

השפעת הרכב הצמחייה על קצב קיבוע פחמן בגגות ירוקים

עובד מתוך הראל אגרא, תמיר קליין, עמיאל וסל, ג'ונג'ילבר קדס וליאון בלאושטיין. השפעת הרכב הצמחייה על קצב קיבוע פחמן בגגות ירוקים. מתוך אקולוגיה וסביבה 7(3), אוקטובר 2016. עמ' 251-252.



פארק נשר (נחל קטיע) דוגמה
לטבע עירוני (שטח ירוק בעיר)



מבוא

בשנים האחרונות חל תהליך פיתוח כתוצאה ממנו שטחים פתוחים בתוך העיר, הכוללים נוף טבעי כגון חלקות יער, גינות, פארקים משנים את ייעודם לאזורים עירוניים הכוללים בניינים, מדרכות וכבישים. לצמצום זה של השטחים הפתוחים בתוך העיר השפעות מזיקות על החברה והסביבה, למשל:

1. השטחים הפתוחים מתפקדים כ"ריאות ירוקות" של העיר – הצמחייה שלהם קולטת את הפחמן הדו-חמצני הנפלט מכלי הרכב, ופולטת לאוויר חמצן. שטחים אלו מסייעים לטהר את האוויר בעיר.
2. פנאי- השטחים הפתוחים בעיר מאפשרים לתושבים לקיים פעילויות ספורט, לערוך פיקניקים, לקיים מופעים פתוחים ועוד.
3. שטחים פתוחים מאפשרים למי הגשמים לחלחל לאדמה.
4. שטחים פתוחים בעיר ובפרט טבע עירוני, מאפשרים שימור ערכי טבע ונוף.

על אף החשיבות הרבה של השטחים הפתוחים בתוך העיר, מכיוון שהערים גדלות, הן זקוקות לשטחים נוספים לשימושי קרקע שונים ולכן בערים רבות בעולם, השטחים הפתוחים בתוך העיר הולכים ומצטמצמים. שטחה של ישראל קטן ומרבית אוכלוסייתה עירונית ומרוכזת במרכז הארץ. התפשטות השטח הבנוי באזור זה מהירה ביותר, והשטחים הפתוחים בערים ובסביבותיהן הולכים ומצטמצמים. לאור כל זאת, בשנים האחרונות גוברת בישראל המודעות לחשיבותם של השטחים הפתוחים ולצורך בשמירתם.



אילוסטרציה של גג ירוק

אחת מדרכי ההתמודדות עם צמצום השטחים הפתוחים בערים היא "גגות ירוקים". **גגות ירוקים** ("גגות חיים") הם גגות שיש עליהם שכבת מצע גידול וצמחייה מתאימה. בשנים האחרונות נאסף מידע רב על תרומתם של גגות ירוקים במגוון היבטים: בידוד תרמי של הבניינים וחיסכון באנרגיה; ספיגה וסיוע בניקוז של מי גשמים; תרומה למגוון הביולוגי במרחב העירוני.

מילון מונחים

שטחים פתוחים: שטחים שאינם בנויים

גגות ירוקים: גגות ששטחם משמש לגידול צמחייה

מגוון ביולוגי: כלל השונות הביולוגית (גנים, מינים ומערכות אקולוגיות) על פני כדור הארץ

עונים לאחר קריאה:

1. **סמנו את המילים הקשורות למונח "שטחים פתוחים": בנייני מגורים / גינות ציבוריות / כבישים / מרכזי קניות / שדרות / פארקים / טבע עירוני**
2. **מדוע נוהגים לקרוא לשטחים הפתוחים בתוך הערים "ריאות ירוקות"?**
3. **הסבירו כיצד השטחים הפתוחים מאפשרים לנצל את מי הגשמים.**
4. **מדוע מצטמצמים השטחים הפתוחים בערים?**
5. **מהם היתרונות של שטחים פתוחים?**
6. **האם גגות ירוקים מהווים לדעתכם פתרון לבעיות הנגרמות כתוצאה מצמצום השטחים פתוחים?**

שאלת המחקר

על אף היתרונות שצוינו בפרק המבוא בנוגע לגגות ירוקים, עדיין חסר מידע לגבי תרומתם לקיבוע פחמן דו-חמצני בתהליך הפוטוסינתזה, ולהפחתת ריכוז הפחמן הדו חמצני באוויר. הערים מאופיינות ברמות גבוהות יחסית של פחמן דו-חמצני באוויר. לאור זאת, בחרו החוקרים למדוד את קצב קיבוע הפחמן בגגות ירוקים בעלי שכבת מצע גידול דקה. גגות אלו, ניתנים להקמה על גבי מרבית המבנים הקיימים בעיר, מצריכים אחזקה מינימלית, ולכן הם הנפוצים יותר בשימוש. במחקר נמדדה השפעת הרכבי צמחייה שונים על קצב קיבוע פחמן, במטרה לבחון את הרכב מיני הצמחייה המומלץ ביותר להשגת מטרה של הפחתת פחמן דו חמצני באוויר.

עונים לאחר קריאה:

7. **מדוע ערים מאופיינות ברמות גבוהות יחסית של פחמן דו-חמצני באוויר?**
8. **הציעו לפחות 3 דרכים שונות להפחתת ריכוז הפחמן הדו חמצני באוויר בערים**
9. **שערו – מה מאפיין צמחיה שתתאים לגידול על גבי גגות?**
10. **שערו - מדוע צפוי הבדל בקיבוע הפחמן בין צמחים מסוגים שונים?**
11. **מהו המשתנה התלוי במחקר ומהו המשתנה הבלתי תלוי?**

שיטות המחקר

סוגי החלקות הן:

- חלקות של צמחים חד-שנתיים ממינים ומשפחות שונים.
- חלקות של צמח בשרני רב-שנתי בשם צורית גבוהה (*Sedum sediforme*) להלן צורית.
- חלקות שבהן שילוב של צמחים חד-שנתיים וצורית.
- חלקות ביקורת (ללא צמחים).



צורית



בחלקות החד-שנתיים נזרעה תערובת הומוגנית של כ-1,000 זרעים של 20 מינים חד-שנתיים מקומיים כגון תלתן כוכבי (*Trifolium stellatum*), תלתן הארגמן (*Trifolium purpureum*), חרצית עטורה (*Chrysanthemum coronarium*), מלעניאל מצוי (*Stipa capensis*), מקור חסידה חלמתי (*Erodium malacoides*), זנב ארנבת ג'יצני (*Lagurus ovatus*), ציפורנית מצרית (*Silene aegyptiaca*).

בחלקות הצורית נשתלו בפיזור אחיד 36 צמחי צורית בני גודל אחיד.

השפעת הרכב הצמחייה על קצב קיבוע הפחמן הדו חמצני נבדקה באמצעות שני מדדים:

- קצב קיבוע הפחמן בעלים (קצב הפוטוסינתזה)** – קצב הקיבוע בעלים נמדד בכל מיני הצמחים, בכל החלקות, בעזרת מכשיר מדידה מיוחד. המדידות התבצעו במשך ארבעה ימים שונים בחודש פברואר 2016 תחת אור גבוה, ובתנאים של ריכוז פחמן דו-חמצני של 400 חלקיקים למיליון, בטמפרטורת הסביבה.
- ריכוז הפחמן הדו חמצני באוויר** – מדידת ריכוז הפחמן הדו חמצני התבצעה על ידי חיזון שנתלה בגובה 50 ס"מ מעל הקרקע במרכז כל חלקה. ריכוז הפחמן הדו-חמצני נמדד במשך חמש דקות. כל מדידה ארכה שלוש שניות, כך שסך הכול נערכו 100 מדידות בחלקה. מדידה זו פשוטה יחסית, אולם רגישה לתנאים האטמוספריים.

מילון מונחים

קיבוע פחמן דו חמצני – קליטת פחמן דו חמצני מהאוויר והפיכתו לתרכובת אורגנית זמינה. תהליך המתבצע בפוטוסינתזה וע"י חיידקים.

פוטוסינתזה - תהליך של יצירת חומרים אורגניים מחומרים אנאורגניים (פחמן דו-חמצני שהצמחים קולטים מהאוויר, ומים שהצמחים קולטים בשורשיהם) בעזרת אנרגיית האור שנקלטת בצמח (באמצעות כלורופיל).

צמח חד שנתי - צמח המשלים את מחזור חייו במשך עונת צמיחה אחת.

שאלות לאחר קריאה:

12. כמה חזרות בוצעו בניסוי? מדוע יש לבצע חזרות?

13. מהי חלקת הבקרה בניסוי? מה החשיבות של ביצוע הבקרה?

14. מדוע החוקרים ביצעו את הניסוי בעוצמת אור גבוהה?

15. מהם הגורמים הקבועים שנשמרו בניסוי ומדוע נשמרו גורמים אלה?

תוצאות

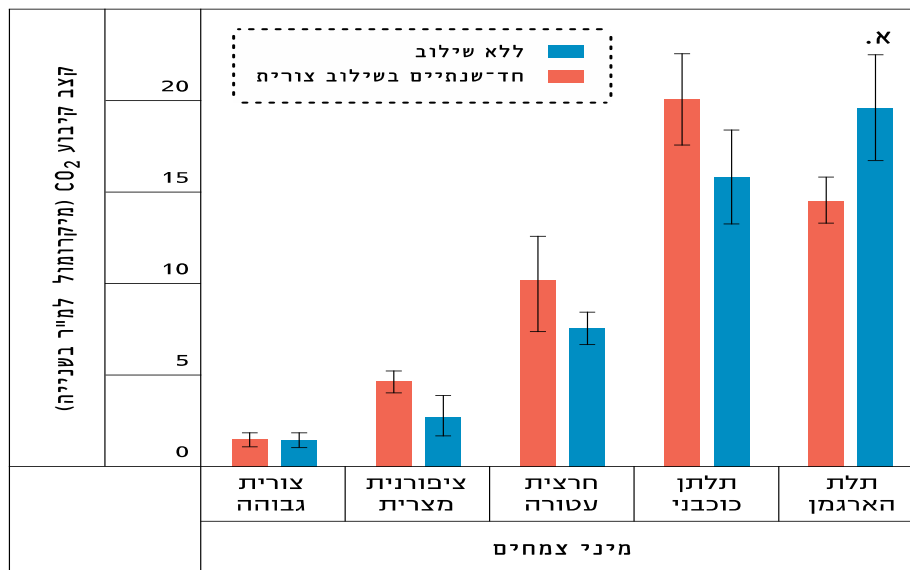
קצב פוטוסינתזה בעלים

נמצאה שונות בקצב קיבוע הפחמן בין הצמחים השונים (גרף 1):

- קצבי פוטוסינתזה גבוהים (15–20 מיקרומול למ"ר בשנייה - ממ"ש) התקבלו בתלתן כוכבי (*Trifolium stellatum*) ובתלתן הארגמן (*Trifolium purpureum*),
- קצבים בינוניים (8–12 ממ"ש) התקבלו בחרצית עטורה (*Chrysanthemum coronarium*), במלעניאל מצוי (*Stipa capensis*) ובמקור חסידה חלמתי (*Erodium malacoides*),
- קצבים נמוכים (4–6 ממ"ש) התקבלו בזנב ארנבת ג'יצני (*Lagurus ovatus*) ובציפורנית מצרית (*Silene aegyptiaca*).
- הקצבים הנמוכים ביותר נמדדו אצל הצורית (1.5 ממ"ש)

נמצאו הבדלים בקצב קיבוע הפחמן בהשוואה בין חלקה ללא שילוב לבין חלקה של חד שנתיים בשילוב הצורית: השפעת הטיפול לא הייתה מובהקת ברמת המין, כלומר היו מינים שקבעו יותר פחמן דו חמצני בחלקה עם הטיפול של שילוב חד שנתיים עם צורית (כמו התלתן הכוכבי) והיו מינים שקבעו יותר פחמן דו חמצני בטיפול ללא הצורית (כמו תלתן הארגמן). עם זאת, יש לציין כי לצורית קיבוע פחמן במסלול CAM (Crassulacean Acid Metabolism), כלומר הצמח קולט פחמן דו-חמצני בלילה ומבצע פוטוסינתזה (ביום), ולכן ניתן לצפות לערכי קיבוע פחמן גבוהים יותר בשעות הלילה, שלא נמדדו בניסוי זה.

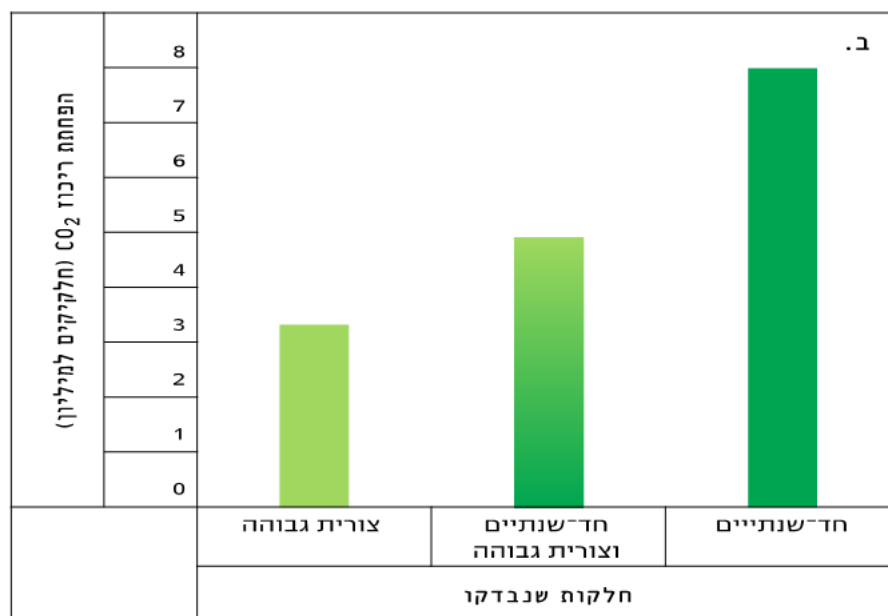
גרף 1 – קצב קיבוע פחמן דו חמצני בחמישה מינים נבחרים בחלקות, עם שילוב ובלעדיו.



ריכוז הפחמן הדו חמצני באוויר

לגגות הירוקים הייתה השפעה על ריכוזי הפחמן הדו-חמצני בתוך החלקה. בהתאם להשערתנו, ריכוזי הפחמן הדו-חמצני היו נמוכים יותר בחלקות של החד-שנתיים והצורית מאשר בחלקות ללא הצמחייה (גרף 2). ניתוח התוצאות הראה כי קיימת השפעת גומלין בין הצורית לחד-שנתיים: השפעת החד-שנתיים על ריכוזי הפחמן הדו-חמצני הייתה גדולה יותר ללא נוכחות הצורית.

גרף 2- הפחתת ריכוז הפחמן הדו חמצני בטיפולים השונים.



עונים לאחר קריאה:

16. בגרף 2 מוצגים 3 מתוך 4 הטיפולים השונים שבוצעו.

א. פרטו מהם הטיפולים השונים.

ב. מהו הטיפול שאינו מצוין בגרף 2? שער, מדוע טיפול זה אינו מיוצג בגרף?

17. במידה ותרצה/י להקים על גג ביתך גג ירוק במטרה לצמצם את ריכוז הפחמן הדו חמצני, איזה

מהצמחים הנבדקים עליך לבחור לגג? האם כדאי לשלב צמחים חד שנתיים עם צורית?

18. במידה ומדידות הפחמן היו מתבצעות בלילה, כיצד לדעתכם היו משתנות התוצאות? בתשובה

התייחסו לצורית ולאחד מהמינים החד שנתיים.

19. שער – מה היתרון בקיבוע פחמן בלילה?

20. לו הייתם מבצעים אתם את הניסוי - האם הייתם בוחרים בצמח הצורית? נמקו

מסקנות

צמחים חד-שנתיים, ומיני התלתן בפרט, הם מקבעי פחמן חזקים, אך הם מסיימים את מחזור חייהם עם תום עונת הגשמים, ולכן השימוש בהם בגגות ירוקים בעייתי מבחינה אסתטית. הצורית נשארת ירוקה לאורך כל השנה ללא צורך בתחזוקה ובהשקיה, ולכן היא אידאלית לשימוש בגגות ירוקים ובתנאי האקלים בישראל בפרט. אולם, על פי תצפיותינו, כאשר מביאים בחשבון שיקולים של קיבוע פחמן ותרומה להקטנת אפקט החממה, השימוש בצורית בנפרד או בשילוב שלה עם חד-שנתיים אינו מיטבי. נראה כי כדי להבטיח קיבוע פחמן מרבי במהלך השנה יש לשלב בגגות המבוססים על צורית גם חלקות סמוכות נפרדות של חד-שנתיים מקבעי פחמן חזקים, כדוגמת התלתן הכוכבי. נוסף על כך, יש לשקול שימוש במינים רב-שנתיים נוספים, המשלבים עמידות ליובש וקיבוע פחמן ברמה שמעל ל-2 מ"מ"ש, ובעדיפות לשעות היום, ששיאי פליטות הפחמן הדו-חמצני בעיר מתרחשים בהן.

עונים לאחר קריאה:

21. ציינו יתרון וחסרון בשימוש בתלתן וצורית בגגות ירוקים (אחד לכל מין, סה"כ ארבעה)

22. שער, מדוע החוקרים טוענים כי שיא פליטת הפחמן הדו חמצני בעיר הינו בשעות היום?

23. ממסקנות המחקר עולה כי יש לשקול שימוש במינים רב שנתיים נוספים, המשלבים עמידות ליובש

וקיבוע פחמן ברמה שמעל ל-2 מ"מ"ש. תכננו ניסוי המשך שיוכל לקבוע טענה זו.

פעילות העשרה

פוטוסינתזה

הצמחים הם יצורים חיים, וכמו כל יצור חי הם נושמים כל ימי חייהם. בצמחים, בנוסף לתהליך הנשימה, מתרחש תהליך נוסף - פוטוסינתזה (הטמעה). פוטוסינתזה היא תהליך של יצירת חומרים אורגניים מחומרים אנאורגניים (פחמן דו-חמצני שהצמחים קולטים מהאוויר, ומים שהצמחים קולטים בשורשיהם) בעזרת אנרגיית האור שנקלטת בצמח (באמצעות כלורופיל). מכיוון שבטבע מקור האנרגיה של תהליך הפוטוסינתזה הוא אור השמש - בטבע הוא יכול להתקיים רק בשעות היום. התוצר של תהליך הפוטוסינתזה הוא חומר אורגני - סוכר (גלוקוז), וכן חמצן שנפלט אל הסביבה. אפשר לסכם את תהליך הפוטוסינתזה באמצעות הנוסחה הבאה:



תהליך הפוטוסינתזה מתרחש רק ביצורים חיים שמכילים כלורופיל - צמחי יבשה ירוקים, אצות וכן חיידקים מקבוצה מסוימת - חיידקים כחוליים. כל אלה הם יצרני החומר האורגני - היצרנים הנמצאים בבסיסן של כל שרשרות המזון ופירמידות המזון בטבע.

מילון מונחים

חומר אורגני - תרכובת המכילה פחמן ומימן ולרוב גם חמצן, למשל, פחמימות ושומנים. היווצרותן של תרכובות אורגניות בטבע תלויה בפעילות של אורגניזמים חיים.

חומר אנאורגני - כל החומרים בטבע שאינם תרכובות של פחמן ומימן. למשל: יסודות, מלחים, פחמן דו חמצני ומים.

עונים לאחר קריאה:

- ידוע כי בתהליך הנשימה נפלט לאטמוספירה פחמן דו-חמצני. בכל זאת ריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה נשאר קבוע פחות או יותר. מדוע?
- מהי החשיבות העיקרית של הפוטוסינתזה?
- כיצד היה משתנה הרכב האטמוספירה אילו הצמחים היו מפסיקים לבצע פוטוסינתזה?
- כיצד ניתן למדוד את עוצמת הפוטוסינתזה? הציעו שתי דרכים שונות
- כיצד בנייה של גגות ירוקים עשויה להשפיע על ריכוז הפחמן הדו חמצני?



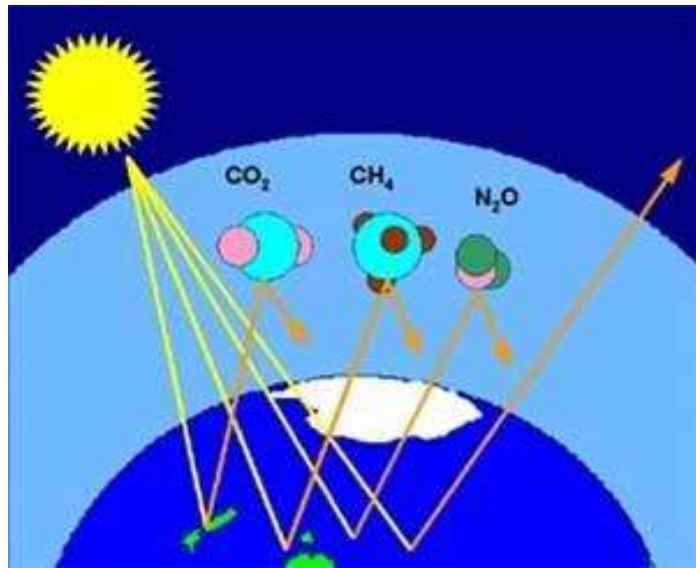
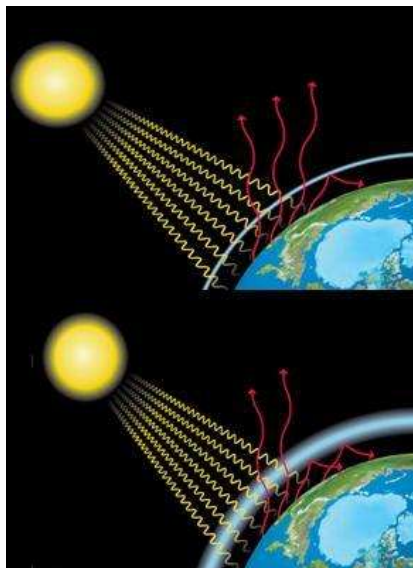
כדי ללמוד על השפעת גגות ירוקים על תהליך הפוטוסינתזה נבצע ניסוי הבוחן את השפעת כמות העלים על עוצמת הפוטוסינתזה (נספח).

פוטוסינתזה ואפקט החממה

האטמוספירה מכילה גזים שונים הבולעים קרינה באורכי גל שונים. גזים בעלי יכולת בליעה רבה במיוחד של קרינת חום נקראים "גזי חממה". גזי החממה מונעים מקרינת החום שכדור-הארץ פולט, לחזור אל החלל, בדומה למה שעושים קירות זכוכית בחממה. העלייה הגוברת בריכוז גזי החממה גורמת לעליה בכמות החום המוחזר אל כדור הארץ, כתוצאה מכך, כדור הארץ מתחמם. פעילות בני האדם מגבירה את אפקט החממה הטבעי.

גז החממה הנפוץ ביותר הם אדי-המים. גזי חממה נוספים המצויים באטמוספירה הם פחמן דו חמצני (CO_2), מתאן (CH_4), אוזון (O_3), NO_2 .

פחמן דו חמצני (CO_2) נפלט בזמן הנשימה של יצורים חיים וכן בתהליכי שריפה של דלקים פוסיליים (פחם, נפט ומוצרי, גז טבעי) שהשימוש בהם הולך ומתרחב. מאז המהפכה התעשייתית (1750) שיעור הפחמן הדו חמצני באטמוספירה גדל ב-12% כתוצאה מפעילות האדם ומעריכים כי שיעורו יגדל עוד ב-50% עד שנת 2050. זהו גז החממה שאחראי לכ-55% מאפקט החממה. מתאן נפלט בתהליכי שרפת דלק ובתהליכי רקב של זבל אורגני, הנגרם על-ידי פעילות חיידקים.



עונים לאחר קריאה:

1. האם אפקט החממה חיוני לחיינו על פני כדור ארץ? נמקו
2. ציינו שלוש השפעות של התגברות אפקט החממה על כדה"א.
3. ציינו שלושה פתרונות אפשריים לצמצום התופעה.
4. כיצד צמחים משפיעים על אפקט החממה? הסבירו את תשובתכם.

ניסוי: השפעת כמות העלים על עוצמת הפוטוסינתזה

(מעובד על פי בחינת בגרות במעבדה 3 יח"ל תשס"ז בעיה 3)

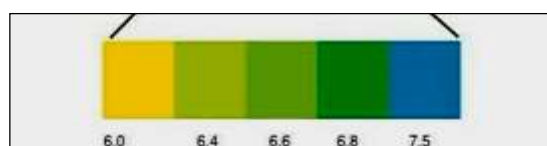
בניסוי זה נבדוק את תהליך הפוטוסינתזה המתרחש בעלי פטרוזיליה.

כלים וחומרים:

1. שקית פלסטיק שקופה עם 24 עלי פטרוזיליה שווים בגודלם. (להכנה ביום העבודה במעבדה).
2. ארבע מבחנות רגילות + 4 פקקים
3. אינדיקטור ברומו תימול כחול
4. פיפטה 10 מ"ל
5. פיפטות פסטר
6. קשית שתייה
7. ניר לבן
8. כן למבחנות
9. מנורת שולחן עם נורה 100 וואט.
10. טוש בלתי מחיק לסימון על זכוכית

עקרון המדידה

ברומתימול כחול הוא אינדיקטור שצבעו כחול בסביבה בסיסית וצהוב בסביבה חומצית. CO_2 המומס במים יוצר חומצה פחמתית. בתהליך הפוטוסינתזה הצמח קולט CO_2 מהתמיסה, ולכן רמת החומצה הפחמתית בתמיסה יורדת. השינוי בריכוז החומצה הפחמתית בתמיסה מבטא את כמות ה- CO_2 שנצרך בתהליך הפוטוסינתזה.



ככל התמיסה חומצית יותר (בניסוי זה ריכוז הפחמן הדו חמצני גבוה יותר) אז הצבע יהיה צהוב יותר. מאידך, ככל שהתמיסה בסיסית יותר צבע התמיסה יהיה כחול- ירוק יותר.

בניסוי זה נוסיף מספר שונה של עלי פטרוזיליה לתמיסה המועשרת ב- CO_2 . נשווה את הצבע ההתחלתי של התמיסה לצבע בתום הניסוי, וכך נדע אם ריכוז הפחמן הדו-חמצני בתמיסה עלה, ירד או נשאר בלי שינוי.

מהלך העבודה:

חלק א- הכנת תמיסה מועשרת ב- CO_2 (באמצעות נשיפה)

- א. בחרו מבחנה אחת ורשמו עליה תמיסה מעושרת בפחמן דו חמצני. מזגו למבחנה 50 מ"ל מים מזוקקים.
- ב. בחרו פיפטת פסטר ורשמו עליה ברומיתל. הוסיפו בעזרת פיפטת פסטר 25 טיפות של האינדיקטור ברומתימול כחול לתוך המבחנה עם המים המזוקקים.

ג. טלטלו קלות לערבוב התמיסה.

ד. טבלו קשית בתמיסה, ונשפו דרכה במשך 45 שניות. שימו לב לא לשאוף את התמיסה.

ה. טלטלו את הכלי עד שצבע התמיסה הופך לירוק.

ו. נשפו שוב (2-3 נשיפות) עד שצבע התמיסה ייעשה צהוב.

חלק ב- הכנת מערכת הניסוי (יש להכין 4 פעמים, 3 פעמים עבור כל טיפול ופעם אחת לביקורת)



1. בחרו פיפטת 10 מ"ל, רשמו עליה פחמן דו חמצני.

2. לפניכם 4 מבחנות ריקות, סמנו מבחנה אחת במספר "1", מבחנה שניה במספר "2" ומבחנה שלישית במספר "3". על המבחנה הרביעית כתבו ביקורת. למבחנה זו לא נוסף עלים.

3. באמצעות הפיטה המסומנת כפחמן דו חמצני הכניסו לכל אחת מהמבחנות ססימנתם 10 מ"ל מהתמיסה המועשרת ב- CO_2 (שהוכנה בשלב א)

4. הכניסו 4 עלי פטרוזיליה למבחנה המסומנת "1" בזה אחר זה, כך שלא יהיו מונחים זה על גבי זה בצפיפות. ניתן להיעזר בקיסם עץ. הכניסו את העלים עד למרחק של 1 ס"מ מתחתית המבחנה (ראו איור 1). פקקו היטב את המבחנה בעזרת הפקק.

5. הכניסו 8 עלים למבחנה המסומנת "2" בזה אחר זה, כך שלא יהיו מונחים זה על גבי זה בצפיפות. ניתן להיעזר בקיסם עץ. הכניסו את העלים עד למרחק של 1 ס"מ מתחתית המבחנה. פקקו היטב את המבחנה בעזרת הפקק.

6. הכניסו 12 עלים למבחנה המסומנת "3" בזה אחר זה, כך שלא יהיו מונחים זה על גבי זה בצפיפות. ניתן להיעזר בקיסם עץ. הכניסו את העלים עד למרחק של 1 ס"מ מתחתית המבחנה. פקקו היטב את המבחנה בעזרת הפקק.

7. הניח ואת המבחנות על השולחן על נייר לבן

8. הציבו ליד המנורה מבחנה כך שיהיה מרחק של כ-15 ס"מ בין הנורה למבחנות.

9. הדליקו את המנורה. כתבו את שעת התחלת הניסוי: _____ . המתינו 15 דקות.

10. כעבור 15 דקות מתחילת הניסוי, ערבבו היטב את התכולה של המבחנות על ידי הפיכת המבחנה כמה פעמים וכבו את המנורה.

11. רשמו בטבלה את צבע הנוזל שבכל מבחנה.

המבחנה	מספר עלי פטרוזיליה	צבע התמיסה בתחילת הניסוי	צבע התמיסה אחרי 15 דקות
1			
2			
3			
4			

שאלות בעקבות הניסוי

1. מהו המשתנה הבלתי תלוי בניסוי? באיזה אופן שיניתם משתנה זה?
2. מהו המשתנה התלוי בניסוי? כיצד מדדתם משתנה זה?
3. מהו התהליך שנבדק בניסוי ומהו הגז שנצרך בתהליך?
4. מהי המסקנה מתוצאות הניסוי?