פתרון מלא עם הסברים: פרויקט "פעמון השונית"

לכל סעיף: הרעיון, החישוב והסבר לתוצאה. בסוגריים: חלוקת הנקודות. • $T[K] = t[°C] + 273$,$P_{atm} = 100\ kPa$

נסו לפתור לבד לפני שאתם קוראים את הפתרון. בכל סעיף, קראו קודם את "הרעיון" ונסו להמשיך משם.

סעיף א: חליפה ליד פני המים (20 נק׳)

הרעיון. מהעור אל המים החום עובר דרך שלוש שכבות הולכה ושכבת הסעה, בטור. הניאופרן הוא "הבידוד" כי הוא מלא בועות גז, ולגז מוליכות נמוכה.

1. הולכה בניילון ← הולכה בניאופרן ← הולכה בניילון ← הסעה למים. (4 נק׳)

2. ל־1 m²: (6 נק׳)

$$R''_{nylon} = 0.0005/0.25 = 0.002\ (\times 2) \quad R''_{neo} = 0.005/0.054 = 0.0926 \quad R''_{water} = 1/200 = 0.005$$

$$\Sigma R'' = 0.1016\ m^2\cdot K/W \ \rightarrow\ R_{th,total} = 0.1016/1.8 = \mathbf{0.0564\ K/W} \quad \text{neoprene: } \mathbf{91\%}$$

3. (5 נק׳)

$$Q = (33 - 24)/0.0564 = \mathbf{159\ W}$$

הגוף מייצר 100 W ומאבד כ־160 W: גם ליד פני המים הצוללן מתקרר לאט. בשחייה פעילה הגוף מייצר יותר, ולכן זה מאוזן בערך.

4. (5 נק׳)

$$\text{no suit: } Q = 9 \cdot 1.8 \,/\, (1/200) = \mathbf{3{,}240\ W} \quad (\times 20)$$

מקדם ההסעה של מים, 200 W/(m²•K) ויותר, גדול פי עשרות ממקדם ההסעה של אוויר (כ־10). למים מוליכות וקיבול חום גבוהים בהרבה, והם "לוקחים" חום מהעור מהר מאוד. לכן 24°C במים מרגישים קרים, ו־24°C באוויר נעימים.

סעיף ב: חליפה בעומק 20 מטר (12 נק׳)

הרעיון. בועות הגז בניאופרן מתנהגות לפי חוק בויל: בטמפרטורה קבועה $P\cdot V$ קבוע. כשהלחץ גדל פי 3, הבועות, ואיתן עובי השכבה, קטנים פי 3, וההתנגדות של הבידוד קטנה פי 3.

1. (4 נק׳)

$$P = 100 + 1025 \cdot 9.81 \cdot 20 \,/\, 1000 = 100 + 201.1 = \mathbf{301.1\ kPa}$$

$$\delta = 5\ mm \cdot 100/301.1 = \mathbf{1.66\ mm}$$

2. (4 נק׳)

$$R''_{neo} = 1.66\cdot 10^{-3}/0.054 = 0.0308 \quad \Sigma R'' = 0.0398 \ \rightarrow\ Q = 9 \cdot 1.8 \,/\, 0.0398 = \mathbf{408\ W} \quad (\times 2.6)$$

3. (4 נק׳)

$$\text{deficit} = 408 - 100 = 308\ \text{W} \ \rightarrow\ E = 308 \cdot 1800\ \text{s} = 554\ \text{kJ}$$

$$\Delta T = E/(m \cdot c) = 554{,}000\ /\ (75 \cdot 3500) = 2.1°\text{C}$$

ירידה של יותר משתי מעלות בחצי שעה היא מסוכנת: זו התחלה של היפותרמיה. המלצות: חליפה עבה יותר (7 mm), חליפה "יבשה" שבה הבידוד הוא שכבת אוויר בלחץ, קיצור זמן הצלילה, והתחממות בתוך הפעמון בין צלילות.

סעיף ג: קרינה (8 נק׳)

הרעיון. קרינה תרמית עוברת רק דרך תווך שקוף לה. מים בולעים אינפרא־אדום כמעט מיד, ולכן מתחת למים כל מעבר החום הוא הולכה והסעה.

1. מים בולעים קרינה תרמית (אינפרא־אדום) כבר אחרי שכבה של מילימטרים בודדים. הקרינה שהחליפה פולטת נבלעת מיד במים שליד הגוף, ואין לה "לאן לברוח". בנוסף, ההסעה במים חזקה מאוד, כך שגם תרומה קטנה של קרינה זניחה לידה. (4 נק׳)

2. השמיכה עוצרת בעיקר **קרינה**: הגוף פולט אינפרא־אדום, והציפוי המבריק מחזיר את רוב הקרינה חזרה אל הגוף. למשטח מבריק פליטות ובליעה נמוכות, ולכן גם השמיכה עצמה כמעט לא פולטת החוצה. היא גם עוצרת רוח, כלומר מקטינה הסעה. (4 נק׳)

סעיף ד: הירידה לעומק (12 נק׳)

הרעיון. הפעמון פתוח, ולכן לחץ האוויר שווה ללחץ המים. ירידה איטית במים שבכל העומקים באותה טמפרטורה היא תהליך בטמפרטורה קבועה: יש זמן לאוויר להחליף חום עם המים.

1. (2 נק׳)

$$m = P_1 V_1/(R \cdot T_1) = 100 \cdot 3.0\ /\ (0.287 \cdot 297) = 3.520\ \text{kg}$$

2. איזותרמי: הירידה איטית, והמים סביב הפעמון ב־24°C בכל העומקים, כך שהאוויר נשאר ב־24°C. (2 נק׳)

3. (4 נק׳)

$$V_2 = V_1 \cdot P_1/P_2 = 3.0 \cdot 100/301.1 = 0.996\ \text{m}^3 \quad \text{water inside: } 3.5 - 0.996 = 2.50\ \text{m}^3$$

4. (4 נק׳)

$$W_{12} = Q_{12} = P_1 V_1 \cdot \ln(V_2/V_1) = 300 \cdot \ln(1/3.011) = -330.7\ \text{kJ} \quad (\Delta U = 0)$$

המים עושים עבודה על האוויר כשהם דוחסים אותו (W שלילית). הטמפרטורה לא עולה, כי האוויר פולט את כל האנרגיה הזו כחום למים (Q שלילי).

סעיף ה: עבודה בעומק (10 נק׳)

הרעיון. העומק קבוע, ולכן לחץ המים, ואיתו לחץ האוויר, קבוע. החימום מגדיל את נפח האוויר ודוחף מים החוצה מתחתית הפעמון.

1. איזוברי: פני המים בפעמון בעומק קבוע, ולכן $P = 301.1\ \text{kPa}$. (3 נק׳)

2. (7 נק')

$V_3 = V_2 \cdot T_3/T_2 = 0.996 \cdot 307/297 = \mathbf{1.030\ m^3}$

$W_{23} = P(V_3 - V_2) = 301.1 \cdot (1.030 - 0.996) = \mathbf{10.1\ kJ}$

$\Delta U_{23} = m \cdot c_v \cdot \Delta T = 3.520 \cdot 0.7175 \cdot 10 = \mathbf{25.3\ kJ}$ $Q_{23} = m \cdot c_p \cdot \Delta T = \mathbf{35.4\ kJ}$ check: $35.4 - 10.1 = 25.3$ ✓

סעיף ו: עלייה איטית, והמחזור נסגר (16 נק')

הרעיון. בעלייה הלחץ יורד והאוויר מתפשט. החימום שומר על טמפרטורה קבועה, ולכן זה תהליך איזותרמי: הגז מקבל חום ממש כמו העבודה שהוא עושה. על פני המים הלחץ קבוע, והקירור הוא איזוברי.

1. **3→4 איזותרמי** (34°C), **1→4 איזוברי** (100 kPa). (4 נק')

$V_4 = V_3 \cdot P_3/P_4 = 1.030 \cdot 3.011 = \mathbf{3.101\ m^3} < 3.5\ m^3$

אין גלישה: נשאר מרווח של כ־0.4 m³ עד שפת הפעמון.

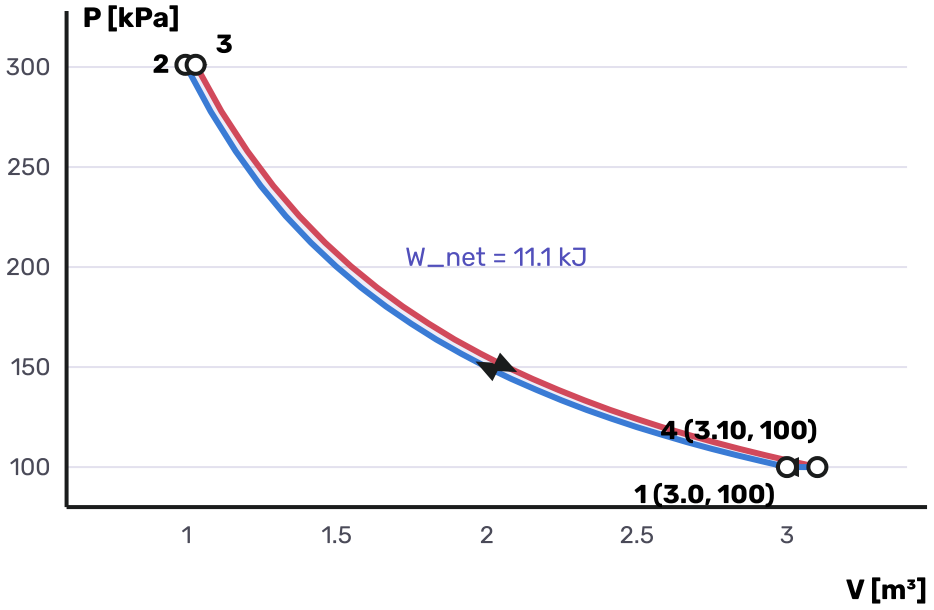
2. (5 נק')

$3 \to 4$: $W = Q = m \cdot R \cdot T_3 \cdot \ln(V_4/V_3) = 3.520 \cdot 0.287 \cdot 307 \cdot \ln(3.011) = \mathbf{341.8\ kJ}$, $\Delta U = 0$

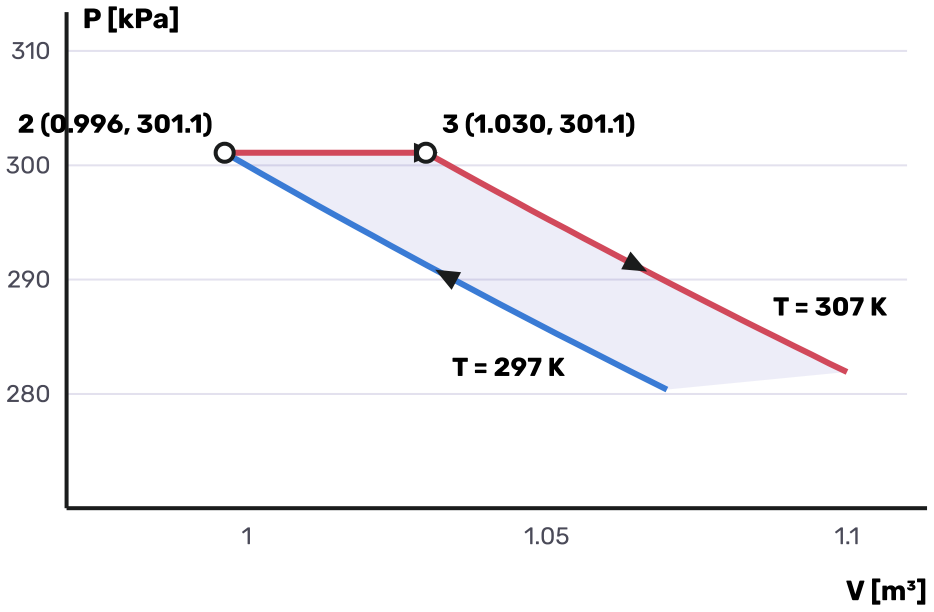
$4 \to 1$: $W = P(V_1 - V_4) = 100 \cdot (3.0 - 3.101) = \mathbf{-10.1\ kJ}$, $\Delta U = \mathbf{-25.3\ kJ}$, $Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T = \mathbf{-35.4\ kJ}$

תהליך	סוג	Q [kJ]	W [kJ]	ΔU [kJ]
1→2	איזותרמי	-330.7	-330.7	0
2→3	איזוברי	+35.4	+10.1	+25.3
3→4	איזותרמי	+341.8	+341.8	0
4→1	איזוברי	-35.4	-10.1	-25.3
סה"כ		**11.1+**	**11.1+**	**0**

3. (4 נק')



המחזור כולו. שתי העקומות האיזותרמיות כמעט נוגעות, כי הן רחוקות זו מזו רק 10 K, ולכן הלולאה צרה מאוד. כחול: האוויר פולט חום. אדום: האוויר מקבל חום. המחזור עם כיוון השעון.



הגדלה של הפינה העליונה: כאן רואים את הרווח בין האיזותרמה של 297 K לזו של 307 K. השטח של הרצועה הצרה הזו, לאורך כל המחזור, הוא העבודה נטו.

4. (3 נק׳)

$$\Sigma Q = -330.7 + 35.4 + 341.8 + (-35.4) = 11.1\ \text{kJ} = \Sigma W \checkmark$$

העבודה נטו היא כ־11.1 kJ, השטח הכלוא בין שתי העקומות האיזותרמיות. מקורה בחום מגוף החימום: האוויר קיבל חום בטמפרטורה גבוהה (34°C) ופלט חום בטמפרטורה נמוכה (24°C).

סעיף ז: עלייה מהירה וערפל (14 נק׳)

הרעיון. כשאין זמן למעבר חום, הגז שמתפשט משלם על העבודה שהוא עושה מהאנרגיה הפנימית שלו, ומתקרר. ככל ש־k קרוב יותר ל־1, התהליך "פחות מקבל חום" והקירור חזק יותר.

1. (4 נק׳)

$$T = 307 \cdot (100/301.1)^{0.4/1.4} = 224.1\ K \approx -49°C \quad V = 1.030 \cdot 3.011^{1/1.4} = 2.26\ m^3$$

2. (6 נק׳)

$$T = 307 \cdot (100/301.1)^{0.2/1.2} = 255.5\ K \approx -18°C \quad V = 1.030 \cdot 3.011^{1/1.2} = 2.58\ m^3$$

$$W = (P_3V_3 - P_4V_4)/(n-1) = (301.1 \cdot 1.030 - 100 \cdot 2.58)/0.2 = 260.2\ kJ$$

$$Q = W + m \cdot c_v \cdot (T_4 - T_3) = +130.1\ kJ$$

החום חיובי: האוויר שהתקרר מאוד **מקבל** חום מדפנות הפעמון ומהמים, אבל לא מספיק כדי להישאר חם.

3. באוויר בפעמון יש אדי מים (הוא עמד מעל מים, והצוללנים נושמים בו). בהתפשטות מהירה הטמפרטורה יורדת בעשרות מעלות, הרבה מתחת לנקודת הטל, והאדים מתעבים לטיפות זעירות: ערפל. בעלייה האיטית האוויר נשאר ב־34°C, מעל נקודת הטל, ולכן אין ערפל. (4 נק׳)

סעיף ח: לרדת עמוק יותר? (8 נק׳)

> **הרעיון.** משוואת המצב מקשרת בין המצב בסוף לבין המסה והטמפרטורה בלבד: על פני המים הלחץ הוא תמיד 100 kPa, לא משנה מאיפה הגענו.

1. על פני המים $V_4 = m \cdot R \cdot T_4 / P_{atm}$. המסה קבועה, והלחץ תמיד 100 kPa, ולכן הנפח תלוי **רק בטמפרטורה** שבה מגיעים למעלה. העומק לא מופיע בכלל: ב־40 m האוויר יתכווץ יותר בדרך למטה, ויתפשט יותר בדרך למעלה, ויחזור לאותו נפח. (4 נק׳)

2. (4 נק׳)

$$V_4 \le 3.5\ m^3 \ \rightarrow\ T_3 \le 3.5 \cdot 100 \ /\ (3.520 \cdot 0.287) = 346.5\ K \approx 74°C$$

חימום עד 34°C בטוח לגמרי. רק חימום קיצוני, מעל כ־74°C, היה גורם לאוויר לגלוש החוצה.