

# פיזיקה תרמית - קורס חלקי



$$\{\sqrt{x}\}^2$$



## תוכן העניינים

1. טמפרטורה התפשטות תרמית וחוק הגז האידיאלי..... 1
2. התיאוריה הקינטית של הגזים..... 5
3. חום והחוק הראשון של התרמודינמיקה..... 6
4. החוק השני של התרמודינמיקה..... 25

# פיזיקה תרמית - קורס חלקי

פרק 1 - טמפרטורה התפשטות תרמית וחוק הגז האידיאלי

תוכן העניינים

1. הרצאות ותרגילים.....1

## הרצאות ותרגילים:

### שאלות:

#### (1) דוגמה-טמפרטורה שווה

- א. גוף נמצא בטמפרטורה של  $37^{\circ}\text{C}$ .  
 מה הטמפרטורה של הגוף בפרנהייט?  
 ב. מודדים את הטמפרטורה של גוף פעם אחת בצלזיוס ופעם אחת בפרנהייט ומקבלים שכמות הערך הנמדד זהה (כלומר אותו מספר בצלזיוס ובפרנהייט).  
 מהי טמפרטורת הגוף?

#### (2) דוגמה-בלון הליום

- א. מהי המסה האטומית של אטום הליום (He) בעל שני פרוטונים ושני נויטרונים?  
 ב. חשב את המסה המולקולרית של הליום?  
 ג. כמה מולים יש בבלון המכיל 50 גרם הליום?  
 ד. כמה אטומים של הליום יש בבלון?

#### (3) דוגמה-ערבוב הליום עם מימן

- ערבבו 50 מול של מימן עם 30 מול של הליום 4.  
 מהי מסת החומר לאחר הערבוב?

#### (4) דוגמה-בקבוק מים

- בקבוק מים מכיל 2 ליטר מים. הנח שצפיפות המים היא:  $1\text{k} \frac{\text{g}}{\text{L}}$ .  
 א. חשב את המסה המולקולרית של מים ( $\text{H}_2\text{O}$ ).  
 ב. כמה מולים של מים יש בבקבוק?  
 הצליחו לפרק כל מולקולה בבקבוק לשני אטומים של מימן ואטום של חמצן.  
 ג. כמה מולים של מימן וכמה מולים של חמצן יש בבקבוק?

#### (5) דוגמה-חנקן דו חמצני

- חנקן דו חמצני ( $\text{NO}_2$ ) מורכב מאטום חנקן ושני אטומי חמצן.  
 רוצים להכין 50 מול של חנקן דו חמצני ע"י ערבוב של מיכל המכיל חמצן ( $\text{O}_2$ ) בלבד ומיכל המכיל חנקן בלבד.  
 א. כמה מולים צריכים להיות בכל מיכל לפני הערבוב?  
 ב. כמה מולים היו צריכים להיות במיכל החמצן אם חמצן היה גז חד אטומי (כלומר כל חלקיק בגז היה מורכב מאטום יחיד של חמצן)?  
 ג. מהי מסת החמצן ומהי מסת החנקן לפני הערבוב?

- 6) דוגמה-מחממים גז במיכל סגור**  
 גז מוחזק במיכל ברזל סגור בלחץ של 1 atm ובטמפ' של 25°C.  
 מחממים את המיכל לטמפ' של 100°C.  
 מה יהיה הלחץ של הגז במיכל?
- 7) דוגמה-נפח של מול ב-STP**  
 מצא מהו הנפח של מול אחד של גז כלשהו ב-STP?
- 8) מנפחים בלון**  
 מנפחים בלון בגז הליום עד אשר הוא מגיע לנפח של 2L ב-STP.  
 א. מהו מספר המולים של הליום שהוכנסו לבלון?  
 ב. מהי מסת הגז שהוכנסה לבלון?  
 ג. מהי התשובה לסעיף א' אם הטמפרטורה היא טמפרטורת החדר (בערך 27°C).
- 9) לחץ בצמיג**  
 מנפחים צמיג לפני נסיעה ללחץ של 32 psi ( $1 \text{ psi} \approx 6,895 \text{ Pa}$ ) ביום בו הטמפרטורה היא 27°C. לאחר נסיעה ארוכה טמפרטורת הצמיג עולה כתוצאה מחיכוך עם הכביש ל-60°C.  
 מה יהיה הלחץ החדש בצמיג ב-psi?  
 (שים לב שהלחץ הנמדד בצמיג הוא ביחס ללחץ אטמוספרי).
- 10) דוגמה-מולקולות בנשימה**  
 הערך כמה מולקולות ישנם בנשימה אחת אם בערך נפח האוויר בנשימה הוא ליטר אחד.
- 11) סרט מדידה**  
 סרט מדידה עשוי מברזל, הסרט כויל בטמפרטורה של 15°C.  
 מודדים עם הסרט ביום בו הטמפרטורה היא 35°C.  
 א. האם המדידה שיראה הסרט נמוכה או גבוהה מהאורך האמיתי?  
 ב. חשב את אחוז הטעות במדידה של הסרט.
- 12) צוללן מנפח ריאות**  
 צוללן מנפח את הריאות לנפח מקסימלי של 5L כאשר הוא 7 מטר מתחת לפני המים.  
 מה יהיה נפח הריאות של הצוללן אם יעלה לפני המים ויחזיק את נשימתו עצורה?  
 הערה: לחץ בתוך מים גדל ב-9.8 Pa לכל מילימטר גובה (או עומק) מתחת לפני המים.



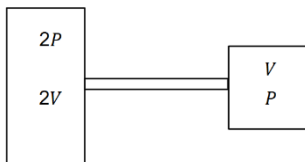
**13) מתי למלא דלק**

הצפיפות של דלק ב- $0^{\circ}\text{C}$  היא:  $0.68 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ .

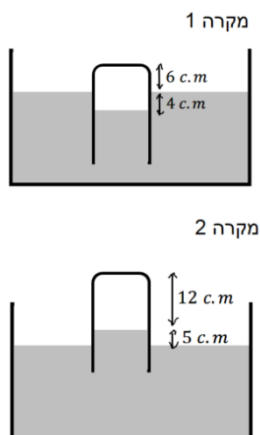
- א. מה הצפיפות של דלק ביום חם בו הטמפרטורה היא  $40^{\circ}\text{C}$  ?  
 ב. מה אחוז השינוי בצפיפות?  
 ג. אם מחיר הדלק נקבע לפי ליטרים (כלומר לפי הנפח) מתי עדיף למלא דלק ביום קר או חם?

**14) שני מיכלים מחוברים בצינור**

שני מיכלים מלאים בגזים שונים ונמצאים באותה הטמפרטורה. נפח מיכל אחד הוא  $V$  והלחץ בו  $P$  ונפח המיכל השני הוא  $2V$  והלחץ בו  $2P$ . מחברים את המיכלים בצינור בעל נפח זניח. בעת הערבוב כל מולקולה ממיכל



אחד מתרכבת עם מולקולה ממיכל 2 ונוצרת מולקולה אחת חדשה (לא כל המולקולות במיכל 2 מתרכבות). מה הלחץ במיכלים לאחר החיבור בהנחה כי הטמפרטורה לא משתנה? (הבא תשובתך באמצעות  $P$ ).

**15) צינורית במיכל כספית**

מיכל גדול מאוד מכיל כספית ונמצא בחדר לחץ בו לחץ האוויר אינו ידוע. טובלים במיכל צינורית זכוכית דקה הסגורה בחלקה העליון. כאשר מחזיקים את הקצה העליון של הצינורית בגובה 6 ס"מ מעל פני הכספית במיכל, גובה הכספית בצינורית הוא 4 ס"מ מתחת לפני הכספית במיכל. כאשר מחזיקים את הקצה העליון של הצינורית בגובה 17 ס"מ מעל פני הכספית במיכל, גובה הכספית בצינורית הוא 5 ס"מ מעל לפני הכספית במיכל. הנח שגובה פני הכספית במיכל קבוע.

א. מהו לחץ האוויר בחדר?

- ב. באיזה גובה צריך להחזיק את קצה הצינורית מעל המיכל כך שפני הכספית בצינורית יהיו בגובה הכספית של המיכל?

**תשובות סופיות:**

- (1) א.  $98.6^{\circ}\text{F}$  ב.  $-40^{\circ}\text{C}$
- (2) א.  $m_a \approx 4_u$  ב.  $M = 4\text{gr}$
- (3)  $170\text{gr}$
- (4) א.  $18u$  ב.  $111\text{mol}$
- (5) א.  $50\text{mol}$  חמצן,  $50\text{mol}$  חנקן  
 ב.  $100\text{mol}$  חמצן ג.  $0.7\text{kg}$  חנקן,  $1.6\text{kg}$  חמצן
- (6)  $\approx 1.25\text{atm}$
- (7)  $\approx 22.4\text{L}$
- (8) א.  $0.0892\text{mol}$  ב.  $0.359\text{gr}$
- (9)  $\approx 37\text{psi}$
- (10)  $\approx 2.45 \cdot 10^{22}$
- (11) א. נמוכה ב.  $0.024\%$
- (12)  $\approx 8.42\text{L}$
- (13) א.  $0.655 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  ב.  $\approx 3.68\%$  ג. ביום קר
- (14) א.  $\frac{4}{3}p$
- (15) א.  $0.656\text{atm}$  ב.  $10.8\text{c.m}$

# פיזיקה תרמית - קורס חלקי

פרק 2 - התיאוריה הקינטית של הגזים

תוכן העניינים

1. הסברים ותרגול ..... 5

## הסברים ותרגול:

### שאלות:

- (1) **דוגמה-אנרגיה של מולקולה**  
 מהי האנרגיה הקינטית הממוצעת של מולקולה של גז אידיאלי בטמפרטורת החדר (בערך  $20^{\circ}\text{C}$ )?
- (2) **מהירות של מולקולה באוויר**  
 מצא את גודל ה- $v_{\text{rms}}$  של מולקולת חמצן  $\text{O}_2$  ושל מולקולת חנקן  $\text{N}_2$  באוויר, בטמפרטורת החדר  $20^{\circ}\text{C}$ .
- (3) **דוגמה-שינוי בנפח ובטמפרטורה**  
 גז המקיים את חוקי הגז האידיאלי נמצא במיכל סגור שיכול לשנות את נפחו.  
 א. מה יהיה השינוי  $v_{\text{rms}}$  של מולקולה בגז אם מכפילים את נפח המיכל כאשר מחזיקים את הלחץ והטמפרטורה קבועים.  
 ב. פי כמה צריכה להשתנות הטמפרטורה של הגז בשביל שה- $v_{\text{rms}}$  תגדל פי 2?
- (4) **דוגמה-מיכל הליום ממלא בלונים**  
 משתמשים במיכל הליום על מנת לנפח בלונים.  
 עם כל בלון שמנפחים מספר המולים של הגז במיכל קטנים.  
 האם מהירות המולקולות תגדל, תקטן או לא תשתנה?

### תשובות סופיות:

- (1)  $E_k = 6.07 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
- (2)  $v_{\text{rms O}_2} \approx 478 \frac{\text{m}}{\text{sec}}, v_{\text{rms N}_2} \approx 513 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$
- (3) א.  $v_{\text{rms}}$  לא ישתנה. ב. פי 4.
- (4)  $v_{\text{rms}}$  לא ישתנה, P יקטן.

# פיזיקה תרמית - קורס חלקי

פרק 3 - חום והחוק הראשון של התרמודינמיקה

תוכן העניינים

6	1. חום טמפרטורה ואנרגיה פנימית
7	2. קיבול חום ושיטת הקלורימטריה
9	3. חום כמוס
11	4. החוק הראשון וניתוח תהליכים פשוטים
16	5. קיבול חום של גזים ועקרון החלוקה השווה
17	6. הקשר בין לחץ ונפח בהתפשטות אדיאבטית
20	7. הולכה הסעה וקרינה
23	8. סיכום

## חום טמפרטורה ואנרגיה פנימית:

סיכום כללי:

הערות	תיאור	הנוסחה
האנרגיה הפנימית של הגז תלויה רק בטמפרטורה	אנרגיה פנימית של גז אידיאלי מונואטומי n - מספר המולים $R = 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ T - טמפרטורה בקלווין	$E_{\text{int}} = \frac{3}{2} nRT$
תלויה רק בטמפרטורה	עבור גז אידיאלי דו-אטומי	$E_{\text{int}} = \frac{5}{2} nRT$

שאלות:

(1) דוגמה - שורפים קלוריות

לאיזה גובה צריך לטפס אדם שמסתו 60 ק"ג בשביל לשרוף 100Cal (100kilocal)?

תשובות סופיות:

700m (1)

## קיבול חום ושיטת הקלורימטריה:

### סיכום כללי:

הערות	תיאור	הנוסחה
	c - קיבול חום סגולי ליחידת מסה	$Q = mc\Delta T$

### שאלות:

- (1) **דוגמה - מחממים ספל מים**  
 ספל מים שוקל 200 גרם ועשוי מזכוכית.  
 כמה חום דרוש בשביל לחמם את הספל מטמפרטורת החדר ( $20^{\circ}\text{C}$ ) ל-  $80^{\circ}\text{C}$  אם:  
 א. הספל ריק ממים.  
 ב. הספל מכיל 200 גרם מים (הנמצאים גם בטמפרטורת החדר בהתחלה).
- (2) **דוגמה - הקפה מתקרר**  
 מוזגים 200 סמ"ק קפה בטמפרטורה של  $90^{\circ}\text{C}$  לכוס זכוכית בעלת מסה של 150 גרם הנמצאת בטמפרטורה של  $20^{\circ}\text{C}$ .  
 מה תהיה טמפרטורת הקפה בכוס במצב שיווי משקל?  
 הנח כי המערכת מבודדת בקירוב.
- (3) **דוגמה - מציאת קיבול חום באמצעות קלורימטר**  
 נרצה למצוא את קיבול החום של תרכובת מתכות חדשה.  
 מחממים 100 גרם מהתרכובת ל-  $500^{\circ}\text{C}$  ומעבירים אותה במהירות לתוך קלורימטר.  
 הקלורימטר מורכב ממיכל אלומיניום בעל מסה של 0.200kg המכיל 0.500kg מים בטמפרטורה של  $22.4^{\circ}\text{C}$ . הטמפרטורה הסופית הנמדדת על ידי המדחום היא  $40.8^{\circ}\text{C}$ .  
 מהו קיבול החום הסגולי של התרכובת?  
 ניתן להזניח את החום שהולך למדחום והחום שיוצא מהבידוד.
- (4) **תרגיל וניסוי - קומקום מחמם מים**  
 קומקום חשמלי פועל בהספק של 1850 וואט.  
 כמה זמן ייקח לקומקום לחמם חצי ליטר של מים מטמפרטורה של  $22.2^{\circ}\text{C}$  ל-  $100^{\circ}\text{C}$ ?

- (5) **תרגיל וניסוי - קומקום מחמם מים - הפעם עם הקומקום**  
 המשך של התרגיל הראשון, גם הפעם נחמם חצי ליטר מים באותו הקומקום  
 (1850W) אבל הפעם לא נחמם את הקומקום לפני הניסוי ונחשב שוב, כמה זמן  
 ייקח לחמם את המים?  
 טמפרטורת החדר היא  $21.9^{\circ}\text{C}$  מסת הקומקום היא 754 גרם ונניח כי הוא עשוי  
 נירוסטה וקיבול החום של נירוסטה הוא:  $0.500 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ .

### תשובות סופיות:

- (1) א.  $10^4 \text{J}$       ב.  $6 \cdot 10^4 \text{J}$
- (2)  $81^{\circ}\text{C}$
- (3)  $911 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{C}}$
- (4) 90sec
- (5) 100sec

## חום כמוס:

### סיכום כללי:

הערות	תיאור	הנוסחה
$L_F$ - חום כמוס להתכה (מעבר ממוצק לנוזל או להיפך) $L_V$ - חום כמוס לרתיחה (מעבר מנוזל לגז או להיפך)	$L$ - החום הכמוס	$Q = m \cdot L$

### שאלות:

#### (1) דוגמה - קרח במים

מכניסים קוביית קרח בטמפרטורה של  $-15^{\circ}\text{C}$  ומסה של 300 גרם לתוך מיכל מים המכיל 1.5kg מים בטמפרטורה של  $20^{\circ}\text{C}$ .  
מה תהיה הטמפרטורה הסופית של התערובת?

#### (2) דוגמה - מציאת חום כמוס של כספית

לוקחים 1kg כספית הנמצאת במצב מוצק ובטמפרטורת ההתכה שלה,  $-39^{\circ}\text{C}$ . מניחים את הכספית בתוך קלורימטר המורכב ממיכל אלומיניום במסה של 0.40kg ומכיל 0.47kg מים בטמפרטורה של  $20^{\circ}\text{C}$ . הכספית מותכת והטמפרטורה הסופית של התערובת היא  $12^{\circ}\text{C}$ . מהו החום הכמוס הסגולי הדרוש להתכת כספית?  
קיבול החום הסגולי של כספית במצב הנוזלי הוא:  $c = 140 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}}$ .

#### (3) תרגיל וניסוי - מתי יגמרו המים בסיר

מחממים 400ml מים על הגז בסיר נירוסטה שמשקלו 177 גרם. מודדים את טמפרטורת המים פעם אחת ורואים שהיא  $60.0^{\circ}\text{C}$ . 16.68 שניות לאחר מכן הטמפרטורה היא  $63.3^{\circ}\text{C}$ .  
א. מהו קצב מעבר החום למים?  
מחממים את המים עד לנקודת הרתיחה  $100^{\circ}\text{C}$ .  
ב. כמה זמן ייקח לכל המים בסיר להפוך לאדים?

**(4) רוכב אופניים**

רוכב אופניים שותה 7 ליטר מים במהלך רכיבה של 3 שעות.  
 נניח כי בקירוב כל האנרגיה של הרוכב הולכת לאידוי המים דרך זיעה.  
 כמה אנרגיה בקילו-קלוריות השתמש הרוכב בנסיעה?  
 (מכיוון שהיעילות של הגוף היא בערך 20% ההערכה שכל האנרגיה הולכת לחום היא לא רחוקה).

**(5) ברזל בקלורימטר**

מחממים חתיכה של 300 גרם ברזל ל-180 מעלות צלזיוס ושמים אותה בקלורימטר העשוי ממיכל אלומיניום בעל מסה של 90 גרם שמכיל 285 גרם גליצרין ב-12 מעלות צלזיוס. הטמפרטורה הסופית של התערובת היא 38 מעלות צלזיוס. הערך מהו קיבול החום הסגולי של גליצרין.

**תשובות סופיות:**

**(1)**  $2^{\circ}\text{C}$

**(2)**  $11 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

**(3)** א.  $300 \frac{\text{J}}{\text{sec}}$  . ב. בערך 40 דקות.

**(4)** 4500kcal

**(5)**  $2.3 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{C}^{\circ}}$

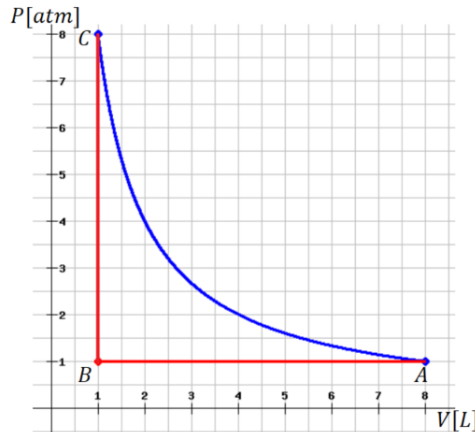
## החוק הראשון וניתוח תהליכים פשוטים:

### סיכום כללי:

הערות	תיאור	הנוסחה
<p>חום היא אנרגיה שעוברת רק בגלל הפרשי טמפרטורות. עבודה היא אנרגיה שעוברת מכל סיבה אחרת.</p> <p>אם המערכת מבצעת עבודה אז <math>W</math> יהיה חיובי ואם מתבצעת עבודה על המערכת אז <math>W</math> יהיה שלילי.</p> <p>אם חום נכנס למערכת אז <math>Q</math> חיובי ואם חום יוצא מהמערכת אז <math>Q</math> שלילי.</p>	החוק הראשון	$\Delta E_{int} = Q - W$
<p>כולל אנרגיה קינטית ופוטנציאלית של כל המערכת כגוף אחד (או של מרכז המסה שלה).</p> <p>בדרכ מתייחס למערכות מכניות כמו גופים קשיחים (אבן שנזרקת לדוגמה).</p>	חוק ראשון נוסחה מורחבת	$\Delta U + \Delta E_k + \Delta E_{int} = Q - W$
<p>מתרחש כאשר המערכת צמודה למאגר חום גדול והתהליך הוא קוויזיסטטי (מאוד איטי).</p>	$T = \text{const}$ $Q = W, \Delta E_{int} = 0$	תהליך איזותרמי - טמפרטורה קבועה
<p>מתרחש אם המערכת מבודדת או אם התהליך מהיר והחום לא מספיק לעבור.</p>	$\Delta E_{int} = W$	תהליך אדיאבטי - $Q = 0$
		תהליך איזוברי (לחץ קבוע) ואיזוכורי (נפח קבוע)
<p>חיובי כאשר הנפח גדל ושלילי כאשר הנפח קטן</p> <p>הנוסחה נכונה לגזים, נוזלים ולמוצקים</p>	<p><math>W</math> - עבודה שמבצעת המערכת על הסביבה</p> <p><math>P</math> - לחץ <math>V</math> - נפח</p>	$W = \int P dV$
<p>אי אפשר לצייר התפשטות חופשית בדיאגרמת P-V מכיוון שמשתני המצב לא מוגדרים במהלך ההתפשטות.</p>	<p>תהליך שבו גז מתפשט במרחב בצורה אדיאבטית ומבלי לעשות עבודה.</p>	התפשטות חופשית - (free expansion)

**שאלות:**

- (1) **דוגמה - חוק ראשון**  
מוסיפים למערכת של חום ועושים על המערכת עבודה של 1000J.  
מה השינוי באנרגיה הפנימית של המערכת?
- (2) **דוגמה - אנרגיה קינטית לחום**  
קליע במסה של 3.0 גרם חודר לתוך עץ במהירות של 300 מטר לשנייה.  
כמה חום נוסף למערכת קליע ועץ?
- (3) **דוגמה - חישוב חום בתהליך איזוברי ואיזוכורי**  
גז אידיאלי מתחיל מהמצב המתואר בנקודה A בגרף.  
דוחסים את הגז בתהליך איזוברי עד לנקודה B ולאחר מכן מחממים את הגז בתהליך איזוכורי עד לנקודה C.  
הגרף המחבר בין A ל-C הוא גרף איזותרמי.  
א. מהי העבודה הכוללת שנעשתה בכל התהליך A עד C?  
ב. מהו החום שנוסף לגז בכל התהליך?

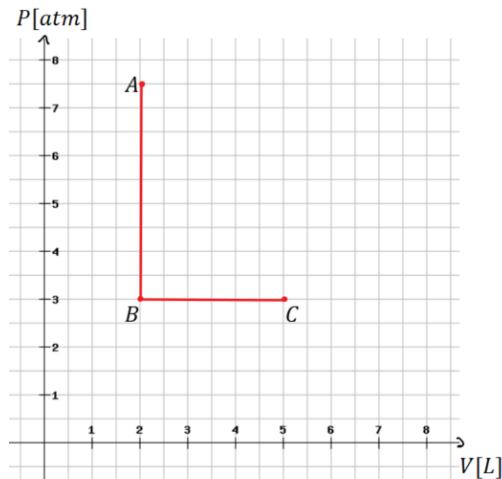


- (4) **דוגמה - עבודה של גז במנוע**  
במנוע 0.4 מול של גז אידיאלי מונואטומי מתרחבים במהירות ובצורה אדיאבטית כנגד הבוכנה. בתהליך, הטמפרטורה של הגז יורדת מ-1100K ל-400K.  
כמה עבודה ביצע הגז?
- (5) **מכונת בולמת**  
מכונת בולמת במשקל 1300 ק"ג נוסעת במהירות 80 קמ"ש.  
כמה חום נוצר במהלך הבלימה עד לעצירה מוחלטת?  
רשמו את התשובה בגאול ובקילו קלוריות.

**(6) תהליך נפח קבוע ולחץ קבוע**

גז אידיאלי עובר תהליך המורכב משני שלבים. בשלב הראשון, בגרף, AB, מאפשרים לחום לצאת מהגז תוך שמירה על נפח קבוע. כתוצאה מכך הלחץ של הגז יורד מ-7.5atm ל-3atm. בשלב השני, BC הגז מתרחב בלחץ קבוע מנפח 2.0L לנפח 5.0L ובכך חוזר לטמפרטורה שהייתה לו בתחילת כל התהליך. חשבו את :

- העבודה הכוללת שנעשתה על ידי הגז בתהליך.
- השינוי באנרגיה הפנימית של הגז.
- כמות החום הכוללת שיצאה או נכנסה לגז.



**(7) גז מתפשט איזותרמית**

1.50 מולים של גז אידיאלי בנפח  $2.50\text{m}^3$  ובטמפרטורה  $280^\circ\text{K}$  מתפשטים איזותרמית עד לנפח  $5.00\text{m}^3$ .  
 א. מהי העבודה שעושה הגז?  
 ב. מהו השינוי באנרגיה הפנימית של הגז?  
 ג. מהו החום שנוסף לגז?

**(8) גז מתפשט אדיאבטית**

שניים וחצי מולים של גז אידיאלי מונואטומי מתפשטים אדיאבטית ומבצעים  $1.3 \cdot 10^4 \text{ J}$  של עבודה בתהליך. מהו השינוי בטמפרטורה של הגז במהלך ההתפשטות?

**9) גז בתהליך ריבועי\***

גז אידיאלי עובר תהליך כפי שמתואר באיור, התהליך מתחיל במצב A ועושה סיבוב שלם עם השעון עד לחזרה למצב A.

בתהליך אחר שבו הגז עבר מהנקודה D לנקודה C בלחץ קבוע ידוע

$$\text{כי: } W_{D \rightarrow C} = 38 \text{ J}$$

בתהליך שלישי שהתרחש מהנקודה B לנקודה D ידוע כי:  $Q_{B \rightarrow D} = -85 \text{ J}$

ו-  $W_{B \rightarrow D} = -55 \text{ J}$  (סוג התהליך לא ידוע).

כמו כן ידוע כי:  $E_B - E_A = 15 \text{ J}$  ו-  $P_A = 2.2 P_D$ .

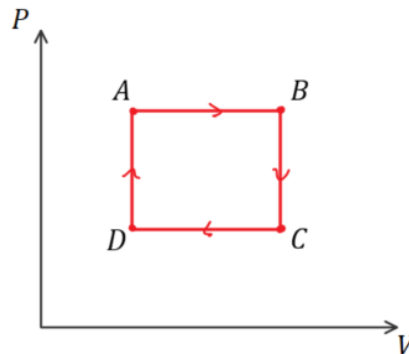
כל התהליכים התרכשו על אותו הגז.

א. תאר במילים כל שלב בתהליך הראשי, מהו סוג התהליך, האם נעשתה עבודה, האם האנרגיה הפנימית גדלה או קטנה, האם נכנס או יצא חום מהמערכת?

ב. מהי העבודה הכוללת שנעשתה על ידי הגז?

ג. מהי הנצילות של התהליך?

נצילות היא העבודה הכוללת שנעשתה חלקי החום שהושקע (כלומר נכנס לגז), כפול 100%.



**תשובות סופיות:**

- (1) 2500J
- (2) 135J
- (3) א. -710J    ב. 710J
- (4) 3500J
- (5)  $Q = 3.2 \cdot 10^5 \text{ J} = 77 \text{ kcal}$
- (6) א. 910J    ב. 0    ג. 910J
- (7) א. 2420J    ב. 0    ג. 2420J
- (8)  $-0.042^\circ\text{K}$
- (9) א.  $A \rightarrow B$  - תהליך בלחץ קבוע, הגז עושה עבודה על הסביבה, האנרגיה הפנימית גדלה, נכנס חום למערכת.
- $B \rightarrow C$  - תהליך בנפח קבוע, לא נעשית עבודה, האנרגיה הפנימית קטנה, חום יוצא מהמערכת.
- $C \rightarrow D$  - תהליך בלחץ קבוע, נעשית עבודה על הגז, האנרגיה הפנימית קטנה, חום יוצא מהמערכת.
- $D \rightarrow A$  - תהליך בנפח קבוע, לא נעשית עבודה, האנרגיה הפנימית גדלה, חום נכנס למערכת. ב. 46J    ג. 40%

## קיבול חום של גזים ועקרון החלוקה השווה:

סיכום כללי:

הערות	תיאור	הנוסחה
	$-Q_P/Q_V$ - כמות החום שעוברת בתהליך בנפח/לחץ קבוע. $C_P/C_V$ - קיבול חום בנפח/לחץ קבוע (למול)	$Q_V = nC_V\Delta T$ $Q_P = nC_P\Delta T$
	$m_{mol}$ - מסה מולרית. $C_P/C_V$ - קיבול חום בנפח/לחץ קבוע (ליחידת מסה)	$C_V = m_{mol}c_V$ $C_P = m_{mol}c_P$
	ההפרש בין קיבול החום בלחץ קבוע לקיבול החום בנפח קבוע תמיד שווה לקבוע R	$C_P - C_V = R$

שאלות:

### (1) אנשים מחממים אולם קולנוע

אולם קולנוע מכיל 1800 מקומות ישיבה. נפח האולם הוא:  $2.0 \cdot 10^4 \text{ m}^3$ . בערב הבכורה של הסרט "תרגיל חם" האולם היה מלא ומערכת האוורור התקלקלה. בכמה מעלות תעלה הטמפרטורה במשך השעתיים של הקרנת הסרט אם אדם ממוצע פולט חום בקצב של 70 וואט. הנח שהאוויר הוא גז אידיאלי דואטומי וטמפרטורת החדר היא בערך  $20^\circ\text{C}$ .

### (2) לחץ לינארי בטמפרטורה\*

גז אידיאלי דו אטומי מכיל 3.00 מולים בלחץ של 1.00 atm ובטמפרטורה של  $430^\circ\text{K}$ . הגז עובר תהליך שבו הלחץ שלו גדל לינארית עם הטמפרטורה. הטמפרטורה הסופית היא  $680^\circ\text{K}$  והלחץ הסופי הוא 1.80 atm. הנח שבכל התהליך יש 5 דרגות חופש פעילות.

א. מהו השינוי באנרגיה הפנימית של הגז?  
 ב. מהי העבודה שנעשתה על ידי הגז?  
 ג. החום שנוסף לגז?

תשובות סופיות:

(1)  $53^\circ\text{C}$

(2) א. 15600J    ב. -1720J    ג. 13900J

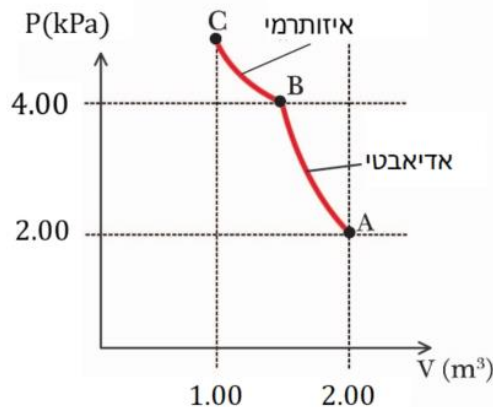
## הקשר בין לחץ ונפח בהתפשטות אדיאבטית:

סיכום כללי:

הערות	תיאור	הנוסחה
	הקשר בין לחץ ונפח בתהליך אדיאבטי קוויזיסטטי	$P \cdot V^\gamma = \text{const}$

שאלות:

- (1) **דוגמה - מכווצים גז אדיאבטית ואיזותרמית**  
 גז אידיאלי מונואטומי עובר תהליך כפי שמתואר בגרף. התהליך מתחיל מהמצב A והגז עובר כיווץ אדיאבטי עד למצב B ומשם הוא מכווץ איזותרמית עד לנקודה C.  
 נתון:  $P_A = 2.00 \text{ kPa}$ ,  $V_A = 2.00 \text{ m}^3$ ,  $P_B = 4.00 \text{ kPa}$ ,  $V_C = 1.00 \text{ m}^3$ .  
 א. מצא את  $V_B$  ו- $P_C$  אינם ידועים.  
 ב. מהי העבודה הכוללת שנעשתה על הגז בתהליך?



- (2) **לחץ וטמפרטורה בהתפשטות אדיאבטית**  
 1.00 mol של גז מונואטומי אידיאלי בלחץ של 1.00 atm ובטמפרטורה של  $20^\circ\text{C}$  מתפשט אדיאבטית לנפח הגדול פי 2.25 מנפחו בהתחלה. מהם הלחץ והטמפרטורה הסופיים של הגז?
- (3) **גז דו-אטומי מתפשט אדיאבטית**  
 גז דו-אטומי מתפשט אדיאבטית. הטמפרטורה בהתחלה היא  $15^\circ\text{C}$  והטמפרטורה בסוף היא  $-25^\circ\text{C}$ . הנפח בהתחלה הוא:  $0.036 \text{ m}^3$ . מהו נפח הגז בסוף התהליך?

**(4) גז עובר תהליך בשלושה שלבים**

1.00mol של גז אידיאלי מונואטומי שנמצא בלחץ 1.00atm עובר את התהליך הבא:

שלב 1 - הגז מתפשט אדיאבטית מ-  $T_A = 578^\circ\text{K}$  עד ל-  $T_B = 388^\circ\text{K}$ .

שלב 2 - הגז נדחס בלחץ קבוע עד שהטמפרטורה שלו מגיעה ל-  $T_C$ .

שלב 3 - הגז חוזר לטמפרטורה והלחץ הראשוניים שלו בתהליך של נפח קבוע.

א. שרטטו את התהליך בדיאגרמת  $P - V$ .

ב. מהו  $T_C$ ?

ג. חשבו את השינוי באנרגיה הפנימית, את העבודה שביצע הגז ואת החום

שנוסף לגז בכל שלב בנפרד ובתהליך כולו.

**(5) צבר אוויר עולה בגובה \*\***

צבר אוויר הוא אוסף של מולקולות בעלי משתני מצב אחידים (לחץ וטמפ'). כשצבר אוויר עולה בגובה הוא משנה את הלחץ שלו בהתאם ללחץ של האוויר

$$\text{מסביבו, ולפי הנוסחה: } \frac{dP}{dy} = -\rho g$$

כאשר  $\rho$  הוא צפיפות המסה של הצבר והוא תלוי בגובה.

במהלך התנועה כלפי מעלה, הנפח גדל, ומכיוון שאוויר הוא מוליך חום גרוע

אפשר להניח שההתפשטות היא אדיאבטית.

א. הראה שעבור גז אידיאלי שעובר תהליך אדיאבטי:  $P^{1-\gamma}T^\gamma = \text{const}$

ב. הראה כי הקשר בין הלחץ לטמפרטורה של הצבר נתון לפי

$$\text{הנוסחה: } (1 - \gamma)(-\rho g) + \gamma \frac{P}{T} \frac{dT}{dy} = 0$$

ג. הראה כי התלות של הטמפרטורה בגובה היא:  $\frac{dT}{dy} = \frac{1-\gamma}{\gamma} \frac{mg}{k}$

כאשר  $m$  היא מסה ממוצעת של מולקולה ו- $k$  הוא קבוע בולצמן.

ד. בהינתן שאוויר הוא גז דו אטומי עם מסה ממוצעת של  $29u$ ,

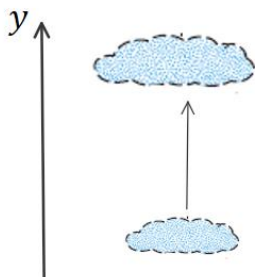
$$\text{הראה ש- } \frac{dT}{dy} = -9.8^\circ\text{C/k}$$

ה. בקליפורניה ישנם רוחות שמגיעות מההרים של מדבר סירה בנבדה.

גובה ההרים הוא כ-4000m. הרוחות מגיעות לעמק המוות שגובהו -100m,

ביחס לפני הים. אם טמפרטורת הרוח היא  $5^\circ\text{C}$  בהרים של נוודה מה תהיה

הטמפרטורה של הרוח בעמק?



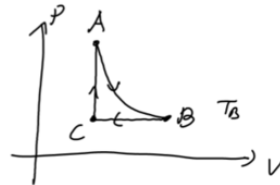
**תשובות סופיות:**

(1) א.  $1.32 \cdot m^3$  ב.  $3.4 \cdot 10^3 J$

(2)  $P = 0.258 \text{ atm}$ ,  $T = -103^\circ C$

(3)  $0.052 m^3$

(4) א. ב.  $214^\circ K$



ג. שלב AB:  $Q = 0$ ,  $\Delta E_{int} = -2370 J$ ,  $W = 2370 J$

שלב BC:  $Q = -2170 J$ ,  $\Delta E_{int} = -2170 J$ ,  $W = -1450 J$

שלב CA:  $Q = 3030 J = \Delta E_{int}$ ,  $W = 0$

כל התהליך:  $Q = 920 J$ ,  $\Delta E_{int} = 0$ ,  $W = 920 J$

(5) א. הוכחה. ב. הוכחה. ג. הוכחה. ד. הוכחה. ה.  $35^\circ C$

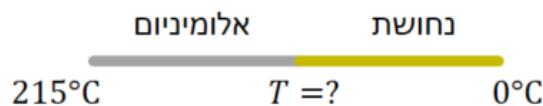
## הולכה הסעה וקרינה:

### סיכום כללי:

הערות	תיאור	הנוסחה
<p>אם אחד מהמשתנים אינו קבוע אז עוברים לנוסחה דיפרנציאלית</p> $\frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx}$ <p>המינוס בנוסחה אומר שקצב הולכת החום הוא בכיוון הפוך לגרדיאנט הטמפרטורה (כלומר קצב הולכת החום הוא מהטמפרטורה הגבוהה לנמוכה)</p>	<p><math>-\frac{\Delta Q}{\Delta t}</math> - קצב הולכת חום</p> <p><math>k</math> - מוליכות תרמית - תלוי בסוג החומר, מופיע בטבלה.</p> <p><math>A</math> - שטח חתך.</p> <p><math>l</math> - אורך.</p>	$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = kA \frac{(T_1 - T_2)}{l}$
<p><math>R</math> גבוה אומר מבודד טוב. לשים לב ש-<math>R</math> תלוי גם באורך של החומר ולא רק בסוג.</p>	<p>R- value</p>	$R = \frac{l}{k}$
<p>שימו לב שהקצב תלוי בטמפרטורה ברביעית. <math>\epsilon</math> - תכונה של פני הגוף שקורן בגופים שחורים (לדוגמה פחם) , <math>\epsilon \approx 1</math> , במתכות מבריקות <math>\epsilon \approx 0</math></p>	<p>משוואת סטפן בולצמן - קצב החום הנפלט מגוף ע"י קרינה.</p> $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$ <p>קבוע סטפן בולצמן.</p> <p><math>T</math> - הטמפרטורה של הגוף הפולט.</p> <p><math>\epsilon</math> - קירון (אמיסיביות) <math>0 &lt; \epsilon &lt; 1</math></p>	$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \epsilon \sigma A T^4$
<p>האמיסיביות זהה לקליטה ופליטה. הקצב של קליטה קשור לטמפרטורה של הסביבה ברביעית.</p>	<p>קצב קליטה של קרינה. <math>T_2</math> - הטמפרטורה של הסביבה.</p>	$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \epsilon \sigma A T_2^4$
	<p>הנטו של קצב פליטת הקרינה (פליטה פחות קליטה) <math>T_1</math> - הטמפרטורה של הגוף הפולט. <math>T_2</math> - הטמפרטורה של הסביבה.</p>	$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \epsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4)$
<p>הקבוע הסולרי <math>1350 \frac{W}{m^2 \cdot s}</math></p> <p>האטמוספירה יכולה לספוג עד 70% מהקרינה.</p> <p>ביום בהיר הקבוע בערך <math>1000 \frac{W}{m^2 \cdot s}</math></p>	<p>כמות החום שסופג גוף כתוצאה מקרינת השמש ביום בהיר</p>	$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \left(1000 \frac{W}{m^2 \cdot s}\right) \epsilon A \cos \theta$

## שאלות:

- (1) **דוגמה - איבוד חום דרך חלונות בבית**  
 מקור רציני לאיבוד החום בבית הוא דרך החלונות.  
 חשבו את קצב איבוד החום דרך חלון זכוכית בגודל  $1.5\text{m} \times 1.0\text{m}$  ועובי  $2.8\text{mm}$  אם הטמפרטורה בצד הפנימי של החלון היא  $18^\circ\text{C}$  ובצד החיצוני היא  $17^\circ\text{C}$ .
- (2) **דוגמה - קירור באמצעות קרינה**  
 אדם יושב בחדר לובש בגד ים בלבד.  
 הקירות של החדר נמצאים בטמפרטורה של  $15^\circ\text{C}$ .  
 הערך את כמות החום שהאדם מאבד כתוצאה מקרינה.  
 הנח שטמפרטורת העור היא בערך  $34^\circ\text{C}$  ו- $\varepsilon = 0.70$ .  
 שטח הפנים של האדם שבמגע עם האוויר הוא:  $-1.5\text{m}^2$ .
- (3) **דוגמה - הערך את הרדיוס של הכוכב ביטלגוס**  
 כוכב הענק ביטלגוס פולט קרינה בקצב שהוא פי  $10^4$  גדול מהקצב של השמש שלנו.  
 הטמפרטורה על פני הכוכב ביטלגוס היא בערך חצי מזו של השמש.  
 הערך את הרדיוס של הכוכב אם  $\varepsilon = 1$  עבור השמש וביטלגוס ורדיוס השמש הוא:  $R_s = 7 \cdot 10^8\text{m}$ . הנוסחה לשטח פני כדור היא:  $4\pi R^2$ .
- (4) **מוט נחושת עם טמפרטורות שונות בקצוות**  
 מוט נחושת באורך של  $42\text{cm}$  וקוטר  $2.6\text{cm}$  מוחזק בצד אחד בטמפרטורה של  $320^\circ\text{C}$  ובצידו השני המוט טבול במים בטמפרטורה של  $20^\circ\text{C}$ .  
 חשבו את קצב מעבר החום במוט.
- (5) **מוט נחושת מחובר למוט אלומיניום**  
 מוט נחושת מחובר בקצה למוט אלומיניום, שני המוטות בעלי אותו שטח חתך ואותו האורך. הקצה השני של האלומיניום נמצא בתוך תנור בטמפרטורה קבועה של  $215^\circ\text{C}$  והקצה השני של הנחושת נמצא בתוך קרח בטמפרטורה קבועה של  $0^\circ\text{C}$ .  
 חשבו את הטמפרטורה בנקודת החיבור של המוטות.



**6 קרח נמס בצידנית**

צידנית בגודל  $20\text{c. m} \times 30\text{c. m} \times 50\text{c. m}$  עשויה מקלקר. הקירות של הצידנית הן בעובי  $1.5\text{c. m}$ . ממלאים את הצידנית בקרח ב- $0^{\circ}\text{C}$ . כמה זמן ייקח לקרח להתמוסס אם הצידנית נמצאת בחדר בו הטמפרטורה היא  $32^{\circ}\text{C}$ ?

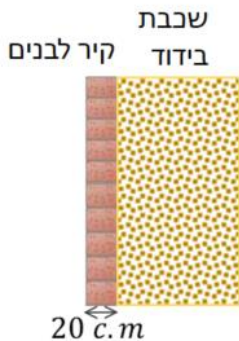
המוליכות התרמית של קלקר היא:  $0.033 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{k}}$  והצפיפות של קרח

היא:  $9.17 \cdot 10^2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ .

**7 קרח נמס בשמש**

כמה זמן לוקח לשמש להמיס קוביית קרח ביום בהיר אם הקרח נמצא בטמפרטורה של  $0^{\circ}\text{C}$  וצורתו היא משטח ישר בגודל  $1.0\text{m}^2$  ובעובי  $1.0\text{c. m}$ . הנח שהזווית של הקרניים עם האנך למשטח היא  $30^{\circ}$  והאמסיביות של הקרח היא  $0.050$ .

**8 איבוד חום דרך קיר עם שכבת בידוד**



בידוד של קיר מורכב משכבה של לבנים ברוחב של  $20\text{c. m}$  שצמודה לשכבת בידוד נוספת בעלת:  $\text{-value} = 3 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{C}^{\circ}}{\text{J}} \cdot \text{R}$ . מהו קצב החום המועבר אם השטח של הקיר הוא  $15\text{m}^2$  והפרש הטמפרטורות הוא  $30^{\circ}\text{C}$ .

**תשובות סופיות:**

(1)  $450 \frac{\text{J}}{\text{sec}}$

(2)  $120 \frac{\text{J}}{\text{sec}}$

(3)  $2.8 \cdot 10^{11} \text{m}$

(4)  $140 \frac{\text{J}}{\text{sec}}$

(5)  $74^{\circ}\text{C}$

(6) בערך 58 שעות.

(7) בערך 20 שעות.

(8)  $140 \frac{\text{J}}{\text{sec}}$

## סיכום:

### טבלאות:

קיבול חום סגולי (Specific Heats) (ב 1 atm ו- 20°C אלא אם מצוין אחרת)		
Substance	Specific Heat, c	
	kcal/kg · C° (= cal/g · C°)	J/kg · C°
Aluminum	0.22	900
Alcohol(ryhyl)	0.58	2400
Copper	0.093	390
Glass	0.20	840
Iron or steel	0.11	450
Lead	0.031	130
Marble	0.21	860
Mercury	0.033	140
Silver	0.056	230
Wood	0.4	1700
Water		
Ice (-5°C)	0.50	2100
Liquid (15°C)	1.00	4186
Steam (110°C)	0.48	2010
Human body (average)	0.83	3470
Protein	0.4	1700

חום כמס (בלחץ של 1 atm)						
Substance	Melting Point (°C)	Heat of Fusion		Boiling Point (°C)	Heat of Vaporization	
		kcal/kg <sup>+</sup>	kJ/kg		kcal/kg <sup>+</sup>	kJ/kg
Oxygen	-218.8	3.3	14	-183	51	210
Nitrogen	-210.0	6.1	26	-195.8	48	200
Ethyl alcohol	-114	25	104	78	204	850
Ammonia	-117	8.0	33	-33.4	33	137
Water	0	79.7	333	100	539	2260
Lead	327	5.9	25	1750	208	870
Silver	961	21	88	2193	558	2300
Iron	1808	69.1	289	3023	1520	6340
Tungsten	3410	44	184	5900	1150	4800

קיבול חום של גזים ב 15°C						
Gas	Specific heats (kcal/kg · K)		Molar specific heats (cal/mol · K)		$C_V - C_P$ (cal/mol · K)	$\gamma = \frac{C_P}{C_V}$
	$c_V$	$c_P$	$C_V$	$C_P$		
Monoatomic						
He	0.75	1.15	2.98	4.97	1.99	1.67
Ne	0.148	0.246	2.98	4.97	1.99	1.67
Diatomic						
N <sub>2</sub>	0.177	0.248	4.96	6.95	1.99	1.40
O <sub>2</sub>	0.155	0.218	5.04	7.03	2.00	1.40
Triatomic						
CO <sub>2</sub>	0.153	0.199	6.80	8.82	2.03	1.30
H <sub>2</sub> O (100°C)	0.350	0.482	6.20	8.20	2.00	1.32

מוליכויות תרמיות		
Substance	Thermal Conductivity, k	
	kcal (s.m.C°)	J (s.m.C°)
Silver	10x10 <sup>-2</sup>	420
Copper	9.2x10 <sup>-2</sup>	380
Aluminum	5.0x10 <sup>-2</sup>	200
Steel	1.1x10 <sup>-2</sup>	40
Ice	5x10 <sup>-4</sup>	2
Glass	2.0x10 <sup>-4</sup>	0.84
Brick	2.0x10 <sup>-4</sup>	0.84
Concrete	2.0x10 <sup>-4</sup>	0.84
Water	1.4x10 <sup>-4</sup>	0.56
Human tissue	0.5x10 <sup>-4</sup>	0.2
Wood	0.3x10 <sup>-4</sup>	0.1
Fiberglass	0.12x10 <sup>-4</sup>	0.048
Cork	01x10 <sup>-4</sup>	0.042
Wood	0.1x10 <sup>-4</sup>	0.040
Goose down	0.06x10 <sup>-4</sup>	0.025
Polyurethane	0.06x10 <sup>-4</sup>	0.024
Air	0.055x10 <sup>-4</sup>	0.023

# פיזיקה תרמית - קורס חלקי

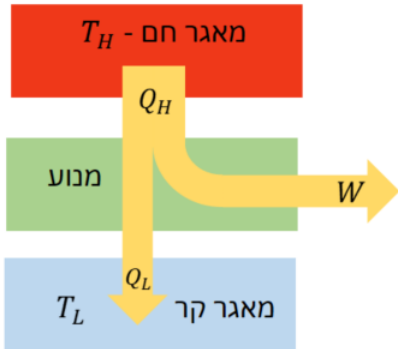
פרק 4 - החוק השני של התרמודינמיקה

תוכן העניינים

1. הקדמה לחוק השני של התרמודינמיקה ומנועי חום ..... 25
2. תהליכים הפיכים ובלתי הפיכים ומנוע קרנו ..... 28
3. מקררים מזגנים ומשאבות חום ..... 31
4. אנטרופיה ..... 33
5. סיכום ..... (ללא ספר) 37
6. פרשנות סטטיסטית לאנטרופיה והחוק השני ..... 37

## הקדמה לחוק השני של התרמודינמיקה ומנועי חום:

סיכום כללי:

הערות	תיאור	הנוסחה
<p>שימו לב לסימנים! כל הסימנים חיוביים!</p> <p><math>T_H</math> ו-<math>T_L</math> נקראות טמפרטורות העבודה</p>	<p><math>Q_H</math> - כמות החום שיוצאת מהמאגר החם. <math>Q_L</math> - כמות החום שנכנסת אל המאגר הקר. <math>W</math> - העבודה שהמנוע מבצע על הסביבה.</p>	 <p><math>Q_H = W + Q_L</math></p>
		$\eta = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$

שאלות:

**1) דוגמה - נצילות של מנוע מכונית**

- למנוע של מכונית יש נצילות של 20%. המנוע מפיק  $25\text{kJ}$  של עבודה כל שניה.  
 א. כמה חום דרוש להכניס למנוע כל שניה?  
 ב. כמה חום נפלט מהמנוע כל שניה?

**2) חישוב נצילות של מנוע חום**

- מנוע חום פולט  $6900\text{J}$  של חום כאשר הוא מבצע עבודה של  $2300\text{J}$ .  
 מה הנצילות של המנוע באחוזים?

**3) חום שפולטת תחנת כוח**

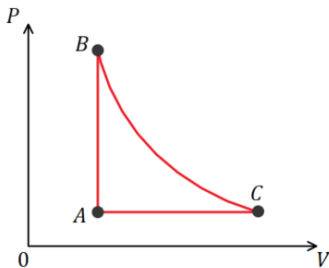
- תחנת כוח מייצרת  $560\text{MW}$  של הספק חשמלי.  
 העריכו את החום שנפלט כל שניה אם הנצילות של התחנה היא 35%.

**(4) מנוע 6 צילינדרים**

- למנוע עם 6 צילינדרים של אוטו יש נצילות של 24%. המנוע מספק 180J של עבודה בכל מחזור עבור כל צילינדר. המנוע עושה 25 מחזורים בשניה.
- מהי העבודה הכוללת שמבצע המנוע בשניה?
  - מהו החום שנוצר משריפת הדלק כל שניה?
  - אם האנרגיה הנוצרת מדלק היא 32MJ לליטר, לכמה זמן מחזיק מיכל דלק מלא המכיל 40 ליטר דלק?

**(5) מנוע הפיך עם גז ארגון**

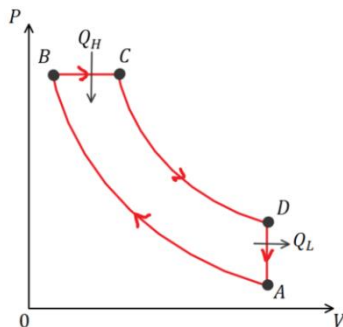
- מנוע הפיך מכיל 1.00mol של גז ארגון, גז מונואטומי כמעט אידיאלי. התהליך שעובר המנוע מתואר באיור כאשר הגז בהתחלה בנקודה A ב-STP. הנקודות B ו-C נמצאות על עקומה איזותרמית בטמפרטורה  $T = 433K$ . התהליך AB הוא תהליך בנפח קבוע והתהליך AC הוא תהליך בלחץ קבוע.



- האם המנוע מבצע את התהליך באיור עם כיוון השעון או נגד השעון?
- מהי הנצילות של המנוע?

**(6) מנוע בנזין אידיאלי**

- אפשר לתאר את הפעולה של מנוע דיזל בקירוב על ידי התהליך המחזורי באיור. אוויר נשאב לצילינדר בפעימת יניקה (לא חלק מהמחזור באיור). האוויר נדחס אדיאבטית, שלב AB. בנקודה B דלק דיזל מוזרק לתוך הצילינדר. הדלק נשרף ישר כי הטמפרטורה מאוד גבוהה. הבעירה היא יחסית איטית ובמהלך החלק הראשון של פעימת העבודה הגז מתפשט כמעט בנפח קבוע, שלב BC. בשלב השני של פעימת העבודה, אחרי שהבעירה מסתיימת, הגז מתפשט אדיאבטית, שלב CD. שלב DA מתאר את פעימת הפליטה.



- הראה שעבור מנוע שעובר את התהליך הנ"ל עם גז אידיאלי הנצילות האידיאלית היא:

$$\eta = 1 - \frac{(V_A/V_C)^{-\gamma} - (V_A/V_B)^{-\gamma}}{\gamma[(V_A/V_C)^{-1} - (V_A/V_B)^{-1}]}$$

- חשב את הנצילות אם הגז הוא דו אטומי,  $V_A/V_B = 16$  ו- $V_A/V_C = 4.5$ .

**תשובות סופיות:**

- (1) א. 125kJ    ב. 100kJ
- (2) 25%
- (3) 1000J
- (4) א. 27000J    ב. 110000J    ג. 3.2hr
- (5) א. עם השעון.    ב. 9%
- (6) א. הוכחה.    ב. 55%

## תהליכים הפיכים ובלתי הפיכים ומנוע קרנו:

סיכום כללי:

הערות	תיאור	הנוסחה
<p>השטח שסגור בתוך הלולאה שווה לעבודה נטו שנעשית על ידי המנוע. מורכב מתהליכים הפיכים ולכן לא קיים במציאות, ניתן רק לשאוף אליו.</p>	מחזור קרנו	
<p>נקראת גם נצילות אידיאלית או מקסימאלית</p>	נצילות במנוע קרנו	$\eta_{קרנו} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$

שאלות:

### (1) דוגמה - טענה לא הגיונית

יצרן רכב טוען כי במנוע שייצר קצב הכניסה של החום הוא  $9.1\text{kJ}$  בטמפרטורה של  $162^\circ\text{C}$  וקצב הפליטה של החום הוא  $4.1\text{kJ}$  בטמפרטורה של  $22^\circ\text{C}$ . האם אתם מאמינים ליצרן?

### (2) דוגמה - נצילות של מנוע בעירה

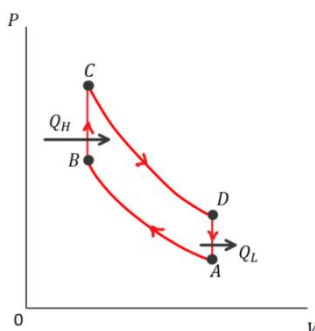
המחזור של מנוע בעירה מתואר באיור. הניחו שחומר העבודה הוא גז אידיאלי.

א. הראו כי הנצילות של המנוע

$$\eta = 1 - \left(\frac{V_A}{V_B}\right)^{1-\gamma}$$

ב. חשבו את הנצילות של המנוע אם יחס

הדחיסה הוא:  $\frac{V_A}{V_B} = 7.0$  והגז הוא דואטומי בדומה ל- $\text{O}_2$  או  $\text{N}_2$ .





**(3) מנוע חום עם חנקן נוזלי**

זה לא הכרחי שהמאגר החום של מנוע חום יהיה יותר חם מהסביבה. חנקן נוזלי זול בערך כמו בקבוק מים והטמפרטורה שלו היא בערך 77K. מה תהיה הנצילות המקסימלית של מנוע הפועל בין הטמפרטורה של חנקן נוזלי לטמפרטורת החדר 293K?

**(4) מנוע 1100W**

מנוע קרנו פועל בטמפרטורות 190°C ו- 25°C. ההספק של המנוע הוא 1100W. כמה חום פולט המנוע כל שניה?

**(5) מטפס הרים**

הניחו שאדם ששוקל 70kg צריך  $4.3 \cdot 10^3 \text{ kcal}$  של אנרגיה בשביל יום אחד של פעילות. העריכו את הגובה המקסימאלי שאותו אדם יכול לטפס על הר עם כמות זו של אנרגיה. כהערכה גסה אפשר להתייחס לאדם כמנוע הפועל בין טמפרטורות הגוף 37°C לטמפרטורת הסביבה 20°C.

**(6) טמפרטורת עבודה בנסיעה**

מכונית מייצרת עבודה בקצב של בערך  $7 \frac{\text{kJ}}{\text{sec}}$  כאשר היא נוסעת במהירות

קבועה של  $25 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$  בכביש אופקי, זוהי עבודה כנגד כוח החיכוך.

המכונית יכולה לנסוע 14km לכל ליטר דלק.

מה הערך המינימלי של  $T_H$  אם  $T_L = 25^\circ\text{C}$  והאנרגיה הזמינה מליטר אחד של

דלק היא:  $3.2 \cdot 10^7 \text{ J}$ ?

**(7) חישובים במחזור קרנו**

מול אחד של גז מונואטומי עובר תהליך של מחזור קרנו,

כאשר  $T_H = 380^\circ\text{C}$  ו-  $T_L = 180^\circ\text{C}$ .

הלחץ ההתחלתי הוא 7.8atm.

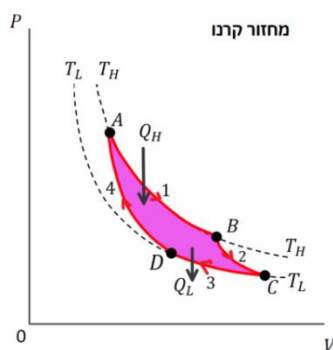
במהלך ההתרחבות האיזותרמית הנפח מוכפל.

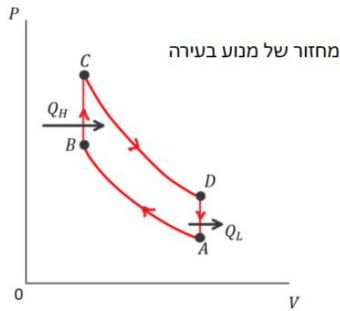
א. מהם הלחץ והנפח בנקודות: A, B, C, D?

ב. מצאו את  $Q$ ,  $W$  ו-  $\Delta E_{\text{int}}$  עבור כל שלב בתהליך.

ג. חשבו את הנצילות של המנוע באמצעות

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad \text{ו-} \quad \eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$





**(8) יחס דחיסה במנוע בעירה**

במנוע שמתנהג בקירוב כמו המחזור של מנוע בעירה הדלק מוצת בסוף שלב הדחיסה האדיאבטית. טמפרטורת ההצתה של דלק מסוג אוקטן 95 היא  $280^{\circ}\text{C}$  ובהנחה שחומר העבודה הוא גז שמגיע מהאוויר (דו אטומי בטמפרטורה  $25^{\circ}\text{C}$ ) קבעו מהו יחס הדחיסה

המירבי  $\frac{V_A}{V_B}$ .

**תשובות סופיות:**

- (1) לא.
- (2) א. הוכחה. ב. 54%
- (3) 74%
- (4) 5000J
- (5) 1400m
- (6)  $400^{\circ}\text{K}$
- (7) א.  $P_B = 4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ,  $V_B = 1.4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$ ,  $P_A = 7.9 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ,  $V_A = 0.69 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$
- ב.  $P_D = 3.2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ,  $V_D = 1.2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$ ,  $P_C = 1.6 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ,  $V_C = 2.4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$
- ג.  $\Delta E_{\text{int}_{BC}} = -2500 \text{ J}$ ,  $Q_{BC} = 0$ ,  $W_{BC} = 2500 \text{ J}$ ,  $\Delta E_{\text{int}_{AB}} = 0$ ,  $Q_{AB} = W_{AB} = 3800 \text{ J}$
- ד.  $\Delta E_{\text{int}_{DA}} = 2500 \text{ J}$ ,  $Q_{DA} = 0$ ,  $W_{DA} = -2500 \text{ J}$ ,  $\Delta E_{\text{int}_{CD}} = 0$ ,  $Q_{CD} = W_{CD} = -2600 \text{ J}$
- ה.  $\eta = 31\%$
- (8) 7.1

## מקררים מזגנים ומשאבות חום:

סיכום כללי:

הערות	תיאור	הנוסחה
	<p>מקדם היעילות של מקרר או מזגן</p>	$COP = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L}$
	<p>עבור מקרר או מזגן אידיאלי (לא מושלם)</p>	$COP_{ideal} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$
<p>תמיד גדול מאחד</p>	<p>מקדם היעילות של משאבת חום</p>	$COP = \frac{Q_H}{W}$

שאלות:

**(1) דוגמה - מכינים קרח**

למקפיא יש מקדם יעילות של 3.6 והוא עובד בהספק של 200W. כמה זמן ייקח למקפיא להקפיא מגש קוביות קרח אם המגש הוכנס למקרר המכיל 400gr מים ב-0°C?

**(2) דוגמה - משאבת חום**

למשאבת חום מקדם יעילות של 3.0 והספק של 1200W.  
 א. כמה חום היא מוסיפה לחדר כל שניה?  
 ב. אם הופכים את פעולת המשאבה בקיץ כך שתשמש כמזגן, מה תצפו שיהיה מקדם היעילות שלה?

**(3) מקדם יעילות של מקרר אידיאלי**  
מקרר אידיאלי מחזיק את הטמפרטורה בתוכו ב- $4^{\circ}\text{C}$  כאשר הטמפרטורה בבית היא  $25^{\circ}\text{C}$ . מהו מקדם היעילות של המקרר?

**(4) מנוע קרנו עובד הפוך**  
למנוע אידיאלי (מנוע קרנו) יש נצילות של 37%. אם היה אפשר להפעיל את המנוע הפוך כך שיעבוד בתור משאבת חום, מה היה מקדם היעילות של המנוע?

**(5) מקרר קרנו אידיאלי מקפיא מים**  
"מקרר קרנו" (מנוע קרנו שעובד הפוך) מוציא חום מתא ההקפאה הנמצא בטמפרטורה של  $-15^{\circ}\text{C}$  ופולט אותו לחדר בטמפרטורה של  $25^{\circ}\text{C}$ .  
א. הראו כי אם מקדם היעילות של מקרר מוגדר לפי:  $\text{COP} = \frac{Q_L}{W}$   
אז מקדם היעילות של מקרר קרנו הוא:  $\text{COP}_{\text{ideal}} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$ .  
ב. כמה עבודה מבצע המנוע לשנות  $0.6\text{kg}$  של מים ב- $25^{\circ}\text{C}$  לקרח ב- $-15^{\circ}\text{C}$ ?  
אם ההספק של המדחס במנוע הוא  $160\text{W}$ , מהו הזמן המינימלי הדרוש להקפיא מים מטמפרטורה של  $25^{\circ}\text{C}$  לקרח ב- $0^{\circ}\text{C}$ ?

**(6) משאבת חום לא אידיאלית**  
משאבת חום פועלת כמזגן ושומרת את הטמפרטורה בתוך הבניין על  $24^{\circ}\text{C}$  כאשר הטמפרטורה בחוץ היא  $40^{\circ}\text{C}$ .  
בשביל לבצע זאת המשאבה שואבת  $3 \cdot 10^7\text{J}$  חום בשעה מתוך הבניין ביעילות של 25% מהיעילות האידיאלית (זו של מקרר קרנו).  
א. מהו מקדם היעילות של המשאבה?  
ב. מהו ההספק של המדחס במשאבה? רשום תשובה בכוח סוס.

### תשובות סופיות:

- (1) בערך 3 דקות.  
(2) א.  $4600\text{J}$  ב. 2  
(3) 13  
(4) 2.7  
(5) א. הוכחה. ב.  $4.4 \cdot 10^4\text{J}$   
(6) א. 4.6 ב. 2.4HP

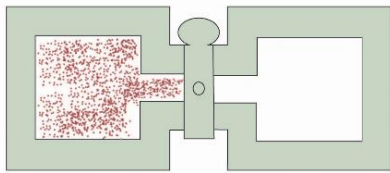
## אנטרופיה:

### סיכום כללי:

הערות	תיאור	הנוסחה
רק בטמפרטורה קבועה ובתהליך הפיך T - בקלווין!	Q - כמות החום שנכנסת למערכת	$\Delta S = \frac{Q}{T}$
	האנטרופיה היא משתנה מצב של המערכת	השינוי באנטרופיה לא תלוי בתהליך

### שאלות:

- (1) **דוגמה - שינוי באנטרופיה כשמערבבים מים**  
מערבבים 5kg מים ב-20°C עם 5kg מים ב-24°C.  
א. מה תהיה הטמפרטורה הסופית של המים המערבבים?  
ב. העריכו את השינוי באנטרופיה של כל המערכת.



- (2) **דוגמה - שינוי באנטרופיה בהתפשטות חופשית**  
גז מתפשט בצורה אדיאבטית וחופשית  
(כפי שמתואר בפרק הקודם בסרטון התפשטות  
חופשית) מנפח  $V_1$  לנפח  $V_2$ .  
א. חשבו את השינוי באנטרופיה של הגז.  
ב. מהו השינוי באנטרופיה של הסביבה?  
ג. הערך את השינוי באנטרופיה עבור  $n = 1.00$  ו- $V_2 = 2.00V_1$ .

- (3) **דוגמה - נחושת חמה נזרקת לתוך אגם**  
גוש נחושת חם בעל מסה של 2.00kg בטמפרטורה של  $T_1 = 840^\circ\text{K}$  נזרק לאגם  
גדול בטמפרטורה של  $T_2 = 280^\circ\text{K}$ .  
הניחו כי האגם מספיק גדול כך שהטמפרטורה שלו לא משתנה באופן מהותי.  
מהו השינוי באנטרופיה של:  
א. הנחושת.  
ב. האגם.  
ג. הכולל.

**(4) דוגמה - קוביית קרח נמסה**

קוביית קרח במסה של  $1.00\text{kg}$  ובטמפרטורה של  $0^{\circ}\text{C}$  נמצאת במגע עם מאגר חום גדול שהטמפרטורה שלו היא מעט מעל  $0^{\circ}\text{C}$ . כתוצאה מכך הקרח נמס מאוד לאט למים. מה השינוי באנטרופיה של:

א. הקרח.  
ב. המאגר.

**(5) שינוי באנטרופיה של מים שהופכים לאדים**

מהו השינוי באנטרופיה של  $150\text{gr}$  של מים ב- $100^{\circ}\text{C}$  שהופכים לאדים ב- $100^{\circ}\text{C}$ ?

**(6) קופסה מחליקה על משטח עם חיכוך**

קופסה בעלת מסה של  $6.5\text{kg}$  מחליקה על משטח אופקי לא חלק (קיים חיכוך קינטי). חשבו את השינוי באנטרופיה של היקום מתחילת תנועתה של הקופסה במהירות  $5 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$  ועד לעצירתה. הניחו שכל הגופים נמצאים בטמפרטורת החדר  $293\text{K}$ .

**(7) מים מתקררים ממאגר קרח**

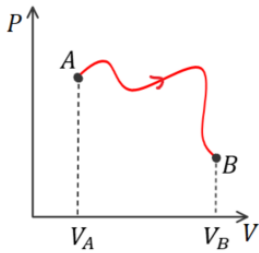
$1.0\text{L}$  של מים ב- $0^{\circ}\text{C}$  נמצאים במגע עם כמות גדולה של קרח ב- $10^{\circ}\text{C}$ . כתוצאה מכך המים קופאים ומתקררים גם ל- $10^{\circ}\text{C}$ . חשבו את השינוי הכולל באנטרופיה.

**(8) מוט ברזל נזרק למים**

מוט ברזל בעל מסה של  $1.8\text{kg}$  ובטמפרטורה של  $43^{\circ}\text{C}$  נזרק למיכל מים המצופה בקלקר. המיכל מכיל  $1.2\text{kg}$  מים בטמפרטורת החדר ( $20^{\circ}\text{C}$ ). מהו השינוי הכולל באנטרופיה?

**(9) גז אידיאלי מתפשט איזותרמית**

גז אידיאלי מתפשט איזותרמית  $T = 350^{\circ}\text{K}$  מנפח  $2.30\text{L}$  ולחץ  $6.9\text{atm}$  ללחץ  $1.0\text{atm}$ . מהו השינוי באנטרופיה של הגז?



**10) גז אידיאלי עובר תהליך מוזר**

גז אידיאלי המכיל  $n$  מולים עובר את התהליך המתואר באיור. הטמפרטורה בנקודות A ו-B זהה. חשבו את השינוי באנטרופיה של הגז בעקבות התהליך. נתונים:  $V_A$ ,  $nV_B$ .

**11) שני גזים מתערבבים**

1.00mol של גז חנקן ו-1.00mol של גז חמצן נמצאים בתאים נפרדים, זהים בגודלם, באותה הטמפרטורה ומבודדים מהסביבה. מחברים בין התאים והגזים (האידיאליים) מתערבבים. מהו השינוי באנטרופיה של:

- כל המערכת?
- של הסביבה?
- חזור על סעיף א' אם התא של אחד הגזים גדול פי שניים מהתא של השני.

**12) קיבול חום מולרי משתנה**

קיבול החום המולרי של אשלגן בטמפרטורות נמוכות משתנה עם הטמפרטורה לפי  $C_V = \alpha T + \beta T^3$  כאשר  $\alpha = 2.08 \frac{\text{mJ}}{\text{mol} \cdot \text{K}^2}$  ו-  $\beta = 2.57 \frac{\text{mJ}}{\text{mol} \cdot \text{K}^4}$ . מצאו את השינוי באנטרופיה של 0.25mol של אשלגן כאשר הטמפרטורה שלו יורדת מ-4.0K ל-2.0K בתהליך בנפח קבוע.

## תשובות סופיות:

$$(1) \quad \text{א. } 22^{\circ}\text{C} \quad \text{ב. } 1 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$(2) \quad \text{א. } \Delta S = nR \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \text{ב. } \Delta S = 0 \quad \text{ג. } 5.76 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$(3) \quad \text{א. } -857 \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad \text{ב. } 1560 \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad \text{ג. } 703 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$(4) \quad \text{א. } -1220 \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad \text{ב. } 1220 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$(5) \quad 910 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$(6) \quad 0.28 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$(7) \quad 48 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$(8) \quad 2.2 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$(9) \quad 8.8 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$(10) \quad nR \ln \frac{V_B}{V_A}$$

$$(11) \quad \text{א. } 5.8 \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad \text{ב. } 0 \quad \text{ג. } 13 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

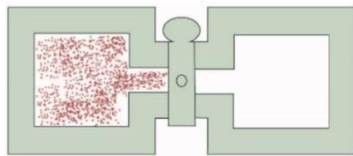
$$(12) \quad -11 \frac{\text{mJ}}{\text{K}}$$

## פרשנות סטטיסטית לאנטרופיה והחוק השני:

### סיכום כללי:

הערות	תיאור	הנוסחה
	k - קבוע בולצמן Ω - פונקציית המצבים המיקרוסקופיים	$S = k \ln \Omega$

### שאלות:



- (1) **דוגמה - התפשטות חופשית גישה סטטיסטית**  
 השתמשו במשוואה של בולצמן לאנטרופיה וחשבו את השינוי באנטרופיה במקרה של התפשטות חופשית של מול אחד של גז אידיאלי מנפח  $V$  לנפח  $2V$ .  
 הניחו ש-Ω אומרת את מספר המיקומים האפשריים של כל המולקולות. השוו לחישוב שנעשה בדוגמה הקודמת של התפשטות חופשית באמצעות הנוסחה של קלאוזיוס.

### (2) אנטרופיה להטלת 4 מטבעות

השתמשו בפונקציית המצבים Ω וחשבו מה האנטרופיה בכל אחד מהמצבים המיקרוסקופיים שתוארו בדוגמה של הטלת 4 מטבעות.

מספר המצבים המיקרוסקופיים	המצבים המיקרוסקופיים המתאימים (H-ראש, T-זנב)	המצב המיקרוסקופי
1	HHHH	4 ראש
4	THHH, HTHH, HHTH, HHHT	3 ראש, 1 זנב
6	TTHH, THTH, HTTH, THHT, HTHT, HHTT	2 ראש, 2 זנב
4	HTTT, THTT, TTHT, TTTH	1 ראש, 3 זנב
1	TTTT	4 זנב

### (3) הטלת 5 מטבעות

- דני לקח 5 מטבעות והטיל אותם בצורה אקראית על השולחן.  
 א. רשמו טבלה ובה את מספר המצבים המיקרוסקופיים המתאימים לכל מצב מקרו.  
 ב. מהי ההסתברות שבהטלה יצאו 3 מטבעות ראש ו-2 זנב?  
 ג. מהי ההסתברות שכל המטבעות יפלו על זנב?  
 ד. מהי ההסתברות שבהטלה יפלו לפחות 3 מטבעות על זנב?

**(4) שינוי באנטרופיה בסידור 10 מטבעות**

על שולחן ישנם 10 מטבעות כאשר 9 מתוכם נמצאים עם הראש כלפי מעלה ואחד עם הזנב כלפי מעלה. הופכים 3 מטבעות שהיו עם הראש כלפי מעלה. מה השינוי באנטרופיה של המערכת? השווה לשינוי באנטרופיה של מערכת תרמודינמית מאחד הדוגמאות הקודמות. ניתן לחשב את פונקציית המצבים גם באמצעות מקדמי הבינום של ניוטון:  $\frac{n!}{k!(n-k)!}$  כאשר  $n$  הוא מספר המטבעות ו- $k$  מספר המטבעות עם הזנב (או הראש) כלפי מעלה.

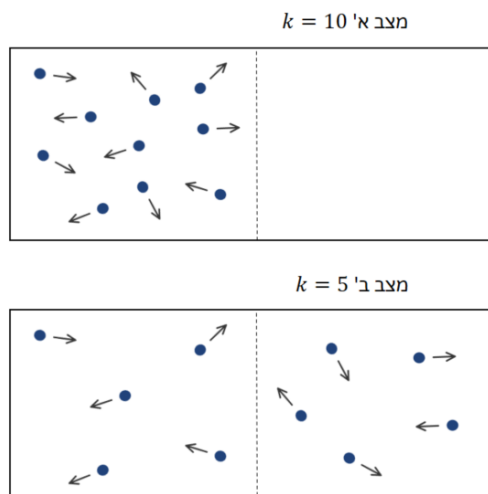
**(5) גז עם 10 אטומים בתיבה**

נניח שישנה מערכת דמויית גז המכילה  $n = 10$  אטומים במהירויות זהות. ה"גז" נמצא בתוך תיבה. נסמן את מספר האטומים הנמצאים בחציה השמאלי של התיבה ב- $k$ . מספר האפשרויות לסדר את האטומים כך ש- $k$  אטומים יהיו

$$\frac{n!}{k!(n-k)!} \cdot$$

נניח כי כל ערך של  $k$  מסמל מצב מיקרוסקופי של המערכת. במצב א' שבאיור כל 10 האטומים בצד שמאל של התיבה ( $k = 10$ ) ובמצב ב' שבאיור 5 בחצי הימני ו-5 בשמאלי ( $k = 5$ ).

- א. מהו השינוי באנטרופיה במעבר בין מצב א' למצב ב'? האם התהליך יכול להתרחש בצורה ספונטנית?
- ב. מהו השינוי באנטרופיה במעבר בין מצב ב' למצב א'? האם התהליך יכול להתרחש בצורה ספונטנית?



## תשובות סופיות:

(1)  $R \ln(2)$

(2)

אנטרופיה	המצב המיקרוסקופי
0	4 ראש
$1.91 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$	3 ראש, 1 זנב
$2.47 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$	2 ראש, 2 זנב
$1.91 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$	1 ראש, 3 זנב
0	4 זנב

(3) א.

מצב מקרוסקופי	המצבים המיקרוסקופיים	פונקציית המצבים $\Omega$
5-H, 0-T	HHHHH	1
4-H, 1-T	HHHHT, HHHHT, HHTHH, HTHHH, THHHH	5
3-H, 2-T	HHHTT, HHTHT, HTHHT, THHHT, HHTTH, HTTTH, THTHH, TTHHH, HTHTH, THHTH	10
2-H, 3-T	כמו 3-H, 2-T רק להחליף H ב-T	10
1-H, 4-T	כמו 4-H, 1-T רק להחליף H ב-T	5
0-H, 5-T	כמו 5-H, 0-T רק להחליף H ב-T	1

ד. 50%

ג. 3.125%

ב. 31.25%

(4)  $4.2 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$

(5) א.  $7.63 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$ , ב.  $-7.63 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$ , לא.