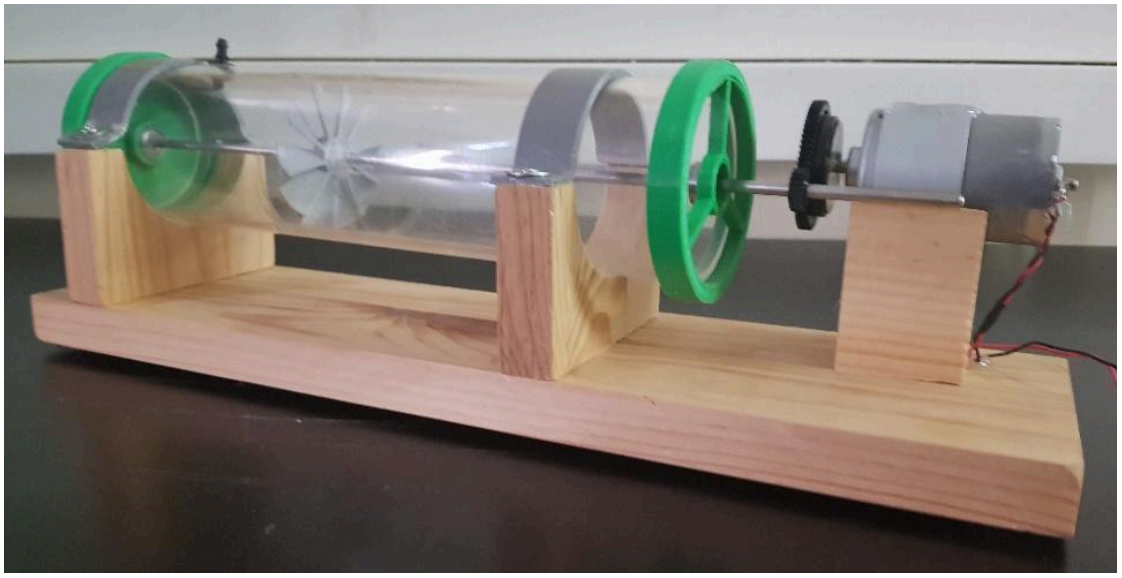
בית חינוך קיבוצי "אופק".
סמל בי"ס: 260125.
כתובת בי"ס: קיבוץ עברון ד.נ.ג. מערבי 25235.
טלפון: 049857755. פקס: 049828528.

עבודת חקר בפיזיקה

מנוע סילון



פרטי התלמידים:
שם התלמיד: עדן סבאח
מספר תעודת זהות: 324264514
כתובת: קיבוץ סער
שם התלמיד: אסף טל
מספר תעודת זהות: 212758122
כתובת: נס עמים

פרטי המנחה:
שם המנחה: נתנאל גבדנק
תואר אקדמי: M.Sc. פיסיקה
עיסוק: מורה לפיסיקה.
כתובת: אבירים
מספר טלפון: 0542623523

אוקטובר 2019

תוכן עניינים

מבוא 2

רקע תיאורטי 3

לחץ 3

גז אידיאלי ומשוואת הגזים 3

טמפרטורה: 3

צפיפות: 3

לחץ אטמוספרי: 3

ניסויים 4

ניסוי 1 – השפעת תדירות הסיבוב של מדחף על כוח הדחף שהוא מייצר 4

ניסוי 2 – השפעת הפעלת כוח על לחץ ושינוי בנפח על לחץ 7

ניסוי 3 – השפעת דחף של פרופלור על הלחץ בכלי סגור 12

ניסוי 4 – השפעת לחץ האוויר בכלי סגור על האנרגיה המקבלת בפיצוץ 15

סיכום ומסקנות 16

נספחים 17

נספח א' – תוצאות ניסוי 1 - השפעת תדירות הסיבוב של מדחף על כוח הדחף שהוא מייצר 17

נספח ב' – תוצאות ניסוי 2 - השפעת הפעלת כוח על לחץ ושינוי בנפח על לחץ 17

נספח ג' – תוצאות ניסוי 3 - השפעת דחף של פרופלור על הלחץ בכלי סגור 18

ביבליוגרפיה 19

מבוא

מה זה מנוע סילון?

מנוע סילון הוא שם כולל למנוע המייצר דחף אוויר להנעת עצמים (לרוב מטוס). מנוע סילון משתמש לרוב בפרופלורים בשביל לייצר דחיסת אוויר במנוע, וכן כדי להניע ולהמשיך את פעולת המנוע על ידי פרופלור ביציאת האוויר מהמנוע.

המנוע פועל בכך שהוא מגדיל את לחץ האוויר, יוצר בעצרתו פיצוצים ומתעל את האנרגיה הנוצרת מהפיצוץ דרך פתח קטן. כתוצאה מהפיצוץ, האוויר המהיר הנפלט מהמנוע גורם לדחף כתוצאה מהחוק השלישי של ניוטון.

מה הייתה מטרת העבודה?

מטרת העבודה הייתה לחקור ולהבין את התהליכים הפיזיקליים במנוע הסילון. בנוסף בעבודה זו ניסינו ללמוד כיצד לבצע ניסויים ולהעלות השערות המתבססות על חוקי הפיזיקה.

למה זה מעניין וחשוב לחקור את זה?

חשוב לחקור נושא זה על מנת לפתח ולקדם את המנוע ולשפר את תפקודו וביצועיו

מה צפוי לקורא בעבודה?

במהלך העבודה ערכנו ניסויים שמטרתם הייתה לבחון את יעילות מנוע הסילון על חלקיו השונים בהתמקדות על המדחס. ניסינו לבחון את הקשר בין תדירות הפרופלור לבין כוח הדחף אותו הוא מייצר כמו גם את הלחץ שהוא מייצר בכלי סגור וזאת על מנת לבדוק את השפעות הלחצים השונים על עוצמת הפיצוץ שנוצרת.

מה הייתה המוטיבציה שלנו לחקור את זה.

בחרנו לעסוק בנושא זה מכיוון שצפינו בסרטון המדגים את פעולת המנוע והדבר עורר בנו שאלות רבות על אופן פעולתו ועל התהליכים הפיזיקליים המתרחשים במנוע. בנוסף לכך עניין אותנו לבנות מנוע מתפקד המסתמך על העקרונות שעליהם חקרנו.

רקע תיאורטי

לחץ

הוא סקלר המייצג יחס בין כוח לבין יחידת שטח עליה הוא מופעל במאונך.

$$P = \frac{F}{A}$$

כאשר:

- A מייצג את השטח
- F מייצג את הכוח המופעל

גז אידיאלי ומשוואת הגזים

גז אידיאלי הגדרה- גז שבו כמעט ואין שום אינטראקציה בין מולקולות הגז ושהמולקולות הן כמעט נקודתיות (היחס בין גודל המולקולה למרחק ביניהן הוא קטן מאוד), לכן הוא מתאר היטב גז בצפיפות נמוכה.

משוואת הגזים: $P \bullet V = N \bullet k_B \bullet T$

- P - לחץ הגז
- V - הנפח שהגז תופס
- N - מספר חלקיקי הגז
- k_B - קבוע בולצמן
- T - הטמפרטורה המוחלטת של הגז

טמפרטורה: גודל פיזיקלי לכימות מה שאינטואיטיבי מובן כ"חם" ו"קר". מבחינה פיזיקלית הטמפרטורה היא גודל המבטא את "רמת התנועה" של חלקיקי החומר ומהווה מדד לאנרגיה הקינטית הממוצעת של החלקיקים.

צפיפות: של גוף היא המסה שלו ליחידת נפח.

לחץ אטמוספרי: לחץ, שמפעיל האוויר באטמוספירה של כדור הארץ בגובה פני הים.

ניסויים

ניסוי 1 – השפעת תדירות הסיבוב של מדחף על כוח הדחף שהוא מייצר

מטרה :

למצוא את הקשר בין מהירות הסיבוב לבין כוח הדף.

רקע תיאורטי:

כוח עילוי הוא סך כל הכוחות הפועלים על גוף הנמצא בתנועה ביחס לאוויר בו הוא שרוי, ומאונכים לכיוון תנועתו. העילוי מאפשר בין היתר לגופים כבדים מן האוויר לעוף. כוח זה תלוי במספר גורמים כמו: צפיפות האוויר, ρ, מהירות התנועה של הגוף, v, שטח הכנף (או הגוף), S ומקדם העילוי, c, התלוי בפרופיל הכנף והזווית של ביחס לכיוון ההתקדמות. משוואת כוח העילוי היא:

$$F = \frac{1}{2}\rho \bullet S \bullet c \bullet v^2$$

אנחנו יודעים שבתנועה מעגלית,

$$v = 2\pi \bullet r \bullet f$$

כאשר r הוא רדיוס הסיבוב ו- f היא תדירות הסיבוב.

אם נציב את המשוואה האחרונה במשוואת כוח העילוי, נקבל ביטוי המתאר את הכוח שפרופלור מייצר:

$$F = 2\rho \bullet S \bullet c \bullet \pi^2 \bullet r^2 \bullet f^2$$

נציין כי r אינו מייצג את רדיוס הפרופלור, אלא סוג של רדיוס ממוצע (הרדיוס שבוא פעל הכוח הממוצע).

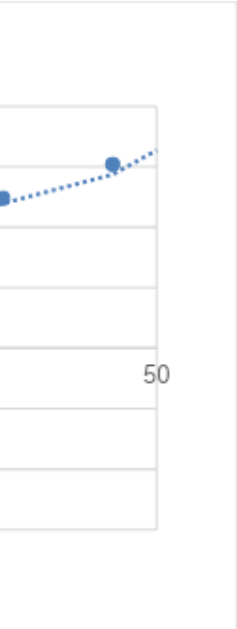
על פי נוסחא זו, אנו מצפים לקבל קשר פרבולי בין כוח הדחף שמייצר הפרופלור, לביו תדירות הסיבוב שלו.

מבנה המערכת ומהלך הניסוי:

חיברנו את המאוורר לספק מתח ובדקנו באמצעות חיישן שער אור מהו זמן המחזור של המאוורר לכל מתח נבדק. לאחר מכן שקלנו את המאוורר ללא תנועה ואז שקלנו את המאוורר כאשר הוא פועל (כל פעם במתח אחר) וחישבנו את ההפרשים בין המשקל ללא תנועה למשקל בתנועה (ההפרש כפול g שווה לכוח הדחף של המנוע). לבסוף הכנסנו את הנתונים של זמני המחזור וכוח הדחף לגרף ובדקנו האם המשוואה שקיבלנו היא זהה למשוואה שהייתה אמורה להתקבל[1].

תוצאות:

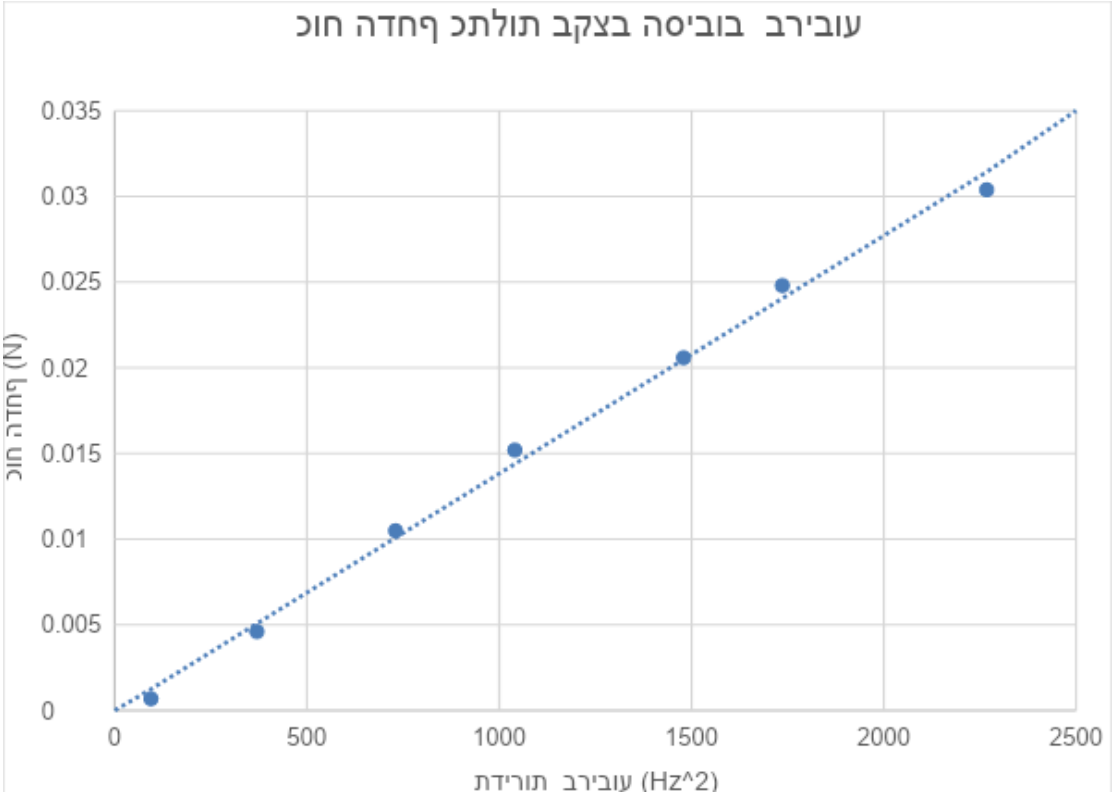
[1] לפירוט אודות תוצאות ניסוי זה, ראו נספח א'.



בגרף ניתן לראות שככל שתדירות הסיבוב של המאוורר גדלה, כך גדל גם כוח הדחף שהוא מייצר. לתוצאות הניסוי העברנו קו מגמה של חזקה. ציפינו לקבל חזקה של 2 ומקו המגמה קיבלנו חזקה של 2.3924 (כ- 20% שגיאה)

בנוסף, הצגנו גרף של כוח הדחף כתלות בתדירות הסיבוב בריבוע, הצגנו גרף זה על מנת לגלות את שיפוע הגרף (גודלה של מכפלת המקדמים) כאשר חזקת תדירות הסיבוב היא 2.

להלן הגרף:



לתוצאות הגרף העברנו קו מגמה לינארי. ניתן לראות שקו המגמה עובר קרוב מאוד לראשית הצירים בהתאם לציפיותינו. כמו כן, קיבלנו שהמקדם של התדירות בריבוע הוא 0.000014 . מכיוון שאיבדנו את המאוורר שבוא השתמשנו, ניסינו להעריך את המקדם בעצמנו וערכו יצא לנו 0.00004 שהוא גבוהה יותר ממה שרשום בקו המגמה אך הוא עדיין באותם סדרי גודל כפי שציפינו.

ניסוי 2 – השפעת הפעלת כוח על לחץ ושינוי בנפח על לחץ

מטרה:

להכיר את מודל הגז האידאלי, בניסוי ננסה למצוא שני קשרים. הראשון הוא הקשר בין הלחץ במזרק לבין הכוח החיצוני המופעל. הקשר השני אותו נרצה למצוא הוא הקשר בין הלחץ במזרק לבין נפח האוויר הכלוא בתוך המזרק.

השערה:

אנו מצפים כי הקשר בין הלחץ במזרק לכוח המועל עליו נתון על ידי משוואת הלחץ:

$$P = \frac{1}{A} \bullet F$$

הקשר בין הלחץ במזרק לנפח הכלוא בו נתון על ידי משוואת הגים האידיאלית:

$$P = N \bullet k_B \bullet T \bullet V^{-1}$$

מבנה המערכת ומהלך הניסוי:

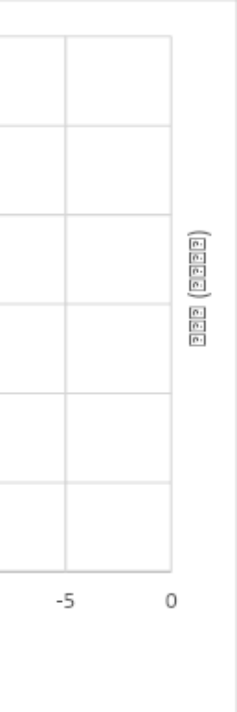
נחבר מד לחץ למזרק, באמצעות משקולות אשר מונחות בתוך סלסלה אשר נטלת על בוכנת המזרק נפעיל כוחות שונים על הבוכנה ונבדוק את השפעתם על הלחץ בתוך המזרק.

במהלך הניסוי הנחנו לפני כל מדידה משקולת של 300 גרם בתוך הסלסלה ולאחר מכן מדדנו את הלחץ בתוך המזרק ואת נפח הפנים של המזרק (שטח הבוכנה כפול האורך הפנימי של המזרק עד לבוכנה)[2].

[2] לפירוט אודות תוצאות ניסוי זה, ראו נספח ב'

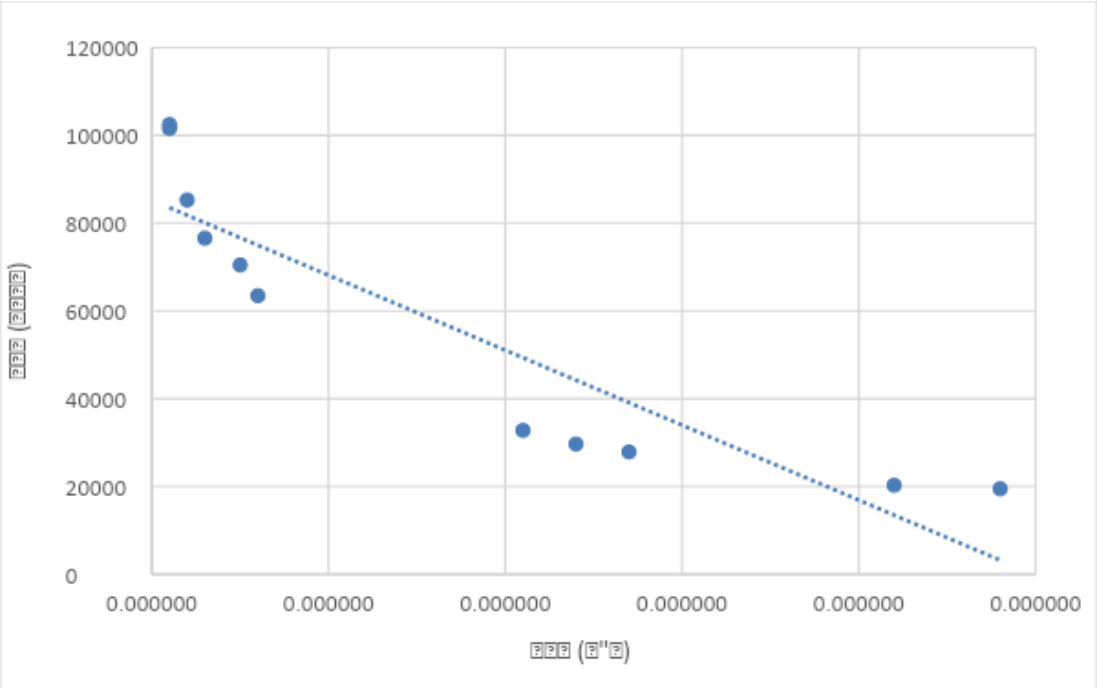
תוצאות וניתוחן:

להלן גרף המתאר את הלחץ בתוך המזרק כתלות בכוח החיצוני המופעל על הבוכנה.



ניתן לראות שישנו גרף לינארי בקירוב גס. נבחן את המקדמים ואת התאמתם להשערתנו. נקודת החיתוך עם ציר Y הייתה אמורה להיות 101325 (Pa) מכיוון שזה הלחץ באוויר ללא התערבות חיצונית (אחד אטמוספרה) אך אנו קיבלנו במשוואת קו המגמה כי נקודת החיתוך היא 137377 (Pa). מדובר בשגיאה של כ- 35%, אך אנחנו משערים כי השגיאה נובעת מכוח החיכוך אשר פעל בין הבוכנה לדפנות המזרק ובגלל זה היה דרוש כוח התחלתי כדי להתחיל ולהזיז את הבוכנה. בנוסף, שיפוע הגרף היה אמור להיות על פי חישוב $3183.1\left(\frac{1}{m^2}\right)$ (אחד חלקי שטח החתך של המזרק) אך קיבלנו במשוואת קו המגמה שיפוע שערכו $3227.9\left(\frac{1}{m^2}\right)$ זוהי שגיאה של 2%.

להלן גרף המתאר את הלחץ בתוך המזרק כתלות בנפח.



כפי שציפינו ניתן לראות בגרף הניסוי שככול שהנפח גדל כך הלחץ קטן. על פי המשוואה המוזכרת בהשערת הניסוי ציפינו לקבל גרף עם קו מגמה של פונקציית חזקה אשר החזקה בו היא 1-. להפתעתנו בקו המגמה קיבלנו כי חזקת הגרף היא 0.432- אנו סבורים כי הדבר נגרם עקב מדידה לא נכונה של נפח האוויר הכלוא במזרק (לא התייחסנו את נפח הצינורית המחברת בין המזרק למד הלחץ).

על מנת להעריך את הנפח ההתחלתי שהיה בצינורית, נעזרנו ב- solver והעברנו לתוצאות קו מגמה מהצורה הבאה:

$$P = A \bullet \left(V + V_0\right)^{-1}$$

כאשר הפרמטרים החופשיים הם V_0 שהוא הנפח ההתחלתי (נפח האוויר בצינורית) והמקדם A שהוא בעצם $N \cdot k_B \cdot T$. קיבלנו את הגרף הבא:

קיבלנו שהנפח ההתחלתי הוא כ- 1 סמ"ק. נפח התחלתי זה הוא הגיוני ביחס לנפחה של הצינורית שאיתה עבדנו ולכן יצרנו גרף חדש עם נתוני נפח מתוקנים.

להלן הגרף המתוקן:

ניתן לראות בגרף זה שכאשר תיקנו את נתוני הנפח ההתחלתי, החזקה שקיבלנו בקו המגמה הייתה מאוד קרובה ל- 1-. כ- 1% שגיאה. והמקדם קרוב מאוד למה שציפינו לקבל מהחישוב התיאורטי:

$$N \bullet k_B \bullet T = 0.099(J)$$

כ- 14% שגיאה.

בהסתמך על התובנות והמסקנות שלנו משני הניסויים הקודמים שבהם הבנו, בין היתר, את האופן שבו פרופלור מייצר כוח דחף ואת הקשר שבין כוח ללחץ, החלטנו לערוך ניסוי אשר מדמה באופן טוב יותר היבט מסוים בפעולת מנוע הסילון.

ניסוי 3 – השפעת דחף של פרופלור על הלחץ בכלי סגור

מטרה:

תחת המטרה של בניית מנוע סילון התמקדנו בחלק הקדמי של המנוע שהוא המדחס, מטרתנו בניסוי זה הייתה לבנות מדחס מתפקד ולעמוד על הקשר בין הפרמטרים השונים ובפרט איך תלוי לחץ במדחס במהירות הסיבוב שלו עבור פרופלור נתון.

השערה:

מין הניסוי הראשון למדנו כי הקשר בין תדירות הסיבוב של הפרופלור לכוח הדחף שאותו הוא מייצר הוא:

$$F = 2\rho \bullet S \bullet c \bullet \pi^2 \bullet r^2 \bullet f^2$$

מין הניסוי השני למדנו כי הקשר בין כוח ללחץ שהוא יוצר בכלי סגור הוא:

$$P = \frac{1}{A} \bullet F$$

אם נחבר בין המשוואות נוכל להבין את הקשר בין תדירות סיבוב הפרופלור לבין הלחץ שהפרופלור מייצר בכלי סגור.

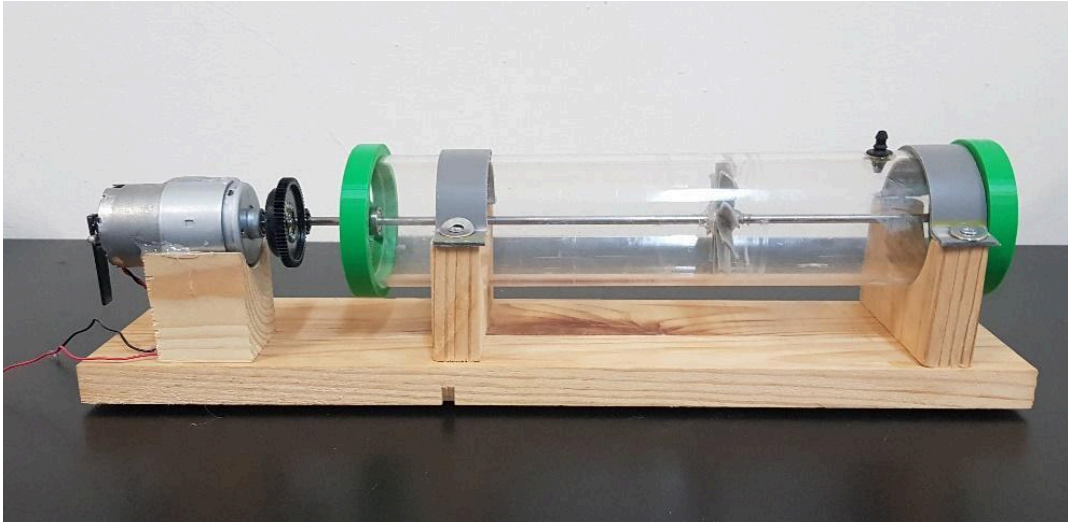
$$P = \frac{1}{A} \cdot 2\rho \bullet S \bullet c \bullet \pi^2 \bullet r^2 \bullet f^2$$

מכיוון שאנו יודעים כי כאשר אין תדירות עדיין יש לחץ אוויר מסוים בתוך הכלי והוא הלחץ האטמוספרי, P_0, אנו מעריכים כי המשוואה הנכונה למציאת הקשר בין תדירות סיבוב הפרופלור לבין הלחץ שהפרופלור מייצר היא:

$$P = \frac{1}{A} \cdot 2\rho \bullet S \bullet c \bullet \pi^2 \bullet r^2 \bullet f^2 + P_0$$

מבנה מערכת ומהלך הניסוי:

על מנת לבחון השערה זו יצרנו את מערכת הניסוי הבאה:



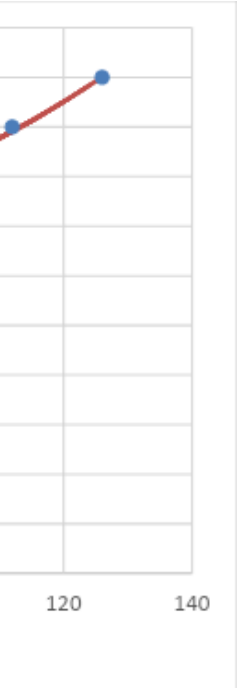
המערכת (המכסה הירוק שנועד לסגירה הרמטית של המערכת והחלק השני הירוק מאפשר כניסת אוויר למערכת, הגלגלי שיניים- מערכת גירים אשר נועדה על מנת להגדיל את מהירות הסיבוב של הפרופלור מכיוון שיחס בין מספר השניים של הגלגלים הוא 70:20 אז מהירות הסיבוב של הפרופלור תהיה גדולה פי 3.5 ממהירות הסיבוב של המנוע, מיסבים אשר נועדו על מנת למנוע חיכוך ולגרום לציר שעליו מונח הפרופלור לנוע במהירות וללא עיכוב. ציר אשר נועד להחזיק את הפרופלור במקום. מנוע DC אשר מספק את האנרגיה על מנת לגרום למערכת לפעול המנוע פועל על מתח מ-0 עד 20 V קצב הסיבוב תלוי במתח אך לא באופן לינארי. הפטמה אשר תאפשר חיבור למד לחץ חיצוני. פרופלור אשר הדפסנו במדפסת תלת מימד, הפרופלור בעל עשר כנפיים בזווית קבועה לאורך הכנף ואם זאת אורך הכנף הולך ומתרחב עשינו זאת על מנת לכסות כמה שיותר את שטח החתך של הצינור ולאפשר יצירת לחץ מקסימלית.

את מהירות הסיבוב של המנוע מדדנו באמצעות שער האור, חיברנו חתיכת פלסטיק לזנב המנוע אשר חסמה את שער האור פעם אחת בסיבוב.

במהלך הניסוי הפעלנו את המערכת על ידי ספק מתח עם מתחים שונים ומדדנו את הלחץ שנוצר במערכת כתלות בתדירות הסיבוב וקיבלנו את התוצאות הבאות[3]:

תוצאות וניתוחן:

[3] לפירוט אודות תוצאות ניסוי זה, ראו נספח ג'



ניתן לראות שככול שתדירות הסיבוב גדלה כך גם הלחץ בתוך המכל גדל כפי שציפינו. לתוצאות הניסוי העברנו קו מגמה בעזרת ה- solver בהסתמך על המשוואה המשוערת:

$$P = P_0 + a \bullet f^n$$

מתוצאות הקו התיאורטי שהתקבל, חילצנו את הערכים הבאים: $n = 2$, $p_0 = 102378\ (Pa)$ ו- $a = 0.0032\ (Pa \bullet s^2)$. על פי ההשערה חישבנו את ערכו של a (בהצבת ערכי הפרמטרים בתוך המשוואה המשוערת) וקיבלנו כי ערכו של a הוא $0.0034\ (Pa \bullet s^2)$, כ-5% שגיאה.

למרות שתוצאותינו הן קרובות מאוד אנו סבורים כי פער זה נובע ממעט בריחת אוויר המתרחשת בין הפרופלור לדפנות הגליל.

דיון ומסקנות:

לאחר שהבנו מהו הקשר בין תדירות הפרופלור לבין הלחץ שהוא מייצר בכלי סגור, ננסה להבין בניסוי הבא את השפעת הלחץ הנמצא בכלי סגור על עוצמת הפיצוץ שייווצר בכלי זה..

ניסוי 4 – השפעת לחץ האוויר בכלי סגור על האנרגיה המקבלת בפיצוץ

מטרה:

בניסוי ניסינו לבדוק את השפעת לחץ האוויר בכלי סגור על האנרגיה המתקבלת בפיצוץ הנוצר בתוך הכלי. אנו רוצים לבדוק דבר זה על מנת להבין את השפעת דחיסת האוויר במנוע סילון על האנרגיה אותה הוא מייצר.

השערה:

אנו משערים כי ככול שלחץ האוויר בתוך הכלי הסגור יגדל (כל עוד נשאר נפח זהה על מנת לבודד משתנים) כך גם תגדל האנרגיה שתיווצר כתוצאה מפיצוץ, השערה זו תקפה כל עוד כל האוויר בכלי ינוצל לטובת יצירת הפיצוץ.

מבנה המערכת ומהלך הניסוי:

לקחנו מזרק ובעזרת פקק אטמנו את צדו הראשון. בפקק עשינו חורים שדרכם העברנו כבלי נחושת שדרכם העברנו מתח חשמלי גבוה שיכול ליצור ניצוצות. בנוסף העברנו גם מד לחץ ואטמנו את החורים שנוצרו בפקק. לתוך המזרק טפטפנו כמות אלכוהול זהה בכל מדידה כאשר כל פעם לחץ האוויר בתוך המזרק שונה אך נפחו נשאר זהה. יצרנו את הניצוץ שהגיב עם האלכוהול בתוך הכלי הסגור מה שגרם לפיצוץ שהעיף את בוכנת המזרק. את מהירות הבוכנה בדקנו בעזרת שער אור ועל פי שינויי המהירות יכולנו לגלות את שינויי האנרגיה שנוצרו בעקבות שינויי לחץ האוויר בכלי.

תוצאות וניתוחן:

לצערנו, עקב דליפת אוויר לא היה באפשרותנו ליצור הבדל משמעותי בלחץ ההתחלתי של האוויר במזרק (פחות מ- 1 kPa) וכתוצאה מכך לא הצלחנו לקבל הבדלים באנרגיה שנוצרה בפיצוץ. בשל מחסור בזמן

לא הצלחנו לפתור בעיה זו ולשפר את מערכת הניסוי כך שנוכל ליצור הבדלים משמעותיים בלחץ האוויר ההתחלתי.

סיכום ומסקנות

בעבודתנו ניסינו לחקור מספר היבטים באופן פעולת מנוע הסילון והסקנו מספר תובנות.

- ככל שתדירות הסיבוב של פרופלור תגדל כך גם יגדל כוח הדחף שאותו הוא מייצר באופן פרבולי.
- הקשר בין כוח ללחץ הוא קשר ישר (לינארי) כלומר ככול שהכוח יגדל כך גם הלחץ.
- הקשר בין נפח ללחץ הוא קשר הופכי (בחזקת 1-).
- הקשר בין תדירות ללחץ הוא קשר פרבולי כלומר, ככל שתדירות הסיבוב של פרופלור תגדל כך הלחץ במיכל יגדל.

במידה והיינו ממשיכים את מחקרנו היינו משפרים את אטימת מערכת הניסוי הרביעי ובכך משפרים את אמינותו ואת תוצאותיו. בנוסף, היינו פועלים על מנת ליצור מערכת המדמה את פעילות מערכת הסילון בהתייחס לכל חלקיו.

במהלך עבודתנו למדנו לעבוד עם מגוון כלים כגון מערכות מדידה ממוחשבות ואקסל, בנוסף, התנסינו בבניית מערכות ניסוי ותפעולן ולהעלות השערות המתבססות על עקרונות פיזיקליים.

ברצונו להודות למנחים אלון שפירו ונתנאל גבדנק על העזרה והתמיכה הרבה.

נספחים

נספח א' – תוצאות ניסוי 1 - השפעת תדירות הסיבוב של מדחף על כוח הדחף שהוא מייצר

כוח דחף (N)	תדירות בריבוע (Hz^2)	תדירות (Hz)
0.0007	94.3	9.7
0.0046	369.8	19.2
0.0105	730.5	27.0
0.0152	1040.6	32.3
0.0206	1479.3	38.5
0.0248	1736.1	41.7
0.0304	2267.6	47.6

נספח ב' – תוצאות ניסוי 2 - השפעת הפעלת כוח על לחץ ושינוי בנפח על לחץ

לחץ (Pa)	כוח (N)	נפח (מ"ק)
103700	1.29066-	0.00000000
103200	4.23066-	0.00000000
103100	7.17066-	0.00000000
102500	10.1107-	0.00000010
101600	13.0507-	0.00000010
85300	15.9907-	0.00000020
76600	18.9307-	0.00000030
70500	21.8707-	0.00000050
63500	24.8107-	0.00000060
32800	27.7507-	0.00000210
29700	30.6907-	0.00000240
27900	33.6307-	0.00000270
20300	36.5707-	0.00000420
19500	39.5107-	0.00000480

נספח ג' – תוצאות ניסוי 3 - השפעת דחף של פרופלור על הלחץ בכלי סגור

לחץ (Pa)	תדירות Hz))
102370	0
102380	24.5
102390	52.5
102400	84
102420	112
102430	126

ביבליוגרפיה

"מנוע סילון". ויקיפדיה. האנציקלופדיה החופשית. קרן ויקימדיה בע"מ. 22 בספטמבר 2019. אינטרנט.