

# מדחס

מעבדת תרמודינמיקה שנה ג' סמסטר א

10/09/12

מעבדות הוראה

### **פרק בטיחות- מעבדת תרמודינמיקה- מדחס**

- 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 לכל דבר)
- לבעלי שיער ארוך- חובה לאסוף את השער בכניסה לכל חדר מעבדה או ניסוי ולהכניסו מתחת לחולצה
- אין לעבוד עם שרזולים ארוכים ולא רכוסים ו/או בגדים רפויים
- סטודנט שלא יגיע עם נעליים סגורות -היינו נעלים סגורות באופן מלא גם מלפנים (אצבעות רגליים) וגם מאחור (קרסול 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

- האוויר הדחוס היוצא משסתום הפליטה יכול להגיע מעל לטמפר'  $140^{\circ}\text{C}$ . יש להיזהר שלא לגעת בצינור היציאה.
- זהירות! ציוד סובב. אין להכניס חוטים/עצמים לכיסוי המנוע!
- בעת פריקת האוויר הדחוס ממיכל האגירה, אין לכוון את צינור הפליטה לעבר חלקי הגוף. יש לפתוח בזהירות את הברז בעוד שהצינור מוחזק כלפי מטה.
- במידה ומתגלה סדק או כשל כלשהו במיכל האגירה, יש להפסיק מיד את הניסוי.
- הקפד על סביבת עבודה נקייה- ציוד שאינו בשימוש, החזר אותו למקומו.
- לא יודע כיצד להפעיל? קרא למדריך או טכנאי



צינור  
היציאה

צינור פליטת  
הלחץ ממיכל

ממיכל האגירה

## מדחס בוכנה

### רקע תיאורטי

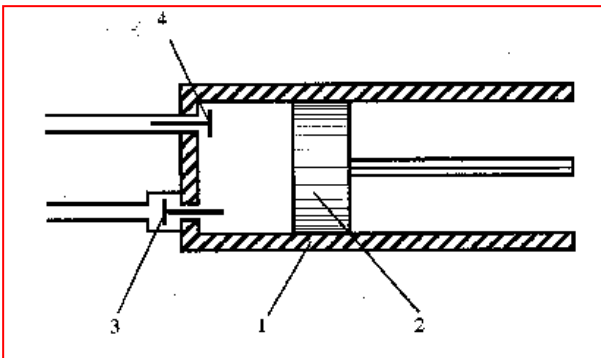
#### הגדרה

מדחס הנו מתקן המשמש להעלאת לחץ הגזים בתוכו. ישנם מספר סוגי מדחסים, אולם אנו נתייחס למדחס בוכנה חד דרגתי.

#### מבנה המדחס

המדחס כולל את המרכיבים הבאים:

- צילינדר חלול (1)
- בוכנה (2)
- שסתום פליטה (3)
- שסתום יניקה (4)



#### ניתוח תרמודינמי של התהליך

לשם בחינת התהליך נניח מספר הנחות המפשטות את הניתוח התרמודינמי:

#### הנחות עבור מדחס אידיאלי:

- כל התהליכים הפיכים פנימיים וכמו-כן אין חיכוך.
- היניקה כמו גם הפליטה נעשים בלחץ קבוע.
- הדחיסה וההתפשטות איזותרופים, איזותרמים, או פוליטרופים.
- נפח היניקה של הגז הטרי קטן מנפח מהלך הבוכנה (נפח מהלך הבוכנה = מכפלת שטח חתך הבוכנה באורך המהלך).

במדחס אידיאלי אמיתי בתום תהליך הפליטה נותר גז בלחץ גבוה הכלוא בנפח שבין הבוכנה לראש הצילינדר. נפח זה מכונה נפח שווא,  $V_c$ , וערכו הוא כ- 4% עד 10% מנפח המהלך. בתהליך ההתפשטות, נפח הגז הנותר ( $V_0$ ) גדל, ולכן נפח הגז הטרי הנכנס לצילינדר קטן מנפח מהלך הבוכנה ובודאי מסה"כ נפח הצילינדר.

#### מדחס מציאותי

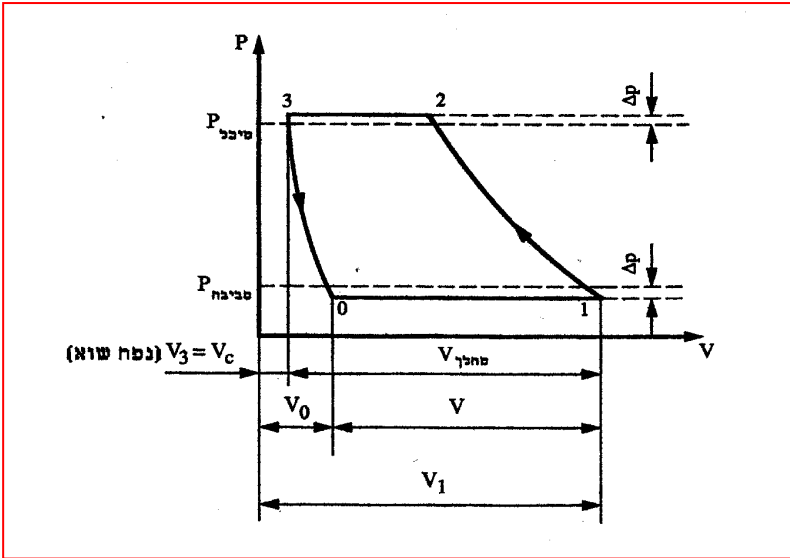
במדחס חד דרגתי מציאותי קיים מפל לחץ על פתחי השסתומים, כך שבפועל תהליך היניקה והפליטה לא נעשים בלחצים קבועים.

#### מדחסים רב דרגתיים

כאשר דרוש לספק לחץ גבוה יותר של אוויר דחוס (שיים לב שהלחץ במיכל האגירה שווה ללחץ האספקה), הלחץ של הגז הנותר בתוך הצילינדר גבוה יותר, נפחו בתנאי לחץ הכניסה גדול יותר, ולכן נפח הגז הטרי הנכנס לצילינדר במהלך היניקה קטן יותר. במקרה קיצוני, אם הלחץ שדרוש לספק שווה ללחץ המקסימלי בתוך הצילינדר (הלחץ בתום מהלך הדחיסה), ברור כי ספיקת האוויר הדחוס המסופק לצרכן תהיה שווה לאפס.

במקרים בהם נדרש לספק אוויר דחוס בלחצים גבוהים, ניתן להשתמש במדחסים בעלי יחס דחיסה גבוה יותר, או לחילופין במספר דרגות דחיסה. שימוש במספר דרגות דחיסה הוא יעיל יותר (הוכח). פתרון מסוג זה מאפשר גם לקרר את האוויר בין דרגה לדרגה ולהעלות עוד את יעילותו של המתקן.

**דיאגרמת P-V המתארת את התהליך המחזורי המתרחש במדחס :**



- 1 ← 0 תהליך היניקה. שסתום היניקה פתוח וגז טרי נכנס לצילינדר בלחץ קבוע.
- 2 ← 1 תהליך הדחיסה. שני השסתומים סגורים והלחץ בצילינדר עולה.
- 3 ← 2 תהליך הפליטה. שסתום הפליטה פתוח והגז נפלט החוצה בלחץ קבוע.
- 0 ← 3 תהליך התפשטות. השסתומים סגורים והלחץ בצילינדר יורד.

**משוואת תרמודינמיות המייצגות את התהליך הדחיסה:**

מתקן הניסוי כולל את מדחס הבוכנה ומיכל לאגירת האוויר הדחוס ואספקתו לצרכן. ניתן לעטוף את המתקן (המדחס והמיכל) במעטפת דמיונית של נפח בקרה, ולראות את תהליך הדחיסה והאספקה כתהליך SSSF עם כניסה אחת ויציאה אחת.

החוק הראשון של התרמודינמיקה עבור נפח בקרה הנז:

$$\dot{Q}_{c.v} + \sum \dot{m}_i \left( h_i + \frac{V_i^2}{2} + gZ_i \right) = \frac{dE_{c.v}}{dt} + \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e \right) + \dot{W}_{c.v}$$

מאחר והמסה בכל נקודה בנפח הבקרה קבוע בזמן (משמע:  $\frac{dm_{c.v}}{dt} = 0$ ,  $\frac{dE_{c.v}}{dt} = 0$ ), נקבל את המשוואה הבאה:

$$\dot{Q}_{c.v} + \dot{m}_i h_i = \dot{m}_e h_e + \dot{W}_{c.v}$$

מתוך חוק שימור המסה:

$$\frac{dm_{c.v.}}{dt} = \sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_e$$

ולכן:

$$\dot{m}_e = \dot{m}_i$$

החוק השני של תרמודינמיקה עבור נפח בקרה:

$$\frac{dS_{c.v.}}{dt} + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i \geq \sum_{c.v.} \frac{\dot{Q}_{c.v.}}{T}$$

עבור תהליך הפיך מסוג SSSF בעל כניסה ויציאה אחת, נקבל:

$$\dot{m}_i (s_e - s_i) = \frac{\dot{Q}_{c.v.}}{T}$$

מהצבת החוק השני בחוק הראשון מתקבל:

$$\dot{W}_{c.v.} = \dot{m}_i [T(s_e - s_i) - (h_e - h_i)]$$

מתוך קשרים בין תכונות תרמודינמיות:

$$Tds = dh - vdp$$

נקבל את המשוואה הבאה:

$$\frac{\dot{W}_{c.v.}}{\dot{m}_i} = -\int v dP$$

כלומר העבודה מבוטאת כשטח תחת דיאגרמת v-P.  
נציין כי עבודה המושקעת בנפח הבקרה כמו גם חום הנפלט מנפח הבקרה מוגדרים שליליים.

**פיתוח משוואת עבודת הדחיסה בתנאים שונים:**

אוויר, גז אידיאלי, מקיים את משוואת הגזים האידיאליים:

$$PV = mRT$$

נשתמש בקשר זה למציאת משוואת העבודה השונות.

$$\frac{\dot{W}_{c.v.}}{\dot{m}_i} = -\int \frac{RT}{P} dP = -RT \ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right) = P_1 v_1 \ln \left( \frac{P_1}{P_2} \right)$$

העבודה שיש להשקיע בדחיסה איזותרמית:

$$Pv = \text{const}$$

העבודה שיש להשקיע בדחיסה איזנטרופית (תהליך אדיאבטי הפיך):

$$Pv^K = \text{const}$$

$$\frac{\dot{W}_{c.v.}}{\dot{m}_i} = -\int \frac{P_1^{\frac{1}{k}} v_1}{P^{\frac{1}{k}}} dP = -P_1^{\frac{1}{k}} v_1 \int \frac{1}{P^{\frac{1}{k}}} dP = \frac{k}{k-1} P_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

העבודה שיש להשקיע בדחיסה פוליטרופית:

$$Pv^n = const$$

$$\frac{\dot{W}_{c.v.}}{\dot{m}_i} = \frac{k}{k-1} P_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

ניתן להראות כי העבודה שיש להשקיע בדחיסה איזותרמית היא הקטנה ביותר.

### קשרים בתהליך פוליטרופי:

מתוך הגדרת התהליך הפוליטרופי, ומשוואת הגזים האידיאליים:

$$PV^n = const$$

$$PV = mRT$$

מתקבלים הקשרים הבאים:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^n$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1}$$

עבור שני מצבים ידועים:

$$P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$$

$$n \ln \left( \frac{V_1}{V_2} \right) = \ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right)$$

$$n = \frac{\ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right)}{\ln \left( \frac{V_1}{V_2} \right)} = \frac{\ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right)}{\ln \left[ \frac{\left( \frac{V_1}{V_2} \right)^n}{\left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1}} \right]} = \frac{\ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right)}{\ln \left[ \frac{\left( \frac{P_2}{P_1} \right)}{\left( \frac{T_2}{T_1} \right)} \right]}$$

מקדם הפוליטרופה, עבור תהליך פוליטרופי בו חומר העבודה הנו גז אידיאלי, הנו:

$$n = \frac{\ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right)}{\ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right) - \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right)}$$

**שאלות הכנה (ללא הגשה או ציון)**

בהתבסס על הקשרים התרמודינמיים שהוצגו, מצאו את התלות בין הפרמטרים הבאים:  
 בין  $n$ , מקדם פוליטרופי, ל-  $P_2$ , לחץ הפליטה.

בין  $\dot{V}_{TP}$ , נפח הגז הטרי הנכנס בתנאי סביבה, ל-  $P_2$ , לחץ הפליטה.

בין  $\eta_v$ , הנצילות הנפחית, ל-  $P_2$ , לחץ הפליטה.

בין  $\frac{\dot{W}}{\dot{W}_T}$ , היחס בין הספק המדחס האיזותרמי להספק המדחס הפוליטרופי, ל-  $P_2$ , לחץ הפליטה.

עם עליית לחץ הפליטה,  $P_2$ , כיצד ישתנו  $n$ ,  $\dot{V}_{TP}$ ,  $\eta_v$  ו-  $\frac{\dot{W}}{\dot{W}_T}$ ?

שרטט גרף תיקני (לפי ההגדרות ב HighLearn) של דיאגרמת P-V על בסיס נתוני המנוע הנתונים בטבלה, התאם קו מגמה לכל שלב וחליץ מקו המגמה את מקדמם הפוליטרופה של כל שלב.

שלב	V [cc]	P [bar]
0→1	10	0.75
	15	
	20	
	25	
	30	
1→2	24.4	1
	20.8	1.25
	18.3	1.5
	16.3	1.75
	14.8	2
2→3	12.4	2
	9.5	
	6.4	
	3.4	
	3.75	
3→0	4.3	1.75
	5	1.5
	6	1.25
	7.5	1
	10	0.75

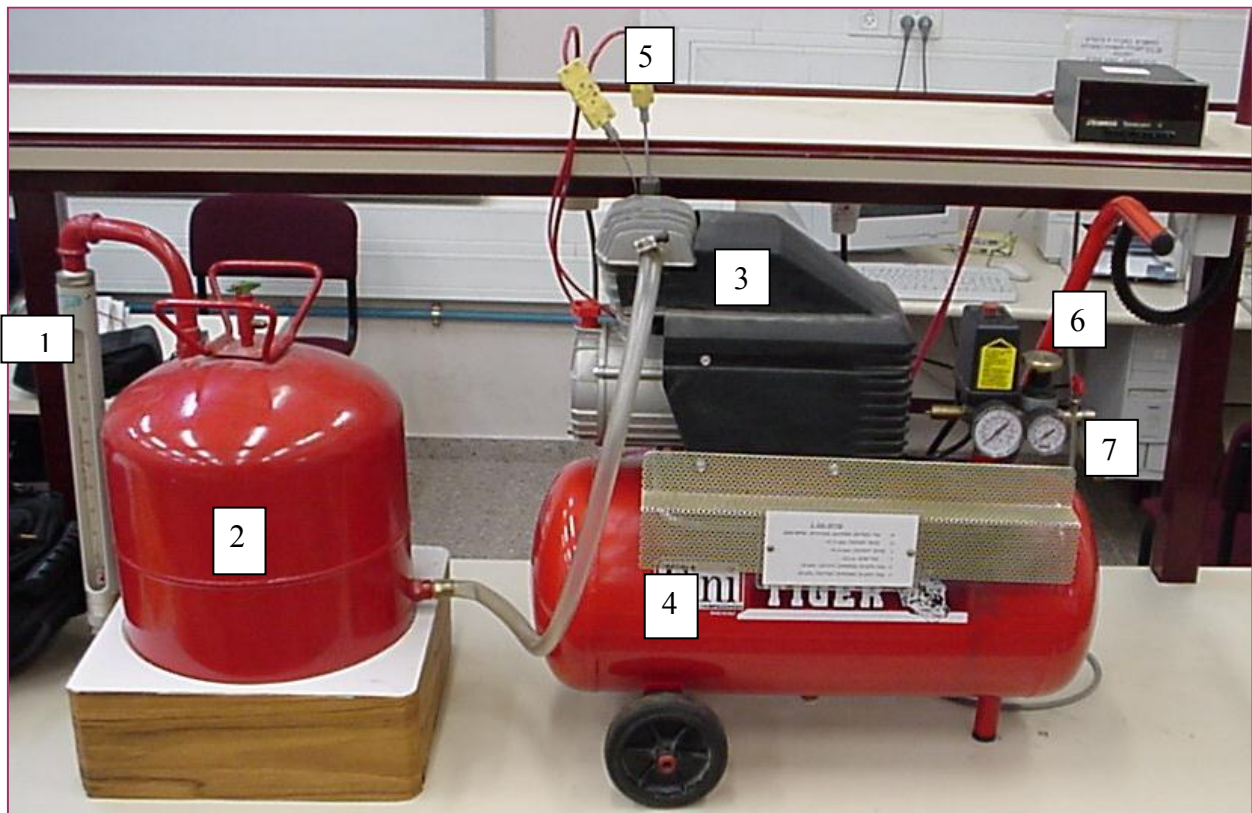
**הערה:** על מנת לבצע את הניסוי בצורה יעילה עליכם להכיר את כל הפרטים של המערכת ולדעת מהו תפקידו של כל חלק (צג, ידית, מד, וכו').

## הניסוי

### מטרת הניסוי

הכרת עקרונות הפעולה של מדחס בוכנה חד דרגתי. מציאת הפרמטרים העיקריים המשפיעים על פעולת המדחס, ובדיקת השתנותם כתלות בלחץ הפליטה.

### תאור מערכת הניסוי



מערכת הניסוי מורכבת מהחלקים הבאים:

- רוטמטר (מד ספיקה נפחית). (1)
- מיכל שיכוך. (2)
- מדחס חד בוכנתי. (3)



- מיכל לחץ. (4)
- מד טמפרטורה. (5)
- וסת לחץ. (6)
- מד לחץ (מנומטר). (7)

### תיאור התהליך

הניסוי מבוצע על מדחס חד דרגתי מקורר אויר. מהירותו הסיבובית כמו גם מהלך הבוכנה, שטח חתכה, ונפח השווא נתונים. בשלב היניקה, בשל לחץ היניקה הנמוך מעט מלחץ הסביבה, אוויר החדר נכנס למערכת.

תוך כדי מעברו למדחס, נמדדת ספיקתו המסית על ידי הרוטמטר. כיוול הרוטמטר הנו באחוזים, כך ש 100% מייצג ספיקה

$$\text{של } 170 \left[ \frac{l}{\text{min}} \right]$$

מהירות האוויר בכנסה למדחס מוקטנת באמצעות שימוש במיכל שיכוך.

בעזרת שימוש בוסת הלחץ ניתן לקבוע את הלחץ במיכל. בשלב הפליטה אויר נפלט מהמדחס חזרה לחדר בשל הפרש לחצים בין המדחס למיכל הלחץ. הפרשי הלחצים ביניקה ובפליטה מתאפשר הודות לשסתומי הפליטה והיניקה במדחס.

### מהלך הניסוי

1. הפעילו את המדחס.
2. המתינו מספר דקות להתייצבות.
3. שנו את הלחץ במיכל על ידי שימוש בוסת הלחץ.
4. קראו ורשמו את הלחץ במנומטר ואת הערכים המתקבלים ברוטמטר ובמד הטמפרטורה המוצב ביציאה מהמדחס.
5. חזרו מספר פעמים על הפעולה עם שינוי לחץ המיכל.

$T_2 [^{\circ}C]$ טמפרטורת פליטה	$\dot{V}[\%]$ ספיקה נפחית בכניסה	$P_{\text{gage}(tank)} [bar]$ לחץ המיכל	מספר מדידה
		2	1
		3	2
		4	3
		5	4

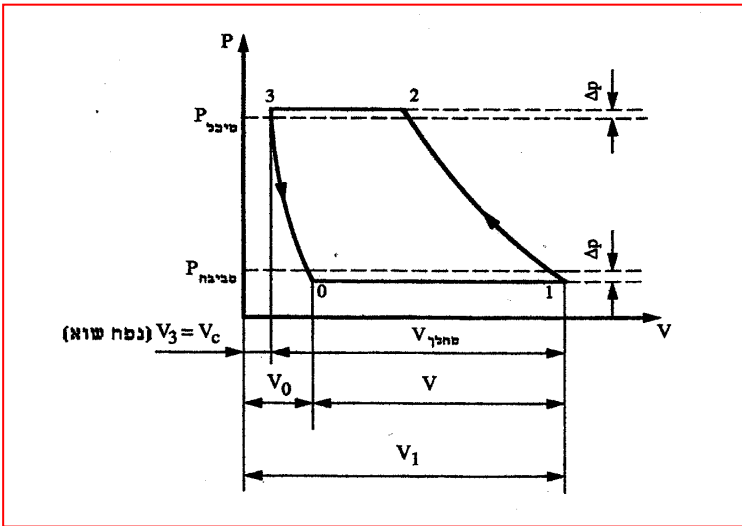
נתונים נוספים:

הערך	הפרמטר
	$T_1 [^{\circ}C]$ - טמפרטורת הסביבה
	$\omega [rpm]$ - מהירות סיבובית של ציר המדחס
	$D [cm]$ - קוטר הבוכנה
	$L [cm]$ - אורך מהלך הבוכנה
	$\Delta P [kPa]$ - מפל הלחץ בשסתומי היניקה והפליטה
	$V_c [cc]$ - נפח שווא

**עיבוד תוצאות**

1. רשמו את מטרת הניסוי.
2. רשמו את הנוסחאות הבאות בצורתן הפרמטרית והציגו דוגמת חישוב מפורטת בהתבסס על תוצאות המדידה הראשונה. אנה הקפידו על בדיקת ורישום היחידות.

הנוסחאות הבאות מבוססות על הסכימה הבאה, דיאגרמת PV במדחס אידיאלי אמיתי בו תהליך הדחיסה וההתפשטות פוליטרופי.



מצב 1 מוגדר כיניקה, מצב 2 כפליטה.

**א. לחץ היניקה:**  
לחץ היניקה נמוך מעט מלחץ הסביבה, בשל מפל הלחץ בשסתום היניקה, על כן:

$$P_1 = P_0 - \Delta P \quad [kPa]$$

**ב. לחץ הפליטה:**  
לחץ הפליטה גבוה מעט מלחץ המיכל, בשל מפל הלחץ בשסתום הפליטה, על כן:

$$P_2 = P_{tank} + \Delta P \quad [kPa]$$

$$P_{tank} = (P_{gage} + P_0)$$

**ג. מקדם הפוליטרופה:**  
מתוך הפיתוח שנעשה ברקע התיאורטי:

$$n = \frac{\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)}{\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) - \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}$$

**ד. מציאת  $V_0$ :**

להזכירכם, בתום תהליך הפליטה נותר גז הכלוא בין הבוכנה לראש הצילינדר. בסיום תהליך הפליטה ועד תחילת תהליך היניקה, משמע בתהליך ההתפשטות הפוליטרופית, השסתומים סגורים. לכן מסת הגז הכלוא נשארת קבועה, אולם בשל ירידת הלחץ, נפח הגז הכלוא גדל. תהליך ההתפשטות הנו פוליטרופי על כן מתקיים הקשר הבא:

$$P_2 V_c^n = P_1 V_0^n$$

↓

$$V_0 = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}} V_c \quad [cc]$$

ה. נפח הצילינדר,  $V_1$  :

נפח הצילינדר הנו נפח המהלך בתוספת נפח השווא.

$$V_1 = V_c + \frac{\pi D^2}{4} \cdot L \quad [cc]$$

ו. נפח הגז הטרי המחושב,  $V_{cal}$  :

בשלב היניקה נכנס גז טרי למערכת הניסוי. נפח זה מוגבל בשל קיום  $V_0$ .

$$V_{cal} = V_1 - V_0 \quad [cc]$$

ז. נפח הגז הטרי המחושב, בתנאי סביבה,  $V_{TP-cal}$  :

נפח הגז הטרי, כפי שחושב בסעיף הקודם  $V_{cal}$  מתקבל עבור מצב יניקה, בו הלחץ והטמפרטורה שונים במקצת מאלו הקיימים בסביבה. כדי שנוכל להשוות בין הספיקה הנפחית של הגז הטרי שנמדדה בניסוי בתנאי סביבה ( $\dot{V}[\%]_{exp}$ ), לבין הספיקה המחושבת באותם תנאים ( $\dot{V}_{TP-cal}$ ) עלינו למצוא את ערכו של  $V$  בתנאי סביבה ( $V_{TP-cal}$ ). מאחר שהאוויר הנו גז אידיאלי, הוא מקיים את משוואת הגזים האידיאליים:

$$PV = mRT$$

נוכל להשוות בין שני המצבים הבאים:

מצב ראשון – מצב היניקה בו הלחץ הנו לחץ היניקה  $P_1$ , ונפח הגז הטרי כפי שחושב הנו  $V$ .

מצב שני – יניקה בתנאי סביבה, משמע  $P_0$ , ונפח הגז הטרי  $V_{TP}$ .

נניח כי שינוי הטמפרטורה בין המצב הראשון לשני זניחה, על כן:

$$P_0 V_{TP-cal} = P_1 V_{cal}$$

↓

$$V_{TP-cal} = \frac{P_1}{P_0} V_{cal} \quad [cc]$$

ח. הספיקה הנפחית המחושבת של הגז הטרי, בתנאי סביבה,  $\dot{V}_{TP-cal}$  :

הספיקה הנפחית תתקבל על ידי הכפלת נפח הגז הטרי הנכנס בכל מחזור במספר הפעמים שהמדחס מבצע את המחזור בדקה.

$$\dot{V}_{TP-cal} = V_{TP-cal} \cdot \omega \quad \left[ \frac{l}{min} \right]$$

ט. הספיקה המדודה, בתנאי סביבה,  $\dot{V}_{TP-exp}$  :

$$\dot{V}_{TP\text{-exp}} = \dot{V}[\%] \times \frac{170[l/\text{min}]}{100[\%]} \quad [l/\text{min}]$$

י. הנצילות הנפחית,  $\eta_v$ :

הנצילות הנפחית מוגדרת כיחס בין נפח הגז הטרי שנכנס למדחס לבין נפח המהלך.

$$\eta_v = \frac{V_{cal}}{V_1 - V_c}$$

יא. הספק המדחס,  $\dot{W}$ :

הספק המדחס יתקבל על ידי הכפלת עבודת המדחס במהירותו הסיבובית של המדחס. תהליך הדחיסה הנו פוליטרופי, על כן:

$$\dot{W} = \frac{n}{n-1} P_1 \dot{V}_{TP\text{-exp}} \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] \quad [kW]$$

יב. הספק המדחס האיזותרמי,  $\dot{W}_T$ :

הספק המדחס אילו התהליך היה איזותרמי.

$$\dot{W}_T = P_1 \dot{V}_{TP\text{-exp}} \ln \frac{P_1}{P_2} \quad [kW]$$

3. השתמשו בתוכנת Excel לשם חישוב הנוסחאות עבור יתר המדידות.

4. הציגו את התוצאות בטבלה מסודרת.

5. בעזרת תוכנת Excel הציגו את הגרפים הבאים:

$\dot{V}_{TP\text{-cal}}$  ו  $\dot{V}_{TP\text{-exp}}$  כפונקציה של  $P_2$

$n$  כפונקציה של  $P_2$

$\frac{\dot{W}}{\dot{W}_{TP}}$  כפונקציה של  $P_2$

6. רשמו את מסקנותיכם בהסתמך על הגרפים. יש לבסס מסקנות אלו על ידי שימוש בנוסחאות המתאימות.

**עבודה מהנה !!!**

**ביבליוגרפיה**

Sonntag, Borgnakke & Van Wylen, F Fundamentals of Thermodynamics, John Wiley, 1998

העשרה:

<http://www.csupomona.edu/~physics/demo/thermody.html>

<http://www.talkorigins.org/faqs/thermo/probability.html>

[http://www.danfoss.com/compressors/technical\\_information/technical\\_information\\_index.htm](http://www.danfoss.com/compressors/technical_information/technical_information_index.htm)