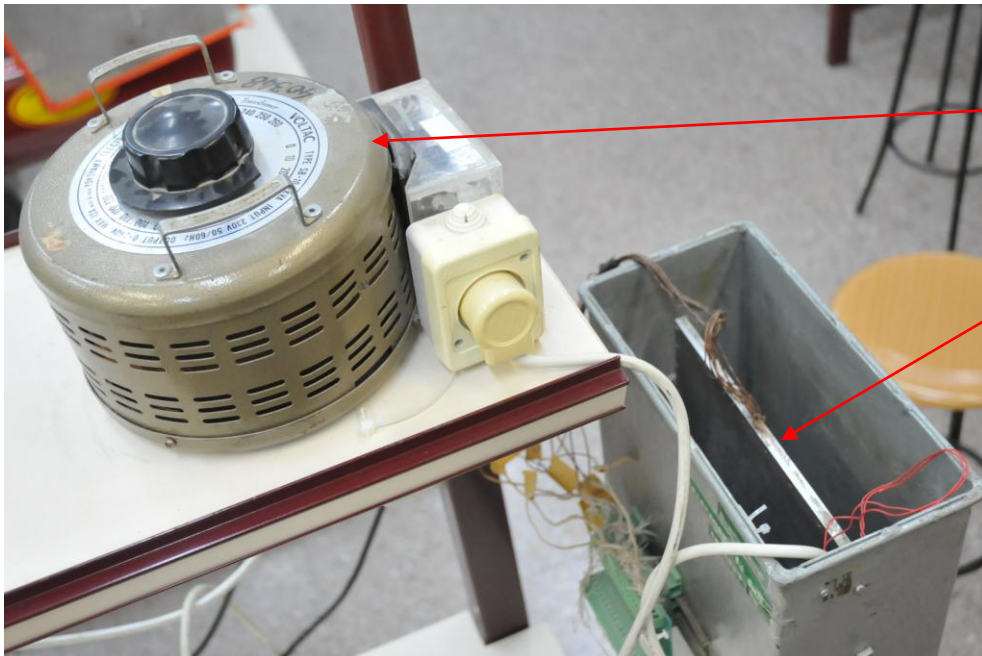


## פרק בטיחות- מעבדת מעבר חום- הסעה

- המעבדות הן שטח תפעולי המשופע בעצמים חמים וזרמי חשמל גבוהים.
- מותר לסטודנטים לעבוד במעבדה רק כאשר נמצא במקום עובד מסגל המעבדה ו/או מדריך מוסמך אשר מודע לניסוי אותו הם מבצעים .
- אין להכניס למעבדה מזון ושתייה. אין לאכול, לשתות או לעשן במעבדה. אסור להשתמש בטלפונים סלולריים בתוך המעבדה (המעבדה היא שיעור לכול דבר)
- לבעלי שיער ארוך- חובה לאסוף את השער בכניסה לכל חדר מעבדה או ניסוי ולהכניסו מתחת לחולצה
- אין לעבוד עם שרוולים ארוכים ולא רכוסים ו/או בגדים רפויים
- סטודנט שלא יגיע עם נעליים סגורות -היינו נעלים סגורות באופן מלא גם מלפנים (אצבעות רגליים) וגם מאחור (קרוסול חשוף) לא יוכל לבצע המעבדה ולא יקבע לו שיבוץ מחדש. הערה- אין להגיע עם נעלי "CROCS" למעבדות
- בכל מקרה של ספק או חשש בהפעלה של מערכת הניסוי יש להתייעץ עם המדריך או איש הסגל האחראי. חל איסור חמור על הפעלת מערכות ניסוי ללא אישור טכנאי או מדריך ו/או במידה ויש ספק או חשש.
- לא יקבע מועד שיבוץ חדש לסטודנט אשר לא ימלא חובות אלו

- טמפרטורת גוף החימום שבניסוי יכולה להגיע מעל ל- 90 °C. אין לגעת בגוף החימום כל עוד המערכת פועלת.
- אין לשנות את מתח הספק ללא ידיעת המדריך והטכנאי.
- הקפד על סביבת עבודה נקייה- ציוד שאינו בשימוש, החזר אותו למקומו.
- לא יודע כיצד להפעיל? קרא למדריך או טכנאי



ספק כח

גוף חימום

## מעבר חום בהסעה

### 1. מטרת הניסוי

במסגרת הניסוי נערכות מדידות של פילוג טמפרטורה על גבי לוח אנכי במשטרי מעבר חום שונים (הסעה חופשית, הסעה מאולצת). מטרת הניסוי הנה השוואת מקדם מעבר החום  $h$  המתקבל כתוצאות מהניסוי עם זה המחושב באופן אנליטי. חישוב מקדם מעבר החום  $h$  מתבצע מתוך פתרון בעיית פינאי חום בהסעה על גבי לוח אנכי כתוצאה משטף חום קבוע על הדופן.

### 2. אנליזה תיאורטית

לפי חוק הקירור של ניוטון קצב מעבר החום לזורם:

$$q = Ah(T_w - T_\infty)$$

מקדם מעבר החום המשוקלל  $h$  מורכב ממקדם מעבר חום בקרינה  $h_r$  ומקדם מעבר החום בהסעה  $h_c$ :

$$h = h_r + h_c$$

(מקדם מעבר החום בהסעה  $h_c$  יכול לאפיין הסעה חופשית בלבד  $h_{cn}$  או את השילוב של מקדם מעבר

החום בהסעה מאולצת  $h_{cf}$  עם זה של הסעה חופשית:  $h_c = h_{cn} + h_{cf}$ ).

### מקדם מעבר החום בקרינה

את מרכיבי הקרינה ניתן לחשב בעזרת הביטוי הבא:

$$q_r'' = \sigma F \varepsilon (T^4 - T_\infty^4) = h_r (T - T_\infty)$$

$$h_r = \frac{\sigma F \varepsilon (T^4 - T_\infty^4)}{T - T_\infty}$$

כאשר:

$$\sigma = 5.7 \cdot 10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 K^4} \right] \quad \text{- קבוע סטפן בולצמן}$$

F - מקדם צורה, בתנאי הניסוי  $F = 1$ .

$\varepsilon$  - מקדם אמסיביבות, היחס בין שטף הפליטה של גוף נתון לבין הפליטה של אותו הגוף אילו היה גוף

$$\text{שחור} : \varepsilon = \frac{E}{E_b}$$

עבור הפרשי טמפרטורה קטנים יחסית, בין  $T$  ל  $T_\infty$  סביב טמפרטורת הסביבה ניתן לכתוב:

$$T^4 - T_\infty^4 \cong 4\bar{T}_m^3 (T - T_\infty)$$

$$\bar{T}_m = \frac{T_{\min} + T_{\max}}{2}$$

כאשר  $\bar{T}_m$  - טמפרטורה ממוצעת:

$$h_r \cong 4\sigma\varepsilon F\bar{T}_m^3$$

ואז:

מקדם מעבר חום בהסעה חופשית

ניתן למצוא קורלציות אמפיריות רבות המתארות את מקדם ההסעה החופשית על גבי לוח אנכי. עבור תנאי שפה של שטף חום קבוע  $q_w''$ , ניתן לכתוב את מקדם מעבר החום בהסעה חופשית, על פני לוח אנכי בזרימה למינרית:

$$h_{cn} = \frac{k_f}{x} \cdot 0.6 (Gr_x^* Pr_f)^{1/5} \quad 10^5 < Gr_x^* < 10^{11}$$

כאשר  $k_f$  הוא מקדם המוליכות התרמית של הזורם,  $Pr_f$  מספר פרנטל ו- $Gr_x^*$  הוא מספר גרשהוף הנתון

$$Gr_x^* = Gr_x \cdot Nu_x = \frac{g\beta q_w'' x^4}{k_f \nu_f^2} \quad \text{על ידי:}$$

כאשר  $g$  היא תאוצת הכובד,  $\beta$  מקדם התפשטות נפחית ועבור גזים אידיאלית מוגדר כ-  $\beta = \frac{1}{T_f} \left[ \frac{1}{K} \right]$ ,

$\nu_f$  היא הצמיגות הקינטית של הזורם.

$$\bar{h}_{cn} = \frac{1}{L} \int_0^L h_x dx \quad \text{את מקדם מעבר החום הממוצע } \bar{h}_{cn} \text{ ניתן להעריך על ידי:}$$

כאשר  $L$  הוא גובה הלוח, מכאן יוצא כי:

$$\bar{h}_{cn} = \frac{5}{4} h_{cn} \Big|_{x=L}$$

מקדם מעבר החום בהסעה מאולצת

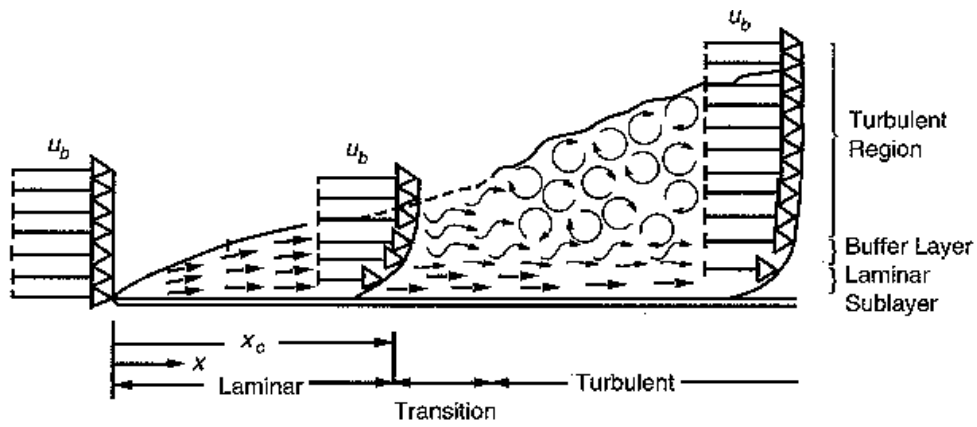
הזרימה על לוח הנה זרימה מתפתחת, מזרימה למינרית לזרימה טורבולנטית, כמוראה באיור 1. מקדם מעבר החום בהסעה על לוח:

$$h_{cf_x} = \frac{k_f}{x} \cdot 0.453 \cdot Re_x^{1/2} \cdot Pr_f^{1/3} \quad Re < 5 \cdot 10^5$$

$$h_{cf_x} = \frac{k_f}{x} \cdot 0.471 \cdot Re_x^{1/2} \cdot Pr_f^{1/3} \quad Re > 5 \cdot 10^5$$

$$Re = \frac{u_\infty \cdot L}{\nu_f} \quad Re_x = \frac{u_\infty \cdot x}{\nu_f} \quad \text{כאשר:}$$

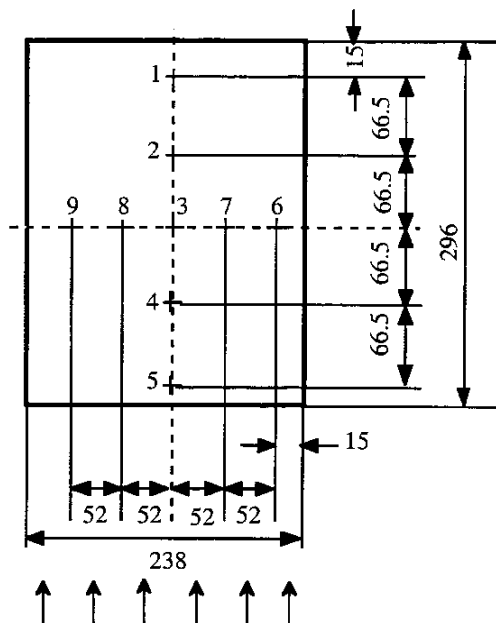
$$\bar{h}_{cf} = 2 \cdot h_{cf} \Big|_{x=L} \quad \text{מקדם מעבר הממוצע בזרימה למינרית:}$$



איור 1 - התפתחות הזרימה בהסעה מאולצת על גבי לוח [2].

### 3. ציוד המעבדה

- א. לוח אלומיניום אשר בתוכו גוף חימום.
- ב. מפוח אוויר.
- ג. מכשיר לקריאת טמפרטורה.
- ד. מדידי טמפרטורה (thermocouples), הממוקמים כמוראה באיור מספר 2.



איור 2 - מיקום מדידי טמפרטורה (thermocouples).

**4. מהלך הניסוי**

בתמונה 1 נראית עמדת עבודה ובה מנהרה שבתחתיתה מפוח אוויר ובחלקה העליון לוח אלומיניום (אינו נראה בתמונה). על הלוח מדידי הטמפרטורה, הממוקמים כמוראה באיור 2. מול העמדה נמצא צג המחשב שבו ניתן לראות את הטמפרטורות לפי מיקומם על לוח האלומיניום.

**ניסוי בהסעה חופשית**

הפעל את גוף החימום והמתן להתייצבות הטמפרטורות בלוח האלומיניום. רשום את הטמפרטורות בלוח האלומיניום (בהתאם לנקודות המדידה) את המתח החשמלי המסופק ללוח האלומיניום ואת התנגדות החשמלית של גוף החימום.

**ניסוי בהסעה מאולצת**

הפעל את המפוח והמתן להתייצבות הטמפרטורות בלוח. רשום את הטמפרטורות בלוח האלומיניום (בהתאם לנקודות המדידה).



**תמונה 1 - עמדת העבודה**

**5. שאלות הכנה**

1. מה היא הסעה חופשית ומה המנגנון המניע אותה?
2. כיצד תחשב את מקדם מעבר החום הממוצע בניסוי? בתשובתך התייחס גם למיקום מדידי הטמפרטורה על פני הלוח.
3. מהוא פרופיל הטמפרטורה הצפוי לרוחב הלוח (מדידים 6,7,8,9)?
4. א. האם קיים שינוי במקדם מעבר החום בין זרימה למינרית לטורבולנטית?  
ב. אילו פרמטרים משפיעים על סוג הזרימה?

**6. עיבוד תוצאות**

1. רשום את מטרת הניסוי.
2. רשום בקצרה את מהלך הניסוי.
3. חשב את הסעיפים הבאים, והראה חישוב מלא (בנקודת חישוב אחת) עבור כל אחת מהנוסחאות הבאות:  
a) חישוב  $h_r$  - מקדם מעבר חום בקרינה:

$$h_r = 4\varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot \bar{T}m^3$$

הנח:  $F=1$ ,  $\varepsilon=0.6$ .

שרטט גרף של מקדם מעבר חום בקרינה (בהתאם לנוסחה), כפונקציה של טמפרטורה ממוצעת  $\bar{T}m$ . הוסף שגיאה אפשרית של 10%.

כאשר  $20^\circ C < \bar{T}m < 80^\circ C$  (ציר x בקפיצות של  $5^\circ C$ )

**שימו לב:** בסעיף זה לא משתמשים בתוצאות הניסוי

(b) א. חישוב מקדם מעבר חום בהסעה חופשית:

$$h_{cn_x} = \frac{k_f}{x} 0.6 (Gr_x^* \cdot Pr_f)^{1/5}$$

כאשר:

$$10^5 < Gr_x^* = Gr_x \cdot Nu_x = \frac{g \cdot \beta \cdot q_w'' \cdot x^4}{k_f \cdot \nu_f^2} < 10^{11}$$

$$q_w = \frac{U^2}{R} [W]$$

$$q_w'' = \frac{q_w}{A_{tot}} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

במקרה הנדון,  $A_{tot} = 2A$  שהרי יש פינוי חום משני צידי הפלטה.

$\nu_f, k_f$  ו- $Pr_f$  יש להוציא מטבלת ערכי אוויר ב-Holman עבור  $T_f$  כאשר:

$$\bar{T}_m = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2}$$

$$T_f = \frac{\bar{T}_m + T_\infty}{2}$$

ב. חישוב מקדם מעבר חום הממוצע בהסעה חופשית:

$$\bar{h}_{cn} = \frac{1}{L} \int_0^L h_x dx = \frac{5}{4} h_{cn} \Big|_{x=L}$$

ג. שרטט גרף  $h_{cn,x}$  ו- $\bar{h}_c$  כפונקציה של אורך הפלטה. הוסף שגיאה אפשרית של 25%.

(c) חישוב מקדם מעבר חום בהסעה מאולצת:

א. בדוק את ערך מספר Re:

$$Re_x = \frac{U_\infty \cdot x}{\nu_f}$$

$$U_\infty = 4[m/s]$$

בהעדר מדידת מהירות הציפה:

$$h_{cfx} = \frac{k_f}{x} \cdot 0.453 \cdot Re_x^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad : \text{עבור } Re < 5 \cdot 10^5$$

$$h_{cfx} = \frac{k_f}{x} \cdot 0.471 \cdot Re_x^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad : \text{עבור } Re > 5 \cdot 10^5$$

ב. חישוב מקדם מעבר חום ממוצע בהסעה מאולצת:

$$\bar{h}_{cf} = 2h_{cf} \Big|_{x=L}$$

ג. שרטט גרף  $h_{cf,x}$  ו- $\bar{h}_{cf}$  כפונקציה של אורך הפלטה. הוסף שגיאה אפשרית של  $\pm 25\%$ .

(d) השוואת מקדמי מעבר חום בין הניסוי לתיאוריה:

$$q_{\text{חשמלי}} = \frac{U^2}{R}$$

$$q_{\text{חשמלי}} = h_{\text{ניסוי}} \cdot 2A (\bar{T}_m - T_\infty) \quad \text{פינוי החום נעשה משני צידי הלוח:}$$

$$\bar{T}_m = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2}$$

האם בהסעה חופשית  $h = \bar{h}_{cn} + h_r$  ניסוי ?

האם בהסעה מאולצת  $h = \bar{h}_{cf} + h_r$  ניסוי ?

הערך את השגיאה:

$$E_h = \frac{h_{\text{ניסוי}} - h_{\text{חישוב}}}{h_{\text{חישוב}}} 100\%$$

(e) מציאת פילוג הטמפרטורות לרוחב הפלטה:

שרטט גרף של טמפרטורות המדידים 6,7,8,9 כתלות ברוחב הפלטה, הן בהסעה חופשית והן מאולצת. שגיאה של  $\pm 3\%$  אפשרית. שרטט על גבי גרף זה את T ממוצע.

(f) הסק מסקנות מהניסוי.

## 7. מקורות

1. Holman, S. P.: "Heat Transfer", McGraw-Hill Book Company, New York. SI edition, 1993.
2. Incropera, F. P. and DeWitt, D. P.: "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", Wiley, New York, 1985.



ניקוד ניסוי הסעה טבעית ומאולצת		
ניקוד		
8		שאלות הכנה
3		מטרת הניסוי
5		מערכת הניסוי
3		מהלך הניסוי
8	דוגמת חישוב	קרינה
6	גרף	
8	דוגמת חישוב	הסעה חופשית
6	גרף	
3	טבלת נתונים	
8	דוגמת חישוב	הסעה מאולצת
6	גרף	
3	טבלת נתונים	
6	חישוב + הסבר ממה מורכב מקדם מעבר החום	השוואה למקדם ההסעה מהניסוי
4	גרף עבור הסעה חופשית	פילוג טמפ' לרוחב הפלטה
4	גרף עבור הסעה מאולצת	
4		יחידות
15		מסקנות