוי באנתלפיה, יוצא תמיד מן המגיבים ומסתיים בתוצרים.

איור 4 - תיאור גרפי לתגובה אקסותרמית ותגובה אנדותרמית



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.

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 אידיאליים. 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°.

השפעת אופן הניסוח של תגובה על ΔH°

כפי שלמדנו: כל תגובה מלווה בשינויי אנרגיה. ערכו של ΔH° מתייחס לתגובה על פי ניסוחה. (בתגובות רבות למול מגיב) אם נתון: $A + B \rightarrow 2C \quad \Delta H^\circ_1 = X\ kJ$

אזי, עבור התגובה: $2A + 2B \rightarrow 4C$ יהיה $\Delta H^\circ_2 = 2X\ kJ$

כלומר כאשר כופלים את המקדמים של תגובה פי מספר מסוים כופלים באותו גודל גם את השינוי באנתלפיה.

עבור התגובה: $2C \rightarrow A + B$ יהיה $\Delta H^\circ_3 = -X\ kJ$

כלומר כאשר הופכים את התגובה חל שינוי בסימן של ΔH° ללא שינוי בערך.

פסק זמן לחשיבה

א. נתון: $N_{2(g)} + O_{2(g)} \rightarrow 2NO_{(g)} \quad \Delta H^o = 180.8kJ$

חשבו – מהו שינוי האנתלפיה בתגובה: $NO_{(g)} \rightarrow \frac{1}{2}N_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \quad \Delta H^o = ?$

ב. נתון: $\frac{1}{2}O_{2(g)} + NO_{(g)} \rightarrow NO_{2(g)} \quad \Delta H^o = -57.2kJ$

חשבו – מהו שינוי האנתלפיה בתגובה: $2NO_{2(g)} \rightarrow 2NO_{(g)} + O_{2(g)} \quad \Delta H^o = ?$

שינוי האנתלפיה בתגובה, ΔH, לעומת שינוי האנרגיה בניסוי מסוים, Q

השינוי באנתלפיה למול בתגובה מיוחס לתגובה על פי ניסוחה , לפי החומר שהמקדם שלו 1 בניסוח התגובה (עבור מול מגיב או מול תוצר). לדוגמה: אם נתון : $CH_{4(g)} + 2O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)} + 2H_2O_{(g)} \quad \Delta H^o = -800kJ$ המשמעות היא שעל כל מול מתאן, $CH_{4(g)}$, שמגיב או על כל מול של פחמן דו חמצני, $CO_{2(g)}$, שנפלט נפלטת אנרגיה בשיעור של 800kJ.

(אם בתגובה אין חומר שהמקדם שלו 1 יש לבחור את החומר שהמקדם שלו הוא הקטן ביותר ולחלק את כל התגובה ואת ΔH^o באותו מקדם כדי לקבל שינוי אנתלפיה למול).

Q – שינוי האנרגיה התרמית במערכת של ניסוי מסוים. שנוי זה תלוי במספר המולים שהשתתפו בתהליך (עבור המרכיב בתגובה שהמקדם שלו 1) ובשינוי האנתלפיה בתגובה (ΔH) באופן הבא $Q = n \times \Delta H$

כאשר: n – מייצג את מספר המולים של המגיב או התוצר שהמקדם שלו הוא 1.

ΔH – שינוי האנתלפיה בתגובה (עבור 1 מול חומר שהמקדם שלו 1 בניסוח).

Q – שינוי האנרגיה התרמית במערכת של ניסוי מסוים (עבור מספר המולים של החומר, מגיב או תוצר, שהגיבו או נוצרו בפועל)

להזכירכם: אם הנתון מתייחס לחומר שהמקדם שלו אינו 1 יש לחלק במקדם לצורך החישוב.

לפי הסימן של Q ניתן לקבוע אם נפלטת או מושקעת אנרגיה במערכת במהלך התרחשות התגובה. כאשר הסימן של Q שלילי, תיפלט אנרגיה מהמערכת בהתרחשות התגובה. כאשר הסימן של Q חיובי, יש להשקיע אנרגיה למערכת לשם התרחשות התגובה.

לדוגמה: אם יגיבו שני מול מתאן בתגובת השריפה, **תיפלט** אנרגיה בשיעור של 1600 kJ.

$Q = 2 \cdot (-800) = -1600kJ$

שאלות

1. כאשר מזרימים למיכל גז מתאן וגז כלור, מחממים או מקרינים באור אולטרא סגול, מתרחשת תגובה הנקראת תגובת התמרה שבה אטום מימן מוחלף באטום כלור. לפניכם ניסוח התגובה המתרחשת:

$$CH_{4(g)} + \frac{1}{2}Cl_{2(g)} \rightarrow CH_3Cl_{(g)} + \frac{1}{2}H_{2(g)} \quad \Delta H^o = -3.8kJ$$

א. בניסוי ראשון הכניסו למיכל התגובה 71 גרם כלור, $Cl_{2(g)}$, כמה אנרגיה נפלטה בניסוי זה?

ב. בניסוי שני נפלטה אנרגיה של 76 קילוג'אול. כמה מול גז מימן, $H_{2(g)}$, נוצרו בניסוי?

2. לפניכם ניסוחי התגובות הבאים:

(1) $2CO_{(g)} + O_{2(g)} \rightarrow 2CO_{2(g)}$ $\Delta H^o = -566kJ$

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

לכל אחת מן התגובות:

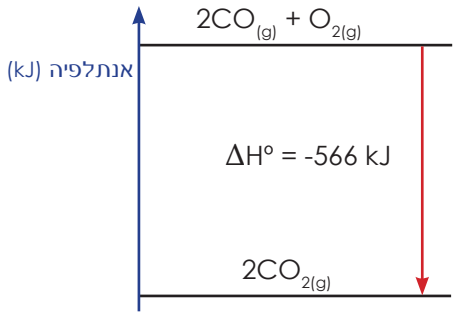
א. הציגו את השינוי באנתלפיה של התגובה באופן גרפי.

ב התייחסו לכל אחת מהתגובות בנפרד וקבעו מה יהיה השינוי באנרגיה בתהליך שבו יתקבלו 220 גרם פחמן דו חמצני? פרטו את חישוביכם.

ג. חשבו מה יהיה השינוי באנתלפיה, ΔH^o, עבור התגובה $CO_{2(g)} \rightarrow \frac{1}{2} O_{2(g)} + CO_{(g)}$ פרטו את חישוביכם.

דוגמה פתורה

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/מול) .

תשובות

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

ב. סימנו של ΔH^o 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 שנתון 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-1 גרם נתרן הידרוכסידי, $NaOH_{(s)}$, כ-1 גרם אמוניום חנקתי, $NH_4NO_{3(s)}$, 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, $NaOH_{(s)}$, ומוצק B, אמוניום חנקתי, $NH_4NO_{3(s)}$. מה המשותף לשני החומרים המוצקים 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 מקסימלית או מינימלית).

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).

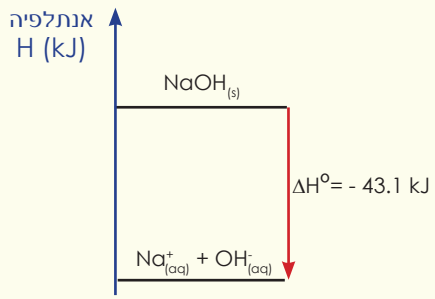
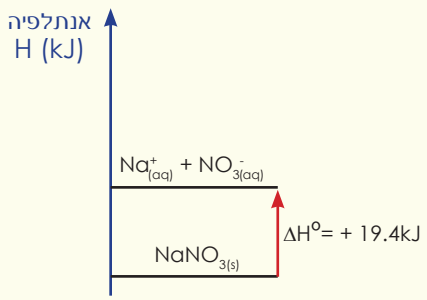
שאלות בעקבות הניסוי

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. אילו 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	$NaOH_{(s)} \xrightarrow{H_2O_{(l)}} Na^+_{(aq)} + OH^-_{(aq)}$ $\Delta H^\circ = -43.1$ kJ	$NaNO_{3(s)} \xrightarrow{H_2O_{(l)}} Na^+_{(aq)} + NO^-_{3(aq)}$ $\Delta H^\circ = +19.4$ kJ
תיאור גרפי של התגובה		
תיאור מאקרוסקופי	הכנסנו כמה גרגרים של נתרן הידרוכסידי לכוס עם מים מזוקקים, ערבבנו וחשנו כי לאחר שכל החומר נעלם התמיסה התחממה. או: במהלך המסת החומר היוני במים, טמפרטורת התמיסה עלתה.	הכנסנו כמה גרגרים של נתרן חנקתי לכוס עם מים מזוקקים וחשנו כי לאחר שכל החומר נעלם 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.
- במהלך ההתרחשות של תגובה כימית, השינוי באנרגיה הפנימית של המערכת שווה לכמות האנרגיה המשתחררת אל הסביבה או הנקלטת ממנה.
- יחידות המידה המקובלות של אנרגיה הן ג׳אול וקילו ג׳אול.
- כאשר תגובה כימית מתרחשת בתנאים בהם הלחץ הוא קבוע (כגון כלי פתוח), השינוי באנרגיה התרמית במערכת שווה לשינוי באנתלפיה של החומר. שינויי אנתלפיה ומסומנים ב-ΔH.
- שינוי האנתלפיה התיקני מסומן כ: ΔH°.
- **תגובה אקסותרמית** – תגובה אשר במהלכה חלה ירידה באנתלפיה של המערכת, כי האנתלפיה של התוצרים נמוכה מזו של המגיבים. הפרש האנתלפיה בין מרכיבי המערכת נפלט 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.
- שינוי האנרגיה התרמית במערכת של ניסוי מסוים. שנוי זה תלוי במספר המולים שהשתתפו בתגובה ובשינוי האנתלפיה בתגובה ומיוצג על ידי האות Q
$Q=n \times \Delta H$.

רמות ההבנה בכימיה

כדי להבין היטב כימיה ולהצליח לענות בצורה מקיפה על שאלות, מומלץ לבנות תשובות הכוללות רמות הבנה רבות ולקשור ביניהן. מבחינים בין שלוש 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, שינויי צבע, שינויי טמפרטורה, שינוים בדרגת חומציות (pH), קבלת משקעים, שמיעת קול נפץ, ריח חריף וכו'.
- **רמה מיקרוסקופית הרמה (החלקיקית)** – ברמה זו מתארים את החומרים ברמה החלקיקית. מתוך מסמך תיאור חומרים ברמות הבנה שונות אתר מפמ"ר כימיה
http://meyda.education.gov.il/files/Mazkirut_Pedagogit/chimya/ramot2015.pdf

"בתיאור מיקרוסקופי יש להתייחס לשלושה היבטים:

- **סוג החלקיקים**
בכל חומר יש להתייחס באופן ממוקד לסוג החלקיקים הרלוונטי (אטומים, יונים, מולקולת וכו')
- **סוג הקשרים בין החלקיקים וסידור החלקיקים**
בתיאור מיקרוסקופי של מוצק יש להתייחס למבנה הסריג של חומר יוני/חומר מתכתי/חומר מולקולרי/חומר אטומרי
- בתיאור מיקרוסקופי של חומרים מולקולריים יש לציין את סוג הקישור הבין מולקולרי כאשר יש בין המולקולות קשרי מימן יש לתאר בפירוט את הקשר המימני וכיצד הוא נוצר
- **אופני תנועה של החלקיקים** (תנודה, סיבוב ומעתק)

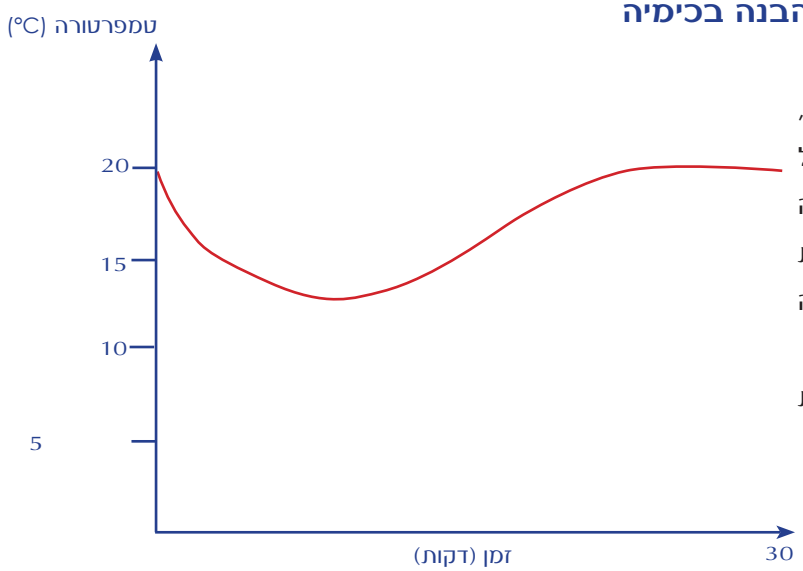
- **רמת הסמל** – ברמה זו משתמשים בייצוגים המהווים את שפת הכימאים. לדוגמה: ניסוח תגובות ואיזונן, סמלים כימיים, שרטוט גרפים, ציור מודלים."

שאלה ותשובה על פי רמות ההבנה בכימיה

מתוארת התופעה הבאה:

חמישה גרם נתרן חנקתי, $NaNO_{3(s)}$, מוצק הוכנסו לתוך 100 מ"ל מים המצויים בכוס כימית. נמדדה הטמפרטורה של המים מרגע הכנסת המוצק למשך 30 דקות. התמיסה ערבבה והמוצק התמוסס כולו.

הגרף שלפניכם מתאר את השתנות הטמפרטורה כתלות בזמן הניסוי.



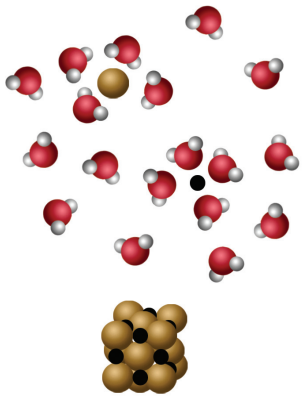
שאלה

מהו התהליך אשר התרחש במהלך הניסוי? התייחסו בתשובתכם לשלוש רמות ההבנה בכימיה – מאקרוסקופית מיקרוסקופית וסמל.

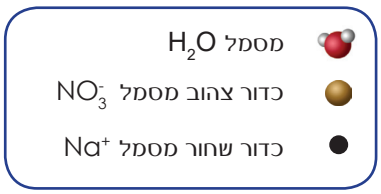
תשובה מפורטת

תיאור התהליך על פי שלוש רמות הבנה בכימיה

1. ברמה **מאקרוסקופית** – אנו רואים, כי החומר המוצק כביכול "נעלם". כמו כן, ניתן לראות מהגרף שהטמפרטורה הנמדדת בתמיסה יורדת ואחר כך חוזרת לטמפרטורה ההתחלתית.
2. ברמה **מיקרוסקופית** – נוכל לומר, כי המוצק שהוכנס הוא חומר יוני המכיל יונים חיובים של נתרן Na^+ ויונים שליליים חנקתיים NO_3^- הקשורים אלה לאלה בקשרים יוניים, תוך כדי יצירת סריג בעל מבנה ענק של קטיונים מוקפים אניונים וההיפך. היונים נעים בתנודות בלבד. המים שאליהם הוכנס המוצק הם נוזל המורכב ממולקולות קוטביות. בין המולקולות קיימים קשרי מימן הנוצרים בין מימן חשוף מאלקטרונים למולקולת מים אחת, לזוג אלקטרונים לא קושר על אטום חמצן במולקולת מים סמוכה. המולקולות נעות בתנודות וסיבוב. מתקבלת תמיסה המכילה את היונים הנ"ל כאשר כל יון חיובי מוקף בקטבים השליליים של מולקולות המים (אטומי החמצן) וכל יון שלילי מוקף בקטבים החיוביים של המים (אטומי המימן. בין מולקולת המים ליונים קיימת משיכה חשמלית. בין מולקולות המים לבין עצמן קיימים קשרי מימן. המולקולות והיונים צפופים במידה מעטה יחסית למוצק ונעים בתנודות וסיבוב.
3. ברמת הסמל – ניתן להשתמש בניסוח בעזרת סמלים כימיים וכן אפשר להוסיף גם ציור המתאר את שינוי המבנה הגבישי ליונים ממוימים.



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



שאלות

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

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

1. הציגו את הרשום לעיל בשני 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, $C_2H_5OH_{(l)}$, בתהליך תסיסה המתואר בניסוח הבא:

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

את האתאנול ניתן לערבב עם בנזין המכיל בעיקר דלק אוקטאן, $C_8H_{18\ (l)}$, ולמכור לצרכנים.

בארה"ב פועלות כיום מעל 3000 תחנות דלק 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, $C_2H_5OH_{(l)}$, ושל אוקטאן, $C_8H_{18(l)}$.

ד. הסבירו מדוע אתאנול מתערבב 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? נמקו.

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

7. קראו את הקטע הבא וענו על השאלות בעקבותיו.

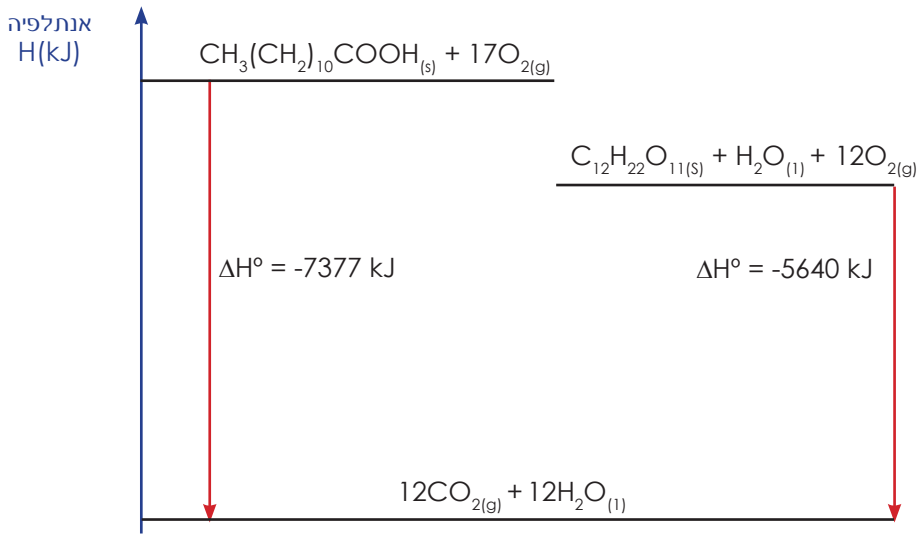
כימיה ואדר הכושר - מה הקשר?

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 הפלמיטית, $CH_3(CH_2)_{14}COOH$. 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: $\Delta H° = -9977\ kJ$ $\quad CH_3(CH_2)_{14}COOH_{(s)} + 23O_{2(g)} \rightarrow 16CO_{2(g)} + 16H_2O_{(l)}$

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. הסתמכו על הנתונים בשאלה ובדקו 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.

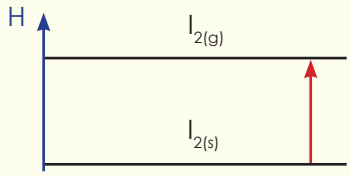
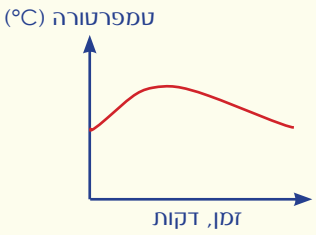
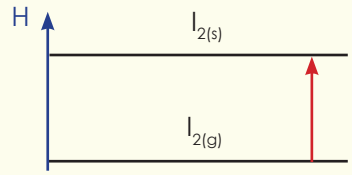
8. השאלה דנה בתגובת השריפה המלאה של סוכרוז $C_{12}H_{22}O_{11\,(s)}$.

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

10. 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, $C_3H_5N_3O_{9(l)}$, 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 בעיתות שלום, אך גם במלחמה.

הדינמיט שהוזכר וטרינִיטרוטולואן (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:

chem matters פברואר 2003

חומרי נפץ – 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 מוזכרים בקטע הנ"ל?

פרק ב

שינויי אנרגיה בתגובות כימיות

- 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?

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

מבוא

הניסיון שלנו מלמד, כי שריפת גפרור ושריפת עצים במדורה הם תהליכים אקסותרמיים. 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 ליבשו כפפות והקפידו על חדר אוורור

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.
- רשמו תצפיותיכם בטבלה.

שאלות בעקבות הניסוי

1. מהו סוג התגובה (אנדותרמית או אקסותרמית) אשר התרחשה בכל אחת מהשקיות?
2. היעזרו בנתונים הרשומים על כל אחת מהשקיות 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

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.

שיטה ניסויית היא שיטה המתבססת על ביצוע התגובה המבוקשת, איסוף נתונים במהלך הניסוי, ועריכת חישובים המבוססים על ממצאי הניסוי. **זוהי העשרה לצורך ביצוע ניסויים במבנית מעבדת החקר.**

חישובים מראים, כי ההבדל בין שינויים באנתלפיה (ΔH^{o}) של אותה תגובה המתרחשת בטמפרטורות שונות, אינו גדול, ובהעדר מידע אחר אפשר להניח שערכו של ΔH^{o} קבוע ואינו משתנה עם הטמפרטורה, כל עוד מצבי הצבירה של החומרים אינם משתנים.

חישוב השינוי באנתלפיה התקנית של תגובה בעזרת חוק הס

היות שאנתלפיה 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^o 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^o עבור התגובות האחרות:

$$A+B \rightarrow \cancel{C}+\cancel{D} \qquad \Delta H^o_1$$
$$\cancel{C}+\cancel{D} \rightarrow \cancel{E}+\cancel{F} \qquad \Delta H^o_2$$
$$\cancel{E}+\cancel{F} \rightarrow G+M \qquad \Delta H^o_3$$

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^o של שלוש התגובות הנתונות, שווה לערכו של ΔH^o עבור התגובה המבוקשת.

כלומר:

$$\Delta H^o = \Delta H^o_1 + \Delta H^o_2 + \Delta H^o_3$$

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^o של אותן תגובות כדי לקבל את ערכו של ΔH^o עבור התגובה המבוקשת.*

ניתן לנסח זאת גם באופן הבא:

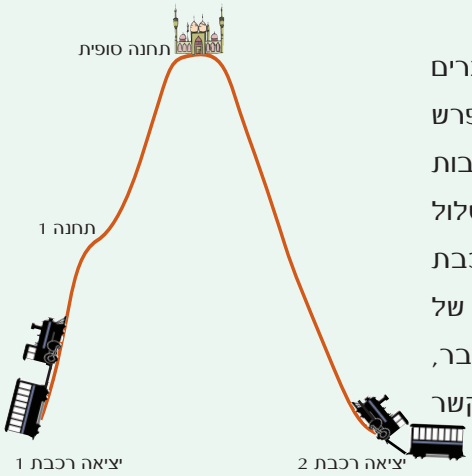
ההפרש באנתלפיית התגובה הוא קבוע ואינו תלוי במספר השלבים בהם התגובה מתבצעת.

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 $\Delta H°$ עבור תגובה חדשה, שלא ניתן לבצעה או שבביצועה יש סיכון. החישוב נעשה באמצעות שימוש בניסוח תגובות נתונות ובערכי $\Delta H°$ 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 $\Delta H°$ של התגובה:

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

בעזרת ערכי $\Delta H°$ עבור שתי תגובות אחרות:

$$(2)\ \tfrac{1}{2}N_{2(g)} + \tfrac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow NO_{(g)} \qquad \Delta H°_2 = +90.4\ kJ$$

$$(3)\ NO_{(g)} + \tfrac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow NO_{2(g)} \qquad \Delta H°_3 = -57.2\ kJ$$

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 הניסוחים 2-3 נוכל למחוק אותו.

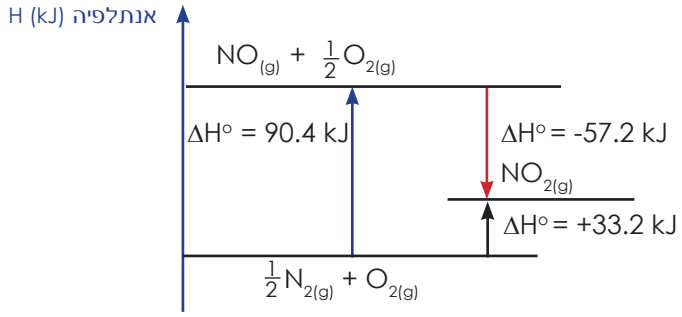
חישוב ערכו של $\Delta H°$ לתגובה 1 ייעשה על ידי **סיכום** ערכי $\Delta H°$ הנתונים לתגובות 2 ו-3 כפי שרואים להלן:

(2) $\frac{1}{2}N_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow \cancel{NO}_{(g)}$ $\Delta H^\circ_2 = +90.4$ kJ

(3) $\cancel{NO}_{(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow NO_{2(g)}$ $\Delta H^\circ_3 = -57.2$ kJ

(1) $\frac{1}{2}N_{2(g)} + O_{2(g)} \rightarrow NO_{2(g)}$ $\Delta H^\circ_1 = +33.2$ 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) $2NO_{(g)} + O_{2(g)} \rightarrow 2NO_{2(g)}$ $\Delta H^\circ_{2a} = -57.4 \times 2 = -114.4$ 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: $2NO_{2(g)} \rightarrow N_2O_{4(g)}$ $\Delta H^\circ_{1a} = -57.2\ kJ$ (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 המבוקש:

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

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

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

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

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

4. לפניכם ניסוחי תגובות ונתוני האנתלפיות שלהן:

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

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

חשבו את ΔH° עבור התגובה הבאה:

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

5. לפניכם ניסוחי תגובות ונתוני האנתלפיות שלהן:

(1) $MgCO_{3(S)} \rightarrow MgO_{(s)} + CO_{2(g)}$ $\Delta H^\circ = 117.7$kJ

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

(3) $Mg_{(s)} + C_{(s)} + \frac{3}{2} O_{2(g)} \rightarrow MgCO_{3(S)}$ $\Delta H^\circ = 1112.9$kJ

חשבו מתוך הנתונים את השינוי באנתלפיה, ΔH°, של התגובה:

(4) $Mg_{(s)} + \frac{1}{2} O_{2(g)} \rightarrow MgO_{(S)}$

6. נתונים הערכים הבאים:

(1) $HCOOH_{(1)} \rightarrow CO_{(g)} + H_2O_{(1)}$ $\Delta H^\circ = 14.0$kJ

(2) $C_{(s)} + H_{2(g)} + O_{2(g)} \rightarrow HCOOH_{(1)}$ נתונים: $\Delta H^\circ = -410.8$ kJ

(3) $H_{2(g)} + \frac{1}{2} O_{2(g)} \rightarrow H_2O_{(1)}$ $\Delta H^\circ = -285.9$ kJ

חשבו את ΔH° עבור התהליך הבא:

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

הרכיבו משקפי מגן לבשו כפפות והקפידו על חדר נורוואמ

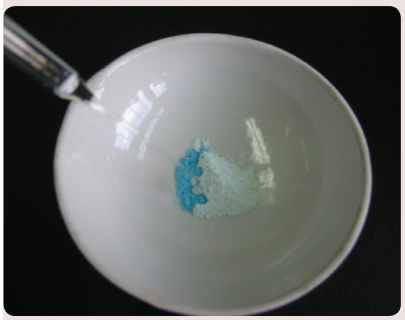
ניסוי 2 - ממציבים לתוצרים ואם בכיוון הפוך!

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 $CuSO_4 \cdot 5H_2O_{(s)}$



מהלך הניסוי - (הקפידו לא לשאוף את האבקה!)

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

במבחנות 1-2 יש כ-0.5 גרם של $CuSO_{4(s)}$.

במבחנות 3-4 יש כ-0.5 גרם של 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 לשלוש 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? תארו את המתרחש ברמה המאקרוסקופית וברמת הסמל. תארו את המגיבים ואת התוצרים ברמה מיקרוסקופית.
5. מה תוכלו להסיק מניסוי זה על שינויי אנתלפיה בתגובות הפוכות?
6. הגישו דו"ח הכולל תשובות לשאלות הנ"ל.

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 $NaCH_3COO_{(s)}$ מתוך תמיסה רוויה ביתר[1], המכילה יוני נתרן $Na^+_{(aq)}$ ויוני אצטאט $CH_3COO^-_{(aq)}$.

ניסוח התגובה המתרחשת:

$$Na^+_{(aq)} + CH_3COO^-_{(aq)} \rightarrow NaCH_3COO_{(s)}$$

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: $NaCH_3COO_{(s)} \rightarrow Na^+_{(aq)} + CH_3COO^-_{(aq)}$ 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° 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) וסמל (ניסוח התגובה).
2. מסה מסוימת של מים הוכנסה לקומקום חשמלי וחוממה עד לרתיחה. מה קורה כאשר המים רותחים? התייחסו בתשובתכם לשלוש רמות ההבנה בכימיה.

תהליכי היתוך

תהליכי היתוך 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: $\Delta H°_m$. האות m מסמלת היתוך m-melting.

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

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

? תוכלו להסביר מדוע אנתלפיית היתוך של מים גבוהה משל אמוניה?

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:

$\Delta H°_b$ או $\Delta H°_v$ כאשר האותיות מסמלות: v-vaporization, b-boiling.

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

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

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

$$C_2H_5OH_{(l)} \rightarrow C_2H_5OH_{(g)} \qquad \Delta H°_b = 38.56\ kJ$$

? תוכלו להסביר מדוע אנתלפיית האידוי של מים גבוהה משל אתאנול?

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)

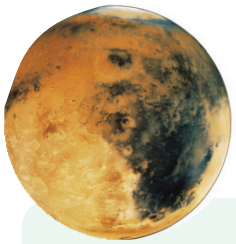
תהליכי המראה הם תהליכים בהם מתרחש מעבר בין מצב צבירה מוצק למצב צבירה גז. ניתן לחשב את אנתלפיית ההמראה של חומרים, תוך שימוש בחוק הס, כאשר ידועות אנתלפיות ההיתוך והאידוי של החומר באותה טמפרטורה.

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 שינוי אנתלפיה במהלך שינויים 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. *אדי מים גורמים לכוויה קשה יותר מזו שגורמים מים רותחים כאשר הם באותה מסה. האם תוכלו להסביר זאת? כיצד קשורה תופעה זו לאנתלפיית האידוי של מים?

5. תגובת "התרמיט" הינה תגובה אקסותרמית המשמשת לריתוך תת-מימי. המגיבים בתגובה הם ברזל חמצני, $Fe_2O_{3(s)}$, ואלומיניום, $Al_{(s)}$. התוצרים הם: אלומיניום חמצני, $Al_2O_{3(s)}$, וברזל, $Fe_{(s)}$

לפניכם ניסוח התגובה:

(1) $2Al_{(s)} + Fe_2O_{3(s)} \rightarrow 2Fe_{(s)} + Al_2O_{3(s)}$

בנוסף נתונות תגובות נוספות:

(2) $2Fe_{(s)} + 1\frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow Fe_2O_{3(s)}$ $\Delta H^\circ_2 = -822.2$ kJ

(3) $2Al_{(s)} + 1\frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow Al_2O_{3(s)}$ $\Delta H^\circ_3 = -1675.7$ kJ

א. חשבו את שינוי האנתלפיה בתגובה (1), ΔH°_1.

ב. מהי כמות האנרגיה שתפלט בתגובה שבה יגיבו 108 ק"ג אלומיניום $Al_{(s)}$, בתגובה הנ"ל? פרטו את חישוביכם.

ג. נתון כי בניסוי מסוים התרחשה תגובת "התרמיט" ונפלטה אנרגיה של 1707 קילוג'אול. חשבו מהי מסת הברזל שנוצרה בתגובה זו. פרטו את חישוביכם.

6. לפניכם שלושה תהליכים אקסותרמיים. מהו התהליך שבו **תיפלט** כמות האנרגיה הגדולה ביותר? נמקו תוך שימוש בדיאגרמת רמות אנרגיה.

(1) $N_2H_{4(l)} + O_{2(g)} \rightarrow N_{2(g)} + 2H_2O_{(l)}$

(2) $N_2H_{4(g)} + O_{2(g)} \rightarrow N_{2(g)} + 2H_2O_{(l)}$

(3) $N_2H_{4(g)} + O_{2(g)} \rightarrow N_{2(g)} + 2H_2O_{(g)}$

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, $\Delta H°$, בעזרת אנתלפיות קשר היא שיטה המתאימה רק לתגובות בהן המרכיבים הם חומרים מולקולריים **במצב גזי**. חומרים אלו בנויים ממולקולות רוב הזמן הן מרוחקות ולכן האינטראקציות שביניהן חלשות. לכן, ניתן להתייחס אל השינוי באנתלפיה של התגובה כאל סיכום כולל של פירוק ויצירה של קשרים קוולנטיים.

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

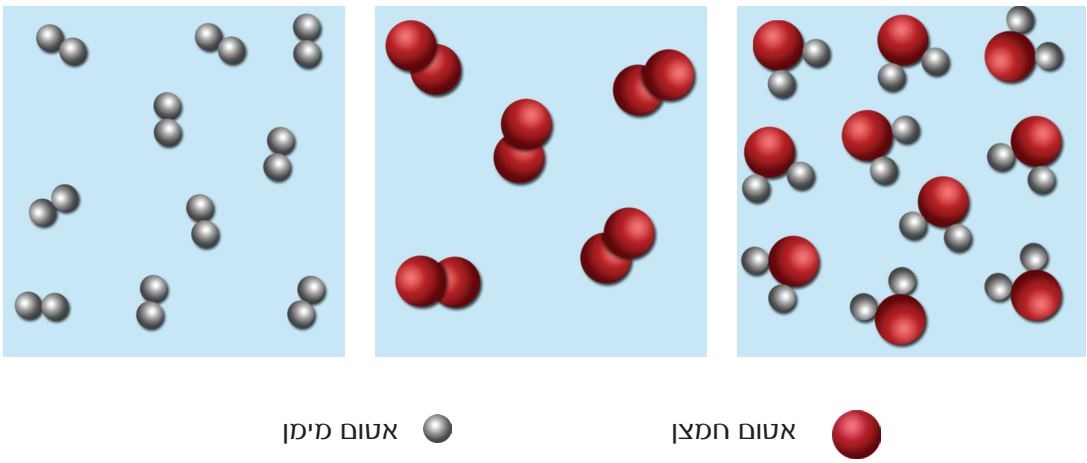
לכלי סגור הוכנסו שני גזים מימן וחמצן. הכלי על כל תכולתו שקוף וחסר צבע. מעבירים ניצוץ חשמלי בכלי. נשמע קול נפץ ומופיעה טיפת נוזל צלול וחסר צבע (רמה מאקרוסקופית).

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

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

באיור 1 אנו רואים בעזרת סמלים (מודלים) 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. אילו היבטים כמותיים מיוצגים באיור?
3. אילו 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 קיימים בין האטומים במולקולות **המגיבים**.

שלב שני – **יצירת** מולקולות התוצרים מהאטומים הבודדים כשהם במצב צבירה גזי. בשלב זה, נוצרים כל הקשרים הקוולנטים אשר קיימים בין האטומים במולקולות **התוצרים**.

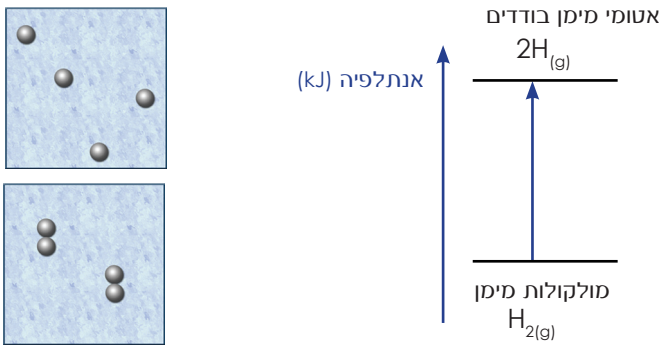
נמשיך לבחון את התגובה בה מתקבלים מים מהיסודות מימן וחמצן.

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.**

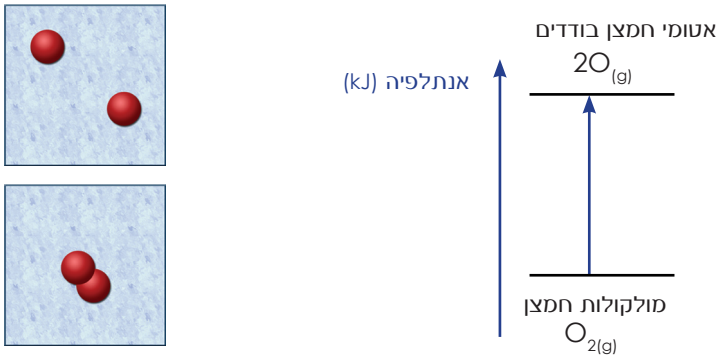
נתאר זאת באופן סכמטי, באיור 2. (מספרי החלקיקים הם רק להמחשה ולהדגשת היחס הסטויכיומטרי במהלך התגובה ואינם מייצגים את המספר האמיתי של החלקיקים).

איור 2 – פירוק מולקולות המגיבים לאטומים בודדים

א. פירוק מולקולות המימן

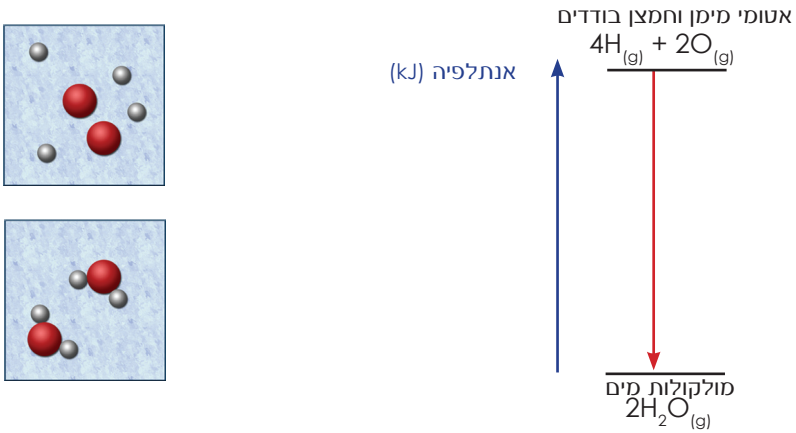


ב. פירוק מולקולות החמצן



השלב השני הוא השלב בו נוצרים קשרים קוולנטים חדשים, קשרים המרכיבים את מולקולות המים, $H_2O_{(g)}$, מאטומי המימן והחמצן הבודדים. 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



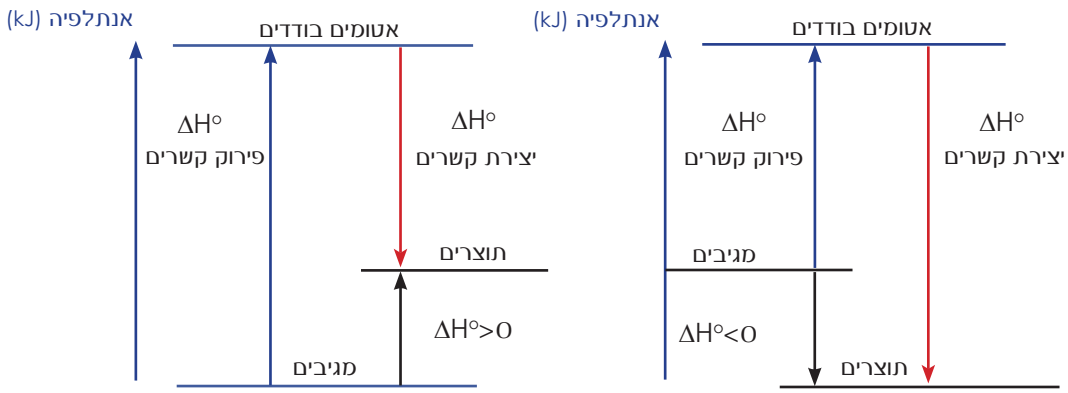
על מנת לדעת מהו שינוי האנתלפיה ΔH° לתגובה הכוללת, עלינו לסכם את שינויי האנתלפיה במהלך פירוק הקשרים הקוולנטים המצויים במגיבים ואת שינויי האנתלפיה במהלך יצירת הקשרים הקוולנטים החדשים המצויים בתוצרים.

סכום האנרגיה הדרושה לפירוק הקשרים בין האטומים במגיבים (בסימן +) והאנרגיה הנפלטת ביצירת הקשרים בין האטומים בתוצרים (בסימן –) שווה לשינוי האנתלפיה בתגובה הכוללת.

ייתכנו שני מקרים:

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

איור 4 – פירוק ויצירת קשרים בתגובות כימיות



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

בטבלה הבאה מוצגים נתונים על מספר סוגי קשרים.

	סוג הקשר	אנתלפיית הקשר (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:

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

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:

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

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

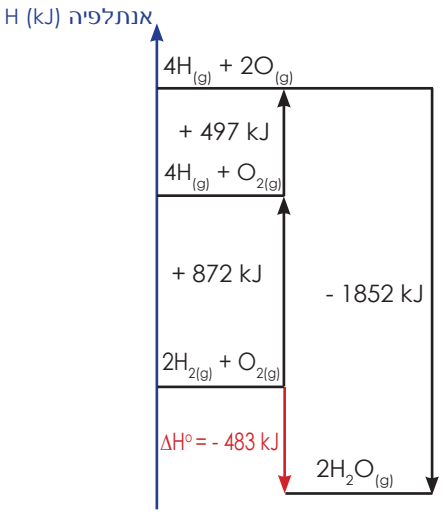
נוכל לומר כי שינוי האנתלפיה ΔH° הוא סכום של: אנתלפיות הקשר של פירוק הקשרים במגיבים (תהליכים אנדותרמים ולכן מסומנים בסימן +) עם אנתלפיות הקשר של הקשרים הנוצרים בתוצרים (תהליכים אקסותרמיים ולכן מסומנים בסימן -).

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

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

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

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 מציאת ΔH° בעזרת אנתלפיות קשר

נתונה טבלה המכילה נתונים על מספר סוגי קשרים

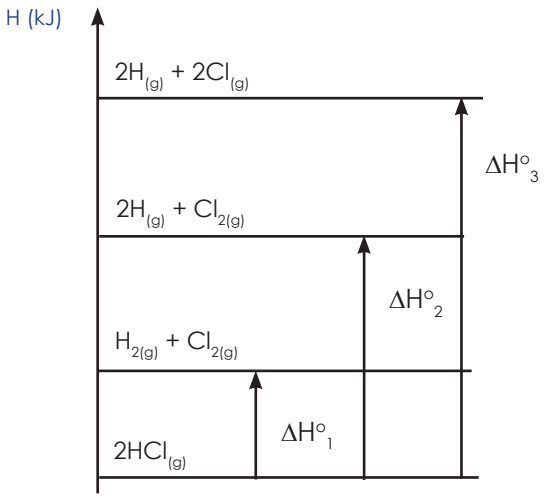
סוג הקשר	אנתלפיית הקשר (kJ/mol)
N-H	391
N≡N	945
N-N	163
H-H	436

היעזרו בטבלת הנתונים על אנתלפיות הקשר 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 הידרזין $N_2H_{4(g)}$ מחנקן ומימן.
2. רשמו את נוסחאות המבנה לאמוניה ולהידרזין.
3. חשבו את ערכו של ΔH° לקבלת אמוניה.
4. חשבו את ערכו של ΔH° לקבלת הידרזין.
5. תארו באופן גרפי את שינוי האנתלפיה לשתי התגובות הנ"ל. השתמשו באותה מערכת צירים.

שאלות נוספות בנושא מציאת ΔH° בעזרת אנתלפיות קשר

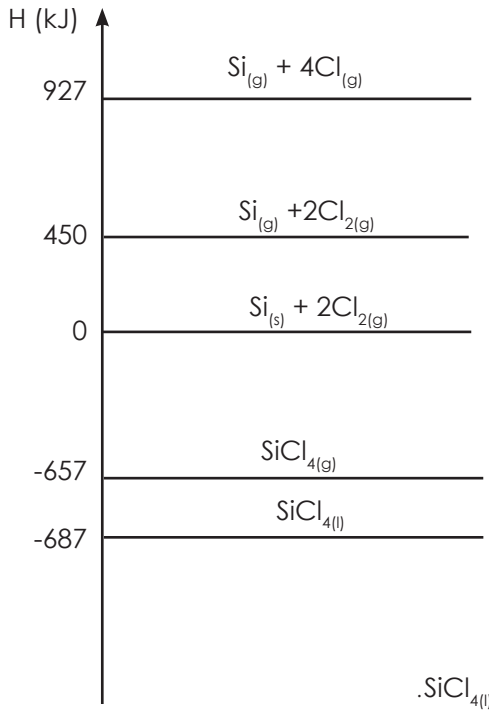
1. נתונה הדיאגרמה הבאה:



איזה מבין הביטויים הבאים מייצג את אנתלפיית הקשר Cl–Cl?

א. $\Delta H^\circ_2 - \Delta H^\circ_1$ ב. ΔH°_2 ג. $\Delta H^\circ_3 - \Delta H^\circ_2$ ד. ΔH°_3

2. נתונה הדיאגרמה הבאה:



א. נסחו את תהליך האידוי של $SiCl_{4(l)}$.

ב. התייחסו לנתונים בדיאגרמה וחשבו את אנתלפיית האידוי של $SiCl_{4(l)}$. פרטו את חישוביכם.

ג. נסחו את התגובה המתאימה לניתוק הקשר הקוולנטי Si-Cl.

ד. חשבו את אנתלפיית הקשר הממוצעת Si-Cl. פרטו את חישוביכם.

ה. הסבירו את ההבדלים בין ערכי אנתלפיית האידוי של $SiCl_{4(l)}$ לבין אנתלפיית הקשר Si-Cl.

3. ניתן לקבל $CH_3Cl_{(g)}$ ממתאנול $CH_3OH_{(g)}$ בנוכחות $HCl_{(g)}$. תוצר נוסף בתגובה הם אדי מים, $H_2O_{(g)}$.
לפניכם ניסוח התגובה:

$$CH_3OH_{(g)} + HCl_{(g)} \rightarrow CH_3Cl_{(g)} + H_2O_{(g)}$$

לרשותכם הנתונים הבאים:

הקשר	O-H בכהל	O-H במים	H-Cl	C-H	C-Cl	C-O
אנתלפיית הקשר(kJ/mol)	437	463	431	413	346	358

א. שרטטו נוסחת מבנה למולקולות של כל אחד מהחומרים המופיעים בתגובה.

ב. קבעו מהם הקשרים הניתקים ומהם הקשרים הנוצרים.

ג. חשבו את אנתלפיית התגובה. פרטו את חישוביכם.

ד. באחד הימים התרחשה התגובה בתנאים שבהם התקבלו מים במצב צבירה נוזל, $H_2O_{(l)}$. האם בתנאים אלו תוכלו לחשב את האנתלפיה של התגובה? אם כן, חשבו אותה. אם לא, איזה נתון נוסף חסר לכם לצורך החישוב? נמקו.

4. לפניכם ניסוח של שתי תגובות הידרוגנציה (סיפוח מולקולת מימן לאטומי הפחמן משני צידי הקשר הכפול):

$$(1)\ \underset{\text{אתן}}{CH_2=CH_2} + H_2 \xrightarrow{Pt} \underset{\text{אתאן}}{CH_3-CH_3}$$

$$(2)\ \underset{\text{פרופן}}{CH_3-CH=CH_2} + H_2 \xrightarrow{Pt} \underset{\text{פרופאן}}{CH_3-CH_2-CH_3}$$

(כל החומרים במצב צבירה גז)

נתון כי $\Delta H°_1 = -126kJ/mol$ מה יהיה ערכו של $\Delta H°_2$ עבור תגובה (2)? נמקו.

5. קבוצת חוקרים בקשה לבצע ניסוי שבאמצעותו יוכלו לחשב מהי אנתלפיית הקשר הממוצעת P-Br. כדי לקבוע אנתלפיה זו, החוקרים ביצעו את הניסוי הבא: הגיבו 0.68 גרם של $PH_{3(g)}$ עם מסה מתאימה של $Br_{2(g)}$. התרחשה התגובה שניסוחה: $PH_{3(g)} + 3Br_{2(g)} \rightarrow PBr_{3(g)} + 3HBr_{(g)}$

בניסוי נפלטה אנרגיה של 7.08kJ.

א. חשבו $\Delta H°$ (למול אחד של $PH_{3(g)}$) עבור התגובה. פרטו את חישוביכם

לפניכם נתונים של אנתלפיות קשר:

הקשר	P-H	Br-Br	H-Br
אנתלפיית הקשר(kJ/mol)	322	197	363

ב. 1. חשבו את אנתלפיית הקשר הממוצעת P-Br. פרטו את חישוביכם.

2. שרטטו גרף המתאר את שבירת הקשרים ויצירת הקשרים בתגובה הנתונה. פרטו את כל הערכים המספריים הרלוונטיים.

בניסוי שני, החוקרים הגיבו 0.68 גרם של $PH_{3(g)}$ עם מסה מתאימה של $Br_{2(l)}$.

כתוצאה מכך נוצרו $PBr_{3(g)}$ וגם $HBr_{(g)}$.

ג. האם כמות האנרגיה שנפלטה בניסוי השני, גדולה, קטנה או שווה לכמות האנרגיה שנפלטה בניסוי הראשון? **נמקו תוך שימוש בשרטוט דיאגרמת אנרגיה מתאימה.**

ד. האם ניתן לחשב את אנתלפיית התגובה המתרחשת בניסוי השני בעזרת אנתלפיות קשר בלבד? אם לא, אילו נתונים חסרים? נמקו.

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

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

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

היעזרו בנתוני השאלה ומצאו מהי אנתלפיית הקשר C-C.

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

ידוע כי: אנתלפיית הקשר S-S שווה ל- 265 kJ/mol, אנתלפיית הקשר H-H שווה ל-436 kJ/mol ואנתלפיית הקשר H-S שווה ל-368 kJ/mol. גופרית S_8 בנויה ממולקולות טבעתיות.

ב. חשבו את ערכו של $\Delta H°$ לתגובה שניסחתם בסעיף הקודם.

ג. חשבו מהי כמות האנרגיה אשר תיפלט לסביבה, או תיקלט ממנה, כאשר 2.56 גרם גופרית S_8, במצב **גזי** מגיבים עם מסה 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 מסה מתאימה של מימן ויוצרים מימן גופרי $H_2S_{(g)}$, היא גדולה, קטנה או שווה לכמות האנרגיה אשר חישבתם בסעיף ג? נמקו.

חישוב השינוי באנתלפיית התגובה באופן ניסויי – העשרה

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 נפלטת אנרגיה העשויה לחמם את הסביבה, וכן תגובות אנדותרמיות, שבהן מועברת אנרגיה מהסביבה אל המערכת.

נדון כעת בדרך המאפשרת לחשב את **כמות** האנרגיה העוברת.

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 מסת הנוזל שיש לחמם. ככל שמסת הנוזל גדולה יותר, האנרגיה הדרושה לחימומו גדולה יותר.

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

הגורם השלישי הוא שינוי טמפרטורת 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, T_1. הפרש הטמפרטורות מחושב לפי הנוסחה: $\Delta T = T_2 - T_1$.

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

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

1 במהלך חישובינו 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 מ"ל. מסת המים = 2000 גרם (צפיפות המים בטמפרטורה של 25°C היא קרובה ל-1 גרם לסמ"ק, ולכן מספר הגרמים שווה למספר המיליליטרים).

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

$\Delta T = 75°C$

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

ניתן להשתמש בקשר זה על מנת לחשב את שינוי האנתלפיה, $\Delta H°$, 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, $\Delta H°$, 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:

$Q = n \times \Delta H°$

סימנים הפוכים

הסביבה

בעת התרחשות תגובה במערכת, אנרגיה Q נקלטת על ידי הסביבה או הולכת לאיבוד מהסביבה לטובת המערכת.

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 הולכת לאיבוד בסביבה 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.

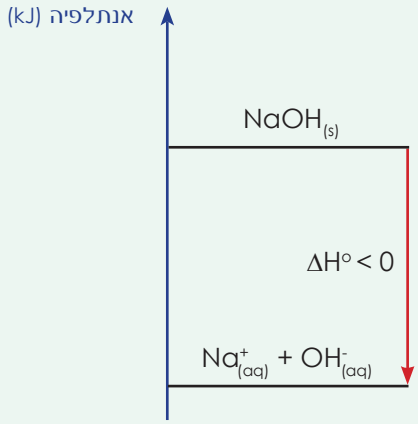
- על פי ההגדרה, ΔH° הוא שינוי האנתלפיה במהלך תגובה על פי הניסוח הנתון (בתגובות רבות מתייחסים למול אחד של מגיב), ואילו Q מתייחס למספר המולים שהגיבו **בפועל** בניסוי מסוים.
- סימנם של Q סביבה ושל ΔH° מערכת הם סימנים הפוכים, היות שהאחד מציין את כמות האנרגיה אשר המערכת פלטה או קלטה, ואילו השני מציין את כמות האנרגיה אשר הסביבה קלטה או איבדה, 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 המגיב, $NaOH_{(s)}$, 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/מ"ל 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: $c = 4.18 J/gr\times°C$ (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 $\Delta H°$, עלינו לחשב את מספר המולים אשר הגיבו בניסוי.

נתון, כי הגיבו 2 גרם $NaOH_{(s)}$ המהווים 0.05 מול מגיב. כלומר, כאשר המסה 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 $\Delta H°$. כאמור, הסימן השלילי מורה כי יש ירידה באנרגיה הפנימית של המערכת כתוצאה ממעבר אנרגיה לסביבה. בקירוב,

$\Delta H° = -43.5\ kJ$

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	$\Delta H°$		

1. כיצד תסבירו את תוצאות החישוב של Q בשני הניסויים?
2. כיצד תסבירו את תוצאות החישוב של $\Delta H°$ בשני הניסויים?

ניסוי 4 - מאיכותי לכמותי

הרכיבו משקפי מגן ליבשו כפפות והקפידו על חדר מאוורר

חומרים וציוד לקבוצת תלמידים או להדגמה

נתרן הידרוכסידי $NaOH_{(s)}$, אמוניום חנקתי, $NH_4NO_{3(s)}$, וציוד על פי הביקוש בעקבות התכנון.

מהלך הניסוי

בפרק א בניסוי 4 ערכתם ניסוי, בו המסתם במים שני מוצקים $NaOH_{(s)}$ ו- $NH_4NO_{3(s)}$ בשני כלים נפרדים. גיליתם, כי תהליך המסת $NaOH_{(s)}$ במים הוא תהליך אקסותרמי ואילו תהליך המסת $NH_4NO_{3(s)}$ במים הוא תהליך אנדותרמי. בניסוי זה התבססתם על השינוי בטמפרטורה על מנת לקבוע את **סימנו** של $\Delta H°$.

מטרת הניסוי כאן, היא לחשב את **ערכו** של $\Delta H°$ 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	נפח מים לא מדוד	נפח מדוד 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 $\Delta H°$ עבור כל אחת מתגובות ההמסה.
2. בצעו את הניסוי שתכננתם.
3. חשבו את ערכו של $\Delta H°$ לכל אחת מהתגובות הנ"ל.

הרכיבו משקפי מגן והקפידו על חדר מאוורר

ניסוי 5 - מישור קיבול אנרגיה סגולי של בדיל

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 הניסוי

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 קיבול 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 הניסוי

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 של בדיל.
3. השוו את הערך הנמדד לערך הספרותי והציעו אפשרויות לשגיאה בניסוי הנ"ל.

שאלות לסיכום פרקים א ו- ב

1. א. השלימו בטבלה את ניסוחי התגובות.

החומר	תגובה מספר	ניסוח תגובת השריפה מלאה	ΔH° השינוי באנתלפיה בתגובת השריפה המלאה (kJ/mol)
מימן $H_{2(g)}$	1		-285.5
פרופין $C_3H_{4(g)}$	2		-1937
פרופאן $C_3H_{8(g)}$	3		-2219

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

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

2. בשני מיכלים מקלקר עבה נמצאת מסה 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 הנמצאים על סף רתיחה, 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 התייחסות לרמה המאקרוסקופית ולרמת הסמל.

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 מי 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

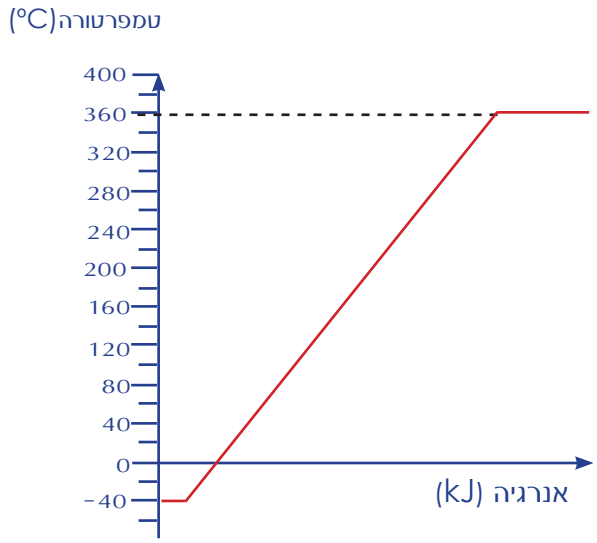
3. לתוך כוס מבודדת המכילה 100 מ"ל מים מזוקקים בטמפרטורת החדר 25°C, הוכנסו 10 גרם קרח בטמפרטורה של 0°C.

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

ב. מהו כיוון מעבר האנרגיה במהלך הניסוי?

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

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 או נמוכה 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?

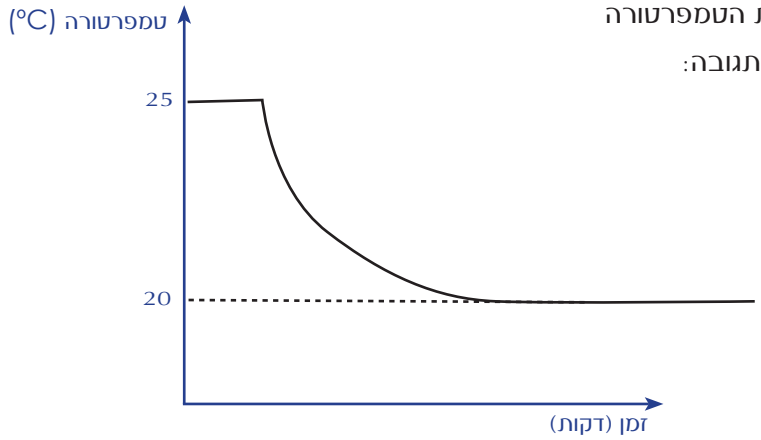
ה. מהם הנתונים הנחוצים לציור גרף מדויק עבור חומר אחר, B?

5. מבצעים שני ניסויים עם החומר $KNO_{3(s)}$. בתנאי החדר הוא מוצק לבן, בצורת גרגירים.

בניסוי 1 ממיסים 2.02 גרם $KNO_{3\,(s)}$ ב-100 גרם מים.

הגרף הנתון מתאר את השתנות הטמפרטורה

של המים במהלך התרחשות התגובה:



נתון ניסוח עבור תהליך ההמסה במים של $KNO_{3(s)}$.

$$KNO_{3(S)} \xrightarrow{H_2O_{(1)}} K^+_{(aq)} + NO_3^-{}_{(aq)}$$

א. ציינו מהי המערכת ומהי הסביבה.

ב. כיצד משתנה האנרגיה הקינטית הממוצעת של מולקולות המים? הסבירו.

ג. האם הכלי שבו מוחזקים המים פתוח, סגור או מבודד? הסבירו תשובתכם תוך הסתמכות על הגרף.

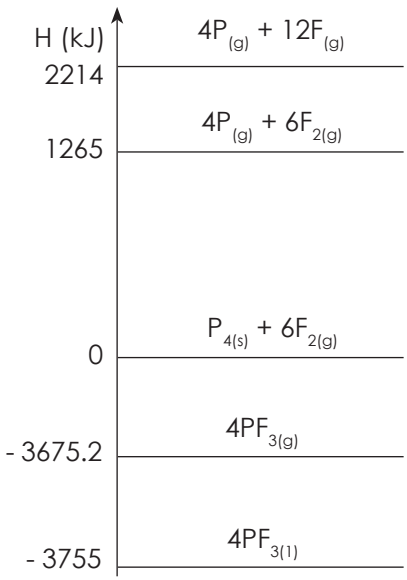
ד. האם התגובה אנדותרמית או אקסותקמית? הסבירו תשובתכם תוך הסתמכות על הגרף.

בניסוי 2 ממיסים 1.01 גרם $KNO_{3(s)}$ ב- 100 גרם מים.

ה. האם $\Delta H°$ של התגובה בניסוי 2 גדול, קטן או שווה ל- $\Delta H°$ של התגובה בניסוי 1? נמקו.

ו. האם הטמפרטורה הסופית של המים בתום ניסוי 2, תהיה נמוכה, גבוהה, או שווה ל-20 מעלות צלזיוס? נמקו.

6. נתונה הדיאגרמה הבאה:



א. חשבו את אנתלפיית הקשר הממוצעת P-F. פרטו את חישוביכם.

ב. חשבו את אתלפיית האידוי של PF_3. פרטו את חישוביכם.

ג. חשבו את אתלפיית הקשר הממוצעת F-F. פרטו את חישוביכם.

ד. מהו $\Delta H°$ לתהליך: $\frac{1}{4}P_{4(s)} \rightarrow P_{(g)}$? פרטו את חישוביכם.

7. בטבלה שלפניכם מוצגים ערכים של אנתלפיות קשר:

הקשר	אנרגיית הקשר (kJ/mol)
C=C	610
C-C	346
H-C	413
H-H	436

א. חשבו את שינוי האנתלפיה בתגובה: $CH_3\text{-}CH\text{=}CH\text{-}CH_{3(g)} + H_{2(g)} \rightarrow CH_3\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}CH_{3(g)}$

ב. האם שינוי האנתלפיה בתגובה: $C_3H_{6(g)} + H_{2(g)} \rightarrow C_3H_{8(g)}$ גדול, קטן או שווה לשינוי האנתלפיה שחישבתם בסעיף א'? נמקו ללא חישובים.

8. השאלה דנה בתגובת שריפה של אתאנול, $C_2H_5OH_{(l)}$.

נתון:

(1) $C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)}$ $\Delta H^o = -393.5\ kJ/mol$

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

(3) $2C_{(s)} + 3H_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow C_2H_5OH_{(l)}$ $\Delta H^o = -277.0\ kJ/mol$

א. חשבו את שינוי האנתלפיה של תגובה מספר 4, ΔH^o_4. פרטו את חישוביכם

(4) $C_2H_5OH_{(l)} + 3O_{2(g)} \rightarrow 2CO_{2(g)} + 3H_2O_{(g)}$ $\Delta H^o_4 = ?$

לאידוי 23 גרם אתאנול דרושים 21.16 קילוג'אול.

ב. 1. נסחו את תהליך האידוי של האתאנול. סמנו תהליך זה כתהליך 5.

2. חשבו מהי אנתלפיית האידוי של האתאנול, פרטו את חישוביכם.

נתונה התגובה 6:

(6) $C_2H_5OH_{(g)} + 3O_{2(g)} \rightarrow 2CO_{2(g)} + 3H_2O_{(g)}$ $\Delta H^o_6 = ?$

ג. חשבו מהו ΔH^o של תגובה 6, פרטו חישוביכם ונמקו בעזרת התגובות המתאימות.

בטבלה שלפניכם רשומות אנתלפיות של מספר קשרים:

הקשר	אנרגיית הקשר (kJ/mol)
C-O	358
O-H (באתאנול)	437
O=O	497
C=O	803
O-H (במים)	463
C-C	346

ד. 1. פרטו בטבלה את הקשרים הנשברים והקשרים הנוצרים בתגובה 6.

2. הסתמכו על נתוני השאלה ועל הנתונים שבטבלה, חשבו מהי אנתלפיית הקשר הממוצעת C-H במולקולת אתאנול C_2H_5OH, פרטו את חישוביכם.

3. שרטטו דיאגרמה המתארת את המגיבים, התוצרים, ושינוי האנתלפיה בתגובה 6, כולל המצב של אטומים בודדים.

ה. לפניכם שלושה תהליכים אקסותרמיים. בכולם שרפו אתאנול. באיזה מהם נפלטת כמות האנרגיה הגדולה ביותר? היעזרו בדיאגרמת אנרגיה כדי לנמק תשובתכם. (אין צורך להוסיף נימוק מילולי)

(1) $C_2H_5OH_{(g)} + 3O_{2(g)} \rightarrow 2CO_{2(g)} + 3H_2O_{(l)}$

(2) $C_2H_5OH_{(l)} + 3O_{2(g)} \rightarrow 2CO_{2(g)} + 3H_2O_{(g)}$

(3) $C_2H_5OH_{(s)} + 3O_{2(l)} \rightarrow 2CO_{2(g)} + 3H_2O_{(g)}$

9. בכלי מבודד בצעו ניסוי 1: ערבבו 50 מ"ל תמיסת $KOH_{(aq)}$ 1M עם 50 מ"ל תמיסת $HCl_{(aq)}$ 1M.

א. 1. רשמו ניסוח נטו של התגובה המתרחשת – סמנו אותה כתגובה (1).

2. חשבו כמה מול $HCl_{(aq)}$ וכמה מול $KOH_{(aq)}$ הגיבו בתגובה. פרטו את חישוביכם

3. נתון כי בתגובה נפלטה אנרגיה של 2856J. חשבו את ΔH^o של תגובה זו. פרטו את חישוביכם.

לפניכם ניסוח נטו של תגובה (2)

(2) $Ba^{2+}_{(aq)} + SO^{2-}_{4(aq)} \rightarrow BaSO_{4(s)}$ $\Delta H^o = -16.8kJ$

ב. התבססו על תשובותיכם לסעיף הקודם, חשבו את ΔH^o של תגובה (3)

(3) $2H_3O^+_{(aq)} + SO^{2-}_{4(aq)} + Ba^{2+}_{(aq)} + 2OH^-_{(aq)} \rightarrow 4H_2O_{(l)} + BaSO_{4(s)}$

בניסוי 2 בכלי מבודד ערבבו 50 מ"ל תמיסת $KOH_{(aq)}$ 2M עם 50 מ"ל תמיסת $HCl_{(aq)}$ 2M.

ג. 1. מהי הסביבה ומהי המערכת בניסוי זה?

2. היעזרו בנתונים של סעיף א' וקבעו אם השינוי שחל באנרגיה הקינטית הממוצעת של התמיסה במהלך התגובה בכלי 2, גדול, קטן או שווה לשינוי באנרגיה הקינטית הממוצעת שהתרחש בניסוי 1.

נמקו את קביעתכם.

10. השאלה עוסקת בחומר $ClF_{3(g)}$ המשמש כחלק מרכיבי דלק לטילים ולתחנות כוח גרעיניות.

לפניכם אנתלפיות של מספר קשרים כימיים:

הקשר	F-F	Cl-Cl
ΔH° (kJ/mol)	158	242

נתון ניסוח התגובה ליצירת $ClF_{3(g)}$ מיסודותיו:

(1) $3F_{2(g)} + Cl_{2(g)} \rightarrow 2ClF_{3(g)}$ $\Delta H^\circ_1 = -317.8kJ$

א. חשבו את אנתלפיית הקשר הממוצעת ΔH°_{Cl-F} עבור הקשר Cl-F. פרטו את חישוביכם.

ב. ביצעו אותה תגובה, אלא שהפעם הגיב כלור במצב צבירה נוזל $Cl_{2(l)}$.

האם כמות האנרגיה שנפלטה בתגובה היתה גדולה, קטנה או שווה לזו שחישבתם בסעיף א? נמקו.

ג. קבעו אם אנתלפיית האידוי של $Cl_{2(l)}$ גבוהה, נמוכה או שווה לאנתלפיית הקשר Cl-Cl? נמקו את קביעתכם.

ד. ClF_3 יכול להגיב עם מים לפי התגובה (2)

(2) $ClF_{3(g)} + 2H_2O_{(g)} \rightarrow 3HF_{(g)} + HCl_{(g)} + O_{2(g)}$ $\Delta H^\circ_2 = -268.2kJ$

או בתנאים מבוקרים לפי תגובה (3)

(3) $ClF_{3(g)} + H_2O_{(g)} \rightarrow HF_{(g)} + HCl_{(g)} + OF_{2(g)}$ $\Delta H^\circ_3 = 78.3kJ$

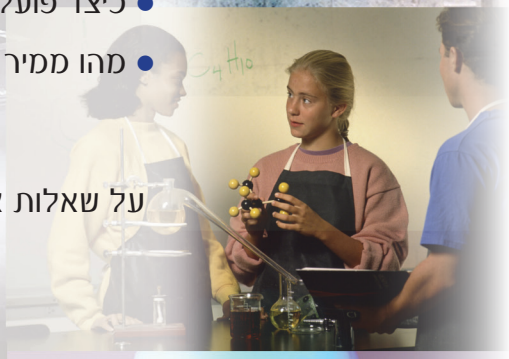
חשבו מהי אנתלפיית התגובה ΔH°_4. פרטו את חישוביכם.

(4) $OF_{2(g)} + H_2O_{(g)} \rightarrow 2HF_{(g)} + O_{2(g)}$

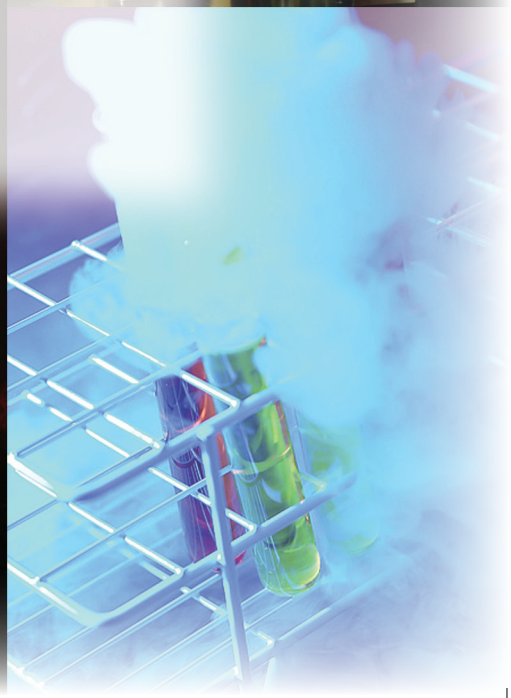
פרק ג

קצב תגובות - מה ואיך?

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



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



מבוא

נחזור וניזכר בניסוי הזיקוקים, איתו התחלנו את פרק א'. תהליך הבעירה של הזיקוק הוא תהליך אקסותרמי, במהלכו קיים מעבר אנרגיה מהמערכת לסביבה בצורה של אור הלהבה וגיצים מאירים וכן מתרחש חימום של הסביבה. היבטים אלו נקראים היבטים אנרגטיים והם קשורים לשינוי באנתלפיה שחל במהלך התרחשותה של תגובה.

תהליך ההצתה של הזיקוק היה כרוך בהשקעת אנרגיה ממקור חום (גפרור או גזיה). בוודאי הבחנתם כי הצתת הזיקוק אינה מתרחשת מידית עם קירוב מקור החום, אלא רק כעבור פרק זמן מסוים. ניתן לשאול: מדוע נדרשה השקעת אנרגיה התחלתית על מנת להצית את הזיקוק? מדוע הזיקוק לא ניצת מאליו? מדוע הצתת הזיקוק לא מתרחשת מיד, אלא רק כעבור פרק זמן מסוים? האם ניתן לגרום לתגובה להתרחש ללא השקעת אנרגיה התחלתית?

אילו ניסיתם להצית את הזיקוק מאמצעו הייתם מגלים שהזמן הנדרש להצתת הזיקוק מראשו שונה מהזמן הנדרש להצתת זיקוק מקצהו. אילו ניסיתם להצית את הזיקוק בעזרת מקורות חום שונים (גפרור, גזיה), הייתם מגלים שהזמן הנדרש להצתת הזיקוק באמצעות גפרור שונה מהזמן הנדרש להצתת הזיקוק באמצעות גזיה. כיצד נוכל להסביר תופעות אלו? מה משפיע על האופן שבה ההצתה מתחילה? בפרק זה נענה על שאלות אלו ונעמיק בהיבטים העוסקים באופן שבו תגובה **מתחילה** להתרחש. היבטים אלו קשורים לתחום הנקרא קינטיקה כימית.

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?

כל תגובה כימית דורשת לשם התרחשותה השקעה של אנרגיה התחלתית, הנקראת **אנרגיית שפעול**, (Activation Energy). זהו מחסום אנרגטי שיש להתגבר עליו כדי שהתגובה תתחיל להתרחש.

מדוע נדרשת השקעת אנרגיה התחלתית להתרחשות התגובה? בשלב זה נסתפק בהסבר קצר שיורחב בהמשך. כדי שתגובה תתרחש יש להקטין את המרחק בין חלקיקי המגיבים, אולם ככל שהמרחק בין החלקיקים קטן יותר, גדלה גם הדחייה ביניהם.[1] על מנת להתגבר על דחייה זו, יש לספק למגיבים אנרגיה. אם המגיבים הם גזים, נוכל לומר כי אנרגיית השפעול היא האנרגיה הקינטית המינימלית הדרושה להתחלת התגובה .

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

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

מה ניתן להסיק על האנרגיה ההתחלתית הדרושה להתרחשות תגובות אלו?

אם תגובה מתרחשת מיד כשהמגיבים באים במגע, כנראה שבתנאי הסביבה יש די אנרגיה על מנת לספק את אנרגיית השפעול לתהליך. כנראה שאנרגית השפעול של התהליך נמוכה באופן יחסי לתגובות אחרות שאינן מתרחשות באותן תנאים.

בתגובות כימיות אחרות, 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 מדוע בתנאים מסוימים התגובה לא מתרחשת כלל ובתנאים אחרים התגובה מתרחשת תוך כדי התפוצצות (במהירות וב"עוצמה").

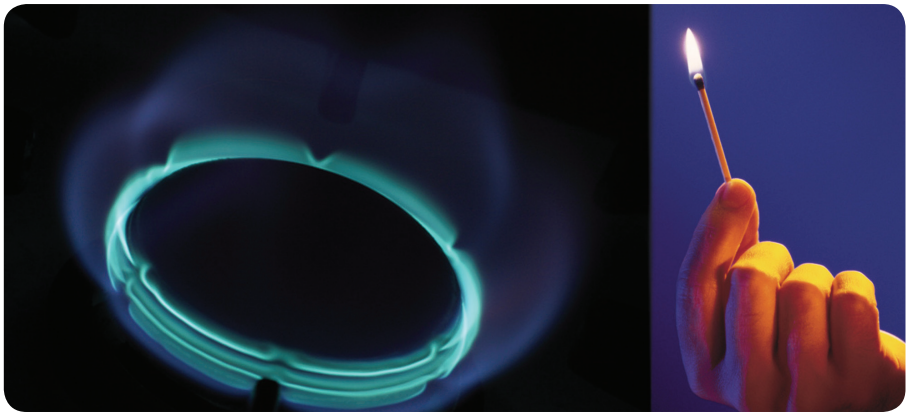
דוגמה נוספת לתגובה כימית בה דרושה השקעה של אנרגיה התחלתית: החומרים המצויים בכרית אוויר במכונית אינם מגיבים ביניהם אלא כאשר ניצוץ מועבר אליהם, במקרה שהמכונית ספגה מכה חזקה בעת תאונה. העברת הניצוץ גורמת להתרחשות תגובה, שבמהלכה נפלט גז המנפח את הכרית וזו מונעת פגיעה בנוסעים.

גם תהליך השריפה של הזיקוק יתרחש רק לאחר שמקור החום יספק אנרגיה התחלתית להצתת הזיקוק.

ניתן לחשוב בטעות, כי רק לתגובות אנדותרמיות נדרשת אנרגיית שפעול, אולם גם תגובות אקסותרמיות **לא יתחילו** להתרחש אם לא תסופק אנרגיה התחלתית מסוימת, אשר תאפשר לתגובה להתרחש.

על מנת שתגובה כלשהי תתרחש יש לספק למגיבים אנרגיה בשיעור אנרגיית השפעול של התהליך.

לדוגמה, תגובות של שריפת גפרור, זיקוק, נייר או עץ הן כולן דוגמאות לתגובות אקסותרמיות, הגורמות בעת התרחשותן לפליטת אנרגיה אל הסביבה. כל התגובות הללו יתרחשו רק בהשקעת אנרגיה התחלתית שהיא אנרגיית השפעול.

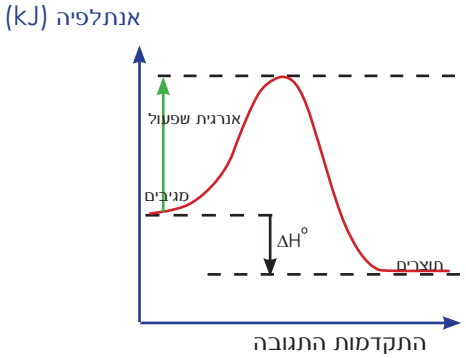


בתהליך ההצתה של ראש הגפרור אנרגיית השפעול מתקבלת מחיכוך הגפרור עם משטח השפשוף שבצד קופסת הגפרורים. אנרגיית השפעול של הדלקת החומר המצוי בראש הגפרור היא נמוכה. מספיק שפשוף חזק הגורם לחיכוך עם המשטח והגפרור נדלק ובוער. אנרגיית השפעול של שריפת גוף הגפרור גבוהה יותר והוא יידלק רק לאחר שראש הגפרור יבער. גם הצתת הזיקוק תתרחש רק לאחר שהזיקוק יקבל אנרגיה בשיעור אנרגיית השפעול ממקור חום (גפרור או גזיה). לאחר שראש הזיקוק ניצת, האנרגיה שנפלטת בתהליך מספקת את אנרגיית השפעול לשריפת גוף הזיקוק. נייר יידלק אם נקרב אליו גפרור בוער ומדורה תידלק אם נקרב לעצים ניירות בוערים. בכל המקרים הללו, נדרשה אנרגיה התחלתית שונה על מנת לגרום לתגובה להתרחש.

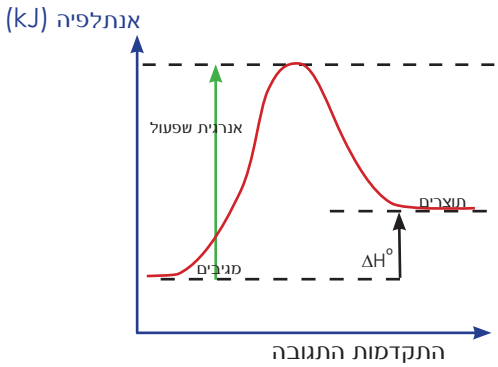
לכל תגובה יש אנרגיית שפעול אופיינית לה. כלומר לתגובות שונות המתרחשות באותה טמפרטורה, יש אנרגיות שפעול שונות, ולכן נדרש להשקיע אנרגיה התחלתית שונה בכל תגובה. ככל שאנרגיית השפעול של תגובה גבוהה יותר דרושה השקעת אנרגיה התחלתית רבה יותר על מנת שתתחיל להתרחש תגובה ונוכל להבחין בתוצרים.
במקרה של הצתת הזיקוק, אנרגיית השפעול הנדרשת להצתת החומר השחור המצוי בראש הזיקוק נמוכה מאנרגיית השפעול של החומר האפור המרכיב את גוף הזיקוק. זו הסיבה שכאשר מקרבים אליהם מקור חום ראש הזיקוק יוצת תוך זמן קצר יותר מאשר גוף הזיקוק.

ניתן להמחיש באופן גרפי סכמטי את השילוב בין האנרגיה שיש להשקיע (אנרגיית השפעול) על מנת שתגובה תצא לפועל, לבין שינוי האנתלפיה הכרוך בהתרחשותה של התגובה. גרף 1 מתייחס לתגובה אקסותרמית וגרף 2 מתייחס לתגובה אנדותרמית.

גרף 1 שינוי האנתלפיה עם התקדמות תגובה אקסותרמית



גרף 2 שינוי האנתלפיה עם התקדמות תגובה אנדותרמית



בשני הגרפים אנרגיית השפעול מיוצגת על ידי חץ הפונה כלפי מעלה, שתחילתו במגיבים וסופו בשיא הגרף. שיא הגרף מייצג את "המחסום האנרגטי" לתגובה. נהוג לסמן את אנרגיית השפעול בסימון E_a. שינוי האנתלפיה בתגובה, ΔH°, מיוצג על ידי חץ שתחילתו במגיבים וסופו בתוצרים.

שימו לב שציר X הוא "התקדמות התגובה" או "מהלך התגובה". ולא זמן.

דוגמה פתורה

נתונה התגובה : $H_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow H_2O_{(l)}$ $\Delta H^\circ = -285.9kJ,\ E_a = X\ kJ$

א. האם X עשוי להיות בעל ערך חיובי, שלילי או כל ערך שהוא? נמקו.

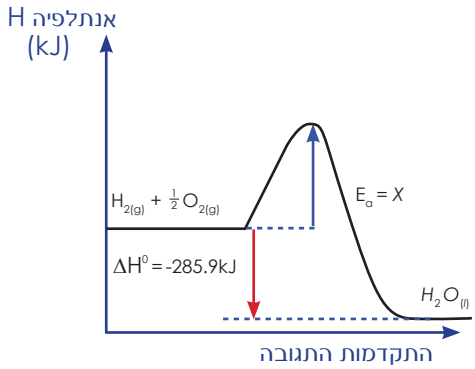
ב. הציגו את הנתונים באמצעות גרף.

ג. עבור התגובה: $H_2O_{(l)} \rightarrow H_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)}$ קיבעו מהם ערכי $\Delta H^\circ, E_a$.

ד. היעזרו בתשובותיכם לסעיפים ב' ו-ג', ובחרו את המילה הנכונה כך שיתקבל משפט נכון:

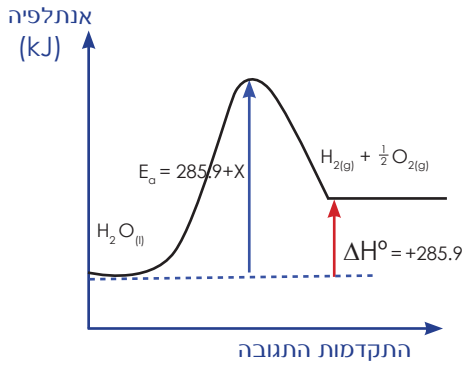
בהשוואה בין תגובה שמתרחשת בכיוון הישיר לעומת התגובה בכיוון ההפוך, אנרגיית השפעול של התהליך האנדותרמי תהיה _____ **(גבוהה יותר מ.../נמוכה יותר מ... / שווה ל...)** אנרגיית השפעול של התהליך האקסותרמי .

פתרון:



א. X הוא מספר שערכו חיובי בלבד משום שאנרגיית השפעול היא האנרגיה ההתחלתית שיש **להשקיע** על מנת שהתגובה תתחיל להתרחש.

ב. מאחר שהתגובה היא אקסותרמית נציג גרף שבו המגיבים בעלי אנתלפיה גבוהה מן התוצרים. נסמן את אנרגיית השפעול כחץ הפונה למעלה מן המגיבים לשיא הגרף (חץ הפונה למעלה בגרף משמעותו אנרגיה שהושקעה במערכת). במקרה זה נייצג את ΔH°, כחץ הפונה למטה, שראשיתו מהאנתלפיה של המגיבים וסופו באנתלפיה של התוצרים (חץ פונה מטה משמעותו אנרגיה שנפלטה מהמערכת).



ג. עבור התהליך ההפוך ניתן לבנות גרף דומה, שבו התוצרים של התגובה המקורית הם המגיבים של התהליך המבוקש, והמגיבים של התגובה המקורית הם התוצרים של התהליך המבוקש: נסמן את אנרגיית השפעול כהפרש האנרגיה שבין המגיבים למקום הכי גבוה בגרף ואת ΔH^0, על ידי ההפרש בין אנתלפיית התוצרים לאנתלפיית המגיבים.

בתגובה זו שינוי האנתלפיה בתהליך **+285.9kJ** ואנרגיית השפעול היא 285.9+X kJ

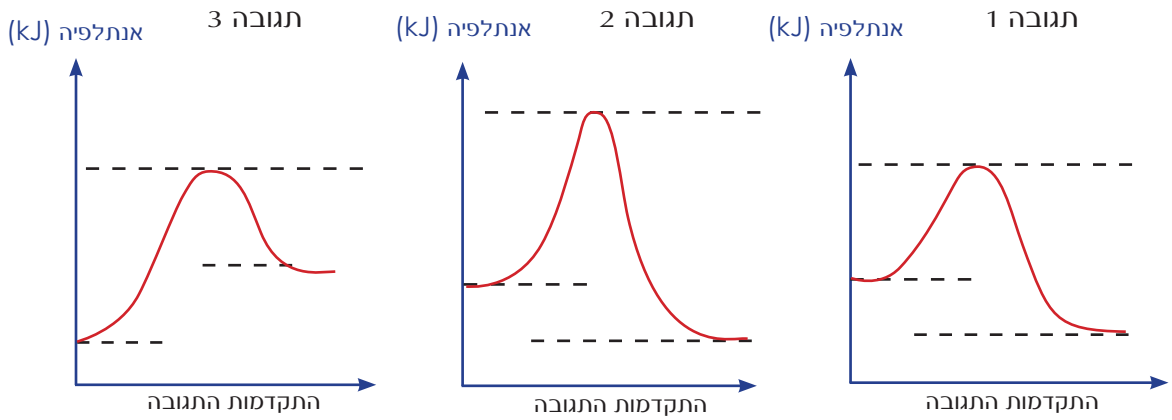
ד. בהשוואה בין תגובה שמתרחשת בכיוון הישיר לעומת התגובה בכיוון ההפוך, אנרגיית השפעול של התהליך האנדותרמי תהיה **גבוהה יותר** מאנרגיית השפעול של התהליך האקסותרמי.
הסבר: אנרגיית השפעול של התהליך ההפוך (האנדותרמי) הייתה X+285.9 kJ ואילו אנרגיית השפעול של התהליך הישיר (האקסותרמי) הייתה רק X kJ.

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?

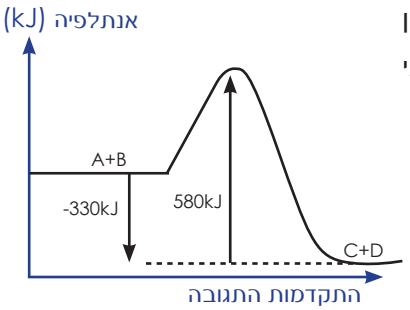
2. בעת השימוש בכיריים גז במטבח הביתי, או במבער במעבדה, מתקיימת שריפת גז הבישול.
   א. האם תוכלו לומר על סמך ניסיונכם אם התגובה הנ"ל היא אקסותרמית או אנדותרמית? נמקו.
   ב. על מנת שגז הבישול יבער בכיריים, עלינו להשתמש באמצעי הדלקה כלשהו. מדוע?
   ג. הראו תיאור גרפי סכמטי המתאר את האנרגיה בתהליך שריפת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

3. נתונים שלושה גרפים א,ב ו-ג', 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.

4. לפניכם גרף המתאר את האנתלפיה במהלך תגובה מסוימת. מבין האפשרויות הבאות קבעו מהי האפשרות המתאימה ביותר לנתוני הגרף. הסבירו את קביעתכם.



א. עבור התגובה $A+B \rightarrow C+D$, $\Delta H^o = -330kJ$ ו- $E_a = 250kJ$

ב. עבור התגובה $A+B \rightarrow C+D$, $\Delta H^o = -330kJ$ ו- $E_a = 580kJ$

ג. עבור התגובה $C+D \rightarrow A+B$, $\Delta H^o = -330kJ$ ו- $E_a = 580kJ$

ד. עבור התגובה $C+D \rightarrow A+B$, $\Delta H^o = +330kJ$ ו- $E_a = 250kJ$

5. לתגובה $A \rightarrow B$ נתון כי: $\Delta H^o = -15kJ$, $E_a = 20kJ$.

א. ציירו גרף של שינוי האנתלפיה במהלך התגובה, והציגו עליו את ערכי Ea ו- ΔH^o.

ב. קיבעו מה יהיו ערכי Ea ו-ΔH^o עבור התגובה: $B \rightarrow A$

לתגובה $C \rightarrow B$ נתון כי: $\Delta H^o = 15kJ$, $E_a = 20kJ$.

ג. ציירו גרף של שינוי האנתלפיה במהלך התגובה, והציגו עליו את ערכי E_a ו-ΔH^o.

ד. קיבעו מה יהיו ערכי E_a ו- ΔH^o עבור התגובה: $B \rightarrow C$

6. לפניכם ניסוח תגובה: $A+2G \rightarrow B+3C$

נתון כי אנרגיית השפעול של התגובה הישירה היא 60.7kJ ואנרגיית השפעול של התגובה ההפוכה היא 96.8kJ.

א. קבעו אם התגובה הישירה היא אנדותרמית או אקסותרמית? שרטטו גרף אחד המתאר את השתנות האנתלפייה במהלך שתי התגובות (הישירה וההפוכה) והסבירו בעזרתו את קביעתכם.

ב. חשבו את ערך ΔH^o.

מהו קצב תגובה?

תגובות כימיות מסוימות, כמו תגובות של חומרי נפץ, מתרחשות מהר מאוד. לעומתן, יש תגובות איטיות, כגון תהליך ההחלדה של ברזל או היווצרות של נטיפים וזקיפים במערת נטיפים. 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 את הפקת המוצר הרצוי בקצב הרצוי.

מדוע כימאים מתעניינים בקצב שבו מתרחשות תגובות כימיות?

בתעשייה כימית: מעוניינים להפיק את התוצר בקצב רצוי, ידוע מראש. לשם כך, נדרש לדעת מהם התנאים האופטימליים לביצוע התגובה, ואילו תנאים עשויים להגביר את קצב התגובה על מנת להגדיל את כמות התוצרים המתקבלת ליחידת זמן.

בביולוגיה: תגובות שונות בגוף האדם מתרחשות בקצב שונה: מוח של ילוד גדל כל דקה ב-2 מ"ג. חלוקת תא בגוף האדם מתרחשת כל שעה וכדומה. קצב כל אחת מהתגובות השונות בגוף החי חייב להיות קבוע על מנת לשמור על הומאוסטאזיס (סביבה פנימית קבועה). שיבוש הקצב הוא סימן למחלות.

בנוסף, תגובות רבות מתרחשות בגוף למרות התנאים המתונים השוררים בו הודות לקיומם של זרזים ביולוגיים - אנזימים. התרחשות תגובות אלו ללא אנזימים דורשת תנאים קיצוניים (טמפרטורה ולחץ גבוהים).

בתעשיית המזון: מטרת הקירור הינה להאט תגובות קלקול לא רצויות ואילו החימום על הכיריים דווקא מזרז את התגובות.

במדעי הסביבה: חשוב לדעת את קצב ההתרחשות של תגובות כימיות הגורמות לזיהום אויר או לפגיעה בשכבת האוזון.

ברפואה: ידיעת מנגנון הפעולה של תרופה וקצב השפעתה היא פרק עיקרי בפרמקולוגיה (ענף החוקר את קשר בין ריכוז התרופה בדם לזמן).

בארכיאולוגיה: מעקב אחר קצב הפירוק של האיזוטופ פחמן 14 במאובן והשוואת יחס האיזוטופים פחמן 14 לפחמן 12 במאובן לעומת היחס באויר, מסייע לתארך מאובנים המכילים תרכובות פחמן.

מהו המושג קצב?

קצב הוא שינוי החל בגודל מסוים ביחידת זמן.

דוגמאות:

- קצב הנסיעה של מכונית הוא שינוי במרחק ביחידת זמן. כלומר, מייצג את הדרך אשר נעשתה ביחידת זמן מסוימת. משמעות היחס הזה היא מהירות הנסיעה. 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).

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?

מודדים את השינויים בתכונה מאקרוסקופית הניתנת למדידה בחומר, ומחלקים בזמן שנדרש לשינוי. בדרך כלל מקובל לעקוב אחר השינוי בריכוז אחד החומרים בכלי עם הזמן.

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

השינוי בריכוז החומר הוא גודל שלוקח בחשבון גם את מספר המולים וגם את נפח הכלי בו התגובה מתרחשת.

קביעת קצב של תגובה מבוססת על ניסויים בהם נערך מעקב אחר התקדמות תגובה.

אפשר לעקוב אחר 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:

- שינוי צבע: בתגובה שבה אחד החומרים הוא בעל צבע ייחודי שניתן לעקוב אחרי ההשתנות שלו, ולהסיק ממנו על קצב התגובה. למשל בתגובה $2NO_{2(g)} \rightarrow N_2O_{4(g)}$, המגיב NO_2 בעל צבע חום ואילו $N_2O_{4(g)}$ חסר צבע. מעקב אחר שינוי הצבע בכלי עם הזמן עשוי לספק מידע על קצב התגובה.
- שינוי הנפח של הגז המתקבל בתגובה: בתגובת הפירוק של מי חמצן למים וחמצן, ניתן לאסוף את החמצן אשר מתקבל בעזרת מזרק ולמדוד את השינוי בנפח החמצן שייאסף במזרק עם הזמן.

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

- ניתן לעקוב אחר הלחץ בכלי שבו מתרחשת תגובה שבה נוצרים גזים, על ידי מדידת הלחץ הכולל של הגז באמצעות מד לחץ.
- ניתן לעקוב אחר התקדמות תגובה גם בעזרת מכשיר מדידה של תכונה כלשהי המהווה מדד לריכוז החומר המשתתף בתגובה. למשל בתגובות שבהן נוצרים או מגיבים יוני $H_3O^+_{(aq)}$ / $OH^-_{(aq)}$. מעקב אחר שינוי ה-pH עם הזמן עשוי לספק מידע על קצב התגובה.
- בתגובות שיקוע ניתן לעקוב אחר שינוי במסת המשקע המתקבל עם הזמן.

תרגיל

(מתוך דגם הוראה בקינטיקה שפותח על ידי מרכז המורים לכימיה בתשע"א)

לפניכם ניסוחים של שלוש תגובות כימיות שונות:

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

(2) $2MnO^-_{3(aq)} + 16H_3O^+{}_{(aq)} + 5C_2O_4^{2-}{}_{(aq)} \rightarrow + 10CO_{2(g)} + 2Mn^{2+}{}_{(aq)} + 24H_2O_{(l)}$

(3) $Mg_{(s)} + 2H_3O^+{}_{(aq)} \rightarrow Mg^{2+}{}_{(aq)} + H_{2(g)} + 2H_2O_{(l)}$

לפניכם מספר שיטות למעקב אחר קצב התגובה:

- נפח גז נפלט
- לחץ הגז במערכת
- pH של התמיסה
- מוליכות התמיסה
- מסת מוצק נוצר / מגיב ליחידת זמן
- עוצמת צבע
- טמפרטורה של הסביבה (עד עליה מכסימלית או ירידה מינימלית)

לכל תגובה, הציעו שיטה למדידת קצב התגובה. אם יש כמה שיטות, ציינו חסרונות ויתרונות לכל שיטה.

אנרגיית שפעול וקצב תגובות

אנרגיית השפעול הינה גודל קבוע שאינו תלוי בטמפרטורה ומאפיין תגובה מסוימת. מידע על גודלה של אנרגיית השפעול מאפשר חיזוי של קצב התגובה.

בהשוואה בין אנרגיות השפעול של שתי תגובות באותה טמפרטורה: לתגובה בעלת אנרגיית שפעול גבוהה יותר, קצב התגובה יהיה בדרך כלל קטן יותר. הסיבה לכך היא שככל שהמחסום האנרגטי לתגובה גדול יותר, כך פחות מולקולות מגיבים יכולות לעבור את המחסום האנרגטי לתגובה ביחידת זמן ולכן קצב התגובה קטן יותר.

כמו כן, אם ידוע ערכה של אנרגיית השפעול בטמפרטורה מסוימת, ניתן לחשב את קצב התגובה בטמפרטורה אחרת. דרך החישוב לא תפורט כאן .

מידע על אנרגיית השפעול מאפשר לחזות את אופן השפעת הטמפרטורה על קצב התגובה.

כאשר משווים את השפעת הטמפרטורה על קצב התגובה של תגובות שונות: ככל שערך אנרגיית השפעול יהיה גבוה יותר, קצב התגובה יושפע באופן משמעותי יותר משינוי בטמפרטורה. הקצב של תגובה בעלת אנרגיית שפעול גבוהה יותר יעלה במידה רבה יותר עם עליית טמפרטורה לעומת תגובה בעלת אנרגיית שפעול נמוכה יותר.

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 צלזיוס) גרם לשינוי גדול יותר בקצב התגובה בעלת אנרגיית שפעול גדולה יותר.

שאלות בנושא אנרגיית שפעול וקצב תגובות

1. השאלה דנה באחד מהשלבים בתהליך הייצור של חומצה חנקתית, $HNO_{3(l)}$, שבו מתרחשת תגובה (1), ומתקבל הגז חנקן דו-חמצני, $NO_{2(g)}$:

(1) $2NO_{(g)} + O_{2(g)} \rightarrow 2NO_{2(g)} \quad \Delta H^o < 0$

בשלב זה עלולה להתרחש גם תגובה (2) שאינה רצויה: (2) $2NO_{(g)} \rightarrow N_{2(g)} + O_{2(g)} \quad \Delta H^o < 0$

במפעל מונעים את ההתרחשות של תגובה (2) על ידי קירור מהיר של תערובת הגזים.

א. הקצב של איזו תגובה גבוה יותר בקירור: של תגובה (1) או של תגובה (2)? נמקו.

ב. לאיזו תגובה מבין שתי התגובות: (1) או (2) יש אנרגיית שפעול גבוהה יותר? נמקו.

2. נתונה התגובה: $NO_{2(g)} + CO_{(g)} \rightarrow NO_{(g)} + CO_{2(g)} \quad \Delta H^o < 0$

ידוע כי התגובה מתרחשת בשני שלבים:

שלב I-איטי $2NO_{2(g)} \rightarrow NO_{(g)} + NO_{3(g)}$

שלב II- מהיר $NO_{3(g)} + CO_{(g)} \rightarrow CO_{2(g)} + NO_{2(g)}$

א. לאיזה מהשלבים אנרגיית שפעול גבוהה יותר? הסבירו.

ב. חיממו את כלי התגובה. כתוצאה מכך עלה קצב התגובה גם לשלב I, ולשלב II.

האם העלייה בקצב התגובה של שלב I (לאחר החימום) גדולה, קטנה, או זהה לעלייה בקצב התגובה של שלב II (לאחר החימום) ? נמקו.

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 הנמצאות 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.

נמצא כי עבור תגובות שמתרחשות בין מולקולות של חומרים במצב גזי, קצב התגובה קטן 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.

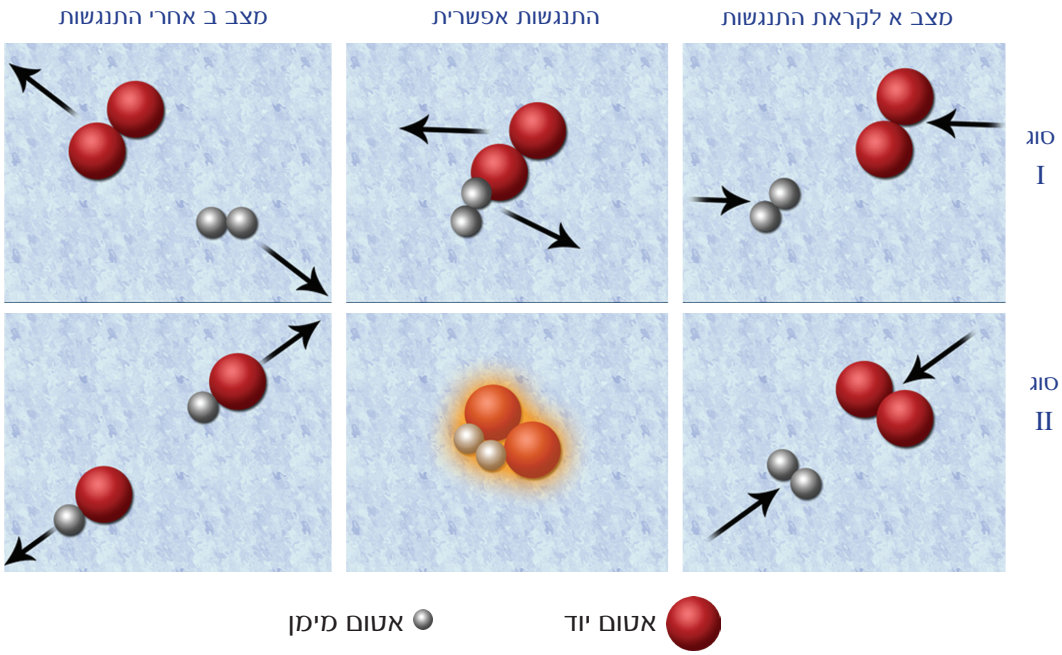
את התוצאות השונות של היווצרות תצמיד משופעל, או של היעדר היווצרותו, נדגים באיור 1 עבור התגובה:

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

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 1 – 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 1 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 זו בזו כשהן בעלות אנרגיה גדולה מסף מסוים, נוצר תצמיד בין המולקולות, הנקרא תצמיד משופעל (באיור 1: 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, נוצרות 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 1 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 מולקולות של תוצר.

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 1, בשורה השנייה, כהתנגשות מסוג II.

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

א. המולקולות נעות ומתנגשות זו בזו, לכל התנגשות יש אנרגיה מסוימת וזווית פגיעה מסוימת.

ב. אם המולקולות מתנגשות באנרגיה נמוכה מדי, (מתחת לערך אנרגית השפעול), או בזווית לא מתאימה, הן ניתקות אחת מהשנייה ומשנות את כיוונן, כמו כדורי ביליארד.

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 **פוריה.***

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

גורמים המשפיעים על הקצב של תגובות כימיות

נתמקד במספר גורמים עיקריים אחרי המשפיעים על הקצב תגובות כימיות.

א. ריכוזי* המגיבים: בדרך כלל קצב התגובה גדל עם העלייה בריכוזי המגיבים. ככל שריכוז המגיבים גדול יותר, יש יותר מולקולות של מגיבים ליחידת נפח, ולכן תהיינה יותר התנגשויות בין מולקולות המגיבים באותה יחידת זמן, ייווצרו יותר תצמידים משופעלים שעשויים להתפרק לתוצרים, ומכאן שגם יהיו יותר התנגשויות פוריות. לכן ריכוזי התוצרים שיתקבלו ליחידת זמן יהיו גדולים יותר ו**קצב התגובה יגדל**.

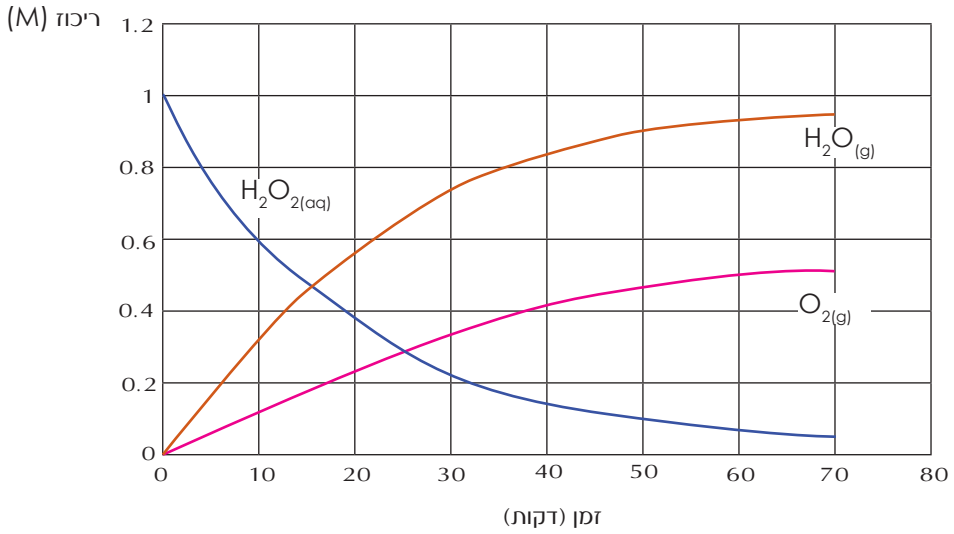
אם עוקבים אחר השינוי של קצב התגובה עם הזמן, מרגע הכנסת המגיבים לכלי (בתגובות שבהן ריכוז המגיבים משפיע על קצב התגובה) מגלים כי קצב התגובה אינו קבוע, אלא יורד עם הזמן. מדוע?

* מידת ההשפעה של ריכוז המגיבים על קצב התגובה יכולה להיות שונה מתגובה לתגובה. ישנן גם תגובות שבהן ריכוז המגיב אינו משפיע על קצב התגובה

בתחילת התגובה ריכוז המגיבים הוא הגבוה ביותר. במהלך התרחשות התגובה, המגיבים מגיבים ונעלמים מן הכלי ולכן מספר מולקולות המגיבים בכלי קטן עם הזמן, וריכוז המגיבים יורד. לכן, הסיכוי להתנגשויות בכלל ולהתנגשויות פוריות בפרט קטן, ומכאן שיווצרו פחות תצמידים משופעלים שיתפרקו לתוצרים עם הזמן, וקצב התגובה ירד.

נתבונן בגרף 3, המתאר את השינוי בריכוז המגיבים והתוצרים עם הזמן עבור תגובת הפירוק של מי חמצן: $2H_2O_{2(aq)} \rightarrow 2H_2O_{(l)} + O_{2(g)}$ מרגע הכנסת המגיבים לכלי. ניתן לראות כי באופן כללי ניתן לומר שריכוזי המגיבים בכלי יורדים משום שהם מגיבים ביניהם ונעלמים, ומאידך ריכוזי התוצרים בכלי עולים כי הם מתקבלים. מעקב אחר שינוי בריכוז המגיבים עם הזמן או שינוי בריכוז התוצרים עם הזמן יכול לספק מידע על קצב התגובה.

גרף 3: השתנות ריכוזי המגיבים והתוצרים עם הזמן במהלך תגובת הפירוק של מי חמצן



ב. טמפרטורה: קצב התגובה גדל עם העלייה בטמפרטורה.

בטמפרטורה גבוהה יותר האנרגיה הקינטית הממוצעת של המולקולות גבוהה יותר. בנוסף, בטמפרטורה גבוהה יותר ליותר מולקולות תהייה אנרגיה קינטית גדולה מהאנרגיה המינימלית הדרושה להתנגשות פורייה לעומת האנרגיה הקינטית שלהן בטמפרטורה נמוכה יותר. גורם שני פחות משמעותי הוא שתדירות ההתנגשויות בין מולקולות המגיבים תהיה גדולה יותר. לכן בטמפרטורה גבוהה יותר יש יותר סיכויים ליצירת תצמידים משופעלים שעשויים להתפרק לתוצרים ובסך הכל יתקבלו יותר תוצרים ליחידת זמן, כלומר קצב התגובה יהיה גדול יותר בטמפרטורה גבוהה יותר.

הצגת ההשפעה של הטמפרטורה על קצב התגובה באמצעות גרף התפלגות אנרגיה

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.

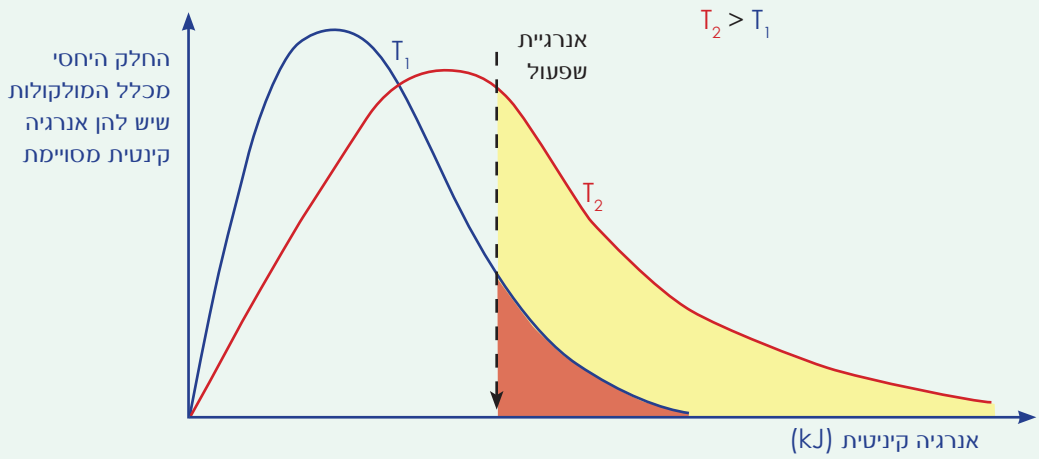
גרף 4 מראה את התפלגות האנרגיה של אותם מגיבים בשתי טמפרטורות שונות. ציר X מייצג ערכים שונים של אנרגיה קינטית וציר Y מייצג את החלק היחסי מכלל המולקולות שיש להן אנרגיה קינטית מסויימת.

ניתן לראות, כי בטמפרטורה גבוהה התפלגות האנרגיה בין סך כל המולקולות **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 השפעול 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, בטמפרטורה גבוהה יותר, יש יותר מולקולות בעלות אנרגיה גבוהה מאנרגיית השפעול.

לכן, בטמפרטורה גבוהה, קצב התגובה גדול יותר מאשר בטמפרטורה נמוכה.

גרף 4 – פיזור אנרגיה קינטית של גז בטמפרטורות שונות



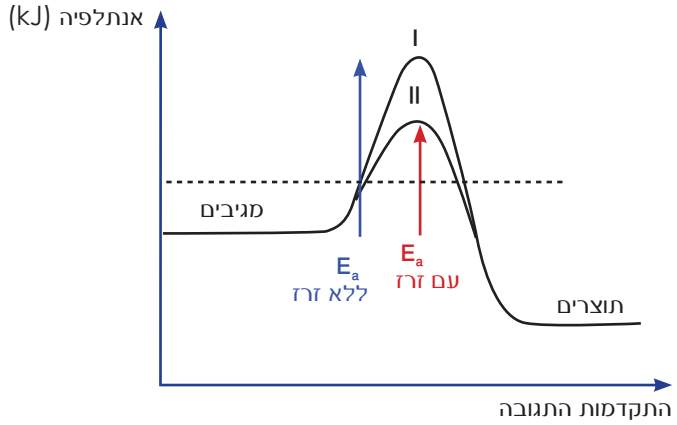
בנוסף, בעזרת גרף זה ניתן להבין כי, ככל שאנרגיית השפעול של תגובה היא גבוהה יותר, יש פחות מולקולות בעלות אנרגיה קינטית גבוהה מסף אנרגיית השפעול, ולכן קצב התגובה קטן.

ג. נוכחות זרז: כאשר תוצר צפוי להתקבל בתגובה איטית, מחפשים דרכים לזירוזה של התגובה. למדנו, שעל ידי העלאת טמפרטורה אפשר להגדיל קצב של תגובה.

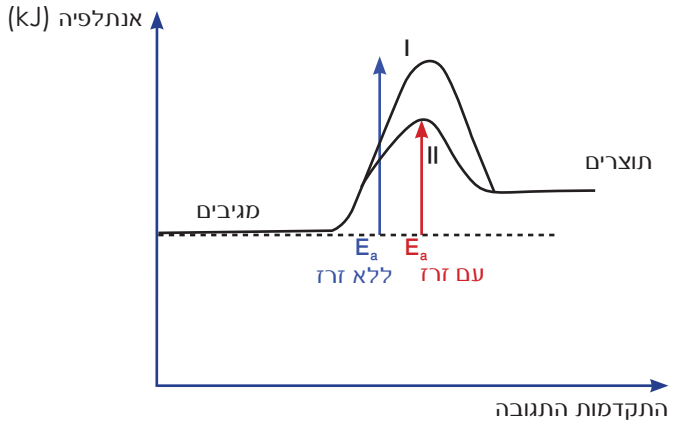
בנוכחות זרז התגובה מתרחשת במסלול חלופי, שבו נוצר תצמיד משופעל שונה, בעל אנרגיית שפעול נמוכה יותר בהשוואה לאנרגיית התצמיד המשופעל בתגובה ללא זרז. כתוצאה מכך, יותר מולקולות מגיבים יוכלו לעבור את מחסום אנרגיית השפעול באותה יחידת זמן. מספר ההתנגשויות הפוריות יהיה גדול יותר, ויתקבלו יותר תוצרים ליחידת זמן קצב התגובה יגדל. בנוכחות זרז קצב התגובה גדול יותר אך כמות התוצרים הסופית שתתקבל באותם תנאי לחץ וטמפרטורה תהייה זהה.

בגרפים 5א' ו- 5ב', מוצג השינוי באנתלפיה של התגובה כתלות בהתקדמות התגובה: עקום I מתאר את שינוי האנתלפייה בתגובה המתרחשת ללא זרז ואילו עקום II מתאר את שינוי האנתלפיה במהלך התגובה בנוכחות זרז. ניתן לראות שאנרגיית השפעול של התהליך בנוכחות זרז (מיוצגת על-ידי החץ האדום) נמוכה יותר מאשר בתהליך ללא זרז (מיוצגת על-ידי החץ הכחול).

גרף 5 א': השתנות אנתלפיית התגובה עם וללא זרז במהלך תגובה אקסותרמית.



גרף 5 ב': השתנות אנתלפיית התגובה עם וללא זרז במהלך תגובה אנדותרמית.



כאשר התצמיד המשופעל מתפרק לתוצרים או למגיבים מתקבל הזרז בחזרה ולכן **מסתו בסוף התגובה זהה למסתו ההתחלתית.** לכן הזרז אינו מוגדר כמגיב מכיוון שמסתו כמעט שאינה פוחתת בזמן התרחשות התגובה.

תגובת הפירוק של מי חמצן: $2H_2O_{2(aq)} \rightarrow 2H_2O_{(l)} + O_{2(g)}$ מתרחשת באמצעות זרז. זרז מקובל לתגובה זו הוא מנגן דו חמצני מוצק, $MnO_{2(s)}$. מכיוון שהזרז אינו מגיב בתגובה הוא אינו מופיע בניסוח שלה. ניתן לבצע את התגובה גם בהוספת מיצוי של תפוחי אדמה, מיצוי של גזר או פיסת כבד של עופות. בכל אלו מצוי האנזים קטלאז המשמש זרז ביולוגי לתגובה.

באורגניזמים חיים קיימים אלפי זרזים ביולוגיים הנקראים אנזימים. האנזימים הם מולקולות ענק, שעל פי המבנה הכימי שלהן ניתן לשייך אותן לקבוצת החלבונים. קיום אנזימים בגוף החי מאפשר לו לקיים תהליכים בטמפרטורה יחסית נמוכה (טמפרטורת הגוף שלו), בעוד שללא האנזימים היה נדרש לקיים תהליכים אלו בטמפרטורות גבוהות ובלחץ גבוה.

העשרה: קטליזה הומוגנית והטרוגנית

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. פעולת אנזימים היא דוגמה לקטליזה הומוגנית.

בתגובות רבות, בהן האדם עושה שימוש בזרז, הקטליזה הינה הטרוגנית.

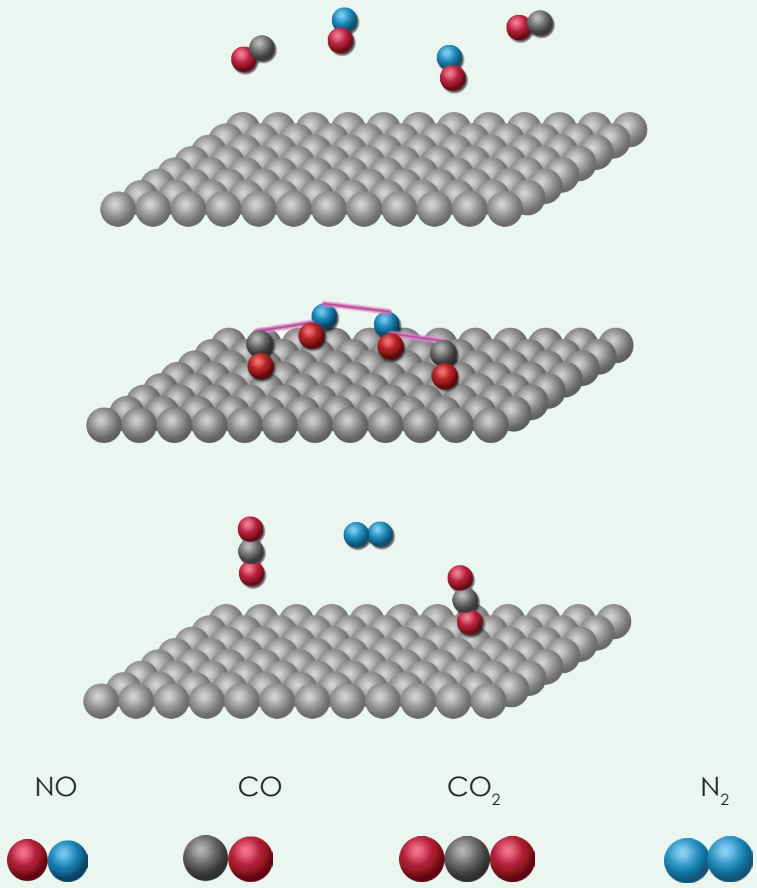
הזרזים המוצקים הם בדרך כלל מתכות מעבר, או תחמוצות של מתכות מעבר. מנגנון פעולתם של הזרזים לא תמיד מובן. משערים, כי ההיערכות האלקטרונית הייחודית באטומים של מתכות מעבר מאפשרת לחומרים אלה לשמש זרזים.

באופן כללי, על פני זרז מוצק נוצרים קשרים חדשים בין האטומים (כפי שניתן לראות באיור 2) ומתרופפים קשרים קיימים (לא מומחש באיור 2).

דוגמה לקטליזה הטרוגנית על פני זרז מוצק

איור 2 ממחיש את התרחשות התגובה הבאה: $2CO_{(g)} + 2NO_{(g)} \rightarrow N_{2(g)} + 2CO_{2(g)}$ על המתכת רודיום.

איור 2 – קטליזה הטרוגנית על פני 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, $CO_{(g)}$, וגם חנקן חד-חמצני $NO_{(g)}$, 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, כיוון שנוכחות נוכחות יוני עופרת עלולה לגרום לפגיעה בזרזים שבממיר, תהליך המוכר כ"הרעלת" הזרז - הקשרות 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 אֶתֶן בלחץ אטמוספרי דרך תמיסת פחמימן נוזלי המכילה כמויות קטנות של $TiCl_4 + (C_2H_5)_3Al$ גרמה להיווצרות מיידית של פולימר של אֶתֶן, שונה מזה שנוצר בהיעדרן של אותן תוספות. לפולימר החדש יש תכונות משופרות, המכשירות אותו לשימושים רבים. הכימאי האיטלקי 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.

ד. שטח פנים (של מוצק): כאשר מעורב בתגובה מוצק (כמגיב או כזרז), יש לגודל החלקיקים של המוצק השפעה על קצב התגובה.

כאשר המוצק הוא מגיב: ככל שגודל חלקיקי המוצק קטן יותר, שטח הפנים הכולל שלהם גדל, וקיים שטח מגע גדול יותר עם המגיבים האחרים. נוצרות יותר התנגשויות בכלל והתנגשויות פוריות בפרט באותה יחידת זמן, ועל כן מתקבלים יותר תוצרים ליחידת זמן , כלומר קצב התגובה יהיה גדול יותר.

כאשר המוצק הוא זרז: ככל שגודל חלקיקי הזרז קטן יותר, הזרז בעל שטח פנים גדול יותר, ויש לו שטח מגע גדול יותר עם המגיבים. יותר מולקולות מגיבים יוכלו להיקשר לזרז באותה יחידת זמן. כאמור הזרז מאפשר לחלק גדול יותר של מולקולות המגיבים לעבור את המחסום האנרגטי משום שאנרגיית השפעול של התהליך עם הזרז נמוכה יותר, ולכן מספר ההתנגשויות הפוריות גדל ואיתו גם קצב התגובה.

דוגמה להשפעת שטח הפנים על קצב התגובה היא כאשר משווים תהליך המסה של כדור אלקא-זלצר[3] במים. כאשר הכדור יפורר לאבקה הוא יתמוסס במים בזמן קצר יותר לעומת כדור שלם.

מלבד הגורמים הללו, קיימים גורמים נוספים שעשויים להשפיע על קצב התגובה, אולם אנו לא נתמקד בהם:

ה. לחץ: בתגובות המתרחשות בפאזה גזית, קצב התגובה גדל עם העלייה בלחץ משום שהגדלת הלחץ בכלי בטמפרטורה קבועה, כרוכה בהקטנת הנפח. הקטנת נפח הכלי גורמת להגדלת הריכוזים של המגיבים, דבר שמגדיל את מספר ההתנגשויות ליחידת זמן של מולקולות המגיבים בכלל ומספר ההתנגשויות הפוריות בפרט. כתוצאה מכך קצב התגובה גדל.

בתעשייה הכימית, העלאת הלחץ עשויה להביא להגדלת קצב התגובה בתגובות שבהן מעורבים חומרים גזיים, אך כרוכה בהשקעה כספית ניכרת כיוון שהכלים שבהם מבצעים את התגובות צריכים להיות עמידים ללחץ שנוצר בכלי.

ו. סוג החומרים המגיבים בתגובה: תגובות בין חומצה לבסיס, תגובות שיקוע ותגובות בין יונים הן מהירות מאוד. תגובות בין חומרים בפאזה גזית איטיות יותר. לכל תגובה אנרגיית שפעול אופיינית ולכן גם בתנאי טמפרטורה ולחץ זהים יהיה לתגובות שונות קצבי תגובה שונים.

סיכום

- קצב הוא שינוי שחל בגודל מסוים ביחידת זמן.
- קצב התגובה מוגדר כשינוי בריכוז של אחד (אחד החומרים המשתתפים בתגובה) המשתתפים בתגובה ביחידת זמן. ניתן לקבוע את קצב התגובה באמצעות ניסוי.
- בדרך כלל, קצב התגובה אינו קבוע במהלך התרחשותה.
- מודל ההתנגשויות המורחב בין חלקיקים:

מולקולות המגיבים נמצאות בתנועה מתמדת. אם מתרחשות התנגשויות באנרגיה מתחת לאנרגיית הסף (אנרגיית השפעול) או בזווית לא מתאימה, המולקולות של המגיבים ינתזו זו מזו.

אם מתרחשות התנגשויות באנרגיה מעל אנרגיית הסף (אנרגית השפעול) ובזווית מתאימה ייווצר תצמיד

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

משופעל. זהו חלקיק לא יציב שעשוי להתפרק למגיבים או לתוצרים. אם התצמיד מתפרק לתוצרים, נאמר שהתרחשה התנגשות פורייה. כאשר יש הרבה התנגשויות פוריות ליחידת זמן ניתן למדוד את השינוי בתכונה הניתנת למדידה ברמה מאקרוסקופית, וכך להעריך את קצב התגובה.

- אנרגיית שפעול היא כמות האנרגיה ההתחלתית שיש להשקיע על מנת שהתגובה תתחיל להתרחש. זו האנרגיה הנדרשת ליצירת התצמיד המשופעל.

בהשוואה בין תגובה שמתרחשת בכיוון הישיר לעומת התגובה בכיוון ההפוך, אנרגיית השפעול הגדולה יותר תהיה עבור התהליך האנדותרמי.

בהשוואה בין אנרגיות שפעול של תהליכים שונים: ככל שאנרגיית השפעול תהיה גבוהה יותר, התגובה תהיה איטית יותר. עם זאת, הקצב שלה יושפע יותר משינויי טמפרטורה (העלאת טמפרטורה תגדיל במידה רבה יותר את הקצב של התגובה בעלת אנרגית השפעול הגבוהה יותר).

- הגורמים המשפיעים על קצב תגובה:

1. ריכוזי החומרים: ברוב המקרים ריכוז התחלתי גדול יותר של מגיב גורם לקצב תגובה גדול יותר. יחד עם זאת קיימות תגובות שבהן ריכוז המגיב אינו משפיע על קצב התגובה.
2. הטמפרטורה בה מתרחשת התגובה: העלאת הטמפרטורה גורמת לקצב תגובה גדול יותר .
3. נוכחות זרז – זרז הינו חומר אשר אינו מופיע כמשתתף בניסוח התגובה, אך נוכחותו גורמת לתגובה להתרחש בקצב גדול יותר מאשר בהיעדרו.
4. שטח הפנים של מוצקים – אם מוצקים מעורבים בתגובה, הגדלת שטח פנים של המוצק גורמת לקצב תגובה גדול יותר.
5. לחץ –במקרה שבתגובה מעורבים גזים, הגדלת הלחץ בטמפרטורה קבועה תגרום להקטנת הנפח והגדלת הריכוזים ההתחלתיים של המגיבים ולכן להגדלת קצב התגובה.
6. סוג החומרים ואנרגיית השפעול של התגובה: אנרגיית שפעול גבוהה גורמת לקצב קטן יותר של תגובה.

שאלות רב ברירה

בכל אחת מהשאלות הבאות בחרו את התשובה הנכונה ביותר:

1. העלאת הריכוז ההתחלתי של המגיבים בתגובה גורמת ל:
   א. העלאת האנרגיה הקינטית הממוצעת של החלקיקים.
   ב. הגדלת מספר ההתנגשויות בין החלקיקים ליחידת זמן.
   ג. התרחשות התגובה במסלול אחר בו אנרגיית השפעול נמוכה יותר.
   ד. הקטנת קצב התגובה כי יש צפיפות גדולה יותר במערכת.

2. העלאת הטמפרטורה במערכת סגורה **אינה** מעלה את:
   א. מספר ההתנגשויות בין החלקיקים ליחידת זמן.
   ב. אנרגיית השפעול.
   ג. מספר החלקיקים המגיבים שהם בעלי אנרגיה גבוהה מאנרגיית הסף.
   ד. המהירות הממוצעת של החלקיקים במערכת.

3. המשפטים הבאים מתייחסים לתפקידו של זרז במהלך התרחשות תגובה. מהו המשפט **השגוי**?

א. הזרז מאפשר את התרחשות התגובה במסלול חלופי בו קיימת אנרגיית שפעול נמוכה יותר.

ב. הזרז יכול להוות איזור מפגש למולקולות המגיבים.

ג. הזרז מקנה למגיבים אנרגיה לעבור את מחסום אנרגיית השפעול.

ד. מסת הזרז במהלך התרחשות התגובה אינה משתנה.

4. איזה מבין המשפטים הבאים לגבי הוספת זרז בתגובה כימית **אינו** נכון?

א. הזרז מגביר את המהירות הממוצעת של המולקולות.

ב. הזרז גורם למגיבים ליצור תצמיד משופעל שונה מאשר ללא זרז.

ג. הזרז מוריד את המחסום האנרגטי לתגובה.

ד. הזרז מקצר את זמן התגובה.

5. כל אחת מהפעולות הבאות מגדילה את הסיכוי להתנגשויות פוריות פרט לאחת. מהי?

א. הוספת זרז .

ב. הגדלת הריכוז של החומרים .

ג. הקטנת שטח הפנים של המוצק.

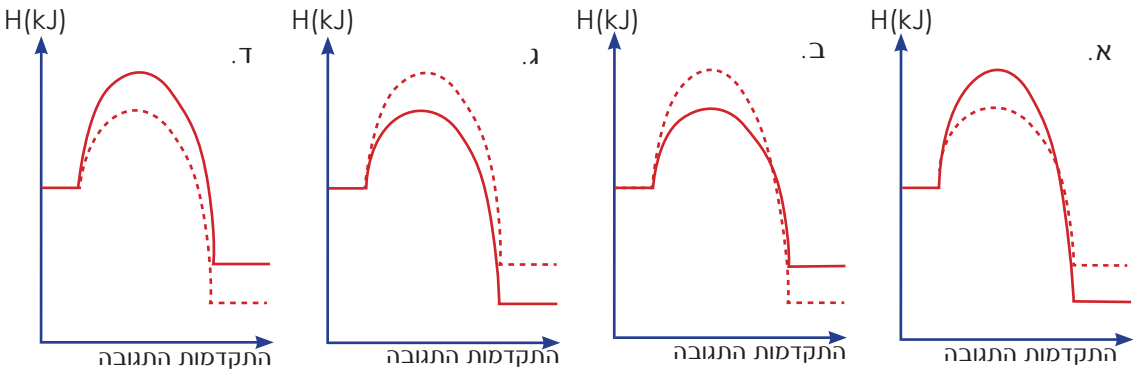
ד. העלאת הטמפרטורה.

6. נתונות שתי תגובות בהן מגיב $NO_{(g)}$:

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

(2) $NO_{(g)} \rightarrow \frac{1}{2}N_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)}$ $\Delta H° = -90.4\ kJ$

כמו כן ידוע כי כאשר מזרימים $NO_{(g)}$ וחמצן **במהירות ובקירור** מתרחשת תגובה (1) בלבד. איזה מבין הגרפים הבאים א-ד מתאר את שתי התגובות הנתונות? קו מלא מיצג את תגובה (1), קו מקווקו מייצג את תגובה (2).



7. איזה/אילו מבין הגדלים הבאים יושפע מהוספת זרז לתגובה? (ייתכנו מספר אפשרויות לתשובה)

א. השינוי באנתלפיה של התגובה.

ב. אנרגיית השפעול של התגובה המקורית (ללא זרז).

ג. קצב התגובה הישירה.

ד. קצב התגובה ההפוכה.

8. איזה/אילו מבין הגדלים הבאים יושפע מהעלאת הטמפרטורה בכלי? (ייתכנו מספר אפשרויות לתשובה)

א. השינוי באנתלפיה של התגובה.

ב. אנרגיית השפעול של התגובה.

ג. קצב התגובה הישירה.

ד. קצב התגובה ההפוכה.

שאלות פתוחות

(שאלות 1,3,5,9 לקוחות מדגם הוראה קינטיקה שפותח ע"י מרכז המורים)

1. לפניכם ארבעה היגדים. קבעו אילו מבין ההיגדים הבאים נכונים ואילו אינם נכונים. תקנו והסבירו את ההיגדים שאינם נכונים.

א. הוספת זרז מקטינה את אנרגית שפעול של התגובה.

ב. הוספת זרז גורמת להגדלת מספר התצמידים המשופעלים באותה יחידת זמן .

ג. חימום כלי התגובה גורם לעליה באנרגית השפעול ולכן קצב התגובה יורד.

ד. הגדלת שטח הפנים של המגיבים גורמת להגדלת קצב התגובה מכיוון שריכוז המגיבים גדל.

2. לפניכם שני תהליכים שעשוי לעבור המגיב A:

(1) $A + B \rightarrow C$

(2) $2A + D \rightarrow E$

תהליך (1) הוא התהליך הרצוי בתעשייה, ואילו תהליך (2) אינו רצוי.

כדי למנוע את התרחשותו של תהליך (2), מקררים במהירות את מיכל התגובה שבו מצוי A

לאיזה מבין שני התהליכים: (1) או (2) יש אנרגיית שפעול גבוהה יותר? נמקו.

3. התגובה : $2NO_{2(g)} + O_{3(g)} \rightarrow N_2O_{5(g)} + O_{2(g)}$

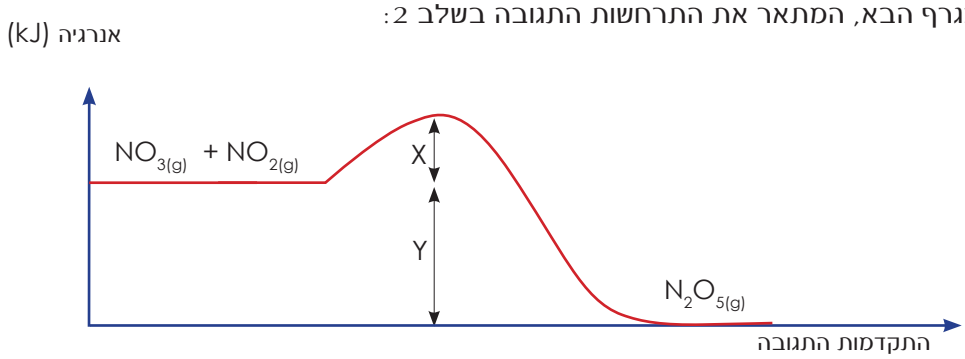
מתרחשת באטמוספירה של כדור הארץ. התגובה מתרחשת בשני שלבים:

שלב 1, מהיר $NO_{2(g)} + O_{3(g)} \rightarrow NO_{3(g)} + O_{2(g)}$

שלב 2, איטי $NO_{3(g)} + NO_{2(g)} \rightarrow N_2O_{5(g)}$

א. לאיזה שלב מבין שני השלבים אנרגיית שפעול גבוהה יותר? נמקו.

ב. התבוננו בגרף הבא, המתאר את התרחשות התגובה בשלב 2:



i. האם אנרגיית השפעול, עבור התגובה בשלב 2, מסומנת על ידי X, Y או X+Y? הסבירו.

ii. האם התגובה בשלב 2 אקסותרמית או אנדותרמית? נמקו **על פי הגרף**.

ג. האם הוספת זרז לתגובה כלשהי:

i. תשפיע על השינוי באנתלפיה, ΔH^o, של התגובה? נמקו.

ii. תגרום לכך שניתן יהיה לבצע את התגובה בטמפרטורות נמוכות יותר? נמקו.

4. אחד משלבי הביניים של ייצור חומצה גופרתית, $H_2SO_{4(l)}$, שיש לה שימושים רבים בתעשייה הכימית, הוא שלב הייצור של גופרית תלת-חמצנית, $SO_{3(l)}$.

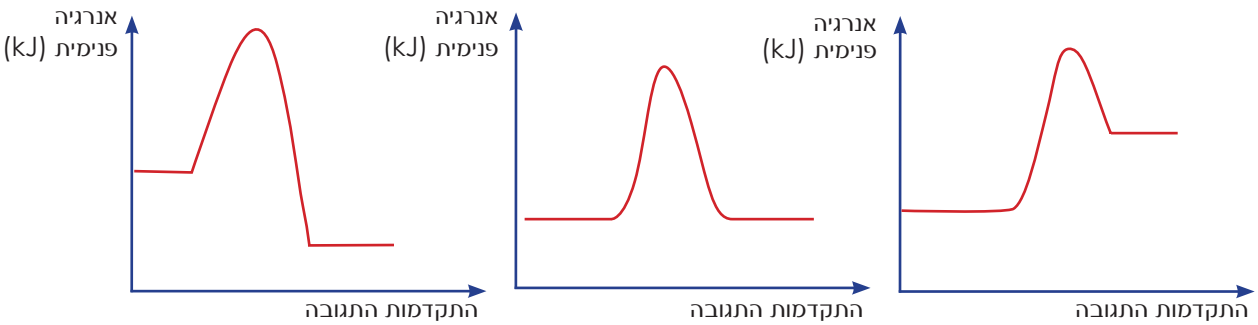
$SO_{3(l)}$ מתקבלת מגופרית דו-חמצנית, $SO_{2(g)}$, וחמצן מהאוויר, על פי התגובה:

$$SO_{2(g)} + \frac{1}{2} O_{2(g)} \rightarrow SO_{3(l)} \qquad \Delta H^o = -92\ kJ$$

תגובה זו היא איטית ביותר.

א. איזה מהגרפים א, ב או ג, שלפניכם עשוי לתאר נכון את השתנות האנרגיה הפנימית של החומרים עם התקדמות התגובה לקבלת $SO_{3(l)}$? הסבירו מדוע פסלתם את שני הגרפים האחרים.

גרף א. גרף ב. גרף ג.



ב. בתעשייה מבצעים את התגובה הנתונה בנוכחות זרז. הסבירו מדוע.

ג. העתיקו את הגרף שבחרתם בסעיף א', ושרטטו לידו את הגרף שעשוי לתאר נכון את השתנות האנרגיה הפנימית של החומרים עם התקדמות התגובה לקבלת $SO_{3(l)}$ בנוכחות זרז.

שאלות מסכמות לפרקים א׳,ב׳ ו-ג׳

שאלה 1 אנרגיה וקצב תגובה

נתונה התגובה (1): $N_{2(g)} + 2H_{2(g)} \rightarrow N_2H_{4(g)} \quad \Delta H^\circ_1 = 98\ kJ$

בטבלה שלפניכם מוצגים נתונים על אנתלפיות קשר:

הקשר	**אנתלפיית קשר** (kJ/mol)
H-H	436
N≡N	945
N-N	163

א. 1. חשבו את אנרגיית הקשר הממוצעת N-H במולקולה $N_2H_{4(g)}$. פרטו את חישוביכם.

2. שרטטו דיאגרמה המתארת את המגיבים, התוצרים, ושינוי האנתלפיה בתגובה (1), כולל המצב של אטומים בודדים.

ביקשו לזרז את קצב תגובה (1). הוצעו מספר אפשרויות להגדלת קצב התגובה:

a. הגדלת הריכוז של גז המימן בכלי התגובה.

b. העלאת הטמפרטורה בכלי התגובה.

ב. התייחסו **לכל אחת** מן האפשרויות, והסבירו בעזרת מודל ההתנגשויות, כיצד היא תגרום לעליה בקצב התגובה (1).

הידרזין משמש כחומר דלק לטילים, בתגובתו עם מי חמצן, $H_2O_{2\,(l)}$. התוצרים המתקבלים הם: $N_{2(g)}$ ו- $H_2O_{(g)}$

לפניכם ניסוח תגובה (2): $(2)\ N_2H_{4(g)} + 2\,H_2O_{2(l)} \rightarrow N_{2(g)} + 4H_2O_{(g)}$

בנוסף, נתונות התגובות הבאות:

$(3)\ H_{2(g)} + O_{2(g)} \rightarrow H_2O_{2(l)} \qquad \Delta H^\circ = -187.6\ kJ/mol$

$(4)\ H_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow H_2O_{(g)} \qquad \Delta H^\circ = -241.5\ kJ/mol$

ג. חשבו את ΔH° עבור תגובה (2). היעזרו גם בנתונים מסעיף א׳.

ד. מה יהיה השינוי באנרגיה בהתרחשות תגובה (2) אם התקבלו בתגובה 720 קילוגרם מים? ציינו את הגודל ואת הסימן.

ה. התייחסו לתגובה (2), וקבעו אם אנרגיית השפעול של התגובה הישירה גבוהה, נמוכה או זהה לאנרגיית השפעול של התגובה ההפוכה. נמקו את קביעתכם.

ניתן להגדיל את קצב התגובה גם על ידי הוספת זרז.

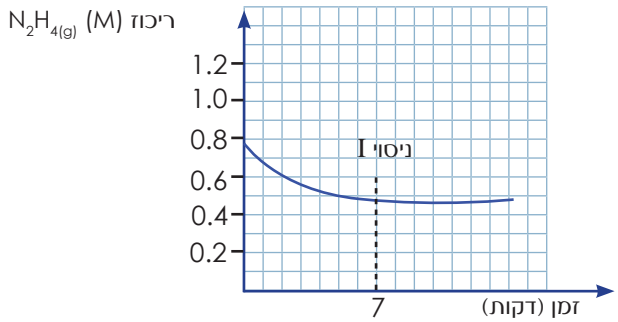
ו. 1. שרטטו בגרף אחד את השתנות האנתלפיה בתגובה (2) במהלך התרחשות התגובה עם וללא זרז. ציינו על גבי הגרף את המגיבים, התוצרים, אנרגיית השפעול עם וללא זרז, ו- $\Delta H°$ של התגובה.

2. הסבירו ברמה המיקרוסקופית כיצד הזרז יכול להגדיל את קצב התגובה.

בשני ניסויים שונים ביצעו את תגובה (2) פעם ללא זרז ופעם עם זרז. בשני הניסויים הריכוזים ההתחלתיים של המגיבים וטמפרטורת הכלים היו זהים.

3. בגרף שלפניכם מופיעה השתנות ריכוז המגיב $N_2H_{4(g)}$ בניסוי I ללא זרז. הוסיפו על הגרף, באופן סכמטי, את השינוי בריכוז השתנות הריכוז של המגיב $N_2H_{4(g)}$ בניסוי II ללא זרז.

השתנות ריכוז $N_2H_{4(g)}$ עם הזמן במהלך התגובה:



ז לפניכם ניסוחים של מספר תגובות אקסותרמיות:

(2) $N_2H_{4(g)} + 2\,H_2O_{2(l)} \rightarrow N_{2(g)} + 4H_2O_{(g)}$

(5) $N_2H_{4(l)} + 2\,H_2O_{2(l)} \rightarrow N_{2(g)} + 4H_2O_{(g)}$

(6) $N_2H_{4(g)} + 2\,H_2O_{2(l)} \rightarrow N_{2(g)} + 4H_2O_{(l)}$

הציגו את התגובות (2), (5) ו-(6) בגרף אחד, וקבעו באיזו תגובה שינוי האנתלפיה הוא הגדול ביותר.

שאלה 2

השאלה עוסקת בדרכים שונות לקבלת $NO_{2(g)}$:

דרך ראשונה לקבלת $NO_{2(g)}$ היא לפי תגובה (1):

(1) $N_2O_{4(g)} \rightarrow 2\,NO_{2(g)} \quad \Delta H° = +57.2\ kJ$

כמו כן, ידוע כי אנרגיית השפעול של התגובה הישירה היא 78 kJ.

א. 1. שרטטו גרף של השתנות האנתלפיה בתגובה במהלך התרחשות התגובה (1). ציינו בשרטוט על גבי הגרף את המגיבים, התוצרים, אנרגיית השפעול (של התגובה הישירה), ו- $\Delta H°$ לתגובה.

2. חשבו את אנרגיית השפעול של התגובה: $2NO_{2(g)} \rightarrow N_2O_{4(g)}$ והציגו אותה על הגרף ששרטטתם בסעיף 1.

דרך שניה לקבלת $NO_{2(g)}$ היא לפי תגובה (2):

(2) $NO_{(g)} + 0.5O_{2(g)} \rightarrow NO_{2(g)}$

כאשר מגיבים 90 גרם של NO, לפי תגובה (2), **נפלטת** אנרגיה בשיעור של 171.6 קילוג'אול.

ב. חשבו את שינוי האנתלפיה עבור תגובה (2). פרטו את חישוביכם.

ג. היעזרו בסעיפים קודמים וחשבו את שינוי האנתלפיה בתגובה (3):

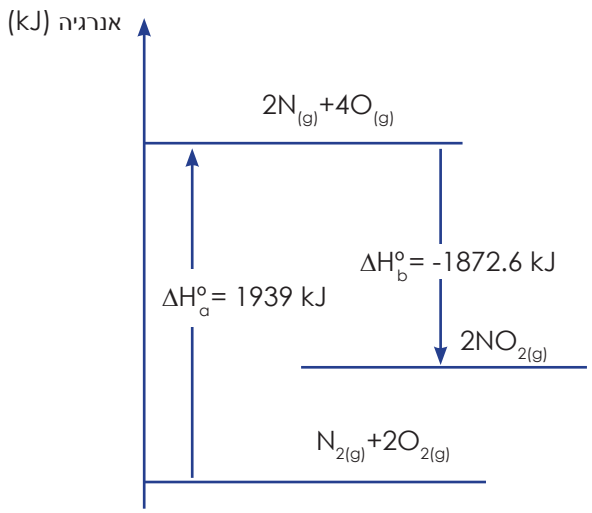
(3) $2NO_{(g)} + O_{2(g)} \rightarrow N_2O_{4(g)}$

ד. שרטטו גרף, שבו תוצגנה תגובות (1), (2), ו-(3), כולל שינוי האנתלפיה בתגובה (3).

דרך שלישית להפיק $NO_{2(g)}$, היא התגובה (4):

(4) $N_{2(g)} + 2O_{2(g)} \rightarrow 2NO_{2(g)}$ $\Delta H^\circ_4 = ?$

ה. היעזרו בגרף וחשבו את שינוי האנתלפיה של תגובה (4).



ביצעו את **תגובה (2)** ארבע פעמים. בכל אחד מהניסויים הוכנסו לכלי אותם המגיבים.

המידע על התנאים בכל ניסוי מופיע בטבלה הבאה:

מספר הניסוי	ריכוז $NO_{(g)}$ (M)	ריכוז $O_{2(g)}$ (M)	טמפרטורה (°C)	קצב התגובה ההתחלתי (M/sec)
1	1.5	0.8	20	5×10^{-2}
2	1.5	0.8	30	?
3	0.75	0.8	20	?
4	1.5	0.8	20	8×10^{-1}

היעזרו בטבלה הנתונה וענו על הסעיפים הבאים:

ו. האם קצב התגובה בניסוי 2 צפוי להיות גדול, קטן או זהה לקצב התגובה בניסוי 1? הסבירו קביעתכם תוך התבססות על הרמה המיקרוסקופית.

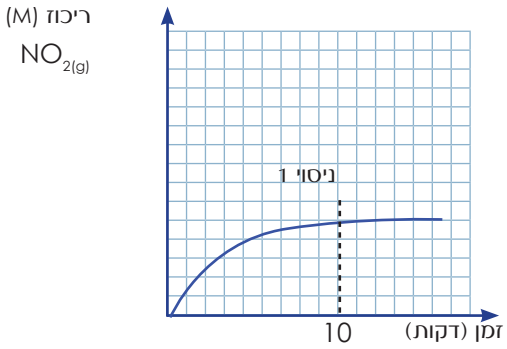
ז. האם קצב התגובה בניסוי 3 צפוי להיות גדול, קטן או זהה לניסוי 1. הסבירו קביעתכם תוך התבססות על הרמה המיקרוסקופית.

ח. 1. הציעו הסבר מדוע קצב התגובה בניסוי 4 גדול מקצב התגובה בניסוי 1. נמקו תוך התבססות על הרמה המיקרוסקופית.

2. שרטטו **במערכת צירים אחת** גרף סכמטי שמראה את השתנות האנתלפיה של המערכת במהלך התגובה בניסוי הראשון לעומת הניסוי הרביעי. הוסיפו על הגרף את המגיבים, התוצרים, ΔH°, אנרגיית השפעול של התגובה בניסוי 1, ואנרגיית השפעול של התגובה בניסוי 4.

לפניכם גרף של שינוי ריכוז התוצר $NO_{2(g)}$ עם הזמן בניסוי 1, במהלך 10 הדקות הראשונות של הניסוי.

השינוי בריכוז $NO_{2(g)}$ עם הזמן במהלך התגובה:



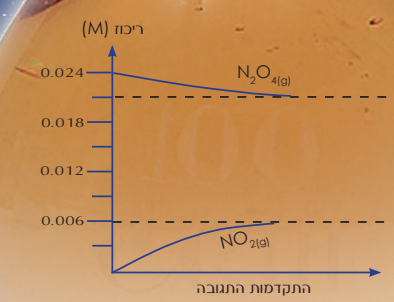
3. הוסיפו על הגרף, באופן סכמטי, את השתנות ריכוז התוצר $NO_{2(g)}$ בניסוי 4.

פרק ד

שיווי משקל כימי

- באילו תנאים מתקיימות תגובות הפוכות?
- 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



הצגת מצב של שיווי משקל כימי

ניסוי 1 - מפתיע!

חומרים וציוד לקבוצת תלמידים או להדגמה

10 מ"ל תמיסת $MgCl_{2(aq)}$ 1M, 5 מ"ל תמיסת נתרן פחמתי, $Na_2CO_{3(aq)}$ 1M, 5 מ"ל תמיסת נתרן הידרוכסידי $NaOH_{(aq)}$ 1M, תמיסת נחושת כלורית, $CuCl_{2(aq)}$ 1M, שתי פיפטות של 10 מ"ל, משאבה לפיפטה, כוס זכוכית בנפח 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. הוסיפו לכוס 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 $MgCO_{3(s)}$.

התגובה נטו אשר התרחשה בכוס היא: $Mg^{2+}_{(aq)} + CO^{2-}_{3(aq)} \rightarrow MgCO_{3(S)}$

1. מהו מספר המולים ההתחלתי של כל אחד מהמגיבים?
2. מהם החלקיקים המרכיבים את המוצק? מהם החלקיקים המצויים בנוזל?
3. 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.

ד. תארו את תצפיותיכם.

שאלות בעקבות הניסוי

1. הוסיפו 2 טיפות של תמיסת $CuCl_{2(aq)}$ בריכוז 1M לתוך מבחנה ב.
2. על פי טבלת המסיסות, מגנזיום הידרוכסידי, $Mg(OH)_{2(S)}$, ונחושת פחמתית, $CuCO_{3(S)}$, הם חומרים יוניים, אשר מידת מסיסותם במים קטנה ביותר.
3. האם תוצאות הניסוי תואמות את הגרף ששרטטתם בשלב א' בסעיף 3? הסבירו.
4. אילו שאלות עולות בעקבות הניסוי?

מסקנה: לאחר התרחשות תגובת שיקוע, קיימים 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, ריכוז התוצרים אינו גדל עוד, למרות שעדיין קיימים 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 בהן המגיבים אינם מגיבים עד תום:

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 כי נותר סוכר מוצק שאינו מתמוסס עוד במים.
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 מספר המולים קטן משמעותית מ- 2 מול וריכוז האמוניה שנוצרה אינו גדל, גם לאחר זמן.

כיצד נסביר את הממצאים? מדוע התהליכים שהוזכרו **אינם מתרחשים עד תום 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 האמבטיה 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. $H_2O_{(g)} \rightarrow H_2O_{(l)}$

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, המוכר לכם מחיי היום יום, ובו תהליכי 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 זה לזה. 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
- בכלי קיימים כל החומרים הדרושים להתרחשות שתי התגובות

התייחסנו לאפשרות קיומן של שתי תגובות הפוכות זו לזו, אך טרם התייחסנו לקצב שלהן.

בהמשך, בחינת **קצב ההתרחשות** של תגובה ישירה לעומת קצב ההתרחשות של תגובה הפוכה, תבהיר כיצד מושג מצב של שיווי משקל כימי.

פעילות - אנלוגיה לתגובות הפוכות

לביצוע הפעילות דרושים שני מתנדבים. תלמידי הכיתה אוספים תצפיות ומתעדים אותן בכתב.

א. קחו שני כלים שקופים בנפח של 3-2 ליטר, שווים בגודלם ובצורתם. מלאו בכלי א מים עד כשני שלישים מנפח הכלי 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.

ג. שני המתנדבים צריכים להעביר **בו זמנית**, מים מכלי א לכלי ב ולהיפך. שימו לב לנפח המים שניתן להעביר כל פעם, מכלי אחד למשנהו!

ד. כעבור 10 העברות מכלי אחד למשנהו, רשמו שוב את גובה המים בכל אחד משני הכלים.

ה. חיזרו מספר פעמים על הפעולות שמתוארות בסעיפים ג' ו-ד'.

שאלות

1. האם נפח המים שמעבירים בכל פעם, בתחילת הפעילות, מכלי א לכלי ב קטן, גדול או שווה מנפח המים שמעבירים בכיוון ההפוך?
2. האם נפח המים שמעבירים מכלי א לכלי ב קטן, ללא שינוי או גדל במהלך הפעילות? פרטו.
3. האם נפח המים שמעבירים מכלי ב לכלי א קטן, ללא שינוי או גדל 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 **אנלוגיה** 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 לזו.

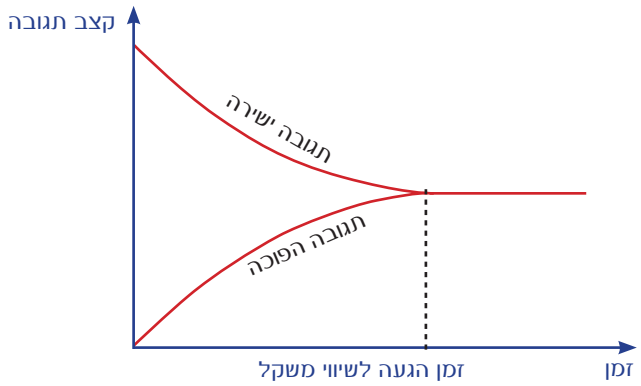
הקשר בין קצב תגובות הפוכות לבין ריכוזי חומרים

למדנו שקצב התרחשותן של רוב התגובות תלוי בריכוזים ההתחלתיים של המגיבים. כלומר, עבור אותה תגובה: אם הריכוזים ההתחלתיים גבוהים יותר - הקצב של התגובה גדול יותר ואם הריכוזים נמוכים יותר- הקצב של התגובה קטן 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 1 מופיע תיאור גרפי של קצב התגובה הישירה והתגובה ההפוכה כתלות בזמן, במקרה שבו מוכנסים רק מגיבים לכלי סגור. בהתחלה, קצב התגובה הישירה גדול ואילו קצב התגובה ההפוכה אפסי כי בכלי אין תוצרים. בהמשך, קצב התגובה הישירה בין מגיבים יורד וקצב התגובה ההפוכה עולה, עד שקצב התגובה הישירה וקצב התגובה ההפוכה משתווים זה לזה. נקודת הזמן בה קצב שתי התגובות משתווה, היא זמן ההגעה לשיווי משקל.

איור 1 - השינוי בקצב התגובה הישירה ובקצב התגובה ההפוכה כתלות בזמן
(במקרה שבו מוכנסים רק מגיבים לכלי)



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, מספר המולים של החומר שנוצר (התוצר) בפרק זמן מסוים שווה למספר המולים של 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 הוסברה קודם באמצעות מודל ההתנגשויות 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.

סימון של תגובה בה מתקיים מצב שיווי משקל דינמי ייעשה על ידי שימוש בחץ כפול ⇄ בניסוח התגובה.

סיכום המאפיינים של מצב שיווי משקל

ברמה מאקרוסקופית:

1. מתרחש במערכת סגורה.
2. בכלי יש גם מגיבים וגם תוצרים. גם אם בתחילת התהליך נכניס לכלי רק מגיבים או רק תוצרים, או תערובת של שניהם, במצב שיווי משקל יימצאו בכלי גם מגיבים וגם תוצרים.
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. (קצב התגובה הישירה=קצב התגובה ההפוכה).
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. להלן 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.

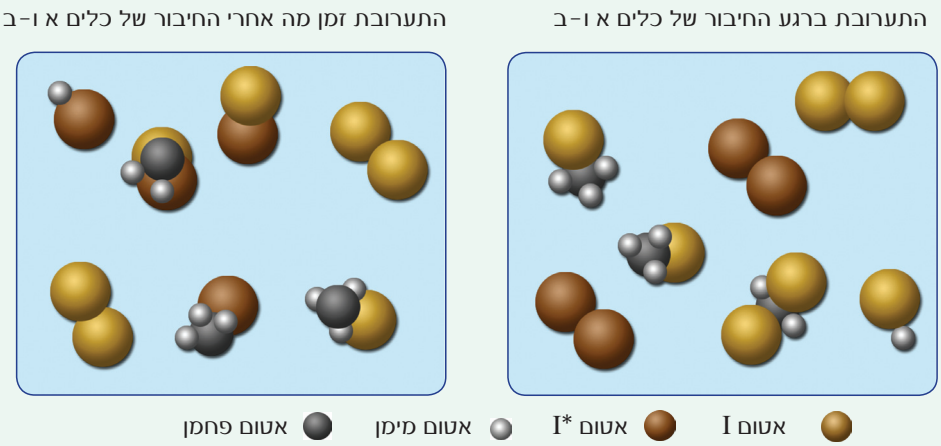
לכלי ב, זהה בנפחו לכלי א, מכניסים תערובת של ארבעה חומרים: - $HI_{(g)}$, $CH_2I_{2(g)}$, $CH_3I_{(g)}$, $I_2{}^*_{(g)}$ בריכוזים שווים לריכוזי שיווי המשקל בכלי א ומחברים מיד את כלי ב לכלי א. היוד בכלי ב רדיואקטיבי, לכן מסומן $I_2{}^*_{(g)}$. אטומים רדיואקטיביים של יוד פולטים קרינה (מהגרעין), הניתנת לזיהוי, 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 המגיב $CH_3I_{(g)}$. 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 2 – 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 בעלי נפח זהה הנמצאים בטמפרטורה 800°C, הוכנסו מספר שונה של מולים של החומרים: $SO_{2(g)}$ ו- $O_{2(g)}$. הכלים נשמרו 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:

ריכוז החומר (M) / 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 ריכוזי שיווי המשקל המופיעים בארבעת הכלים השונים בטבלה 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).

ריכוז החומר (M) / 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 שיווי המשקל של הריכוזים, 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).

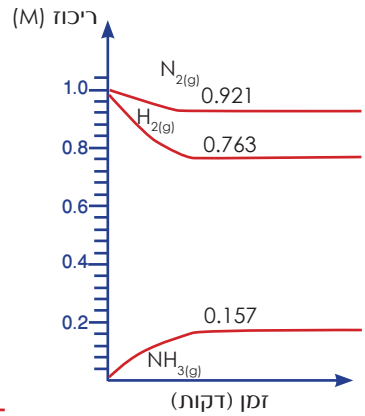
לאותה התגובה יש קבועי שיווי משקל שונים בטמפרטורות שונות.

נביא **דוגמה נוספת** של קבוע שיווי משקל, המאפיין תגובה בטמפרטורה מסוימת, אך הפעם נציג את הנתונים באופן גרפי.

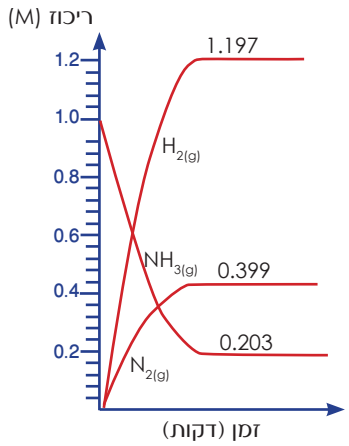
התגובה: $N_{2(g)} + 3\,H_{2(g)} \rightleftarrows 2\,NH_{3(g)}$. בוצעה בשלושה ניסויים שונים, אך באותה טמפרטורה.

בגרפים הבאים מוצגים השינויים בריכוזי החומרים עם הזמן בשלושת הניסויים השונים:

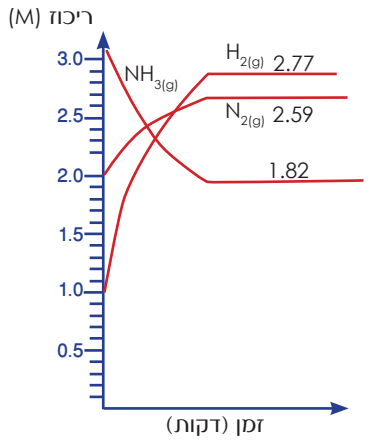
גרף 1



גרף 2



גרף 3



על פי הגרפים הנ"ל (גרף 1, גרף 2, גרף 3):

1. רשמו בטבלה בהמשך את ריכוזי החומרים המשתתפים בתגובה.
2. השוו בין הריכוזים של החומרים בשלושת הניסויים השונים: מה שונה ומה דומה ביניהם?
3. רשמו את הביטוי המתאים לקבוע שיווי המשקל.
4. חשבו את הקבוע המתאים לכל אחד מהניסויים. השוו בין התוצאות והסיקו מסקנות.

	גרף 1		גרף 2		גרף 3	
ריכוז החומר (M)	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						

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 המשקל, שקרובים ביניהם בגודלם (במקרה):

עבור $2\,SO_{3(g)} \rightleftarrows 2\,SO_{2(g)} + O_{2(g)}$ $K_c = 0.041$ בטמפרטורה 723°C

עבור $2\,NH_{3(g)} \rightleftarrows N_{2(g)} + 3\,H_{2(g)}$ $K_c = 0.060$ בטמפרטורה 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 ריכוזי תוצרים גבוהים, ביחס לריכוזי המגיבים. כלומר, בטמפרטורה בה נמדד קבוע שיווי המשקל של התגובה, **יש הרבה יותר תוצרים ממגיבים**. במקרה כזה, **באופן מעשי, מבחינים בעיקר בתוצרים ולא במגיבים**, שריכוזיהם נמוכים.

נביא דוגמאות של תגובות מסוג זה:

לתגובות שיקוע רבות, המוכרות לכם, יש קבועים גדולים מאוד בטמפרטורת החדר. כך גם לתגובת סתירה בין חומצה לבסיס יש קבוע גדול, $K_c=1 \cdot 10^{14}$. המשמעות היא, שבמצב שיווי משקל של תגובות אלה, יש ריכוזים גבוהים 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 גבוהים של מגיבים, ביחס לריכוזי התוצרים. פירוש הדבר הוא **שיש הרבה יותר מגיבים מתוצרים** באותם התנאים (באותה טמפרטורה).

ריכוזי התוצרים כה נמוכים, עד **שבאופן מעשי, מבחינים בעיקר בקיום מגיבים ולא בתוצרים**, כלומר לא 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: $2\,H_2O_{(l)} \rightleftarrows H_3O^+_{(aq)} + OH^-_{(aq)}$ $\quad K_c = 1 \cdot 10^{-14}$ 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:

$N_2O_{4(g)} \rightleftarrows 2NO_{2(g)}$ $\quad K_c = 4.61 \cdot 10^{-3}$ ב- 25°C.

קבוע התגובה גדול משמעותית מהקבוע הקודם, כלומר במקרה זה, במצב שיווי משקל יש ריכוזים גבוהים יחסית של תוצרים.

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.

לסיכום: ערכו המספרי של קבוע שיווי המשקל מעיד על היחס בין ריכוזי התוצרים לבין ריכוזי המגיבים בתערובת החומרים במצב שיווי משקל.

ערך מספרי גדול של קבוע שיווי המשקל מעיד על נוכחות תוצרים בריכוזים גבוהים ואילו ערך נמוך של קבוע שיווי המשקל מעיד על נוכחות מגיבים בריכוזים גבוהים.

לכן, קבוע שיווי המשקל מהווה מעין מדד למידת ההתרחשות של התגובה הישירה, בהשוואה להפוכה, עד להגעה לשיווי משקל.

עד כה עסקנו בסוג המידע שקבוע שיווי משקל מביע וכעת 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 מה קצב התגובה.** 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 שלא 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.

תרגילים

1. השאלה עוסקת בתגובה: $N_{2(g)} + 3H_{2(g)} \rightleftarrows 2NH_{3(g)}$, 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.
2. האם הקביעות הבאות נכונות או לא? אם הקביעה אינה נכונה, הסבירו מדוע.
   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.
3. להלן נתונים למערכת: $2A_{(g)} \rightleftarrows B_{(g)} + C_{(g)}$
   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 קצב:
      I. התגובה הישירה?
      II. התגובה ההפוכה? נמקו.
   ג. אם מורידים את הטמפרטורה, של מערכת זו כאשר היא במצב שיווי משקל, האם יישמר מצב שיווי המשקל? הסבירו.
   ד. כיצד תשפיע נוכחות זרז מתאים על קצב התגובות הישירה וההפוכה עד הגעה לשיווי משקל?
4. איזה/אילו מהגדלים הבאים יושפעו מהוספת זרז לתגובה? (ייתכנו מספר אפשרויות תשובה).
   א. קצב התגובה הישירה.
   ב. קצב התגובה ההפוכה.
   ג. השינוי באנתלפיית התגובה ΔH°.

כיצד מחשבים את ערכו של קבוע שיווי המשקל?

כפי שלמדתם, מאפיין חשוב של תגובה כימית המצויה בשיווי משקל הוא קביעות בריכוזי המרכיבים במערכת וקיום **יחס קבוע** בין הריכוזים, הנקרא קבוע שיווי המשקל 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 בביטויים: קצב תגובה, תגובה ישירה, תגובה הפוכה.

כאשר המערכת הגיעה למצב של שיווי משקל נמצא כי בכלי היו 0.089 מול מהתוצר מתאנול, $CH_3OH_{(g)}$.

1. חשבו את ריכוזי החומרים במצב שיווי המשקל.
2. רשמו את הביטוי לקבוע שיווי המשקל.
3. חשבו את ערכו של קבוע שיווי המשקל, 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	$CO_{(g)}$	$H_{2(g)}$	$CH_3OH_{(g)}$
היחסים בניסוח	1	2	1
מספר מולים התחלתי – על פי הנתונים	1.000	1.000	0
השינוי במולים – על פי נתונים ועל פי היחסים בניסוח			
מספר מולים בשיווי משקל – על פי הנתונים או על פי מספר המולים ההתחלתי והשינוי במספר המולים.			0.089
ריכוז בשיווי משקל = מספר המולים/נפח הכלי ב- M			

שלב ב. קובעים את השינוי באחד החומרים

נחשב מהו **השינוי** אשר התרחש במספר מולי המתאנול 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	$CO_{(g)}$	$H_{2(g)}$	$CH_3OH_{(g)}$
היחסים בניסוח	1	2	1
מספר מולים התחלתי – על פי הנתונים	1.000	1.000	0
השינוי במולים – על פי נתונים ועל פי היחסים בניסוח			+0.089
מספר מולים בשיווי משקל – על פי הנתונים או על פי סכום מספר המולים ההתחלתי והשינוי במספר המולים.			0.089
ריכוז בשיווי משקל = מספר המולים/נפח הכלי ב- M			

שלב ג. מחשבים את השינויים בשאר החומרים.

ידוע כי השינוי בריכוז המתאנול הוא 0.089+. לכן השינוי במספר המולים של הפחמן החד-חמצני הוא 0.089 - (כיון שהיחס הסטויכיומטרי הוא 1:1). השינוי במספר המולים של המימן גדול פי שניים מזה של הפחמן-החד חמצני, כלומר 0.178- (כיוון שהיחס הסטויכיומטרי הוא 1:2) נרשום זאת בטבלה.

המרכיב במערכת	$CO_{(g)}$	$H_{2(g)}$	$CH_3OH_{(g)}$
היחסים בניסוח	1	2	1
מספר מולים התחלתי - על פי הנתונים	1.000	1.000	0
השינוי במולים - על פי נתונים ועל פי היחסים בניסוח	-0.089	-0.178	+0.089
מספר מולים בשיווי משקל - על פי הנתונים או על פי סכום מספר המולים ההתחלתי והשינוי במספר המולים.			0.089
ריכוז בשיווי משקל =מספר המולים/נפח הכלי ב- M			

שלב ד. מחשבים את מספר מולי החומרים במצב שיווי משקל.

מסכמים את שתי השורות הראשונות ורושמים בטבלה: 0.911 מול פחמן חד חמצני ו-0.822 מול מימן.

המרכיב במערכת	$CO_{(g)}$	$H_{2(g)}$	$CH_3OH_{(g)}$
היחסים בניסוח	1	2	1
מספר מולים התחלתי - על פי הנתונים	1.000	1.000	0
השינוי במולים - על פי נתונים ועל פי היחסים בניסוח	-0.089	-0.178	+0.089
מספר מולים בשיווי משקל - על פי הנתונים או על פי סכום מספר המולים ההתחלתי והשינוי במספר המולים.	0.911	0.822	0.089
ריכוז בשיווי משקל = מספר המולים/נפח הכלי ב- M			

שלב ה. חישוב **ריכוזו** של כל אחד מהחומרים.

הדבר נעשה על ידי חילוק מספר המולים של החומר בנפח הכלי הנתון. בשאלה זו נתון כי נפח הכלי הוא 10 ליטר. נרשום את התוצאות בשורה אחרונה.

המרכיב במערכת	$CO_{(g)}$	$H_{2(g)}$	$CH_3OH_{(g)}$
היחסים בניסוח	1	2	1
מספר מולים התחלתי - על פי הנתונים	1.000	1.000	0
השינוי במולים - על פי נתונים ועל פי היחסים בניסוח	-0.089	-0.178	+0.089
מספר מולים בשיווי משקל - על פי הנתונים או על פי מספר המולים ההתחלתי והשינוי במספר המולים.	0.911	0.822	0.089
ריכוז בשיווי משקל = מספר 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: $K_c = \frac{[CH_3OH]}{[CO] \times [H_2]^2}$

חישוב ערכו של K_c: $K_c = \frac{0.0089}{0.0911 \times (0.0822)^2} = 14.458$

דוגמה 2

בניסוי אחר, הוכנס 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. אילו שינויים התרחשו בכלי עד לקבלת מצב של שיווי משקל? התייחסו להיבט מיקרוסקופי.

בהתחלה היו בכלי מולקולות של מתאנול, $CH_3OH_{(g)}$, בלבד, אשר התנגשו ביניהן. חלק מן ההתנגשויות היו פוריות, כלומר נוצרו תצמידים משופעלים שהתפרקו למגיבים פחמן חד חמצני, $CO_{(g)}$, ומימן, $H_{2(g)}$. כאשר אלו נוצרו, התאפשרה התרחשות התגובה הישירה.

בהתחלה, ריכוזי המתאנול היו גבוהים, לכן קצב התגובה ההפוכה גדול. לא היו פחמן חד חמצני ומימן בכלי ולכן קצב התגובה הישירה היה אפס. עם התקדמות התגובה, קצב התגובה ההפוכה הלך וירד, כי ריכוז התוצר מתאנול ירד, וקצב התגובה הישירה הלך ועלה כי ריכוז המגיבים פחמן חד חמצני ומימן עלה. עד שברגע מסוים, קצב התגובה הישירה וקצב התגובה ההפוכה השתווה. במצב זה, המערכת מגיעה לשיווי משקל. ריכוזי כל המרכיבים של המערכת אינם משתנים עוד, למרות ששתי התגובות (הישירה וההפוכה) ממשיכות להתרחש בו זמנית.

2. מהם ריכוזי המרכיבים במצב שיווי משקל ומהו קבוע שיווי המשקל לתגובה הנתונה?

התגובה היא:

$$CO_{(g)} + 2H_{2(g)} \rightleftarrows CH_3OH_{(g)}$$

א. מכניסים את הנתונים לטבלה:

כאשר במצב נתון התחלתי לא מוזכרים חלק ממרכיבי התגובה, מניחים כי ריכוזם ההתחלתי הוא אפס (0).

המרכיב במערכת	$CO_{(g)}$	$H_{2(g)}$	$CH_3OH_{(g)}$
היחסים בניסוח	1	2	1
מספר מולים התחלתי - על פי הנתונים	0	0	1.000
השינוי במולים - על פי נתונים ועל פי היחסים בניסוח			
מספר מולים בשיווי משקל - על פי הנתונים או על פי סכום מספר המולים ההתחלתי והשינוי במספר המולים.	0.753		
ריכוז בשיווי משקל = מספר 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.

השלמת הטבלה:

המרכיב במערכת	$CO_{(g)}$	$H_{2(g)}$	$CH_3OH_{(g)}$
היחסים בניסוח	1	2	1
מספר מולים התחלתי – על פי הנתונים	0	0	1.000
השינוי במולים – על פי נתונים ועל פי היחסים בניסוח	+ 0.753	+1.506	- 0.753
מספר מולים בשיווי משקל – על פי הנתונים או על פי מספר המולים ההתחלתי והשינוי במספר המולים.	0.753	1.506	0.247
ריכוז בשיווי משקל = מספר 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 0.176M.

1. הסבירו, איזו תגובה (הישירה או ההפוכה) התרחשה בקצב גבוה יותר עד אשר המערכת הגיעה לשיווי משקל.
2. חשבו את ריכוזי כל החומרים בכלי במצב שיווי משקל. הציגו את חישוביכם בטבלה מתאימה.
3. חשבו את ערכו של K_c במקרה זה.

פיתרון לדוגמה 3

המרכיב במערכת	$CO_{(g)}$	$H_{2(g)}$	$CH_3OH_{(g)}$
היחסים בניסוח	1	2	1
מספר מולים התחלתי – על פי הנתונים	1.000	1.000	1.000
השינוי במולים – על פי נתונים ועל פי היחסים בניסוח	+0.380	+0.760	-0.380
מספר מולים בשיווי משקל – על פי הנתונים או על פי סכום הכמות ההתחלתית והשינוי.	1.380	1.760	0.620
ריכוז בשיווי משקל = מספר המולים/נפח הכלי ב- M	0.138	0.176	0.062

חישוב ערכו של K_c

$$K_c = \frac{0.062}{0.138 \times 0.176^2} = 14.503$$

שלוש הדוגמאות שהוצגו כאן מראות, כי ניתן להגיע לאותה תגובה הנמצאת במצב שיווי משקל מנתונים התחלתיים שונים.

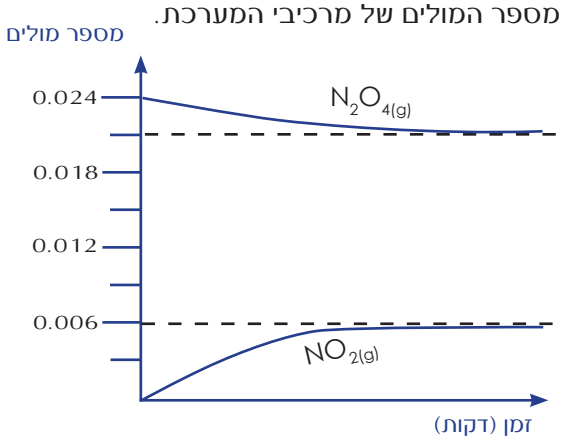
כל עוד הטמפרטורה בה התרחשה התגובה לא שונתה, למרות ריכוזי שיווי משקל שונים, ערכו של קבוע שיווי המשקל K_c יישאר קבוע.

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. חשבו מהו ערכו של קבוע שיווי המשקל לתגובה הנ"ל בטמפרטורה הנתונה. פרטו את חישוביכם.

שאלות בנושא קבוע שיווי המשקל

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 המשקל מבחינה מיקרוסקופית.

ג. נסחו ואזנו את תגובת שיווי המשקל.

ד. רשמו את הביטוי לקבוע שיווי המשקל K_c.

ה. שרטטו טבלה בה רשומים ריכוזי כל המרכיבים לפני ההגעה לשיווי משקל ולאחריה.

ו. חשבו את ערכו של קבוע שיווי המשקל K_c. פרטו את חישוביכם.

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, $I_{2(g)}$. התגובה שהתרחשה בכלי היא:

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

ריכוז המימן במצב שיווי משקל היה 001M.

א. מהו הביטוי של קבוע שיווי המשקל K_c?

ב. חשבו את ערכו של K_c. פרטו את חישוביכם.

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 המשקל הוא 14.5 וכן ידועים הריכוזים הבאים במצב שיווי משקל:

$[CO]=1.03M \quad [CH_3OH]=1.56M$

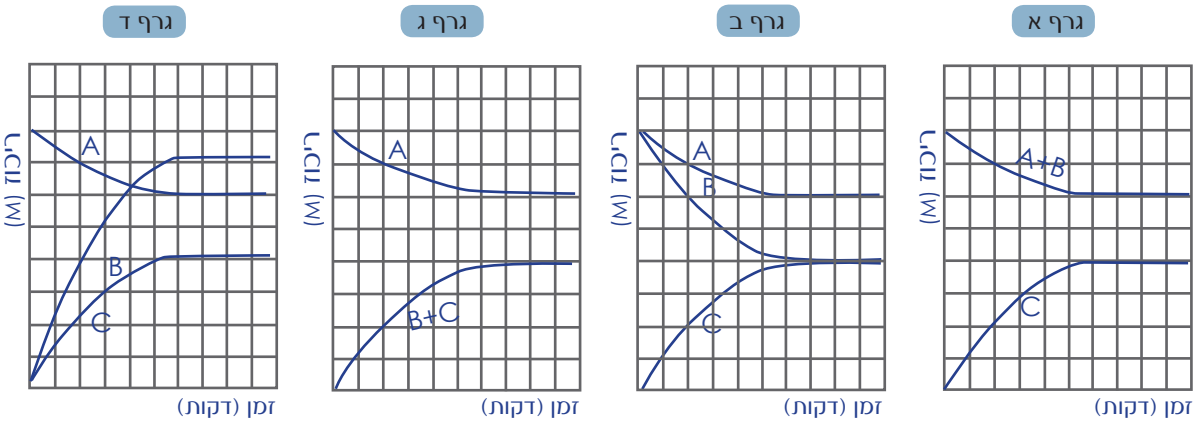
חשבו מהו ריכוז המימן הנמצא בכלי במצב שיווי משקל. פרטו את חישוביכם.

4. לתוך כלי בנפח 1 ליטר, הנמצא בטמפרטורה של 210°C, הוכנס 1 מול פחמן חד-חמצני, $CO_{(g)}$. האם המערכת תגיע למצב שיווי משקל המתואר בתגובה הבאה: $CO_{(g)} + 2H_{2(g)} \rightleftarrows CH_3OH_{(g)}$?

אם כן, מהו ריכוזו של פחמן - חד חמצני במצב שיווי משקל? אם לא, נמקו מדוע.

5. נתונה התגובה: $A_{(g)} + 2B_{(g)} \rightleftarrows 2C_{(g)}$

איזה מבין הגרפים הנתונים א-ד מתאר 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 את הנתונים לטבלה המוכרת וסמנו בתור נעלם X את השינוי שחל באחד המרכיבים. רשמו משוואה ריבועית ופתרו. כמה פיתרונות לשאלה?

מנת הריכוזים – Q

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: C, B, A ו- D? האם המערכת נמצאת בשיווי משקל? אם לא, הקצב של איזו תגובה גבוה יותר עד מצב של שיווי משקל? קצב התגובה הישירה או קצב התגובה 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 מה כיוון ההתקדמות של התגובה 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 $Q = K_c$

תערובת החומרים הנתונה נמצאת כבר בשיווי משקל.

2. אם $Q < K_c$

על מנת שערכו של Q יגדל (כדי להגיע לערך של K_c) ריכוזי התוצרים צריכים לעלות וריכוזי המגיבים צריכים לרדת. הדבר יקרה אם תתגבר התגובה הישירה בה ריכוזי התוצרים יגדלו וריכוזי המגיבים יקטנו. (שימו לב: שתי התגובות הישירה וההפוכה מתרחשות אך קצב התגובה הישירה גבוה מקצב התגובה ההפוכה עד הגעה לשיווי משקל)

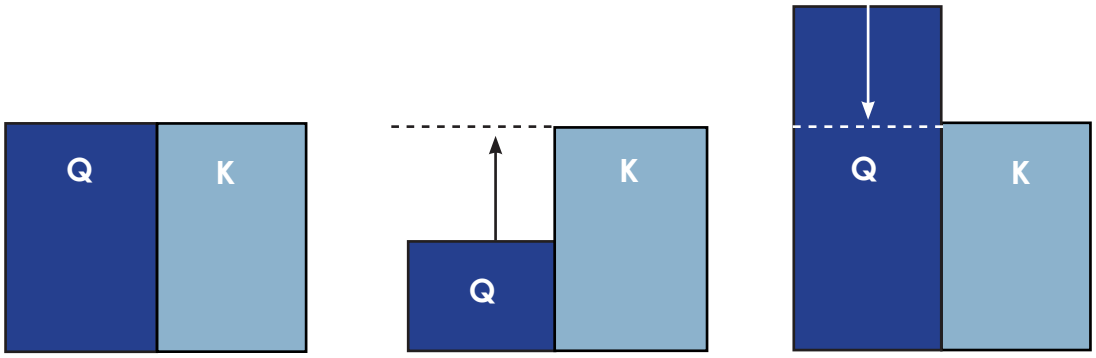
3. אם $Q > K_c$

על מנת שערכו של Q יקטן (כדי להגיע לערך של K_c), ריכוזי התוצרים צריכים לרדת. הדבר יקרה אם תתגבר התגובה ההפוכה בה ריכוזי התוצרים יקטנו וריכוזי המגיבים יגדלו.

(שימו לב: שתי התגובות הישירה וההפוכה מתרחשות אך קצב התגובה ההפוכה גבוה מקצב התגובה הישירה עד הגעה לשיווי משקל).

איור 3 מסכם את האמור לעיל.

איור 3 - כיוון התקדמות תגובה על פי השוואת Q ל-K



מקרה 3: קצב התגובה ההפוכה גבוה מקצב התגובה הישירה עד למצב שיווי משקל

מקרה 2: קצב התגובה הישירה גבוה מקצב התגובה ההפוכה עד למצב שיווי משקל

מקרה 1: קיים שיווי משקל במערכת, קצב התגובה הישירה שווה לקצב התגובה ההפוכה

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 המשקל 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 $O_{2(g)}$.

לכלי B: הכניסו 0.08 מול $NO_{2(g)}$, 0.8 מול $NO_{(g)}$ ו- 0.2 מול $O_{2(g)}$.

האם וכיצד ישתנה ריכוזו של $NO_{2(g)}$ בכל אחד מהכלים? נמקו.

2. לתגובה הנתונה: $B_{(g)} \rightleftarrows A_{(g)}$

קבוע שיווי המשקל שווה ל-10 בטמפרטורה T_1. לתוך כלי הוכנסו 0.05 מול A ו-0.8 מול B.

א. איזו תגובה מתרחשת בקצב גבוה יותר עד הגעה למצב של שיווי משקל בכלי התגובה?

ב. האם הלחץ בכלי עד הגעה לשיווי משקל, עולה, יורד או נשאר ללא שינוי? נמקו.

שינויי הלחץ החלים במערכת מתחילת התגובה עד הגעה לשיווי משקל

המולקולות נעות בכלי במהירות ובתנועתן הן מתנגשות זו בזו, עם הדפנות/התחתית/המכסה של הכלי.
הביטוי המיקרוסקופי ללחץ בכלי הוא מספר ההתנגשויות של המולקולות עם דפנות הכלי, התחתית והמכסה.
ככל שתהיינה התנגשויות רבות יותר עם דפנות הכלי (באותה יחידת זמן), הלחץ בכלי יגדל.
הלחץ במערכת תלוי בטמפרטורה, בנפח הכלי ובמספר המולים הכולל בכלי.
בהנחה שהטמפרטורה ונפח הכלי קבועים ולא חל בהם שינוי במהלך התרחשות התגובה, ניתן לומר כי הלחץ במערכת יושפע רק מהשינוי במספר מולי החלקיקים בכלי.
כאשר התגובה, בה גדל מספר מולי החלקיקים בכלי, מתרחשת בקצב גבוה יותר עד שיווי משקל, הלחץ בכלי יגדל.
כאשר התגובה, בה קטן מספר מולי החלקיקים בכלי, מתרחשת בקצב גבוה יותר עד שיווי משקל, הלחץ בכלי יקטן.

דוגמה:

עבור התגובה: $2A_{(g)} \rightleftarrows F_{(g)}$, בהתרחשות התגובה הישירה בקצב גבוה יותר עד שיווי משקל, הלחץ בכלי קטן כיוון שמספר מולי מולקולות הגז בכלי קטן ופחות חלקיקים מכים על דפנות הכלי. משני מול מולקולות גז במגיבים קיים מעבר למול מולקולות אחד של גז בתוצרים.

עבור התגובה: $2A_{(g)} \rightleftarrows B_{(g)} + C_{(g)}$, בהתרחשות התגובה הישירה בקצב גבוה יותר עד שיווי משקל, הלחץ בכלי **אינו משתנה**, כיוון שמספר מולי מולקולות הגז במגיבים שווה למספר מולי מולקולות הגז בתוצרים. משני מול מולקולות גז במגיבים קיים מעבר לשני מול מולקולות גז בתוצרים. מספר זהה של חלקיקים מכה על דפנות הכלי בכל רגע ורגע עד הגעה לשיווי משקל.

עבור התגובה: $A_{(g)} \rightleftarrows 3E_{(g)}$, בהתרחשות התגובה הישירה בקצב גבוה יותר עד שיווי משקל, הלחץ בכלי גדל, כיוון שמספר מולי מולקולות הגז בכלי גדל ויותר חלקיקים מכים על דפנות הכלי.
ממול אחד של מולקולות גז במגיבים קיים מעבר לשלושה מול מולקולות של גז בתוצרים.

שינוי התנאים במערכת שיווי משקל

במערכת הנמצאת במצב שיווי משקל, קצב התגובה הישירה וקצב התגובה ההפוכה שווים זה לזה. כל גורם העשוי לשנות את הקצב של אחת התגובות ולהפר את האיזון, מהווה הפרעה למצב שיווי משקל. גורמים המשנים את קצב התגובה, כמו ריכוז החומרים המשתתפים בתגובה 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 ממיכל התגובה. (אפשרי רק אם החומר במצב צבירה שונה משאר החומרים בכלי 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, $SO_{3(g)}$.

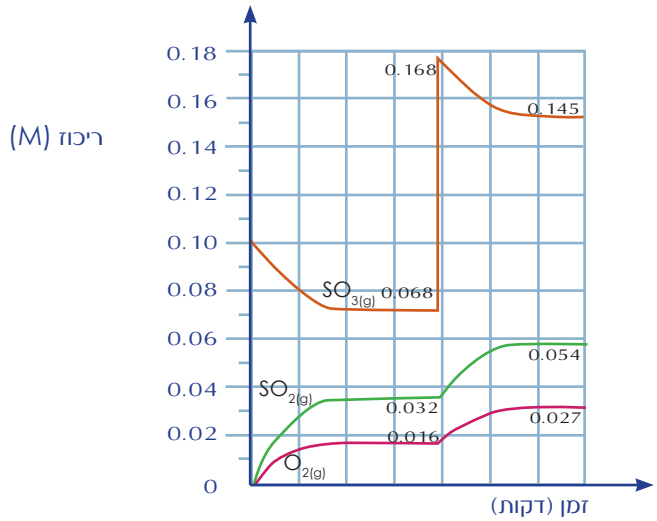
התרחשה התגובה: $2SO_{3(g)} \rightleftarrows 2SO_{2(g)} + O_{2(g)}$.

לאחר שהמערכת הגיעה לשיווי משקל, הוכנס 1 מול נוסף של החומר $SO_{3(g)}$ לכלי התגובה.

איור 4 מתאר את השתנות ריכוזי המרכיבים במערכת עד ההגעה לשיווי משקל, ברגע השינוי ולאחריו.

הטמפרטורה בכלי לא השתנתה במהלך התרחשות התגובה.

איור 4 – 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 המשקל 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 מספר מולים נוסף של החומר $SO_{3(g)}$ לתוך הכלי, עלה ריכוזו ועקב כך עלה קצב התגובה הישירה, כיוון שמספר מולקולות המגיבים בכלי גדל, גדל הסיכוי ליצירת התנגשויות ביניהן אשר הובילו להתנגשויות פוריות, תצמידים משופעלים ותוצרים באותה יחידת זמן.

הדבר גרם לחוסר איזון בין קצב התגובה הישירה וקצב התגובה ההפוכה 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, התלוי בריכוזי התוצרים, גדל עד אשר נוצר מצב בו הקצב של שתי התגובות משתווה וזהו מצב שיווי משקל חדש.

במצב שיווי המשקל החדש ריכוזי כל המרכיבים (המגיבים והתוצרים) שונים, בהשוואה למצב ההתחלתי, אולם היחס ביניהם - קבוע שיווי המשקל 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 קצבי שתי התגובות.*
- *במצב שיווי המשקל 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 המשקל, K_c, לתגובה הנתונה בטמפרטורה מסוימת. השוואה כזו תוכל לעזור להבין איזו תגובה-הישירה או ההפוכה - מתרחשת בקצב גבוה 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, תתרחש התגובה הישירה בקצב גבוה יותר עד שיווי משקל מחודש כך שריכוז התוצרים יגדל וריכוז המגיב יקטן, כפי שרואים באיור 4.

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 לשינוי 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, תתרחש בקצב גבוה יותר 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, תתרחש בקצב גבוה יותר 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 כאשר עוסקים בהפרעת ריכוזים יש להסביר את תוצאות השינוי ברמה המיקרוסקופית, כלומר יש להתייחס לעיקרון הגדלת מספר ההתנגשויות ולכן להגדלת הסיכוי ליצירת התנגשויות פוריות, תצמידים משופעלים ותוצרים ביחידת זמן, מה שמעלה את קצב התגובה (הישירה או ההפוכה כתלות בהוספת מגיב או תוצר).

עיקרון לה-שטלייה במקרה זה הינו כלי עזר בלבד, המסייע בחיזוי ההתרחשות עד חזרה למצב שיווי משקל חדש, אך אינו מהווה נימוק מספק.

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 $NH_{3(g)}$.

התרחשה התגובה: $N_{2(g)} + 3H_{2(g)} \rightleftarrows 2NH_{3(g)}$

1. שרטטו גרף סכמטי המתאר את השתנות הריכוזים של המרכיבים עד למצב של שיווי משקל.
2. רשמו את הביטוי לקבוע שיווי המשקל, K_c, וחשבו את ערכו.

לאחר שהמערכת הגיעה לשיווי משקל הוכנסו לכלי התגובה מעט מים, $H_2O_{(l)}$. התרחשה התגובה הבאה: $NH_{3(g)} + H_2O_{(l)} \rightleftarrows NH^+_{4(aq)} + OH^-_{(aq)}$. כתוצאה מכך, קטן מספר מולי האמוניה הגזית בכלי ולכן קטן גם ריכוזה.

3. כיצד ישפיע שינוי זה על קצב התגובה הישירה?
4. האם השינוי מהווה הפרעה לשיווי משקל? הסבירו.
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.

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?

מדוע שינוי טמפרטורה מהווה הפרעה למערכת המצויה במצב שיווי משקל?

כפי שלמדתם בפרק ג', חימום יגרום להגדלת קצב התגובה הישירה וההפוכה, ואילו קירור יגרום להקטנתם.

האם השינוי בטמפרטורה יגרום להשתנות הקצב של התגובה הישירה וההפוכה באופן זהה?

שינוי טמפרטורה (חימום או קירור) גורם לשינוי קצב התגובה הישירה וקצב התגובה ההפוכה במידה שונה (כיוון שיש להן אנרגיות שפעול שונות) ולכן קצבי התגובות לא יהיו שווים לאחר ביצוע השינוי בטמפרטורה והמערכת תצא משיווי משקל.

חיזוי תוצאות של שינוי טמפרטורה על פי עיקרון לה-שטליה

קירור, כלומר איבוד אנרגיה מכלי התגובה, יגרום להעדפה של התגובה האקסותרמית, הפולטת אנרגיה ובכך מקטינה את השינוי החיצוני, עד שיווי משקל חדש. במקרה הנ"ל זוהי התגובה הישירה, לכן K_c החדש יהיה גדול יותר. חימום, כלומר הוספת אנרגיה לכלי התגובה, יגרום להעדפה של התגובה האנדותרמית, אשר קולטת אנרגיה ובכך מקטינה את השינוי החיצוני, עד שיווי משקל חדש. במקרה הנתון זוהי התגובה ההפוכה, לכן K_c החדש יהיה קטן יותר.

שימו לב כי במקרה של שינוי הטמפרטורה, K_c בשיווי המשקל החדש שונה מ - K_c בטרם בוצע השינוי. כיוון שכך, לא נוכל להשוות את מנת הריכוזים Q לאחר ביצוע ההפרעה ל - K_c המקורי בטרם בוצעה ההפרעה.

העלאת הטמפרטורה גורמת הן לתגובה הישירה והן לתגובה ההפוכה להתרחש בקצב גבוה יותר עד שיווי משקל חדש ולכן **מתקצר זמן ההגעה לשיווי המשקל**. הן למולקולות המגיבים והן למולקולות התוצרים אנרגיה קינטית גבוהה יותר, גדלים הסיכויים ליצירת התנגשויות, המביאות להתנגשויות פוריות, לתצמידים משופעלים ולתוצרים ביחידת זמן. עם זאת, התגובה האנדותרמית בעלת קצב גבוה יותר, בהשוואה לקצב התגובה האקסותרמית.

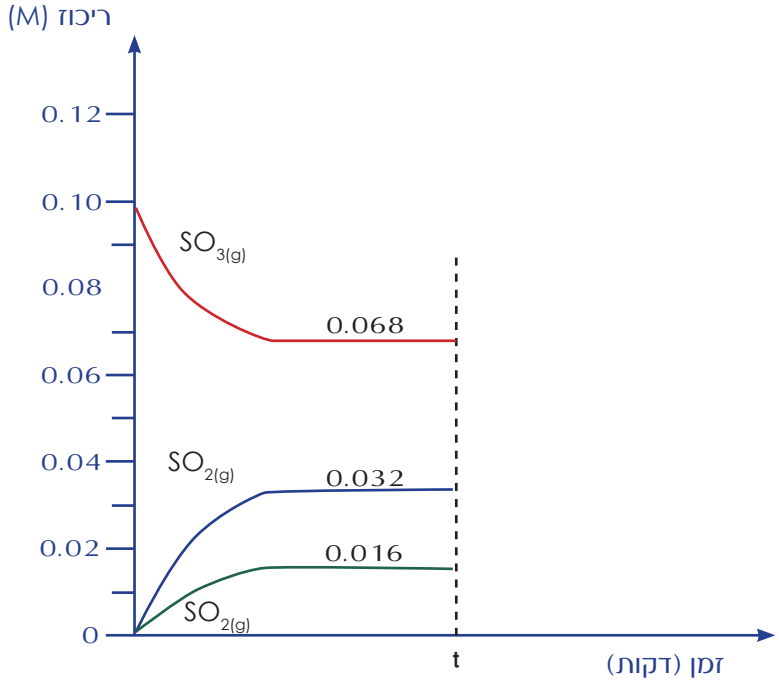
הורדת הטמפרטורה גורמת הן לתגובה הישירה והן לתגובה ההפוכה להתרחש בקצב נמוך יותר עד שיווי משקל חדש ולכן **מתארך זמן ההגעה לשיווי משקל**. הן למולקולות המגיבים והן למולקולות התוצרים אנרגיה קינטית נמוכה יותר, קטנים הסיכויים ליצירת התנגשויות, המביאות להתנגשויות פוריות, לתצמידים משופעלים ולתוצרים ביחידת זמן. עם זאת, התגובה האקסותרמית בעלת קצב גבוה יותר, בהשוואה לקצב התגובה האנדותרמית.

שינוי טמפרטורה גורם למערכת לצאת ממצב שיווי משקל והקצב של התגובה הישירה ושל התגובה ההפוכה משתנים במידה שונה.

חימום מערכת הנמצאת בשיווי משקל מהווה הפרעה לשיווי משקל ויגרום להעדפה של התגובה האנדותרמית עד שיווי משקל חדש. זמן ההגעה לשיווי משקל יתקצר.

קירור מערכת הנמצאת בשיווי משקל מהווה גם כן הפרעה לשיווי משקל ויגרום להעדפה של התגובה האקסותרמית עד שיווי משקל חדש. זמן ההגעה לשיווי משקל יתארך.

פעילות 3



? בזמן t חיממו את כלי התגובה. השלימו את העקומות המתארות את שינויי הריכוזים של כל החומרים באיור הנ"ל.

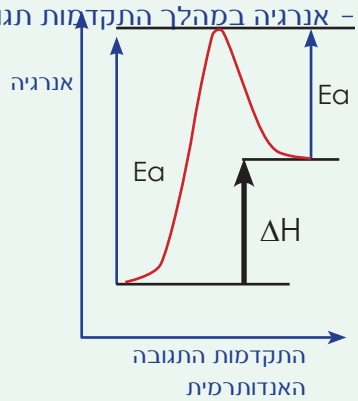
לדעת יותר על השפעת הטמפרטורה על ערכו של K_c על פי קצב התגובה

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 5.

איור 5 – 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 באופן משמעותי יותר מקצב התגובה האקסותרמית. כתוצאה משינוי זה ישתנה יחס הריכוזים וערכו של קבוע שיווי המשקל **ישתנה**.

בדוגמה הנתונה, התגובה האנדותרמית היא התגובה ההפוכה ולכן בטמפרטורה גבוהה יותר התגובה ההפוכה תתרחש בקצב גבוה יותר ביחס לתגובה הישירה עד שיווי משקל חדש ולכן ריכוז המגיבים גדל וריכוז התוצר קטן. במקרה זה, ערכו של K_C קטן יותר מערך שיווי המשקל בטמפרטורה נמוכה יותר.

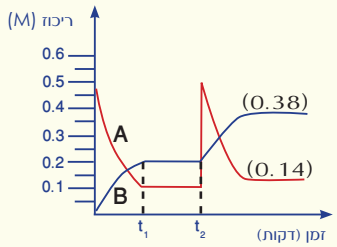
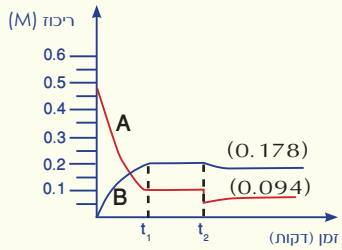
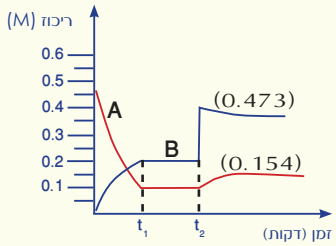
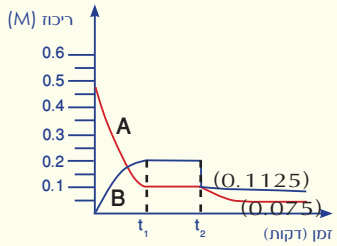
השפעת זרז על מערכת שאינה מצויה במצב שיווי משקל

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 התגובה הישירה והן של התגובה ההפוכה באותה מידה. המערכת תגיע למצב שיווי משקל בזמן קצר יותר. אולם, הרכב המערכת יהיה זהה להרכבה ללא הוספת זרז ולכן ערכו של קבוע שיווי המשקל K_c לא ישתנה.

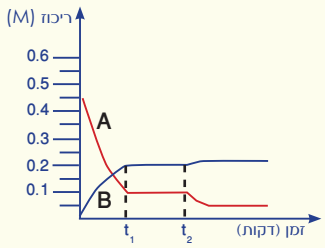
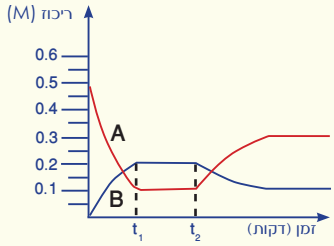
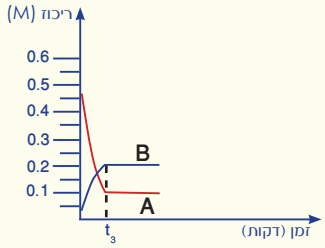
טבלה מסכמת: ההבדל בין הוספת זרז להעלאת טמפרטורה

קריטריון	הוספת זרז (למערכת שאינה בשיווי משקל)	חימום
השפעה על זמן ההגעה לשיווי משקל	מקצר את זמן ההגעה לשיווי משקל	מקצר את זמן ההגעה לשיווי משקל
הריכוזים הסופיים במצב שיווי משקל (בהשוואה למערכת שבה לא בוצע השינוי)	יהיו זהים למערכת ללא זרז	יהיו שונים בהשוואה למערכת שבה לא בוצעה העלאת טמפרטורה.

סיכום: שינוי התנאים במערכת שיווי משקל

סוג השינוי	פירוט השינוי המבוצע בזמן t_2	כיוון ההטיה של המערכת עד למצב שיווי משקל חדש (על פי לה שטליה)	השפעה על ערכו של K_c	ביטוי גרפי לשינוי הגרפים מתייחסים לתגובה: $2A_{(g)} \rightleftarrows B_{(g)}$ $\Delta H^{o}>0$
שינוי ריכוז אחד ממרכיבי המערכת בטמפרטורה קבועה	הגדלת 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 תוצרים	תגובה ישירה (להעלאת ריכוז תוצרים)	אין השפעה	

סיכום: שינוי התנאים במערכת שיווי משקל – המשך

סוג השינוי	פירוט השינוי המבוצע בזמן t_2	כיוון ההטיה של המערכת עד למצב שיווי משקל חדש (על פי לה שטליה)	השפעה על ערכו של K_c	ביטוי גרפי לשינוי הגרפים מתייחסים לתגובה: $2A_{(g)} \rightleftarrows B_{(g)}$ $\Delta H^{\circ}>0$
שינוי טמפרטורה	העלאת הטמפרטורה	התגובה האנדותרמית, זמן הגעת המערכת לשיווי משקל חדש קצר יותר	K_C משתנה	
	הורדת הטמפרטורה	התגובה האקסותרמית, זמן הגעת המערכת לשיווי משקל חדש ארוך יותר	K_C משתנה	
הוספת זרז	עד להגעה לשיווי משקל	אין הטייה של תגובה מסוימת. זמן הגעת המערכת לשיווי משקל קצר יותר	אין השפעה	

שאלות מסכמות

1. נתונה התגובה: $\Delta H^{\circ} = 57.2kJ$ $N_2O_{4(g)} \rightleftarrows 2NO_{2(g)}$

א. מה יגרום 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.

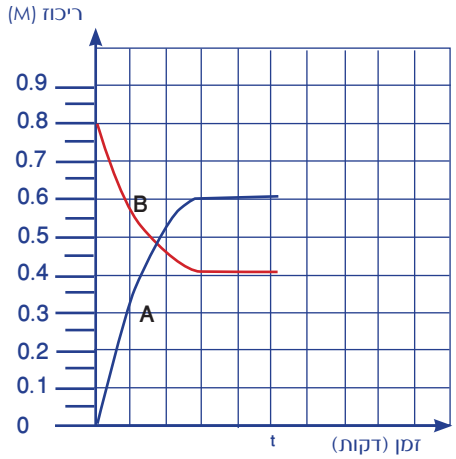
2. נתונה התגובה $N_{2(g)} + 2O_{2(g)} \rightleftarrows 2NO_{2(g)}$. בטמפרטורה של 25°C, $K_C = 4.7 \times 10^{-17}$.

בטמפרטורה של 1527°C, $K_C = 1.3 \times 10^{-4}$.

א. מהי התגובה (הישירה או ההפוכה) אשר התרחשה בקצב גבוה יותר עד שיווי משקל בחימום?

ב. מהו סימנו של ΔH° לתגובה הנ"ל?

3. הגרף הבא מתאר את השתנות הריכוזים של שני חומרים A ו-B הנמצאים בכלי סגור.

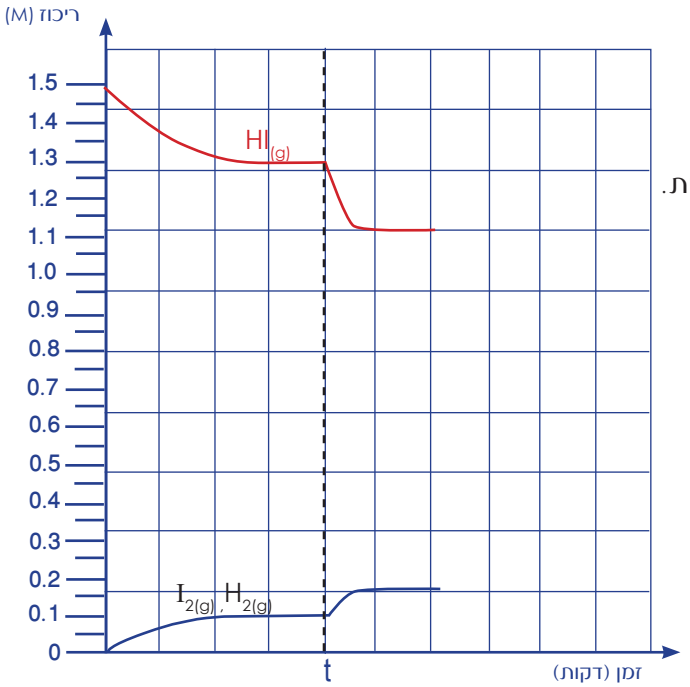


א. נסחו את התגובה המתרחשת בכלי.

ב. על פי הנתונים בגרף, מהו K_c לתגובה שניסחתם?

ג. שרטטו את המשך הגרף, אם בזמן t מעלים את ריכוז B (התייחסו גם לריכוז A וגם לריכוז B החל מזמן t).

4. לתוך כלי שנפחו 1 ליטר, הנמצא בטמפרטורה של 227°C הוכנס 1.5 מול גז מימן יודי, $HI_{(g)}$.
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?
השיבו תוך התייחסות לרמה המאקרוסקופית ולרמה המיקרוסקופית.

ב. חשבו את ערכו של K_c בטמפרטורה של 227°C לתגובה:

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

ג. מהו השינוי אשר התרחש במערכת בזמן t? נמקו.

ד. מהו סימנו של ΔH° לתגובה הנ"ל?

5. לתוך כלי שנפחו 1 ליטר, הנמצא בטמפרטורה של 200°C, הוכנס 1 מול $N_2O_{4(g)}$. התרחשה התגובה

$$N_2O_{4(g)} \rightleftarrows 2NO_{2(g)} \quad \Delta H^\circ = 57.2kJ$$

נתון כי במצב שיווי משקל ריכוז $N_2O_{4(g)}$ הוא 0.1M ואילו ריכוז $NO_{2(g)}$ הוא 1.8M.

א. שרטטו גרף המתאר את שינויי הריכוזים עד למצב שיווי משקל.

ב. התייחסו להיגדים הבאים וציינו אם הם נכונים או לא. נמקו בכל מקרה:

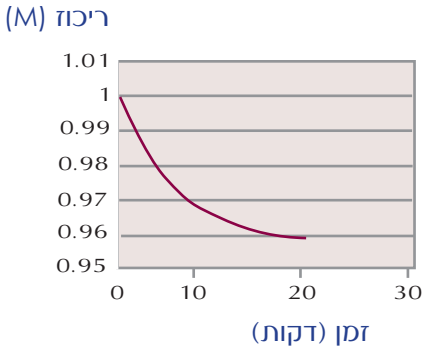
1. במצב שיווי משקל קצב הפירוק של $N_2O_{4(g)}$ גבוה מקצב ההיווצרות של $NO_{2(g)}$.
2. אם נקרר את כלי התגובה הנמצאת בשיווי משקל, הלחץ בכלי יקטן.
3. אם נוסיף זרז לכלי התגובה הנמצאת בשיווי משקל, K_c יגדל.
4. אם נחמם את כלי התגובה הנמצאת בשיווי משקל, K_c יקטן.
5. אם נזרים לכלי התגובה הנמצאת בשיווי משקל $NO_{2(g)}$, הלחץ בכלי עד הגעה לשיווי משקל חדש יגדל.

6. 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. נסחו את תגובת שיווי המשקל המתרחשת בכלי.

ב. הציעו שתי דרכים אשר מאפשרות מעקב אחרי קצב התגובה הנ"ל.

הגרף שלפניכם מתאר את השינוי בריכוז החומר $N_2O_{4(g)}$.



ג. 1. איך מיוצג בגרף מצב שיווי המשקל? הסבירו את המשמעות.

2. תארו את המתרחש בכלי במצב שיווי משקל ברמות השונות: מאקרו, מיקרו וסמל.

3. רשמו ביטוי לקבוע שיווי המשקל, K_C וחשבו את ערכו.

בדקה ה-20 העלו את ריכוז $N_2O_{4(g)}$ בכלי.

ד. 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 המשקל?

ה. 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.

7. 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 או ללא שינוי. התייחסו לתוצאה ברגע השינוי ולאחריו. רשמו הסבר קצר לכל תשובה. כל שינוי מתרחש בנפרד.

	שינוי	הגודל הנבחן	ברגע השינוי-בשורה ראשונה ולאחריו-בשורה השנייה		
			גדל	קטן	לא משתנה
1	העלאת הטמפרטורה של הכלי	K_c			
2	הוספת $O_{2(g)}$	K_c			
3	הוספת $NO_{(g)}$	ריכוז החמצן*			
4	הוספת $HCl_{(g)}$	ריכוז החמצן*			
5	הורדת הטמפרטורה של הכלי	ריכוז האמוניה			
6	הוספת זרז	K_c			

* התייחסו בנפרד לשני מצבים: למצב שברגע השינוי - בשורה ראשונה
למצב שיווי משקל שיושג לאחר השינוי - בשורה שנייה

8. נתונה התגובה: $H_{2(g)} + I_{2(g)} \rightleftarrows 2HI_{(g)}$. לכלי שנפחו 2 ליטרים הנמצא בטמפרטורה T_1 הוכנסו 2.4 מול של מימן יודי $HI_{(g)}$. לאחר שהמערכת הגיעה למצב שיווי משקל נמצא כי ריכוז היוד, $I_{2(g)}$, הוא 0.2 M.

א. רשמו ביטוי לקבוע שיווי המשקל וחשבו את ערכו.

לאחר שהמערכת הגיעה למצב של שיווי משקל, העלו את הטמפרטורה בכלי לטמפרטורה T_2.

בשיווי המשקל החדש שהתקבל נמדדו הריכוזים: $[H_{2(g)}] = [I_{2(g)}] = 0.167M, [HI_{(g)}] = 1M$

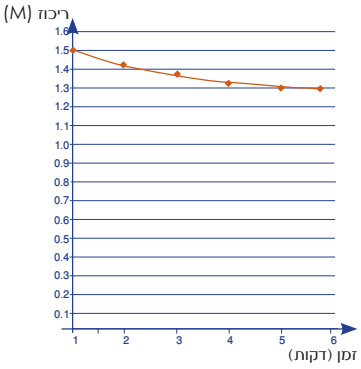
ב. קבעו אם התגובה אנדותרמית או אקסותרמית.

9. נתונה התגובה: $2NO_{(g)} + O_{2(g)} \rightleftarrows 2NO_{2(g)}$

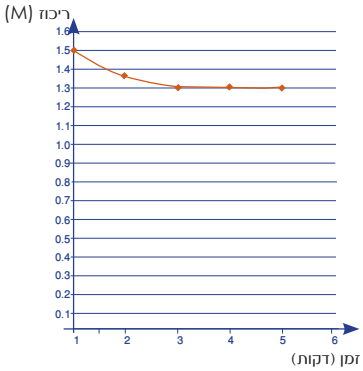
לתוך שלושה כלים א', ב', ו- ג' שנפח כל אחד מהם 1 ליטר, הוכנסו 1.5 מול של $NO_{(g)}$ ו- 1.5 מול של $O_{2(g)}$. באחד מן הכלים יש זרז. בשני כלים מתוך השלושה שורר טמפרטורה זהה.

הגרפים הבאים מתארים את השינוי בריכוז של $NO_{(g)}$ עם הזמן בכל אחד מהכלים.

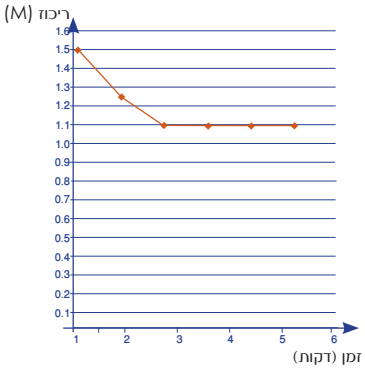
כלי ג



כלי ב



כלי א



א. 1. לאיזה כלי הוכנס זרז?

2. באילו כלים שררה אותה טמפרטורה?

3. האם הטמפרטורה בכלי השלישי גבוהה או נמוכה יותר?

ב. האם התגובה הישירה אקסותרמית או אנדותרמית? נמקו.

פרק ה

מדוע מתרחשות תגובות כימיות?

- מדוע, באותם תנאים, תגובות מסוימות מתרחשות ואחרות אינן מתרחשות?
- האם אפשר לחזות את היכולת של תגובה להתרחש?
- מהו החוק השני של התרמודינמיקה?

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

מבוא

בפרקים הקודמים למדתם על היבטים שונים של תגובות כימיות. הכרתם את ההיבטים האנרגטיים, הקובעים אם תגובות כימיות הן אקסותרמיות או אנדותרמיות ואת ההיבטים הקינטיים המבהירים כי יש תגובות בעלות קצב גבוה או קצב נמוך. למדתם כי יש תגובות המגיעות לשיווי משקל לעומת אחרות אשר מתרחשות עד תום, כלומר עד שכל המגיבים הופכים לתוצרים, כגון שרפת דלק במכונית.

לאחר כל זאת, עדיין נותרו שאלות פתוחות רבות:

- מדוע, באותם תנאים, תגובות מסוימות מתרחשות ואחרות אינן מתרחשות (גם כאשר משקיעים אנרגיה התחלתית)?
- האם אפשר לחזות את היכולת של תגובה להתרחש?
- אם אכן אפשר לחזות יכולת התרחשות של תגובה – האם יש מדד **כמותי** העוזר בחיזוי זה?

בפרק זה נחשוף ונבהיר מושגים ועקרונות נוספים על אלה שנלמדו עד כה. המושגים החדשים יתנו מענה לשאלות הנ"ל.

ספונטניות של תגובה

ספונטניות

על מנת להבין מדוע תגובות מסוימות מתרחשות ואחרות אינן מתרחשות, נתחיל את דיוננו בבחינה של שינויים ותגובות הנוטים "להתרחש מעצמם", ונבחן מה מאפיין אותם.

אפשר להבחין כי יש שינויים המתרחשים כביכול "מעצמם" ואילו שינויים אחרים אינם מתרחשים כלל.

נביא כדוגמה כמה תהליכים, המתארים שינויים שאינם משפיעים על החומר. כדור הנמצא בראש גבעה יתגלגל במורד "מעצמו", ואילו כדור הנמצא בתחתית הגבעה לא ינוע לראש הגבעה, אלא אם יופעל כוח להעלותו. שחרור קפיץ מתוח בצעצוע יגרום להפעלתו עד אשר הקפיץ יהפוך לרפוי, אולם הקפיץ לא יחזור ויימתח "מעצמו". גוף בטמפרטורה גבוהה (כמו סיר בתום בישול) יתקרר לטמפרטורת החדר, ואילו הטמפרטורה של סיר המצוי בטמפרטורת החדר לא תעלה "מעצמה".

בתגובה כימית אנו מתייחסים לשינויים החלים בחומר עצמו. תגובה **ספונטנית** היא תגובה שיש לה יכולת או "נטייה" להתרחש. היכולת להתרחש באה לידי ביטוי בכך שתגובה שהחלה, אם הושקעה בתחילה אנרגיית שפעול מתאימה, **תמשיך** להתרחש מעצמה. כמו כן, תגובה ספונטנית היא תגובה בעלת נטייה להתרחש גם אם בתנאים מסוימים היא לא מתרחשת. בהמשך הפרק נבין מהם הגורמים המקנים לתגובה יכולת להתרחש ונדון בהם.

לפניכם מספר דוגמאות לתגובות ספונטניות. החלדת הברזל (תגובה בין הברזל לחמצן) היא דוגמה לתגובה ספונטנית, המתרחשת בטמפרטורות שכיחות, ללא השקעת אנרגיה נוספת. דוגמה נוספת לתגובה ספונטנית היא שרפה של קוצים או של יערות בקיץ. בתנאי יובש עלולות שרפות כאלה להימשך כל עוד יש חומר לשרפה, ועלולות להתפשט על פני שטחים רחבים. אם כן, לשרפות יש יכולת להתרחש. עם זאת חשוב לציין

כי כל שרפה מתחילה מגורם חיצוני כלשהו (טבעי או אנושי), כגון ברק או גפרור בוער, אשר מהווה מקור של אנרגיית שפעול התחלתית עבור תגובה זו.

*לסיכום, תגובה ספונטנית היא תגובה אשר יש לה יכולת להתרחש וכן תגובה אשר מרגע שהתחילה, היא תמשיך להתרחש **באותם תנאים** ללא שום התערבות חיצונית.*
*תגובה שאינה ספונטנית לא תתרחש אלא אם תהיה התערבות חיצונית **מתמדת** בצורת עבודה.*

ספונטניות בחיי היומיום וספונטניות בכימיה

משתמשים במילה "ספונטני" הן בשפת היומיום והן בכימיה, אך במשמעויות שונות.
בשפת היומיום פירוש המילה ספונטני/ת הוא רחב למדי ומתייחס להתרחשות המתחילה מעצמה או ללא הכנה ומחשבה מוקדמת. למשל, התפרצות ספונטנית של צחוק או החלטה ספונטנית להזמין חברים.
לעומת זאת, הגדרת המושג "ספונטניות" בכימיה היא ברורה וייחודית לתגובה כימית. תגובה ספונטנית היא תגובה בעלת **יכולת** להתרחש, ולאו דווקא תגובה המתרחשת בפועל. כלומר ייתכן שתגובה תהיה ספונטנית, אך בתנאים מסוימים היא לא תתרחש – לא תתבצע בפועל. כפי שנראה, ספונטניות של תגובה נובעת משיקולים של פיזור אנרגיה (יוסבר בהמשך), וכימאים יודעים לחשב אם תגובה עשויה להיות ספונטנית בטמפרטורה נתונה.
לדוגמה, נמצא כי שרפתם של יהלומים (כלומר הפיכתם לפחמן דו־חמצני בנוכחות חמצן) היא תגובה ספונטנית. כלומר, לתגובה זו יש **יכולת** להתרחש. אולם בתנאים רגילים של טמפרטורת החדר התגובה אינה מתרחשת, והיהלומים נשמרים ללא שינוי. ההסבר: התגובה עשויה להתחיל רק בטמפרטורה גבוהה ביותר ואז היא תימשך ללא השקעת אנרגיה נוספת. היות שיהלומים (בדרך כלל) לא נמצאים בטמפרטורות גבוהות, הם אינם נשרפים.

פסק זמן לחשיבה

א. לפניכם רשימה של שינויים ותגובות כימיות. קראו את הרשימה ומיינו לתהליכים העשויים להיות ספונטניים ולא ספונטניים.

1. התייבשות של שלולית מים בקיץ.
2. קיפאון מים בטמפרטורה נמוכה מ-0°C.
3. דבש הנשפך מצנצנת פתוחה והפוכה.
4. שרפת סרט מגנזיום בלהבת מבער.
5. בעירת זיקוקים (היזכרו בניסוי 1 בפרק א).
6. השחרת כלי כסף.
7. פירוק מים למימן וחמצן.

ב. תארו תהליכים ההפוכים לאלה הרשומים בסעיף א' ומיינו אותם ל**תהליכים ספונטניים** ול**לא ספונטניים**.
מהו הקשר לתשובתכם בסעיף א?

ג. הוסיפו שתי דוגמאות משלכם לתהליכים ספונטניים.

מסקנה: אם תהליך מסוים הוא ספונטני, הרי שבאותם תנאים – התהליך ההפוך אינו ספונטני.
גם ההפך נכון: אם תהליך מסוים אינו ספונטני, הרי שבאותם התנאים – התהליך ההפוך הוא ספונטני.

האם תגובות ותהליכים ספונטניים הם בהכרח תהליכים אקסותרמיים?

כאשר בוחנים את השינויים המתרחשים בכדור מתגלגל 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 של תרכובות פחמן שונות (דלק, פחמימות ועוד). כפי שלמדתם בפרקים הקודמים, בעת ההתרחשות של תגובות אקסותרמיות, יש ירידה באנרגיה הפנימית (באנתלפיה) של התגובה.

? האם אפשר להסיק ולומר כי **ירידה באנרגיה** הפנימית היא הגורם לספונטניות של התגובה?

שני מדענים, כימאי דני בשם ג'וליוס תומסן, Julius Thomsen (1854) וכימאי צרפתי בשם מרסלין ברטלוט, Marcellin Berthelot (1864), התבססו על כך שתגובות אקסותרמיות רבות הן ספונטניות וקבעו כי **התגובה היא ספונטנית כאשר היא אקסותרמית**.

אולם, בניגוד לקביעה זו, התברר כי קיימות **תגובות ספונטניות <u>שאינן</u> אקסותרמיות**. כמו כן ייתכנו תהליכים שבעת התרחשותם לא מתקיים כל שינוי באנתלפיה.

להלן כמה דוגמאות:

1. כאשר פותחים בקבוק בושם במקום מסוים בחדר, יהפוך הנוזל לגז אשר יתפזר ברחבי החדר באופן ספונטני, כפי שנוכל לחוש בו בעזרת חוש הריח. תהליך האידוי של הבושם הוא תהליך ספונטני ואנדותרמי.
2. כאשר פותחים בקבוק המכיל גרגירי יוד (במנדף פועל), הם ישנו את מצב הצבירה שלהם ויהפכו לגז בטמפרטורת החדר. המראת יוד בטמפרטורת החדר היא תהליך ספונטני ואנדותרמי.
3. כאשר מחברים שני כלים המכילים גזים, חל מעבר של הגזים מכלי אחד לאחר. זהו תהליך ספונטני שאינו כרוך בשינוי באנתלפיה.
4. חלק מתהליכי ההמסה במים של חומרים יוניים קלי תמס, הם אמנם אקסותרמיים (כגון המסת נתרן הידרוכסידי, $NaOH_{(s)}$), אולם חלקם אנדותרמיים (כגון המסת אמוניום חנקתי, $NH_4NO_{3(s)}$)

המספרים בכתב תחתי וגם מצב הצבירה. כל תהליכי ההמסה במים של חומרים יוניים מסיסים – הם ספונטניים.

ניסוי - חקירה של תגובות ספונטניות

הרכיבו משקפי מגן והקפידו על עבודה בטוחה

חומרים וציוד (הכמויות הן להדגמה לפני הכיתה)

4 גרם אמוניום חנקתי, $NH_4NO_{3(s)}$

כוס כימית בנפח 100 מ"ל

מים מזוקקים

מד/חיישן טמפרטורה, מכשיר לבדיקת מוליכות חשמלית, ספטולה, מקל זכוכית.

הערה: אפשר לבצע ניסוי זה כניסוי ממוחשב – מד הטמפרטורה יוחלף בחיישן טמפרטורה, ומכשיר לבדיקת המוליכות יוחלף בחיישן מוליכות. לחיישנים יתווסף אוגר נתונים דיגיטלי.

מהלך הניסוי

חלק א

א. הכניסו 50 מ"ל מים לתוך כוס כימית.

ב. מדדו את הטמפרטורה ההתחלתית של המים.

ג. מדדו את המוליכות החשמלית של המים.

ד. הוסיפו אל המים אמוניום חנקתי, $NH_4NO_{3(s)}$.

ה. הניחו את הכוס מבלי לערבב ומדדו את הטמפרטורה כל 2 דקות **או** השתמשו בחיישן טמפרטורה ובחיישן מוליכות ומדדו את הטמפרטורה והמוליכות במהלך התרחשות התגובה.

ו. רשמו תצפיות.

פרשנות לתצפיות

א. מה אפשר ללמוד ממדידת המוליכות החשמלית בכוס?

ב. מה אפשר ללמוד ממדידת הטמפרטורה בכוס?

ג. הציעו ניסוח מאוזן לתגובה שהתרחשה בכוס.

עיבוד התוצאות

הציגו את הנתונים בצורת גרף או הדפיסו את הגרפים המתקבלים בעקבות השימוש בחיישן.

הסבר התוצאות

א. מהי המערכת ומהי הסביבה בניסוי שערכתם?

ב. האם היה מעבר אנרגיה מהסביבה אל המערכת או להפך?

ג. האם התגובה שהתרחשה במערכת היא ספונטנית?

ד. האם התגובה שהתרחשה במערכת היא אנדותרמית או אקסותרמית?

חלק ב

צפו בסרט המופיע **בקישור** הבא https://www.youtube.com/watch?v=wEb8x993kbE

וענו על השאלות הבאות.

בסרט הוכנסו לתוך כוס מסות שוות של שני מוצקים שונים. המוצקים הם:

הידראט של באריום הידרוכסידי – $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O_{(s)}$ ואמוניום תיוציאנט - $NH_4SCN_{(s)}$.

1. תארו את המערכת בסיום התגובה ברמה המאקרוסקופית על פי צפייתכם בסרט.

לפניכם ניסוח התגובה שהתרחשה:

$$Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O_{(s)} + 2NH_4SCN_{(s)} \rightarrow Ba(SCN)_{2(s)} + 2NH_{3(s)} + 10H_2O_{(l)}$$

2. לשם מה התיזו מים על פני המשטח שעליו הונחה הכוס?
3. מהו סימנו של ΔH° לתגובה?
4. מדוע יש צורך לערבב את המוצקים?
5. האם התגובה היא ספונטנית?

הערת בטיחות: החומר באריום הידרוכסידי – $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O_{(s)}$ הוצא מרשימת החומרים המותרים לשימוש במעבדת בית הספר, ולכן אין לבצע ניסוי זה עם תלמידים, גם לא כהדגמה.

מסקנה: כתבו מסקנה אחת לפחות מהניסוי שערכתם.

הניסוי שערכתם והסרט בו צפיתם מלמדים כי קיימות תגובות ספונטניות שהן אנדותרמיות.

*לכן, ההנחה כי **כל** התגובות הספונטניות הן אקסותרמיות **אינה נכונה**.*
יש צורך להמשיך ולחפש אחר גורם המסביר את הספונטניות של תגובות אקסותרמיות
ושל תגובות אנדותרמיות.

אנטרופיה ומשמעותה

נבחן כמה תגובות **ספונטניות** שהן אנדותרמיות כדי למצוא גורם מאחד. נעשה זאת תוך בחינת ההיבטים המאקרוסקופיים והמיקרוסקופיים של התופעה.

התצלומים המופיעים להלן מתארים מערכות שונות מבחינה מאקרוסקופית. יש לציין שכל מערכת כזו ניתנת לתיאור על ידי מספר גדול מאוד של מצבים מיקרוסקופיים המתאימים לה.

מצב מיקרוסקופי של החומר הוא מצב המאופיין בתיאור מלא ומדויק של מספר החלקיקים הנתון, מיקומם במרחב ואופני התנועה שלהם.

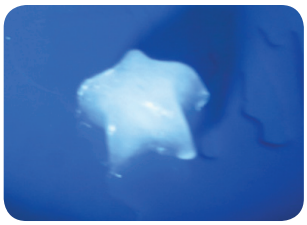
האיורים ותמונות המודלים הנלווים מציגים בצורה חלקית (ומוגבלת) תיאור מצב מיקרוסקופי אחד רגעי של כל מערכת. הייצוג של הרמה המיקרוסקופית (ברמת הסמל), מראה אפשרות אחת של היערכות החלקיקים בכלי, אך **אינו** יכול להראות את העובדה שהחלקיקים נעים כל הזמן במהירויות שונות ובכיוונים שונים או את אופני התנועה השונים של החלקיקים המשתנים אף הם מרגע לרגע.

דוגמה א – היתוך קרח

נתייחס בדוגמה הראשונה אל קרח המוצא מהמקפיא, ניתך והופך לנוזל. נבחן שינוי זה בעזרת רמות ההבנה בכימיה אשר מתייחסות למצב ההתחלתי של קרח בלבד ולמצב הסופי הכולל קרח (מוצק) ומים (נוזל).

קוביית קרח בצורת כוכב הוצאה מהמקפיא אל טמפרטורת החדר.

התוצר – קרח ומים



המגיב – הקרח

תיאור המגיב – הקרח ברמה מאקרוסקופית (מצב התחלתי):

הקרח הוא מוצק בצורת כוכב, צבעו לבן, מבריק, ובנגיעה בו אפשר לחוש כי הוא קר למגע.

תיאור התוצר – המים (נוזל) ברמה מאקרוסקופית (מצב סופי):

לאחר כמה דקות מצטבר ליד הכוכב המוצק, הקטן בגודלו עם הזמן, נוזל צלול חסר צבע וקר למגע, המתפשט לאִטו על המשטח. קודקודי הכוכב המוצק אינם חדים כפי שהיו.

תיאור המגיב והתוצר ברמה מיקרוסקופית – מתייחס לקרח שעבר שינוי

תיאור הקרח ברמה מיקרוסקופית:

בין מולקולות המים קיימים קשרי מימן, בין מימן חשוף מאלקטרונים במולקולה אחת לבין זוג אלקטרונים בלתי קושר על אטום חמצן במולקולה סמוכה. המולקולות מאורגנות בצורה סדירה, בצפיפות, בסריג מולקולרי כך שסביב לכל מולקולת מים קיימות ארבע מולקולות מים אחרות (המרחקים בין המולקולות קטנים). המולקולות נעות בתנודות בלבד.

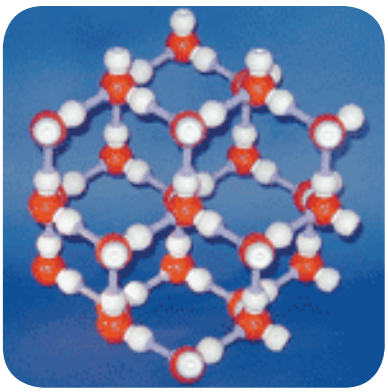
תיאור הנוזל – המים ברמה מיקרוסקופית:

בין מולקולות המים קיימים קשרי מימן, בין מימן חשוף מאלקטרונים במולקולה אחת לבין זוג אלקטרונים בלתי קושר על אטום חמצן במולקולה סמוכה. המולקולות אינן מאורגנות. תנועת המולקולות במצב צבירה נוזל שונה מאשר במצב צבירה מוצק. למולקולות יש יותר אפשרויות תנועה כיוון שנוסף על התנודות, הן יכולות להסתובב וגם לנוע מעט. (ברמה המאקרוסקופית אפשר לראות התפשטות של הנוזל על המשטח למקומות שלא היה בהם קודם).

אפשר לייצג את המצב המיקרוסקופי בצורה מוגבלת באמצעות כמה איורים. איורים אלה מוגבלים כיוון שאינם יכולים לייצג את מגוון התנועות של המולקולות ואת האפשרויות הרבות של מיקומן במרחב.

ניסוח תהליך היתוך הקרח – רמת הסמל

$$H_2O_{(s)} \rightarrow H_2O_{(l)}$$

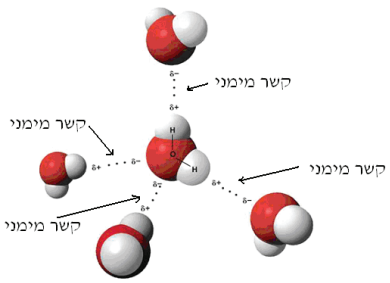


תיאור הקרח ברמת הסמל:

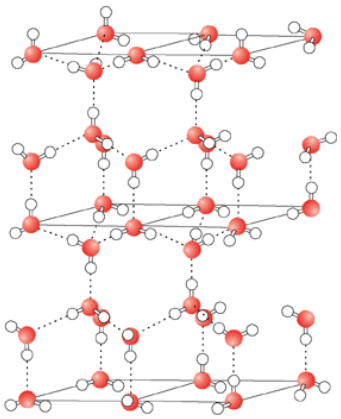
האיורים הבאים מציגים בצורה חזותית את המידע שתואר באופן מילולי ברמה המיקרוסקופית.

בתמונה של המודל אפשר לראות כי לכל כדור אדום (צבע כהה) יש חיבור לארבעה כדורים לבנים שכנים ומתקבל מארג תלת־מימדי של כדורים מחוברים. ליד כל כדור אדום (המייצג אטום חמצן) יש שני כדורים סמוכים לבנים (המייצגים אטומי מימן) וביחד הם מרכיבים את מולקולת המים. בנוסף אליהם יש שני כדורים לבנים המחוברים באמצעות ה"מקלות" האפורים, שמייצגים את קשרי המימן בין המולקולות כאשר מצב הצבירה של החומר הוא מוצק.

האיור בצד שמאל מציג מולקולות מים וביניהן, בקו מקווקו, את קשרי המימן בין המולקולות. מסביב לכל מולקולת מים יש ארבע מולקולות שכנות, המסודרות במבנה מרחבי של טטראדר.



בסופו של דבר מתקבל סריג מולקולרי, שהאינטראקציות בין המולקולות שבו יוצרות היערכות החוזרת על עצמה כפי שאפשר לראות באיור המופיע משמאל:



יש לזכור כי המצבים המיקרוסקופיים הללו המתוארים בייצוגים גרפיים שונים (רמת סמל) הם חלקיים בלבד, כיוון, שכפי שלמדתם, במצב המוצק יש לכל מולקולה אפשרויות של תנודה. למולקולת המים יש כמה אפשרויות כאלה, ולכן למעשה התיאור המיקרוסקופי, המיוצג באיורים השונים, הוא רגעי ומוגבל ביותר.

? מהו, אם כן, השינוי שהתרחש בקרח באופן ספונטני בעת הוצאתו מהמקפיא?

עלינו לבחון גם את היבט האנרגיה.

בעת היתוך הקרח, קלטה המערכת אנרגיה בצורת חום מהסביבה, והאנרגיה הפנימית שלה עלתה. לאחר היתוך הקרח יש במערכת אנרגיה פנימית גבוהה יותר. אנרגיה זו מפוזרת יותר כעת, כיוון שהיא באה לידי ביטוי בהרבה יותר אפשרויות של תנועת מולקולות. שינוי אופני התנועה של המולקולות גורם גם לשינוי מקומן במרחב ולהיערכות פחות סדירה. כל אפשרות שונה של תנועה מהווה ייצוג מיקרוסקופי שונה, ולכן יש כעת הרבה מאוד מצבים מיקרוסקופיים אפשריים למולקולות המים (המערכת).

אנימציות המתארות את תהליך היתוך המים:

http://www.youtube.com/watch?v=NTs7hx4ycNs

http://www.youtube.com/watch?v=6s0b_keOiOU

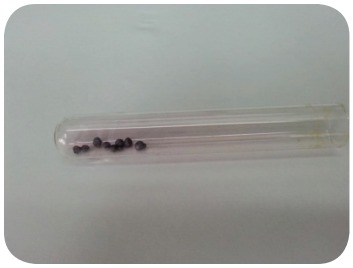
http://www.youtube.com/watch?v=PcoiLAsUvqc

דוגמה ב – המראת יוד

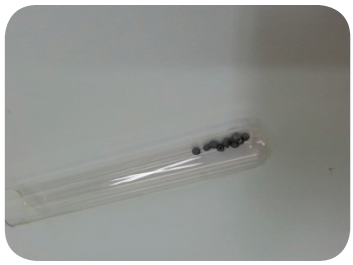
מבחנה ובה יוד, הנמצאת בטמפרטורת החדר, הוכנסה לכלי המכיל מים חמים לפרק זמן קצר, והוצאה ממנו (הניסוי נערך במנדף).

גם הפעם נבחן את התהליך המתרחש במבחנה על פי זמן ההתרחשות, כלומר נשווה בין המצב ההתחלתי למצב הסופי.

תיאור המערכת **ברמה מאקרוסקופית** – המערכת במצב התחלתי מכילה יוד מוצק בצורת גבישים מבריקים בצבע סגול כהה ומעט גז בצבע סגלגל, כפי שמופיע בתמונה השמאלית. לאחר חימום קצר של המבחנה במים חמים אפשר להבחין בהתכהות חלק מהמבחנה (בתמונה הימנית).



יוד בטמפרטורה גבוהה מטמפרטורת החדר

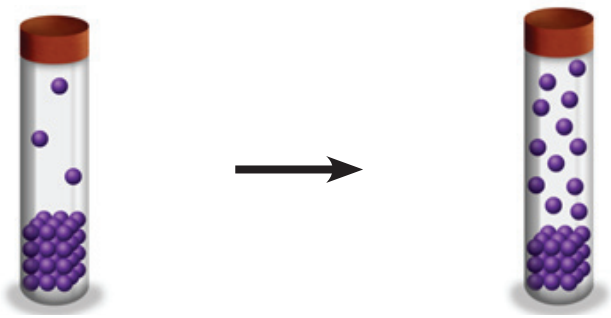


יוד בטמפרטורת החדר

תיאור המערכת ברמה מיקרוסקופית

במצב צבירה מוצק, מולקולות דו־אטומיות של יוד קרובות זו לזו, מאורגנות בסריג מולקולרי בהיערכות סדירה, ולכל מולקולה אופני תנועה של תנודה בלבד. בין המולקולות מתקיימות אינטראקציות מסוג ואן דר ואלס.

במצב צבירה גז, המולקולות מפוזרות בכלי. הן בעלות אופני תנועה רבים יותר (תנודה, סיבוב ומעתק) ואפשרויות רבות של פיזור בכלי. כמעט שאין קשרים בין המולקולות והמרחקים ביניהן גדולים. האיור המוצג (למטה) מייצג אפשרות אחת מבין האפשרויות הרבות של תיאור מצב המוצק ומצב הגז.



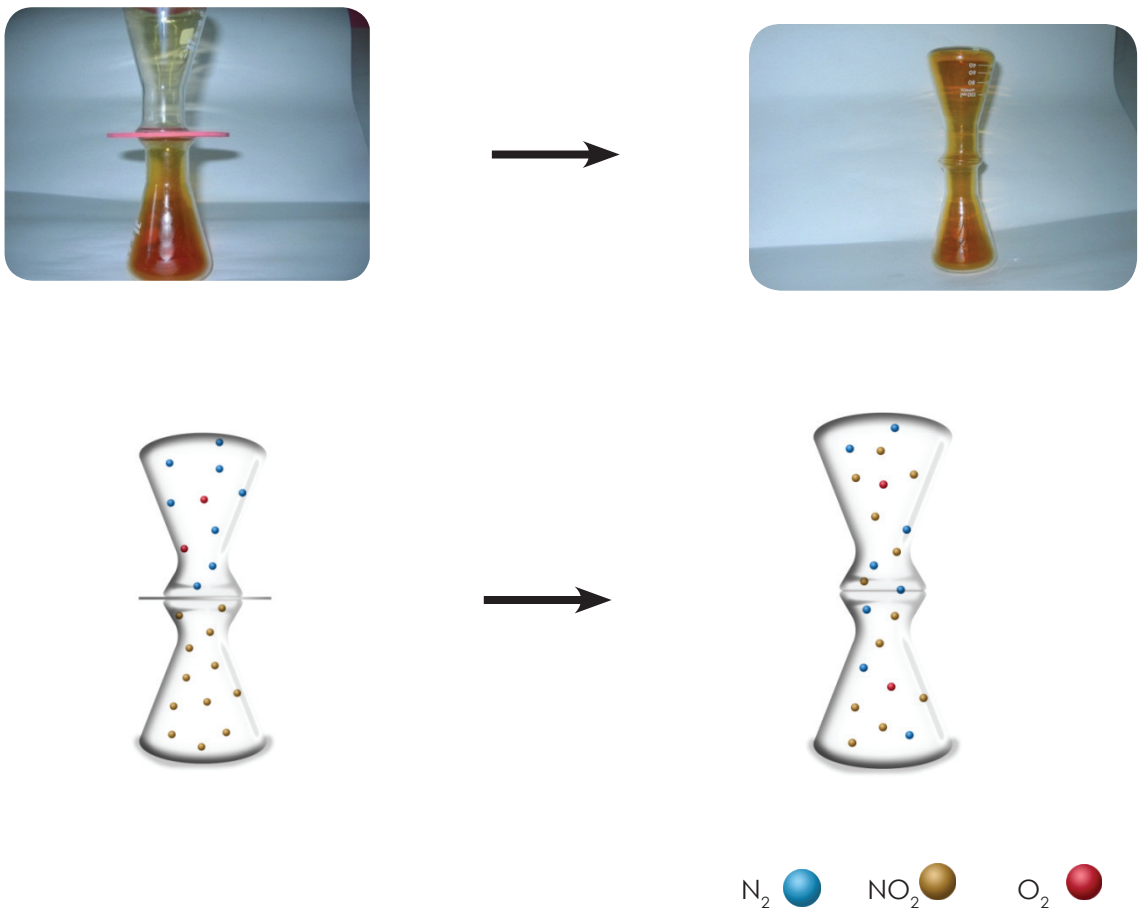
כל כדור סגול מסמל מולקולה אחת של יוד I_2. הצבע הסגול הוא להמחשה בלבד. מולקולות בודדות אינן סגולות!

ניסוח תהליך המראה של יוד (רמת הסמל) $I_{2(s)} \rightarrow I_{2(g)}$

כפי שבחנו את התגובה בדוגמה א, יש להתייחס גם בדוגמה זו להיבטי אנרגיה.
לאחר שהמבחנה הוכנסה לכלי המכיל מים חמים, האנרגיה הפנימית של המערכת עלתה כיוון שאנרגיה בצורת חום הועברה מהסביבה בעלת הטמפרטורה הגבוהה יותר (המים) אל המבחנה של היוד הממריא, בעלת הטמפרטורה הנמוכה יותר וגרמה לכך שמולקולות נוספות של יוד עזבו את המצב המוצק. מולקולות אלו עברו למצב צבירה גז (המראה) בגלל ניתוק קשרים בין מולקולריים, מסוג אינטראקציות ון דר ואלס בין מולקולות היוד לבין עצמן. כעת, יש יותר מולקולות אשר נעות באופני תנועה רבים (תנודה, סיבוב ובעיקר מעתק) המאפיינים את המצב הגזי בהשוואה למצב ההתחלתי בו היו מולקולות מעטות יותר בפאזה הגזית. כך גדל בהרבה מספר האפשרויות שבהן חלקיקים אלה יכולים להימצא במרחב. כלומר, כאשר היוד משנה את מצב הצבירה שלו ממוצק לגז, עולה מספר האפשרויות לתיאור המערכת מבחינה מיקרוסקופית ואפשר להבחין בתופעה של פיזור גדול יותר של אנרגיה ופיזור גדול יותר של חלקיקים בכלי.

דוגמה ג – ערבוב גזים

נבחן כעת דוגמה של תהליך ספונטני שאינו מלווה בתגובה כימית. במצב ההתחלתי, המתואר בתמונה התחתונה משמאל, קיימים שני גזים שונים. בכלי אחד מצוי גז בצבע חום $NO_{2(g)}$, ואילו בכלי השני מצוי אוויר (המכיל חנקן, $N_{2(g)}$, וחמצן, $O_{2(g)}$). בין שני הכלים יש מחיצה ורודה.
במצב סופי, לאחר שהוסרה המחיצה בין הכלים, שני הגזים התערבבו.



תיאור המערכת ברמה המאקרוסקופית:

בתחילת הניסוי, הכלי התחתון מכיל חומר שצבעו חום והכלי העליון נראה חסר צבע. בין שני הכלים מחיצה בצבע ורוד. זמן קצר לאחר הסרת המחיצה נראה כי שני הכלים מכילים חומר בצבע חום זהה.

תיאור המערכת ברמה מיקרוסקופית:

מולקולות הגזים השונות, הנמצאות בכל אחד מהכלים לפני הערבוב ולאחריו, נעות לכל הכיוונים, במהירויות שונות, מסתובבות, ויש בהן אופני תנועה מסוגים שונים (תנודה, סיבוב ובעיקר מעתק).

מה התרחש בכלי?

מולקולות הגזים השונות, אשר היו בשני הכלים הנפרדים, התערבבו באופן ספונטני, וכעת הן תופסות את נפח שני הכלים והיערכותן שונה.

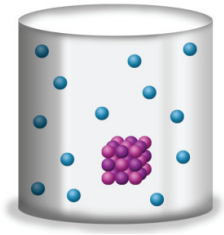
מה השתנה תוך כדי התפשטות הגז? היות שלא חל שינוי בטמפרטורת הסביבה, אפשר לקבוע כי האנרגיה הפנימית של הגזים לא השתנתה, אולם השתנה **פיזור המולקולות** במערכת. פיזור המולקולות בין שני הכלים תרם למצב שבו לכל מולקולה יש אפשרויות רבות יותר למיקום בתוך הכלים. כלומר, לאחר ערבוב הגזים יש **יותר** מצבים מיקרוסקופיים המתארים את מיקומם של החלקיקים בכלים המחוברים בהשוואה למיקומם בטרם הוסרה המחיצה והם התערבבו.

דוגמה ד – המסת חומר יוני במים

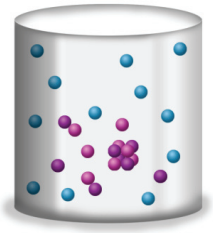
נכניס למים, הנמצאים בטמפרטורת החדר, כמה גרגירים של החומר אשלגן על מנגנטי, $KMnO_{4(s)}$. אשלגן על מנגנטי, $KMnO_{4(s)}$, הוא חומר יוני, שמסיסותו במים גבוהה. ממדידת השינוי שחל בטמפרטורת הסביבה (המים) מסיקים כי התגובה היא אנדותרמית.

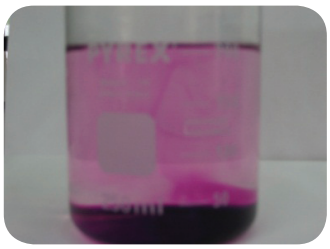
התמונות הבאות מציגות את התרחשות התגובה מבחינה מאקרוסקופית. כל אחד מהאיורים בצד השמאלי של העמוד מייצג תיאור מיקרוסקופי אחד בלבד (חלקי, ללא תנועה!) מבין סך כל המצבים המיקרוסקופיים האפשריים הרבים של המערכת.

שעת צילום 08.20

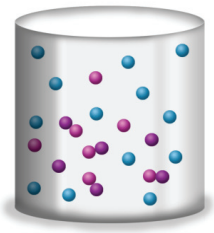


שעת צילום 08.25

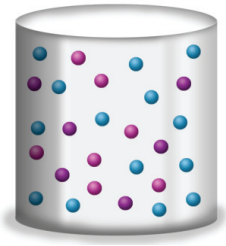




שעת צילום 08.30



שעת צילום 09.50



H_2O יונים בסריג המוצק ובתמיסה

** באיור אין הבחנה בין היונים במוצק לבין היונים הממוימים בתמיסה. צבעי היונים הם להמחשה בלבד.

פסק זמן לחשיבה

נבחן את תהליך ההמסה במים של אשלגן על מנגנטי בעזרת רמות ההבנה.

רשמו תיאור מאקרוסקופי של החומר לפני ההמסה ואחריה.

רשמו תיאור מיקרוסקופי של החומר לפני ההמסה ואחריה.

נסחו את תגובת ההמסה (רמת הסמל).

האם חלים שינויים בפיזור האנרגיה והחלקיקים במהלך ההמסה של החומר היוני? אם כן, אילו?

במהלך ההמסה חל שינוי בהיערכות החלקיקים (היונים) המרכיבים את המוצק. היונים שהיו ערוכים בצורה מסודרת במצב המוצק ולהם אפשרות תנועה של תנודה בלבד, מצויים לאחר ההמסה במצב ממוים, המאפשר להם אופני תנועה רבים נוספים, כגון סיבוב ומעתק, ולכן הם מתפזרים בכוס עם המים. המים בכוס היו במצב נוזל, ולכן מראש אופיינו במצבים מיקרוסקופיים רבים. לאחר ההמסה יש במערכת פיזור אנרגיה, ולכן גם פיזור חלקיקים גדול יותר בהשוואה לפיזור האנרגיה והחלקיקים לפני ההמסה.

מספר התיאורים האפשריים של המערכת (המים והחומר היוני) לאחר ההמסה, גדול בהרבה ממספר התיאורים המיקרוסקופיים שהיו לחומרים הטהורים (המים והחומר היוני) לפני ההמסה.

נוכל להסיק מניתוח כל התופעות אשר הוצגו כאן, כי יש לכל מערכת מספר רב של מצבים מיקרוסקופיים, המתייחסים לאנרגיה השונה של החלקיקים במערכת, ולכן משפיעים גם על מיקומם. ככל ש**מספר המצבים המיקרוסקופיים גדול** יותר, יש במערכת **פיזור אנרגיה ופיזור חלקיקים גדול** יותר.

מדענים מגדירים במושג אנטרופיה את פיזור האנרגיה
והחלקיקים הקיים בחומר.
לחומרים שונים יש חלקיקים, קשרים והיערכות שונים, לכן, אנטרופיה היא תכונה של חומר. סימונה של האנטרופיה הוא S (מקור המילה מיוונית, entrope- לעשות שינוי).
אנטרופיה של חומר גדולה יותר ככל שרב יותר מספר המצבים המיקרוסקופיים האפשריים של חלקיקי החומר (מבחינת מהירות חלקיקים ומיקום במרחב).

אנטרופיה, S, היא מדד לפיזור האנרגיה הפנימית ולפיזור החלקיקים בחומר, הבא לידי ביטוי במספר המצבים המיקרוסקופיים האפשריים של המערכת. ככל שמספר המצבים המיקרוסקופיים גדול יותר, האנטרופיה גדולה יותר.

- פיזור אנרגיה עולה נמדד לפי מספר אופני התנועה (תנודה, סיבוב או מעתק) המתווספים אל החלקיקים.
- פיזור חלקיקים בא לידי ביטוי בשינוי מיקום החלקיקים במרחב, לדוגמה: בעת שינוי מצבי צבירה כגון מוצק ההופך לגז שבו החלקיקים מתרחקים אחד מהשני.

נוכל לסכם את הדוגמאות (א)-(ד) שהוצגו: חלה **עלייה** באנטרופיה של המערכת בעת ההתרחשות של התגובות הספונטניות / השינויים הספונטניים הללו: היתוך קרח, המראת יוד, ערבוב גזים והמסת חומר יוני במים.

אנטרופיה - היבטים כמותיים

לאחר הבנת המשמעות של אנטרופיה, נרצה לדעת מהו השינוי באנטרופיה הנלווה לתגובה כימית. השינוי באנטרופיה נובע משינוי במספר המצבים המיקרוסקופיים האפשריים במערכת בסיומה של תגובה (של תוצרי התגובה) לעומת תחילתה (של המגיבים בתגובה).

כיצד נקבעת האנטרופיה של חומרים?

בדוגמאות הקודמות ראינו כי תוספת אנרגיה בצורת חום לחומר (לקרח, לדוגמה) גרמה להעלאת האנטרופיה של החומר. מהו ערכה של האנטרופיה כאשר האנרגיה של החומר היא מינימלית והחומר הוא במצב מוצק? ככל שהטמפרטורה תהיה נמוכה יותר, אופני התנועה של החומר יהיו מעטים יותר ופיזור האנרגיה והחלקיקים בחומר יהיה מינימלי.

כאשר חומר כלשהו נמצא במצב מוצק, בהיערכות מסודרת אידאלית (גבישית) ובטמפרטורה של האפס המוחלט, מעלות בסולם קלווין, (0K), תוגדר האנטרופיה של החומר כאפס. (כלל זה נקבע כחוק השלישי של התרמודינמיקה).

סולם הטמפרטורה של קלווין

סולם טמפרטורה הקרוי על שמו של המדען הסקוטי לורד קלווין (1827-1907), נקבע על פי האנרגיה הקינטית של חלקיקי החומר עצמו. הערך אפס 0 ניתן לטמפרטורה הנמוכה ביותר האפשרית - האפס המוחלט - שבו אין לחומר כל אנרגיה קינטית. האפס המוחלט מתאים לטמפרטורה של 273°C-. יש להדגיש כי -

- היחידות בסולם קלווין שוות בגודלן ליחידות בסולם צלזיוס.
- בסולם טמפרטורות זה אין מספרים שליליים.
- את הטמפרטורה מציינים באות K.

המרת טמפרטורה מסולם קלווין לסולם צלזיוס:

טמפרטורה בסולם צלזיוס °C + 273 = טמפרטורה בסולם קלווין K

לדוגמה: 25°C הן 298K (טמפרטורת החדר)

באופן כללי נכתוב: $T(K) = T(°C) + 273$

ומה קורה לאנטרופיה של חומר כאשר הטמפרטורה גבוהה מהאפס המוחלט? האנטרופיה עולה.

כאשר חומר הנמצא בטמפרטורת האפס המוחלט עובר חימום ומגיע לטמפרטורה גבוהה יותר, חלקיקי החומר (אטומים, יונים או מולקולות) קולטים אנרגיה המאפשרת אופני תנועה רבים יותר, פיזור גדול יותר של חלקיקים ומספר רב יותר של מצבים מיקרוסקופיים. ולכן ערכה של האנטרופיה עולה.

אנטרופיה מולרית תקנית

אנטרופיה מולרית תקנית, המסומנת $S°$, היא ערך האנטרופיה של 1 מול חומר בתנאים תקניים בלחץ 1 אטמוספרה. אף על פי שאנטרופיה תקנית מתייחסת לטמפרטורות שונות בדרך כלל, מתייחסים לטמפרטורה של 298K.

יחידות **האנטרופיה התקנית לחומר** הן: $\frac{\text{ג'אול}}{\text{מול} \cdot \text{קלווין}}$ ($\frac{J}{K \cdot mol}$).

השפעת מצב הצבירה על האנטרופיה המולרית התקנית של חומרים

לחומר במצב צבירה גזי בטמפרטורת החדר בדרך כלל יש אנטרופיה גבוהה יותר מאשר לחומר במצב צבירה נוזל או מוצק. הסיבה לכך היא ריבוי אופני תנועה של חלקיקי החומר (תנודה, סיבוב ומעתק) במצב הגזי, המאפשרים מספר רב יותר של מצבים מיקרוסקופיים של החומר לעומת המוצק והנוזל. כלומר במצב גז יש יותר אפשרויות לפיזור אנרגיה מאשר במוצק ובנוזל, וכן אפשרויות רבות יותר להיערכות החלקיקים במרחב ולפיזור במיקומם, ולכן ערך האנטרופיה גבוה יותר.

לחומרים נוזליים בטמפרטורת החדר יש בדרך כלל אנטרופיה גבוהה יותר מאשר לחומרים מוצקים, כיוון שלחלקיקי החומר במצב נוזל יש יותר חופש תנועה ויש אפשרות למצבים מיקרוסקופיים רבים יותר לתיאורם, בהשוואה לחלקיקים במצב מוצק.

לסיכום: $S^\circ_{\text{מוצק}} < S^\circ_{\text{נוזל}} < S^\circ_{\text{גז}}$

דוגמה:

נשווה את האנטרופיה המולרית התקנית של מים, $H_2O_{(l)}$, בטמפרטורת החדר שערכה, $69.9\ \frac{J}{K \cdot mol}$ לאנטרופיה התקנית של אמוניה, $NH_{3(g)}$, באותה טמפרטורה שערכה $192.4\ \frac{J}{K \cdot mol}$, למולקולות של שני החומרים ענן אלקטרונים זהה בגודלו (10 אלקטרונים), אך למרות זאת, האנטרופיה המולרית התקנית של האמוניה גבוהה משמעותית מזו של המים. בין מולקולות האמוניה במצב הגזי לא קיימים קשרים בין מולקולריים, ואילו בין מולקולות המים במצב נוזל קיימים קשרי מימן. חופש התנועה של מולקולות האמוניה גדול מזה של מולקולות המים ועל כן הן מבצעות מספר רב יותר של אופני תנועה: ויברציה, רוטציה וטרנסלציה ביחס למולקולות המים המבצעות ויברציה ורוטציה בלבד. ריבוי אופני התנועה מגדיל את מספר המצבים בחומר ומגדיל את פיזור האנרגיה והחלקיקים.

כמובן שאם נשווה חומר מסוים בשלושה מצבי צבירה, לדוגמה קרח, $H_2O_{(s)}$, מים, $H_2O_{(l)}$, ואדי מים, $H_2O_{(g)}$, הרי שהאנטרופיה של קרח נמוכה מהאנטרופיה של מים והאנטרופיה של מים נמוכה מהאנטרופיה של אדי מים.

השינוי באנטרופיה של החומרים במהלך התרחשות תגובות כימיות

בשלב ראשון ננסה **להעריך את סימנו** של השינוי באנטרופיה של המערכת שהיא התגובה שבה המגיבים הופכים לתוצרים, כלומר לקבוע אם הוא שלילי או חיובי, על פי הגורמים העיקריים המשפיעים על האנטרופיה של חומרים.

הערכת השינוי תיעשה באמצעות השוואת האנטרופיה של המגיבים לאנטרופיה של התוצרים.

בתהליכים הרשומים בהמשך, השינוי באנטרופיה של התגובה גדול מאפס, $\Delta S^\circ_{\text{מערכת}} > 0$.

- **בתהליכי היתוך** של חומרים מוצקים טהורים - כי נוצרים חומרים במצב צבירה נוזל.
- **בתהליכי אידוי או המראה** כי נוצרים חומרים במצב צבירה גז.
- **בחלק מתהליכי ההמסה** של חומרים מוצקים בנוזל כלשהו מכיוון שמתקבלות תמיסות נוזליות.

- בתגובה כימית שבה **מספר המולים של חומרים** במצב גזי גדול יותר בתוצרים לעומת מספר המולים של חומרים במצב גזי במגיבים.
- ביצירת **תערובת** חומרים.

בכל המקרים הנ"ל **עולה** מספר המצבים המיקרוסקופיים בהם ניתן לתאר את המערכת, ולכן במקרים אלו קיימת עלייה באנטרופיה של המערכת. לאחר התגובה/השינוי – יש יותר אפשרויות תנועה לחלקיקים ויש אפשרויות רבות יותר למיקום החלקיקים במרחב. פירוש הדבר שחלה עלייה בפיזור האנרגיה ובפיזור החלקיקים במערכת, עקב הפיכת המגיבים לתוצרים. לכן, $\Delta S°_{\text{מערכת}} > 0$.

שאלה עם פתרון

העריכו את סימנו של השינוי באנטרופיה של המערכת במקרים הבאים.

(רשמו אם $\Delta S°_{\text{מערכת}}$ גדול או קטן מאפס). אם השינוי באנטרופיה של המערכת אינו ניתן להערכה, נמקו מדוע.

א. פירוק התרכובת אמוניום חנקתי, $NH_4NO_{3(s)}$ (חומר נפץ):

$$2NH_4NO_{3(s)} \rightarrow 2N_{2(g)} + 4H_2O_{(l)} + O_{2(g)}$$

ב. הפיכת גופרית דו־חמצנית לגופרית תלת־חמצנית (זהו שלב חשוב בייצור חומצה גופרתית בתעשייה הכימית).

$$2SO_{2(g)} + O_{2(g)} \rightarrow 2SO_{3(g)}$$

ג. שינוי מגיב גזי לתוצר גזי

$$N_2O_{4(g)} \rightarrow 2NO_{2\ (g)}$$

ד. אחד התהליכים להפקת מימן

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

ה. פירוק מים ליסודות

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

ו. פירוק גיר

$$CaCO_{3(s)} \rightarrow CaO_{(s)} + CO_{2(g)}$$

תשובה

התגובה	שינוי האנטרופיה במערכת והסבר לקביעה
א	האנטרופיה של התוצרים גדולה מהאנטרופיה של המגיבים. $\Delta S^o_{\text{מערכת}} > 0$ פירוק המוצק גרם ליצירת שלושה מול מולקולות גז בתוצרים וכן לחומר במצב צבירה נוזלי. למולקולות התוצרים יש מספר רב יותר של מצבים מיקרוסקופיים כי מצבי הצבירה שלהם הם נוזל וגז לעומת האנטרופיה של המגיב המוצק בתחילת התגובה. בנוזל ובגז יש יותר אופני תנועה, ולכן פיזור אנרגיה גדול יותר.
ב	האנטרופיה של התוצרים נמוכה מהאנטרופיה של המגיבים. $\Delta S^o_{\text{מערכת}} < 0$ משלושה מולי מולקולות גז במגיבים נוצרו רק שני מולי מולקולות גז בתוצרים. פיזור האנרגיה והחלקיקים קטן, וכן קטן מספר המצבים המיקרוסקופיים לתיאור המערכת.
ג	האנטרופיה של התוצרים גדולה מהאנטרופיה של המגיבים. $\Delta S^o_{\text{מערכת}} > 0$ נוצרים שני מול מולקולות גז בתוצרים ממול אחד של מולקולות גז במגיבים, ולכן מספר המצבים המיקרוסקופיים האפשריים גדל בהרבה, פיזור האנרגיה ומיקום החלקיקים במרחב גדל אף הוא משמעותית.
ד	במקרה זה אי אפשר להעריך אם השינוי באנטרופיה של המערכת גדול מאפס או קטן ממנו. גם במגיבים וגם בתוצרים יש תערובת חומרים, המכילה 2 מול מולקולות גזים. ללא נתונים כמותיים מדוייקים, **לא נוכל להעריך** את **סימנו** של השינוי באנטרופיה.
ה	האנטרופיה של התוצרים גדולה מהאנטרופיה של המגיבים. $\Delta S^o_{\text{מערכת}} > 0$ כל החומרים הם במצב צבירה גזי. העובדה שמשני מול מולקולות במצב צבירה גז מתקבלים שלושה מול מולקולות גז, גורמת להגדלת פיזור האנרגיה והחלקיקים של התוצרים, ולכן גם להגדלת מספר המצבים המיקרוסקופיים בהם ניתן לתאר את המערכת ולכן $\Delta S^o_{\text{מערכת}} > 0$
ו	האנטרופיה של התוצרים גדולה מהאנטרופיה של המגיבים. $\Delta S^o_{\text{מערכת}} > 0$ הסיבה היא קבלת תוצר גזי ($CO_{2(g)}$) שיש לו יותר אופני תנועה, ופיזור אנרגיה גדול יותר, בהשוואה לחומרים המוצקים במגיבים ובתוצרים. מאפס מול מולקולות גז במגיבים התקבל מול אחד של מולקולות גז בתוצרים.

קביעת ערכו של השינוי באנטרופיה של תגובה

על מנת לקבוע את השינוי באנטרופיה של תגובה, עלינו להתבסס על ערכי אנטרופיה מולרית תקנית של חומרים שונים שכבר חושבו ונקבעו (בשיטות שלא פורטו בפרק זה) ומופיעים בטבלאות נתונים שונות. כמו כן, יש לקחת בחשבון את מספר המולים של החומרים – כפי שהם מופיעים בניסוח התגובה ועל סמך נתוני האנטרופיה התקנית, המותאמים למספר המולים של חומר המשתתפים בתגובה – ולחשב את ההפרש בין האנטרופיה הכוללת של התוצרים ובין האנטרופיה הכוללת של המגיבים.

הדבר בא לידי ביטוי בנוסחה (1):

$$\Delta S^o_{\text{מערכת}} = \Sigma n \cdot S^o_{\text{תוצרים}} - \Sigma n \cdot S^o_{\text{מגיבים}} \quad (1)$$

Σ = סכום n = מספר המולים של החומר על פי המקדמים בתגובה המאוזנת

שאלות עם פתרון

1. חשבו את השינוי באנטרופיה של התגובה הבאה ליצירת גפרית תלת־חמצנית.

$$2SO_{2(g)} + O_{2(g)} \rightarrow 2SO_{3(g)}$$

היעזרו בטבלה הבאה המציגה נתונים של ערכי אנטרופיה מולרית תקנית של המגיבים ושל התוצרים:

החומר	אנטרופיה מולרית תקנית S^0 $(\frac{J}{K \cdot mol})$
$SO_{2(g)}$	248.5
$O_{2(g)}$	205.0
$SO_{3(g)}$	256.1

ניעזר בנוסחה 1:

$$\Delta S^\circ_{\text{מערכת}} = \Sigma n \cdot S^\circ_{\text{תוצרים}} - \Sigma n \cdot S^\circ_{\text{מגיבים}}$$

$$\Delta S^\circ_{\text{מערכת}} = 2 \times S^\circ\ SO_{3(g)} - (S^\circ\ O_{2(g)} + 2\times S^\circ\ SO_{2(g)})$$

$$\Delta S^\circ = 2mol \times 256.1 J/mol \cdot K - (2mol \times 248.5 J/mol \cdot K + 1mol \times 205.0 J/mol \cdot K) = -189.8\ J/K$$

תוצאה זו מראה כי יש ירידה באנטרופיה של התגובה, כפי שהערכנו בשאלה קודמת, בסעיף ב.

2. קבעו את שינוי האנטרופיה של התגובה.

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

החומר	אנטרופיה מולרית תקנית S° $(\frac{J}{K \times mol})$
$CO_{2(g)}$	213.6
$H_{2(g)}$	130.6
$CO_{(g)}$	197.9
$H_2O_{(g)}$	188.7

$$\Delta S^\circ_{\text{מערכת}} = \Sigma n \cdot S^\circ_{\text{תוצרים}} - \Sigma n \cdot S^\circ_{\text{מגיבים}}$$

$$\Delta S^\circ_{\text{מערכת}} = 213.6 + 130.6 - (197.9 + 188.7) = -42.2\ J/K$$

אנו רואים כי בעזרת חישוב המבוסס על נתוני האנטרופיה המולרית אפשר **לקבוע** הן את סימנו והן את ערכו של $\Delta S^\circ_{\text{מערכת}}$. בתגובה זו הערכנו כי השינוי יהיה קטן, אולם לא יכולנו להעריך את סימנו (סעיף ד בשאלה קודמת).

שאלות

להלן ערכי אנטרופיה מולרית עבור מספר חומרים הקשורים לשאלות הבאות.

החומר	אנטרופיה מולרית S° $\left(\frac{J}{K \cdot mol}\right)$
$NO_{(g)}$	210.5
$NO_{2(g)}$	240.0
$O_{2(g)}$	205.0
$N_{2(g)}$	191.4
$NH_{3(g)}$	192.5
$H_{2(g)}$	130.0

1. נתונה התגובה הבאה:

$$2NO_{(g)} + O_{2(g)} \rightarrow 2NO_{2(g)}$$

א. העריכו: האם שינוי האנטרופיה בתגובה זו הוא גדול מאפס או קטן מאפס? נמקו.

ב. חשבו מהו שינוי האנטרופיה התקנית במהלך התגובה בהתבסס על נתוני האנטרופיה המולרית התקנית של החומרים. פרטו את חישוביכם.

2.

א. נסחו את התגובה לקבלת אמוניה גזית $NH_{3(g)}$ מהיסודות המרכיבים אותה.

ב. העריכו את השינוי באנטרופיה של התגובה שניסחתם בסעיף א. נמקו.

ג. חשבו את ערך השינוי באנטרופיה התקנית של התגובה שניסחתם בסעיף א. פרטו את חישוביכם.

3. החומר $N_2O_{3(g)}$ מתפרק לגזים חנקן חד־חמצני, $NO_{(g)}$, וחנקן דו־חמצני, $NO_{2(g)}$. במהלך התגובה חלה עלייה באנטרופיה, השווה ל- 138.5 J/K.

א. נסחו ואזנו את התגובה שהתרחשה.

ב. חשבו את האנטרופיה המולרית של $N_2O_{3(g)}$. פרטו את חישוביכם.

4. התייחסו לנתונים שבתחילת השאלות. חשבו מהו השינוי באנטרופיה של המערכת עבור התגובה ההפוכה לתגובה המנוסחת בשאלה.

5. האם איזון שונה של אותה תגובה משפיע על ערכו של השינוי באנטרופיה? אם כן, כיצד? נמקו.

6. נתונה תגובה (1)

$$(1)\quad CO_{(g)} + H_2O_{(g)} \rightarrow CO_{2(g)} + H_{2(g)}$$

השינוי באנטרופיה של המערכת לתגובה זו הוא: -42.7 J/K

נתונה תגובה (2)

$$(2)\quad CO_{(g)} + H_2O_{(l)} \rightarrow CO_{2(g)} + H_{2(g)}$$

האם השינוי באנטרופיה של המערכת לתגובה (2) גדול משינוי האנטרופיה של תגובה (1), קטן ממנו או שווה לו? נמקו.

7. אם ידוע שינוי האנטרופיה של תגובה מסוימת - מה יהיה שינוי האנטרופיה של התגובה ההפוכה לה? נמקו את תשובתכם.

השינוי באנטרופיה של הסביבה במהלך התרחשות תגובות כימיות

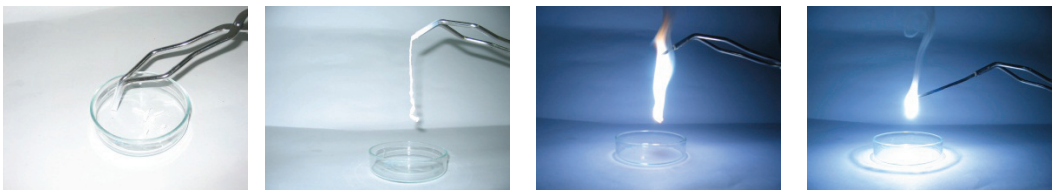
לאחר שהרחבנו את הדיון במושג אנטרופיה ככלל ואנטרופיה של המערכת בפרט, נחזור לדון שוב בשאלה: מהי תגובה ספונטנית?

דנו עד עתה בתגובות אנדותרמיות שהן ספונטניות ומצאנו כי בכל המקרים הללו הייתה עלייה באנטרופיה של המערכת.

האם נוכל לטעון כי תגובה ספונטנית היא תגובה שיש בה עלייה באנטרופיה של המערכת?

נבחן עתה תגובה ספונטנית נוספת המפריכה טענה זו.

שרֵפת מגנזיום



ניסוח התגובה – רמת הסמל

$$2Mg_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow 2MgO_{(s)}$$

בתגובה זו מתרחשת שרֵפה ספונטנית של מגנזיום. (להזכירכם, תגובה ספונטנית מוגדרת כתגובה אשר מרגע התחלתה ממשיכה להתרחש ללא מעורבות חיצונית). התגובה החלה לאחר שמגנזיום נדלק בעזרת להבת המבער, והמשיך לבעור ללא תוספת אנרגיה.

בעת התרחשות התהליך, נוצר מגנזיום חמצני ממגנזיום ומחמצן. המגנזיום החמצני הוא מוצק יוני שבו אופני התנועה של החלקיקים (יוני המגנזיום ויוני החמצן) מצומצמים מאוד לעומת המגנזיום המתכתי שבו יש אלקטרונים בלתי מאותרים ובמיוחד לעומת החמצן הגזי שבו יש למולקולות אופני תנועה רבים ופיזור חלקיקים גדול, כלומר אנטרופיה גבוהה.

אפשר לומר, כי בתהליך זה חלה ירידה באנטרופיה של המערכת. ממגיבים בעלי אנטרופיה גבוהה, מתקבל תוצר בעל אנטרופיה נמוכה יחסית.

כלומר **לא** נוכל לטעון כי בכל התגובות הספונטניות יש עלייה באנטרופיה של המערכת.

אולם ראינו כי במהלך שרֵפת המגנזיום נפלטה אנרגיה רבה בצורת חום ואור אל הסביבה. האם זו הסיבה שהתגובה ספונטנית?

- האם עלינו לבחון את שינויי האנטרופיה לא רק במערכת אלא גם בסביבה?

כפי שלמדתם בפרק א׳ בספר זה, על מנת לבחון היבטים אנרגטיים של תגובה אפשר להגדיר את התגובה המתרחשת כ״מערכת״, וכל מה שמחוץ למוקד התעניינותנו ואיננו חלק מהתגובה הכימית (חלקיקי המגיבים וחלקיקי התוצרים) יוגדר כ״סביבה״. המכלול של המערכת והסביבה מהווה את היקום. נבחן, אם כן, את השינוי באנטרופיה המתרחש גם בסביבה ולא רק במערכת.

הערכת השינוי באנטרופיה של הסביבה

כאשר מתרחשת במערכת תגובה אקסותרמית שבה $\Delta H^\circ < 0$, נפלטת אנרגיה אל הסביבה, כלומר הסביבה קולטת אנרגיה, גדל פיזור האנרגיה בסביבה.

כאשר מתרחשת במערכת תגובה אנדותרמית שבה $\Delta H^\circ > 0$ נקלטת אנרגיה מהסביבה, כלומר הסביבה מאבדת אנרגיה, קטן פיזור האנרגיה בסביבה.

אפשר, אם כן, להסיק כי:

*כאשר מתרחשת תגובה **אקסותרמית**, שבה יש פליטה של אנרגיה אל הסביבה,*
***תעלה** האנטרופיה של הסביבה.*
*כאשר מתרחשת תגובה **אנדותרמית**, שבה יש קליטה של אנרגיה מהסביבה,*
***תרד** האנטרופיה של הסביבה.*

חישוב השינוי באנטרופיה של הסביבה

אין לנו הפעם צורך בהגדרת סביבה מוגדרת מבודדת כפי שעשינו בפרק ב', לצורכי חישוב של $\Delta H°$. הסביבה במקרה זה היא כל מה שלא מוגדר כמערכת. כלומר, הסביבה גדולה מאוד יחסית לכלי התגובה, ולכן אפשר להניח כי הטמפרטורה והלחץ שלה יישארו קבועים בעת מעברי אנרגיה בינה ובין המערכת.

לפיכך מתקבלת הנוסחה (2):

$$\Delta S°_{\text{סביבה}} = -\frac{\Delta H°}{T} \quad (2)$$

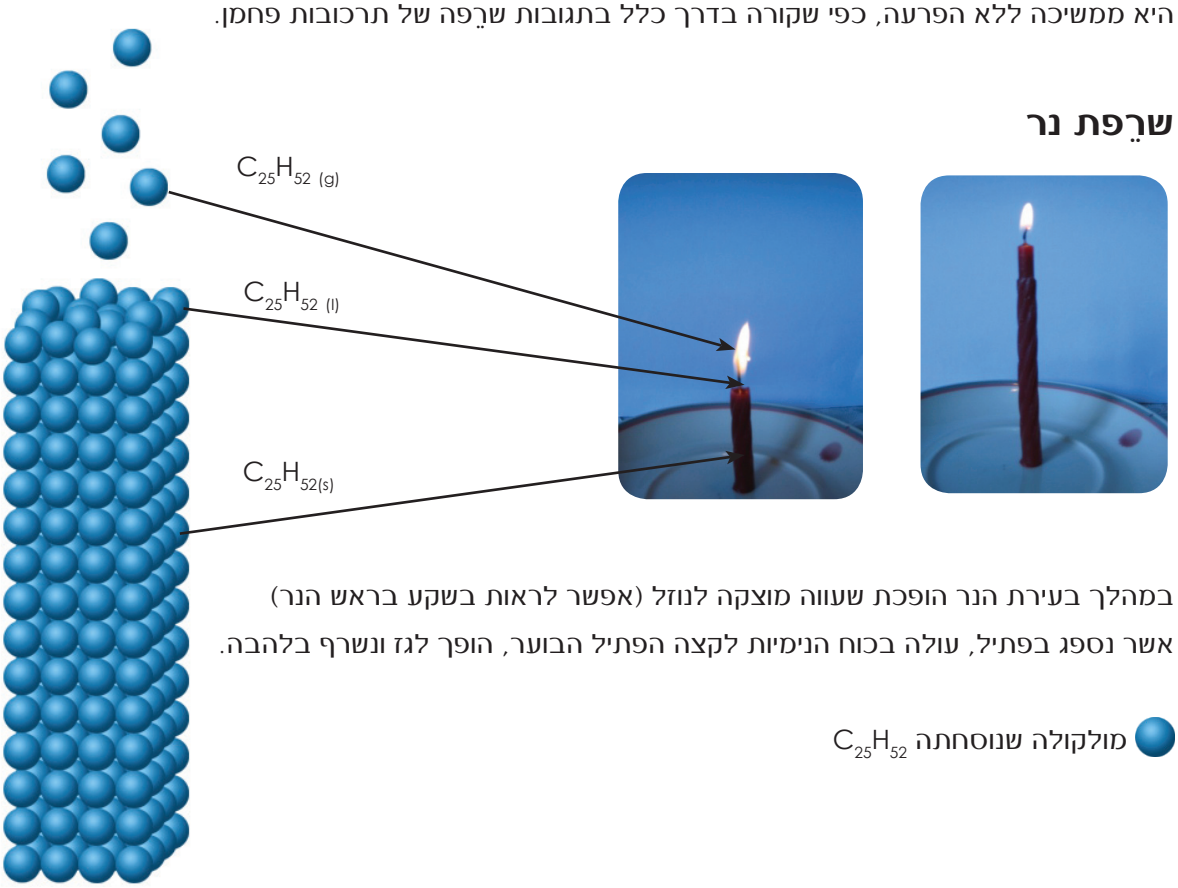
$\Delta H°$ = שינוי האנתלפיה של התגובה ביחידות J (או kJ, במקרה זה יש לכפול פי 1000 את הנתון כדי להתאים יחידות)

T = טמפרטורת הסביבה במעלות קלווין K.

ניזכר בשרֵפת המגנזיום. גם ללא חישובים אפשר לקבוע כי בעת שרֵפת המגנזיום עולה האנטרופיה של הסביבה. האם כאן טמונה התשובה?

נבחן כעת מערכת נוספת ואחרונה – שרֵפת נר. זוהי תגובה ספונטנית כיוון שמרגע שהתחילה להתרחש, היא ממשיכה ללא הפרעה, כפי שקורה בדרך כלל בתגובות שרֵפה של תרכובות פחמן.

שרֵפת נר



במהלך בעירת הנר הופכת שעווה מוצקה לנוזל (אפשר לראות בשקע בראש הנר) אשר נספג בפתיל, עולה בכוח הנימיות לקצה הפתיל הבוער, הופך לגז ונשרף בלהבה.

מולקולה שנוסחתה $C_{25}H_{52}$

התמונות מתארות חלק מהתהליכים המתרחשים בעת תהליך שרֵפתו של נר. אחד ממרכיביה של שעוות הנר הוא $C_{25}H_{52(s)}$. מהרגע בו החל הנר לדלוק מתרחשת תגובת השרֵפה של הגז $C_{25}H_{52(g)}$ שמקורו בשעוות הנר.
נניח כי הנר מורכב רק ממולקולות $C_{25}H_{52}$.
ניסוח תגובת השרֵפה:

$$C_{25}H_{52(g)} + 38O_{2(g)} \rightarrow 25CO_{2(g)} + 26H_2O_{(g)}$$

במהלך בעירת הנר (המהווה את המערכת) חשים בעליית הטמפרטורה של הסביבה הקרובה. משתמע מכך כי תגובת השרֵפה המתרחשת היא תגובה אקסותרמית $\Delta H° < 0$.

כאשר מעריכים את שינוי האנטרופיה **במערכת** זו, אפשר לומר כי היא גדלה, כיוון שהייתה עלייה במספר מולי מולקולות הגז הנוצרים, שבהם יש חלקיקים רבים יותר בהשוואה לחלקיקים שהיו במגיבים. מספר המצבים המיקרוסקופיים האפשריים בתיאור התוצרים גדול ממספר המצבים המיקרוסקופיים האפשריים בתיאור המגיבים, לכן פיזור האנרגיה והחלקיקים במערכת גדל, $\Delta S°_{\text{מערכת}} > 0$.

כמו כן, הסקנו כי התגובה היא אקסותרמית - כיוון שנפלטה אנרגיה בצורת חום לסביבה - לאוויר הקרוב לנר, כלומר **גם השינוי באנטרופיה של הסביבה** הוא חיובי, $\Delta S°_{\text{סביבה}} > 0$.

שאלות בנושא השינוי באנטרופיה של המערכת ושל הסביבה.

על פי הנתונים בטבלה הנתונה בהמשך, חשבו את השינוי באנטרופיה של המערכת ושל הסביבה בכל אחת מהתגובות הבאות.

	שינויים באנטרופיה $(\frac{J}{K})$ / התגובה ונתוני שינוי האנתלפיה שלה	$\Delta S°$ מערכת סימן	$\Delta S°$ מערכת ערך	$\Delta S°$ סביבה סימן	$\Delta S°$ סביבה ערך
1	$2NH_4NO_{3(S)} \rightarrow 2N_{2(g)} + 4H_2O_{(g)} + O_{2(g)}$ $\Delta H^0 = -236kJ$				
2	$4Fe_{(s)} + 3O_{2(g)} \rightarrow 2Fe_2O_{3(S)}$ $\Delta H^0 = -1648kJ$				
3	$HgO_{(s)} \rightarrow Hg_{(l)} + 1/2\ O_{2(g)}$ $\Delta H^0 = 90.8kJ$				

אנטרופיה מולרית תקנית S° $(\frac{J}{K \cdot mol})$	החומר
151.1	$NH_4NO_{3(S)}$
27.2	$Fe_{(S)}$
90.0	$Fe_2O_{3(S)}$
72.0	$HgO_{(S)}$
76.1	$Hg_{(l)}$
205.0	$O_{2(g)}$
189	$H_2O_{(g)}$
191.4	$N_{2(g)}$

השינוי הכולל באנטרופיה של היקום

התחלנו פרק זה בהגדרת ספונטניות של תגובה ובחיפוש אחר גורם הקובע מה הן תגובות ספונטניות. הגורם נמצא בגודל אנטרופיה.

מתברר כי עלינו לקחת בחשבון, לא רק את השינוי באנטרופיה של המערכת (אשר הסביר את הספונטניות של תגובות אנדותרמיות) או את השינוי באנטרופיה של הסביבה (אשר הסביר את הספונטניות של שרפת מגנזיום, שבה חלה ירידה באנטרופיה של המערכת), אלא להתייחס **לסכום השינויים באנטרופיה**, הן של המערכת והן של הסביבה.

המערכת והסביבה מהוות את היקום כולו. לכן עלינו לחשב את שינוי האנטרופיה של היקום כולו על מנת לקבוע ספונטניות של תגובה.

*נמצא כי בתגובה שהיא ספונטנית, **סכום** השינוי באנטרופיה של המערכת*
*והשינוי באנטרופיה של הסביבה הוא ערך **גדול מאפס**.*
זהו חוק הידוע כחוק השני של התרמודינמיקה.

היות שהמערכת (בה מתרחשת תגובה) בצירוף הסביבה מהווים את היקום, נוכל לומר כי:

מערכת + סביבה = יקום

וכי:

השינוי באנטרופיה התקנית של המערכת + השינוי באנטרופיה התקנית של הסביבה = השינוי באנטרופיה התקנית של היקום, ולכן מתקבלת נוסחה (3):

$$\Delta S^\circ_{\text{יקום}} = \Delta S^\circ_{\text{מערכת}} + \Delta S^\circ_{\text{סביבה}}$$

$$\Delta S^\circ_{\text{סביבה}} = -\frac{\Delta H^\circ}{T}$$

$$(3)\ \Delta S^\circ_{\text{יקום}} = \Delta S^\circ_{\text{מערכת}} - \frac{\Delta H^\circ}{T} > 0$$

בחינה של השינוי באנטרופיה של היקום בתגובות רבות הובילה למסקנה כי:

בעת התרחשות של תגובה ספונטנית, האנטרופיה של היקום עולה.

$$\Delta S^\circ_{\text{יקום}} > 0$$

מסקנה זו ידועה גם כחוק השני של התרמודינמיקה.

זהירות, לא להתבלבל!

שינוי באנתלפיה ΔH^0 – הוא השינוי באנרגיה הפנימית במהלך תגובה המתרחשת בלחץ קבוע, שאין בה עבודה. האנרגיה הפנימית היא סך האנרגיה הקינטית והפוטנציאלית שבחומר.

שינוי באנטרופיה ΔS^0 – הוא פונקציה המתארת את השינוי בפיזור האנרגיה והחלקיקים במהלך התרחשות תגובה. קיימים שינויים הן באנטרופיה של המערכת, הן באנטרופיה של הסביבה, והן באנטרופיה של היקום.

מצאנו, אם כן, קריטריון הקובע כי תגובה היא ספונטנית, כאשר השינוי באנטרופיה של היקום גדול מאפס. להזכירכם, הספונטניות מלמדת אותנו על **היכולת** של התגובה להתרחש ולא על התרחשותה בפועל. על כך, הרחבה בפרק ההעשרה שבהמשך.

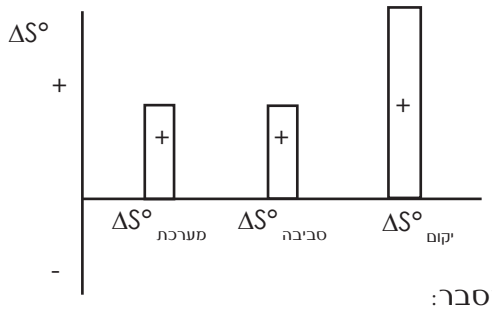
על פי קריטריון זה אפשר **למיין** את התגובות הכימיות לארבעה סוגים (א) – (ד).

א. **תגובה ספונטנית בכל טמפרטורה** – זו תגובה שיש בה עלייה באנטרופיה של התוצרים בהשוואה לאנטרופיה של המגיבים, והיא אקסותרמית, כלומר במהלך התגובה נפלטת אנרגיה לסביבה.

במקרה זה, השינוי באנטרופיה של המערכת גדול מאפס וכן השינוי באנטרופיה של הסביבה גדול מאפס. לכן, סכום השינויים יהיה תמיד גדול מאפס, כלומר השינוי באנטרופיה של היקום יהיה תמיד גדול מאפס. תגובה מסוג זה ספונטנית בכל טמפרטורה, כלומר **הנטייה** שלה להתרחש קיימת בכל טמפרטורה.

להלן תיאור לתגובה מסוג זה בגרף 1

גרף 1



$\Delta S^0_{\text{מערכת}} > 0$

$\Delta H^0 < 0$

דרך נוספת להסבר:

נתון: $\Delta H^\circ < 0 \quad \Delta S^\circ_{\text{מערכת}} > 0$

כאשר $\Delta H^\circ < 0$ אז $\Delta S^\circ_{\text{סביבה}} = -\frac{\Delta H^\circ_{\text{מערכת}}}{T}$

ולכן: $\underset{\text{חיובי}}{\Delta S^\circ_{\text{סביבה}}} + \underset{\text{חיובי}}{\Delta S^\circ_{\text{מערכת}}} = \Delta S^\circ_{\text{יקום}} > 0$

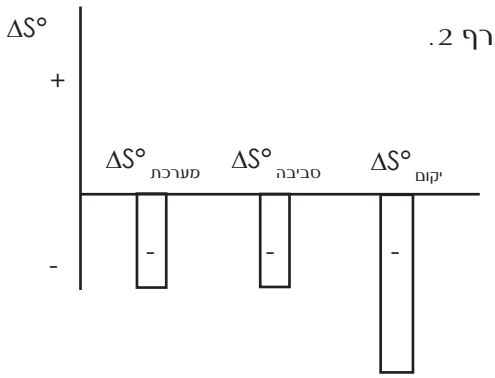
כלומר התגובה הישירה ספונטנית בכל טמפרטורה.

ב. **תגובה שאינה ספונטנית באף טמפרטורה** – זו תגובה שיש בה ירידה באנטרופיה של התוצרים בהשוואה לאנטרופיה של המגיבים, והיא אנדותרמית, כלומר במהלך התגובה נקלטת אנרגיה מהסביבה.

במקרה זה, השינוי באנטרופיה של המערכת קטן מאפס, וכן השינוי באנטרופיה של הסביבה קטן מאפס. לכן, סכום השינויים יהיה תמיד קטן מאפס, כלומר השינוי באנטרופיה של היקום יהיה תמיד קטן מאפס. תגובה מסוג זה אינה ספונטנית באף טמפרטורה, כלומר **הנטייה** שלה להתרחש אינה קיימת באף טמפרטורה.

להלן תיאור לתגובה מסוג זה בגרף 2.

גרף 2



$\Delta S^\circ_{\text{מערכת}} < 0$

$\Delta H^\circ > 0$

נתון: $\Delta H^\circ > 0$ $\Delta S^\circ_{\text{מערכת}} < 0$

כאשר $\Delta H^\circ > 0$ אז $\Delta S^\circ_{\text{סביבה}} = -\frac{\Delta H^\circ_{\text{מערכת}}}{T}$

ולכן: $\Delta S^\circ_{\text{יקום}} = \Delta S^\circ_{\text{מערכת שלילי}} + \Delta S^\circ_{\text{סביבה שלילי}} < 0$

כלומר התגובה הישירה אינה ספונטנית באף טמפרטורה.

שני סוגי התגובות הבאות (ג) ו-(ד) מייצגים מקרים מורכבים יותר: בהם אחד השינויים - שינוי באנטרופיה של המערכת או באנטרופיה של הסביבה - הוא חיובי והאחר שלילי. במקרה זה הספונטניות של התגובה (היכולת שלה להתרחש) **תיקבע על פי הטמפרטורה**, שכן הטמפרטורה תשפיע על גודלה של אנטרופיית הסביבה, בהתאם לנוסחה (2):

$$\Delta S^\circ_{\text{סביבה}} = \frac{\Delta H^\circ}{T} \quad (2)$$

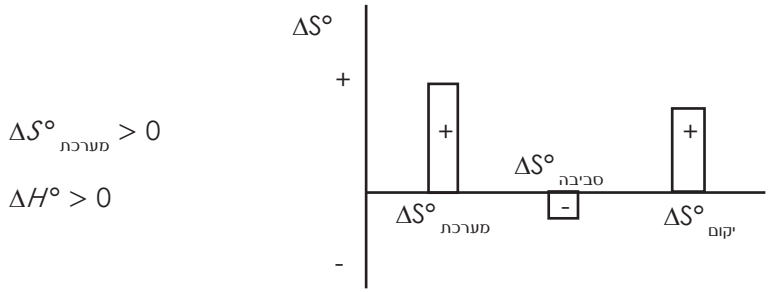
שימו לב כי ערכו של $\Delta S^\circ_{\text{סביבה}}$ הוא ביחס הפוך לטמפרטורה. כלומר הביטוי הנתון יקטן ככל ש- T גבוה, ויגדל ככל ש- T נמוך. לכן, ערך הטמפרטורה יקבע אם השינוי באנטרופיית היקום יהיה גדול מאפס או קטן ממנו.

ג. **תגובה ספונטנית בטמפרטורות גבוהות**: תגובה שיש בה עלייה באנטרופיה של התוצרים בהשוואה לאנטרופיה של המגיבים, והיא אנדותרמית, כלומר השינוי באנטרופיית המערכת הוא חיובי, אולם השינוי באנטרופיה של הסביבה הוא שלילי. היות שהתגובה תהיה ספונטנית כאשר סכום שינויי האנטרופיה יהיה חיובי, חשוב לדעת איזה שינוי גדול יותר.

להלן תיאור לתגובה מסוג זה בגרפים 3א' ו - 3ב'

כאשר השינוי באנטרופיית הסביבה הוא שלילי וערכו **קטן** (בטמפרטורות גבוהות) - השינוי הכולל באנטרופיית היקום יהיה חיובי והתגובה תהיה ספונטנית (גרף 3 א).

גרף 3א



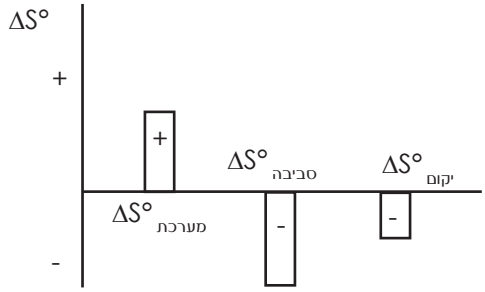
נתון: $\Delta H^\circ > 0$ $\Delta S^\circ_{\text{מערכת}} > 0$

כדי שהערך של $\Delta S^\circ_{\text{יקום}} > 0$, נדרש ש- $\Delta S^\circ_{\text{מערכת}} + \Delta S^\circ_{\text{סביבה}} > 0$ דבר אשר יתרחש רק בטמפרטורות גבוהות:

רק בטמפרטורות גבוהות המכנה בביטוי: $\Delta S^\circ_{\text{סביבה}} = -\frac{\Delta H^\circ_{\text{מערכת}}}{T}$ יהיה גדול מאוד והשבר יהיה קטן.

במקרה כזה יתקיים $|\Delta S^\circ_{\text{סביבה}}| < |\Delta S^\circ_{\text{מערכת}}|$ ובסך הכל יתקבל ששינוי האנטרופיה של היקום יהיה חיובי.

גרף 3ב



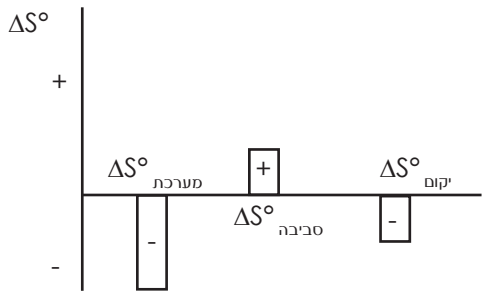
$\Delta S°_{\text{מערכת}} > 0$

$\Delta H° > 0$

כאשר השינוי באנטרופיית הסביבה הוא שלילי וערכו **גדול** (בטמפרטורות נמוכות) – השינוי הכולל של אנטרופיית היקום יהיה שלילי והתגובה לא תהיה ספונטנית (גרף 3ב).

ד. **תגובה ספונטנית בטמפרטורות נמוכות:** תגובה שיש בה ירידה באנטרופיה של התוצרים בהשוואה לאנטרופיה של המגיבים, והיא אקסותרמית – השינוי באנטרופיית המערכת הוא שלילי, אולם השינוי באנטרופיית הסביבה הוא חיובי. היות שהתגובה תהיה ספונטנית כאשר סכום שינויי האנטרופיה יהיה חיובי, עלינו לבחון איזה שינוי גדול יותר. להלן תיאור לתגובה מסוג זה בגרפים 4א ו – 4ב.

גרף 4א

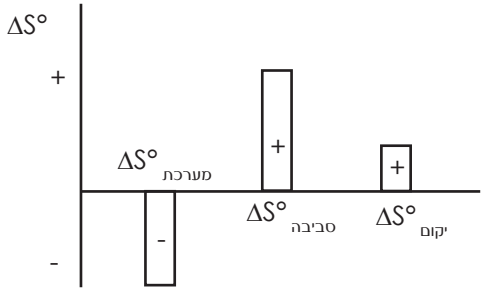


$\Delta S°_{\text{מערכת}} < 0$

$\Delta H° < 0$

כאשר השינוי באנטרופיית הסביבה הוא חיובי וערכו **קטן** (בטמפרטורות גבוהות), השינוי הכולל באנטרופיית היקום יהיה שלילי והתגובה לא תהיה ספונטנית (גרף 4א).

גרף 4ב



$\Delta S°_{\text{מערכת}} < 0$

$\Delta H° < 0$

כאשר השינוי באנטרופיית הסביבה יהיה חיובי וערכו **גדול** (בטמפרטורות נמוכות) – השינוי הכולל באנטרופיית היקום יהיה חיובי והתגובה תהיה ספונטנית (גרף 4 ב).

נתון : $\Delta H° < 0$ $\quad 0 > \Delta S°_{\text{מערכת}}$

כדי שהערך של $\Delta S°_{\text{יקום}} > 0$, נדרש ש– $\Delta S°_{\text{סביבה}} > 0$ + $\Delta S°_{\text{מערכת}}$ דבר אשר יתרחש רק בטמפרטורות נמוכות מאוד.

רק בטמפרטורות נמוכות המכנה בביטוי: $\Delta S°_{\text{סביבה}} = -\frac{\Delta H°_{\text{מערכת}}}{T}$ יהיה קטן מאוד והשבר יהיה גדול יותר.

במקרה כזה יתקיים $|\Delta S°_{\text{מערכת}}| < |\Delta S°_{\text{סביבה}}|$ ובסך הכל יתקבל ששינוי האנטרופיה של היקום יהיה חיובי.

הטבלה הבאה מסכמת את הסוגים של טיפוסי התגובות ונותנת דוגמה לתגובה מתאימה.

סוג התגובה	$\Delta S°$ מערכת	$\Delta H°$	$\Delta S°$ סביבה	$\Delta S°$ יקום	ספונטניות	דוגמה לתגובה
א	+	−	+	+	תגובה ספונטנית בכל טמפרטורה.	$2N_2O_{(g)} \rightarrow 2N_{2(g)} + O_{2(g)}$
ב	−	+	−	−	התגובה אינה ספונטנית באף טמפרטורה.	$3O_{2(g)} \rightarrow 2O_{3(g)}$
ג	+	+	−	+	תגובה ספונטנית בטמפרטורות גבוהות.	$2NH_{3(g)} \rightarrow N_{2(g)} + 3H_{2(g)}$
				−	התגובה אינה ספונטנית בטמפרטורות נמוכות.	————
ד	−	−	+	−	התגובה אינה ספונטנית בטמפרטורות גבוהות.	————
				+	התגובה ספונטנית בטמפרטורות נמוכות.	$2Mg_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow 2\ MgO_{(s)}$

העשרה - האם כל תהליך ספונטני אכן מתרחש בפועל?

חשוב להבחין ולהפריד בין **ספונטניות** של תגובה לבין **התרחשות** של תגובה. ספונטניות של תגובה מלמדת אותנו על הנטייה של התגובה להתרחש וניתנת לחישוב על פי ערכו של השינוי באנטרופיה של היקום. זהו החוק השני של התרמודינמיקה.

התרחשות של תגובה בתנאים מסוימים קשורה לקצב התגובה באותם תנאים ושייכת להיבט הקינטי ולא להיבט התרמודינמי.

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, אפשר לקבוע מראש אם תהליך **יכול להיות** ספונטני או לא. אולם שיקולי אנטרופיה אינם קובעים אם תהליך ספונטני אכן יתחיל להתרחש בתנאים מסוימים או באיזה קצב הדבר יקרה.

רק היבטים קינטיים, שעליהם למדתם במהלך היחידה, כגון אנרגיית שפעול ושאר הגורמים המשפיעים על קצב תגובה, הם הגורמים הנותנים תשובה לגבי התרחשות התגובה בפועל.

יש תגובות ספונטניות בתנאים מסוימים - לדוגמה: בטמפרטורת החדר - המתרחשות במהירות ויש תגובות ספונטניות שאינן מתרחשות כלל. אם תגובה שהיא ספונטנית (כי מצאנו שהשינוי באנטרופיה של היקום גדול מאפס) אינה מתרחשת בתנאים מסוימים, נוכל להניח כי על מנת שהתגובה תתרחש דרושה אנרגיה מסוימת להתחלת התגובה, אנרגיית שפעול מתאימה. כל עוד אנרגיה זו לא תינתן, התגובה לא תתחיל להתרחש למרות **הנטייה** שלה להתרחש.

אם תגובה מסוימת מתרחשת לנגד עינינו או יש ראיות לכך שהתקיימה בתנאים מסוימים, נוכל להסיק כי התגובה היא ספונטנית והושקעה אנרגיית שפעול המאפשרת את התחלת התגובה (אם התגובה התרחשה בפועל, ודאי שיש לה יכולת להתרחש).

כדי להבהיר נקודה זו, נזכיר כמה תהליכים ספונטניים הדומים מבחינה כימית: תגובת יסודות המגיבים 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.

ניתן לשמור בכלי תערובת של מימן וחמצן ללא שינוי לאורך זמן רב. כלומר למרות שהתהליך הוא ספונטני, הוא אינו מתרחש. חישוב השינוי באנטרופיה של היקום, מלמד אותנו שהתהליך יכול להתרחש, אך אינו מגדיר באיזה מצב הוא יתרחש. רק אם יועבר ניצוץ חשמלי בתערובת הנ"ל, כלומר תהיה השקעת אנרגיה, אשר תספיק כדי להתגבר על אנרגיית השפעול של התגובה, התגובה אמנם 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 שסך כל האנטרופיה של היקום גדלה. על פי שיקולי האנטרופיה (החוק השני) זוהי תגובה היכולה להיות ספונטנית. אולם בטמפרטורת החדר נשמר מגנזיום במחסן החומרים לאורך זמן, ולמרות הנטייה להגדלת האנטרופיה של היקום - התהליך אינו מתרחש.

בניגוד ליצירת המים, לא די בניצוץ קטן להתחלת תגובת המגנזיום עם החמצן. רק לאחר שנחמם את המגנזיום לטמפרטורה גבוהה ביותר בעזרת להבת המבער, הוא יידלק ויתחיל להתרחש תהליך שרֵפה בקצב גבוה, ללא השקעת אנרגיה נוספת.

האם תהליכים לא ספונטניים עשויים להתרחש?

קיומו של תהליך שבו אנטרופיית היקום יורדת (תהליך לא ספונטני) הוא למעשה בלתי אפשרי ולא יתרחש כלל.

אולם, אם לתהליך לא ספונטני יהיה **צימוד** לתהליך ספונטני אחר, וסכום השינויים באנטרופיית היקום יהיה גדול מאפס, הרי שיתרחש גם תהליך מסוג זה.

אין פרוש המילה צימוד לכך ששני התהליכים הם קרובים אחד לשני אלא שישנה דרך מיוחדת, שנמצאת בטבע או שנתגלתה על ידי האדם, לכך ששני התהליכים מתרחשים בצורה צמודה אחד לשני.

דוגמה לתהליך כזה היא תגובת הפוטוסינתזה.

תהליך הפוטוסינתזה הוא תהליך אנדותרמי שניסוחו: $6CO_{2(g)} + 6H_2O_{(g)} \rightarrow C_6H_{12}O_{6(s)} + 6O_{2(g)}$

הנתונים הנ"ל מעידים כי האנטרופיה של היקום בעת התרחשות תהליך זה אמורה לרדת. הסיבה היא שאנטרופיית המערכת יורדת, ואף האנטרופיה של הסביבה יורדת, כיוון שהתהליך אנדותרמי.

אולם תהליך הפוטוסינתזה מתקיים על פני כדור הארץ זה כ-3 מיליארדי שנים. כיצד? תהליך הפוטוסינתזה הוא תהליך מורכב ובו שלבים שונים. אחד השלבים צמוד לתהליך פליטת האנרגיה המתרחש בשמש, שהוא תהליך ספונטני. בשמש מתרחש תהליך היתוך גרעיני שנוצרים בו גרעינים של אטומי הליום מגרעינים של אטומי מימן. תהליך זה ספונטני בזכות האנרגיה הגדולה הנפלטת. כאשר בוחנים את שינוי האנטרופיה ביקום

בעת התרחשותם של שני התהליכים הצמודים הללו (פוטוסינתזה והיתוך גרעיני), יש אמנם ירידה באנטרופיה בגלל תהליך הפוטוסינתזה, אך במקביל יש עלייה באנטרופיה עקב תהליכי ההיתוך המתרחשים בשמש. בסיכומו של דבר, התהליך המשולב מקיים את החוק השני והאנטרופיה של היקום עולה.

דוגמה נוספת היא תהליך הפירוק של המים למימן ולחמצן בטמפרטורת החדר. פירוק המים ליסודות הפוך לתהליך הספונטני של יצירת מים מהיסודות. לכן ברור כי תהליך זה אינו ספונטני. אפשר לבצע את התגובה בעזרת אלקטרוליזה, כלומר חיבור המערכת לסוללה.

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

איך אפשר להסביר זאת? בסוללה מתרחש כל הזמן תהליך ספונטני. (רצוי לשמור סוללות במקפיא על מנת להאט את קצב הפירוק שלהן עד לשימוש). כאשר מחברים את הסוללה למים מזוקקים בעזרת מעגל חשמלי מתאים, המים יתפרקו למימן ולחמצן. כלומר כל עוד תהיה התערבות חיצונית (הסוללה), המים ימשיכו להתפרק. שימו לב, שזו אינה אנרגיית שפעול – אנרגיה התחלתית, אלא אנרגיה שיש להשקיע כל הזמן. (חזרו והיזכרו בהגדרה של **תגובה ספונטנית** בעמ' 151). נהוג לומר כי במקרה של פירוק המים באמצעות אלקטרוליזה יש צימוד בין תגובה ספונטנית (בסוללה) לתגובה לא ספונטנית (פירוק המים), המאפשרת את קיומה באמצעות השקעת עבודה.

מהי יציבות של חומרים?

פירוש המושג **יציבות של חומר**, שבתנאים הנתונים החומר מתקיים ללא שינוי לאורך זמן. יציבות של חומר היא מושג תרמודינמי. פירוש יציבות זו הוא, שחומר שהוא תוצר של תגובה ספונטנית יציב יותר מהמגיבים באותה תגובה. לדוגמה, בתגובת השרֵפה של מגנזיום נוכל לומר כי מגנזיום חמצני הוא יציב תרמודינמית יותר מהיציבות התרמודינמית של המגנזיום. כלומר המושג יחסי, וכאשר מדברים על יציבות חומר יש לציין יציבות ביחס לחומר אחר.

שאלה מסכמת

היזכרו בניסוי הראשון ביחידה: בעירת זיקוק

לפניכם המושגים העיקריים שלמדתם 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.

תארו את בעירת הזיקוק מבחינה מדעית תוך כדי קישור מושגים רבים ככל האפשר מהרשימה.

שאלות לסיכום הפרק

1. התגובה הנתונה אינה ספונטנית בטמפרטורה של 298K.

$$H_2O_{(l)} \rightarrow H_{2(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \qquad \Delta H^\circ = +285.9\,kJ/mol$$

החומר	$H_2O_{(s)}$	$H_2O_{(l)}$	$H_2O_{(g)}$	$O_{2(g)}$	$H_{2(g)}$
אנטרופיה מולרית תקנית S° $\left(\frac{J}{K\cdot mol}\right)$	47.8	70	188.7	205	130.6

א. חשבו את השינוי באנטרופיה של המערכת. פרטו את חישוביכם.

ב. חשבו את השינוי באנטרופיה של הסביבה. פרטו את חישוביכם.

ג. חשבו את השינוי באנטרופיה של היקום. פרטו את חישוביכם.

ד. איזה מבין הגרפים 3א, 3ב, 4א או 4ב, המופיעים בפרק זה (בעמודים 175-177), מתאימים לתגובה זו?

ה. הסבירו מדוע התגובה אינה ספונטנית ב-298K.

ו. נמצא שהתגובה מתרחשת בטמפרטורה גבוהה. הסבירו מדוע.

2. נתונה התגובה הבאה: $\Delta H^\circ = +247.3\,kJ$

$$CH_{4(g)} + CO_{2(g)} \rightarrow 2CO_{(g)} + 2H_{2(g)}$$

החומר	$CH_{4(g)}$	$CO_{(g)}$	$CO_{2(g)}$	$H_{2(g)}$
אנטרופיה מולרית תקנית S° $\left(\frac{J}{K\cdot mol}\right)$	186	197.9	213.6	130.6

א. חשבו את השינוי באנטרופיה של המערכת. פרטו את חישוביכם.

ב. חשבו את השינוי באנטרופיה של הסביבה בטמפרטורה של 298K. פרטו את חישוביכם.

ג. חשבו את השינוי באנטרופיה של היקום. האם התגובה ספונטנית בטמפרטורת החדר? פרטו את חישוביכם.

ד. איזה / אילו מהערכים שחישבתם ישתנה/ישתנו כאשר הטמפרטורה תהיה 1100K? האם התגובה ספונטנית בתנאים אלה?

3. נתונה התגובה הבאה:

$$H_2O_{(s)} \rightarrow H_2O_{(l)} \qquad \Delta H^\circ = 6000J$$

החומר	$H_2O_{(l)}$	$H_2O_{(s)}$
אנטרופיה מולרית תקנית S° $(\frac{J}{K \cdot mol})$	69.9	47.8

א. בחנו אם התגובה ספונטנית בשתי טמפרטורות שונות: 298K ו-248K. פרטו את חישוביכם.

ב. הציגו את האיורים הגרפיים המתאימים לכל טמפרטורה (מבין הגרפים בעמודים 175-177).

ג. האם תוצאות החישובים תואמות את ניסיונכם היומיומי בהיתוך קוביות קרח? אם כן, כיצד?

4. לפניכם שלושה תהליכים המתארים ייצור חומצה חנקתית, $HNO_{3(aq)}$, מאמוניה, $NH_{3(g)}$:

(1) $4NH_{3(g)} + 5O_{2(g)} \rightarrow 4NO_{(g)} + 6H_2O_{(g)}$

(2) $2NO_{(g)} + O_{2(g)} \rightarrow 2NO_{2(g)} \quad \Delta H^\circ = -114.4\ kJ$

(3) $4NO_{2(g)} + O_{2(g)} + 2H_2O_{(l)} \rightarrow 4HNO_{3(aq)}$

א. קבעו את סימנו של השינוי באנטרופיה של המערכת עבור כל אחת משלוש התגובות (1)-(3).
נמקו את קביעתכם.

ב. הסעיף דן בתגובה (1).
האם תוכלו לקבוע אם תגובה (1) היא ספונטנית בטמפרטורת החדר או לא? נמקו.

ג. הסעיף דן בתגובה (2). לפניכם טבלה ובה נתונים תרמודינמיים:

החומר	$NO_{(g)}$	$O_{2(g)}$	$NO_{2(g)}$
אנטרופיה מולרית תקנית S° $(\frac{J}{K \cdot mol})$	210.5	205	240

I. חשבו את השינוי באנטרופיה ΔS° של התגובה. פרטו את חישוביכם.

II. האם התגובה ספונטנית בתנאי החדר? נמקו בפירוט.

ד. הסעיף דן בתגובה (3).
ידוע כי התגובה ספונטנית בתנאי החדר. האם התגובה אקסותרמית או אנדותרמית?
הסבירו.

5. נתונות שלש תגובות :

(1) $N_2O_{4(g)} \rightleftarrows 2NO_{2(g)}$

(2) $N_{2(g)} + O_{2(g)} \rightleftarrows 2NO_{(g)}$

(3) $N_{2(g)} + 2\,O_{2(g)} \rightleftarrows 2NO_{2(g)}$

נתונים שלושה ערכים שונים של שינויי אנטרופיה במערכת:

$\Delta S°_a = -121.4\ J / K$

$\Delta S°_b = 24.6\ J / K$

$\Delta S°_c = 175.8\ J / K$

א. התאימו **כל אחת** מהתגובות לשינוי האנטרופיה המתאים. נמקו תשובתכם.
ידוע כי ערכה של האנטרופיה המולרית של $NO_{2(g)}$ הוא $240\ \frac{J}{K \cdot mol}$.

ב. חשבו את האנטרופיה המולרית של $N_2O_{4(g)}$.

6. המורה קיימה הדגמה במעבדה: בעזרת שני מזרקים ערבבה שני גזים: אמוניה, $NH_{3(g)}$, ומימן כלורי, $HCl_{(g)}$. הגזים התערבבו והתקבל מוצק לבן.
להלן ניסוח התגובה שהתרחשה: $NH_{3(g)} + HCl_{(g)} \rightarrow NH_4Cl_{(S)}$
האם התגובה היא אקסותרמית או אנדותרמית? נמקו בפירוט.

7. צפו בסרטון בכתובת הבאה:
http://www.youtube.com/watch?v=ezsur0L0L1c&feature=related
האם התגובה היא ספונטנית בטמפרטורת החדר? נמקו.

8. ידוע שבתגובה מסוימת, האנרגיה הפנימית של התוצרים גבוהה מזו של המגיבים, וכן ידוע שתגובה זו מתרחשת באופן ספונטני בטמפרטורות מסוימות.

איזה ניסוח מבין הניסוחים הבאים יכול לתאר תגובה זו? נמקו בפירוט את בחירתכם.

(1) $2A_{(g)} + B_{(g)} \rightarrow 2C_{(g)}$

(2) $2A_{(s)} + 4B_{(g)} \rightarrow 3C_{(s)}$

(3) $2A_{(g)} + 3B_{(s)} \rightarrow 4C_{(g)}$

(4) $2A_{(l)} + 5B_{(g)} \rightarrow 3C_{(g)}$

9. בחרו את ההיגד הנכון ונמקו אותו:

1. תגובה ספונטנית בתנאים מסוימים רק כאשר השינוי באנטרופיית היקום שלילי.
2. תגובה ספונטנית בתנאים מסוימים רק כאשר השינוי באנטרופיית המערכת חיובי.
3. תגובה ספונטנית בכל טמפרטורה כאשר התגובה אקסותרמית והשינוי באנטרופיית המערכת חיובי.
4. תגובה ספונטנית בתנאים מסויימים רק כאשר התגובה אקסותרמית.
5. תגובה ספונטנית בתנאים מסוימים רק כאשר סכום שינוי אנטרופיית המערכת ושינוי אנטרופיית הסביבה שלילי.

שאלות מסכמות בנושאים: שיווי משקל ותרמודינמיקה

1. עבור התגובה: $2NO_{2(g)} \rightleftarrows 2NO_{(g)} + O_{2(g)}$

נתונים:

K_C	טמפרטורה °C
$4.3*10^{-13}$	25
$1.2*10^{-13}$	275

בניסוי שבוצע בטמפרטורה של 275 °C נמצא כי ריכוזי החומרים בכלי ברגע מסוים היה:

$[O_2]$	$[NO]$	$[NO_2]$
0.2M	0.2M	0.5M

א. האם עד הגעה לשיווי משקל הלחץ בכלי עלה, ירד או לא השתנה? נמקו.

ב. האם עד הגעה לשיווי משקל אנטרופיית הסביבה עלתה, ירדה או לא השתנתה? נמקו.

ג.כשהמערכת הגיעה למצב של שיווי משקל, חיממו את כלי התגובה.

I. עד הגעה לשיווי משקל חדש, האם ריכוזו של $NO_{(g)}$ עלה, ירד או לא השתנה ביחס לריכוזו בשיווי המשקל המקורי? נמקו.

II. האם זמן ההגעה לשיווי משקל ארוך, קצר או שווה לזמן ההגעה לשיווי משקל בטמפרטורה של 275 °C? נמקו ברמה המיקרוסקופית.

2. נתונה התגובה הבאה: $K_C=0.016$ $PCl_{5(g)} \rightleftarrows PCl_{3(g)} + Cl_{2(g)}$

לכלי בנפח 1 ליטר, המצוי בטמפרטורה של 500 °C הכניסו 0.02 מול מכל אחד משלושת הגזים.

א. האם עד הגעה לשיווי משקל, אנטרופיית המערכת עלתה, ירדה או לא השתנתה? נמקו ברמה המיקרוסקופית.

ב. האם הלחץ בכלי עד הגעה לשיווי משקל עלה, ירד או לא השתנה? נמקו.

ג. הורידו את הטמפרטורה בכלי ל - 200 °C.

I. האם תוכלו לדעת אם ערכו של קבוע שיווי המשקל גדל, קטן או לא השתנה? אם כן, הסבירו. אם לא, מהו הנתון הנוסף החסר לשם קביעת השינוי בערכו קבוע שיווי המשקל? הסבירו.

II. לגבי כל אחד מהנתונים הבאים, האם תוכלו לקבוע את מגמת שינויו עד הגעה למשקל חדש, עם קירור הכלי? הסבירו.

i. ריכוז $PCl_{3(g)}$

ii. הלחץ בכלי

iii. זמן ההגעה לשיווי משקל חדש

iv. אנטרופיית הסביבה

III. האם תשובתכם לסעיף ג II תשתנה אם נתון כי התגובה אקסותרמית? אם כן, הסבירו מה מגמת השינוי של כל אחד מארבעת הגורמים בסעיף ג II.

3. השאלה עוסקת במערכת הבאה:

$$2N_2O_{4(g)} + O_{2(g)} \rightleftarrows 2N_2O_{5(g)} \qquad \Delta H^\circ<0$$

לכלי שנפחו 1 ליטר הכניסו 0.15 מול $N_2O_{4(g)}$ ו - 0.225 מול $O_{2(g)}$. המערכת נשמרה בטמפרטורה קבועה עד השגת שיווי משקל. בשיווי משקל נמצא כי בכלי היו קיימים 0.05 מול $N_2O_{5(g)}$.

א. חשבו את קבוע שיווי המשקל K_C של המערכת בתנאים אלו.

ב. מה יהיה סימנה של אנטרופיית המערכת עד הגעה לשיווי משקל? הסבירו.

ג. מה יהיה סימנה של אנטרופיית הסביבה עד הגעה לשיווי משקל? הסבירו.

ד. בצעו את התגובה בשתי מערכות שונות A ו - B. בכל מערכת חושב ערכו של K_C.

המערכת	טמפרטורה	ריכוזים התחלתיים (M)		K_C
		$N_2O_{4(g)}$	$O_{2(g)}$	
A	t_A	0.001	0.001	$K_{c(A)}$
B	t_B	0.1	0.1	$K_{c(B)}$

נמצא ש $K_{c(A)} > K_{c(B)}$.

1. האם t_A גדול מ - t_B, קטן ממנו או שווה לו? נמקו.

2. באיזו מערכת הושג שיווי המשקל תוך זמן קצר יותר? נמקו.

ה. האם כדאי להשתמש בזרז על מנת להפיק ריכוז גבוה יותר של $N_2O_{5(g)}$ בתהליך זה? נמקו.

4. שני ניסויים נערכו לבדיקת התגובה ההפיכה

$$COCl_{2(g)} \rightleftarrows CO_{(g)} + Cl_{2(g)}$$

בניסוי הראשון הוכנסו למיכל בנפח 200 מ"ל, 0.34 מול $COCl_{2(g)}$ ו - 0.02 מול $Cl_{2(g)}$. לאחר 25 דקות, כאשר המערכת הגיעה לשיווי משקל, היה ריכוז ה - $Cl_{2(g)}$ 0.5M.

א. כתבו את הביטוי לקבוע שיווי המשקל וחשבו את ערכו.

ב. האם משתנה הלחץ בכלי במהלך התגובה עד הגעה לשיווי משקל? נמקו.

הניסוי השני נערך באותו מיכל עם מספר מולים זהה של $COCl_{2(g)}$ ו - $Cl_{2(g)}$.

הפעם הגיעה המערכת לשיווי משקל אחרי 15 דקות, וריכוז ה - $Cl_{2(g)}$ היה 0.6M.

ג. קבעו אם ההבדל בין תוצאות שני הניסויים נובע מהוספת זרז לתגובה או משינוי הטמפרטורה בכלי. הסבירו.

ד. על פי תוצאות הניסויים, האם התגובה הישירה אקסותרמית או אנדותרמית? נמקו.

שאלות רב ברירה

בחרו את המשפט/המשפטים הנכונים בכל שאלה ונמקו

1. בתהליך ספונטני **תמיד**:

א. אנטרופיית המערכת גדלה.

ב. סכום אנטרופיית המערכת והסביבה גדל.

ג. הן אנטרופיית המערכת והן אנטרופיית הסביבה גדלות.

ד. מספר המולים של התוצרים במצב גזי במערכת גבוה ממספר מולי הגז במגיבים.

ה. אנטרופיית היקום גדלה.

ו. סכום אנטרופיית המערכת והסביבה קטן.

2. בתהליך המזורז באמצעות זרז:

א. מסת הזרז בסיום התהליך נמוכה ביחס למסתו ההתחלתית.

ב. מסת הזרז בסיום התהליך גדולה ביחס למסתו ההתחלתית.

ג. מסת הזרז בסיום התהליך אינה משתנה ביחס למסתו ההתחלתית.

ד. מסת הזרז משתנה בסיום התהליך בהתאם לסוג התהליך.

ה. מסת התוצרים גבוהה ממסתם לו התהליך היה מתרחש ללא זרז.

ו. האנרגיה הפנימית של מולקולות המגיבים גבוהה מהאנרגיה הפנימית שלהן ללא זרז.

ז. התהליך מתרחש במנגנון חלופי בו אנרגיית התצמיד המשופעל נמוכה מהאנרגיה שלו ללא זרז.

ח. ככל ששטח הפנים של הזרז קטן יותר כך התהליך מתרחש מהר יותר.

ט. בתגובת שיווי משקל, זמן ההגעה לשיווי משקל קצר יותר.

3. בתגובה אקסותרמית:

א. אנטרופיית הסביבה תמיד עולה.

ב. אנטרופיית היקום תמיד חיובית.

ג. אם קיימת ירידה באנטרופיית המערכת, התגובה אינה ספונטנית אף פעם.

ד. אם מספר מולי התוצרים גבוה ממספר מולי המגיבים, התגובה תמיד ספונטנית.

4. בתגובה אנדותרמית:

א. לתצמיד המשופעל אנרגיה הגבוהה מאנרגיית המגיבים בלבד.

ב. לתצמיד המשופעל אנרגיה הגבוהה מאנרגיית המגיבים והתוצרים.

ג. לתצמיד המשופעל אנרגיה הגבוהה מאנרגיית התוצרים בלבד.

ד. אנטרופיית היקום תמיד שלילית.

ה. כאשר אנטרופיית התוצרים גבוהה מאנטרופיית המגיבים התגובה תמיד ספונטנית.

ו. קיים טווח טמפרטורות מסוים בו התגובה ספונטנית.

5. עבור התגובה: $N_{2(g)} + O_{2(g)} \rightleftarrows 2NO_{(g)}$

ערכי ה - K_C הם:

טמפרטורה (K)	500	700	1500
קבוע שיווי משקל K_C	10^{-30}	10^{-12}	10^{-5}

כמו כן נתונות האנטרופיות המולריות התקניות הבאות $S°$:

החומר	$S°$ $\left(\frac{J}{K \cdot mol}\right)$
$N_{2(g)}$	191.4
$O_{2(g)}$	205
$NO_{(g)}$	210.5

א. התגובה ליצירת $NO_{(g)}$ היא תגובה אנדותרמית.

ב. עם הירידה בטמפרטורה, ריכוז $NO_{(g)}$ במערכת גדל.

ג. התגובה ליצירת $NO_{(g)}$ היא תגובה בה $\Delta S°$ יקום גדול מאפס בטמפרטורות מסוימות.

ד. במהלך התגובה לפירוק $NO_{(g)}$ אנטרופיית הסביבה קטנה.

ה. $\Delta S°_{\text{מערכת}} = -185.9\ J/mol \cdot K$