

## מוליכות חום

ספרות:

סירס-זימנסקי פיסיקה תיכונית – תורת החום, קול וגלים פרק 3.

מילות מפתח:

חום, טמפרטורה, מוליכות חום, חוק הקירור של ניוטון.

**ציוד:** מעמד פלסטי לקנקן וללחות פליז, לוח שעם, קנקן לחימום מים+כיסוי, מזלג חשמלי, מערכת בקרה לחימום, משטח פליז עגול, גליל פליז, כוס קלקר, מדי טמפרטורה, מלקחים, משקל מכני, משורה, מחשב ותוכנת איסוף נתונים.

### 1. מטרות הניסוי

- להכיר מושגים הקשורים במוליכות חום.
- למצוא את מוליכות החום של שעם.
- לוודא את חוק הקירור של ניוטון.

### 2. תיאוריה

חום וטמפרטורה

חום הינו אחת מצורות האנרגיה. אנרגיית חום קיימת במערכת רבת חלקיקים, ומבטאת את סך כל האנרגיה הקשורה בתנועת החלקיקים (אנרגיה קינטית ופוטנציאלית). לדוגמא: אנרגיית חום במוצק פירושה תנודות של אטומי המוצק סביב מצב שווי המשקל. חום אינו טמפרטורה, טמפרטורה היא פרמטר המאפיין את המערכת כך שאם נצמיד שתי מערכות בטמפרטורות שונות יזרום חום מהטמפרטורה הגבוהה לנמוכה עד להשתוות הטמפרטורות. הטמפרטורה נמדדת במעלות צלסיוס  $^{\circ}\text{C}$ , חום נמדד ביחידות של אנרגיה ( ביחידות MKS – Joule , ביחידות erg - cgs). ישנה יחידת אנרגיה נוספת המשמשת למדידת חום: קלוריה - calorie . קלוריה מוגדרת ככמות החום הדרושה להעלות את הטמפרטורה של גרם מים במעלת צלסיוס אחת.

$$\text{הקשר בין היחידות נתון ע"י } 1 \text{ cal} = 4.18 \text{ J} = 4.18 \times 10^7 \text{ erg}$$

חום סגולי - לכל חומר ניתן להגדיר את החום הסגולי ככמות החום הדרושה להעלות גרם אחד של חומר במעלת צלסיוס אחת. החום הסגולי מסומן בדרך כלל ע"י  $c$ , עפ"י ההגדרה החום הסגולי של מים הוא  $c_w = 1 \text{ cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$ . כמות החום  $Q$  הדרושה להעלות מסה  $M$  של חומר מטמפרטורה  $T_1$  ל-  $T_2$  נתונה ע"י:

$$(1) \quad Q = Mc(T_2 - T_1)$$

מעבר של חום ממקום למקום נעשה בשלש דרכים: הולכה, הסעה וקרינה. הולכת חום מתרחשת כאשר החומר נשאר במקומו ואילו החום עובר ממקום למקום, לדוגמא: מוט מתכתי המחומם בקצהו, החום יזרום דרך המוט ויגיע גם לקצה המרוחק. הולכת חום מתרחשת ע"י כך שנוצרות התנגשויות בין האטומים המהירים (באזור החם) לאטומים האיטיים (באזור הקר). התנגשויות אלו מתרחשות בעיקר ע"י האלקטרונים ולכן חומרים מתכתיים הם מוליכי חום טובים. הסעת חום מתרחשת כאשר החומר החם נוסע ממקום למקום, לדוגמא בחימום החדר ע"י מזגן, אוויר חם מוסע לתוך החדר וע"י כך מתחמם החדר. מעבר חום ע"י קרינה מתרחש לדוגמא בקרני השמש המחממות את כדור הארץ ללא הולכה והסעה אלא ע"י קרינה.

מוליכות חום – מוליכות חום היא תכונה של חומר המאפיינת את מעבר החום דרך החומר ע"י הולכה. לדוגמא: ניקח לוחית בעלת שטח חתך  $A$  ועובי  $d$ , נחזיק צד אחד בטמפרטורה  $T_1$  וצד שני בטמפרטורה  $T_2$ . החום זורם מהצד החם לצד הקר.

קצב מעבר החום  $H$  (כמות החום ליחידת זמן  $H = \frac{dQ}{dt}$ ) פרופורציוני לשטח החתך

ולהפרש הטמפרטורות בין צידי הלוחית, ונמצא ביחס הפוך לעובי הלוחית:

$$(2) \quad H = \frac{K \cdot A}{d}(T_2 - T_1)$$

מקדם הפרופורציה  $K$  נקרא מוליכות החום של החומר. גוף האדם אינו רגיש לטמפרטורה כי אם לקצב מעבר החום. אנו נרגיש כי חפץ כלשהו חם אם קצב מעבר החום מהחפץ לגופנו יהיה מהיר ולהפך. התחושה כי החפץ חם מושפעת אם כן לא רק מטמפרטורת החפץ כי אם גם ממוליכות החום של החפץ. לדוגמא: אם נכניס למקרר מתכת ועץ ולאחר מכן ניגע בשניהם, המתכת תורגש קרה יותר מהעץ למרות ששניהם באותה טמפרטורה.

חוק הקירור של ניוטון – חוק זה הינו חוק אמפירי (נסיוני), חוק הקירור קובע כי גוף הנמצא בטמפרטורה הגבוהה מטמפרטורת הסביבה מאבד חום בקצב הפרופורציוני להפרש הטמפרטורות בין הגוף לסביבתו. אם נסמן את טמפרטורת הגוף  $T$  ואת טמפרטורת הסביבה  $T_e$  אז קצב איבוד החום  $H$  נתון ע"י:

$$(3) \quad H = -a(T - T_e)$$

מקדם הפרופורציה  $a$  תלוי בגיאומטריה של הגוף, ותיתכן תלות חלשה גם בטמפרטורה.

אם נשתמש במשוואה (1) ונבטא את קצב איבוד החום באמצעות קצב שינוי הטמפרטורה נוכל לרשום

$$(4) \quad \frac{dT}{dt} = -\frac{a}{M \cdot c}(T - T_e)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{d(T - T_e)}{dt} \quad \text{כאשר טמפרטורת הסביבה } (T_e) \text{ נשארת קבועה מתקיים}$$

נגדיר:  $\Delta T = T - T_e$  ונקבל שפתרונה של משוואה (4) הוא:

$$(5) \quad \Delta T = \Delta T_0 \cdot e^{\left(\frac{-a}{M \cdot c}\right) \cdot t}$$

כאשר  $\Delta T_0$  הוא הפרש הטמפרטורות ההתחלתי בין הגוף החם לסביבתו.

### עבודת הכנה

1. נתונה לוחית אסבסט שעובייה 2 מ"מ ושטחה 80 סמ"ר. בצידה האחד של הלוחית יש מקור חום בטמפרטורה קבועה  $T_2 = 95^\circ\text{C}$ , וצידה השני נמצא במגע עם גוף פליז שמסתו 600 גרם בטמפרטורה  $T_1 = 25^\circ\text{C}$ . מוליכות החום של לוחית האסבסט  $K = 0.00022 \frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{deg}}$  והחום הסגולי של הפליז  $c = 0.092 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{deg}}$ . מצא את קצב עליית הטמפרטורה של גוף הפליז בתחילת המדידה בהנחה שאינו מאבד חום לסביבה (זה קורה במציאות רק כאשר הטמפרטורה שלו שווה לטמפרטורת הסביבה).

2. מה תהיה הטמפרטורה הסופית של הפליז עפ"י משוואה (5) (בהנחה שהוא אינו מאבד חום לסביבה).

3. בניסוי למדידת מוליכות חום של חומר כלשהו, התקבלה התאמה

לינארית לגרף של  $\frac{\Delta T}{\Delta t}$  כפונקציה של הטמפרטורה  $T$ .

המשוואה שהתקבלה היא:  $\frac{\Delta T}{\Delta t} = -0.00142 \cdot T + 0.063$ . בעזרת נוסחה

(6) מצא את מוליכות החום  $K$  ואת מקדם הקירור  $a$  של החומר, אם ידוע:

$$A = 40 \text{ cm}^2, d = 0.6 \text{ cm}, m = 200 \text{ g}, c = 0.28 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{deg}}, T_w = 95^\circ, T_e = 22^\circ$$

4. מצא כמה זמן ידרש לגוף להתקרר מטמפרטורה של  $100^\circ \text{C}$  לטמפרטורה של

$60^\circ \text{C}$  כאשר טמפרטורת הסביבה היא  $20^\circ \text{C}$ ? (משוואה 5)

השתמש בנתונים הבאים: מסה  $100 \text{ g}$ , חום סגולי  $0.2 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{deg}}$ , ומקדם צורה  $a = 1$ .

5. גוש ברזל חם בעל מסה של  $50 \text{ g}$  הונח ב  $150 \text{ ml}$  מים הנמצאים בטמפרטורה

של  $22^\circ \text{C}$ , לאחר זמן מה הברזל והמים הגיעו לשיויון בטמפרטורה וטמפרטורת

המים הגיע לשיא של  $24^\circ \text{C}$ .

חשב מהי הטמפרטורה ההתחלתית של הברזל לפני שהונח במים בהנחה שקיבול

החום הסגולי של ברזל הוא  $c = 0.109 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{deg}}$ ?

### 3. מהלך הניסוי

ניסוי זה מורכב משלושה חלקים :

בחלק הראשון נמדוד את מוליכות החום של שעם.

בחלק השני נמצא את מקדם איבוד החום של דיסקית פליז.

בחלק השלישי נמצא את מקדם החום הסגולי של הפליז.

**שים לב !** במהלך הניסוי תדרש לעבוד עם מערכת המכילה מים רותחים.

אין לגעת ישירות במיכל המים או בכל חפץ שחומם על ידו!

נהג במשנה זהירות בכל פעולה הקשורה למיכל המים.

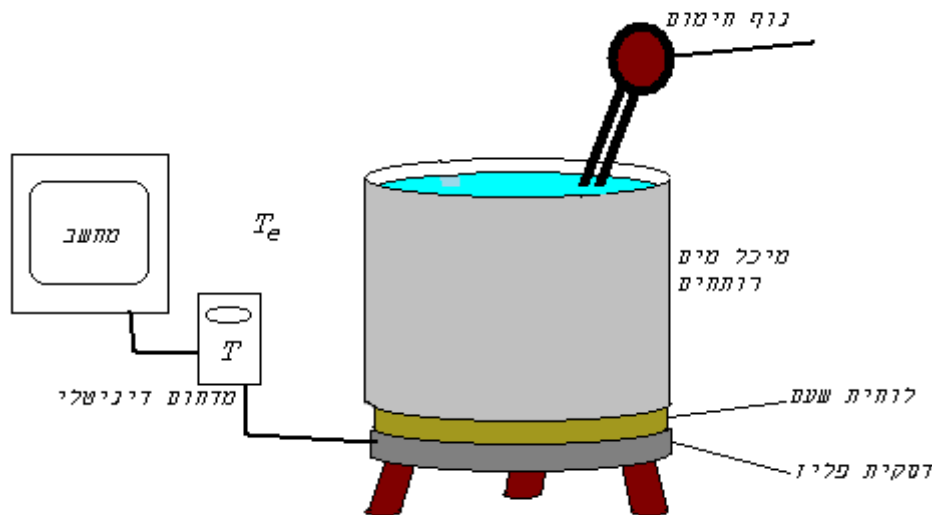
#### 3.1 מדידת מוליכות חום של שעם

בניסוי זה נמדוד את מוליכות החום של לוחית שעם. נחזיק צד אחד של הלוחית

בטמפרטורה קבועה באמצעות מיכל מים רותחים, ונמדוד את קצב עליית

הטמפרטורה של דיסקית פליז הנמצאת מצדו השני של השעם. המערכת מתוארת

בציור 1.



ציור 1: החום זורם ממיכל המים דרך השעם אל הפליז.

השימוש במיכל מים מתכתי וכן בדיסקית פליז נועדו להבטיח פיזור אחיד של זרימת

החום על פני שטח המגע כולו. את קצב מעבר החום ממיכל המים לפליז דרך השעם

ניתן לבטא באמצעות משוואה (2), מצד שני הפליז מאבד חום לסביבה עפ"י חוק

הקירור של ניוטון – משוואה (3).

נשתמש בסימונים הבאים: טמפרטורת המים –  $T_w$ , טמפרטורת הסביבה –  $T_e$ , טמפרטורת הפליז –  $T$ , מוליכות החום של השעם –  $K$ , עובי השעם –  $d$ , שטח המגע –  $A$ , מסת הפליז –  $M$ , חום סגולי של פליז –  $c$ , מקדם איבוד החום של הפליז –  $a$ . קצב שינוי הטמפרטורה של הפליז נתון ע"י

$$(5) \quad \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{K \cdot A}{d \cdot M \cdot c} (T_w - T) - \frac{a}{M \cdot c} (T - T_e)$$

בניסוי נמדוד באמצעות המחשב את  $T(t)$ , נחשב את יחס ההפרשים:  $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ , ומתוך משוואה (5) נחשב את מוליכות החום של שעם.

### 3.1.2. הנחיות ביצוע

- מדוד את מסת דסקית הפליז, את עובי לוחית השעם, את שטח המגע (פני דסקית הפליז) ואת טמפרטורת הסביבה.
- הרתח את המים במיכל מבלי לשים את המיכל על השעם ומדוד את הטמפרטורה הסופית של המים.
- פתח את תוכנת Recmeter במחשב, פתח את sample rate וכוון את זמן המדידה ל 60sec. בתפריט File לחץ על Name והכנס את שם קובץ התוצאות.
- הצמד את המדחום הדיגיטלי לדסקית הפליז וחבר אותו למחשב. הנח את השעם מעל הפליז, לחץ בתוכנה על Start recording.
- הנח את מיכל המים הרותחים על גבי השעם ועקוב אחר טמפרטורת המים.
- לאחר 15 דקות נוספות לחץ על End recording.
- העתק את קבצי התוצאות ל Disk on Key (הקבצים נמצאים בכונן C בספירת RECMETER).
- מתוך התוצאות חשב את קצב שינוי הטמפרטורה, כלומר שינוי הטמפרטורה בין מדידה למדידה חלקי הזמן בין מדידה למדידה

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} \text{ שרטט בגרף את קצב שינוי הטמפרטורה } , \left. \frac{\Delta T}{\Delta t} \right|_n = \frac{T_{n+1} - T_{n-1}}{t_{n+1} - t_{n-1}}$$

כפונקציה של הטמפרטורה  $T$  והתאם לתוצאות פונקציה לינארית.

- את משוואה (5), המתארת את התהליך, ניתן לרשום גם בצורה הבאה:

$$(6) \quad \frac{\Delta T}{\Delta t} = \underbrace{\left( -\frac{K \cdot A}{d \cdot M \cdot c} - \frac{a}{M \cdot c} \right)}_A \cdot T + \underbrace{\frac{K \cdot A}{d \cdot M \cdot c} \cdot T_w + \frac{a}{M \cdot c} \cdot T_e}_B$$

ניתן לראות שמדובר במשוואת קו ישר כאשר הביטוי המסומן ב  $A$  הוא שיפוע הגרף והביטוי המסומן ב  $B$  הוא נקודת החיתוך עם הציר האנכי.

מתוך השוואת השיפוע שהתקבל בגרף  $A$  ונקודת החיתוך בגרף  $B$  מתקבלות שתי משוואות בשני נעלמים  $(K, a)$ , מתוך שתי המשוואות מצא את מוליכות החום של השעם  $K$  ואת מקדם הקירור  $a$  (החום הסגולי של

$$\text{הפליז הוא } c = 0.092 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{deg}}.$$

- השווה עם הערך המופיע בספרות: מוליכות החום של שעם

$$K = 0.00011 \frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{deg}}$$

3.2 חוק הקירור של ניוטון

### מהלך הניסוי :

מדוד את משקלה של דיסקית הפליז שבה תשתמש בניסוי פתח את תוכנת Recmeter במחשב, פתח את sample rate וכוון את זמן המדידה ל 10sec. בתפריט File לחץ על Name והכנס את שם קובץ התוצאות.

כאשר המדחום הדיגיטאלי נמצא בטמפרטורת החדר, לחץ בתוכנה על Start recording.

באמצעות מלקחיים הנח דיסקית פליז בתוך מים רותחים, לאחר כחצי דקה, הוצא את הדיסקית והנח אותה על המעמד היעודי.

הכנס את המדחום הדיגיטאלי לחריץ המדידה שעל הדיסקית, ועקוב אחרי הטמפרטורה למשך כ-5 דקות.

העתק את קבצי התוצאות ל Disk on Key

חשב את קצב שינוי הטמפרטורה  $\left. \frac{\Delta T}{\Delta t} \right|_n = \frac{T_{n+1} - T_{n-1}}{t_{n+1} - t_{n-1}}$ , שרטט בגרף את קצב

שינוי הטמפרטורה  $\frac{\Delta T}{\Delta t}$  כפונקציה של הטמפרטורה  $T$  והתאם לתוצאות פונקציה

לינארית, בעזרת נוסחה (3) מצא את מקדם איבוד החום  $a$ , האם הוא זהה לתוצאה בניסוי הקודם? רשום מה לדעתך הסיבה להבדל.

### 3.3 חישוב מקדם החום הסגולי של פליז

בניסוי זה נניח דיסקת פליז חמה במים הנמצאים בטמפרטורת החדר, חום יעבור מדיסקת הפליז למים עד להשוואת הטמפרטורות ביניהם. כמות החום שהמים קיבלו בתהליך שווה לכמות החום שהפליז מסר (בהזנחת איבודים לסביבה). הקשר בין שינוי הטמפרטורה לשינוי בכמות החום של הפליז נתון בנוסחה (1) וממנה ניתן למצוא את מקדם החום הסגולי (C) של הפליז.

#### מהלך הניסוי

- מדוד את משקלה של דיסקית הפליז שבה תשתמש בניסוי.
  - מלא בעזרת משורה כמות מים ידועה בכוס הפלסטיק (100 ml בערך) ומדוד את טמפרטורת המים, הנח את כוס הפלסטיק במיכל קלקר לצורך יצירת בידוד מהסביבה.
  - באמצעות מלקחיים הנח את הדיסקית במים רותחים ומדוד את טמפרטורת המים הרותחים. לאחר כחצי דקה הנח את הדיסקית בכוס הפלסטיק וכסה את הכוס בקלקר.
- עקוב אחר עלית טמפרטורת המים באמצעות מדחום ורשום את הטמפרטורה המקסימלית שאליה הם הגיעו.

## עיבוד תוצאות

כמות החום שהמים קיבלו היא (על פי (1) ) :

$$(7) \quad Q = M_w c_w (T - T_{0,w})$$

כאשר  $T_{0,w}$  היא טמפרטורת המים בתחילת התהליך,  $T$  טמפרטורת המים המקסימאלית שנמדדה ו  $c_w$  מקדם החום הסגולי של המים ( $c_w = 1$ ).

כמות החום שהפליז איבד היא :

$$(8) \quad Q = M_p c_p (T_{0,p} - T)$$

כאשר  $T_{0,p}$  היא הטמפרטורה ההתחלתית של הפליז, שהיא שווה לטמפרטורת המים הרוותחים שבהם הוא היה מונח ו  $T$  היא הטמפרטורה בסוף התהליך ששוה לטמפרטורת המים המקסימאלית (התחממות המים נעצרה כאשר נוצר שיוויין בטמפרטורות של הפליז והמים).

מתוך השוואת (7) ל(8) מתקבל :

$$(9) \quad M_p c_p (T_{0,p} - T) = M_w c_w (T - T_{0,w})$$

ולכן

$$(10) \quad c_p = \frac{M_w c_w (T - T_{0,w})}{M_p \cdot (T_{0,p} - T)}$$

חשב את מקדם החום הסגולי של הפליז והשווה לערך המקובל

$$.(c = 0.092 \frac{cal}{g \cdot deg})$$

חשב את השגיאה, ממה לדעתך היא נובעת ?