

מנוע אוטו

מעבדת תרמודינמיקה שנה ג' סמסטר א

10/09/12

מעבדות הוראה

פרק בטיחות- מעבדת תרמודינמיקה- מנוע אוטו

- 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

- המנוע נמצא מחוץ למעבדה- בשום מקרה אין להפעיל את המנוע ללא אישור מדריך או טכנאי.
- המנוע מגיב לאט לשינויים בסל"ד. יש להעלות בהדרגה את הסל"ד (לפתוח מצערת) ולחכות להתייצבות המנוע.
- אין לעבור 4,500 סל"ד, הגנת המנוע תפסיק את פעולתו אוטומטית.
- לקראת כיבוי המנוע, יש להוריד את העומס ואת הסל"ד בהדרגה.
- במקרה של אירוע מסכן חיים או תקלה בלתי הפיכה למנוע, יש ללחוץ על לחצן החירום, Emergency Stop, הממוקם בצידו הימני תחתון של פאנל השליטה
- הקפד על סביבת עבודה נקייה- ציוד שאינו בשימוש, החזר אותו למקומו.
- לא יודע כיצד להפעיל? קרא למדריך או טכנאי

פאנל השליטה במנוע



כפתור חירום

רקע תיאורטי

הגדרה

מנוע הוא מכונה ההופכת אנרגיה כימית ותרמית לאנרגיה מכנית.

סוגי מנועים

נהוג להבחין בין שני סוגי מנועים: מנוע בשריפה פנימית ומנוע בשריפה חיצונית.

- **במנוע שריפה פנימית (ICE-Internal Combustion Engine)** חומר הבעירה עצמו מתפשט ומבצע את העבודה. לדוגמה: במנוע בנזין, חומר הבעירה, תערובת דלק ואוויר, נשרף בתוך הצילינדר תוך כדי התהוות גזים המניעים את הבוכנה בתנועה קווית. תנועה קווית זו הופכת לתנועה סיבובית על ידי שימוש בטלטל וגל ארכובה. (איור 1)
- **במנוע שריפה חיצונית (ECE-External Combustion Engine)** חומר הבעירה מחליף חום עם זורם אחר שהתפשטותו ממירה את האנרגיה התרמית למכנית. לדוגמה: במנועי קיטור, חומר הבעירה, תערובת אויר ודלק, נשרף ומחליף חום עם מים. המים הופכים לאדים המתפשטים דרך מעברים מעל פני ראש הבוכנה לתוך הצילינדר, ויוצרים את התנועה הקווית של הבוכנה. גם במקרה זה התנועה הקווית מומרת לתנועה סיבובית באמצעות שימוש בטלטל ובגל ארכובה.

מנוע שריפה פנימית

בסקירה תיאורטית זו נתמקד במנועי שריפה פנימית. מבין מנועי השריפה הפנימית, מנועי הבוכנה הם הנפוצים ביותר, ומשמשים להנעת כלי רכב מגדלים שונים: טיסנים, סירות, אופנועים, טנקים, אוניות, תחנות כוח ועוד.

ניתן להבחין בין מנועי השריפה הפנימית לפי הקריטריונים הבאים:

- שיטת עבודה, משמע הבחנה בין סוגים שונים של מקורות האנרגיה בהם משתמשים לבעירה. במנוע אוטו (SI-spark ignition) מקור האנרגיה הנו בנזין ואילו במנוע דיזל (CI-compression ignition) נעשה שימוש בסולר.
- מספר המהלכים הדרושים להשלמת מחזור פעולה אחד. ישנם מנועים להם דרושים ארבעה מהלכים, וישנם מנועים המשלימים מחזור פעולה בשני מהלכים בלבד.

מבנה המנוע

החלקים העיקריים המרכיבים את המנוע הנם: צילינדר, בוכנה, טלטל וגל ארכובה. הצילינדר הנו גליל חלול הסגור בקצה אחד, ובתוכו נעה הבוכנה בצורה אנכית. הטלטל, שהנו מעין מוט קשיח, מחובר בקצהו העליון לבוכנה, ובקצהו התחתון אל גל הארכובה. בשל צורתו המיוחדת של גל הארכובה, תזוזתה האנכית של הבוכנה מומרת לתנועה סיבובית על גל הארכובה.

כשגל הארכובה מסתובב, מושך הטלטל אחריו את הבוכנה ולהפך. עם סיבוב גל הארכובה הבוכנה יורדת מטה עד לנקודה התחתונה האפשרית, נקודה זו נקראת הנקודה התחתונה (BC-bottom center). בהמשך סיבובו של גל הארכובה דוחף הטלטל את הבוכנה מעלה עד לנקודה העליונה האפשרית, נקודה עליונה (TC-top center). המרחק בין שתי הנקודות האלו נקרא מהלך בוכנה. תנועת הבוכנה מהנקודה העליונה עד לנקודה התחתונה נקראת מהלך. מהלך הבוכנה מתבצע כאשר גל הארכובה משלים סיבוב של 180 מעלות.

מחזור ארבעה מהלכים לפי מחזור אוטו

מחזור הפעולה של מנוע ארבע - פעימות כולל את ארבע הפעימות הבאות: יניקה, דחיסה, התפשטות ופליטה. מחזור זה מושלם בסיום שני סיבובים של גל הארכובה (720 מעלות). כל אחד מהמהלכים משמש שלב מכין למהלך הבא ומשתלב היטב עם המהלך הקודם לו.

❖ מהלך היניקה:

במהלך זה יורדת הבוכנה מהנקודה העליונה לנקודה התחתונה, כך שנוצר הפרש לחצים בין הסביבה לבין פנים הצילינדר. בעת פתיחת שסתום היניקה נשאבת תערובת אויר ודלק לתוך הצילינדר. עם סיום התהליך נסגר שסתום היניקה.

❖ מהלך הדחיסה:

במהלך זה עולה הבוכנה מהנקודה התחתונה לנקודה העליונה, כך שהתערובת נדחסת. לאורך מהלך זה שסתומי היניקה והפליטה סגורים.

❖ מהלך ההתפשטות (מהלך העבודה):

לפני תחילתו של מהלך זה מוצתת התערובת הדחוסה על ידי ניצוץ חשמלי. שריפה זו גורמת להתפשטות הגזים השרופים, המאלצים את הבוכנה לנוע מהנקודה העליונה לנקודה התחתונה. האנרגיה המכנית הנוצרת במהלך זה מנוצלת לסיבוב גל הארכובה בשלושת המהלכים הנותרים, משמע יתר המהלכים הנם מהלכי עזר בעוד מהלך ההתפשטות הנו מהלך העיקרי במחזור. גם במהלך זה סגורים שסתומי הפליטה והיניקה.

❖ מהלך הפליטה:

במהלך זה הבוכנה עולה מהנקודה התחתונה לעליונה, תוך כדי פתיחת שסתום הפליטה. הגזים השרופים נפליטים מהצילינדר והצילינדר מוכן למהלך היניקה.

☒ הפסדי יניקה (Pumping losses): על מנת לקיים את מהלכי הפליטה והיניקה יש להשקיע עבודה לכן סך העבודה במהלכים אלו היא שלילית, עיקר הפסדי היניקה נובע מהפסד מקומי על המצערת. כאשר המצערת סגורה (סרק) או פתוחה חלקית (עומס חלקי) הפסדי היניקה גדולים ממצב של מצערת פתוחה (עומס גבוהה).

לחצו כאן להדמיית מחזור ארבעה מהלכים

במחזור פעולה אחד יורדת הבוכנה במהלך היניקה ובמהלך העבודה, ועולה במהלך הדחיסה ובמהלך הפליטה. כלומר הבוכנה עולה ויורדת פעמיים בכל מחזור פעולה, אולם כל שסתום נפתח פעם אחת בלבד. לשם פעולתו התקינה של המנוע יש הכרח בתיאום מלא בין השסתומים לבוכנה. תיאום זה נקרא תזמון שסתומים.

מחזור אוטו דו מהלכי

במנוע דו מהלכי משתמשים בו זמנית בחלל הצילינדר מעל הבוכנה ובחלל בית הארכובה. באופן זה ניתן לבצע שתי פעולות בו זמנית.

❖ מהלך הדחיסה:

הבוכנה נעה מעלה, התערובת הכלואה בצילינדר נדחסת, ותערובת חדשה נכנסת לבית הארכובה דרך פתח היניקה.

❖ מהלך ההתפשטות (מהלך העבודה):

בו זמנית הגזים השרופים מתפשטים בתוך הצילינדר, הבוכנה נעה מטה, הגזים נפליטים החוצה, והתערובת נדחסת בבית הארכובה ומועברת לצילינדר.

במחזור פעולה אחד הבוכנה יורדת ועולה פעם אחת, כלומר מהלך העבודה מתרחש כל סיבוב של גל הארכובה. אין צורך בשסתומי יניקה ופליטה.

לחצו כאן להדמיית מחזור דו מהלכי

למרות שמהלך העבודה במחזור דו מהלכי מתרחש כל סיבוב של גל הארכובה, יתרונו של מנוע זה לעומת מנוע ארבעה מהלכים קטן וזאת בשל היותו בזבזני בדלק (כמות לא זניחה של דלק טרי נפלטת דרך פתחי הפליטה בצילינדר). במנוע דו מהלכי משתמשים כאשר נדרש יחס גבוה בין הספק המנוע למשקלו.

ריבוי צילינדרים

בדגמים הראשונים של כלי הרכב השתמשו במנועים בעלי צילינדר אחד, אולם עד מהרה נתבררו יתרונות רבים למנועים מרובי הצילינדרים. שהרי כפי שהוזכר במנוע בעל צילינדר יחיד מהלך העבודה הנו 180 מעלות באופן תיאורטי, בפועל רק בכ-140 מעלות מתבצעת עבודה, כך שיתר 580 מעלות הסיבוב של גל הארכובה הנם מהלכי עזר. מכאן שבמנוע בעל 4 צילינדרים נגיע למהלך עבודה של 560 (4*140) מעלות מתוך 720 ואילו במנוע 6 צילינדרים נקבל חפיפה בין מהלכי העבודה.

העשרה:

מנוע ארבעה מהלכים במחזור דיזל

ההבדלים העיקריים בין מנוע הפועל לפי מחזור אוטו לבין זה הפועל במחזור דיזל הנם: באופן הזנת הדלק, אופן הכנת התערובת ואופן ההצתה. בעוד שבמנוע אוטו מתערבב הדלק עם האוויר מחוץ לצילינדר, הרי שבמנוע דיזל רק אוויר נכנס לצילינדר במהלך היניקה ואילו הדלק מוזרק לתא השריפה רק בסוף מהלך הדחיסה. כמו כן, בניגוד למנוע אוטו בו הצתת התערובת נעשית על ידי ניצוץ חשמלי, במנוע דיזל התערובת ניצתת מעצמה בשל הלחץ והטמפרטורה הגבוהים בתא השריפה.

איפיון מנועים

מנוע שריפה פנימית מאופיין על ידי הפרמטרים הבאים:

- פרמטרים בסיסיים: מספר צילינדרים, אופן הצבתם, מספר הפעילות וסוג המחזור.
- גדלים פסיים: משקל כללי, נפח תזוזה כולל, אורך מהלך, קוטר צילינדר ויחס דחיסה.
- אופייני ביצוע: עקומת עבודה בעומס מלא ובעומס חלקי ושיעור הגזים הנפלטים לסוגיהם.
- נתונים מיוחדים: מיקום השסתומים ואופן הפעלתם, צורת חלל השריפה, עקרון מערכת ההצתה, אופן הזנת הדלק ועוד.

אופייני ביצוע

אופייני הביצוע של מנוע מוצגים גרפית בעקומת עבודה בעומס מלא וכמפת ביצועים בעומס חלקי. קיימים שישה פרמטרים בעזרתם ניתן לאפיין את המנוע. פרמטרים אלו תלויים במהירות סיבוב גל הארכובה:

- **הספק מושקע למנוע:** קצב אספקת האנרגיה האגורה בדלק כחום השריפה.
- **Friction power – f_p :** ההספק המתבזבז הן בחיכוך בין חלקיו הפנימיים של המנוע, והן בהפעלת מערכות עזר ההכרחיות לפעולתו התקינה של המנוע. אם אופיין זה אינו ידוע ניתן להניח כי גודלו פרופורציונלי בקירוב לריבוע מהירותו הסיבובית של גל הארכובה.

$$f_p \propto N^2$$

- **Indicator power – i_p :** ההספק האינדיקטורי, משמע ההספק המועבר אל הבוכנה עצמה. זהו השטח הכלוא דיאגרמה אינדיקטורית (דיאגרמת P-V).

$$i_p = \frac{W_i \cdot n \cdot N}{X}$$

- **Brake power – b_p :** הספק המנוע לבלימה, משמע ההספק המתקבל על גל הארכובה.

$$b_p = i_p - f_p$$

- **T-Torque** : המומנט המתפתח על גל הארכובה.

$$T = \frac{b_p}{2\pi \frac{N}{60}}$$

- **sfc – Specific fuel consumption** : תצרוכת הדלק הסגולית של המנוע. היא מוגדרת ליחידת הספק אינדיקטורי, בלימה או חיכוך.

$$isfc = \frac{\dot{m}_f}{i_p}$$

$$bsfc = \frac{\dot{m}_f}{b_p}$$

$$fsfc = \frac{\dot{m}_f}{f_p}$$

- **נצילות של מנוע**: נצילות אינדיקטורית, נצילות בלימה ונצילות מכנית

$$\eta_i = \frac{i_p}{H_{RP}}$$

$$\eta = \frac{b_p}{H_{RP}}$$

$$\eta_m = \frac{b_p}{i_p}$$

נצילות אינדיקטורית מוגדרת כיחס בין ההספק האינדיקטורי המתקבל, לבין קצב אספקת האנרגיה האגורה בדלק כחום השריפה. על כן:

נצילות בלימה מוגדרת כיחס בין ההספק היעיל המתקבל, לבין קצב אספקת האנרגיה האגורה בדלק כחום השריפה. על כן:

הנצילות המכנית של המנוע ניתן להגדיר כיחס בין ההספק היעיל המתקבל, לבין ההספק האינדיקטורי.

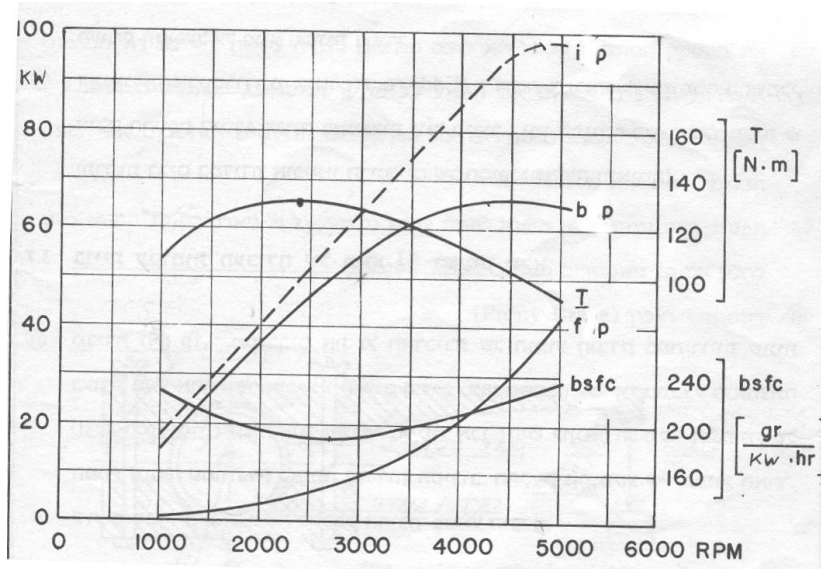
כאשר:

W_i	זו העבודה המתקבלת על הבוכנה בכל צילינדר לכל מחזור.
n	הנו מספר הצילינדרים.
X	הנו מספר סיבובי גל הארכובה לכל מחזור עבודה. ($X=2$ עבור מנוע ארבעה מהלכים ואילו $X=1$ עבור מנוע דו מהלכי.)
N	הנו מהירות סיבוב גל הארכובה.
\dot{m}_f	ספיקה מסית של דלק הנצרכת על ידי המנוע.
h_{RP}	ערך ההיסק (החום המתקבל בתהליך שריפה סטוכיומטרית)

מדידה של הספק המנוע לבלימה נעשית באמצעות שימוש בדינמומטר המעמיס את גל הארכובה בצורה מבוקרת. קיימים סוגים שונים של דינמומטרים, אנו נתמקד בדינמומטר החשמלי שהוא למעשה גנרטור חשמלי המועמס על ידי מעגל חשמלי חיצוני (בניסוי – תנורים חשמליים).

עקומות עבודה בעומס מלא עבור מנוע אוטו

עקומות העבודה בעומס מלא של מנוע מסוים מתארות את ההספקים השונים של המנוע, את המומנט המתפתח על גל הארכובה ואת תצרוכת הדלק הסגולית שלו כתלות במהירות הסיבוב.



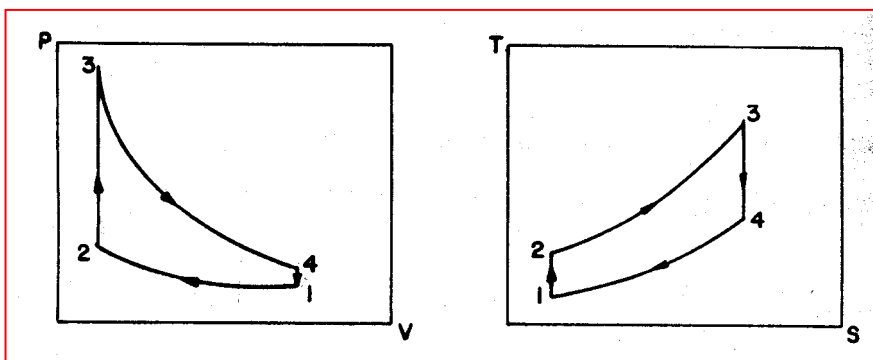
ניתן לראות כי עקום ההספק האינדיקטורי, i_p , עולה עם מהירות הסיבוב. אולם, במהירות גבוהה מדי משך הזמן העומד לרשות התערובת להיכנס לצילינדר קטן, כך שבמהירויות גבוהות מסת התערובת הנכנסת לצילינדר קטנה, ועל כן i_p קטן. מהירות הסיבוב האופטימלית עבור כל אחד מהמאופיינים שונה.

תאור תרמודינמי של מחזור אוטו אידיאלי

במנועי שריפה פנימית כל מהלך מורכב ממספר תהליכים לא הפיכים. על כן קשה לתאר את התהליך האמיתי בעזרת אוסף של תהליכים אידיאליים. נוכל בכל זאת לייצג את התהליך על ידי שימוש במשוואות מתמטיות לשם בדיקה איכותית של השפעת הגורמים השונים על נצילות המחזור, עבודת המחזור ועוד. ההנחות בהן נשתמש הן:

- ההרכב הכימי של חומר העבודה אינו משתנה במשך המחזור.
- חומר העבודה נחשב לאויר המתנהג כגז אידיאלי.
- תהליכי הפליטה והיניקה מוחלפים בתהליך של גריעת חום בנפח קבוע.
- קיבול החום של חומר העבודה אינו תלוי בטמפרטורה ובלחץ.
- תהליך השריפה מוחלף בתהליך של תוספת חום בנפח קבוע.
- אין הפסדי חום בדופן הצילינדר.
- כל התהליכים הפיכים.

מחזור אוטו הנו מחזור תרמודינמי הכולל שתי איזותרות ושתי איזנטרופות.



דיאגרמת P-V נקראת דיאגרמה אינדיקטורית של המחזור.
 1 → 2 הנו מהלך הדחיסה, דחיסה איזנטרופית.
 2 → 3 הנו תהליך הבעירה, הוספת חום בנפח קבוע.
 3 → 4 הנו מהלך העבודה, התפשטות איזנטרופית.
 4 → 1 הנו מהלך הפליטה והיניקה, גריעת חום בנפח קבוע.

בשל ההנחה כי התהליכים הפיכים, נוכל להשתמש בקשרים התרמודינמיים הבאים:

$$W = \oint PdV$$

$$Q = \oint TdS$$

משמע:

השטח בדיאגרמת P-V, השטח תחת העקום מייצג עבודה.
 השטח בדיאגרמת T-S, השטח תחת העקום מייצג חום.

החוק הראשון של תרמודינמיקה עבור תהליך מחזורי הנו:

$$\oint \delta Q = \oint \delta W$$

במחזור אוטו נקבל:

$${}_2Q_3 + {}_4Q_1 = {}_1W_2 + {}_3W_4$$

הנצילות התרמודינמית (נצילות אינדיקטורית) של המחזור מוגדרת כיחס בין העבודה המתקבלת נטו לכמות החום המושקעת:

$$\eta_i = \frac{W_i}{{}_2Q_3}$$

לשם חישוב W_i ו- ${}_2Q_3$ נשתמש בחוק הראשון של התרמודינמיקה עבור מערכת במצב של SSSF:

$$Q = W + \Delta E$$

בהזנחת השינוי באנרגיה הפוטנציאלית והקינטית נקבל:

$$Q = W + \Delta U$$

תהליכים 2 → 3 ו- 4 → 1 הנם תהליכים בנפח קבוע, על כן נוכל להשתמש בקשר:

$$C_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v$$

לכן:

$${}_2Q_3 = {}_2W_3 + U_3 - U_2 = 0 + mC_v(T_3 - T_2)$$

$${}_4Q_1 = {}_4W_1 + U_1 - U_4 = 0 + mC_v(T_1 - T_4)$$

העבודה המתקבלת נטו:

$$W_i = {}_1W_2 + {}_3W_4 = {}_2Q_3 + {}_4Q_1$$

מהצבת הקשרים הנ"ל במשוואת הנצילות התרמודינמית מתקבל הקשר הבא:

$$\eta_i = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

תהליכים 1 → 2 ו- 3 → 4 הנם אדיאבטים והפיכים (איזנטרופים), וחומר העבודה הנו גז אידיאלי. לכן נוכל להשתמש בקשרים הבאים:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{1-k}, \quad \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{1-k}$$

מדיאגרמת P-V ניתן לראות כי יחס הדחיסה של המנוע:

$$R_v = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3}$$

לכן:

$$\eta_i = 1 - R_v^{1-k}$$

$$7 < R_v < 12, \quad 1 < k = \frac{C_p}{C_v} < 1.66 \quad \text{כאשר:}$$

לדוגמא, עבור יחס דחיסה של 8.5 ו- k=1.4 נצילות זו שווה ל- 57.5%.

תהליך שריפה במנוע בנוזן

תהליך השריפה הנו התהליך העיקרי והחשוב ביותר במחזור. בשריפה מתרחשת תגובה כימית בה המגיבים (אוויר ודלק) הופכים לתוצרים (גזי פליטה). כדי לנתח את התהליך מבחינה תרמודינמית, עלינו להציג מספר הגדרות שימשו אותנו בהמשך:

יחס דלק אוויר:

זהו היחס בין הספיקה המסית של הדלק לספיקה המסית של האוויר.

$$FA = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_A}$$

תצרוכת דלק סגולית:

זהו היחס בין צריכת הדלק להספק היעיל.

$$bsfc = \frac{\dot{m}_f}{b_p}$$

יחס תערובת:

יחס תערובת הנו היחס בין FA של התערובת ל- FA סטוכיומטרי. תערובת דלק אויר נקראת סטוכיומטרית אם תוצרי הבעירה של התגובה הכימית בין הדלק והחמצן יכולו רק פחמן דו-חמצני ומים.

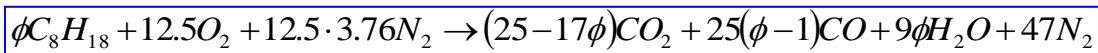
$$\phi = \frac{FA}{FA_{stc}}$$

בבנזין מסוג אוקטן C_8H_{18} , בו נשתמש בניסוי, יחס אויר דלק סטוכיומטרי הנו: $FA_{stc} = \frac{1}{14.9}$. מכאן, כאשר התערובת סטוכיומטרית נקבל $\phi = 1$.

כאשר התערובת מכילה עודפי אויר התערובת נקראת תערובת עניה, $\phi < 1$, ותוצרי הבעירה יכולו בתוכם גם מולקולות חמצן.

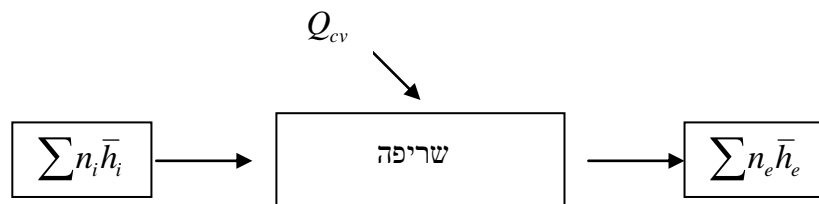


כאשר התערובת מכילה עודפי דלק התערובת נקראת תערובת עשירה, $1 < \phi < 1.47$, ותוצרי הבעירה יכולו בתוכם גם מולקולות של חד תחמוצת הפחמן.



מבחינה תרמודינמית, נניח כי השריפה מתרחשת בנפח קבוע (כמוצג בסכימה), על כן נקבל את הקשר הבא מתוך משוואת החוק הראשון של תרמודינמיקה:

$$Q_{cv} = \sum n_e (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_e + \sum (n\bar{h}_f^\circ)_e - \sum n_i (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_i - \sum (n\bar{h}_f^\circ)_i$$



כאשר $\sum n (\bar{h} - \bar{h}^\circ)$ הנו הפרש האנתלפיה מנקודת ייחוס לנקודה הקיימת. ואילו $\sum n \bar{h}_f^\circ$ הנו אנתלפית היווצרות של החומר בנקודת הייחוס.

עבור חומר הנמצא בצורתו הטהורה בטבע, אנטלפית ההיווצרות הנה 0, משמע:

$$\left[\frac{kJ}{kmole} \right] (\bar{h}_f^\circ)_{O_2} = (\bar{h}_f^\circ)_C = (\bar{h}_f^\circ)_{N_2} = 0$$

נקודת הייחוס לפיה נמצאו אנטלפיות החומרים השונים הנה בתנאים סטנדרטיים, משמע:

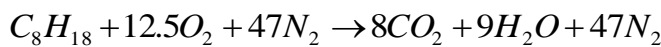
$$T_0 = 25[^\circ C], \quad P_0 = 100[kPa]$$

ערכי אנטלפית ההיווצרות של החומרים השונים מוצגים בטבלה 1 בסוף התדריך.

ערך היסק

ערך היסק הנו החום המתקבל אם התהליך התבצע בתנאים סטנדרטיים וסטוכיומטרים.

לדוגמא עבור שרפת אוקטן ביחס סטוכיומטרי נקבל את ערך ההיסק הבא :



$$\bar{h}_{RP} = 8(\bar{h}_f^\circ)_{CO_2} + 9(\bar{h}_f^\circ)_{H_2O} - (\bar{h}_f^\circ)_{C_8H_{18}}$$

$$h_{RP} = \frac{\bar{h}_{RP}}{M_{C_8H_{18}}} = 44,250 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$\begin{aligned} Q_{cv} &= \sum n_e (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_e + \sum (n\bar{h}_f^\circ)_e - \sum n_i (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_i - \sum (n\bar{h}_f^\circ)_i = \\ &= n_{CO_2} (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_{CO_2} + n_{H_2O} (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_{H_2O} + n_{N_2} (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_{N_2} + n_{CO_2} \bar{h}_{CO_2}^\circ + n_{H_2O} \bar{h}_{H_2O}^\circ + n_{N_2} \bar{h}_{N_2}^\circ - \\ &- n_{C_8H_{18}} (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_{C_8H_{18}} - n_{O_2} (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_{O_2} - n_{N_2} (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_{N_2} - n_{C_8H_{18}} \bar{h}_{C_8H_{18}}^\circ - n_{O_2} \bar{h}_{O_2}^\circ - n_{N_2} \bar{h}_{N_2}^\circ = \\ &= \underbrace{n_{CO_2} \bar{h}_{CO_2}^\circ + n_{H_2O} \bar{h}_{H_2O}^\circ - n_{C_8H_{18}} \bar{h}_{C_8H_{18}}^\circ}_{\bar{h}_{RP}} + \underbrace{n_{CO_2} (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_{CO_2} + n_{H_2O} (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_{H_2O}}_{\bar{h}_p} - \\ &- \underbrace{(n_{C_8H_{18}} (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_{C_8H_{18}} + n_{O_2} (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_{O_2})}_{\bar{h}_R} \end{aligned}$$

$$\dot{Q}_{cv} = \dot{W} + \dot{H}_p - \dot{H}_R$$

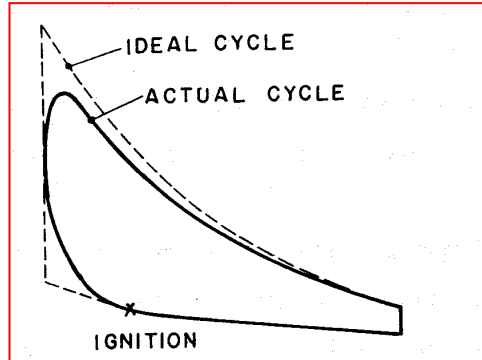
מכאן:

כאשר:

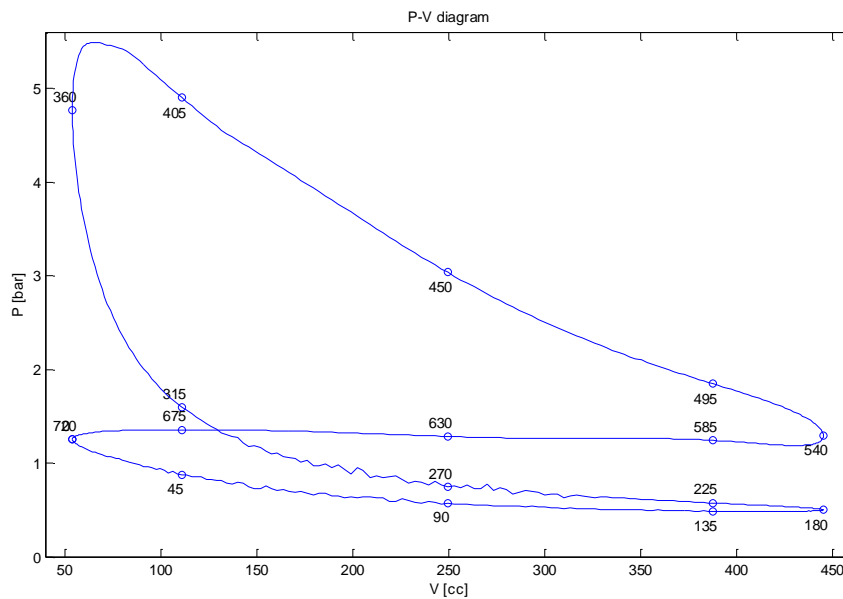
$$\dot{H}_R = \dot{m}_{air} C_{p_{air}} (T_R - T_0) + \dot{m}_{fuel} [C_{p_{fuel(vapor)}} (T_R - T_0) + h_{RP}]$$

$$\dot{H}_p = (\dot{m}_{CO_2} C_{p_{CO_2}} + \dot{m}_{H_2O} C_{p_{H_2O}} + \dot{m}_{N_2} C_{p_{N_2}}) (T_P - T_0)$$

בפועל תהליך השריפה לא נעשה בנפח קבוע על כן השטח הכלוא תחת דיאגרמת P-V המייצגת מחזור אוטו אידיאלי קטן יותר. מכאן שהנצילות המעשית קטנה מהאידיאלית.



דיאגרמה הבאה היא דוגמא של דיאגרמה אינדיקטורית בצירוף זווית המהלך, שימו לב כי הלחץ המכסימלי אינו ב T.C



פעולה	זווית מהלך
יניקה	0-180
דחיסה	180-360
עבודה	360-540
פליטה	540-720

שאלת הכנה (ללא הגשה או ציון)

1. שרטטו גרף תיקני של דיאגרמה אינדיקטורית (דיאגרמת P-V) על בסיס נתוני המנוע הנתונים בטבלה (הגרף שתקבלו יהיה שונה מהגרף המוצג בדף קודם מאחר וחסרות לכם נקודות מדידה).

2. חשבו את ההספק האינדיקטורי ביחידות סטנדרטיות [W] על ידי אינטגרל נומרי לאותם נתונים (ראה הסבר בסעיף ה' של עיבוד התוצאות ובקובץ הנמצא בהיילרן – "שיטת הטרפז") הנחו שמהירות המנוע הינה: 2500 [RPM].

Angle	Volume [cc]	Pressure [bar]
0	54	1.251
45	111.3	0.8727
90	249.5	0.5733
135	387.7	0.4848
180	445	0.5
225	387.7	0.5731
270	249.5	0.7425
315	111.3	1.595
360	54	4.762
405	111.3	4.901
450	249.5	3.036
495	387.7	1.844
540	445	1.292
585	387.7	1.242
630	249.5	1.284
675	111.3	1.354
720	54	1.251

הערה: חובת הסטודנט להגיע מוכן למעבדה הן מבחינה תיאורטית והן מבחינה תפעולית על מנת לבצע את הניסוי בצורה יעילה. עליכם להכיר היטב את כל הפרטים של המערכת ולדעת מהו תפקידו של כל חלק (צג, ידית, מד, וכו').

ביתוח תרמודינמי של מחזור אוטו (VANGUARD™)

מטרת הניסוי

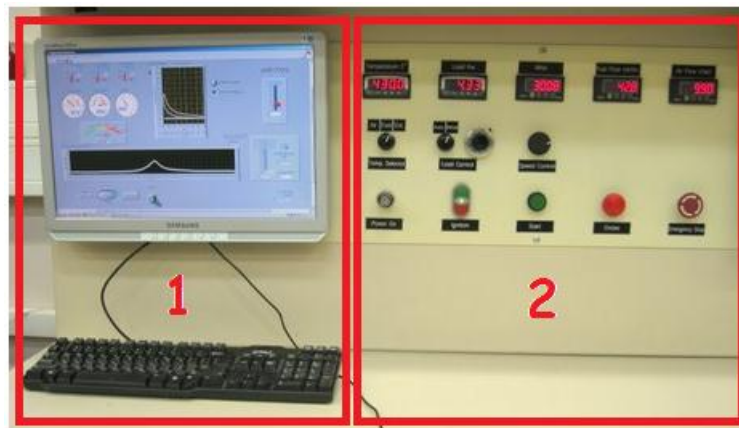
ביצוע מאזן אנרגיה על מנוע אוטו, ומציאת נצילות המנוע תוך כדי לימוד אופן המדידה וחישוב האנרגיה בצורותיה השונות: אנרגיה מכנית, אנרגית חום ואנרגית שריפה.

מערכת הניסוי

מערכת הניסוי בה נשתמש הנה מערכת לימודית. מערכת זו כוללת:

- מנוע שריפה פנימית, חד בוכנתי, ארבעה מהלכים, המקורר על ידי אויר.
- אלטרנטור.
- צנרת לזרימת אויר ודלק.
- מדי טמפרטורת מגיבים בכניסה לצילינדר ומדיד טמפרטורת גזי פליטה, מד מהירות סיבובית, מד הספק בלימה, מדי ספיקת אוויר וספיקת דלק וחיישן פיזואלקטרי למדידת לחץ באופן "רציף".
- לוח פיקוד כנראה באיור 1.

לוח הפיקוד כולל את שני החלקים העיקריים הבאים:



איור 1. לוח פיקוד של ניסוי מנוע אוטו.

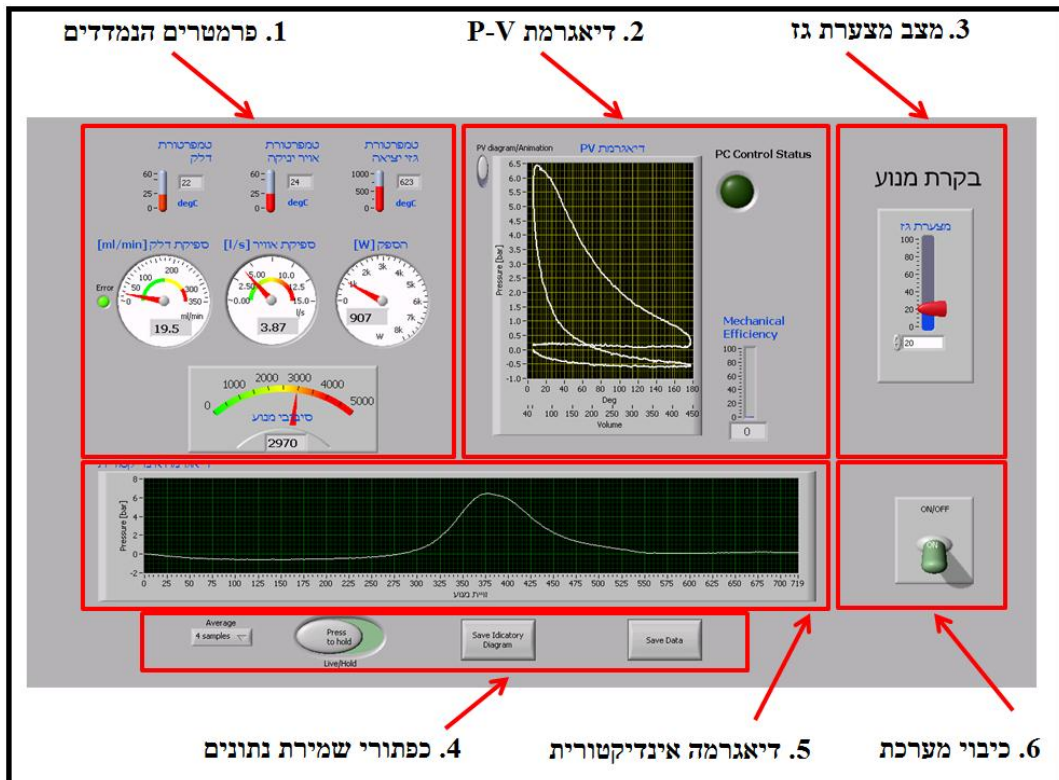
1. לוח מדידות ממוחשב (בעזרת LABVIEW) המיועד לקריאת הפרמטרים המתקבלים.
2. לוח בקרה ידנית המיועד לשליטה על המנוע.

נפרט על החלקים של כל לוח בנפרד ותפקידם במערכת הניסוי.

1. לוח מדידות:

לוח זה כולל את (לפי מספור באיור 2):

1. צגי הפרמטרים הנמדדים: טמפרטורות דלק, אוויר וניקה, גזי יציאה, ספיקות דלק ואוויר, הספק ומהירות סיבובי המנוע. הפרמטרים נמדדים בעזרת חיישנים מתאימים הממוקמים במנוע.
2. דיאגרמה אינדיקטורית P-V המראה את הלחצים הנמדדים בצילינדר כפונקציה של מעלות/נפח. הלחץ נמדד ע"י חיישן לחץ מהיר הנמצא בתוך הצילינדר.
3. מצב מצערת גז – תפקידה של תצוגת מצערת הגז הינה אינדיקציה לשלבי הניסוי השונים בקובץ הנשמר בלבד (ראו מהלך הניסוי), ואין לה השפעה כלשהיא על מצערת הגז או על פעולת המנוע.
4. כפתורי שמירת נתונים: **PRESS TO HOLD** - הקפאת הנתונים המדודים, **SAVE INDICATORY** - שמירה של דיאגרמה אינדיקטורית, **SAVE DATA** - שמירת הנתונים הנדרשים לעיבוד התוצאות (בעיקר הפרמטרים המוצגים באזור 1).
5. דיאגרמת P-θ, הוזהה למעשה לדיאגרמת P-V, אך פרושה לאורך ציר ה-X עבור כל מעלות הסיבוב מ-0 עד 720
6. כיבוי המערכת ו/או יציאה מהתוכנה.



איור 2. לוח מדידות ממוחשב.

2. לוח הבקרה

לוח זה כולל (לפי המספור באיור 3):

1. צג טמפרטורה. ניתן לבחור את מדיד הטמפרטורה הרצוי באמצעות בורר (6).
2. צג עומס המראה את הספק העומס על המנוע. ניתן לשנות את העומס באמצעות בורר (7).
3. צג מהירות הסיבוב של המנוע. ניתן לשנות את המהירות באמצעות בורר (8).
4. צג ספיקת הדלק.
5. צג ספיקת האוויר.
6. בורר לבחירת מדיד הטמפרטורה הרצוי (יניקת דלק, יניקת אוויר, גזי פליטה).
7. בורר לשינוי העומס על המנוע.
8. פתיחה/סגירה של מצערת גז הגורמת לשינוי מהירות הסיבוב.
9. מפתח להדלקת המערכת.
10. כפתור להדלקת המערכת. יש ללחוץ לאחר סיבוב המפתח (9).
11. כפתור התנעה של המנוע.
12. משנק (choke) הגורם להספקת תערובת עשירה יותר למנוע. יש לפתוח במידה והמנוע קר ודרושה כמות גדולה יותר של דלק בתערובת הדלק-אוויר (בחורף, בבוקר).
13. כפתור חירום. יש ללחוץ על מנת לכבות את המנוע באופן מידי.



איור 3. לוח בקרה ידנית.

מהלך הניסוי

1. התניעו את המנוע ואפשרו את התחממותו.
2. **שלב א**
בעזרת מצב המצערת (8) כוונו את מהירות המנוע ל-4200 סל"ד במצב סרק או בעומס התחלתי של 1000 וואט (נקבע ע"י המדריך).
3. יש לכוון את מצב מצערת הגז על גבי מסך לוח המדידות בהתאמה למצב המצערת על גבי לוח הבקרה.
4. שימרו את הנתונים המתקבלים (טמפרטורת מגיבים בכניסה לצילינדר וגזי פליטה, מהירות סיבובית, הספק בלימה, ספיקות אוויר ודלק) לקובץ ע"י סדר הפעולות הבאות:
a. "הקפאת" הנתונים במצב העומס הנתון בלחיצה על כפתור "PRESS TO HOLD".
b. שמירת הנתונים לקובץ בלחיצת על כפתור "SAVE DATA".
5. לאחר לחיצה על כפתור "SAVE DATA" מצב "HOLD" משתחרר למצב "LIVE" להמשך הניסוי.
6. העמיסו ל (7) את המנוע ב-300 וואט נוספים לעומס ההתחלתי. (במקרה והעומס ההתחלתי הינו אפס וואט – הגבירו ל 300 וואט, במקרה והעומס ההתחלתי הינו 1000 וואט – הגבירו ל 1300 וואט). שימרו את הנתונים כמוסבר בסעיף 4.

6. העמיסו את המנוע בהדרגה (בקפיצות של 300 וואט) ללא שינוי במצב המצערת ושימרו את הנתונים (כמוסבר בסעיף 4), עד לערך מינימלי של 2700 סל"ד.

7. יש להקפיד לא לצאת מתחום הסל"ד המוגדר בין 4500 ל 2500.

שלב ב

8. בעזרת מצב המצערת כווננו את מהירות המנוע ל-4200 סל"ד במצב בעומס התחלתי של 2000 וואט או בעומס התחלתי של 3000 וואט (נקבע ע"י המדריך).

9. יש לכוון את מצב מצערת הגז על גבי מסך לוח המדידות בהתאמה למצב המצערת על גבי לוח הבקרה.

10. שימרו את הנתונים המתקבלים (טמפרטורת מגיבים בכניסה לצילינדר וגזי פליטה, מהירות סיבובית, הספק בלימה, ספיקות אוויר ודלק) לקובץ ע"י סדר הפעולות הבאות:

a. "הקפאת" הנתונים במצב העומס הנתון בלחיצה על כפתור "PRESS TO HOLD".

b. שמירת הנתונים לקובץ בלחיצת על כפתור "SAVE DATA".

לאחר לחיצה על כפתור "SAVE DATA" מצב "HOLD" משתחרר למצב "LIVE" להמשך הניסוי.

11. בדומה לשלב א, העמיסו את המנוע בהדרגה (בקפיצות של 300 וואט) ללא שינוי במצב המצערת ושימרו את הנתונים (כמוסבר בסעיף 10), עד לערך מינימלי של 2700 סל"ד.

12. יש להקפיד לא לצאת מתחום הסל"ד המוגדר בין 4500 ל 2500.

שלב ג

13. באמצעות מצב המצערת כווננו את מהירות המנוע ל- _____ סל"ד בעומס של _____ וואט (יקבע ע"י המדריך).

14. יש לכוון את מצב מצערת הגז על גבי מסך לוח המדידות בהתאמה למצב המצערת על גבי לוח הבקרה.

15. שימרו את הנתונים המתקבלים (טמפרטורת מגיבים בכניסה לצילינדר וגזי פליטה, מהירות סיבובית, הספק בלימה, ספיקות אוויר ודלק ודיאגרמה אינדיקטורית) לקובץ ע"י סדר הפעולות הבאות:

a. "הקפאת" הנתונים במצב הנתון בלחיצה על כפתור "PRESS TO HOLD".

b. יש לשמור דיאגרמה אינדיקטורית ע"י לחיצה על כפתור "SAVE INDICATORY".

"POWER". לחיצה על כפתור זה שומרת קובץ נתונים נפרד הכולל את לחצי הצילינדר ונפח הצילינדר עבור כל זווית גל הארכובה במנוע, בהתאמה.

c. שמירת הנתונים לקובץ בלחיצת על כפתור "SAVE DATA".

לאחר לחיצה על כפתור "SAVE DATA" מצב "HOLD" משתחרר למצב "LIVE" להמשך הניסוי.

16. סגרו את המצערת ועצרו את המנוע.

נתונים:

הפרמטר	הערך הנתון
ρ_f - צפיפות הדלק	$750 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$
FA_{stc} - יחס דלק אוויר סטוכיומטרי	$\frac{1}{14.9}$
R - קבוע הגזים של אויר	$0.287 \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$
h_{RP} - ערך ההיסק	$44,250 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$
T_o - טמפרטורת הסביבה	$[^{\circ}C]$

עיבוד תוצאות

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

הנוסחאות:

א. חשב את הספיקה המסית של האוויר, תוך שימוש במשוואת הגזים האידיאליים:

$$P_0 = \rho_{air} R T_{air} \Rightarrow \dot{m}_{air} = \rho_{air} \cdot \dot{V}_{air}$$

ב. חשב את הספיקה המסית של הדלק:

$$\dot{m}_f = \rho_f \cdot \dot{V}_f$$

ג. חשב את יחס התערובת:

$$\phi = \frac{FA}{FA_{stc}} = \frac{\dot{m}_f / \dot{m}_{air}}{1/14.9}$$

יחס התערובת הנו היחס בין FA, משמע $\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_{air}}$, כפי שהתקבל בניסוי, לבין FA_{stc} , משמע $\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_{air}}$ עבור שריפה

מלאה. עבור בניזין שהינו תערובת פחמימנים מקובל לבצע חישובים תחת ההנחה שהרכבו הכימי הממוצע זהה

להרכבו של C_8H_{18} (אוקטן). עבור אוקטן יחס דלק אוויר סטוכיומטרי הינו: $FA_{stc} = \frac{1}{14.9}$.

במנועים יחס התערובת נמצא בתחום הבא: $0.6 < \phi < 1.4$ מעבר לתחום זה הלהבה אינה יכולה להתפשט בתא השריפה.

ד. אנתלפית האוויר בכניסה למנוע:

$$\dot{H}_{air} = \dot{m}_{air} c_{p,air} (T_R - T_0) \quad [kW]$$

הערה: ניתן לקחת טמפרטורת הדלק ההתחלתית (מדידה ראשונה בניסוי) כטמפרטורת סביבה, T_0 .

ה. אנתלפית הדלק בכניסה למנוע:

$$\dot{H}_f = \dot{m}_f [c_{p,f} (T_R - T_0) + h_{RP}] \quad [kW]$$

ו. אנתלפית המגיבים (R=Reactor – מגיב):

$$\dot{H}_R = \dot{H}_f + \dot{H}_{air} \quad [kW]$$

ז. אנתלפית התוצרים (P=Product – תוצר):

$$\dot{H}_P = (\dot{m}_{CO_2} c_{p,CO_2} + \dot{m}_{CO} c_{p,CO} + \dot{m}_{H_2O} c_{p,H_2O} + \dot{m}_{N_2} c_{p,N_2} + \dot{m}_{O_2} c_{p,O_2}) (T_P - T_0) \quad [kW]$$

הקשרים הבאים נמצאו מתוך המשוואה הכימית ותוך כדי התייחסות לייחס המשקלים בין הדלק לכל אחד מהתוצרים. עבור תערובת עניה או סטוכיומטרית:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{CO}_2} &= \left(\frac{8\varphi \cdot 44}{\varphi \cdot 114} \right) \dot{m}_f = 3.09 \dot{m}_f \\ \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} &= \left(\frac{9\varphi \cdot 18}{\varphi \cdot 114} \right) \dot{m}_f = 1.42 \dot{m}_f \\ \dot{m}_{\text{N}_2} &= \left(\frac{47 \cdot 28}{\varphi \cdot 114} \right) \dot{m}_f = \frac{11.54}{\varphi} \dot{m}_f \\ \dot{m}_{\text{O}_2} &= \left(\frac{12.5(1-\varphi) \cdot 32}{\varphi \cdot 114} \right) \dot{m}_f = 3.51 \left(\frac{1}{\varphi} - 1 \right) \dot{m}_f\end{aligned}$$

עבור תערובת עשירה:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{CO}_2} &= \left(\frac{9.63}{\varphi} - 6.55 \right) \dot{m}_f \\ \dot{m}_{\text{CO}} &= 6.13 \left(1 - \frac{1}{\varphi} \right) \dot{m}_f \\ \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} &= 1.42 \dot{m}_f \\ \dot{m}_{\text{N}_2} &= \frac{11.54}{\varphi} \dot{m}_f\end{aligned}$$

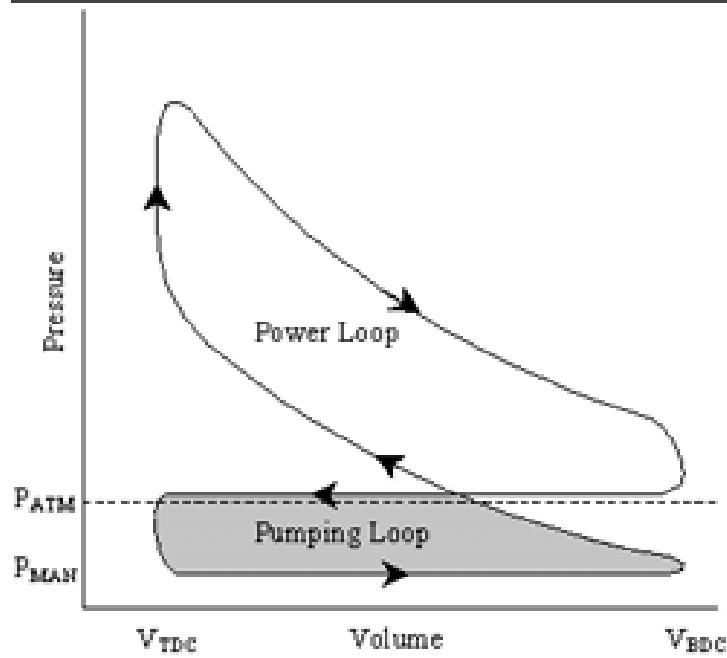
$$\begin{aligned}c_{p_{\text{CO}_2}} &= 0.8418 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] & c_{p_{\text{O}_2}} &= 0.9216 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] & c_{p_{\text{air}}} &= 1.005 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] \\ c_{p_{\text{CO}}} &= 1.0413 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] & c_{p_{\text{N}_2}} &= 1.0416 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] & c_{p_f} &= 1.71 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] \\ c_{p_{\text{H}_2\text{O}}} &= 1.8723 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]\end{aligned}$$

ה. חשב הספק אינדיקטורי בעזרת דיאגרמת P-V בעבור שלב ג' ההספק האינדיקטורי של המנוע

$$i_p = \frac{W_i \cdot n \cdot N}{X}$$

על ידי אינטגרציה נומרית חשב את העבודה האינדיקטורית W_i של מחזור אחד (ראה איור A) העבודה האינדיקטורית הינה השטח הכלוא בדיאגרמת P-V. שימו לב שהשטח הכלוא ב-Power loop הוא חיובי ושהשטח הכלוא ב-Pumping loop הוא שלילי. סימן העבודה יתקבל אוטמאטית על ידי בחירה נכונה של גבולות האינטגרלים V_1, V_2 . דונו בהבדל בשטח הכלוא ב-Power loop בין מצב של עומס נמוך לבין מצב של עומס גבוה.

$$W = \int_{V_1}^{V_2} PdV$$



איור A

ט. סה"כ איבודי האנרגיה כתוצאה מחיכוך, הפסדי יניקה ואיבוד חום בדופן הצילינדר ($\dot{W}_S = b_p$):

$$\dot{Q} = \dot{H}_R - \dot{H}_P - \dot{W}_S \quad [\text{kW}]$$

י. חשב את נצילות הבלימה של המנוע:

$$\eta = \frac{b_p}{H_{RP}}$$

יא. חשב את נצילות האינדיקטורית של המנוע:

$$\eta_i = \frac{i_p}{H_{RP}}$$

יב. חשב את נצילות המכנית של המנוע:

$$\eta_m = \frac{b_p}{i_p}$$

יג. חשב את תצרוכת הדלק הסגולית:

$$\text{bsfc} = \frac{\dot{m}_f}{b_p} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \right]$$

יד. חשב את מומנט הבלימה על ציר המנוע :

$$T = \frac{b_p}{2\pi \frac{N}{60}} \quad [N \cdot m]$$

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{Q} , b_p , T כפונקציה של RPM לכל מצב מצערת (שלושה גרפים, שתי עקומות לכל גרף - עבור שלב א' ו-ב')
- η כפונקציה של RPM לכל מצב מצערת (שתי עקומות לגרף - עבור שלב א' ו-ב')
- $BSFC$ כפונקציה של RPM וכפונקציה של b_p לכל מצב מצערת (שני גרפים, שתי עקומות לכל גרף - עבור שלב א' ו-ב')
- דיאגרמת $P-V$ אחד עבור שלב ג'. מתוך דיאגרמת $P-V$ יש לקבל את ההספק האינדיקטורי של המנוע עבור המצב הנמדד בשלב ג'.

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

עבודה מהנה !!!

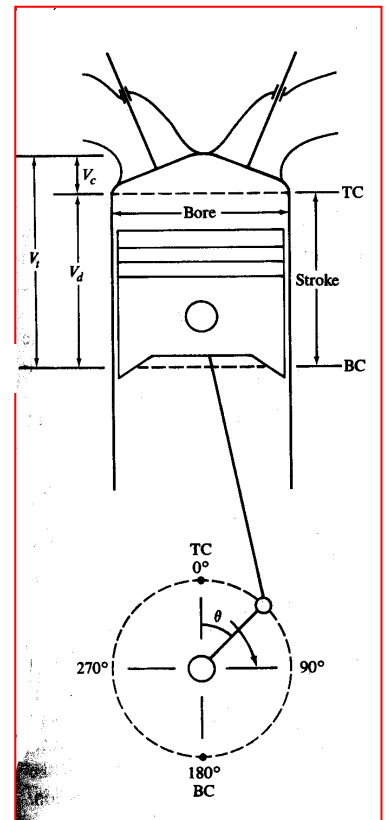
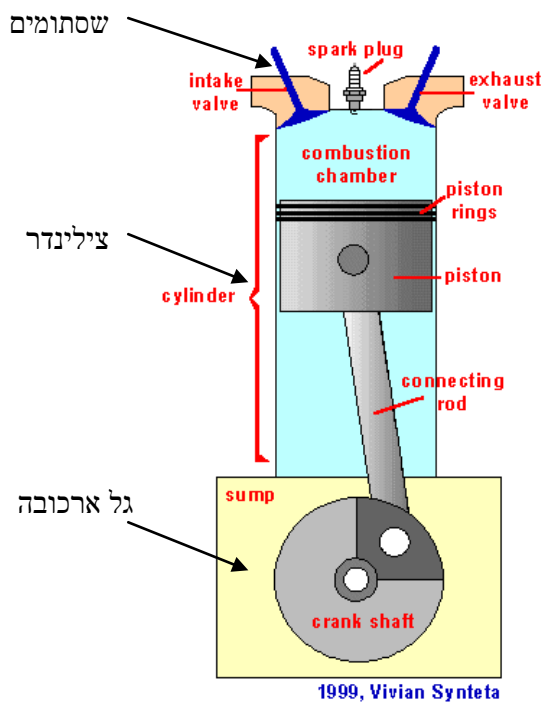
העשרה

- <http://www.howstuffworks.com/engine2.htm>
- <http://tecfa.unige.ch/staf/staf-e/paraskev/staf15/engine.html>
- <http://www.engr.colostate.edu/~allan/thermo/page1/page1f.html>
- http://biketransplant.tripod.com/marc_build.htm
- <http://www.coe.berkeley.edu/labnotes/0701worldssmallest.html>

ביבליוגרפיה

- שר ע., "מבוא למנועי שריפה פנימית", מכלול, 1990
- "יסודות המבנה של רכב ממונע", חיל החימוש צבא ההגנה לישראל, מערכות, 1977
- Heywood, J.B, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw Hill, 1988
- Cussons Instruction Manual, 1998

איורים נוספים



איור 1 – מבנה בוכנת המנוע

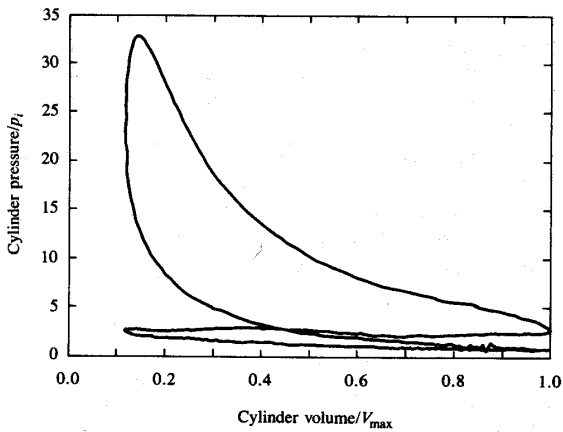


TABLE 5.1
Ideal models of engine processes

Process	Assumptions
Compression (1-2)	1. Adiabatic and reversible (hence isentropic)
Combustion (2-3)	1. Adiabatic 2. Combustion occurs at (a) Constant volume (b) Constant pressure (c) Part at constant volume and part at constant pressure (called limited pressure)
Expansion (3-4)	3. Combustion is complete ($\eta_c = 1$) 1. Adiabatic and reversible (hence isentropic)
Exhaust (4-5-6) and intake (6-7-1)	1. Adiabatic 2. Valve events occur at top- and bottom-center 3. No change in cylinder volume as pressure differences across open valves drop to zero 4. Inlet and exhaust pressures constant 5. Velocity effects negligible

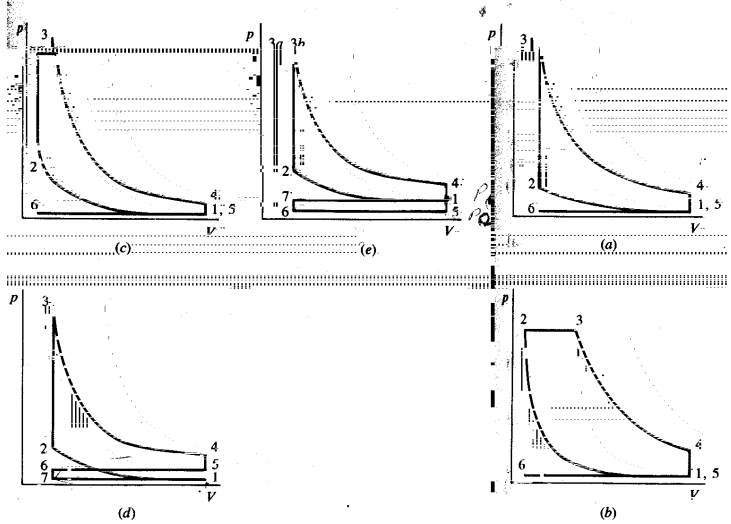


FIGURE 5-2
Pressure-volume diagrams of ideal cycles. Unthrottled operation: (a) constant-volume combustion; (b) constant-pressure combustion; (c) throttled constant-volume combustion cycle; (d) supercharged constant-volume combustion cycle; (e) supercharged constant-volume combustion cycle.

TABLE 3.2
Standard enthalpies of formation

Species	State†	$\Delta\tilde{h}_f^\circ$, MJ/kmol
O ₂	Gas	0
N ₂	Gas	0
H ₂	Gas	0
C	Gas	0
CO ₂	Gas	-393.52
H ₂ O	Gas	-241.83
H ₂ O	Liquid	-285.84
CO	Gas	-110.54
CH ₄	Gas	-74.87
C ₃ H ₈	Gas	-103.85
CH ₃ OH	Gas	-201.17
CH ₃ OH	Liquid	-238.58
C ₈ H ₁₈	Gas	-208.45
C ₈ H ₁₈	Liquid	-249.35

† At 298.15 K (25°C) and 1 atm.

טבלה 1 – טבלת ערכים של אנתלפיית ההיווצרות של חומרים שונים