

צמד חומני

תדריך ביצוע

הנחיות בטיחות:

אתנול:

האתנול נדיף מאוד. דאגו לאוורור נאות של החדר כדי למנוע הצטברות בלתי רצויה של אדי אלכוהול. אין להסיר את מכסה הקלקר, המכסה את כוס האתנול. האתנול דליק, לכן הרחיקו מקורות של להבה גלויה וטלפונים ניידים.

מים רותחים:

היזהרו מכוויות, במיוחד כאשר אתם מוזגים מים מן הקומקום לכוס. היזהרו גם מאדי המים, העולים מן הקומקום בעת המזיגה.

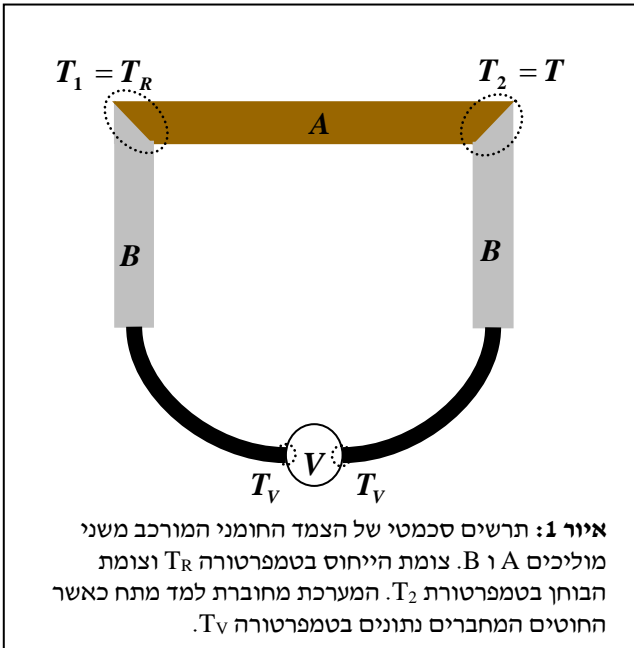
חנקן רותח:

טמפרטורת החנקן הרותח היא כ $-196^{\circ}C$. כל מגע ישיר בין החנקן (או בין גוף שקורר בו) לבין רקמה ביולוגית יגרום כוויה חמורה ונזק בלתי הפיך. לכן, השימוש בחנקן הרותח מחייב זהירות מרבית.

- **אין להוציא את מכל החנקן מן התושבת.**
- **אין להזיז את מגש המערכת עם החנקן הנוזלי במהלך ביצוע המדידות או לקרב את מגש המערכת לשפת השולחן.**
- **הרחיקו ככל הניתן את הפנים מפתחו של מכל החנקן מחשש לנתזים ולשאיפה מסוכנת של חנקן.**
- **עטו כפפות בידוד בעת השימוש בחנקן. שימו לב: הכפפות מגינות מנתזים, אך אינן עמידות בטבילה ממושכת בחנקן. אין להטביל את הכפפות בחנקן הנוזלי.**
- **אווררו את החדר כדי למנוע הצטברות של גז חנקן.**

מטרת הניסוי

בחינת התנהגותו האופיינית של המתח המושרה בצמד חומני בתחומים שונים של טמפרטורה.

**ציוד:**

- מכל דיואר מלא חנקן רותח ומכוסה במכסה קלקר
- אתנול ומתקן לאכסונו.
- קומקום
- כוס למים חמים ומתקן תליה לחישנים
- צמד חומני מסוג K (צומת ייחוס במי קרח)
- מד מתח דיגיטלי
- חיישן טמפי PT-100 $+ 400^\circ C - 200^\circ C$
- רב־רשם (Multi-Log)
- כפפות בידוד

I. מכשירי המדידה**הצמד החומני:**

הצמד החומני המשמש בניסוי מורכב משני תילים דקים. התיל האחד עשוי כרומל (סגסוגת שהרכבה $90\% Ni, 10\% Cr$), ואילו התיל האחר עשוי אלומל (סגסוגת שהרכבה $95\% Ni, 2\% Mn, 2\% Al$). צמד חומני, המורכב משני מוליכים אלה, מכונה צמד מסוג K. כל צומת של הצמד טמון בִּפְחוֹן (probe) מתכת דמוי מקלון.

לאורך כל שלבי הניסוי נשתמש בתערובת פתיתי קרח בשלבי המסה, המצויה במכל דיואר, על מנת לקבוע את טמפי הייחוס של הצמד. ודאו, שהבחון של צומת הייחוס נמצא בתוך מִכְל הדיואר שבו מי קרח. זכרו שעל בחון זה להיות קבוע במקומו במשך הניסוי.

אתרו את הבחון של הצומת החופשי של הצמד (צומת הבוחן, צומת המדידה). בשלב זה מותקן הבחון החופשי בתופסן גלילי שחור שמעל כוס קלקר; השאירו אותו במקומו. על בחון זה נטיל טמפרטורות שונות במהלך הניסוי כדי לבחון את התנהגות המתח, המושרה בצמד בהשפעת הטמפרטורה.

מד המתח:

לרשותכם רב־מד (multi-meter) דיגיטלי למדידת הפרש המתחים בין הצמתים של הצמד החומני. וודאו כי הוא דלוק ומוודד מתח ישר (לחץ DC משוחרר) בתחום מדידה של $200 mV$. שגיאת היצרן במדידת המתח V נתונה כ:

$$\Delta V = 3 \times 10^{-4} \times |\text{ערך המתח}| + 2 \times \text{סדר הגודל של הספרה האחרונה} \times 2$$

חיישן הטמפרטורה:

בסמוך לבחון הטמפי נמצא חיישן טמפי מסוג PT-100 (פעולתו מבוססת על תלות התנגדות החשמלית של נגד פלטינה בטמפרטורה). החיישן מחובר לרבו־רשם (multi-logger), אשר מחובר למחשב. החיישן משמש למדידת טמפי בתחום -200° – $+400^{\circ}$ וכיול הצמד החומני.

ודאו, שהרבו־רשם זולק והפעילו את תוכנת Multi-Lab שבמחשב. הגדירו את התוכנה להשתמש בחיישן טמפי -200° – $+400^{\circ}$, קצב דגימה של 1 דגימה בשנייה וזמן מדידה כולל הגדול מ4 שעות (ראו נספח א').

הפעילו את המדידה וודאו כי החיישן מודד ערכי טמפי סבירים בהתאם להגדרות הרצויות וכי החיישן תקין. מדידה זו של הטמפי תפעל ברציפות לכל אורך הניסוי, ואין לעצור את הדגימה בין החלקים השונים של הניסוי.

ודאו, שהחיישן דוגם כהלכה, שקצב הדגימה הוא הקצב הנדרש (כלומר: שעקומת הטמפי בצג המחשב מתפתחת בצעדי זמן בני שנייה), ושערך הטמפי הנדגמת של הסביבה הוא סביר.

מהי שגיאת המדידה בטמפרטורה? נסו להעריכה ע"י הערכת הרזולוציה של הדגימות המתקבלות מהרבו־רשם.

התרשמו מהוריית הטמפי וקצב שינוי הוריית הטמפי בצג המחשב ובצג הרב-רשם. קיבעו מאיזה צג תקראו את הטמפי במהלך הניסוי.

II. קירור מים רותחים

בחלק זה נדגום סדרה של טמפרטורות ושל מתחים מתאימים במהלך התקררות מים רותחים. נמדוד גם את טמפי החדר, את הטמפי של מי קרח ואת המתחים המתאימים לטמפרטורות אלה. על סמך הנתונים שנאספו נתווה גרף אופיין לינארי בחלק IV.

קרא בעיון את הוראות חלק זה עד תום טרם תחילת ביצוע הניסוי. יש לקבל את אישור המדריך לתחילת ביצוע חלק זה.

1. תעדו את טמפי החדר ואת המתח המתאים לה.
2. מיזגו בזהירות מים רותחים לכוס הקלקר עד לקו הסימון האדום. היזהרו מכוויות ומאדי המים העולים מן הקומקום בעת המזיגה.
3. הנמיכו את התופסתן הגלילי כך שצומת הבוֹחן וחיישן הטמפרטורה יהיו שקועים במים הרותחים. הוריית הטמפי בצג הרבו־רשם צריכה לעלות עד לֶךְ 92° ואז להתחיל לרדת.
4. בצעו מספר מדידות של טמפרטורת המים והמתח המתאים לה בתחום 50° – 90° C. ניתן להאיץ את התקררות המים ע"י בחישה בשלב ראשון ולאחר מכן ע"י הוספת פתיתי קרח.

בתום המדידות הגביהו בזהירות את התופסן הגלילי חזרה לגובהו ההתחלתי. היעזרו בבורג האחיזה הלבן ובאמצעות כף היד דחקו מעלה בעדינות את הקצוות התחתונים של שני הבחונים, ושלפו אותם מן התופסן הגלילי.

5. עתה נמדוד את הסטייה השיטתית של חיישן הטמפ' ע"י הכנסת הבחונים בעדינות אל תוך מיכל מי הקרח וביצוע מדידה של טמפ' מי הקרח ושל המתח המתאים. ערך זה יש להשוות לטמפ' ידועה של מי קרח – 0.2° . האם סטייה שיטתית זו תשפיע על ניתוח התוצאות?

6. בתום המדידה שלפו את הבחונים מתוך מיכל מי הקרח וייבשו אותם.

7. בצעו עיבוד מדגמי של התוצאות בטרם תעברו לחלקים הבאים. למשל, ניתן למצוא את קבוע זיבק ע"י מציאת השיפוע בין שתי מדידות שנלקחו. בעזרת אומדן זה לקבוע זיבק, בדקו מהו המתח המצופה עבור טמפרטורת החדר והשוו מתח זה למתח שמורה מד-המתח עבור טמפרטורה זו.

לפני תחילת ביצוע הניסוי תכנן את עבודתך תוך התייחסות לנקודות הבאות:

- מספר המדידות הרצוי עבור המים הרותחים.
- המיקום של קצוות החיישנים זה ביחס לזה במהלך המדידה.
- המיקום הגיאומטרי של החיישנים בתוך מכלי המים והקרח.
- פיזור הטמפ' הרצוי במים ומשך הזמן הנדרש עד להתייצבות ומדידה של ערך אמין.

III. מדידה בחנקן רותח לבדיקה של חיזוי מתח

את המתח שנמדוד עתה – המתח המושרה ע"י טמפ' החנקן הרותח – נשווה לערך החזוי מתוך מדידות המתח בחלק הקודם. באמצעות השוואה זו נוכל להשוות את הערך התיאורטי והערך המדוד של טמפ' חנקן נוזלי.

1. הכניסו את הבחונים בעדינות אל תוך מיכל החנקן הנוזלי דרך החריצים המתאימים ובצעו מדידה של טמפ' החנקן הנוזלי ושל המתח המתאים. **בשלב זה אין להסיר את מכסה הקלקר של המכל.**

2. שלפו את שני הבחונים מן החנקן הנוזלי וחממו אותם ע"י הטבלתם במים. נגבו את הכפור שהצטבר עליהם בעזרת הנייר הסופג, והניחו אותם על המגש.

IV. קירור אתנול

בחלק זה נדגום סדרה של טמפרטורות בתחום $0^{\circ} - 100^{\circ}$, ושל מתחים מתאימים במהלך התקררות אתנול.

במהלך ביצוע חלק זה אין להסיר את מכסה הקלקר מכוס האתנול.

האתנול, הידוע גם ככוהל אתילי (CH_3CH_2OH), קופא בטמפ' של $C -114^{\circ}$. ננצל זאת לצרכינו. את האתנול נקרר ע"י הטבלה בחנקן הנוזלי. שינויי הטמפ' בניסוי זה הם מהירים מאוד בגלל ההפרש הגדול בין טמפ' האתנול לבין טמפ' החנקן. לכן ניאלץ לשלוף בכל פעם את כוס האתנול מן החנקן ולהביא את המערכת לידי התייצבות.

כשהניסוי נערך ע"י זוג, רצוי להתחלק בתפקידים: תלמיד אחד יקרר את האתנול בחנקן ואילו התלמיד האחר יתעד את התוצאות בכתב.

1. הכניסו שני הבחונים לחרירים המתאימים במכסה הקלקר של כוס האתנול, ודחקו אותם מטה בעדינות, עד שקצותיהם נושקים לתחתית הכוס. **עשו זאת בזהירות על מנת שהכוס לא תתבקע.**
2. הסירו בזהירות את מכסה הקלקר של מכל החנקן, והניחו אותו על המגש. **בטרם ביצוע חלק זה של הניסוי קראו שוב את הוראות בטיחות העבודה עם חנקן נוזלי שבתחילת התדריך. במהלך קירור האתנול עם החנקן הנוזלי עליכם לעבוד עם כפפות הבידוד.**
3. אחזו בידית האחיזה של כוס האתנול, והטבילו בזהירות את הכוס בחנקן הרוותח. יש להשקיע את הכוס בחנקן, כך שפני החנקן נושקים למשטח התחתון של טבעת האחיזה המקיפה את הכוס.

הימנעו מהשקעתה של שפת הכוס מתחת לפני החנקן, כי חדירת חנקן אל האתנול תכשיל את הניסוי. יש להמשיך לאחוז את הכוס בעזרת הידית, ואין להניחה על קרקעית המכל.

עליכם לבצע מדידות במהלך הורדת הטמפרטורה מ 0° ל -100° בשלבים, ע"י טבילת הכוס בחנקן הנוזלי וייצוב הטמפרטורה מחוצה לו. בעת שלבי הקירור בחנקן אין צורך בבחישה. ניתן (ורצוי) לבחוש את האתנול לאחר הוצאת הכוס מהחנקן.

4. בצעו מספר מדידות של טמפרטורת האתנול והמתח המתאים לה בתחום $0^{\circ} - 100^{\circ}$. בטרם ביצוע מדידה בחשו את האתנול והמתינו מעט עד שהוראת הטמפרטורה תתייצב לכמה שניות.
5. בסיום המדידות כסו את מכל החנקן במכסה הקלקר.
6. בצעו עיבוד מדגמי של התוצאות (ראה סעיף 6 בחלק II).

V. גרף אופיין למדידות במים

בחלק זה נתאים ישר לאוסף המדידות שדגמנו עבור מים מתקררים. אם אתם מספיקים בצעו את הניתוח במעבדה. בכל אופן, עליכם לבצע ניתוח מדגמי במהלך הניסוי.

1. מצאו את קבוע זיבק באמצעות מדידת המתח בטמפרטורת החדר.
2. צרו גרף על סמך נתוני הטמפ' ונתוני המתח (רק עבור המים המתקררים, ללא המדידות עבור טמפרטורת החדר ועבור החנקן הנוזלי). עיבדו עם הפרש טמפרטורות ביחס לצומת הייחוס. התאימו למדידות התאמה לינארית. האם ההחלטה להתאים אופיין תגובה ישר לאוסף הנקודות היא החלטה סבירה בהסתמך על מראה עיניים ?
3. השוו את המקדם החופשי (המתאים להפרש טמפרטורה אפס) של ההתאמה לערך המצופה.
4. חשבו את הערך החזוי של המתח המתאים לטמפ' של חנקן רותח על פי קבוע זיבק המחושב מטמפ' החדר ועל פי ההתאמה הלינארית שנערכה למדידות המים. חשבו גם את השגיאה של מתחים חזויים אלה. האם המשתנים בעזרתם אתם מחשבים את הערך החזוי ממדידות המים הם בלתי תלויים? במידה ולא, איך תחשבו את השגיאה?
5. השוו את התוחלת החזויה של מתח בטמפ' של חנקן רותח למתח שמדדתם בפועל. האם החזוי מוצלח? מדוע?

VI. גרף אופיין למדידות האתנול/לכלל המדידות

בחלק זה נתאים קו ישר ועקומה פרבולית למדידות שנדגמו עבור התקררות האתנול.

1. צרו גרף לינארי על סמך נתוני הטמפ' ונתוני המתח עבור התקררות האתנול. עיבדו עם הפרש טמפרטורות ביחס לצומת הייחוס. האם ההחלטה להתאים אופיין תגובה ישר לאוסף הנקודות היא החלטה סבירה? התייחסו הן למראה עיניים והן למדד טיב ההתאמה χ^2_{red} (או p-value).
 2. כעת נתאים פרבולה לנתונים. הפעילו את תוכנת ההתאמה, והתאימו עקומה פרבולית. האם ההתאמה של אופיין פרבולי מוצלחת? התייחסו הן למראה עיניים והן למדד טיב ההתאמה χ^2_{red} (או p-value). כדי לבצע התאמה שאינה לינארית עליכם לתת ניחוש ראשוני לפרמטרים, חישובו, כיצד ניתן להעריך את סדר הגודל של הפרמטרים בהתאמה הפרבולית?
 3. עבור כל אחת מההתאמות, חשבו את הערך החזוי של תוחלת המתח המתאימה לטמפרטורת חנקן רותח והשוו לערך הצפוי (ראו סעיפים 4,5 בחלק IV).
- עתה, נאסוף את כל הנתונים שבידינו ונתאים אופיין תגובת מתח בתחום רחב יחסית של טמפרטורות.
4. הקלידו את נתוני הטמפרטורות ואת נתוני המתחים המתאימים, שאספתם במהלך המדידות: את נתוני המדידות במהלך קירור המים, את נתוני המדידה בסביבת החדר ואת נתוני המדידות במהלך קירור האתנול (אין לכלול את נתוני המדידה בחנקן הרותח עצמו). זיכרו לעבוד עם הפרש טמפרטורה ביחס לצומת הייחוס.
 5. בצעו התאמה לפרבולה או לפולינום ממעלה שלישית על סמך נתוני הטמפ' ונתוני המתח.
 6. עבור ההתאמה בתחום הטמפ' הרחב, חשבו את הערך החזוי של תוחלת המתח המתאימה לטמפרטורת חנקן רותח והשוו לערך הצפוי (ראו סעיפים 4,5 בחלק V).

7. לסיכום, השוו בין התוצאות השונות שקיבלתם עבור המתח המתאים לטמפי' החנקן הנוזלי (4 תוצאות) לבין ערך המתח שמדדתם ישירות בטמפי' חנקן נוזלי (ניתן להשוות גם בין התוצאות עצמן). דונו וקבעו על איזו מדידה הייתם מסתמכים בבואכם לקבוע את המתח בטמפי' החנקן הנוזלי ומדוע. בדיונכם התייחסו לגדלים הסטטיסטיים אותם קיבלתם בניסוי.

VII. שאלות עזר לסיכום

א. האם, לפי מיטב שיפוטכם, נשמרו בקפידה במשך הניסוי כל התנאים, הנדרשים להבטחת תלות המתח של צמד חומני בטמפי' צומת הבוכן לבדה ?

ב. מהם, לדעתכם, חסרונותיהם העיקריים של החיישנים שבהם השתמשנו בניסוי ? באלה חיישנים אחרים הייתם מעדיפים להשתמש (חיישנים בעלי צורה אחרת או אופן פעולה שונה), אילו היה הדבר נתון לבחירתכם ?

ג. מהם, להערכתכם, הגורמים העיקריים, הקובעים את זמן התגובה האופייני של הבחונים שבהם השתמשנו בניסוי ? (לענייננו, זמן תגובה אופייני הוא הזמן האופייני, החולף מן הרגע שבו אירע שינוי נתון בטמפי', עד לרגע שבו מורה החיישן על השינוי.)

ד. את מדידות הטמפי' ואת מדידות המתח במהלך קירור המים ערכנו, בזמן שהטמפרטורה השתנתה מרגע לרגע. מהו התנאי, שעל זמני התגובה של שני החיישנים לקיים, כדי שנוכל לערוך מדידות באופן זה ?

ה. בעזרת החנקן הנוזלי ניתן היה להמשיך לקרר את האתנול לטמפרטורות שמתחת לטמפי' הקיפאון שלו (או אף לקרר מים מתחת לטמפי' הקיפאון שלהם) וע"י כך להרחיב את תחום האופייין של הצמד החומני. מדוע, לדעתכם, נמנענו לעשות כן ?

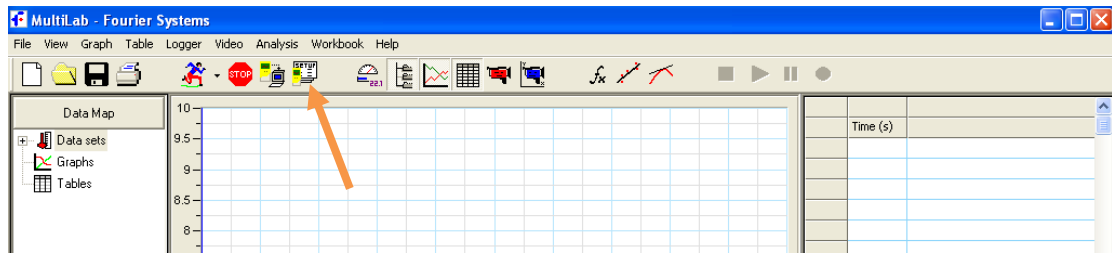
ו. האם יהיה זה נכון, לדעתכם, לצרף את הטמפי' ואת המתח, המתייחסים למדידה בחנקן הרוחח עצמו, לשאר הנתונים שדגמתם ולהתאים עקומה לסדרת הנתונים כולה ? נמקו.

ז. על סמך ההתאמה הפרבולית חזינו בחלק VI את תוחלת המתח, שיושרה בצמד החומני בהינתן טמפי' מסוימת שמדדנו. את תחזית תוחלת המתח השוינו למדידה יחידה של מתח באותה טמפרטורה. האומנם יש מקום לעריכת השוואה בין שני הערכים הללו ? מדוע ?

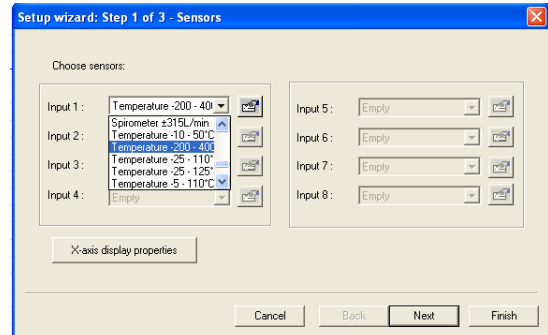
נספח א- הפעלת מערכת המד-רשם

1. הפעילו את המולטי לוג.

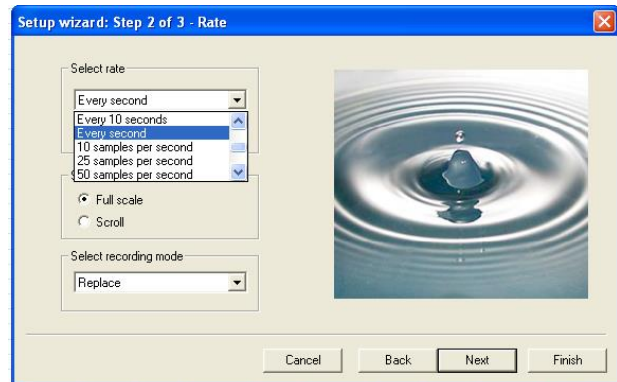
2. הפעילו את תוכנת המולטי לאב (נמצאת על ה desktop). במסך שיפתח לחצו על **SETUP**.



3. במסך שיפתח בחרו במדידת טמפרטורה בתחום של -200° to $+400^{\circ}$, ולחצו על **NEXT**.



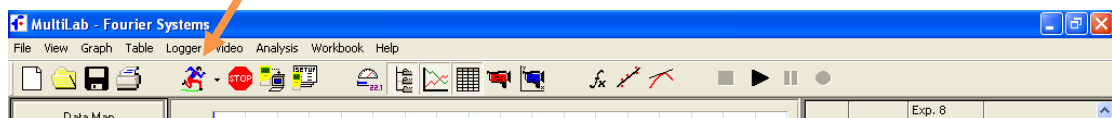
4. בחרו בקצב של מדידה של דגימה אחת בשנייה ולחצו על **NEXT**.



5. בחרו בזמן מדידה ארוך מספיק, כלומר יותר מ 4 שעות, ולחצו על **FINISH**.



6. לחצו על **RUN** להתחלת המדידות.



7. אתם אמורים לקבל רשימת תוצאות מדידה בצד ימין של התוכנה. המדידה הראשונה תופיע מיד, והמדידות הנוספות יופיעו לפי קצב המדידה שבחרתם.

