



**משרד החינוך**  
המזכירות הפדגוגית



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



**הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל**  
המחלקה לחינוך למדע וטכנולוגיה

# אנרגיה בקצב הכימיה

פרק ה

**מדוע מתרחשות תגובות כימיות?**

ריכוז כתיבת הפרק:

**ד"ר מרים כרמי**

צוות הכתיבה:

**ד"ר מרים כרמי**

**ד"ר אדית וייסלברג**

ראש הפרויקט:

**פרופ' יהודית דורי**

יועץ מדעי:

**פרופ' אלי קולודני**

עריכת לשון:

**שלומית ברנע**

ברצוננו להודות:

♥ **לד"ר צביה קברמן ולעדינה שיינפלד** על קריאת מספר טיוטת של הפרק ומתן

הערות מועילות

♥ **למורות הניסוי: עדינה שיינפלד, ד"ר צביה קברמן, אמירה אלוש, ד"ר מרים כרמי**

על הוראת הפרק בכיתותיהן ומתן משוב לעיצוב הפרק

© כל הזכויות שמורות למשרד החינוך

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

מהדורה מעודכנת ומורחבת של הפרק, נובמבר 2013

"מעלות" הוצאת ספרים בע"מ, רח' קרליבך 29 תל-אביב. טל: 03-5614121

## תוכן העניינים

4	מבוא
4	ספונטניות של תגובה
10	אנטרופיה ומשמעותה
27	השינוי באנטרופיה של החומרים במהלך התרחשות תגובות כימיות
37	השינוי באנטרופיה של הסביבה במהלך התרחשות תגובות כימיות
42	השינוי הכולל באנטרופיה של היקום
48	סיכום
52	שאלות לסיכום הפרק

## 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 אטיות ויש תגובות מהירות. 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)?
- כיצד ייתכן ששתי תגובות הפוכות זו לזו מתרחשות בו זמנית?
- 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 ייתנו 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 מה הם הגורמים המקנים לתגובה יכולת להתרחש ונדון בהם.

נביא כמה 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 עשויות 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 ספונטנית/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, ולא 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- $0^{\circ}\text{C}$
  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 הפוכים לאלה הרשומים בסעיף א' ומיינו אותם לתהליכים ספונטניים וללא 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 שינוי הספונטני משתחררת אנרגיה אל הסביבה. הנכם מכירים תגובות ספונטניות רבות שהן תגובות אקסותרמיות. לדוגמה, תגובות שרפה 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 שאינן 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 האידיוי 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 של חומרים יונים קלי תמס, במים, הם אמנם אקסותרמיים (כגון המסת נתרן הידרוקסידי NaOH), אולם חלקם אנדותרמיים (כגון המסת ליתיום כלורי LiCl). כל תהליכי ההמסה במים של חומרים יונים מסיסים - הם ספונטניים.

**חומרים וציוד** (הכמויות הן להדגמה לפני הכיתה)

4 גרם ליתיום כלורי  $\text{LiCl}_{(s)}$

נייר לקמוס כחול, נייר קובלט כלורי כחול

2 כוסות כימיות בנפח 100 מ"ל

מבחנה קטנה באורך 10 ס"מ

מים מזוקקים

שני מדי טמפרטורה, מכשיר לבדיקת הולכה חשמלית, 3 ספטולות, מקל זכוכית הערה: אפשר לבצע ניסוי זה כניסוי ממוחשב – מד הטמפרטורה יוחלף בחייושן טמפרטורה, ומכשיר לבדיקת הולכה יוחלף בחייושן מוליכות. לחייושנים יתווסף אוגר נתונים דיגיטלי.

**מהלך הניסוי**

**חלק א**

- א. הכניסו 50 מ"ל מים לתוך כוס כימית.
- ב. מדדו טמפרטורה התחלתית של המים.
- ג. מדדו הולכה חשמלית של המים.
- ד. הוסיפו אל המים את הליתיום הכלורי  $\text{LiCl}_{(s)}$ .
- ה. הניחו את הכוס מבלי לערבב ומדדו את הטמפרטורה כל 2 דקות או השתמשו בחייושן טמפרטורה ובחייושן מד 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**

- א. הציגו את הנתונים בצורת גרף או הדפיסו את הגרפים המתקבלים בעקבות השימוש בחייושן.



## 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 וענו על השאלות הבאות.

<https://www.youtube.com/watch?v=wEb8x993kbE>

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

הידראט של באריום הידרוקסידי -  $\text{Ba(OH)}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}_{(s)}$

אמון חנקתי -  $\text{NH}_4\text{NO}_{3(s)}$ .

1. תארו את המערכת בסיום התגובה ברמה המאקרוסקופית על פי צפייתכם בסרט.
2. נסחו את התגובה שהתרחשה במהלך התגובה.
3. לשם מה התיזו מים על פני המשטח שעליו הונחה הכוס?
4. מהו סימנו של  $\Delta H$  לתגובה?
5. מדוע יש צורך לערבב את המוצקים?
6. האם התגובה היא ספונטנית?

**הערת בטיחות:** החומר באריום הידרוקסידי -  $\text{Ba(OH)}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}_{(s)}$  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 שצפיתם בו 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 על מנת 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 האנרגיה שלהם.

### לדעת יותר - על רמות אנרגיה של חלקיקים

כפי שלמדתם בלימודיכם הקודמים בכימיה, יש באטום רמות אנרגיה אלקטרוניות מסוימות ובדידות (לא רציפות) שהאלקטרונים יכולים להימצא בהן. באופן דומה, אופני צבירת האנרגיה במולקולה גם הם בדידים (מקוונטים). כאשר מדברים על אופני תנועה, מתכוונים לסוגי התנועה השונים האפשריים של המולקולה כולה: מעתק (טרנסלציה) וסיבוב (רוטציה), ושל האטומים במולקולה: תנודות (ויברציה). נמצא שכל אופן תנועה נפרד ניתן לתיאור באמצעות סולם של רמות אנרגיה בדידות ונפרדות. לכל מולקולה יש סולם של רמות אנרגיה טרנסלציוניות, סולם נפרד של רמות אנרגיה רוטציוניות וסולם נפרד של רמות אנרגיה ויברציוניות. ככל שהמולקולה נעה במהירות גבוהה יותר או שהסיבובים שהיא עושה מהירים או שתנודות האטומים בה מהירות יותר - כך יהיו לחלקיק רמות אנרגיה רבות יותר וגבוהות יותר.

האיורים ותמונות המודלים הנלווים מציגים בצורה חלקית (ומוגבלת) תיאור מיקרוסקופי אחד רגעי של כל מערכת. הייצוג של הרמה המיקרוסקופית (רמת 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 ראשונה אל קרח המוצא מהמקפיא, ניתך והופך לנוזל. נבחן שינוי זה בעזרת רמות ההבנה בכימיה אשר יתייחסו למצב ההתחלתי של קרח בלבד ואל המצב הסופי הכולל קרח ונוזל (מים).

קוביית קרח בצורת כוכב הוצאה מהמקפיא אל טמפרטורת החדר.

**המגיב - הקרח**



**התוצר - קרח ומים**



**תיאור המגיב - הקרח ברמה מאקרוסקופית (מצב התחלתי):**

הקרח הוא מוצק בצורת כוכב, צבעו לבן לא שקוף, מבריק, ולאחר נגיעה בו אפשר לחוש כי הוא קר למגע.

**תיאור התוצר - המים (נוזל) ברמה מאקרוסקופית (מצב סופי):**

לאחר כמה דקות מצטבר ליד הכוכב המוצק נוזל חסר צבע, שקוף וקר המתפשט לאטו על המשטח. (נשאר עוד קרח שלא השתנה).

**תיאור המגיב והתוצר ברמה מיקרוסקופית - מתייחס לקרח שעבר שינוי**

**תיאור הקרח ברמה מיקרוסקופית:**

מולקולות המים בקרח מצויות במרחק מתאים זו מזו, כך שבין המולקולות מתקיימים קשרי מימן. סביב כל מולקולת מים יש ארבעה שכנים קרובים, היוצרים קשרי מימן עם אטום החמצן המרכזי וגם עם אטומי המימן של המולקולה. למולקולות במצב זה קיימת אפשרות תנועה של תנודות בלבד.

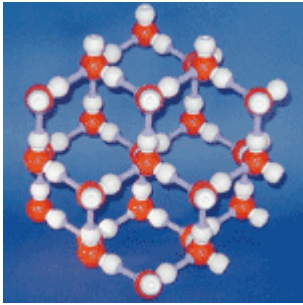
**תיאור הנוזל - המים ברמה מיקרוסקופית:**

בין מולקולות הנוזל קיימים כוחות - קשרי מימן - המחזיקים את צבר המולקולות במצב נוזלי. גם תנועת המולקולות כעת שונה. למולקולות יש יותר אפשרויות תנועה כיוון שנוסף על התנודות, הן יכולות להסתובב וגם לנוע מעט. (אנו רואים התפשטות של הנוזל על המשטח למקומות שלא היה בו קודם).

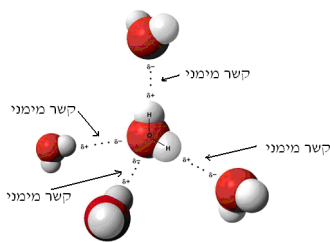
אפשר לייצג את המצב המיקרוסקופי בצורה מוגבלת באמצעות כמה איורים. איורים אלה מוגבלים כיוון שאינם יכולים לייצג את מגוון התנועות של המולקולות ואת האפשרויות הרבות של מיקומם במרחב.

## תיאור הקרח ברמת הסמל:

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

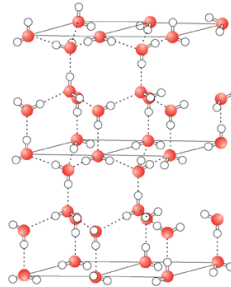


בתמונה של המודל אפשר לראות כי לכל כדור אדום (צבע כהה) יש חיבור לארבעה כדורים לבנים שכנים ומתקבל מארג תלת־ממדי של כדורים מחוברים. ליד כל כדור אדום (המייצג אטום חמצן) יש שני כדורים סמוכים לבנים: הם מייצגים את אטומי המימן המהווים את מולקולת המים, ואילו החיבורים האפורים מייצגים את קשרי המימן בין המולקולות כאשר מצב הצבירה של החומר הוא מוצק.

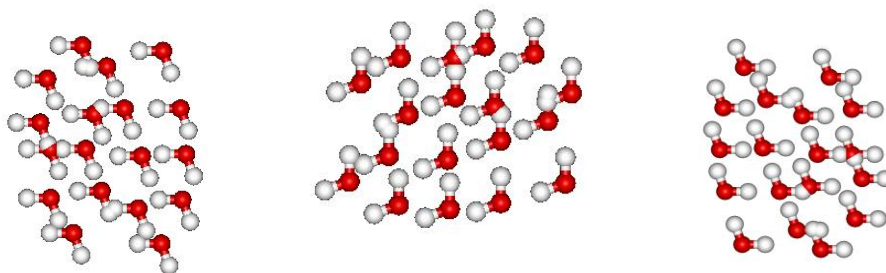


האיור מצד שמאל מציג מולקולות מים וביניהן, בקו מקווקו, את קשרי המימן בין המולקולות. אפשר לראות כי בין המולקולות מתקיימים קשרי מימן: מסביב לכל מולקולת מים יש ארבע מולקולות שכנות, הממסודרות במבנה מרחבי של טטראדר.

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



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 תנועה; למולקולת המים יש כמה אפשרויות כאלה, ולכן למעשה התיאור המיקרוסקופי, המיוצג באיורים השונים, הוא רגעי ומוגבל ביותר. להלן שלושה איורים הממחישים שלוש אפשרויות רגעיות של היערכות המולקולות במצב נוזל (שלוש מתוך רבות הקיימות).



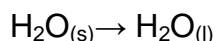
זכרו: הכימאי נוהג לייצג מולקולות במגוון שיטות: בנוסחאות, באיורים, בבניית מבנים מרחביים, באמצעות מודלים מוחשיים או ממוחשבים.

### סיכום

#### ההיתוך ברמת התהליך - הסבר מילולי בשילוב רמה מאקרוסקופית

לאחר זמן אפשר לראות כי צורת הכוכב העשוי קרח משתנה: קודקודי הכוכב אינם חדים כפי שהיו, נפחו של הכוכב קטן, וסביב המוצק מצטבר נוזל שקוף, המתפשט על פני המשטח שעליו מונח הקרח.

#### ההיתוך ברמת התהליך, בשילוב רמת הסמל



#### ההיתוך ברמת התהליך, בשילוב רמה מיקרוסקופית

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 גדלה. 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). הסתכלות זו על התופעה מהווה רמת הבנה חדשה הנקראת **רמת התהליך**. ברמת התהליך, מושם דגש במהות השינוי שעובר/ים החומר/ים. אנימציות על היתוך מים:

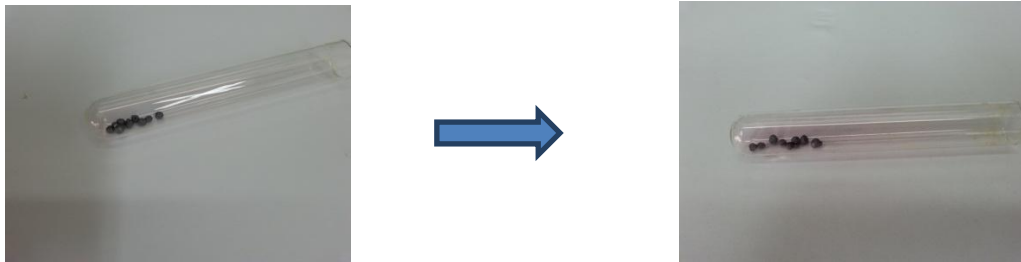
<http://www.youtube.com/watch?v=NTs7hx4ycNs>

[http://www.youtube.com/watch?v=6s0b\\_keOiOU](http://www.youtube.com/watch?v=6s0b_keOiOU)

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

## דוגמה ב - המראת יוד

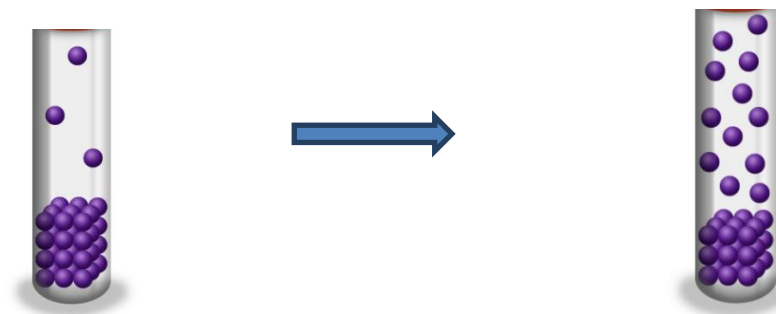
מבחנה ובה יוד, הנמצאת בטמפרטורת החדר, הוכנסה לכלי מים חמים לפרק זמן קצר, והוצאה ממנו. (הניסוי נערך במנדף). גם הפעם נבחן את התהליך המתרחש במבחנה על פי זמן ההתרחשות, כלומר נשווה בין המצב ההתחלתי למצב הסופי. תיאור המערכת **ברמה מאקרוסקופית** - המערכת במצב התחלתי מכילה יוד מוצק בצורת גבישים מבריקים בצבע סגול כהה ומעט גז בצבע סגלגל, כפי שמופיע בתמונה הבאה. לאחר חימום קצר של המבחנה במים חמים אפשר להבחין בהתכהות חלק מהמבחנה.



יוד בטמפרטורת החדר

יוד בטמפרטורה גבוהה מטמפרטורת החדר

**תיאור המערכת ברמה מיקרוסקופית** - מצב המוצק מתאפיין במספר רב מאוד של אפשרויות לתיאור מיקרוסקופי, הכוללות תיאור של מולקולות דו-אטומיות של יוד, קרובות, בהיערכות סדירה, ולכל מולקולה אופני תנועה של תנועה בלבד. בין המולקולות מתקיימות אינטראקציות מסוג ואן דר ואלס. מולקולות הגז המפוזרות בכלי הן בעלות אופני תנועה רבים יותר (תנועה, סיבוב ומעתק) ואפשרויות רבות של פיזור בכלי. המרחקים בין המולקולות גדולים. האיור המוצג (מצד ימין) מייצג אפשרות אחת מבין האפשרויות הרבות של תיאור מצב המוצק ומצב הגז.



● כל כדור סגול מסמל מולקולה אחת של יוד<sub>2</sub>. הצבע הסגול הוא להמחשה בלבד. מולקולות בודדות אינן סגולות!

## סיכום השינוי במבחנת היוד

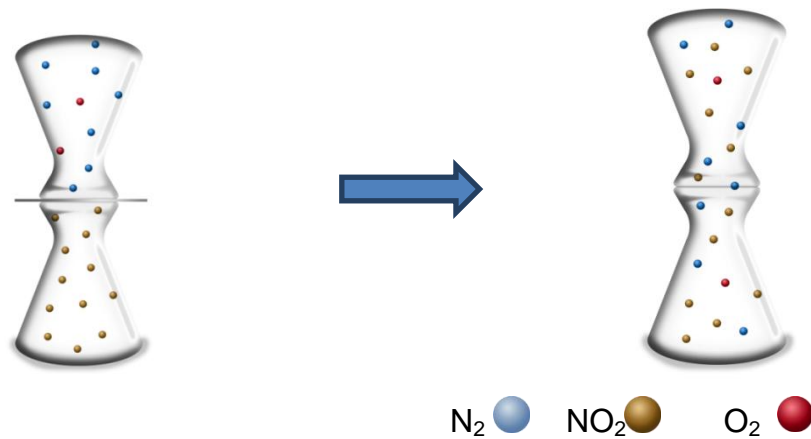
נוכל להציג את ניסוח התהליך שהתרחש ברמת הסמל:  $I_{2(s)} \rightarrow I_{2(g)}$

אולם, כפי שבחנו את התגובה בדוגמה א, יש להתייחס גם עכשיו להיבטי אנרגיה. לאחר שהמבחנה הוכנסה לכלי מים חמים גדלה האנרגיה הפנימית של המערכת כיוון שאנרגיה בצורת חום הועברה מהסביבה בעלת הטמפרטורה הגבוהה יותר (המים) אל המבחנה של היוד וגרמה לכך שמולקולות נוספות של יוד עזבו את המצב המוצק. מולקולות אלו עברו למצב צבירה גזי (המראה) בגלל ניתוק קשרים בין מולקולאריים, מסוג אינטראקציות ון דר ולס 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 בפזה הגזית. כך גדל בהרבה מספר האפשרויות שבהן חלקיקים אלה יכולים להימצא במרחב. כלומר כאשר היוד משנה את מצב הצבירה שלו ממוצק לגז, עולה מספר המצבים לתיאור המערכת מבחינה מיקרוסקופית ואפשר להבחין בתופעה של פיזור אנרגיה ופיזור חלקיקים בכלי.

## דוגמה ג – ערבוב גזים

נבחן כעת דוגמה של תהליך ספונטני שאינו תגובה כימית. במצב ההתחלתי, המתואר בתמונה תחתונה מימין, יש שני גזים שונים. בכלי אחד מצוי גז בצבע חום  $NO_{2(g)}$ , ואילו בכלי שני מצוי כלי המלא באוויר. בין שני הכלים יש מחיצה ורודה. במצב סופי הורדה המחיצה בין הכלים, ושני 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 הוצאת 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).

### תיאור השינוי במערכת ברמת התהליך:

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

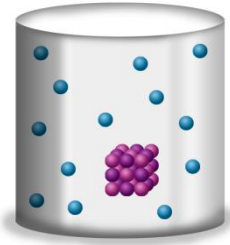
מה השתנה תוך כדי התפשטות הגז? היות שלא נמצא כי חל שינוי בטמפרטורת הסביבה, אפשר לקבוע כי האנרגיה הפנימית של הגזים לא השתנתה, אולם השתנה פיזור המולקולות במערכת. פיזור המולקולות בין שני הכלים גרם שכעת לכל מולקולה יש אפשרויות רבות יותר למיקום בתוך הכלים. כלומר לאחר ערבוב הגזים יש יותר מצבים מיקרוסקופיים המתארים את מיקומם של החלקיקים בכלים המחוברים מאשר היו לפני ערבובם.

### דוגמה ד – המסת חומר יוני במים

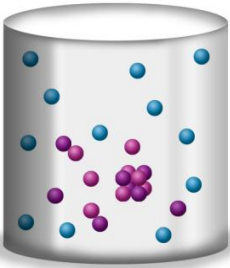
נכניס למים, הנמצאים בטמפרטורת החדר, כמה גרגירים של החומר אשלגן על מנגנתי  $KMnO_{4(s)}$ . אשלגן על מנגנתי  $KMnO_{4(s)}$  הוא חומר יוני, שמסיסותו במים גבוהה. ממדידת השינוי שחל בטמפרטורת הסביבה (המים) מסיקים כי התגובה היא אנדותרמית.



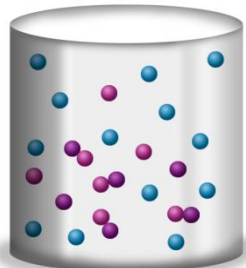
התמונות הבאות מציגות את התרחשות התגובה מבחינה מאקרוסקופית. כל אחד מהאיורים בצד השמאלי של העמוד מייצג תיאור מיקרוסקופי אחד בלבד (חלקי, ללא תנועה!) מבין סך כל המצבים המיקרוסקופיים האפשריים הרבים של המערכת.



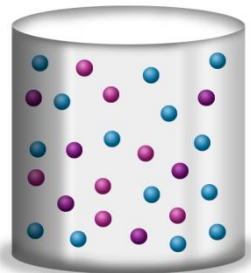
שעת צילום 08.20



שעת צילום 08.25



שעת צילום 08.30



שעת צילום 09.50



 יונים במוצק ובתמיסה
  H<sub>2</sub>O

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

## פסק זמן לחשיבה

נבחן את תהליך ההמסה של אשלגן על מנגנתי בעזרת רמות ההבנה.

א. רשמו תיאור מאקרוסקופי של החומר לפני ההמסה ואחריה.

ב. רשמו תיאור מיקרוסקופי של החומר לפני ההמסה ואחריה.

ג. נסחו את תגובת ההמסה (רמת הסמל).

בחינת תגובת ההמסה ברמת התהליך:

**1) 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 תנועה 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 מצבים מיקרוסקופיים רבים. לאחר ההמסה יש במערכת פיזור אנרגיה, ולכן גם פיזור חלקיקים גדול יותר מאשר היה לפני ההמסה.

מספר התיאורים האפשריים של המערכת (המים והחומר היוני) לאחר ההמסה, גדול בהרבה ממספר התיאורים המיקרוסקופיים שהיו לחומרים (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 שמספר 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,  $en\ trope$  – 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 הספונטאניות/השינויים הספונטניים הללו: היתוך קרח, המרת יוד, ערבוב גזים והמסת חומר יוני במים.

### אנטרופיה - היבטים כמותיים

לאחר הבנת המשמעות של אנטרופיה, נרצה לדעת מהו השינוי בתכונה שלמדנו עליה עתה. כלומר מהו השינוי באנטרופיה הנלווה לתגובה כימית. השינוי באנטרופיה נובע משינוי במספר המצבים המיקרוסקופיים האפשריים במערכת בסיימה של תגובה לעומת תחילתה. אך ראשית נחשוב: 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 והחומר 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  $-273^{\circ}\text{C}$ . 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:

$$\text{טמפרטורה בסולם צלזיוס } = \text{טמפרטורה בסולם קלווין } - 273 \text{ } ^\circ\text{C}$$

לדוגמה:  $25^\circ\text{C}$  הן  $298\text{K}$  (טמפרטורת החדר)  
באופן כללי נכתוב:  $T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273$

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) מקבלים אנרגיה המאפשרת יותר אופני תנועה, פיזור גדול יותר של חלקיקים, יותר מצבים מיקרוסקופיים, ולכן ערכה של האנטרופיה עולה.

העלייה באנטרופיה תלויה בשני גורמים:

- **כמות האנרגיה (Q) בצורת חום אשר מועברת לחומר.** ככל שהועברה כמות אנרגיה רבה יותר, השינוי באנטרופיה גדול יותר (יחס ישר).
  - **טמפרטורה.** ככל שהחומר נמצא בטמפרטורה גבוהה יותר, שכבר יש בה ריבוי של מצבים מיקרוסקופיים אפשריים, תוספת האנרגיה גורמת לשינוי קטן יותר באנטרופיה (יחס הפוך).
- מבחינה מתמטית הדבר בא לידי ביטוי בנוסחה (2). הטמפרטורה בנוסחה זו תוצב על פי סולם קלווין.
- הדבר בא לידי ביטוי בנוסחה (1) <sup>1</sup>

$$(1) \quad \Delta S = \frac{Q_{rev}}{T}$$

אנטרופיה עולה אין פירושה כי מדגם החלקיקים נמצא בכל אחד מהמצבים המיקרוסקופיים האפשריים. בכל רגע ורגע החלקיקים נמצאים באחד מהמצבים, אולם מספר האפשרויות שבהן הם יכולים להימצא, -גדל.

<sup>1</sup> הסימון rev מתייחס למעבר אנרגיה מזערי שאינו משנה את הטמפרטורה. (תהליך הפיך - reversible)

אנלוגיה: בפאזל יש 500 חלקים. קיים סידור אחד בלבד שבו כל החלקים של הפאזל מסודרים ומתקבלת התמונה השלמה. זוהי אנלוגיה למצב של גביש מושלם של חומר במצב מוצק באפס המוחלט, שבו לחלקיקים יש רק אפשרות אחת להיות בה.

ניעור קופסת הפאזל מעניק לחלקים אנרגיה, והם יכולים לנוע. כך משתנה סידור החלקים בקופסה, ועולה מספר האפשרויות של מיקומם בתוך הקופסה. ככל שנעיר יותר את הקופסה, יש סיכוי כי יותר חלקים מהפאזל ינועו ממקומם ויכלו להיות בכל מקום אפשרי בקופסה. למרות האפשרויות הרבות בכל רגע ורגע של מצב חלקי הפאזל, יש מצב אחד המתאר את הפאזל הנמצא בערבוביה.

חלקיקי החומר המקבלים אנרגיה יכולים להימצא במצבים מיקרוסקופיים רבים יותר ככל שאנרגיה זו גדולה יותר, ועם זאת, בכל רגע ורגע הם נמצאים באחד מהמצבים האפשריים. ככל שמספר המצבים האפשריים גדול יותר, האנטרופיה של החומר גדולה יותר.

להלן אנלוגיה העשויה לחדד את משמעות הנוסחה (2)

- התעטשות ברחוב והתעטשות בספרייה - השינוי ברעש, הנגרם על ידי התעטשות בספרייה - מקום שקט בדרך כלל - הוא הרבה יותר גדול מאשר השינוי ברעש שגורמת התעטשות ברחוב - מקום סואן ורועש מטבעו.

דרכים מתמטיות מורכבות, שלא יתוארו כאן, מאפשרות את חישובה של האנטרופיה עבור חומרים שונים בטמפרטורות שונות.

על מנת להשוות בין ערכי אנטרופיה של חומרים שונים יש להשוות בין מספר שווה של חלקיקים הנמצאים באותה טמפרטורה, ולכן הוגדר המושג **אנטרופיה מולרית תקנית** -  $S^0$ . (להזכירכם, למדתם גם על שינוי אנתלפיה **תקני** בפרק ב.)

אנטרופיה מולרית תקנית, המסומנת  $S^0$ , היא ערך האנטרופיה של 1 מול חומר בתנאים תקינים בלחץ 1 אטמוספירה. אף על פי שאנטרופיה תקנית מתייחסת לטמפרטורות שונות בדרך כלל, מתייחסים לטמפרטורה של 298K.

יחידות השינוי באנטרופיה המולרית התקנית הן ג'אול למעלות קלווין  $K \left( \frac{J}{K} \right)$ . יחידות אלו

נובעות מנוסחה (2) לעיל. האות Q מסמלת את אנרגיית החום שהועברה לחומר ביחידות של ג'אול (J) והטמפרטורה T נמדדת במעלות קלווין K.

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

### **לדעת יותר על פיזור אנרגיה**

ככל שטמפרטורה של גז עולה, לא רק מספר אופני התנועה עולה, אלא גם הצפיפות של רמות האנרגיה (מעתיק, סיבוב ותנודה) של החלקיקים גדלה, יש יותר רמות קרובות זו לזו, ולכן מספר המצבים היכולים לתאר את החלקיקים ברמות האלה גדל בהרבה.

בטבלה הבאה (1) מוצגים ערכי אנטרופיה תקנית מולרית (אנטרופיה של 1 מול חומר בתנאים תקינים) של מספר חומרים. כל הנתונים מתייחסים לטמפרטורה של 298K.

שם החומר	אנטרופיה מולרית	שם החומר	אנטרופיה מולרית	שם החומר	אנטרופיה מולרית
נוסחה מוצקים	$S^0$	נוסחה נוזלים	$S^0$	נוסחה גזים	$S^0$
בטמפרטורת החדר	$\frac{J}{K \times mol}$	בטמפרטורת החדר	$\frac{J}{K \times mol}$	בטמפרטורת החדר	$\frac{J}{K \times mol}$
סידן חמצני CaO	39.8	פחמן גפרי CS <sub>2</sub>	151	אמוניה NH <sub>3</sub>	192.4
סידן פחמתי, CaCO <sub>3</sub>	92.9	חומצה גפרתית H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	156.9	פחמן דו-חמצני CO <sub>2</sub>	213.7
יהלום, C	2.4	מים H <sub>2</sub> O	69.9	מימן H <sub>2</sub>	130.7
גרפיט, C	5.7	מימן על חמצני H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	109.6	חנקן N <sub>2</sub>	191.6
עופרת, Pb	64.8	מתאנול CH <sub>3</sub> OH	127.2	חמצן O <sub>2</sub>	205.1
גפרית S <sub>8</sub> (רומבית)	256.0	אתאנול C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	161.2	חנקן חד-חמצני NO	210.5
גלוקוז C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	212.1	יוד כלורי ICl	247.3	אתאן C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	229.5
עופרת כלורית PbCl <sub>2</sub>	136.0	הידראזין N <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	121.2	אצטילן C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	203.2
עופרת ברומית PbBr <sub>2</sub>	161.5	פחמן 4 כלורי CCl <sub>4</sub>	214.2	פרופאן C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	269.9
נחושת כלורית CuCl <sub>2</sub>	113.8	צורן 4 כלורי SiCl <sub>4</sub>	239.5	מים H <sub>2</sub> O	188.7

הנתונים לקוחים מתוך "ספר הנתונים" בעריכת איטה כהן וכן מתוך General Chemistry .PETRUCCI

## שאלות

1. הסתכלו בנתוני אנטרופיה מולרית תקנית בטבלה, וציינו מה הם שני החומרים בעלי האנטרופיה הנמוכה ביותר. הציעו הסבר לערכים הנמוכים של האנטרופיה.
2. לאיזה מהחומרים הרשומים בטבלה יש את ערך האנטרופיה המולרית הגדול ביותר? הציעו הסבר לעובדה זו.

### גורמים המשפיעים על האנטרופיה המולרית התקנית של חומרים

כפי שאפשר לראות מהטבלה הנ"ל, לחומרים שונים יש אנטרופיה תקנית ( $S^0$ ) שונה. ננסה להבין מה הם הגורמים העיקריים המשפיעים על האנטרופיה.

#### מצב הצבירה של החומר

לחומר במצב צבירה גזי בטמפ' החדר יש אנטרופיה גבוהה יותר מאשר לחומר דומה מבחינת מסה מולרית, שהוא נוזל או מוצק. הסיבה לכך היא ריבוי אופני תנועה של חלקיקי החומר (תנועה, סיבוב ומעתק) במצב הגזי, המאפשרים מספר רב יותר של מצבים מיקרוסקופיים של החומר לעומת המוצק והנוזל. כלומר במצב גזי יש יותר אפשרויות לפיזור אנרגיה מאשר במוצק ובנוזל, וכן אפשרויות רבות יותר להיערכות החלקיקים במרחב ולפיזור במיקומם, ולכן ערך האנטרופיה גבוה יותר. לחומרים נוזליים בטמפ' החדר יש אנטרופיה גבוהה יותר מאשר לחומרים מוצקים בעלי מסה מולרית דומה, כיוון שלחלקיקי החומר במצב נוזל יש יותר חופש תנועה ויש אפשרות למצבים מיקרוסקופיים רבים יותר לתיאורם, מאשר לחלקיקים במצב מוצק.

$$S_{\text{מוצק}}^0 < S_{\text{נוזל}}^0 < S_{\text{גז}}^0 \quad \text{לסיכום:}$$

#### דוגמה:

נשווה את האנטרופיה המולרית התקנית של מים  $H_2O$  בטמפרטורת החדר שערכה,

$$(69.9) \frac{J}{K \times mol}$$

אפשר לראות על פי הנתונים בטבלה לעיל כי ערכי האנטרופיה המולרית של כל הגזים (גם אלה עם מסה מולרית נמוכה משל המים) גבוהים יותר מהאנטרופיה התקנית של המים, ואילו האנטרופיה של המים גבוהה מהאנטרופיה של רוב החומרים המוצקים. השוואה בין האנטרופיה של מוצקים או נוזלים: ככל שהקשרים בין החלקיקים בחומר חזקים יותר, האנטרופיה נמוכה יותר.



## מספר מול חומר

בהשוואת חומרים גזיים שונים, ישפיע מספר המולים של הגז על האנטרופיה של החומר. ככל שמספר מול גז גדול יותר, גדולה יותר גם האנטרופיה של החומר.

## מורכבות המולקולות

מורכבות מולקולות – ככל שהחומר מכיל מולקולות מורכבות יותר - המכילות יותר אטומים -האנטרופיה המולרית של החומר גדולה יותר. הסיבה היא שבמולקולות מורכבות ייתכנו אופני תנועה רבים יותר מכיוון שיש יותר אפשרויות תנודה וסיבוב סביב הקשרים. (לדוגמה, במולקולת מים המכילה 3 אטומים וצורתה מישורית וכפופה ייתכנו פחות סוגים של תנודות לעומת מולקולת אמוניה שצורתה פירמידה המכילה 4 אטומים שבה ייתכנו יותר סוגים של תנודות כיוון שיש יותר אטומים הקשורים זה לזה.)

## מסה מולרית

נמצא כי מסה מולרית של חומר היא גורם המשפיע על האנטרופיה של החומרים. ככל שמסה מולרית גדולה יותר בחומרים המצויים באותו מצב צבירה, ערך האנטרופיה של החומר גדלה כיוון שפיזור האנרגיה בחומר עולה. ההסבר המדויק למגמה זו הוא מעל לרמה הנדרשת ביחידה זו, ולכן לא יוצג כאן.

## השוואת חומרים גזיים מבחינת מורכבות המולקולות והמסה המולרית שלהן

לפחמן דו-חמצני  $\text{CO}_2(\text{g})$  ולפרופאן  $\text{C}_3\text{H}_8(\text{g})$  יש מסה מולרית זהה (44 גרם למול). אך למולקולת פרופאן מורכבות גדולה יותר, כיוון שמספר האטומים רב יותר, ולכן האנטרופיה המולרית שלו גדולה יותר. הסיבה: יותר אפשרויות לתנודה של הקשרים ולסיבוב של המולקולות. ככל שיש יותר אטומים במולקולה, יש יותר סוגים של תנודות ויותר אפשרויות של סיבוב.

למימן  $\text{H}_2(\text{g})$  ולחנקן  $\text{N}_2(\text{g})$  אותה מורכבות (2 אטומים במולקולה). המסה המולרית של חנקן גבוהה יותר (לחנקן מסה מולרית של 28 גרם למול לעומת מסה מולרית של מימן - 2 גרם למול), לכן האנטרופיה של חנקן גזי גבוהה יותר כיוון שפיזור האנרגיה עולה.

מכאן אפשר להסיק כי:

- א. אם לחומרים גזיים שונים יש מסה מולרית כמעט זהה, הרי לחומר שהמולקולות שלו מורכבות יותר - תהיה אנטרופיה גבוהה יותר.
- ב. אם לחומרים גזיים שונים יש מולקולות בעלות אותה מורכבות, לחומר בעל המסה המולרית הגדולה יותר - תהיה אנטרופיה גבוהה יותר.

## אנטרופיה - שאלות

- א. הסבירו בקצרה את המושג **אנטרופיה של חומרים**.
- ב. השוו בין ערכי האנטרופיה המולרית התקנית של שני החומרים הנתונים בכל אחד מהזוגות המופיעים בטבלה, והסבירו את ההבדל במידת האפשר.

$S^0$ $\frac{J}{K \times mol}$ ב-298K	החומרים	
126.0	He(g)	זוג 1
130.0	H <sub>2</sub> (g)	
213.6	CO <sub>2</sub> (g)	זוג 2
248.5	SO <sub>2</sub> (g)	
219.5	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (g)	זוג 3
186.2	CH <sub>4</sub> (g)	
269.9	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (g)	זוג 4
127.2	CH <sub>3</sub> OH(l)	

- ג. בטבלה הבאה נתונים ערכי אנטרופיה מולרית תקנית  $S^0$

$$\left( \frac{J}{K \times mol} \right) \text{ של תרכובות גזיות (בטמפרטורה 298K)}$$

על פי מסה מולרית ומורכבות

מסה מולרית 118-99 גרם/מול		מסה מולרית 80-71 גרם/מול		מסה מולרית 20-16 גרם/מול	
240	BrCl	223	Cl <sub>2</sub>	174	HF
273	NOBr	238	CS <sub>2</sub>	189	H <sub>2</sub> O
281	COCl <sub>2</sub>	256	SO <sub>3</sub>	193	NH <sub>3</sub>
296	CHCl <sub>3</sub>	271	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	186	CH <sub>4</sub>

- בחנו את הנתונים לאורך כל אחד מהטורים בטבלה. מה הן המגמות המסתמנות לאורך כל אחד מהטורים?
- בחנו את הנתונים לאורך כל אחת מהשורות בטבלה. מה משותף לנתונים בכל שורה בטבלה?
- מה הן שתי המגמות המשתנות לאורך כל אחת מהשורות?
- אילו מסקנות תוכלו להסיק מהנתונים בטבלה?

## השינוי באנטרופיה של החומרים במהלך התרחשות תגובות כימיות

בשלב ראשון ננסה להעריך את סימנו של השינוי באנטרופיה של המערכת (התגובה), כלומר לקבוע אם הוא שלילי או חיובי, על פי הגורמים העיקריים המשפיעים על האנטרופיה של חומרים. כפי שלמדנו.

הערכת השינוי תיעשה באמצעות השוואת האנטרופיה של המגיבים לאנטרופיה של התוצרים.

בתהליכים הרשומים בהמשך, השינוי באנטרופיה של תגובה גדול מאפס,  $\Delta S^0_{\text{מערכת}} > 0$ .

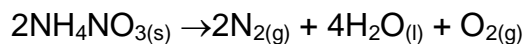
- **בתהליכי היתוך של חומרים מוצקים טהורים** - כי נוצרים חומרים במצב צבירה נוזל.
- **בתהליכי אידיוי או המראה** כי נוצרים חומרים במצב צבירה גז.
- **בחלק מתהליכי ההמסה של חומרים מוצקים** כי מתקבלות תמיסות נוזליות.
- בתגובה כימית שבה **מספר המולים של חומרים** במצב גזי גדול יותר בתוצרים לעומת מספר המולים של חומרים במצב גזי במגיבים.
- ביצירת **תערובת חומרים**.

בכל המקרים הנ"ל **עולה** מספר המצבים המיקרוסקופיים שאפשר לתאר בהם את המערכת, ולכן במקרים אלה הייתה 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. לכן,  $\Delta S^0_{\text{מערכת}} > 0$ .

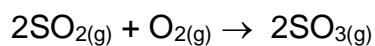
## שאלה עם פתרון

העריכו את סימנו של השינוי באנטרופיה של המערכת במקרים הבאים.  
(רשמו אם מערכת  $\Delta S$  גדול או קטן מאפס). אם השינוי באנטרופיה של המערכת אינו ניתן להערכה, נמקו מדוע.

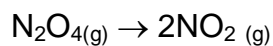
א. פירוק התרכובת אמוניום חנקתי  $\text{NH}_4\text{NO}_3(\text{s})$  (חומר נפץ) :



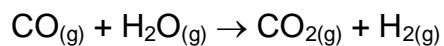
ב. הפיכת גפרית דו־חמצנית לגפרית תלת־חמצנית (זהו שלב חשוב בייצור חומצה גפרתית בתעשייה הכימית).



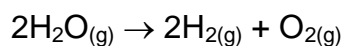
ג. שינוי מגיב גזי לתוצר גזי



ד. אחד השלבים בשריפת פחם



ה. פירוק מים ליסודות



ו. פירוק גיר



תשובה

התגובה	שינוי האנטרופיה במערכת והסבר לקביעה
א	<p>האנטרופיה של התוצרים גדולה מהאנטרופיה של המגיבים. <math>\Delta S_{\text{מערכת}} &gt; 0</math></p> <p>פירוק המוצק גרם ליצירת שלושה מול גז בתוצרים וכן לחומר במצב צבירה נוזלי. למולקולות התוצרים יש אפשרויות רבות 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.</p>
ג	<p>האנטרופיה של התוצרים גדולה מהאנטרופיה של המגיבים. <math>\Delta S_{\text{מערכת}} &gt; 0</math></p> <p>בגלל המקדם 2 אנו מבינים כי נוצרים 2 מול מולקולות תוצרים מ-1 מול מגיבים, ולכן מספר המצבים המיקרוסקופיים האפשריים גדל בהרבה, והאנטרופיה של התוצרים גדולה משל המגיבים. (זאת, אף על פי שהאנטרופיה המולרית של התוצרים (<math>\text{NO}_2(\text{g})</math>) נמוכה מאשר האנטרופיה המולרית של המגיבים (<math>\text{N}_2\text{O}_4(\text{g})</math>). הסיבה היא ששני החומרים הם במצב צבירה גזי ומולקולות התוצרים הן בעלות מסה מולרית נמוכה יותר ופחות מורכבות (3 אטומים בכל מולקולה של תוצר, לעומת 6 אטומים בכל מולקולת מגיב. לכן מספר אופני התנועה בהן קטן יותר.)</p>
ד	<p>במקרה זה אי אפשר להעריך אם השינוי באנטרופיה של המערכת גדול מאפס או קטן ממנו.</p> <p>גם במגיבים וגם בתוצרים יש תערובת חומרים, המכילה 2 מול גזים. (מולקולות התוצרים שונות ממולקולות המגיבים אך הן בעלות מספר אטומים זהה – יש להן אותה מורכבות). בחינת מסה מולרית של החומרים אינה מצביעה על הבדל בין מגיבים או תוצרים. לכן, אנו יכולים להעריך שהשינוי באנטרופיה יהיה <b>קטן</b>, אולם ללא נתונים כמותיים מדויקים, <b>לא נוכל להעריך את סימנו.</b></p>
ה	<p>האנטרופיה של התוצרים גדולה מהאנטרופיה של המגיבים <math>\Delta S_{\text{מערכת}} &gt; 0</math></p> <p>כל החומרים הם במצב צבירה גזי. העובדה שמשני מול מולקולות גזיות מתקבלים שלושה מול מולקולות, גורמת להגדלת פיזור האנרגיה והחלקיקים של התוצרים, ולכן <math>\Delta S_{\text{מערכת}} &gt; 0</math>. (אף על פי שמורכבות התוצרים נמוכה מזו של המגיבים, וכן נמוכה יותר המסה המולרית שלהם - גורמים האחראים להורדת האנטרופיה.)</p>
ו	<p>האנטרופיה של התוצרים גדולה מהאנטרופיה של המגיבים. <math>\Delta S_{\text{מערכת}} &gt; 0</math></p> <p>הסיבה היא קבלת תוצר גזי (<math>\text{CO}_2(\text{g})</math>) שיש לו יותר אופני תנועה, ופיזור אנרגיה גדול יותר, ולכן האנטרופיה המולרית גבוהה יותר יחסית לחומרים המוצקים במגיבים ובתוצרים.</p>

## 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. 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.

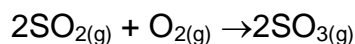
הדבר בא לידי ביטוי בנוסחה (2):

$$(2) \quad \Delta S^0_{\text{מערכת}} = \sum n S^0_{\text{תוצרים}} - \sum n S^0_{\text{מגיבים}}$$

$\Sigma =$  סכום  $n =$  מספר המולים של החומר על פי האיזון הנתון

## שאלות עם פתרון

1. חשבו את השינוי באנטרופיה של התגובה הבאה ליצירת גפרית תלת-חמצנית.



היעזרו בטבלה הבאה המציגה נתונים של ערכי אנטרופיה מולרית תקנית של המגיבים ושל התוצרים:

החומר	אנטרופיה מולרית תקנית $S^0$ $\frac{J}{K \times mol}$
$\text{SO}_{2(g)}$	248.5
$\text{O}_{2(g)}$	205.0
$\text{SO}_{3(g)}$	256.1

ניעזר בנוסחה 2:

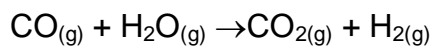
$$\Delta S^0_{\text{מערכת}} = \sum n S^0_{\text{תוצרים}} - \sum n S^0_{\text{מגיבים}}$$

$$\Delta S^0_{\text{מערכת}} = 2 \times S^0_{\text{SO}_{3(g)}} - (S^0_{\text{O}_{2(g)}} + 2 \times S^0_{\text{SO}_{2(g)}})$$

$$2 \text{ mol} \times 256.1 \text{ J/molK} - (2 \text{ mol} \times 248.5 \text{ J/molK} + 1 \text{ mol} \times 205.0 \text{ J/molK}) = -189.8 \text{ J/K}$$

תוצאה זו מראה כי יש ירידה באנטרופיה של התגובה, כפי שהערכנו בשאלה קודמת, בסעיף ב.

2. קבעו את שינוי האנטרופיה של התגובה.



החומר	אנטרופיה מולרית תקנית $\frac{J}{K \times mol}$
$\text{CO}_{2(g)}$	213.6
$\text{H}_2(g)$	130.6
$\text{CO}_{(g)}$	197.9
$\text{H}_2\text{O}_{(g)}$	188.7

$$\Delta S^0_{\text{מערכת}} = \sum n S^0_{\text{תוצרים}} - \sum n S^0_{\text{מגיבים}}$$

$$\Delta S^0_{\text{מערכת}} = 213.6 + 130.6 - (197.9 + 188.7) = -42.4 \text{ J/K}$$

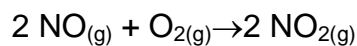
אנו רואים כי בעזרת חישוב המבוסס על נתוני האנטרופיה המולרית אפשר לקבוע הן את סימנו והן את ערכו של  $\Delta S^0_{\text{מערכת}}$ . בתגובה זו הערכנו כי השינוי יהיה קטן, אולם לא יכולנו להעריך את סימנו (סעיף ד בשאלה קודמת).

## שאלות

להלן ערכי אנטרופיה מולרית עבור מספר חומרים הקשורים לשאלות הבאות.

החומר	אנטרופיה מולרית $S^0$ $\frac{J}{K \times mol}$
NO(g)	210.5
NO <sub>2</sub> (g)	240.0
O <sub>2</sub> (g)	205.0
N <sub>2</sub> (g)	191.4
NH <sub>3</sub> (g)	192.5
H <sub>2</sub> (g)	130.0

1. נתונה התגובה הבאה:



- א. העריכו: האם שינוי האנטרופיה בתגובה זו הוא גדול מאפס או קטן ממנו? נמקו.
- ב. חשבו מהו שינוי האנטרופיה התקני במהלך התגובה בהתבסס על נתוני האנטרופיה המולרית התקנית של החומרים. פרטו את חישוביכם.

2.

- א. נסחו את התגובה לקבלת אמוניה גזית NH<sub>3(g)</sub> 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<sub>2</sub>O<sub>3(g)</sub> מתפרק לגזים חנקן חד-חמצני NO<sub>(g)</sub> וחנקן דו-חמצני NO<sub>2(g)</sub>. במהלך התגובה חלה עלייה באנטרופיה, השווה ל-138.5 J/K.



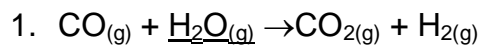
א. נסחו ואזנו את התגובה שהתרחשה.

ב. חשבו את האנטרופיה המולרית של  $N_2O_3(g)$ . פרטו את חישוביכם.

4. התייחסו לנתונים בשאלה 1. חשבו מהו השינוי באנטרופיה של המערכת עבור התגובה הפוכה לתגובה המנוסחת בשאלה.

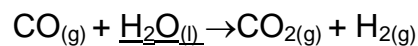
5. האם מושפע ערכו של השינוי באנטרופיה כאשר מאזנים אותה תגובה באופן שונה? אם כן, כיצד? נמקו.

6. נתונה תגובה (1)



השינוי באנטרופיה של המערכת לתגובה זו הוא:  $-42.7 \text{ J/K}$

נתונה תגובה (2)



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 הפוכה לה? נמקו תשובתכם.

## שינוי אנטרופיה במהלך היתוך ואידוי של חומרים

כאשר מתקיים שיווי המשקל בין שני מצבי צבירה, מעברי האנרגיה בצורת חום יכולים להיעשות בצורה הפיכה, ולכן אפשר להשתמש בנוסחה 1 כדי לחשב את שינוי האנטרופיה. כאשר מתרחש תהליך היתוך, האנרגיה המועברת למערכת היא אנתלפיית ההיתוך  $\Delta H_{\text{היתוך}}^0$  והטמפרטורה שבה מתרחש השינוי היא טמפרטורת ההיתוך של החומר  $T_{\text{היתוך}}$ . לפיכך מתקבלת נוסחה (3):

$$(3) \quad \Delta S_{\text{היתוך}}^0 = \frac{\Delta H_{\text{היתוך}}^0}{T_{\text{היתוך}}}$$

כאשר השינוי המתרחש במערכת הוא תהליך רתיחה, האנרגיה המועברת שווה לאנתלפיית הרתיחה (או אידוי)  $\Delta H_{\text{אידוי}}^0$  והטמפרטורה שבה מתקיים השינוי שווה לטמפרטורת הרתיחה של החומר  $T_{\text{אידוי}}$ . לפיכך מתקבלת נוסחה (4):

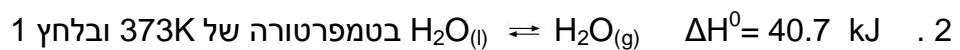
$$(4) \quad \Delta S_{\text{אידוי}}^0 = \frac{\Delta H_{\text{אידוי}}^0}{T_{\text{אידוי}}}$$

לדוגמה: נחשב את שינוי האנטרופיה כאשר מים משנים את מצב הצבירה ממוצק לנוזל:



בטמפרטורה של 273K ובלחץ 1 אטמוספירה יהיה השינוי באנטרופיה בעת שינוי מצב הצבירה כדלהלן::

$$\Delta S_{\text{היתוך}}^0 = \frac{6.02 \text{ kJ/mol}}{273 \text{ K}} = 0.022 \text{ kJ/mol} \cdot \text{K} = 22 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$



אטמוספירה

יהיה השינוי באנטרופיה בעת שינוי מצב הצבירה כדלהלן:

$$\Delta S_{\text{אידוי}}^0 = \frac{40.7 \text{ kJ/mol}}{373 \text{ K}} = 0.109 \text{ kJ/mol} \cdot \text{K} = 109 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$

אנו רואים כי השינוי באנטרופיה בעת המעבר ממצב צבירה נוזל למצב צבירה גזי הוא הרבה יותר גדול מאשר בעת המעבר ממוצק לנוזל. הסיבה היא שבמעבר בין מוצק לנוזל מתווספים אופני תנועה למולקולות (סיבוב ומעתק), אולם עדיין מתקיימים קשרי מימן ביניהם; ואילו המעבר מנוזל לגז גורם להעלאת מספר אופני התנועה מסוג מעתק, לא מתקיימים קשרים בין המולקולות, ולכן מספר המצבים המיקרוסקופיים המתארים גז גדול בהרבה משל נוזל, והשינוי באנטרופיה גדל באופן משמעותי יותר. מכאן עולה כי מספר התיאורים המיקרוסקופיים מכיל בתוכם את העלייה באופני התנועה ואת העלייה במיקום החלקיקים.

### שאלה עם פתרון

בטבלה הבאה מוצגים נתונים על אנתלפיית האידי של חומרים נוזליים שונים וכן על טמפרטורת הרתיחה שלהם.

חשבו את השינוי באנטרופיה בעת המעבר מנוזל לגז  $\Delta S_{\text{אידי}}^0$  של החומרים הבאים ביחידות

$$\frac{J}{K \times mol}$$

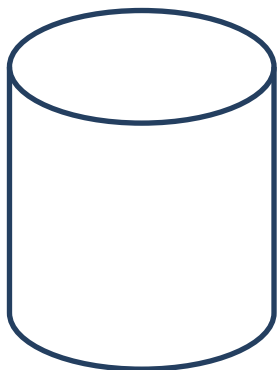
אנתלפיית רתיחה $\Delta H_{\text{אידי}}^0$ (kJ/mol)	טמפרטורת רתיחה $T_b$ (°C)	החומר ונוסחתו
29.82	76.8	פחמן ארבע-כלורי $CCl_4$
26.74	46.3	פחמן דו-גופרי $CS_2$
30.79	80.2	בנזן $C_6H_6$
38.56	78.4	אתאנול $C_2H_5OH$
23.70	118.0	חומצה אצטית $CH_3COOH$

## תשובה

החומר ונוסחתו	השינוי באנטרופיית האידוי $\Delta S_{\text{אידוי}}^0$
	$\frac{J}{K \times mol}$
פחמן ארבע-כלורי $CCl_4$	85.25
פחמן דו-גופרי $CS_2$	83.74
בנזן $C_6H_6$	87.17
אתאנול $C_2H_5OH$	109.73
חומצה אצטית $CH_3COOH$	60.61

ניתוח התוצאות :

אנו רואים כי הערכים של שינוי האנטרופיה של שלושת החומרים הראשונים די קרובים לערך הממוצע של  $85 J / mol \cdot K$ . כלל טרוטון קובע כי בנוזלים רבים קרוב שינוי האנטרופיה בעת האידוי לערך הנ"ל. זאת, כי ההבדל בין האנטרופיה של נוזל לאנטרופיה של גז עבור נוזלים שיש בין המולקולות שלהם אינטראקציות ואן דר ואלס - זהה. לעומת זאת אנו רואים כי השינוי באנטרופיה עבור אידוי האתאנול גבוה מהערך הממוצע הנ"ל. אפשר להסביר זאת בכך שהאנטרופיה של אתאנול במצב נוזל נמוכה יותר מהאנטרופיה של נוזלים בעלי מסה מולרית דומה אך בעלי אינטראקציות ואן דר ואלס, כיוון שקשרי המימן בין מולקולות האתאנול חזקים יותר מאשר אינטראקציות ואן דר ואלס בין המולקולות האחרות. לכן, יש ירידה במספר אופני התנועה האפשריים למולקולות באתאנול הנוזלי, וההפרש בין האנטרופיה של שני מצבי הצבירה גדל. בחומצה אצטית מתקיים מצב ייחודי של קיום קשרים בין מולקולריים בין מולקולות החומר גם במצב צבירה גז, האנטרופיה במצב הגזי הנמוכה מהאנטרופיה של החומרים האחרים במצב הגזי, ולכן ההפרש בין האנטרופיה של שני מצבי הצבירה קטן יותר. שתי מולקולות הקשורות ביניהן בקשרי מימן במצב צבירה גז, נקראות **דימרים**. האיור הבא המתאר דימרים של חומצה אצטית במצב גזי ממחיש את ההסבר המילולי שניתן.



## השינוי באנטרופיה של הסביבה במהלך התרחשות תגובות כימיות

לאחר שהרחבנו במושג אנטרופיה ככלל ואנטרופיה של המערכת בפרט, נחזור לדון שוב בשאלה מהי תגובה ספונטנית.

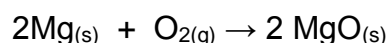
דנו עד עתה בתגובות אנדותרמיות שהן ספונטניות ומצאנו כי בכל המקרים הללו הייתה עלייה באנטרופיה של המערכת.

האם נוכל לטעון כי תגובה ספונטנית היא תגובה שיש בה עלייה באנטרופיה של המערכת? נבחן עתה תגובה ספונטנית נוספת המפריכה טענה זו.

שרפת מגנזיום



ניסוח התגובה - רמת הסמל



בתגובה זו מתרחשת שרפה 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 ההתרחשות של 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 ניידיים, ובמיוחד לעומת החמצן הגזי שבו יש למולקולות אופני תנועה רבים ופיזור חלקיקים, 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 שרפת 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 "מערכת" באופן שרירותי, וכל מה שמחוץ למוקד התעניינותנו יוגדר כ"סביבה".

המכלול של המערכת והסביבה מהווה את היקום. נבחן, אם כן, את השינוי באנטרופיה המתרחש גם בסביבה ולא רק במערכת.

לשם קביעת השינוי באנטרופיה של הסביבה ניעזר שוב בנוסחה (1) ונייחס אותה אל הסביבה.

$$(1) \quad \Delta S = \frac{Q_{rev}}{T}$$

### הערכת השינוי באנטרופיה של הסביבה

Q מוגדר ככמות האנרגיה העוברת אל הסביבה, וערך זה תלוי בערכו של  $\Delta H^0$ . סימנו של Q הפוך לסימנו של  $\Delta H^0$  כיוון שכאשר מתרחשת תגובה אקסותרמית שבה  $\Delta H^0 < 0$ , נפלטת אנרגיה אל הסביבה, כלומר הסביבה קולטת אנרגיה; וכאשר מתרחשת תגובה אנדותרמית שבה  $0 < \Delta H^0$  - נקלטת אנרגיה מהסביבה, כלומר הסביבה מאבדת אנרגיה. 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 כפי שעשינו בפרק ב', לצורכי חישוב של  $\Delta H^0$ , אלא 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 (5):

$$(5) \quad \Delta S_{\text{סביבה}} = - \frac{\Delta H^0}{T}$$

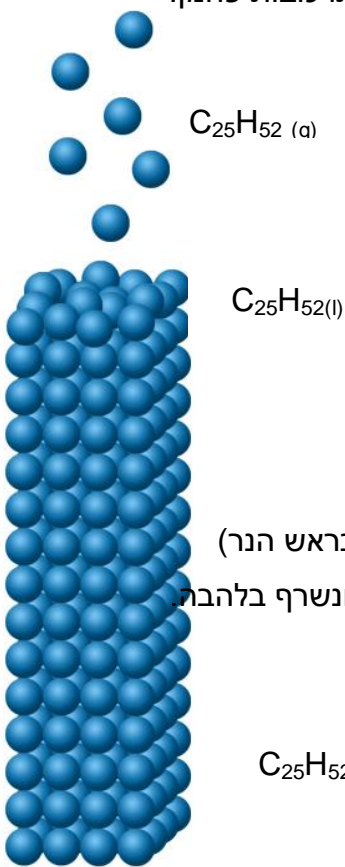
$$\Delta H^0 = \text{שינוי האנתלפיה של התגובה ביחידות J או kJ}$$

$$T = \text{טמפרטורת הסביבה במעלות קלווין K.}$$

ניזכר בשרפת המגנזיום. גם ללא חישובים אפשר לקבוע כי בעת שרפת המגנזיום עולה האנטרופיה של הסביבה. האם כאן טמונה התשובה?

נבחן כעת מערכת נוספת ואחרונה - שרפת נר. זוהי תגובה ספונטנית כיוון שמרגע שהתחילה היא ממשיכה ללא הפרעה, כפי שקורה לתגובות שרפה של תרכובות פחמן.

### שרפת 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 בלהבת.

● מולקולה שנוסחתה  $C_{25}H_{52}$

$C_{25}H_{52}(s)$

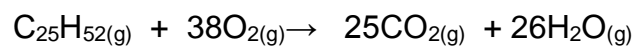
התמונות מתארות את תהליך שרפתו של נר. אחד ממרכיביה של שעוות הנר הוא

$C_{25}H_{52}(s)$ .

מהרגע בו החל הנר לדלוק מתרחשת תגובת השרפה של הגז  $C_{25}H_{52}(g)$  שמקורו בשעוות הנר.

ניח כי הנר מורכב רק ממולקולות  $C_{25}H_{52}$ .

ניסוח תגובת השרפה:



במהלך בעירת הנר (המהווה את המערכת) חשים בעליית הטמפרטורה של הסביבה הקרובה. משתמע מכך כי תגובת השרפה המתרחשת היא תגובה אקסותרמית  $\Delta H^0 < 0$ .

כאשר מעריכים את שינוי האנטרופיה **במערכת זו**, אפשר לומר כי היא גדלה, כיוון שהייתה עלייה במספר מולי 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 והחומר 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 –  $\Delta S_{\text{סביבה}} > 0$ .



### השינוי באנטרופיה של המערכת ושל הסביבה - שאלות

- העריכו את הסימן של שינוי האנטרופיה של המערכת ושל הסביבה בכל אחת מהתגובות הבאות בטמפרטורה של 298K.
- חשבו את השינוי באנטרופיה של המערכת ושל הסביבה בכל אחת מהתגובות הבאות.

שינויים באנטרופיה				$\frac{J}{K}$	
סביבה	סביבה	מערכת	מערכת	התגובה	
$\Delta S^0$	$\Delta S^0$	$\Delta S^0$	$\Delta S^0$		
ערך	סימן	ערך	סימן		
				$2\text{NH}_4\text{NO}_3(\text{s}) \rightarrow 2\text{N}_2(\text{g}) + 4\text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$ $\Delta H^0 = -236\text{kJ}$	<b>1</b>
				$4\text{Fe}(\text{s}) + 3\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s})$ $\Delta H^0 = -$ $1648\text{kJ}$	<b>2</b>
				$\text{HgO}(\text{s}) \rightarrow \text{Hg}(\text{l}) + 1/2 \text{O}_2(\text{g})$ $\Delta H^0 = 90.8\text{kJ}$	<b>3</b>

החומר	אנטרופיה מולרית תקינית $S^0$
	$\frac{J}{K \times mol}$
$\text{NH}_4\text{NO}_3(\text{s})$	151.1
$\text{Fe}(\text{s})$	27.2
$\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s})$	90.0
$\text{HgO}(\text{s})$	72.0
$\text{Hg}(\text{l})$	76.1
$\text{O}_2(\text{g})$	205.0
$\text{H}_2\text{O}(\text{g})$	189
$\text{N}_2(\text{g})$	191.4

## 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 שינוי האנטרופיה של המערכת (אשר הסביר את הספונטניות של תגובות אנדותרמיות) או את שינוי האנטרופיה 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 שמערכת (בה יש תגובה) בצירוף הסביבה מהווים את היקום, נוכל לומר כי:

$$\text{מערכת} + \text{סביבה} = \text{יקום}$$

וכי:

השינוי באנטרופיה התקנית של מערכת + השינוי באנטרופיה התקנית של סביבה = השינוי באנטרופיה התקנית של היקום, ולכן:

$$\Delta S^0_{\text{יקום}} = \Delta S^0_{\text{מערכת}} + \Delta S^0_{\text{סביבה}}$$

$$\Delta S^0_{\text{סביבה}} = - \frac{\Delta H^0}{T}$$

$$(6) \Delta S^0_{\text{יקום}} = \Delta S^0_{\text{מערכת}} - \frac{\Delta H^0}{T} > 0$$

בחינה של השינוי באנטרופיה של היקום בתגובות רבות הובילה למסקנה כי:

בעת התרחשות של תגובה ספונטנית, האנטרופיה של היקום עולה.

$$\Delta S^0_{\text{יקום}} > 0$$

מסקנה זו ידועה גם כחוק השני של התרמודינמיקה.

זהירות, לא להתבלבל!

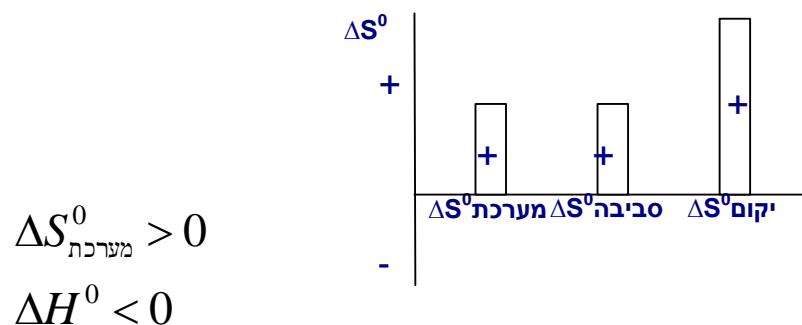
**שינוי באנטלפיה  $\Delta H$**  - הוא השינוי באנרגיה הפנימית במהלך תגובה המתרחשת בלחץ קבוע. האנרגיה הפנימית היא סך האנרגיה הקינטית והפוטנציאלית שבחומר. שינוי באנטלפיה קיים אך ורק במערכת.  
**שינוי באנטרופיה  $S^0$**  - הוא פונקציה המתארת את השינוי בפיזור האנרגיה והחלקיקים במהלך התרחשות תגובה. קיימים שינוי באנטרופיה של המערכת, שינוי באנטרופיה של הסביבה, ושינוי 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 בהמשך.

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.

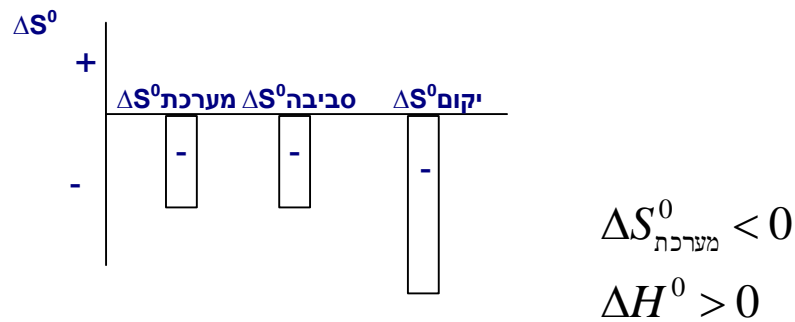
במקרה זה, השינוי באנטרופיה של המערכת גדול מאפס וכן השינוי באנטרופיה של הסביבה גדול מאפס. לכן, סכום השינויים יהיה תמיד גדול מאפס, כלומר השינוי באנטרופיה של היקום יהיה תמיד גדול מאפס. תגובה מסוג זה ספונטנית בכל טמפרטורה, כלומר הנטייה שלה להתרחש קיימת בכל טמפרטורה. אפשר להציג זאת באופן גרפי. ראו איור 1.



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.

אפשר להציג זאת באופן גרפי. ראו איור 2.



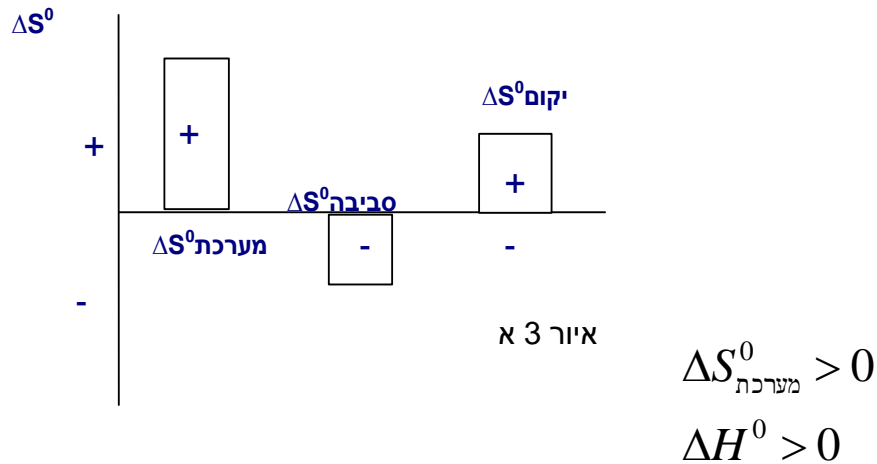
שני סוגי התגובות הבאות (ג) ו-(ד) מייצגים מקרים מורכבים יותר: בהם אחד השינויים שינוי באנטרופיה של המערכת או באנטרופיה של הסביבה - הוא חיובי והאחר שלילי. במקרה זה הספונטניות של התגובה (היכולת שלה להתרחש) **תיקבע על פי הטמפרטורה**, שכן הטמפרטורה תשפיע על גודלה של אנטרופיית הסביבה, בהתאם לנוסחה (5):

$$\Delta S^0_{\text{סביבה}} = - \frac{\Delta H^0}{T}$$

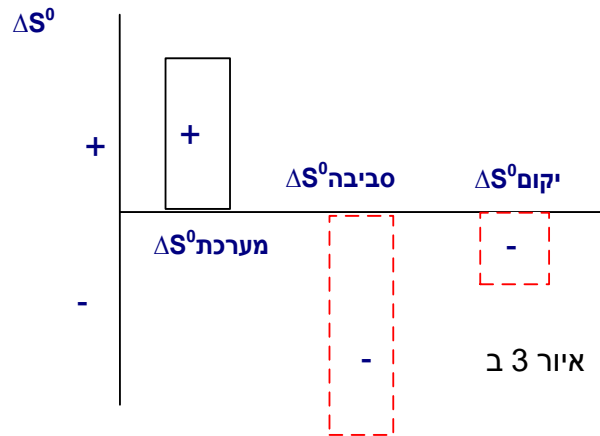
שימו לב כי ערכו של  $\Delta S_{\text{סביבה}}$  הוא ביחס הפוך לטמפרטורה. כלומר הביטוי הנתון יקטן ככל ש-T גבוה, ויגדל ככל ש-T נמוך. לכן, ערך הטמפרטורה יקבע אם השינוי באנטרופיית היקום יהיה גדול מאפס או קטן ממנו.

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. אפשר להציג זאת באופן גרפי. ראו איורים 3.א ו-3.ב.

- כאשר השינוי באנטרופיית הסביבה הוא שלילי וערכו **קטן** (בטמפרטורות גבוהות) - השינוי הכולל באנטרופיית היקום יהיה חיובי והתגובה תהיה ספונטנית (איור 3 א).

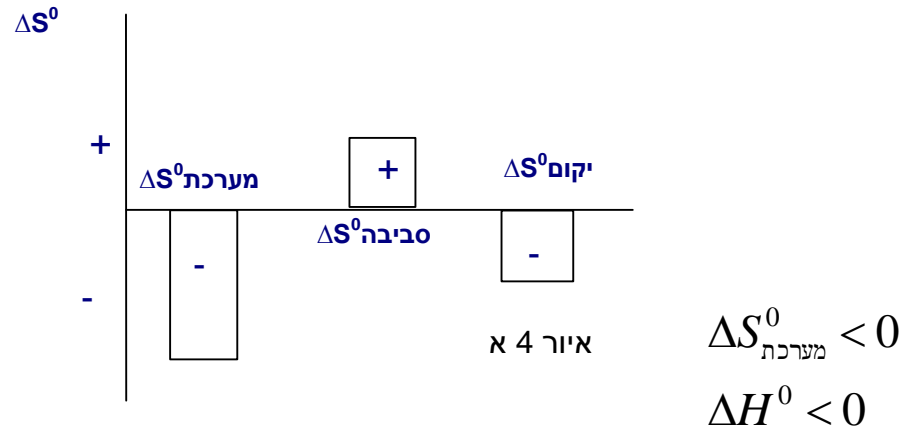


כאשר השינוי באנטרופיית הסביבה הוא שלילי וערכו **גדול** (בטמפרטורות נמוכות) - השינוי הכולל של אנטרופיית היקום יהיה שלילי והתגובה לא תהיה ספונטנית (איור 3 ב).

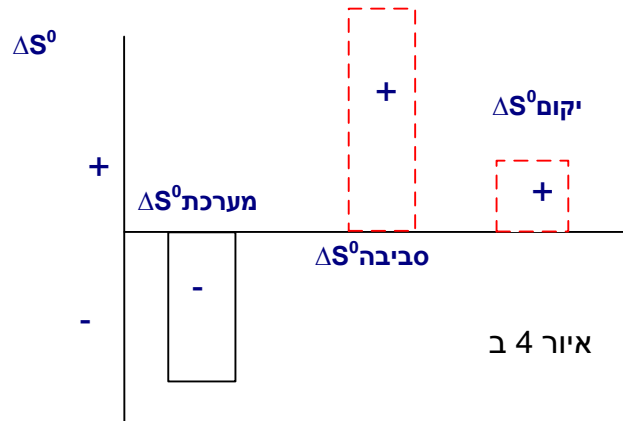


ד. **תגובה ספונטנית בטמפרטורות נמוכות:** תגובה שיש בה ירידה באנטרופיה של התוצרים בהשוואה לאנטרופיה של המגיבים, והיא אקסותרמית - השינוי באנטרופיית התגובה הוא שלילי, אולם השינוי באנטרופיית הסביבה הוא חיובי. היות שהתגובה תהיה ספונטנית כאשר סכום שינויי האנטרופיה יהיה חיובי, עלינו לבחון איזה שינוי גדול יותר. אפשר להציג זאת באופן גרפי. ראו איורים 4.א ו-4.ב.

- כאשר השינוי באנטרופיית הסביבה הוא חיובי וערכו **קטן** (בטמפרטורות גבוהות) השינוי הכולל באנטרופיית היקום יהיה שלילי והתגובה לא תהיה ספונטנית (איור 4 א)



- כאשר השינוי באנטרופיית הסביבה יהיה חיובי וערכו גדול (בטמפרטורות נמוכות) - השינוי הכולל באנטרופיית היקום יהיה חיובי והתגובה תהיה ספונטנית (איור 4 ב).



הטבלה הבאה מסכמת את הסוגים של טיפוס התגובות ונותנת דוגמה לתגובה מתאימה.

דוגמה לתגובה	ספונטניות	$\Delta S$ יקום	$\Delta S$ סביבה	$\Delta H^0$	$\Delta S$ מערכת	סוג התגובה
$2N_2O_{(g)} \rightarrow 2N_{2(g)} + O_{2(g)}$	תגובה ספונטנית בכל טמפרטורה.	+	+	-	+	א
	התגובה אינה ספונטנית באף טמפרטורה.	-	-	+	-	ב
$2NH_{3(g)} \rightarrow N_{2(g)} + 3H_{2(g)}$	תגובה ספונטנית בטמפרטורות גבוהות.	+				ג
-----	התגובה אינה ספונטנית בטמפרטורות נמוכות.	-	-	+	+	
-----	התגובה אינה ספונטנית בטמפרטורות גבוהות.	-	+	-	-	ד
$2Mg_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow 2MgO_{(s)}$	התגובה ספונטנית בטמפרטורות נמוכות.	+				

## סיכום

### האם כל תהליך ספונטני אכן מתרחש בפועל?

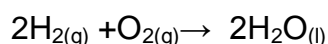
חשוב להבחין ולהפריד בין ספונטניות של תגובה לבין התרחשות של תגובה. ספונטניות של תגובה מלמדת אותנו על הנטייה של התגובה להתרחש וניתנת לחישוב על פי ערכו של השינוי באנטרופיה של היקום. זהו החוק השני של התרמודינמיקה. התרחשות של תגובה בתנאים מסוימים קשורה לקצב התגובה באותם תנאים ושייכת להיבט הקינטי ולא להיבט 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 בקצב מהיר 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

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 להתגבר על אנרגיית השפעול של התגובה, התגובה אמנם תתרחש, והתרחשותה תהיה מהירה ביותר - תוך כדי פיצוץ!



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 מגנזיום לטמפרטורה גבוהה ביותר בעזרת להבת המבער הוא יידלק ויתחיל להתרחש תהליך שרפה בקצב גבוה, ללא השקעת אנרגיה נוספת.

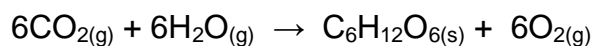
### האם תהליכים לא ספונטניים עשויים להתרחש?

**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.

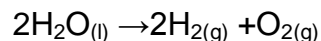
תהליך הפוטוסינתזה הוא תהליך אנדותרמי שניסוחו:



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.



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' 3). 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 השרפה 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:

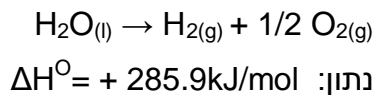
אנרגיה פנימית, אנרגיה פוטנציאלית, אנרגיה קינטית, טמפרטורה, תגובה אקסותרמית, תגובה אנדותרמית, אנתלפיה, מהירות תגובה, אנרגיית שפעול, תצמיד משופעל, מערכת בשיווי משקל, תהליך ספונטני, אנטרופיה של מערכת, אנטרופיה של סביבה, החוק השני של התרמודינמיקה.

תארו את בעירת הזיקוק מבחינה מדעית תוך כדי קישור מושגים רבים ככל האפשר מהרשימה.

## שאלות לסיכום הפרק

### שאלה 1

התגובה הנתונה אינה ספונטנית בטמפרטורה של 298K.

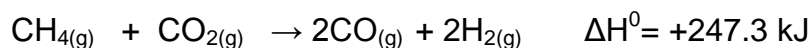


החומר	$\text{H}_2\text{O}_{(s)}$	$\text{H}_2\text{O}_{(l)}$	$\text{H}_2\text{O}_{(g)}$	$\text{O}_{2(g)}$	$\text{H}_{2(g)}$
אנטרופיה מולרית	47.8	70	188.7	205	130.6
תקנית $\frac{J}{K \times mol}$					

- חשבו את השינוי באנטרופיה של המערכת. פרטו את חישוביכם.
- חשבו את השינוי באנטרופיה של הסביבה. פרטו את חישוביכם.
- חשבו את השינוי באנטרופיה של היקום. פרטו את חישוביכם.
- איזה מבין האירורים 3א, 3ב, 4א או 4ב, המופיעים בפרק זה (עמוד 39), מתאימים לתגובה זו?
- מדוע התגובה אינה ספונטנית ב-298K?
- נמצא שהתגובה מתרחשת בטמפרטורה גבוהה. הסבירו מדוע.

### שאלה 2

נתונה התגובה הבאה:



החומר	$\text{CH}_{4(g)}$	$\text{CO}_{(g)}$	$\text{CO}_{2(g)}$	$\text{H}_{2(g)}$
אנטרופיה מולרית	186	197.9	213.6	130.6
תקנית $\frac{J}{K \times mol}$				

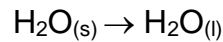
- חשבו את השינוי באנטרופייה של המערכת. פרטו את חישוביכם.
- חשבו את השינוי באנטרופייה של הסביבה בטמפרטורה של 298K. פרטו את חישוביכם.

ג. חשבו את השינוי באנטרופייה של היקום. האם התגובה ספונטנית בטמפרטורת החדר? פרטו את חישוביכם.

ד. איזה / אילו מהערכים שחיבתם ישתנו כאשר הטמפרטורה תהיה 1100K? האם התגובה ספונטנית בתנאים אלה?

### שאלה 3

נתונה התגובה הבאה:



$$\Delta H^0 = 6000\text{J}$$

$\text{H}_2\text{O}_{(s)}$	$\text{H}_2\text{O}_{(l)}$	החומר
47.8	69.9	אנטרופיה מולרית תקנית
		$\frac{J}{K \times mol}$

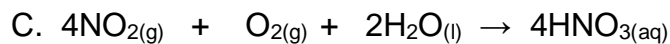
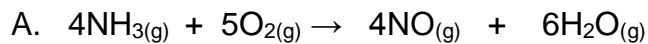
א. בחנו אם התגובה ספונטנית בשתי טמפרטורות שונות: 298K ו-248K. פרטו את חישוביכם.

ב. הציגו את האיורים הגרפיים המתאימים לכל טמפרטורה ( מבין האיורים 1-4 ).

ג. האם תוצאות החישובים תואמים את ניסיונכם היומימי בהיתוך קוביות קרח? אם כן, כיצד?

### שאלה 4

לפניכם שלושה תהליכים המתארים ייצור חומצה חנקתית ( $\text{HNO}_3$ ) מאמוניה ( $\text{NH}_3$ ):



א. קבעו את סימנו של השינוי באנטרופיה של המערכת עבור כל אחת משלוש התגובות A-C. נמקו את קביעתכם.

ב. הסעיף דן בתגובה A.

א. ל-  $\text{H}_2\text{O}(g)$  אנטרופיה מולרית תקנית דומה לאנטרופיה של  $\text{NH}_3(g)$ . הציעו גורם העשוי להשפיע.

א. האם נוכל לקבוע אם תגובה A היא ספונטנית או לא? נמקו.

ג. הסעיף דן בתגובה B. לפניכם טבלה ובה נתונים תרמודינמיים:

NO <sub>2(g)</sub>	O <sub>2(g)</sub>	NO <sub>(g)</sub>	
240	205	210.5	S <sup>0</sup>
			$\frac{J}{K \times mol}$

א. חשבו את השינוי באנטרופיה  $\Delta S^0$  של התגובה. פרטו את חישוביכם.

ב. האם התגובה ספונטנית בתנאי החדר? נמקו בפירוט.

ד. הסעיף דן בתגובה C.

ידוע כי התגובה ספונטנית בתנאי החדר. האם התגובה אקזותרמית או אנדותרמית?  
הסבירו.

### שאלה 5

נתונות שלש תגובות :

1. N<sub>2</sub>O<sub>4(g)</sub> ⇌ 2NO<sub>2(g)</sub>
2. N<sub>2(g)</sub> + O<sub>2(g)</sub> ⇌ 2NO(g)
3. N<sub>2(g)</sub> + 2 O<sub>2(g)</sub> ⇌ 2NO<sub>2(g)</sub>

נתונים שלושה ערכים שונים של שינויי אנטרופיה במערכת:

$$\Delta S_a^0 = -121.4 \text{ J / K}$$

$$\Delta S_b^0 = 24.6 \text{ J / K}$$

$$\Delta S_c^0 = 175.8 \text{ J / K}$$

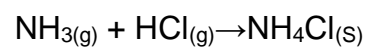
א. התאימו כל אחת מהתגובות לשינוי האנטרופיה המתאים. נמקו תשובתכם.

ידוע כי ערכה של האנטרופיה המולרית של NO<sub>2(g)</sub> הוא  $240 \frac{J}{K \times mol}$ .

ב. חשבו את האנטרופיה המולרית של N<sub>2</sub>O<sub>4(g)</sub>.

### שאלה 6

המורה קיימה הדגמה במעבדה: בעזרת שני מזרקים עירבבה שני גזים: אמוניה NH<sub>3(g)</sub> ו-HCl(g) כלורי. הגזים התערבבו והתקבל מוצק לבן. להלן ניסוח התגובה שהתרחשה:



האם התגובה היא אקסותרמית או אנדותרמית? נמקו בפירוט.

### שאלה 7

צפו בסרטון בכתובת הבאה:

<http://www.youtube.com/watch?v=eZsur0L0L1c&feature=related>

א. נסחו את התגובה המתרחשת.

ב. האם התגובה היא ספונטנית בטמפרטורת החדר? נמקו.