

# תרמודינמיקה

## תוכנית הלימודים

(בצהוב – ירד במיקוד 2011):

<p>תלמיד יידרש להסביר הבדל באנטרופיה של חומרים על פי ערכים נתונים</p> <p>הנושאים הבאים הם להעשרה</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• צימוד תגובות</li> <li>• הקשר בין קבוע שיווי משקל לטמפרטורה</li> <li>• שינוי האנטרופיה של היקום כתלות בטמפרטורה</li> <li>• הרחבה של שאלות הכוללות גרפים עבור השינוי באנטרופיה של היקום</li> </ul>	<p>ספונטניות של תגובה כימית- מהי? האנטרופיה ומשמעותה; אנטרופיה תקנית של חומרים מולקולריים בלבד</p> <p><b>חישוב שינוי האנטרופיה במהלך היתוך ורתיחה של חומר טהור</b></p> <p>השינוי באנטרופיה במהלך התרחשות תגובה, (הערכה וחישובים)</p> <p>השינוי באנטרופיה של הסביבה (איכותית וחישובים)</p> <p>השינוי באנטרופיה של היקום (איכותית וחישובים)</p> <p>החוק השני של התרמודינמיקה על פי השינוי באנטרופיה של היקום (איכותית וחישובים)</p> <p>הקשר בין תהליך ספונטני לשינוי האנטרופיה של היקום</p> <p><b>בקרה קינטית ותרמודינמית</b></p>
--	---

## תוכן העניינים

- פרק א - הקדמה.....2
- פרק ב - איך קובעים יחידות לאי – סדר (אנטרופיה)?.....8
- פרק ג - ערכים של אנטרופיה לחומרים שונים : .....10

**החוק ה - I של התרמודינמיקה.**

חוק שימור האנרגיה. האנרגיה של כל היקום קבועה - לאנרגיה יש צורות שונות, כאשר היא נעלמת בצורה אחת היא מופיעה בצורות אחרות.

מאז ומתמיד מנסה האדם להפוך את האנרגיה המתקבלת משרפת דלק, לעבודה, אך רק חלק קטן מן האנרגיה, שנפלטה בתהליך השריפה ניתן לנצל לשם ביצוע עבודה.

מסתבר, שקיים חסם עליון לכמות האנרגיה שניתן להפוך עבודה: אם יושקעו 100% אנרגיה בהפעלת מכונה להפקת חשמל - 45% ממנה ילכו לאיבוד (בצורת חום) ורק 55% ינוצלו להפקת חשמל. במילים אחרות – הניצולת של המכונה היא 55%. הניסיונות לבנות מכונה, שהניצולת שלה תהיה 100%, ניסיונות שנכשלו, הובילו לראשיתו של מדע חדש, מדע התרמודינמיקה. הודות למדע זה ניתן להבין שהניצולת המכסימלית של מכונות לא נובעת רק מבעיות טכנולוגיות.

שני חוקרים בשם פּלנֶק וקלוּיֶן אמרו: "שום מתקן אינו יכול לעבוד בתהליך מחזורי כך שכל החום שנקלט בו יהפוך לעבודה", כלומר לא ניתן ליצור מכונה של תנועת – עד (בלטינית –פּרֶפְטוּס מוּבִּילָה).

מילון אבן שושן: "תרמודינמיקה: ענף במדע הפיסיקה העוסק בחקר הפיכת אנרגית החום לצורות אנרגיה אחרות. (תרמו - חום, דינמיס - כוח)".

החוק ה-I של התרמודינמיקה - האנרגיה של כל היקום קבועה, לאנרגיה יש צורות שונות, כאשר היא נעלמת בצורה אחת היא מופיעה בצורות אחרות - אינו מטיל הגבלות על כווננו של מעבר האנרגיה :  
ישנם תהליכים כימיים שפולטים אנרגיה - תהליכים אקסותרמיים, וישנם תהליכים כימיים שקולטים אנרגיה - תהליכים אנדותרמיים.  
 $\Delta H$  - גודל שאנחנו מכירים, מייצג את האנרגיה שעוברת בין המערכת לבין הסביבה.  
 $\Delta H$  - הוא ההפרש בין האנרגיה הפנימית של התוצרים ובין האנרגיה הפנימית של המגיבים בתהליך כימי.  
 $\Delta H$  - יכול לקבל ערכים חיוביים, שליליים או אפס כי אין הגבלה על כוון מעבר האנרגיה.

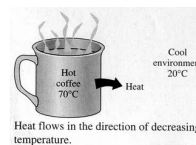
ארבע הדוגמות הבאות מראות משהו אחר -

**הניסיון היומיומי מצביע על קיומן של מגבלות על כוון מעבר האנרגיה :**

1. כאשר שני גושי מתכת שהטמפרטורה שלהם זהה, באים במגע זה עם זה, לעולם לא יאבד אחד מהם חום לשני כך שהאחד יתקרר והשני יתחמם.
2. כוס קפה חם תמיד תאבד חום עד שהטמפרטורה שלה תגיע לזו של החדר. קלאוזיוס : "לא ניתן להעביר חום מגוף בעל טמפרטורה נמוכה לגוף בעל טמפרטורה גבוהה".

**הניסיון היומיומי מצביע גם על קיומן של מגבלות על כוון מעבר חומר :**

1. שני כלים מחוברים על ידי ברז, הברז סגור. כלי אחד ריק ובכלי השני יש גז. עם פתיחת הברז ימלא הגז באופן שווה את שני הכלים.
2. כאשר שמים שקית תה בכוס מים חמים, תמצית התה תתפזר בתוך המים. לא נצפה מקרה שבו תמצית התה תחזור אל השקית.



ארבע הדוגמות מציגות תהליכים ותגובות בעלי כוון מועדף. תהליכים ותגובות בעלי כוון מועדף הנם תהליכים בלתי הפיכים, המתרחשים באופן ספונטני עד למצב של שווי-משקל.

באופן ספונטני - למה הכוונה?

ספר הלימוד עמוד 156 :

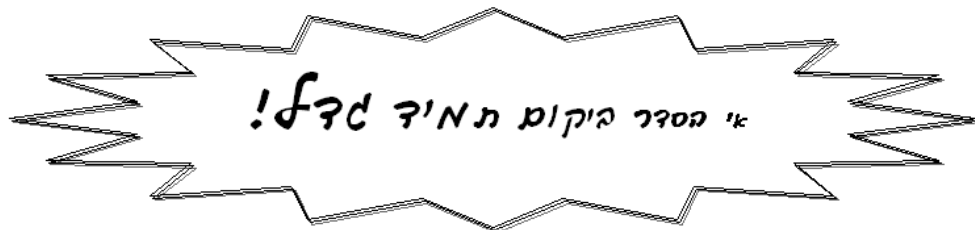
תגובה ספונטנית היא תגובה שיש לה יכולת להתרחש וכן תגובה אשר מרגע שהתחילה, היא תמשיך להתרחש ללא שום התערבות חיצונית. תגובה שאינה ספונטנית לא תתרחש אלא אם תהיה מתערבות חיצונית מתמדת.

האם ניתן למצוא חוק כוללני שיסביר את התופעות שתוארו להלן?

### החוק ה - II של התרמודינמיקה

תהליכים יתרחשו באופן ספונטני כל זמן שתוך כדי התרחשותם יגדל אי הסדר ביקום (תהיה עליה במספר הדרכים לתיאור היקום).

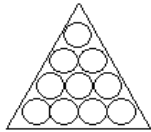
מסתבר שכל התופעות שמתרחשות באופן ספונטני ביקום שלנו גורמות ליקום להיות יותר ויותר לא מסודר!



**'אי - סדר' או 'מספר הדרכים לתאר' למה הכוונה?**

ידוע לנו ההבדל בין חדר מסודר לבין חדר לא מסודר. מה ההבדל בין מערכת מסודרת למערכת לא מסודרת, כיצד נותנים ערכים ל - 'אי-סדר'?

נתאר לעצמנו את המסגרת המשולשת שבה מסדרים עשרה כדורי ביליארד. אם כל הכדורים לבנים הרי בתוך המסגרת יש רק אפשרות אחת לסידורם:



★ את המערכת של 10 כדורים – ניתן לתאר רק בדרך אחת.

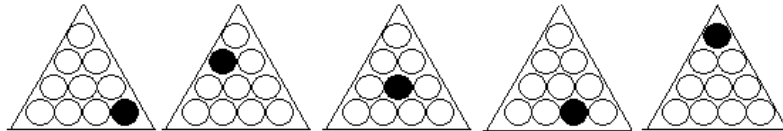
אבל -

אם המערכת שלנו תהיה מסגרת משולשת ובה תשעה כדורי ביליארד לבנים וכדור אחד שחור ניתן יהיה לסדר אותה במספר אפשרויות.

1. כמה אפשרויות שונות מוצגות באיור שלמטה?

2. האם אלה האפשרויות היחידות, האם יש כאן אפשרויות שחוזרות על

עצמן?



★ את המערכת שמכילה תשעה כדורים לבנים + כדור שחור ניתן לתאר בשלוש

דרכים שונות.

לפיכך -

במערכת שמכילה תשעה כדורים לבנים וכדור אחד שחור אי הסדר גדול יותר

ממערכת שמכילה רק כדורים לבנים.

אם נמלא את המשולש בשני כדורים שחורים ושמונה לבנים או בכדורים בצבעים שונים נקבל מערכות שניתן יהיה לתאר אותן בדרכים רבות יותר ממערכת עם כדור

שחור אחד – כלומר נקבל מערכות שבהן האי סדר גדול יותר.

מה הקשר של כל זה לכימיה?

באמת - מה הקשר של כל השטויות האלה לכימיה?!  
 בכימיה לא מדברים על ביליארד אלא על חלקיקים. ככל שהחלקיק – אטום,  
 מולקולה, יון ממוים, גביש יוני ועוד - גדול יותר כך ניתן יהיה לתאר אותו מבחינה  
 מיקרוסקופית במספר דרכים רב יותר כלומר האי הסדר שלו גדול יותר.

3. איזו מן המולקולות ניתן לדעתכם לתאר בדרכים רבות יותר

HOCl או H<sub>2</sub>O?

4. איזו מן המולקולות ניתן לדעתכם לתאר בדרכים רבות יותר

H<sub>2</sub>S או H<sub>2</sub>O?

**אי סדר קרוי אנטרופיה ומסומל על ידי האות S.**

מתוך ספר הלימוד עמוד 162 :

**אנטרופיה, S, היא מדד לפיזור האנרגיה בחומר, הבא לידי  
 ביטוי במספר התיאורים המיקרוסקופיים האפשריים**

**יש שלושה שמות לסמל S:**

1. אי סדר

2. אנטרופיה

3. מספר הדרכים לתאר מערכת או מספר  
 התיאורים המיקרוסקופיים האפשריים של  
 המערכת

נגדיר: האנטרופיה ביקום בתחילת תהליך כימי - S<sub>1</sub>

האנטרופיה ביקום בסוף תהליך כימי - S<sub>2</sub>

השינוי באנטרופיה שביקום בעקבות התהליך הכימי ΔS<sub>יקום</sub>

$$\Delta S_{\text{יקום}} = S_2 - S_1$$

ההפרש בין S<sub>2</sub> ובין S<sub>1</sub> חייב להיות גדול או שווה ל-0 על מנת שהתהליך יתקיים.  
 כלומר כל תהליך כימי שמתקיים, גורם להגדלת האנטרופיה של היקום.

$$\Delta S_{\text{יקום}} \geq 0$$

שאלה פילוסופית: ממה מורכב היקום?

תשובה: היקום מורכב מן המערכת, שהיא התהליך כימי שאליו אנחנו מתייחסים, ומן הסביבה (זה לא חדש לכם כי כך התייחסנו ליקום גם כאשר למדנו אנרגיה).

השינוי באנטרופיה של היקום בעקבות תהליך כימי,  $\Delta S_{\text{יקום}}$ , הוא סכום שני שינויים:  
שינוי האנטרופיה במערכת + שינוי האנטרופיה בסביבה.

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

לא מתייחסים לתגובה הכימית כאל אירוע מנותק מן הסביבה, אלא מתחשבים גם בשינויים שהתחוללו בסביבה בעקבותיה.

כיון ששינוי האנטרופיה ביקום חייב להיות גדול מ-0 ברור שבמקרה של האנטרופיה, (בניגוד למה שהתרגלנו באנרגיה), שינוי האנטרופיה במערכת - אינו שווה בערכו המוחלט והפוך בסימנו לשינוי האנטרופיה בסביבה (אם כך היה הדבר הרי שינוי האנטרופיה ביקום היה תמיד שווה ל-0).

אחת הסיבות, שלא ניתן ליצור מכונה עם נצילות של 100% היא שחלק מן האנרגיה שנפלטת במטרה להפעיל מכונה אינו מפעיל אותה אלא מחמם אותה ואת סביבתה כלומר מושקע בהגדלת אי הסדר ביקום.  
זהו ה"מס" שאנחנו חייבים על פי החוקה II –

האם יש מצב שבו האנטרופיה של החומר תוגדר כאפס?

### **החוקה III – התרמודינמיקה**

פיזור האנרגיה המינימלי בחומר יתרחש כאשר החומר יהיה במצב מוצק, בהיערכות מסודרת אידיאלית ובטמפרטורה של האפס המוחלט 0 מעלות קלוין. בתנאים אלה האנטרופיה של החומר תוגדר כאפס.

על השינוי באנטרופיה במערכת שבה מתקיים שווי משקל קראו בספר בעמוד 166.

פרק ב - איך קובעים יחידות לאי – סדר (אנטרופיה)?

כדי לקבוע נוסחה פיסיקלית יש לדעת כיצד מתייחסים המשתנים שלה זה לזה :

1. אם משקיעים אנרגיה,  $\Delta H$ , בגוף מסוים אזי האי סדר שלו,  $\Delta S$ , גדל כלומר יש יחס ישר בין שינוי האנרגיה ( או האנתלפיה) לשינוי האי-סדר (אנטרופיה):  
(הסימן  $\propto$  מייצג יחס)

$$\Delta S \propto \Delta H$$

2. לגבי הגוף שבו משקיעים את האנרגיה - ככל שטמפרטורה שלו,  $T$ , גבוהה יותר שינוי האי-סדר שבו,  $\Delta S$ , קטן יותר כלומר יש יחס הפוך בין שינוי הטמפרטורה לבין לשינוי האי-סדר (אנטרופיה):

$$\Delta S \propto 1/T$$

3. קבענו שתי מערכות יחסים בין גדלים. נקשר ביניהן ונהפוך אותן לנוסחה:

$$\Delta S = \frac{\Delta H}{T}$$

נתאר את הנוסחה במלים – שינוי האנטרופיה במערכת מסוימת שווה לשינוי האנרגיה שבה חלקי הטמפרטורה של המערכת במעלות קלוין.

**Comment [1.1x]:** מדוע חייבים להשתמש ביחידות של קלוין?

לאנטרופיה יש לפיכך יחידות של אנרגיה חלקי טמפרטורה.  
האנרגיה מבוטאת ביחידות של ג'אול J. את הטמפרטורה מציינים במעלות קלוין, K.

האנטרופיה התקנית של מול חלקיקים מבוטאת ביחידות של ג'אול חלקי קלוין כפול מול:

יחידות של אנטרופיה:

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



הסבר סטטיסטי ליחס בין שינוי האנטרופיה והטמפרטורה – רשות - מתוך

'תרמודינמיקה הכימיה אתגר':

נניח שיש בידינו שני גופים. כל אחד מכיל 60 חלקיקים. לכל חלקיק יכולה להיות אנרגיה משלו אבל אנחנו נגדיר לכל חלקיק שני מצבי אנרגיה בלבד: יש לחלקיק אנרגיה = החלקיק דלוק, אין לחלקיקי אנרגיה = החלקיק כבוי. גוף 1 בעל טמפרטורה מסוימת מכיל: 11 חלקיקים דלוקים ו-49 כבויים. גוף 2 בעל טמפרטורה גבוהה יותר מכיל: 21 חלקיקים דלוקים ו-39 כבויים. לכל אחד מן הגופים מוסיפים מנת אנרגיה אחת – חלקיק כבוי הפך לחלקיקי דלוק - כלומר מספר הדלוקים עולה ב-1 ומספר הכבויים יורד ב-1. בודקים מה ההפרש בין מספר הדרכים לתאר כל אחד משני הגופים (כלומר את ההפרש באנטרופיה) לפני ואחרי הוספת מנת האנרגיה. כפי שרואים בטבלה, ההפרש אינו זהה והוא גדול יותר אצל הגוף בעל הטמפרטורה הנמוכה.

ההפרש במספר הדרכים לתיאור הגוף כאשר מוסיפים לו 'חלקיק דלוק'	מספר הדרכים לתיאור הגוף	היחס בין הדלוקים לכבויים	מספר החלקיקים הדלוקים בגוף בעל 60 חלקיקים	
$10 * 10^{11}$	$3 * 10^{11}$	11/49	11	גוף בעל טמפרטורה נמוכה
	$13 * 10^{11}$	12/48	12	
$6 * 10^{11}$	$8 * 10^{11}$	21/39	21	גוף בעל טמפרטורה גבוהה
	$14 * 10^{11}$	22/38	22	

ניתן לראות שכאשר מוסיפים את אותה מנת אנרגיה לשני גופים זהים – האחד בעל טמפרטורה נמוכה והשני בעל טמפרטורה גבוהה – אצל הגוף בעל הטמפרטורה הנמוכה יותר יתקבל שינוי גדול יותר במספר הדרכים לתארו כלומר באנטרופיה. ישנו שתי דוגמות לא מדעיות במיוחד אבל ממחישות:

- רעש של סיכה נופלת ישמע בחדר שקט. כלומר יהיה שינוי משמעותי ברעש של החדר השקט עם תוספת הרעש של הסיכה. רעש של סיכה נופלת לא ישנה בהרבה את רמת הרעש בחדר רועש.

- אם נוסיף נייר מקומט לרצפה נקייה תשתנה מאד רמת הניקיון של הרצפה, אך אם נוסיף נייר מקומט לרצפה זרועת ניירות מקומטים – לא תשתנה מאד רמת הניקיון.

### פרק ג - ערכים של אנטרופיה לחומרים שונים:

ערכי האנטרופיה של יסודות, תרכובות או יונים ממוימים נמצאים בטבלות שונות בספר הנתונים תחת הכותרת "נתונים תרמודינמיים".

1. עיינו בתוכן של ספר הנתונים – לאילו סוגי חומרים מובאים הנתונים התרמודינמיים שלהם?

(אתם בוודאי זוכרים כי ערכי האנרגיה הפנימית של יסודות, תרכובות או יונים ממוימים, אינם נמצאות בספר הנתונים, ניתן רק לחשב את  $\Delta H$  של תהליך שהוא ההפרש בין האנרגיה הפנימית של התוצרים ובין האנרגיה הפנימית של המגיבים).

### ג.1. האנטרופיה, S, של חומר נתון עשויה להשתנות בשני מקרים:

#### I. במצבי צבירה שונים:

$H_2O_{(g)}$	$H_2O_{(l)}$	$H_2O_{(s)}$	החומר
188.7	70	47.8	האנטרופיה ( $S^\circ$ ) - $J/K$

2. מתי חל שינוי גדול יותר באנטרופיה, במעבר בין מוצק לנוזל או במעבר בין נוזל לגז. הסבירו?

#### II. בטמפרטורות שונות:

ככל שעולה הטמפרטורה עולה האנטרופיה של כל חומר (גם אם אין שינוי במצב הצבירה שלו).

3. מדוע יש עליה באנטרופיה של חומר כאשר יש עליה בטמפרטורה שלו?

ג.2. ניתן להשוות S של חומרים שונים. ה – S תלוי בגורמים הבאים:

I. מסה מולרית או גודל הענן האלקטרוני למשל

Xe	Kr	Ar	Ne	He	הגז
169	164	155	146	126	$J^{\circ}k - S^{\circ}$

II. מספר האטומים שבמולקולה.

NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O	HF	Ne	החומר
17	18	20	20.18	מסה מולרית (בגרם למול)
193	189	174	146	$J^{\circ}k - S^{\circ}$

III. אופי וחוזק הקשר הכימי. (דוגמות לכך נראה בתרגילים שנפתור).

4. הסבירו את השינוי בערכי האנטרופיה מן ההליום ועד לקסנון.

5. הסבירו את השינוי בערכי האנטרופיה מן הניאון ועד לאמוניה.

ניתן לראות שהשוואת ערכי האנטרופיה עבור חומרים שונים, מאפשרת לקבל מושג אודות המבנה שלהם.

קריאה: פרקי תרמודינמיקה: עמודים 18 – 22

תרגילים: פרקי תרמודינמיקה: עמוד 79 תרגילים 1 – 5.

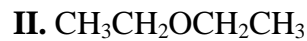
### תרגילים

1. על הלוח יש רשימת זוגות חומרים העתיקו באופן מרווח למחברת את רשימת זוגות החומרים.

i. בכל זוג, סמנו בעיגול את החומר שהוא לדעתכם בעל אנטרופיה גדולה יותר, נמקו במחברת את קביעתכם לכל זוג.

ii. בדקו את נכונות קביעתכם בעזרת ספר הנתונים והוסיפו את ערכי האנטרופיה המתאימים לכל חומר.

2. הנוסחה המולקולרית  $C_4H_{10}O$  מתאימה למספר איזומרים, ביניהם:



בטבלה הבאה מובאים ערכי  $S^0$  (ביחידות של  $J/K \cdot mol$ ) של שני האיזומרים במצב נוזלי ובמצב גזי:

$S^0$ (g)	$S^0$ (l)	האיזומר
262.82	225.51	I
342.34	252.34	II

א. ציירו את נוסחת המבנה של שני האיזומרים.

ב. כיצד תסבירו את ההבדלים בערכי האנטרופיה של שני האיזומרים במצב הגזי?

ג. כיצד תסבירו את ההבדלים בערכי האנטרופיה של שני האיזומרים במצב

הנוזלי?