

כשהתותחים רועמים... הכימיה חוגגת



תגובת השעון של עמילן-יוד על רקע היצירה "1812" של צ'קובסקי*

| שרה פרח** |

המונחים המשמשים לתיאור תגובת שעון מתאימים לאנלוגיה זו. הזמן החולף מרגע ערבוב המרכיבים ועד לשינוי הצבע נקרא מחזור השעון, והשינוי הפתאומי נקרא האזעקה של השעון.

מבחינה כימית, התהליכים המתרחשים בתגובת שעון אנלוגיים לטיטרציה. בטיטרציה, כידוע, מוסיפים חומר אחד לחומר אחר עד לנקודה קריטית שגורמת לשינוי נראה לעין בתמיסה (נקודת הסיום). **בתגובת שעון, תהליכים כימיים יוצרים חומר שמגיב עם חומר אחר עד לנקודה הקריטית שמפעילה את ה"אזעקה"**. כמו בטיטרציה, התנאים המפעילים את האזעקה הם בדרך כלל עלייה או ירידה מהירה בריכוז של חומר מסוים בתערובת. בתגובת השעון של עמילן ויוד, התנאי שמפעיל את האזעקה הוא העלייה הפתאומית בריכוז I_3^- בתערובת. תגובת השעון של עמילן ויוד יכולה להיחשב כטיטרציה של יוני ביסולפיט HSO_3^- ע"י יוני יודט IO_3^- בנוכחות עמילן כאינדיקטור. העלייה הפתאומית בריכוז יוני I_3^- המתרחשת כאשר כל יוני הביסולפיט נצרכו בתהליך, מפעילה את האזעקה - היווצרות קומפלקס כחול מעמילן ויוני I_3^- . למעשה,

לפניכם תיאור של פעילות מעבדתית לא שגרתית שביצעתי בהנאה בכיתתי - תלמידי יא' במגמת כימיה.

מבוא

מהי תגובת שעון?*

תגובות שעון הן מההדגמות החביבות והדרמטיות ביותר. המוכרת ביותר מהן היא אולי תגובת השעון של עמילן ויוד. בתגובה זו, לאחר ששתי תמיסות צלולות וחסרות צבע מעורבבות יחד, התערובת נשארת לזמן קצר חסרת צבע ואז הופכת באופן פתאומי לכחולה כהה. התנהגות זו היא המאפיינת תגובות שעון: פרק זמן מסוים לאחר שהתגובה החלה לא מתרחש שינוי נראה לעין; ואז, השינוי מתרחש בבת אחת ובאופן פתאומי. השינוי הפתאומי הוא סוד הקסם של תגובות השעון.

תגובות שעון נקראות כך מפני שניתן ליצור אנלוגיה ברמת התפקוד בין התהליכים הכימיים המתרחשים בתגובה לבין פעולתו של שעון מעורר. האנלוגיה מדויקת יותר אם מדובר בשעון ללא מחוגים: רק כשהשעון מצלצל אנו מבינים שהשעון אכן עובד. כך גם בתגובה - רק שינוי הצבע מצביע על כך שתהליכים התרחשו במערכת. גם

* את מהלך הניסוי המתואר כאן בגרסתו הפתוחה והמוזמנה יצירתיות, למדתי מחברתי זהר די-נור ברזילי, בעת שהייתה רכות כימיה בתיכון הישראלי למדעים ואמנויות בירושלים. במסגרת המסורת הבית-ספרית, העלתה דפנה מנדלר, בזמן שהיתה מורה לכימיה בתיכון הישראלי למדעים ואמנויות, את הרעיון לניסוי זה בפני זהר, אם כי בגרסה שונה, מובנית יותר, מעין חקר מודרך. הניסוי מופיע במגוון גרסאות (בעלות הוראות מפורטות) גם בספר ההדגמות של B.Z. Shakhshiri, כרך 4 (הנוכח להלן) בסעיף 10.1 תחת הכותרת The Landolt Iodine Clock: Oxidation of Bisulfite by Iodate

** שרה פרח, עורכת ראשית של העיתון "על-כימיה", מורה לכימיה בתיכון הישראלי למדעים ואמנויות ובב"ס פלך בירושלים

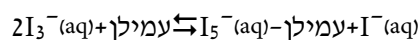
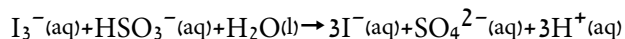
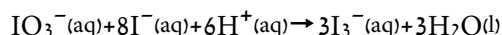
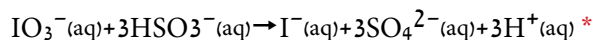
1. מעובד על פי

B.Z. Shakhshiri, Chemical Demonstrations A Handbook for Teachers of Chemistry, Vol.4.,chapter 10 "Clock Reactions".



הגורמים המשפיעים על קצב תגובה. בתגובת השעון של עמילן ויוד (תגובת Landolt) מחזור השעון תלוי בריכוזים ההתחלתיים של יוני ביסולפיט ויוני יודט, בטמפרטורה וב-pH של התערובת. מחזור השעון נמצא ביחס הפוך לריכוזים ההתחלתיים של יוני הביסולפיט ויוני היודט ומשך המחזור מתקצר כשהטמפרטורה עולה או כשה-pH יורד.

התהליך כולו מוצג ברצף הניסוחים להלן:



קומפלקס כחול

* מטעמי נוחות, יוני המימן הושארו כך, חשופים. אם הניסוח הלא מדויק מפריע לכם, אתם מוזמנים להוסיף מולקולות מים כנדרש.

בתגובה הראשונה בסדרה, יוני ביסולפיט מחזרים יודט ליוני יוד. בתגובה השנייה יוני יוד אלה עוברים חמצון ע"י יוני יודט והופכים ליוני I_3^- . בנקודה זו התערובת מכילה גם יוני I_3^- וגם עמילן, שהם המרכיבים היוצרים את הקומפלקס הכחול בתגובה הרביעית. אבל התגובה השלישית מתרחשת בקצב כל כך מהיר, שהיא מונעת את היווצרות הקומפלקס הכחול. בתגובה השלישית יוני I_3^- עוברים חיזור ליוני יוד I^- עד שכל יוני הביסולפיט אוזלים. בנקודה זו, יוני I_3^- מתרכבים עם עמילן ויוצרים את הקומפלקס הכחול עמילן- $\text{I}_5^- (\text{aq})$. יוצא אפוא, שהתמיסה נשארת חסרת צבע כל עוד יוני הביסולפיט מגיבים, וברגע שאזלו, מופיע הצבע הכחול של הקומפלקס.

התוצאה הכוללת של שלוש התגובות הראשונות היא חמצון שלושה מול יוני ביסולפיט על כל מול של יון יודט שעובר חיזור. ההשלכה האופרטיבית היא שאם הריכוז ההתחלתי של יוני הביסולפיט גבוה יותר מפי 3 מריכוז יוני היודט, לא יתרחש שינוי צבע עודף הביסולפיט יצרוך את כל יוני I_3^- שנוצרו בתגובה השנייה.

כל דרך המשמשת למציאת נקודת הסיום של טיטרציה (שינוי צבע, הופעת משקע...), יכולה להיות אזעקה של תגובת שעון.

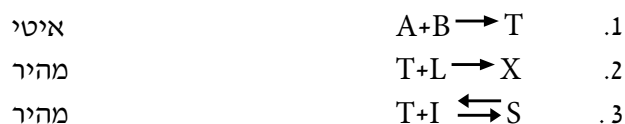
מנגנון כללי לתגובת שעון

תגובות שעון כוללות שלושה תהליכים.

השלב הראשון הוא היווצרות איטית יחסית של חומר ביניים כלשהו. במונחים של אנלוגיית הטיטרציה, חומר ביניים זה הוא המטטר.

התהליך השני הוא צריכה מהירה מאוד של חומר ביניים זה ע"י חומר המהווה גורם מגביל.

התהליך השלישי יוצר את השינוי הנראה לעין ברגע שהגורם המגביל בתגובה נגמר כליל. תהליך זה הוא תהליך בשינוי משקל שמופרע ע"י העלייה בריכוז המטטר. ייצוג סכמטי לשלושת התהליכים הללו יראה כך:



בתחילה תערובת התגובה מכילה את A, L, B, I, כאשר L מייצג את הגורם המגביל (limiting reagent) ו-I מיצג את האינדיקטור. המגיבים A ו-B יוצרים את המטטר T (ואולי גם תוצרים נוספים) בתגובה איטית יחסית. תוצר זה T- מגיב בקצב מהיר עם הגורם המגביל L. T נמצא גם בשינוי-משקל מהיר עם האינדיקטור I ליצירת S (הסינגל - האות האחראי לאזעקה). אבל כל עוד T מסולק בקצב מהיר ע"י L, נותר ריכוזו של T נמוך ושינוי-המשקל נוטה לכיוון המגיבים, כך שיש מעט מאוד S במערכת. ברגע ש-L כולו נצרך, ריכוזו של T במערכת עולה ויש לכך השפעה על מצב שינוי-המשקל בתגובה 3.

מחזור השעון תלוי בקצב של התהליך האיטי שבו נוצר המטטר בתגובת השעון והוא מלמד אותנו כמה זמן נדרש לתגובה האיטית ליצור כמות מספקת של מטטר שישתמש בגורם המגביל בשלמות. מופע האזעקה מסמן שהגורם המגביל אזל לחלוטין.

שעון היוד של Landolt²

מבחינה חזותית זו אחת מתגובות השעון המרשימות ביותר. התגובה מאפשרת מגוון של אפשרויות להדגמת

² התצפית דווחה לראשונה ע"י Landolt ב-1880 ולכן יש הקוראים לתגובה על שמו.



הכימי כך ש"יצלצל" במקומות מדויקים במהלך היצירה המוזיקלית. וכשהכימיה והמוזיקה פועלות בהרמוניה, הכימאי (אנחנו או תלמידינו) יכול להחזיק בידו לרגע קט שרביט של מנצחים, ולנצח, כביכול, בו-בזמן על שתי ההתרחשויות - הכימית והמוזיקלית. ועל זה לא מגיע מחיאות כפיים!! לאחר כל מילות ההקדמה הארוכות, הגיע הזמן להפשיל שרוולים ולגשת למלאכה.

להלן הפעילות כפי שהתבצעה בכיתה.

רעמי תותחים ושעון יוד מטרות הפעילות

יצירת גיוון במעבדה: תלמידי משתתפים בתכנית כימיה בגישה חוקרת, ולכן הם מתנסים בקביעות בניסויי חקר ברמות ובהיקפים משתנים. בדרך כלל הם נהנים מאוד מהעבודה במעבדה ונהנים מעט פחות מכתבת הדו"ח שמתלווה לכל ניסוי. מצאתי לנכון לשבור מדי פעם את השגרה ולתת להם לבצע ניסוי שלא על מנת לכתוב דו"ח (עדיין מצופה מהם לנהל רישום מסודר של התצפיות והתוצאות במהלך עבודתם, אך לא יותר מזה).

אתגר לימודי: הניסוי התבצע לפני לימוד הפרק קצב תגובה, והעיתוי קבע, למעשה, את דרגת הקושי של המטלה שהוצבה בפניהם. מאחר שלא היה להם בסיס ידע בנוגע לגורמים המשפיעים על קצב תגובה או בנוגע לחוקי הקצב כמבטאים את תלות קצב התגובה בריכוזי המגיבים, היה עליהם להיות יצירתיים וחדשניים בעת ניתוח הבעיה שניצבה בפניהם. אפשרות נוספת שעמדה בפניהם הייתה להשקיע מאמץ בחיפוש מידע רלוונטי, וזאת לאחר שהגדירו לעצמם את מהות הבעיה.

חווית לימוד מהנה: תגובת שעון מעצם טבעה מעוררת ציפייה, מתח ולבסוף - תחושת הישג. כשכלל אלה התווספה ההאזנה ליצירה המוזיקלית המתנגנת ברקע, שודרג הניסוי והפך לחוויתי ומעשיר יותר. לדעתי, כשניסוי מצליח לעורר מחשבה ובו-בזמן הוא כיפי-זכינו.

פוטנציאל ייצוגי: התלמידים יכולים להשתמש בניסוי זה באירוע חגיגי שהם עורכים במהלך השנה ולהציגו בפני תלמידים/ מורים/ הורים בליווי הסברים.

מהלך השיעור

1. השמעה ראשונה של הקטע הרלוונטי מתוך היצירה

מן הראוי לציין שרצף התגובות המתואר לעיל הוא בבחינת דרך נוחה לתיאור אפשרי של ההתרחשויות בשעון עמילן-יוד. אין זה בהכרח התיאור המלא של כל התגובות המתרחשות בתערובת הנתונה. הכימיה של יוני ביסולפיט בתמיסה מימית מסבכת את התמונה (בתמיסה נוכחים צורונים שונים, בהם S מצוי בדרגת חמצון +4, כמו סולפיטים ומטא-ביסולפיטים ועוד...), וכן יש תלות ב-pH של התמיסה. מכאן גם נובע שהתלות בין מחזור השעון לחוקי הקצב או למנגנון התגובה היא מורכבת.

אם נתייחס באופן השוואתי לרצף התגובות הנ"ל ולעומתן לסכימה הכללית של תגובת שעון שהצגנו קודם לכן, נציין שבמקרה שלנו המטטר הוא יוני I_3^- (והוא נוצר בשני שלבים ולא בשלב אחד), ואילו הגורם המגביל הוא יוני ביסולפיט. האינדיקטור בתגובה הוא, כמובן, עמילן, שכידוע מכיל עמילוז. עמילוז הוא פולימר של גלוקוז והוא בנוי מיחידות חוזרות של גלוקוז טבעתי. הקומפלקס בין עמילן ליוד נוצר כאשר השרשרת הפולימרית של עמילוז יוצרת גדיל ספירלי שעוטף שרשרת ישרה בת חמישה אטומי יוד. החומר הקומפלקסי הזה בולע במידה רבה אור צהוב ולכן נותן מופע של צבע כחול עמוק.

הערה: כל ההסברים במבוא מיועדים למורה. לגבי התלמידים, לא בהכרח כדאי להיכנס לרמה כזו של פירוט (אני לא נכנסתי). מועיל יותר לדבר על המאפיינים הכלליים של תגובת שעון ולהזכיר רצף של כמה תגובות עוקבות (אפשר להיעזר בתיאור הסכמטי הנ"ל) והופעת צבע רק כאשר אחד המגיבים (הגורם המגביל, במקרה שלנו יוני ביסולפיט) נגמר. רק אז נוצר מפגש בין שני המרכיבים שתגובתם יוצרת את המופע הצבעוני (במקרה שלנו - התגובה בין I_3^- לבין עמילן). לתלמידים סקרנים במיוחד אפשר לתת תיאור יותר מעמיק או להפנות אותם לספרות המתאימה. על כל פנים, לא כדאי לייגע תלמידים שאינם מעוניינים בכל הפרטים והדקדוקים של התהליך. הדבר עלול להחמיץ את המטרה האמיתית של פעילות זו.

שילוב בין תגובת שעון ליצירה מוזיקלית

הרעיון הכללי של הפעילות המעבדתית שתואר בהמשך הוא לשלב בין היכרות עם מאפייניה וקסמה של תגובת שעון לבין האזנה ליצירה מוזיקלית שמתנגנת בחלל הכיתה. המשימה של התלמידים תהיה לכוון את השעון

של התמיסות A ו-B בריכוזים שונים. התלמידים ימזגו ויערבבו כל צמד בארלנמייר אחר, בנקודת זמן מסוימת שנקבעה מראש, במהלך השמעת היצירה 1812 (סעיף 2). התוצאה הצפויה: בתחילה כל התערובות יהיו חסרות צבע. לאחר זמן מה, אחת-אחת לפי תורה, הן יהפכו לתמיסות בעלות צבע כחול כהה. **כל תערובת אמורה לשנות את צבעה בזמן אחר, המותאם למטח יריות אחר.**

5. כל קבוצה מבצעת את הניסוי עם התמיסות A ו-B המקוריות, כמו בהדגמה, מודדת את משך הזמן מרגע הערבוב של שתי התמיסות ועד להופעת הצבע הכחול (מחזור השעון) ורושמת את הנתון.

6. כל קבוצה מחפשת דרך למציאת 11 ההרכבים הרצויים.

בכיתה שלי חלק מהתלמידים פעלו באופן המעשי וניסו מיהולים שונים של התמיסות המקוריות. חלקם הדליקו את המחשב, בנו טבלה ובעקבותיה שרטטו גרף כיול של ריכוז אחת התמיסות כנגד זמן (בלי לדעת שכך קוראים לגרף שעשו), וחלק מהם ניסו לראיין אותי, אך נשלחו לחפש בספרים מהם הגורמים המשפיעים על קצב תגובה, ובאופן ספציפי - מהי החוקיות שקושרת בין השינוי בריכוז המגיבים לשינוי בקצב התגובה. ברקע עמדה ההמלצה שלי שיחסכו ב"עבודה שחורה" ויחזרו לפתרון חכם.

7. כשקבוצה מסוימת מוכנה עם תפריט מדויק של 11 הצמדים, כל הכיתה מתגייסת לביצוע הערבובים המתאימים. (בו-בזמן, זוכרים?). מעמידים על שני שולחנות מחוברים את סדרת הארלנמיירים והמשורות, מפעילים את הנגן ועם מתן האות (המוזיקלי) - מוזגים את התמיסות לארלנמיירים ומצפים...

אפשרות חלופית: קבוצות שונות יתרמו למאמץ המשותף אחד או שניים מהצמדים על פי הזמנים המבוקשים וכך למעשה המטלה הופכת להיות כיתתית ולא קבוצתית. ושוב, כשהתמיסות מוכנות כל התלמידים מתייצבים, כל הארלנמיירים עומדים בשורה, ומקווים לטוב.

משך הניסוי

לניסוי הוקדשו שני שיעורי מעבדה כפולים. הפעם הראשונה התבצעה לפי התיאור המפורט הנ"ל. בסיום השעתיים הראשונות עדיין לא הצליחו התלמידים להשלים את משימתם

1812 - פתיחה מאת צ'יקובסקי. ביצירה ישנן שתי סדרות של רעמי תותחים, האחת מורכבת מ-3 רעמים והשנייה מ-11 רעמים. אנחנו מתכוונים לסדרה השנייה.

בעקבות ההשמעה אפשר לתאר את הרקע לכתיבת היצירה (תבוסתו של נפוליאון ברוסיה) ולהצביע על אלמנטים מוזיקליים המופיעים בה - מנגינה עממית רוסית מול צלילים מההמנון הצרפתי ה-"Marseillaise" ועוד... אם יש בכיתה תלמידים שעוסקים במוזיקה אפשר להיעזר בהם בתיאור וניתוח היצירה. אני מציעה לא להיבהל ולא להירתע מהיצאה מהמסגרת ומתחום ההתמחות שלנו.

2. השמעה שנייה יותר מדוקדקת של הקטע הנבחר מתוך היצירה. תוך כדי האזנה למוזיקה, התלמידים רושמים את הזמנים שבהם נשמעים מטחי היריות, יחסית לנקודה מסוימת ביצירה המוזיקלית שנקבעת מראש על ידנו (כדאי לבחור בקטע מוזיקלי שיהיה ברור ומובחן). ייתכן שיהיה צורך לחזור ולהשמיע את הקטע כדי לוודא שרשמנו בצורה מדויקת את כל הזמנים. הערה: פערי הזמן בין רעמי התותחים הם בסדר גודל של שניות ואורך הקטע כולו הוא 60 - 65 שניות.

3. המורה מדגים את תגובת השעון של עמילן ויוד.

הרכב התמיסות:

תמיסה A: 4.3 גר' אשלגן יודטי, KIO_3 , בליטר תמיסה. תמיסה B: 4 גר' עמילן, 0.2 גר' נתרן מטא-ביסולפיט, $Na_2S_2O_5$, ו-5 מ"ל חומצה גפרתית 1.0M בליטר תמיסה.

הערה: אמנם בתיאור רצף התגובות המופיע לעיל היה המגיב יוני ביסולפיט ואילו כאן מופיע מטא ביסולפיט, אך בתמיסה מימית מתקיים שיווי-משקל בין יוני הביסולפיט לדימר שהם יוצרים, יון דיסולפיט (או מטא ביסולפיט בנומנקלטורה של פעם), לפי הניסוח הבא:



מטא ביסולפיט ביסולפיט

מהלך העבודה: מודדים במשורה 10 מ"ל מתמיסה A ומוזגים לארלנמייר של 50 מ"ל. מודדים במשורה 10 מ"ל מתמיסה B ומוסיפים לאותו ארלנמייר. מנערים ומערבבים. התערובת המתקבלת חסרת צבע. לאחר זמן המתנה קצר מופיע צבע כחול כהה.

4. **הגדרת המטלה:** תזמון הופעת הצבע הכחול - המעיד על קבלת הקומפלקס בין יוד לעמילן - לצלילי רעמי התותחים ביצירה המוזיקלית 1812. **כנגד 11 רעמי התותחים, על התלמידים להכין סדרה בת 11 צמדים**

מזדמן הזמן לצפות בתוצאה (הלבורנטית, רכז המדעים ומורים ותלמידים שנקרו למסדרון בזמן המתאים). התלמידים עמדו במטלה והקהל התרשם מאוד. התלמידים בחרו לבצע את הניסוי פעם נוספת כחלק מה"תכנית האמנותית" בערב כימיה שערכו לתלמידי כימיה בשכבת י' ותלמידי מדעים אחרים משכבת יא'.

וליצור את כל ההרכבים הנדרשים. לכן החלטתי להקדיש לניסוי שיעור מעבדה נוסף. התלמידים נראו מעוניינים. כעבור שבוע חזרנו על הניסוי. הפעם השנייה הייתה תכליתית יותר. התלמידים ידעו בדיוק מה הם אמורים לעשות. הם בדקו, הכינו, ערבבו, תזמנו, ולקראת סוף השיעור הגיעו לתוצאות הרצויות. כל הכיתה השתתפה בהפעלה וקהל

הערות

- בגלל רגישות התמיסות (יוני ביסולפיט בהיותם מחזרים טובים חשופים לחמצון ע"י האוויר), יש להכין לכל מעבדה תמיסות A ו-B טריות (יש להשתמש בתמיסות בתוך 3 ימים).
- ההכנה מחדש של התמיסות יכולה לשנות במקצת את ריכוזיהן ולכן אם התלמידים הכינו לעצמם גרף כיוול - הם יצטרכו להכינו שוב. התלמידים מתאכזבים מעט מכך, אבל עם הזמן המיומנות שלהם משתפרת והתהליך נמשך פחות זמן.
- הטמפרטורה משפיעה כמובן גם היא על קצב התגובה, וזו סיבה נוספת המחייבת הכנת גרף כיוול חדש לתגובה בכל הפעלה נוספת של הניסוי.
- לדעתי, התרומה להבנת משמעותו ומגבלותיו של גרף כיוול שווה את כל הטרחה.

בטיחות

יוני ביסולפיט הם בעלי כושר חיזור גבוה ולכן יש להיזהר בהתאם. תמיסות בריכוז גבוה של ביסולפיט עלולות לגרום לגירוי בעור וברקמות ריריות. בסביבה חומצית, תמיסות של ביסולפיט עלולות לשחרר גפרית דו חמצנית במצב גזי, העלולה לגרום לגירוי במערכת הנשימה. יש אנשים הרגישים במיוחד לסולפיטים ועליהם להימנע ממגע ישיר עם חומרים אלה.

להלן תמונה של תלמידי בפעולה.

