עודכן לאחרונה: November 1, 2026

🗺️ מפת דרכים לארבע שנים · שנה 2, סתיו · 🧱 מחשבון מובנה

על הקורס

לקורס החינמי הזה יש 10 יחידות ו-6 מעבדות. אלה המספרים האמיתיים, לא תוכנית ארוכה יותר שקוצרה.

בדיקה היא מספר או תוצאת קוד בעמוד קורס שסקריפט מחשב מחדש לפני הפרסום. המספר המודפס והמספר שחושב מחדש חייבים להתאים.

זהו מתווה של קורס חינמי ללימוד עצמי שנכתב על ידי Saving Planets. הוא אינו קורס אוניברסיטאי, אינו מעניק נקודות זכות אקדמיות, ואף מוסד לימודים אינו מעורב בו.

היקפו תואם קורס סמסטריאלי בתרמודינמיקה הנדסית לשנה השלישית. הוא מבוסס על הנושאים והעומק של MIT 16.050 Thermal Energy ושל חלקי התרמודינמיקה ב־MIT Unified Engineering (שניהם חינמיים ב־MIT OpenCourseWare), ועל קורסים כמו Purdue ME 200 ו־Georgia Tech ME 3322, תוך שימוש בפרקים החינמיים של OpenStax University Physics Volume 2 על חום ועל חוקי התרמודינמיקה ובנתוני תכונות הזורמים החינמיים של NIST, שאליהם אנו מקשרים היכן שהם מועילים. אף אחד מהמחברים או המוסדות האלה אינו תומך בדף זה.

מה שאנו מוסיפים: כל יחידה קשורה לעבודה אמיתית עם מקור ציבורי מצוטט (נצילות תחנות כוח, תחנות גרעיניות וסולאריות מרוכזות, משאבות חום, ייצור משולב ואנרגיה גאותרמית), כל מספר בדף מחושב מחדש בסקריפט בדיקה לפני פרסומו, ולכל מעבדה יש סימולציה חינמית או גרסה ביתית בטוחה.

עברו עליו לפי הסדר. בכל יחידה יש מטרות, רעיונות מרכזיים, משוואות, דוגמאות צעד אחר צעד, תרגול עם תשובות מלאות, טעויות נפוצות, כרטיסיות ובוחן. ההתקדמות שלכם נשמרת רק בדפדפן הזה.

איך הקורס הזה עוזר להציל את כדור הארץ

כמעט כל החשמל המופק מדלק, מאורניום, מאור שמש מרוכז או מחום כדור הארץ מגיע ממחזור תרמודינמי, וכמעט כל החימום והקירור פועלים גם הם על מחזור. החוק הראשון אומר שאנרגיה נשמרת; החוק השני אומר כמה ממנה יכולה להפוך לעבודה שימושית. יחד הם קובעים כמה דלק העולם שורף.

מחזורים טובים יותר, ניצול חום שיורי ומשאבות חום הם מהדרכים המהירות ביותר להפחתת פליטות. כל יחידה מסתיימת בקטע קצר עם מקורות. ערכים שאינם ממקור מסומנים כערכים לדוגמה.

למורים

אפשר ללמד את הקורס הזה, או לתת לתלמיד לעבור אותו לבד. הוא חינם. Saving Planets לא נותנת ציון ולא נקודות זכות.

- העמוד הזה הוא כל הקורס: 10 יחידות ו-6 מעבדות (ENGR 320).
- תכננו 15 שבועות, בערך 6 עד 9 שעות בשבוע, כולל שבועות המעבדה.
- עקבו אחרי לוח 15 השבועות. קראו את היחידה, פתרו על הנייר, ואז פתחו את התשובה. בשבוע מעבדה עשו את המעבדה או את הגרסה הביתית.
- בדיקה היא מספר או תוצאת קוד בעמוד שסקריפט מחשב מחדש לפני הפרסום. המספר שרואים והמספר שחושב מחדש חייבים להתאים.
- השתמשו בהדפסת העמוד, או הורידו את מדריך הלימוד ב-PDF. דף הנוסחאות נמצא לקראת הסוף.
- שאלו: איך היחידה הזו עוזרת לאנשים ולכוכב? בכל יחידה יש תיבה ירוקה עם עובדה ומקור.
- העתיקו את תבנית המדריך למורה וכתבו את שם הכיתה, הזמן שיש לכם, והשאלות שתשאלו. פתיחת תבנית המדריך למורה

לפני שמתחילים

ידע מוקדם

- חדו"א II ו־III: אינטגרלים, נגזרות חלקיות ולוגריתמים טבעיים.
- פיזיקה I וכימיה כללית I: אנרגיה, עבודה, גזים אידאליים וחום.
- משוואות דיפרנציאליות מועילות אך אינן חובה.
- נוחות בעבודה עם גיליונות אלקטרוניים לטבלאות ולאינטרפולציה.

איך ללמוד

- התחילו כל בעיה בשרטוט המערכת או נפח הבקרה וציינו אם היא סגורה או פתוחה, יציבה או לא.
- רשמו את המצבים הידועים ומצאו את התכונות לפני כתיבת מאזן כלשהו.
- כתבו קודם את מאזן האנרגיה במילים (אנרגיה נכנסת − אנרגיה יוצאת = שינוי באנרגיה האגורה), ואז בטלו איברים שתוכלו להצדיק.
- שמרו על יחידות עקביות: kJ, kPa, m³, kg וקלווין; לעולם אל תשתמשו ב־°C בתוך יחס טמפרטורות.
- שרטטו כל תהליך על דיאגרמת T–s או v–p; כך הרבה יותר קל לעקוב אחר מחזורים.
- פתרו כל תרגיל על נייר לפני שאתם פותחים את התשובה, וחזרו על הבחנים כעבור כמה ימים.

מה צריך

- מחשב או טאבלט לסימולציות החינמיות של PhET: Gas Properties, Energy Forms and Changes ו־States of Matter.
- מדחום מטבח (או חיישן דיגיטלי זול), כוס מדידה ומשקל מטבח.
- קומקום חשמלי בעל הספק ידוע, קוביות קרח, ספל מבודד או כוס קלקר.
- סטופר בטלפון.
- תוכנת גיליון אלקטרוני למעבדות המחזורים.

לוח זמנים מוצע ל־15 שבועות

כ־6 עד 9 שעות בשבוע: קריאה, תרגילים, ובשבועות המעבדה גם המעבדה.

שבוע	יחידה	נושאים	קריאה
1	מערכות, תכונות, אנרגיה ונצילות	מערכות, תכונות, טמפרטורה, יחידות אנרגיה, קצב חום	OpenStax UP2 1.1, 3.1; EIA

שבוע	יחידה	נושאים	קריאה
2	חומרים טהורים, מעבר פאזה וטבלאות תכונות	פאזות, רוויה, איכות; מעבדה A	UP2 1.5, 2.1; NIST WebBook
3	חומרים טהורים, מעבר פאזה וטבלאות תכונות	טבלאות קיטור, אינטרפולציה, גז אידאלי	NIST WebBook
4	העברת אנרגיה בעבודה ובחום	עבודת גבול, עבודת ציר ועבודה חשמלית; אופני העברת חום; מעבדה D	UP2 3.2, 1.6
5	החוק הראשון למערכות סגורות	החוק הראשון למערכות סגורות, חום סגולי, חום כמוס; מעבדות B ו־C	UP2 3.3, 3.5
6	החוק הראשון לנפחי בקרה: התקני זרימה יציבה	מסה ואנרגיה לנפחי בקרה; נחירים, טורבינות, מדחסים	MIT 16.050
7	החוק הראשון לנפחי בקרה: התקני זרימה יציבה	מצערות, ערבול, מחליפי חום; תרגול לבחינת אמצע	MIT 16.050
8	החוק השני: מנועי חום, מקררים וגבולות קרנו	החוק השני, מנועים, משאבות חום, קרנו; מעבדה E	UP2 4.2–4.5
9	אנטרופיה ונצילות איזנטרופית	אנטרופיה, אי־שוויון קלאוזיוס, יצירת אנטרופיה	UP2 4.6–4.7
10	אנטרופיה ונצילות איזנטרופית	תהליכים ונצילויות איזנטרופיים	UP2 3.6; NASA Glenn
11	אקסרגיה: כמה מהאנרגיה שימושית	אקסרגיה, אי־הפיכות, נצילות לפי החוק השני	MIT 16.050
12	מחזורי כוח גזיים: אוטו, דיזל ובריטון	מחזורי אוטו ודיזל	NASA Glenn
13	מחזורי כוח גזיים: אוטו, דיזל ובריטון	מחזור בריטון, רגנרציה, מחזורים משולבים	NASA Glenn; MIT Unified
14	מחזורי כוח קיטור ומחזורי קירור	מחזור רנקין ושיפוריו	NIST WebBook
15	מחזורי כוח קיטור ומחזורי קירור	קירור ומשאבות חום; מעבדה F; תרגול לבחינה הסופית	UP2 4.3

ההתקדמות שלכם

סמנו יחידות ומעבדות כשאתם מסיימים אותן, ועשו את הבחנים. ההתקדמות והציונים נשמרים רק בדפדפן הזה ולעולם לא נשלחים אלינו.

יחידות

מערכות, תכונות, אנרגיה ונצילות

מערכות סגורות, נפחי בקרה וסביבה, תכונות ומצבים, תהליכי שיווי משקל וקוואזי־שיווי משקל, סולמות טמפרטורה והחוק האפס, לחץ, צורות אנרגיה, יחידות אנרגיה, ונצילות כתפוקה שימושית חלקי הקלט הנדרש.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לבחור מערכת או נפח בקרה ואת גבולו.
- להבחין בין תכונות אינטנסיביות לאקסטנסיביות, ובין פונקציות מצב לפונקציות מסלול.
- להמיר בין kJ, kWh ו־Btu, ובין °C ל־K.
- לחשב נצילות, ואת נצילות תחנת כוח מקצב החום שלה.

מושגי מפתח

- מערכת היא האזור שאנו חוקרים; מערכת סגורה מחליפה אנרגיה אך לא מסה עם סביבתה, ואילו נפח בקרה (מערכת פתוחה) מאפשר למסה לחצות את גבולו.
- תכונות כגון הלחץ p, הטמפרטורה T והנפח הסגולי v = V/m מתארות את המצב. תכונות אינטנסיביות (p, T, v) אינן תלויות בגודל; תכונות אקסטנסיביות (V, m, E) כן. שתי תכונות אינטנסיביות בלתי תלויות קובעות את מצבו של חומר פשוט דחיס.
- החוק האפס: שני גופים שכל אחד מהם בשיווי משקל תרמי עם גוף שלישי נמצאים בשיווי משקל זה עם זה; זו הסיבה שמדחומים עובדים. יש להשתמש בטמפרטורה המוחלטת T(K) = T(°C) + 273.15 בכל יחס ובכל חוק גזים.
- אנרגיה אגורה כאנרגיה פנימית U, אנרגיה קינטית ½mV² ואנרגיה פוטנציאלית mgz, והיא חוצה גבול רק כחום Q או כעבודה W.
- נצילות = תפוקה שימושית ÷ קלט נדרש. בתחנות כוח, ה־EIA בארה"ב משתמשת בקצב חום: Btu של דלק לכל kWh של חשמל, כאשר 1 kWh = 3412 Btu.

משוואות מפתח

$$v = \frac{V}{m}, \quad \rho = \frac{1}{v}$$

```
v=V/m,\ \ ρ=1v
```

נפח סגולי וצפיפות

$$T(\mathrm{K}) = T(^\circ\mathrm{C}) + 273.15$$

```
T( K)=T(^ C)+273.15
```

טמפרטורה מוחלטת

$$E = U + \tfrac{1}{2}mV^2 + mgz$$

```
E=U+12mV^2+mgz
```

סך האנרגיה האגורה

$$\eta = \frac{3412\ \text{Btu/kWh}}{\text{heat rate}}$$

```
=3412\ Btu/kWhheat rate
```

נצילות תחנת כוח מקצב חום (EIA)

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 1.1 ה־EIA נותנת כדוגמאות קצבי חום של 10500 Btu/kWh ו־7500 Btu/kWh. מצאו את הנצילות של כל אחד.

1. η = 3412/10,500.
2. η = 3412/7500.

תשובה: 32.5% ו־45.5% (ה־EIA מעגלת אותם ל־33% ו־45%).

דוגמה 1.2 מכל מכיל 2 kg גז ב־0.5 m³. מצאו את v ואת ρ.

1. v = 0.5/2.
2. ρ = 1/v.

תשובה: v = 0.25 m³/kg, ρ = 4 kg/m³.

דוגמה 1.3 מכונית של 1000 kg הנוסעת ב־30 m/s בולמת עד עצירה. כמה אנרגיה קינטית הופכת לאנרגיה פנימית של הבלמים, ב־kJ וב־kWh?

1. KE = ½ × 1000 × 30² = 450,000 J.
2. 450 kJ ÷ 3600 kJ/kWh.

תשובה: 450 kJ = 0.125 kWh.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. המירו 25 °C לקלווין.

298.15 K.

2. האם טמפרטורה היא תכונה אינטנסיבית או אקסטנסיבית?

אינטנסיבית.

3. לתחנה קצב חום של 9000 Btu/kWh. מצאו את הנצילות שלה.

.3412/9000 = 37.9%

4. המירו 1 MWh ל־GJ.

.3600 MJ = 3.6 GJ

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: חום וטמפרטורה הם אותו דבר.

בפועל: טמפרטורה היא תכונה; חום הוא אנרגיה במעבר.

מיתוס: מערכת „מכילה חום”.

בפועל: היא מכילה אנרגיה פנימית; חום קיים רק בעת חציית גבול.

מיתוס: אפשר להשתמש ב־°C ביחסים.

בפועל: חוקי גזים ונצילויות דורשים קלווין.

כרטיסיות

מערכת

האזור הנחקר.

נפח בקרה

מסה יכולה לחצות אותו.

נפח סגולי

.v = V/m

החוק האפס

הבסיס למדחומים.

קצב חום

Btu לכל kWh.

1 kWh

.3600 kJ = 3412 Btu

בוחן לבדיקה עצמית

1. נפח בקרה מאפשר…

למסה לחצות את גבולו

אף מעבר אנרגיה

רק חום

כלום

למסה לחצות את גבולו. מערכת פתוחה.

2. איזו מהן אינטנסיבית?

נפח

מסה

לחץ

אנרגיה

לחץ. אינה תלויה בגודל.

3. קצב חום של 6824 Btu/kWh פירושו נצילות של...

25%

50%

68%

100%

.50%. 3412/6824

4. אנרגיה חוצה גבול של מערכת סגורה בצורת...

מסה

חום ועבודה

טמפרטורה

לחץ

חום ועבודה. רק שתי דרכים.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

מינהל מידע האנרגיה של ארה"ב (EIA) מודד נצילות של תחנות כוח באמצעות קצב החום: אנרגיית הדלק שהתחנה צורכת כדי לספק קילוואט־שעה אחת לרשת, כולל החשמל שהתחנה עצמה צורכת להזנת דלק, למשאבות הדוד, לקירור ולבקרת זיהום. חלוקת 3412 Btu (האנרגיה ב־kWh אחת) בקצב החום נותנת את הנצילות; הדוגמאות של ה־EIA הן תחנה של 10500 Btu בנצילות של כ־33% ותחנה של 7500 Btu בנצילות של כ־45%.

הפער הזה הוא כל העניין בקורס הזה. לאותה כמות חשמל, התחנה של 7500 Btu שורפת 7500/10500 = 71.4% מהדלק, כלומר כ־28.6% פחות דלק ו־CO_2. חוקי התרמודינמיקה מסבירים לאן הולכת שאר האנרגיה ואיך מהנדסים מחזירים חלק ממנה.

ב־Saving Planets: פתרונות · מעגלים חשמליים

מקורות: U.S. EIA: What is the efficiency of different types of power plants? (https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=107&t=3)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP2, 1.1 Temperature and thermal equilibrium (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/1-1-temperature-and-thermal-equilibrium): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax UP2, 3.1 Thermodynamic systems (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-1-thermodynamic-systems): פרק מספר לימוד חינמי.
- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): רשימות MIT על אנרגיה תרמית.
- NASA Glenn: First law of thermodynamics (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/thermo1.html): דף חינמי של NASA.

סיימתי את היחידה הזו

חומרים טהורים, מעבר פאזה וטבלאות תכונות

פאזות ומעבר פאזה, טמפרטורת רוויה ולחץ רוויה, נוזל דחוס, תערובת רוויה וקיטור מחומם־על, איכות, דיאגרמות T–v ו־p–v, טבלאות קיטור ואינטרפולציה, משוואת הגז האידאלי ומתי היא תקפה, ומקדם הדחיסות.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לזהות את הפאזה מ־p ו־T בעזרת נתוני רוויה.
- להשתמש באיכות כדי למצוא v, u ו־h של תערובת רוויה.
- לבצע אינטרפולציה בטבלאות תכונות.
- להשתמש בחוק הגז האידאלי ולדעת מתי הוא נכשל.

מושגי מפתח

- לחומר טהור הרכב כימי קבוע. בלחץ נתון המים רותחים בטמפרטורת רוויה אחת (99.61 °C ב־100 kPa); בזמן הרתיחה p ו־T נשארים קבועים ואיכות התערובת x = m_vapor/m_total גדלה מ־0 עד 1.
- בתערובת רוויה כל תכונה סגולית היא y = y_f + x(y_g − y_f) = y_f + x·y_fg, עם ערכי נוזל רווי (f) וקיטור רווי (g) מהטבלאות.
- אם T נמוכה מטמפרטורת הרוויה באותו לחץ, המים הם נוזל דחוס (בקירוב נוזל רווי ב־T); אם היא גבוהה ממנה, זהו קיטור מחומם־על, שנמצא בטבלאות נפרדות.
- אינטרפולציה לינארית: $y = y_1 + (x - x_1)(y_2 - y_1)/(x_2 - x_1)$. ה־WebBook החינמי של NIST נותן את אותם נתונים למים ולנוזלי קירור רבים.
- בלחץ נמוך ובטמפרטורה גבוהה ביחס לנקודה הקריטית, גזים מצייתים ל־pv = RT עם R = R_u/M; לאוויר R = 0.287 kJ/(kg·K). קרוב לרוויה (קיטור בדוד) השתמשו בטבלאות במקום זאת.

משוואות מפתח

$$x = \frac{m_g}{m_f + m_g}$$

```
x=(m_g)/(m_f+m_g)
```

איכות

$$y = y_f + x\, y_{fg}$$

```
y=y_f+x y_fg
```

תכונה של תערובת רוויה

$$pv = RT, \;\; R = \frac{R_u}{M}$$

```
pv=RT,\ \ R=(R_u)/(M)
```

$$y = y_1 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}(y_2 - y_1)$$

```
y=y_1+(x-x_1)/(x_2-x_1)(y_2-y_1)
```

אינטרפולציה לינארית

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 2.1 ב־100 kPa, h_f = 417.51 ו־h_fg = 2257.5 kJ/kg, v_f = 0.001043 ו־v_g = 1.6941 m³/kg (טבלאות קיטור). מצאו את h ואת v באיכות 0.6.

1. h = 417.51 + 0.6 × 2257.5.
2. v = 0.001043 + 0.6 × (1.6941 − 0.001043).

תשובה: h = 1772.0 kJ/kg; v = 1.0169 m³/kg.

דוגמה 2.2 מצאו את מסת האוויר במכל של 0.5 m³ ב־100 kPa וב־300 K.

1. m = pV/(RT) = 100 × 0.5/(0.287 × 300).

תשובה: m = 0.581 kg.

דוגמה 2.3 מצאו את הלחץ של 2 kg אוויר ב־0.5 m³ ב־400 K.

1. p = mRT/V = 2 × 0.287 × 400/0.5.

תשובה: p = 459.2 kPa.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מים ב־100 kPa וב־80 °C הם…

   נוזל דחוס (80 °C < 99.61 °C).

2. מים ב־100 kPa וב־150 °C הם…

   קיטור מחומם־על.

3. בצעו אינטרפולציה ל־h ב־25 °C אם h = 83.9 ב־20 °C ו־125.7 ב־30 °C (kJ/kg, נוזל רווי).

   83.9 + 0.5 × 41.8 = 104.8 kJ/kg.

4. מצאו את R להליום (M = 4.003 kg/kmol).

   8.314/4.003 = 2.077 kJ/(kg·K).

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: הטמפרטורה עולה בזמן שהמים רותחים.
בפועל: בלחץ קבוע היא נשארת T_sat עד שכל הנוזל נעלם.

מיתוס: קיטור בדוד הוא גז אידאלי.
בפועל: קרוב לרוויה הוא אינו כזה; השתמשו בטבלאות קיטור.

מיתוס: איכות חלה על קיטור מחומם־על.
בפועל: רק על תערובות רוויות, 0 ≤ x ≤ 1.

כרטיסיות

רוויה

נוזל וקיטור מתקיימים יחד ב־T_sat(p).

איכות

x = m_g/m.

תכונת תערובת

y_f + x y_fg.

נוזל דחוס

T < T_sat.

מחומם־על

T > T_sat.

גז אידיאלי

pv = RT.

בוחן לבדיקה עצמית

1. איכות היא…

מסת הקיטור חלקי המסה הכוללת

מסת הנוזל חלקי המסה הכוללת

יחס טמפרטורות

יחס לחצים

מסת הקיטור חלקי המסה הכוללת. x = m_g/m.

2. מים ב־100 kPa וב־120 °C הם…

נוזל דחוס

תערובת רוויה

קיטור מחומם־על

מוצק

קיטור מחומם־על. מעל T_sat.

3. ערכו של R לאוויר הוא בערך…

8.314

0.287

1.005

4.18

0.287. kJ/(kg·K).

4. בזמן רתיחה ב־p קבוע, T…

עולה

יורדת

נשארת קבועה

מתנודדת

נשארת קבועה. רוויה.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

משרד האנרגיה של ארה"ב מסביר שכורים גרעיניים משתמשים בחום הביקוע כדי לייצר קיטור המסובב טורבינה. כל הכורים המסחריים בארה"ב הם כורי מים קלים: יותר מ־65% הם כורי מים בלחץ, השומרים את מי הליבה בלחץ גבוה כדי שלא ירתחו ומייצרים קיטור במחליף חום נפרד, וכשליש הם כורי מים רותחים, המייצרים קיטור ישירות בכלי הכור.

שני התכנונים הם תרגילים ביחידה זו: העלאת הלחץ מעלה את טמפרטורת הרוויה ולכן המים נשארים נוזל, והאיכות והאנתלפיה של הקיטור קובעות כמה עבודה מקבלת הטורבינה. משרד האנרגיה מונה יותר מ־400 כורים מסחריים בעולם, מהם 94 בארצות הברית, וכולם מתוכננים על סמך טבלאות קיטור.

ב־Saving Planets: פתרונות · כימיה כללית I

מקורות: U.S. DOE: Nuclear 101: How does a nuclear reactor work? (May 2025) (https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-101-how-does-nuclear-reactor-work) · NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/)

מקורות לימוד חינמיים

- NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/): טבלאות קיטור חינמיות.
- OpenStax UP2, 1.5 Phase changes (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/1-5-phase-changes): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax UP2, 2.1 Molecular model of an ideal gas (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/2-1-molecular-model-of-an-ideal-gas): פרק מספר לימוד חינמי.
- PhET: States of Matter (https://phet.colorado.edu/en/simulations/states-of-matter): מעבר פאזה באופן אינטראקטיבי.

סיימתי את היחידה הזו

העברת אנרגיה בעבודה ובחום

מוסכמות סימן, עבודת גבול והשטח שלה בדיאגרמת p–V, תהליכים בלחץ קבוע, איזותרמיים ופוליטרופיים, עבודת ציר ועבודה חשמלית, ושלושת אופני העברת החום: הולכה, הסעה וקרינה.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לחשב עבודת גבול בתהליכים נפוצים.
- להראות שעבודה וחום הם פונקציות מסלול.
- לחשב עבודת ציר ועבודה חשמלית והספק.
- להעריך קצבי חום בהולכה ובהסעה.

מושגי מפתח

- מוסכמת סימן: חום הנכנס למערכת ועבודה שהמערכת מבצעת הם חיוביים (Q_in, W_out). שניהם פונקציות מסלול: הם תלויים בתהליך, ולא רק במצבי הקצה.
- עבודת גבול W_b = ∫p dV היא השטח מתחת לעקומת התהליך בדיאגרמת p–V. בלחץ קבוע W_b = p(V₂ − V₁).
- לגז אידאלי בטמפרטורה קבועה W_b = mRT ln(V₂/V₁). לתהליך פוליטרופי pVⁿ = קבוע (n ≠ 1), W_b = (p₂V₂ − p₁V₁)/(1 − n).
- עבודת ציר: הספק = מומנט × מהירות זוויתית, Ẇ = 2πṅT. עבודה חשמלית: W = VIΔt = PΔt.
- חום עובר בהולכה Q̇ = kAΔT/L (דרך קיר), בהסעה Q̇ = hAΔT לזורם נע) ובקרינה Q̇ = εσA(T_s⁴ − T_surr⁴). בידוד מקטין את k; זו הסיבה שמעטפת המבנה חשובה.

משוואות מפתח

$$W_b = \int_1^2 p\,dV$$

W_b=_1^2 p dV

עבודת גבול

$$W_b = mRT\ln\frac{V_2}{V_1}$$

W_b=mRT(V_2)/(V_1)

גז אידאלי איזותרמי

$$W_b = \frac{p_2V_2 - p_1V_1}{1-n}$$

W_b=(p_2V_2-p_1V_1)/(1-n)

תהליך פוליטרופי

$$\dot{Q} = \frac{kA\,\Delta T}{L},\quad \dot{Q} = hA\,\Delta T$$

```
Q=(kA Δ T)/(L),\ \ Q=hA Δ T
```

הולכה והסעה

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 3.1 1 kg אוויר מתפשט באופן איזותרמי ב־300 K עד שנפחו מוכפל. מצאו את העבודה.

1. $W = 1 \times 0.287 \times 300 \times \ln 2$.

תשובה: $W = 59.7\ \text{kJ}$ (מבוצעת על ידי הגז).

דוגמה 3.2 אוויר נדחס באופן פוליטרופי ($n = 1.3$) מ־100 kPa ו־0.2 m³ ל־0.1 m³. מצאו את p_2 ואת העבודה.

1. $p_2 = 100 \times 2^{1.3} = 246.2\ \text{kPa}$.
2. $W = (246.2 \times 0.1 - 100 \times 0.2)/(1 - 1.3)$.

תשובה: $p_2 = 246.2\ \text{kPa}$; $W = -15.4\ \text{kJ}$ (עבודה המבוצעת על הגז).

דוגמה 3.3 על קיר בשטח 10 m², בעובי 0.1 m ועם $k = 0.04\ \text{W/(m·K)}$ (בידוד לדוגמה) יש הפרש של 20 K. מצאו את איבוד החום.

1. $\dot{Q} = 0.04 \times 10 \times 20/0.1$.

תשובה: $\dot{Q} = 80\ \text{W}$.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. גז מתפשט בלחץ קבוע של 200 kPa מ־0.5 ל־0.8 m³. מהי העבודה?

   $200 \times 0.3 = 60\ \text{kJ}$.

2. ציר מספק 50 N·m ב־3000 סל״ד. מהו ההספק?

   $2\pi \times 50 \times 50 = 15.7\ \text{kW}$.

3. מחמם של 1500 W פועל 10 דקות. מהי העבודה החשמלית?

.1500 × 600 = 900 kJ

4. הסעה: $h = 10\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)}$, $A = 2\ \mathrm{m^2}$, $\Delta T = 30\ \mathrm{K}$. מהו קצב החום?

.600 W

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: עבודה היא תכונה של המצב.

בפועל: היא תלויה במסלול.

מיתוס: מכל קשיח יכול לבצע עבודת גבול.

בפועל: No; $dV = 0$.

מיתוס: הכפלת עובי הבידוד מחצה את הטמפרטורה.

בפועל: היא מחצה את קצב ההולכה באותו ΔT.

כרטיסיות

מוסכמת סימן

Q נכנס ו־W יוצא חיוביים.

עבודת גבול

$\int p\,dV$.

איזותרמי

$mRT\ln(V_2/V_1)$.

פוליטרופי

$(p_2V_2 - p_1V_1)/(1 - n)$.

הספק ציר

$2\pi\dot{n}T$.

הולכה

$kA\Delta T/L$.

בוחן לבדיקה עצמית

1. עבודת גבול שווה ל…

$\int V\,dp$

$\int p\,dV$

pV

mRT

$\int p\,dV$. השטח מתחת לעקומת p–V.

2. העבודה האיזותרמית של גז אידאלי היא...

$mRT \ln(V_2/V_1)$

$p\,\Delta V$

$mc_v\Delta T$

0

$pV = mRT \ln(V_2/V_1)$. קבוע.

3. חום ועבודה הם...

תכונות

פונקציות מסלול

תמיד שווים

אינטנסיביים

פונקציות מסלול. תלויים בתהליך.

4. קצב החום בהולכה פרופורציוני ל...

1/k

L

ΔT/L

T^4

$kA\Delta T/L$. ΔT/L.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

משרד האנרגיה של ארה"ב מסביר שאנרגיה סולארית־תרמית מרוכזת משתמשת במראות כדי לרכז אור שמש על קולט ולחמם זורם בטמפרטורה גבוהה. החום הזה מסובב טורבינה או מניע מנוע לייצור חשמל, והוא יכול לשמש גם את התעשייה, מהתפלה ועד עיבוד מזון וייצור כימי.

משרד האנרגיה מציין שתחנות בקנה מידה גדול משתמשות במגדלי שמש או בשורות של מראות לינאריות, בעוד שמערכות צלחת/מנוע בודדות מפיקות 5 עד 25 קילוואט כל אחת. כל אחת מהן היא בעיה של העברת חום ועבודה: לבלוע קרינה מרוכזת, להגביל הפסדי הולכה והסעה מהקולט ולהפוך את החום לעבודת ציר.

ב־Saving Planets: פתרונות · פיזיקה 2

מקורות: U.S. DOE: Concentrating solar-thermal power basics (https://www.energy.gov/eere/solar/concentrating-solar-thermal-power-basics)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP2, 3.2 Work, heat and internal energy (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-2-work-heat-and-internal-energy): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax UP2, 1.6 Mechanisms of heat transfer (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/1-6-mechanisms-of-heat-transfer): פרק מספר לימוד חינמי.
- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): הרצאות על עבודה וחום.
- PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes): העברת אנרגיה באופן אינטראקטיבי.

צפו בהרצאה

Lecture 2: Work, heat, first law (https://ocw.mit.edu/courses/5-60-thermodynamics-kinetics-spring-2008/resources/lecture-2-work-heat-first-law/w/) (באנגלית)

MIT 5.60 Thermodynamics & Kinetics (Spring 2008), MIT OpenCourseWare. רישיון: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · תנאי שימוש (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

☐ **סיימתי את היחידה הזו**

החוק הראשון למערכות סגורות

מאזן אנרגיה למערכות סגורות, אנרגיה פנימית ואנתלפיה, חום סגולי של גזים אידאליים, נוזלים ומוצקים, חימום בנפח קבוע ובלחץ קבוע, חום כמוס ומאזני אנרגיה למחזורים.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לכתוב וליישם Q − W = ΔU + ΔKE + ΔPE.
- להשתמש ב־c_v וב־c_p לגזים אידאליים, וב־c לנוזלים ולמוצקים.
- לכלול חום כמוס בבעיות מעבר פאזה.
- להראות שבמחזור החום הנקי שווה לעבודה הנקייה.

מושגי מפתח

- החוק הראשון למערכת סגורה: Q − W = ΔE = ΔU + ΔKE + ΔPE. בדרך כלל ΔKE ו־ΔPE זניחים, ולכן Q − W = ΔU.
- אנתלפיה h = u + pv. בלחץ קבוע החום המוסף שווה לשינוי באנתלפיה: Q = m(h₂ − h₁), כי עבודת הגבול כבר כלולה בה.
- בגזים אידאליים u ו־h תלויים רק ב־T: Δu = c_vΔT, Δh = c_pΔT, כאשר c_p − c_v = R ו־k = c_p/c_v (1.4 לאוויר).
- בנוזלים ובמוצקים c_v = c_p ≈ c, ולכן Q = mcΔT. התכה או רתיחה ב־T קבועה דורשות חום כמוס: Q = m h_if או m h_fg.
- במחזור שלם המערכת חוזרת למצבה ההתחלתי, ולכן ΔU = 0 ו־Q_net = W_net. זהו הבסיס לכל מנוע ולכל מקרר.

משוואות מפתח

$$Q - W = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

```
Q-W=Δ U+Δ KE+Δ PE
```

החוק הראשון, מערכת סגורה

$$h = u + pv$$

```
h=u+pv
```

אנתלפיה

$$\Delta u = c_v \Delta T,\ \Delta h = c_p \Delta T,\ c_p - c_v = R$$

```
Δ u=c_vΔ T,\ Δ h=c_pΔ T,\ c_p-c_v=R
```

חום סגולי של גז אידאלי

$$Q = mc\Delta T,\ \ Q = m\,h_{fg}$$

```
Q=mcΔ T,\ \ Q=m h_fg
```

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 4.1 2 kg אוויר במכל קשיח מחוממים מ־300 K ל־400 K. מצאו את Q.

1. $W = 0$ (קשיח).
2. $Q = m\,c_v\,\Delta T = 2 \times 0.718 \times 100$.

תשובה: $Q = 143.6\ \text{kJ}$.

דוגמה 4.2 אותו אוויר מחומם בלחץ קבוע (100 kPa) מ־300 ל־400 K. מצאו את Q ואת עבודת הגבול.

1. $Q = m\,c_p\,\Delta T = 2 \times 1.005 \times 100$.
2. $W = mR\Delta T = 2 \times 0.287 \times 100$.

תשובה: $Q = 201.0\ \text{kJ}$; $W = 57.4\ \text{kJ}$; $\Delta U = 143.6\ \text{kJ}$ בשני המקרים.

דוגמה 4.3 מצאו את החום הדרוש לחימום 1 kg מים מ־20 °C ל־100 °C, ואז לאידוי 0.1 kg מהם.

1. $Q_1 = 1 \times 4.18 \times 80$.
2. $Q_2 = 0.1 \times 2257$.

תשובה: $Q_1 = 334.4\ \text{kJ}$; $Q_2 = 225.7\ \text{kJ}$.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. התכת 0.2 kg קרח ב־0 °C. כמה חום?

   $0.2 \times 334 = 66.8\ \text{kJ}$.

2. מצאו את $c_p - c_v$ לאוויר.

   $R = 0.287\ \text{kJ/(kg·K)} = 1.005 - 0.718$.

3. מחזור מקבל 500 kJ חום ופולט 300 kJ. מהי העבודה הנקייה?

   200 kJ.

4. מצאו את k לאוויר.

1.40 = 1.005/0.718.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: הוספת חום תמיד מעלה את הטמפרטורה.

בפועל: לא בזמן מעבר פאזה.

מיתוס: $Q = mc_p\Delta T$ תקף למכל קשיח.

בפועל: השתמשו ב־c_v כשהנפח קבוע.

מיתוס: אנתלפיה היא סוג של חום.

בפועל: היא תכונה, $u + pv$.

כרטיסיות

החוק הראשון

$\Delta U = Q - W$.

אנתלפיה

$h = u + pv$.

Δu של גז אידאלי

$c_v\Delta T$.

Δh של גז אידאלי

$c_p\Delta T$.

חום כמוס

$Q = m\, h_{fg}$.

מחזור

$Q_{net} = W_{net}$.

בוחן לבדיקה עצמית

1. במכל סגור קשיח, Q שווה ל…

ΔH

ΔU

W

0

ΔU. אין עבודת גבול.

2. $c_p - c_v$ לגז אידאלי הוא…

k

R

1

c_v

R. יחס מאייר.

3. לאורך מחזור, ΔU הוא…

חיובי

שלילי

אפס

Q

אפס. אותו מצב התחלתי וסופי.

4. בלחץ קבוע, Q שווה ל…

ΔU

ΔH

W

pV

ΔH. $h = u + pv$.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

משרד האנרגיה של ארה"ב מדווח שמשאבות חום צומחות במהירות: נכון ל־2020 היו להן יותר מ־17 מיליון יחידות דיור בארה"ב, וכיום הן מהוות יותר ממחצית ממכירות ציוד החימום הביתי בארצות הברית. הן פועלות כמו מקרר: משתמשות בחשמל כדי

להעביר חום ממקום קר למקום חם במקום לייצר חום.

החוק הראשון מסביר למה זה חשוב: תנור חשמלי בעל נגד הופך כל kWh של חשמל ל־kWh אחת בדיוק של חום, אבל משאבת חום מספקת את החשמל ועוד החום שהיא שואבת מבחוץ. לדברי משרד האנרגיה, משאבות חום אוויר מודרניות יכולות לקצץ את צריכת החשמל ב־50% לעומת תנורים ומחממי פאנל, והמעבר עשוי לחסוך עד 7.6 טונות של פליטות פחמן בשנה, בהתאם לציוד המוחלף.

ב־Saving Planets: פתרונות · חשבון אינפיניטסימלי 2

מקורות: U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP2, 3.3 First law of thermodynamics (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-3-first-law-of-thermodynamics): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax UP2, 3.5 Heat capacities of an ideal gas (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-5-heat-capacities-of-an-ideal-gas): פרק מספר לימוד חינמי.
- NASA Glenn: First law of thermodynamics (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/thermo1.html): דף חינמי של NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): רשימות על החוק הראשון.

צפו בהרצאה

Lecture 1: State of a system, 0th law, equation of state (https://ocw.mit.edu/courses/5-60-thermodynamics-kinetics-spring-2008/resources/lecture-1-state-of-a-system-0th-law-equation-of-state/) (באנגלית)

MIT 5.60 Thermodynamics & Kinetics (Spring 2008), MIT OpenCourseWare. רישיון: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · תנאי שימוש (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

סיימתי את היחידה הזו

החוק הראשון לנפחי בקרה: התקני זרימה יציבה

מאזני מסה ואנרגיה לנפחי בקרה, עבודת זרימה ואנתלפיה, התקני זרימה יציבה (נחירים ומפזרים, טורבינות ומדחסים, משאבות, שסתומי מצערת, תאי ערבול ומחליפי חום), ומבוא למילוי לא יציב.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לכתוב מאזני מסה ואנרגיה בזרימה יציבה.
- להסביר מדוע אנתלפיה מופיעה בזרמים.
- לנתח נחירים, טורבינות, מדחסים, מצערות ומחליפי חום.
- לבחור אילו איברים ניתן להזניח בכל התקן.

מושגי מפתח

- מאזן מסה: בזרימה יציבה Σṁ_in = Σṁ_out, כאשר ṁ = ρAV.
- דחיפת זורם דרך גבול דורשת עבודת זרימה pv ליחידת מסה; הוספתה ל־u נותנת את האנתלפיה h, ולכן מאזנים של מערכות פתוחות משתמשים ב־h.
- משוואת האנרגיה לזרימה יציבה, כניסה אחת ויציאה אחת: Q̇ − Ẇ = ṁ[(h₂ − h₁) + (V₂² − V₁²)/2 + g(z₂ − z₁)].
- קיצורי דרך להתקנים: נחירים מחליפים אנתלפיה במהירות (Q̇ = 0 = Ẇ); טורבינות ומדחסים כמעט אדיאבטיים עם Ẇ = ṁ(h₁ − h₂); שסתומי מצערת שומרים על h₁ = h₂; במחליפי חום Ẇ = 0 והחום שזרם אחד מאבד שווה לחום שהזרם האחר מקבל.
- זכרו את היחידות: יש לחלק אנרגיה קינטית ב־J/kg ב־1000 כדי לחברה לאנתלפיה ב־kJ/kg.

משוואות מפתח

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out}$$

```
m_in= m_out
```

מאזן מסה יציב

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}\left[\Delta h + \frac{\Delta V^2}{2} + g\Delta z\right]$$

```
Q- W= m[Δ h+(Δ V^2)/(2)+gΔ z]
```

משוואת האנרגיה לזרימה יציבה

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

```
W_turb= m(h_1-h_2)
```

טורבינה אדיאבטית

$$h_1 = h_2$$

h_1=h_2

שסתום מצערת

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 5.1 אוויר נכנס לאט לנחיר אדיאבטי ב־400 K ויוצא ב־350 K. מצאו את מהירות היציאה.

1. $\Delta h = c_p \Delta T = 1.005 \times 50 = 50.25\ \text{kJ/kg} = 50{,}250\ \text{J/kg}$.
2. $V_2 = \sqrt{(2 \times 50{,}250)}$.

תשובה: $V_2 = 317.0\ \text{m/s}$.

דוגמה 5.2 קיטור זורם ב־5 kg/s דרך טורבינה אדיאבטית מ־$h_1 = 3116.1$ ל־$h_2 = 2403.0\ \text{kJ/kg}$. מצאו את ההספק.

1. $\dot{W} = 5 \times (3116.1 - 2403.0)$.

תשובה: $\dot{W} = 3565.5\ \text{kW} \approx 3.57\ \text{MW}$.

דוגמה 5.3 מדחס אדיאבטי מעלה 1.2 kg/s אוויר מ־300 K ל־450 K. מצאו את הספק הכניסה.

1. $\dot{W}_{in} = \dot{m} c_p \Delta T = 1.2 \times 1.005 \times 150$.

תשובה: 180.9 kW.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מים ב־0.5 kg/s מחוממים מ־15 ל־45 °C במחליף חום. מהו קצב החום?

   $0.5 \times 4.18 \times 30 = 62.7\ \text{kW}$.

2. קיטור עובר מצערת מ־$h = 2800\ \text{kJ/kg}$. מהו h ביציאה?

   2800 kJ/kg.

3. המירו שינוי מהירות מ־0 ל־100 m/s ל־kJ/kg.

   $100^2/2 = 5000\ \text{J/kg} = 5\ \text{kJ/kg}$.

4. בצינור $\dot{m} = 2\ kg/s$ בכניסה. מה ביציאה בזרימה יציבה?

.2 kg/s

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: הספק טורבינה משתמש ב־u.

בפועל: זרמים משתמשים ב־h, הכולל את עבודת הזרימה.

מיתוס: מצערת מורידה את האנתלפיה.

בפועל: h נשאר קבוע; p ובדרך כלל גם T יורדים.

מיתוס: אנרגיה קינטית תמיד זניחה.

בפועל: לא בנחירים ובמפזרים.

כרטיסיות

מסה במצב יציב

$\dot{m}$ נכנס = $\dot{m}$ יוצא.

עבודת זרימה

pv לכל kg.

SFEE

$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}\Delta(h + V^2/2 + gz)$.

טורבינה

$\dot{m}(h_1 - h_2)$.

מצערת

$h_1 = h_2$.

מחליף חום

חום שאבד = חום שהתקבל.

בוחן לבדיקה עצמית

1. בשסתום מצערת…

$h_1 = h_2$

$T_1 = T_2$

$p_1 = p_2$

$W > 0$

$h_1 = h_2$. אין עבודה, אין חום, ΔKE קטן.

2. אנתלפיה מופיעה במערכות פתוחות בגלל...

עבודת זרימה

חיכוך

כבידה

קרינה

עבודת זרימה. $h = u + pv$.

3. נחיר ממיר...

מהירות לאנתלפיה

אנתלפיה למהירות

עבודה לחום

מסה לאנרגיה

אנתלפיה למהירות. מאיץ את הזרימה.

4. הספק טורבינה אדיאבטית הוא...

$\dot{m}(h_1 - h_2)$

$\dot{m}(h_2 - h_1)$

$\dot{Q}$

0

$\dot{m}(h_1 - h_2)$. ירידת האנתלפיה.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

משרד האנרגיה של ארה"ב מתאר את לב תחנת הכוח הגרעינית כשרשרת של התקני זרימה יציבה: הביקוע מחמם מים, מחליף חום (בכורי מים בלחץ) מייצר קיטור במעגל נפרד, הקיטור מסובב טורבינה המחוברת לגנרטור, והקיטור שנותר מעובה חזרה למים ונשאב חזרה לחימום.

כל קופסה היא משוואת אנרגיה אחת לזרימה יציבה. תחנות גאותרמיות, שלדברי משרד האנרגיה שואבות זורם חם דרך בארות וממירות את חומו לקיטור המניע טורבינות, משתמשות באותם התקנים עם חום כדור הארץ כמקור. הפקת עוד כמה kJ לכל kg מכל שלב טורבינה היא הדרך שבה עולה נצילות התחנה.

ב־Saving Planets: פתרונות · אווירודינמיקה 1

מקורות: U.S. DOE: Nuclear 101: How does a nuclear reactor work? (May 2025) (https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-101-how-does-nuclear-reactor-work) · U.S. DOE: Geothermal basics (https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP2, 3.4 Thermodynamic processes (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-4-thermodynamic-processes): פרק מספר לימוד חינמי.
- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): הרצאות על נפחי בקרה.
- NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/): נתוני קיטור.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): רשימות על זרימה יציבה.

צפו בהרצאה

Lecture 2: Work, heat, first law (https://ocw.mit.edu/courses/5-60-thermodynamics-kinetics-spring-2008/resources/lecture-2-work-heat-first-law/w/) (באנגלית)

MIT 5.60 Thermodynamics & Kinetics (Spring 2008), MIT OpenCourseWare. רישיון: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · תנאי שימוש (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

סיימתי את היחידה הזו

החוק השני: מנועי חום, מקררים וגבולות קרנו

מאגרים תרמיים, מנועי חום ונצילות תרמית, מקררים, משאבות חום ו־COP, ניסוחי קלווין–פלנק וקלאוזיוס, תהליכים הפיכים ובלתי הפיכים, מחזור קרנו וגבולות קרנו לנצילות ול־COP.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לחשב נצילות תרמית ו־COP.
- לנסח את ניסוחי קלווין–פלנק וקלאוזיוס.
- לזהות מקורות של אי־הפיכות.
- להשתמש בגבולות קרנו כדי לשפוט אם התקן נטען אפשרי.

מושגי מפתח

- מנוע חום לוקח Q_H ממאגר חם, פולט Q_L למאגר קר ומפיק W = Q_H − Q_L. נצילות תרמית η = W/Q_H = 1 − Q_L/Q_H.
- קלווין–פלנק: שום מחזור אינו יכול להפוך את כל החום ממאגר יחיד לעבודה, ולכן η < 100%. קלאוזיוס: חום אינו זורם מעצמו מקר לחם; מקרר או משאבת חום זקוקים להשקעת עבודה.
- COP_R = Q_L/W למקרר; COP_HP = Q_H/W = COP_R + 1 למשאבת חום. COP יכול להיות גבוה בהרבה מ־1, ולכן משאבות חום עדיפות על מחממי נגד.
- אי־הפיכויות (חיכוך, העברת חום על פני ΔT סופי, התפשטות חופשית, ערבול) מקטינות ביצועים. מחזור הפיך בין שני מאגרים, מחזור קרנו, הוא הטוב ביותר האפשרי.
- גבולות קרנו משתמשים בטמפרטורות מוחלטות: η_Carnot = 1 − T_L/T_H, COP_R,Carnot = T_L/(T_H − T_L), COP_HP,Carnot = T_H/(T_H − T_L).

משוואות מפתח

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

=(W)/(Q_H)=1-(Q_L)/(Q_H)

נצילות תרמית

$$COP_R = \frac{Q_L}{W},\ COP_{HP} = \frac{Q_H}{W}$$

COP_R=(Q_L)/(W),\ COP_HP=(Q_H)/(W)

מקדמי ביצועים

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

_Carnot=1-(T_L)/(T_H)

$$COP_{HP,Carnot} = \frac{T_H}{T_H - T_L}$$

`COP_HP,Carnot=(T_H)/(T_H-T_L)`

משאבת חום של קרנו

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 6.1 מנוע מקבל 1000 kJ חום ומפיק 350 kJ עבודה. מצאו את η ואת Q_L.

1. η = 350/1000.
2. Q_L = 1000 − 350.

תשובה: η = 35%; Q_L = 650 kJ.

דוגמה 6.2 מצאו את נצילות קרנו בין 800 K ל־300 K, ובין 1073 K ל־293 K.

1. 1 − 300/800.
2. 1 − 293/1073.

תשובה: 62.5% ו־72.7%.

דוגמה 6.3 משאבת חום שומרת בית ב־294 K כשבחוץ 273 K. מצאו את COP של קרנו, ואת החום שמספקת יחידה אמיתית עם COP = 3 (ערך לדוגמה) הצורכת 3 kWh.

1. COP = 294/(294 − 273).
2. Q_H = 3 × 3.

תשובה: COP_Carnot = 14.0; היחידה האמיתית מספקת 9 kWh חום.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. למקרר COP_R = 2.5 והוא מוציא 500 kJ. מהי העבודה?

   200 kJ.

2. מצאו את COP_HP אם COP_R = 2.5.

.3.5

3. מקרר פועל בין 275 K ל־298 K. מהו COP_R של קרנו?

.275/23 = 11.96

4. ממציא טוען לנצילות של 70% בין 600 K ל־300 K. האם זה אפשרי?

לא: גבול קרנו הוא 50%.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: COP גבוה מ־1 מפר את שימור האנרגיה.

בפועל: משאבת החום מעבירה חום; היא אינה יוצרת אותו.

מיתוס: נצילות קרנו יכולה להשתמש ב־°C.

בפועל: חייבים להשתמש בקלווין.

מיתוס: הנדסה טובה יותר יכולה להגיע לנצילות של 100%.

בפועל: קלווין–פלנק אוסר זאת.

כרטיסיות

נצילות

.W/Q_H

COP_R

.Q_L/W

COP_HP

.Q_H/W

קלווין–פלנק

אין מנוע של 100%.

קלאוזיוס

אין מעבר מקר לחם בלי עבודה.

קרנו

.1 − T_L/T_H

בוחן לבדיקה עצמית

1. נצילות קרנו בין 600 K ל־300 K היא…

25%

50%

75%

100%

.50%. 1 − 0.5

2. COP_HP − COP_R שווה ל…

0

1

η

T_H

.1. Q_H = Q_L + W

3. איזה ניסוח אוסר מנוע בנצילות של 100%?

קלאוזיוס

קלווין–פלנק

החוק האפס

החוק הראשון

קלווין–פלנק. הניסוח של מאגר יחיד.

4. מה מהבאים הוא אי־הפיכות?

חיכוך

דחיסה קוואזי־סטטית

התפשטות איזנטרופית

אף אחת

חיכוך. פיזור.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

משרד האנרגיה של ארה"ב מתאר משאבות חום כמעבירות חום במקום לייצר אותו, ולכן הן יעילות בהרבה מחימום מסורתי. משאבות חום אוויר מודרניות יכולות לקצץ את צריכת החשמל ב־50% לעומת תנורים ומחממי פאנל, ומשאבות חום גאותרמיות, המנצלות את הטמפרטורה היציבה של הקרקע הרדודה, יכולות להפחית את צריכת האנרגיה ב־30% עד 60%.

COP של קרנו מסביר את שתי הטענות: ככל שהפרש הטמפרטורות $T_H - T_L$ קטן יותר, ה־COP גבוה יותר. הקרקע נשארת מתונה יותר מאוויר החורף, ולכן משאבת חום קרקעית מעלה חום על פני פער קטן יותר. משרד הגאותרמיה של משרד האנרגיה רואה פוטנציאל לעד 28 מיליון משאבות חום גאותרמיות עד 2050.

ב־Saving Planets: פתרונות · אוקיינוסים

מקורות: U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps) · U.S. DOE: Geothermal basics (https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP2, 4.2 Heat engines (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-2-heat-engines): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax UP2, 4.3 Refrigerators and heat pumps (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-3-refrigerators-and-heat-pumps): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax UP2, 4.5 The Carnot cycle (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-5-the-carnot-cycle): פרק מספר לימוד חינמי.
- NASA Glenn: Carnot cycle (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/carnot.html): דף חינמי של NASA.

צפו בהרצאה

The Second Law of Thermodynamics and Carnot's Engine (https://oyc.yale.edu/physics/phys-200/lecture-23) (באנגלית)

Ramamurti Shankar, PHYS 200 Fundamentals of Physics I, Open Yale Courses. רישיון: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · תנאי שימוש (https://oyc.yale.edu/terms). הקישור מיועד ללימוד חינמי בלבד; Saving Planets אינו קשור לאוניברסיטה זו ואינו נתמך על ידה.

סיימתי את היחידה הזו

אנטרופיה ונצילות איזנטרופית

אי־שוויון קלאוזיוס, אנטרופיה כתכונה, עקרון עליית האנטרופיה ויצירת אנטרופיה, יחסי T ds, שינוי אנטרופיה של נוזלים, מוצקים וגזים אידאליים, תהליכים איזנטרופיים, דיאגרמות T–s, ונצילויות איזנטרופיות של טורבינות, מדחסים ונחירים.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לחשב שינויי אנטרופיה של נוזלים, מוצקים וגזים אידאליים.
- למצוא יצירת אנטרופיה ולהכריע אם תהליך אפשרי.
- להשתמש ביחסים איזנטרופיים לגזים אידאליים.
- ליישם נצילויות איזנטרופיות על התקנים אמיתיים.

מושגי מפתח

- אנטרופיה S היא תכונה המוגדרת על ידי dS = δQ_rev/T. לכל תהליך S₂ − S₁ ≥ ∫δQ/T; ההפרש הוא האנטרופיה שנוצרה, S_gen ≥ 0 (אפס רק בתהליך הפיך).
- עקרון עליית האנטרופיה: האנטרופיה של מערכת מבודדת (המערכת והסביבה) לעולם אינה יורדת. תהליך עם S_gen < 0 אינו אפשרי.
- יחסי T ds: T ds = du + p dv = dh − v dp. בנוזלים ובמוצקים Δs = c ln(T₂/T₁); בגזים אידאליים Δs = c_p ln(T₂/T₁) − R ln(p₂/p₁).
- בתהליך איזנטרופי (אדיאבטי הפיך) של גז אידאלי עם חום סגולי קבוע T₂/T₁ = (p₂/p₁)^((k−1)/k). בדיאגרמת T–s זהו קו אנכי, והשטח מתחת לתהליך הפיך הוא החום שהועבר.
- התקנים אמיתיים מושווים לאיזנטרופיים: η_T = (h₁ − h₂a)/(h₁ − h₂s) לטורבינות ו־η_C = (h₂s − h₁)/(h₂a − h₁) למדחסים.

משוואות מפתח

$$dS = \frac{\delta Q_{rev}}{T}, \;\; S_{gen} \geq 0$$

```
dS= Q_revT,\ \ S_gen0
```

אנטרופיה והחוק השני

$$\Delta s = c \ln \frac{T_2}{T_1}$$

```
Δ s=c(T_2)/(T_1)
```

נוזלים ומוצקים

$$\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

```
Δ s=c_p(T_2)/(T_1)-R(p_2)/(p_1)
```

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k-1)/k}$$

(T_2)/(T_1)=((p_2)/(p_1))^(k-1)/k

גז אידאלי איזנטרופי

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 7.1 מצאו את שינוי האנטרופיה של 2 kg מים המחוממים מ־293 K ל־353 K.

1. ΔS = 2 × 4.18 × ln(353/293).

תשובה: ΔS = 1.557 kJ/K.

דוגמה 7.2 אוויר עובר מ־300 K ו־100 kPa ל־500 K ו־400 kPa. מצאו את Δs.

1. Δs = 1.005 ln(500/300) − 0.287 ln(400/100).

תשובה: Δs = 0.1155 kJ/(kg·K).

דוגמה 7.3 אוויר ב־300 K נדחס ביחס לחצים של 8. מצאו את טמפרטורת היציאה האיזנטרופית ואת האמיתית אם η_C = 0.85.

1. $T_2s = 300 \times 8^{(0.4/1.4)} = 543.4$ K.
2. $T_2a = 300 + (543.4 - 300)/0.85$.

תשובה: $T_2s = 543.4$ K; $T_2a = 586.4$ K.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. 1000 kJ חום זורמים ממאגר ב־800 K למאגר ב־300 K. מהו S_gen?

1000/300 − 1000/800 = 2.083 kJ/K.

2. מהי T_2 האיזנטרופית ליחס לחצים של 10 מ־300 K?

579.2 K.

3. האם S_gen יכול להיות שלילי?

לא; תהליך כזה אינו אפשרי.

4. מה מייצג השטח מתחת לעקומת T–s הפיכה?

החום שהועבר.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: אנטרופיה לעולם אינה יכולה לרדת.
בפועל: האנטרופיה של מערכת יכולה לרדת אם היא פולטת חום; הסך הכולל של מערכת מבודדת אינו יכול.

מיתוס: אדיאבטי פירושו איזנטרופי.
בפועל: רק אם הוא גם הפיך.

מיתוס: נצילות איזנטרופית יכולה לעלות על 1.
בפועל: לא בטורבינות או במדחסים.

כרטיסיות

אנטרופיה

$dS = \delta Q_{rev}/T$.

S_gen

≥ 0.

Δs של נוזל

$c \ln(T_2/T_1)$.

Δs של גז אידאלי

$c_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(p_2/p_1)$.

T איזנטרופית

$T_2/T_1 = (p_2/p_1)^((k-1)/k)$.

η_T

$(h_1 - h_2a)/(h_1 - h_2s)$.

בוחן לבדיקה עצמית

1. S_gen בתהליך הפיך הוא…

חיובי

אפס

שלילי

אינסופית

אפס. אין אי־הפיכות.

2. תהליך איזנטרופי בדיאגרמת T–s הוא…

אופקי

אנכי

אלכסוני

מעגלי

אנכי. s קבוע.

3. Δs של נוזל מחומם הוא…

$c \ln(T_2/T_1)$

$c\Delta T$

$R \ln(p_2/p_1)$

0

$c \ln(T_2/T_1)$. בלתי דחיס.

4. הנצילות האיזנטרופית של מדחס היא…

$(h_2s - h_1)/(h_2a - h_1)$

$(h_2a - h_1)/(h_2s - h_1)$

h_2/h_1

1

$(h_2a - h_1)/(h_2s - h_1)$. עבודה אידאלית חלקי עבודה אמיתית.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

הדף של NASA Glenn על מחזור בריטון מציג טורבינת גז בדיאגרמת T–s: באופן אידאלי המדחס מעלה לחץ וטמפרטורה באופן איזנטרופי, בקו אנכי, אך במציאות קו הדחיסה נוטה ימינה כי האנטרופיה עולה בזרימה. הבעירה מתרחשת בלחץ קבוע, והטורבינה, על אותו ציר, מניעה את המדחס.

NASA מציינת שהשטח הכלוא בדיאגרמת T–s פרופורציוני לעבודה השימושית. כל פירור אנטרופיה שנוצר במדחס או בטורבינה מקטין את השטח הזה, ולכן נצילויות איזנטרופיות גבוהות יותר פירושן יותר חשמל או דחף מאותו דלק, ופחות CO_2.

ב־Saving Planets: אווירודינמיקה 1 · חשבון אינפיניטסימלי 3

מקורות: NASA Glenn: Turbine engine thermodynamic cycle (Brayton cycle) (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/brayton.html)

מקורות לימוד חינמיים

- OpenStax UP2, 4.6 Entropy (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-6-entropy): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax UP2, 4.7 Entropy on a microscopic scale (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-7-entropy-on-a-microscopic-scale): פרק מספר לימוד חינמי.
- NASA Glenn: Entropy (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/entropy.html): דף חינמי של NASA.
- OpenStax UP2, 3.6 Adiabatic processes for an ideal gas (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-6-adiabatic-processes-for-an-ideal-gas): פרק מספר לימוד חינמי.

☐ **סיימתי את היחידה הזו**

אקסרגיה: כמה מהאנרגיה שימושית

מצב מת וסביבה, אקסרגיה (זמינות) של חום ושל זרמים, עבודה הפיכה ואי־הפיכות, הרס אקסרגיה $I = T_0 S_{gen}$, נצילות לפי החוק השני, ומדוע חשוב להתאים את איכות האנרגיה לשימוש.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לחשב את האקסרגיה של חום ממאגר.
- לקשר בין אקסרגיה שנהרסה לאנטרופיה שנוצרה.
- לחשב נצילות לפי החוק השני.
- להסביר מדוע ייצור משולב ומשאבות חום מנצלים היטב אקסרגיה.

מושגי מפתח

- אקסרגיה היא העבודה השימושית המרבית שאפשר להפיק בזמן שמערכת מגיעה לשיווי משקל עם סביבתה (המצב המת, T_0 ו־p_0). אנרגיה נשמרת; אקסרגיה נהרסת על ידי אי־הפיכות.
- לחום Q ממאגר ב־T יש אקסרגיה $X = Q(1 - T_0/T)$: חום בטמפרטורה גבוהה הוא בעל ערך, וחום קרוב לטמפרטורת החדר כמעט חסר ערך להפקת עבודה.
- אקסרגיה של זרם ליחידת מסה: $\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + V^2/2 + gz$.
- אקסרגיה שנהרסה (אי־הפיכות) $I = T_0 S_{gen}$ (גוי–סטודולה). כל אי־הפיכות עולה בעבודה שימושית.
- נצילות לפי החוק השני $\eta_{II} = \eta_{th}/\eta_{rev}$ למנועים, או COP/COP_rev למשאבות חום. שריפת דלק ב־2000 K רק כדי לחמם מים ל־60 °C מבזבזת את רוב האקסרגיה; שימוש לשם כך בחום השיורי של תחנת כוח אינו מבזבז.

משוואות מפתח

$$X_Q = Q\left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$$

```
X_Q=Q(1-(T_0)/(T))
```

אקסרגיה של חום

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz$$

```
=(h-h_0)-T_0(s-s_0)+(V^2)/(2)+gz
```

אקסרגיית זרימה

$$I = T_0 S_{gen}$$

```
I=T_0S_gen
```

אקסרגיה שנהרסה

$$\eta_{II} = \frac{\eta_{th}}{\eta_{rev}}$$

_II=_th_rev

נצילות לפי החוק השני

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 8.1 מצאו את האקסרגיה של 100 kJ חום ממקור ב־600 K עם T_0 = 300 K.

1. X = 100 × (1 − 300/600).

תשובה: 50 kJ.

דוגמה 8.2 1000 kJ זורמים מ־800 K ל־(T_0 = 300 K) 300 K. מצאו את האקסרגיה שנהרסה.

1. S_gen = 1000/300 − 1000/800 = 2.083 kJ/K.
2. I = 300 × 2.083.

תשובה: I = 625 kJ, כל האקסרגיה שהייתה לחום ב־800 K.

דוגמה 8.3 מנוע עם η = 35% פועל בין 800 K ל־300 K. מצאו את η_II.

1. η_rev = 62.5%.
2. η_II = 0.35/0.625.

תשובה: η_II = 56%.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מהי האקסרגיה של 100 kJ ב־330 K עם T_0 = 300 K?

   100 × (1 − 300/330) = 9.09 kJ.

2. למשאבת חום COP של 3; COP_rev = 14. מהו η_II?

   3/14 = 21.4%.

3. מדוע חום בטמפרטורת החדר כמעט חסר ערך להפקת עבודה?

מקדם האקסרגיה שלו $T_0/T - 1$ קרוב לאפס.

4. מה הורס אקסרגיה?

כל אי־הפיכות: חיכוך, ערבול, העברת חום על פני ΔT סופי.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: אנרגיה ואקסרגיה הן אותו דבר.

בפועל: אנרגיה נשמרת; אקסרגיה נהרסת.

מיתוס: נצילות גבוהה לפי החוק הראשון פירושה תהליך טוב.

בפועל: לדוד גז בנצילות 95% יכולה להיות נצילות נמוכה לפי החוק השני.

מיתוס: אקסרגיה תלויה רק במערכת.

בפועל: היא תלויה גם בסביבה (T_0, p_0).

כרטיסיות

אקסרגיה

עבודה שימושית מרבית.

אקסרגיה של חום

$Q(1 - T_0/T)$.

מצב מת

T_0, p_0.

אי־הפיכות

$I = T_0 S_{gen}$.

η_{II}

η/η_{rev}.

איכות אנרגיה

T גבוהה היא בעלת ערך.

בוחן לבדיקה עצמית

1. אקסרגיה שנהרסה שווה ל…

$T_0 S_{gen}$

Q

W

ΔU

$T_0 S_{gen}$. גוי–סטודולה.

2. האקסרגיה של חום ב־T_0 = T היא…

Q

אפס

אינסופית

Q/2

אפס. $1 - T_0/T = 0$.

3. η_{II} משווה ביצועים בפועל ל…

הגבול ההפיך

אפס

100%

החוק הראשון

הגבול ההפיך. נצילות לפי החוק השני.

4. המצב המת הוא…

שיווי משקל עם הסביבה

האפס המוחלט

הנקודה הקריטית

ריק

שיווי משקל עם הסביבה. T_0, p_0.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

משרד האנרגיה של ארה"ב מסביר שייצור משולב של חום וחשמל מפיק חשמל וחימום או קירור שימושיים מדלק יחיד במקום השימוש או בסמוך לו, ומנצל חום שאחרת היה הולך לאיבוד בייצור החשמל. לדברי משרד האנרגיה, ייצור משולב יכול לפעול באופן סביר בנצילות של 65% עד 75%, לעומת ממוצע לאומי של כ־50% כשחשמל וחום מיוצרים בנפרד.

האקסרגיה מסבירה את הרווח: החלק בטמפרטורה הגבוהה של אקסרגיית הדלק מייצר חשמל, והחום באיכות נמוכה שתחנת כוח הייתה משליכה עונה על צורכי חימום שמעולם לא דרשו יותר מאנרגיה בעלת אקסרגיה נמוכה. מעבר מ־50% ל־75% פירושו אותם שירותים בשני שלישים מהדלק.

ב־Saving Planets: פתרונות · מזג אוויר בחלל

מקורות: U.S. DOE: Combined heat and power basics (https://www.energy.gov/eere/amo/combined-heat-and-power-basics)

מקורות לימוד חינמיים

- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): הרצאות על זמינות.
- OpenStax UP2, 4.1 Reversible and irreversible processes (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-1-reversible-and-irreversible-processes): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax UP2, 4.4 Statements of the second law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-4-statements-of-the-second-law-of-thermodynamics): פרק מספר לימוד חינמי.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): רשימות על החוק השני.

סיימתי את היחידה הזו

מחזורי כוח גזיים: אוטו, דיזל ובריטון

הנחות אוויר תקני, לחץ אפקטיבי ממוצע, מחזור אוטו (הצתת ניצוץ), מחזור דיזל (הצתת דחיסה), מחזור בריטון לטורבינות גז ולמנועי סילון, יחס עבודה חוזרת, רגנרציה, קירור ביניים וחימום חוזר, ומחזורים משולבים.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לנתח מחזורי אוטו ודיזל אידאליים.
- לנתח את מחזור בריטון האידאלי, כולל יחס העבודה החוזרת.
- להסביר כיצד יחס הדחיסה ויחס הלחצים מעלים את הנצילות.
- לתאר רגנרציה ומחזורים משולבים.

מושגי מפתח

- הנחות אוויר תקני: זורם העבודה הוא אוויר, גז אידאלי, במחזור סגור; הבעירה מוחלפת בהוספת חום והפליטה בדחיית חום. אוויר תקני קר מוסיף חום סגולי קבוע בטמפרטורת החדר.
- מחזור אוטו: דחיסה איזנטרופית, הוספת חום בנפח קבוע, התפשטות איזנטרופית, דחיית חום בנפח קבוע. η_Otto = 1 − 1/r^(k−1), עם יחס דחיסה r = V_max/V_min.
- מחזור דיזל: החום מוסף בלחץ קבוע; עם יחס ניתוק r_c, η_Diesel = 1 − (1/r^(k−1))·((r_c^k − 1)/(k(r_c − 1))). מנועי דיזל פועלים ב־r גבוה יותר, ולכן הם יעילים יותר בפועל.
- מחזור בריטון (טורבינות גז): דחיסה איזנטרופית, הוספת חום בלחץ קבוע, התפשטות איזנטרופית, דחיית חום בלחץ קבוע. η_Brayton = 1 − 1/r_p^((k−1)/k). חלק גדול מעבודת הטורבינה מניע את המדחס (יחס העבודה החוזרת).
- רגנרציה משתמשת בפליטה החמה כדי לחמם מראש את האוויר הדחוס; קירור ביניים וחימום חוזר מקרבים את המחזור לקרנו. מחזור משולב מזין את פליטת טורבינת הגז למחזור קיטור (רנקין).

משוואות מפתח

$$\eta_{Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

```
_Otto=1-1r^k-1
```

מחזור אוטו

$$\eta_{Diesel} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)}$$

```
_Diesel=1-1r^k-1(r_c^k-1)/(k(r_c-1))
```

מחזור דיזל

$$\eta_{Brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}}$$

_Brayton=1-1r_p^(k-1)/k

מחזור בריטון

$$r_{bw} = \frac{w_{comp}}{w_{turb}}$$

r_bw=_compw_turb

יחס עבודה חוזרת

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 9.1 מצאו את נצילות האוויר התקני הקר של מחזורי אוטו עם r = 8 ו־r = 10.

1. 1 − 8^(−0.4).
2. 1 − 10^(−0.4).

תשובה: 56.5% ו־60.2%.

דוגמה 9.2 למחזור דיזל r = 18 ו־r_c = 2. מצאו את η.

1. 1/r^0.4 = 0.3147.
2. (1 × 1.4)/(2^1.4 − 1) = 1.1703.
3. η = 1 − 0.3147 × 1.1703.

תשובה: η = 63.2%.

דוגמה 9.3 למחזור בריטון אידאלי r_p = 8, כניסה ב־300 K וכניסה לטורבינה ב־1300 K. מצאו את T_2, T_4, עבודת המדחס והטורבינה, יחס העבודה החוזרת, העבודה הנקייה ו־η.

1. T_2 = 300 × 8^0.2857 = 543.4 K; T_4 = 1300/1.8114 = 717.7 K.
2. w_c = 1.005 × 243.4 = 244.7 kJ/kg; w_t = 1.005 × 582.3 = 585.3 kJ/kg.
3. η = 1 − 8^(−0.2857); w_net = 340.6 kJ/kg; r_bw = 244.7/585.3.

תשובה: r_bw = 0.418, w_net = 340.6 kJ/kg, η = 44.8%.

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. מהי נצילות בריטון ב־r_p = 12?

50.8% = (0.2857−)^12 − 1.

2. מדוע מנועי דיזל יעילים יותר ממנועי בנזין בפועל?

הם פועלים ביחסי דחיסה גבוהים בהרבה.

3. העלאת r במחזור אוטו מ־8 ל־10 מוסיפה כמה נקודות?

60.2 − 56.5 = 3.7 נקודות.

4. מה עושה רגנרציה?

משתמשת בחום הפליטה כדי לחמם מראש את אוויר המדחס, וכך מקטינה את הדלק הנדרש.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: דחיסה גבוהה יותר פירושה תמיד מנועים אמיתיים יעילים יותר.

בפועל: נקישה מגבילה מנועי הצתת ניצוץ.

מיתוס: העבודה החוזרת זניחה בטורבינות גז.

בפועל: לעיתים קרובות 40–80% מעבודת הטורבינה.

מיתוס: נצילות האוויר התקני היא הנצילות האמיתית.

בפועל: מנועים אמיתיים נמוכים בהרבה בגלל חיכוך, איבוד חום וגזים אמיתיים.

כרטיסיות

אוויר תקני

אוויר, גז אידאלי, מחזור סגור.

אוטו

1 − 1/r^(k−1).

דיזל

הוספת חום ב־p קבוע.

בריטון

1 − 1/r_p^((k−1)/k).

עבודה חוזרת

w_c/w_t.

רגנרציה

הפליטה מחממת מראש את האוויר.

בוחן לבדיקה עצמית

1. נצילות אוטו תלויה ב…

יחס הדחיסה

סוג הדלק בלבד

גודל המהירות

יחס הניתוק

יחס הדחיסה. (1−k)^1/r − 1.

2. בבריטון החום מוסף בערך קבוע של…

נפח

לחץ

טמפרטורה

אנטרופיה

לחץ. תא הבעירה.

3. יחס העבודה החוזרת הוא…

w_c/w_t

w_t/w_c

η

r_p

w_c/w_t. מדחס חלקי טורבינה.

4. מחזור משולב מצמיד את בריטון ל…

אוטו

רנקין

דיזל

קרנו

רנקין. מחזור קיטור תחתון.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

NASA Glenn מסבירה שמחזור בריטון משמש בכל מנועי טורבינת הגז, בין שהם טורבו־סילון, טורבו־מניפה או טורבו־מדחף, ושלכולם יש מדחס, תא בעירה וטורבינה המניעה את המדחס. תוכנת EngineSim של NASA משתמשת בניתוח מחזור בריטון כדי לחזות את הדחף ואת ספיקת הדלק של מנוע.

טורבינות גז יבשתיות פועלות באותו מחזור. דוגמאות קצב החום של ה־EIA מראות מדוע תכנון המחזור חשוב: 7500 Btu/kWh הם נצילות של כ־45% לעומת כ־33% ב־10500 Btu/kWh. העלאת יחס הלחצים וטמפרטורת הכניסה לטורבינה, וניצול חום הפליטה, הם הדרכים שבהן תחנות מתקרבות למספר הטוב יותר.

ב־Saving Planets: אווירודינמיקה 1 · מבוא להנדסת אווירונאוטיקה וחלל

מקורות: · NASA Glenn: Turbine engine thermodynamic cycle (Brayton cycle) (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/brayton.html)
U.S. EIA: What is the efficiency of different types of power plants? (https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=107&t=3)

מקורות לימוד חינמיים

- NASA Glenn: Brayton cycle (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/brayton.html): דף חינמי של NASA.
- NASA Glenn: Otto cycle (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/otto.html): דף חינמי של NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (/https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002): הרצאות על מחזורים.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): רשימות על מחזורי הנעה.

סיימתי את היחידה הזו

מחזורי כוח קיטור ומחזורי קירור

מחזור רנקין האידאלי וארבעת התקניו, עבודת המשאבה, הגדלת הנצילות (לחץ וטמפרטורה גבוהים יותר בדוד, לחץ נמוך יותר במעבה, חימום חוזר, רגנרציה), מחזור הקירור בדחיסת אדים ומשאבות חום, נוזלי קירור וייצור משולב.

מטרות הלמידה

בסוף היחידה הזו תוכלו:

- לנתח מחזור רנקין אידאלי בעזרת טבלאות קיטור.
- להסביר כיצד לחץ, חימום־על וחימום חוזר משנים את הנצילות.
- לנתח מחזור קירור אידאלי בדחיסת אדים.
- לקשר את ה־COP של המחזור לביצועי משאבת חום.

מושגי מפתח

- מחזור רנקין אידאלי: משאבה (דחיסה איזנטרופית של נוזל), דוד (חימום בלחץ קבוע עד קיטור מחומם־על), טורבינה (התפשטות איזנטרופית), מעבה (עיבוי בלחץ קבוע).
- עבודת המשאבה קטנה כי לנוזל יש v קטן: $w_p \approx v(p_2 - p_1)$. עבודה נקייה $w_{net} = w_{turb} - w_{pump}$; $\eta = w_{net}/q_{in}$.
- הנצילות עולה עם טמפרטורה ממוצעת גבוהה יותר של הוספת החום (לחץ דוד גבוה יותר, יותר חימום־על, חימום חוזר) ועם לחץ מעבה נמוך יותר. רגנרציה עם מחממי מי הזנה מחממת מראש את המים בקיטור הנלקח מהטורבינה.
- קירור בדחיסת אדים: מדחס (עד אדים מחוממים־על), מעבה (פולט Q_H), שסתום התפשטות (מצערת, $h_3 = h_4$), מאייד (בולע Q_L). $COP_R = (h_1 - h_4)/(h_2 - h_1)$.
- משאבת חום היא אותו מחזור המשמש לחימום, עם $COP_{HP} = (h_2 - h_3)/(h_2 - h_1)$. נוזלי קירור נבחרים לפי תכונות הרוויה שלהם, בטיחותם ופוטנציאל ההתחממות הגלובלית הנמוך שלהם.

משוואות מפתח

$$w_p = v(p_2 - p_1)$$

`w_p=v(p_2-p_1)`

עבודת משאבה

$$\eta = \frac{w_t - w_p}{q_{in}}$$

`=_t-w_pq_in`

נצילות רנקין

$$COP_R = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

`COP_R=(h_1-h_4)/(h_2-h_1)`

$$h_3 = h_4$$

h_3=h_4

שסתום התפשטות

דוגמאות פתורות שלב אחר שלב

דוגמה 10.1 מחזור רנקין אידאלי פועל בין 3 MPa/350 °C ל־75 kPa. טבלאות קיטור: $h_1 = 384.44$, $v_1 = 0.001037\ m^3/kg$, $h_3 = 3116.1$, $h_4 = 2403.0\ kJ/kg$. מצאו את w_p, q_{in}, w_{net} ו־η.

1. $w_p = 0.001037 \times (3000 - 75) = 3.03\ kJ/kg$; $h_2 = 387.47$.
2. $q_{in} = 3116.1 - 387.47 = 2728.6\ kJ/kg$.
3. $w_{net} = (3116.1 - 2403.0) - 3.03 = 710.1\ kJ/kg$; $\eta = 710.1/2728.6$.

תשובה: $w_p = 3.03\ kJ/kg$, $q_{in} = 2728.6\ kJ/kg$, $w_{net} = 710.1\ kJ/kg$, $\eta = 26.0\%$.

דוגמה 10.2 למחזור דחיסת אדים $h_1 = 244.5$, $h_2 = 275.4$ ו־$h_3 = h_4 = 95.5\ kJ/kg$ (ערכים לדוגמה). מצאו את q_L, w_{in} ו־COP_R.

1. $q_L = 244.5 - 95.5 = 149.0\ kJ/kg$.
2. $w = 275.4 - 244.5 = 30.9\ kJ/kg$.
3. $COP = 149.0/30.9$.

תשובה: $q_L = 149.0\ kJ/kg$, $w = 30.9\ kJ/kg$, $COP_R = 4.82$.

דוגמה 10.3 לאותו מחזור כמשאבת חום, מצאו את COP_{HP}.

1. $q_H = 275.4 - 95.5 = 179.9\ kJ/kg$.
2. $COP_{HP} = 179.9/30.9$.

תשובה: $COP_{HP} = 5.82$ (= $COP_R + 1$).

תרגילים

פתרו כל אחד קודם על נייר, ואז בדקו.

1. בדוגמת רנקין, מהו החום הנפלט?

.2403.0 − 384.44 = 2018.6 kJ/kg

2. איזה חלק מעבודת הטורבינה צורכת המשאבה?

.3.03/713.1 = 0.425%

3. מצאו את ספיקת הקיטור עבור 100 MW נטו בדוגמה.

.100,000/710.1 = 140.8 kg/s

4. מדוע הורדת לחץ המעבה עוזרת?

היא מורידה את טמפרטורת דחיית החום.

תפיסות שגויות נפוצות

מיתוס: עבודת המשאבה במחזור רנקין גדולה.

בפועל: היא זעירה כי הנוזל כמעט בלתי דחיס.

מיתוס: שסתום ההתפשטות מבצע עבודה.

בפועל: זו מצערת: h קבוע, אין עבודה.

מיתוס: יותר חימום־על תמיד עוזר, ללא גבול.

בפועל: חומרי הטורבינה מגבילים את הטמפרטורה.

כרטיסיות

רנקין

משאבה, דוד, טורבינה, מעבה.

עבודת משאבה

$v(p_2 - p_1)$.

חימום חוזר

מעלה את T הממוצעת של הוספת החום, פליטה יבשה יותר.

דחיסת אדים

מדחס, מעבה, שסתום, מאייד.

COP_R

$(h_1 - h_4)/(h_2 - h_1)$.

מצערת

$h_3 = h_4$.

בוחן לבדיקה עצמית

1. במחזור רנקין החום מוסף ב…

משאבה

דוד

טורבינה

מעבה

דוד. לחץ קבוע.

2. עבודת המשאבה היא בערך…

$v\,\Delta p$

$c_p \Delta T$

h_{fg}

אפס בדיוק

$\Delta p\, v$. נוזל בלתי דחיס.

3. בקירור, Q_L נבלע ב…

מעבה

מאייד

מדחס

שסתום

מאייד. הצד הקר.

4. COP_{HP} פחות COP_R הוא…

0

1

η

2

1. $q_H = q_L + w$.

לנסות שוב את הבוחן

איך זה עוזר להציל את כדור הארץ

משרד הגאותרמיה של משרד האנרגיה של ארה"ב מסביר שתחנות גאותרמיות מעלות זורם חם דרך בארות וממירות את חומו לקיטור המניע טורבינות, מחזור ממשפחת רנקין שבו כדור הארץ הוא הדוד. תחנות גאותרמיות יכולות לפעול למעשה 24 שעות ביממה בלי תלות במזג האוויר, וניתוח משרד האנרגיה רואה פוטנציאל ל־90 ג'יגה־וואט של חשמל גאותרמי בארה"ב עד 2050 אם עלויות הגאותרמיה המשופרת ירדו.

תחנות גרעיניות משתמשות באותו מחזור רנקין, והמאמר של משרד האנרגיה על משאבות חום מתאר את מחזור דחיסת האדים בכיוון ההפוך: הכנסת חום לבתים בחורף והוצאתו בקיץ. ממחזורי רנקין וקירור טובים יותר יגיע חלק גדול מהחשמל הנקי ומהחימום היעיל של העולם.

ב־Saving Planets: פתרונות · תצפית על כדור הארץ

מקורות: U.S. DOE: Geothermal basics (https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics) · U.S. DOE: Nuclear 101: How does a nuclear reactor work? (May 2025) (https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-101-how-does-nuclear-reactor-work) · U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps)

מקורות לימוד חינמיים

- NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/): טבלאות קיטור ונוזלי קירור.
- OpenStax UP2, 4.3 Refrigerators and heat pumps (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-3-refrigerators-and-heat-pumps): פרק מספר לימוד חינמי.
- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): הרצאות על מחזורי קיטור.
- NASA Glenn: Second law of thermodynamics (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/thermo2.html): דף חינמי של NASA.

סיימתי את היחידה הזו

תרגילים

התרגילים האלה נמצאים בתוך כל יחידה. פתרו על הנייר, ואז פתחו את התשובה.

1. מערכות, תכונות, אנרגיה ונצילות
   4 תרגילים
2. חומרים טהורים, מעבר פאזה וטבלאות תכונות
   4 תרגילים
3. העברת אנרגיה בעבודה ובחום
   4 תרגילים

4. החוק הראשון למערכות סגורות
   4 תרגילים
5. החוק הראשון לנפחי בקרה: התקני זרימה יציבה
   4 תרגילים
6. החוק השני: מנועי חום, מקררים וגבולות קרנו
   4 תרגילים
7. אנטרופיה ונצילות איזנטרופית
   4 תרגילים
8. אקסרגיה: כמה מהאנרגיה שימושית
   4 תרגילים
9. מחזורי כוח גזיים: אוטו, דיזל ובריטון
   4 תרגילים
10. מחזורי כוח קיטור ומחזורי קירור
    4 תרגילים

המעבדה (Thermodynamics lab)

המעבדה היא החלק המעשי של הקורס. כאן היא חינמית ולתרגול בלבד, ללא נקודות זכות.

כל מעבדה אפשר לבצע בסימולציה חינמית או בעזרת כלי מטבח. מים חמים וקיטור גורמים לכוויות: השתמשו בכפפות תנור, הניחו את הקומקום על משטח יציב, מזגו הרחק מעצמכם והרחיקו ילדים וחיות מחמד. לעולם אל תחממו כלי סגור.

מקור בטיחות: NFPA: Burn awareness information (https://www.nfpa.org/education-and-research/home-fire-safety/burns)

מעבדה A: חוק הגז האידאלי ב־PhET Gas Properties

שבוע 2

מטרה: להראות שהלחץ פרופורציוני לטמפרטורה המוחלטת בנפח ובכמות קבועים, ושה־pV/T נשאר קבוע.

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (V,\ m \text{ fixed})$$

```
(p_1)/(T_1)=(p_2)/(T_2)\ \ (V,\ m\ fixed)
```

חוק הגז האידאלי בנפח קבוע

מהלך הניסוי

1. פתחו את PhET Gas Properties, לשונית Ideal; הזרימו גז והחזיקו את הנפח קבוע.
2. חממו את הגז בשלבים ורשמו את T ואת p.
3. שרטטו את p כפונקציה של T בקלוויין; האריכו את הקו עד p = 0.
4. חזרו על כך בלחץ קבוע ורשמו את הנפח.

טבלת נתונים

T (K)	p (kPa), החל מ־100 kPa ב־300 K
300	100
400	133.3
600	200

ערכי גז אידאלי; המספרים בסימולטור משתנים מעט כי הוא סופר התנגשויות של חלקיקים.

חישוב לדוגמה

1. $p_2 = 100 \times 400/300 = 133.3$ kPa.
2. הקו העובר דרך הנתונים חוצה את p = 0 ב־T = 0 K.

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- Gas Properties פועל בדפדפן.

PhET: Gas Properties (https://phet.colorado.edu/en/simulations/gas-properties) · PhET: States of Matter (https://phet.colorado.edu/en/simulations/states-of-matter)

הקשר לכדור הארץ: משרד האנרגיה של ארה"ב מציין שמתכנני כורים מעמידים את המים בלחץ כדי שלא ירתחו; אותם יחסי מצב קובעים את תכנון כל דוד וכל מכל. (https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-101-how-does-nuclear-reactor-work) U.S. DOE: Nuclear 101: How does a nuclear reactor work? (May 2025)

☐ **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

מעבדה B: מאזן אנרגיה ונצילות של קומקום

שבוע 5

מטרה: ליישם את החוק הראשון על חימום מים ולמצוא כמה מהאנרגיה החשמלית של קומקום מגיעה למים.

$$\eta = \frac{mc\Delta T}{P\,t}$$

```
=(mcΔ T)/(P t)
```

נצילות הקומקום

מהלך הניסוי

1. שקלו 1.00 kg (1 L) מי ברז ומדדו את הטמפרטורה שלהם.
2. קראו את ההספק של הקומקום מהתווית.
3. מדדו כמה זמן לוקח להגיע לרתיחה (הקומקום נכבה).
4. חשבו את החום שנבלע ואת האנרגיה החשמלית שנצרכה.

טבלת נתונים

גודל	ערך
חום המים, 1 kg 20→100 °C (kJ)	334.4
אנרגיה חשמלית, 1500 W × 250 s (kJ)	375.0
נצילות	89.2%

ערכים לדוגמה; הזמן של הקומקום שלכם תלוי בהספקו, בטמפרטורת ההתחלה של המים ובגובה שבו אתם נמצאים.

חישוב לדוגמה

1. $Q = 1 \times 4.18 \times 80 = 334.4$ kJ.
2. $\eta = 334.4/375 = 89.2\%$.

בטיחות

- קיטור ומים רותחים גורמים לכוויות: השאירו את המכסה סגור, מזגו הרחק מעצמכם והרחיקו ילדים וחיות מחמד.
- אל תגעו בגוף הקומקום כשהוא חם.

חלופה ביתית או וירטואלית

- זוהי מעבדה ביתית.

PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes)

הקשר לכדור הארץ: משרד האנרגיה מציין שחימום בנגד הופך 1 kWh ל־1 kWh של חום, בעוד שמשאבות חום מקצצות את צריכת החשמל בכ־50%. U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps)

- [ ] **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

מעבדה C: התכת קרח וחום כמוס

שבוע 5

מטרה: להשתמש במאזן חום כדי לחזות את הטמפרטורה הסופית כשקרח נמס במים פושרים, ולהשוות למדידה.

$$m_w c(T_w - T_f) = m_i h_{if} + m_i c T_f$$

```
m_wc(T_w-T_f)=m_i h_if+m_ic T_f
```

חום שהמים מאבדים = חום שהקרח מקבל

מהלך הניסוי

1. שימו 300 g מים ב־40 °C בכוס מבודדת.
2. הוסיפו 50 g קרח ב־0 °C (ייבשו אותו).
3. ערבבו בעדינות עד שכל הקרח נמס ורשמו את הטמפרטורה הנמוכה ביותר.
4. השוו לטמפרטורה הסופית החזויה.

טבלת נתונים

גודל	ערך
מים	0.300 kg ב־40 °C
Ice	0.050 kg ב־0 °C
T סופית חזויה	22.9 °C

ערכים לדוגמה; חום שמתקבל מהכוס ומהאוויר הופך את הערך הנמדד לגבוה מעט יותר.

חישוב לדוגמה

1. $0.3 \times 4.18 \times (40 - T) = 0.05 \times 334 + 0.05 \times 4.18 \times T$.
2. $T = 33.46 / 1.463 = 22.9\ °C$.

בטיחות

- השתמשו במי ברז חמים, לא רותחים.

חלופה ביתית או וירטואלית

- זוהי מעבדה ביתית.

PhET: States of Matter (https://phet.colorado.edu/en/simulations/states-of-matter) · PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes)

הקשר לכדור הארץ: חום כמוס הוא העיקרון של אגירה תרמית; משרד האנרגיה מציין שאנרגיה גאותרמית יכולה לתמוך גם באגירת אנרגיה תרמית. U.S. DOE: Geothermal basics (https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics)

- [ ] **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

מעבדה D: בידוד וקצב התקררות

שבוע 4

מטרה: להשוות כמה מהר מתקררים מים חמים בספל רגיל ובספל מבודד, ולמצוא את קבוע ההתקררות של כל אחד.

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = e^{-kt}$$

`(T-T_∞)/(T_0-T_∞)=e^-kt`

חוק הקירור של ניוטון

מהלך הניסוי

1. מלאו שני ספלים, אחד רגיל ואחד מבודד (או עטוף במגבת), במים בכ־80 °C.
2. רשמו את הטמפרטורה כל 2 דקות במשך 20 דקות; רשמו את טמפרטורת החדר.
3. חשבו $k = \ln[(T_0 - T_\infty)/(T - T_\infty)]/t$ לכל אחד.
4. השוו את קצבי איבוד החום.

טבלת נתונים

Mug	T אחרי 20 min (°C)	k (1/min)
רגיל	60	0.0203
מבודד	70	0.00912

ערכים לדוגמה כשהחדר ב־20 °C.

חישוב לדוגמה

1. רגיל: $k = \ln(60/40)/20 = 0.0203$ לדקה.
2. מבודד: $k = \ln(60/50)/20 = 0.00912$ לדקה, פחות ממחצית.

בטיחות

- מים חמים גורמים לכוויות: השתמשו בכפפות תנור והשאירו את הספלים על משטח יציב הרחק מהקצוות.

חלופה ביתית או וירטואלית

- זוהי מעבדה ביתית.

PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes)

הקשר לכדור הארץ: משרד האנרגיה ממליץ לבודד את הבית לפני התקנת משאבת חום, כי בידוד מקטין את החום שהבית צריך להשלים. U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps)

- [ ] השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)

מעבדה E: גבולות קרנו למשאבת חום

שבוע 8

מטרה: לבנות גיליון אלקטרוני של COP קרנו של משאבת חום כפונקציה של הטמפרטורה בחוץ ולהשוות ל־COP הנקוב של יחידה אמיתית.

$$COP_{HP,Carnot} = \frac{T_H}{T_H - T_L}$$

`COP_HP,Carnot=(T_H)/(T_H-T_L)`

משאבת חום של קרנו

מהלך הניסוי

1. קבעו טמפרטורה פנימית T_H = 294 K.
2. רשמו טמפרטורות חוץ מ־253 K עד 288 K.
3. חשבו את COP קרנו לכל אחת.
4. חפשו את הנצילות הנקובה של משאבת חום כלשהי בתווית שלה או ברישום ENERGY STAR והשוו.

טבלת נתונים

T_L (K)	COP_Carnot
263	9.48
273	14.0
283	26.7

גבולות אידאליים; משאבות חום אמיתיות מגיעות לחלק מהם.

חישוב לדוגמה

1. COP = 294/(294 − 263) = 9.48.
2. אוויר חוץ קר יותר פירושו גבול נמוך יותר.

בטיחות

- מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

OpenStax UP2, 4.3 Refrigerators and heat pumps (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-3-refrigerator-and-heat-pumps)

הקשר לכדור הארץ: משרד האנרגיה של ארה"ב מציין שמשאבות חום גאותרמיות, המנצלות את הטמפרטורה היציבה של הקרקע, יכולות להפחית את צריכת האנרגיה ב־30% עד 60%. U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps)

- [ ] **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

מעבדה F: גיליון אלקטרוני של מחזור רנקין

שבוע 15

מטרה: לחשב מחזור רנקין אידאלי מערכי טבלאות קיטור ולראות כיצד איברי הטורבינה, המשאבה והדוד קובעים את הנצילות.

$$\eta = \frac{(h_3 - h_4) - v_1(p_2 - p_1)}{h_3 - h_2}$$

```
=((h_3-h_4)-v_1(p_2-p_1))/(h_3-h_2)
```

נצילות רנקין אידאלית

מהלך הניסוי

1. חפשו את ארבעת המצבים ב־WebBook של NIST (או השתמשו בערכים הנתונים).
2. חשבו את עבודת המשאבה, החום הנכנס, עבודת הטורבינה, העבודה הנקייה ו־η.
3. שנו את לחץ המעבה או את טמפרטורת הדוד בעזרת ערכי טבלה חדשים וחשבו מחדש.
4. מצאו את ספיקת הקיטור לתחנה של 100 MW.

טבלת נתונים

גודל	ערך
w_pump (kJ/kg)	3.03
q_in (kJ/kg)	2728.6
w_net (kJ/kg)	710.1
η	26.0%

ערכי טבלאות קיטור ל־3 MPa/350 °C ול־75 kPa.

חישוב לדוגמה

1. η = 710.1/2728.6 = 26.0%.
2. ספיקת קיטור ל־100 MW = 100000/710.1 = 140.8 kg/s.

> **בטיחות**
>
> - מחשב בלבד.

חלופה ביתית או וירטואלית

- כל גיליון אלקטרוני מתאים.

NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/)

הקשר לכדור הארץ: משרד האנרגיה מציין שתחנות גרעיניות וגאותרמיות הופכות שתיהן חום לקיטור המסובב טורבינות, המחזור של מעבדה זו. U.S. DOE: Nuclear 101: How does a nuclear reactor work? (May 2025) (https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-101-how-does-nuclear-reactor-work) · U.S. DOE: Geothermal basics (https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics)

☐ **השלמתי את המעבדה הזו (רטובה או וירטואלית)**

מערכי תרגול למבחן

מדדו זמן: כ־10 דקות לבעיה. אחר כך השוו לפתרונות המלאים.

סט תרגול לבחינת אמצע (יחידות 5–1)

1. לתחנה קצב חום של 8530 Btu/kWh. מצאו את הנצילות שלה.

   1. 3412/8530.

   תשובה: 40.0%.

2. מצאו את מסת האוויר במכל של 2 m³ ב־200 kPa וב־350 K.

   1. $m = 200 \times 2/(0.287 \times 350)$.

   תשובה: 3.98 kg.

3. מצאו את h ב־100 kPa ובאיכות 0.9 ($h_f = 417.51$, $h_{fg} = 2257.5$ kJ/kg).

   1. $417.51 + 0.9 \times 2257.5$.

   תשובה: 2449.3 kJ/kg.

4. 3 kg מים מחוממים מ־15 °C ל־65 °C. מצאו את Q.

   1. $3 \times 4.18 \times 50$.

   תשובה: 627 kJ.

5. קיטור ב־10 kg/s מאבד 800 kJ/kg בטורבינה אדיאבטית. מצאו את ההספק.

   1. 10×800.

   תשובה: 8000 kW.

מערך תרגול מסכם (כל היחידות)

1. מצאו את נצילות קרנו בין 900 K ל־300 K.

   1. $1 - 300/900$.

תשובה: 66.7%.

2. משאבת חום מספקת 12 kW עם COP של 4. מצאו את ההספק החשמלי ואת החום הנלקח מבחוץ.

1. W = 12/4; Q_L = 12 − 3.

תשובה: 3 kW ו־9 kW.

3. מצאו את Δs של 1 kg אוויר מ־300 K, 100 kPa ל־600 K, 100 kPa.

1. 1.005 ln 2.

תשובה: 0.697 kJ/(kg·K).

4. מצאו את האקסרגיה של 500 kJ חום ב־1000 K עם T_0 = 300 K.

1. 0.7 × 500.

תשובה: 350 kJ.

5. מצאו את נצילות אוטו ב־r = 9.

1. 1 − 9^(−0.4).

תשובה: 58.5%.

6. למחזור קירור q_L = 150 kJ/kg ו־w = 37.5 kJ/kg. מצאו את COP_R ואת COP_HP.

1. 150/37.5.

תשובה: 4.0 ו־5.0.

דף נוסחאות

$$\eta = 3412/\text{heat rate},\ v = V/m$$

$$pv = RT,\ y = y_f + x\,y_{fg}$$

$$W_b = \int p\,dV,\ W = mRT\ln(V_2/V_1)$$

$$Q - W = \Delta U,\ h = u + pv$$

$$\Delta u = c_v \Delta T,\ \Delta h = c_p \Delta T,\ Q = mc\Delta T$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}(\Delta h + \Delta V^2/2 + g\Delta z)$$

$$\eta = W/Q_H,\ COP_R = Q_L/W,\ COP_{HP} = Q_H/W$$

$$\eta_{Carnot} = 1 - T_L/T_H$$

$$\Delta s = c_p \ln(T_2/T_1) - R\ln(p_2/p_1)$$

$$T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{(k-1)/k}$$

$$X_Q = Q(1 - T_0/T),\ I = T_0 S_{gen}$$

$$\eta_{Otto} = 1 - r^{1-k},\ \eta_{Brayton} = 1 - r_p^{(1-k)/k}$$

$$w_p = v\Delta p,\ COP_R = (h_1 - h_4)/(h_2 - h_1)$$

קבועים

קבוע	ערך
קבוע הגזים האוניברסלי	R_u = 8.314 kJ/(kmol·K)
אוויר (גז אידאלי, טמפרטורת החדר, ערכי ספר לימוד)	R = 0.287 kJ/(kg·K), c_p = 1.005, c_v = 0.718 kJ/(kg·K), k = 1.4
מים נוזליים (ערך ספר לימוד)	c = 4.18 kJ/(kg·K)
חום כמוס (ערכי ספר לימוד)	התכת קרח 334 kJ/kg; אידוי ב־100 °C 2257 kJ/kg
יחידות אנרגיה	1 kWh = 3600 kJ; 1 Btu = 1.055 kJ; 1 kWh = 3412 Btu
טמפרטורה מוחלטת	T(K) = T(°C) + 273.15

מקור: NIST: CODATA value of the molar gas constant (https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?r)

טקסטים, נתונים וסימולציות חינמיים

השתמשו בהרצאות, בנתוני התכונות ובסימולציות החינמיים האלה לצד הקורס.

- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): רשימות הרצאה ובעיות חינמיות של MIT.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): רשימות חינמיות של MIT בתרמודינמיקה.
- OpenStax University Physics Volume 2, Chapter 3: The first law of thermodynamics (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-introduction): פרק מספר לימוד חינמי.
- OpenStax University Physics Volume 2, Chapter 4: The second law of thermodynamics (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-introduction): פרק מספר לימוד חינמי.
- NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/): טבלאות חינמיות של תכונות קיטור ונוזלי קירור.
- PhET: Gas Properties (https://phet.colorado.edu/en/simulations/gas-properties): לחץ, נפח וטמפרטורה באופן אינטראקטיבי.

מילון מונחים

אדיאבטי

אין מעבר חום.

יחס עבודה חוזרת

עבודת המדחס חלקי עבודת הטורבינה.

COP

מקדם הביצועים של מקרר או משאבת חום.

מחזור קרנו

מחזור הפיך בין שני מאגרים; הטוב ביותר האפשרי.

נפח בקרה

אזור במרחב שמסה יכולה לחצות.

מצב מת

שיווי משקל עם הסביבה.

אנתלפיה

$h = u + pv$.

אנטרופיה

תכונה שבה $dS = \delta Q_{rev}/T$; מודדת אי־הפיכות.

אקסרגיה

העבודה השימושית המרבית שאפשר להפיק.

מנוע חום

התקן ההופך חום לעבודה במחזור.

משאבת חום

התקן המעביר חום מקר לחם בעזרת עבודה.

קצב חום

Btu של דלק לכל kWh שמיוצרת.

איזנטרופי

אנטרופיה קבועה; הפיך ואדיאבטי.

חום כמוס

אנרגיה למעבר פאזה בטמפרטורה קבועה.

איכות

שבר המסה של הקיטור בתערובת רוויה.

מחזור רנקין

מחזור כוח קיטור: משאבה, דוד, טורבינה, מעבה.

תהליך הפיך

תהליך אידאלי ללא יצירת אנטרופיה.

רוויה

מצב שבו נוזל וקיטור מתקיימים יחד.

קיבול חום סגולי

האנרגיה להעלאת 1 kg ב־1 K.

מצערת

ירידת לחץ באנתלפיה קבועה.

מחוון להערכה עצמית

לא ניתנים ציון או נקודות זכות. השתמשו בזה כדי להעריך בכנות איפה אתם עומדים בכל יחידה.

רמה	איך זה נראה
4 · שליטה מלאה	משרטט מערכות ודיאגרמות, מוצא מצבים נכון, כותב מאזני מסה, אנרגיה ואנטרופיה מלאים, בודק מול גבולות קרנו ומבצע מעבדות בבטחה.
3 · מיומן	פותר את בעיות התרגול עם טעויות מזדמנות בטבלאות או ביחידות.
2 · מתפתח	עוקב אחר דוגמאות פתורות אך מבלבל בין מערכות פתוחות לסגורות, או משתמש ב־°C ביחסים.
1 · מתחיל	מציב מספרים בנוסחאות בלי שרטוט של המערכת; צריך לחזור על היחידה.

שקלול מוצע אם רוצים ציון

חלק	משקל
תרגילים	20%
מעבדות	25%
מערך תרגול לאמצע הקורס	25%
מערך תרגול מסכם	30%

שאפו לרמה 3 ומעלה בכל יחידה לפני שעוברים לקורס הבא.

קורסים קשורים

- אווירודינמיקה 1 AERO 310
- מכניקת זורמים ENGR 330
- ביצועי מטוסים AERO 320
- כל הקורסים