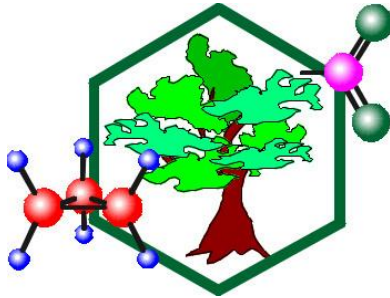


## כימיה ירוקה

ד"ר אושרית נבון

המחלקה להוראת המדעים – מכון ויצמן למדע



התעשייה הכימית היא ענף הייצור הגדול ביותר בארה"ב ובמדינות מפותחות אחרות. חומרים שימושיים מיוצרים בתהליכים כימיים, ובתוך כך נוצרים גם חומרי פסולת. בעבר, קברו את חומרי הפסולת באדמה או שפכו אותם לימים או לנהרות. גם כיום נוהגים כך במקומות רבים, אך המגמה הרווחת בעולם שונה, וברור שיש לנקוט אמצעים אחרים לטיפול בפסולת ובעיקר לנסות ולמנוע את היווצרות החומרים האלו בתהליכי הייצור הכימיים.

חיינו מושפעים רבות ממדע הכימיה. רוב החומרים מיוצרים לשרת את העולם ולרווחתו. כמות הכימיקלים המיוצרים בעולם בשנה יכולה למלא רכבת מרובת קרונות עמוסים, שתקיף את כדור הארץ ארבע פעמים. חומרים אלה משמשים כמעט בכל תחומי החיים: מכוניות, כבישים, חממות, בתים, תרופות, חקלאות ועוד. היקף הייצור האדיר מחייב לחשוב כיצד אפשר לייצר את החומרים האלו בלי לפגוע בסביבה. תפיסה זו הובילה להתפתחותו של ענף מדעי חדש יחסית הקרוי "כימיה ירוקה".

למדע "הכימיה הירוקה" שתי מטרות עיקריות:

1. פיתוח תהליכים חדשים שאינם כוללים חומרים מסוכנים ואינם יוצרים זיהומים סביבתיים.
2. מציאת דרכים חדשות (לא דרך הכימיה הקלאסית) לייצור חומרים ידועים שיובילו להפחתת המפגעים והזיהומים תוך התבססות על הקיים בטבע. באופן זה, הכימאים יכולים להשפיע רבות על בריאות האדם והסביבה. ייצור חומרים כאלה צריך להיות כלכלי, נוסף על היותו כדאי מבחינה אקולוגית.

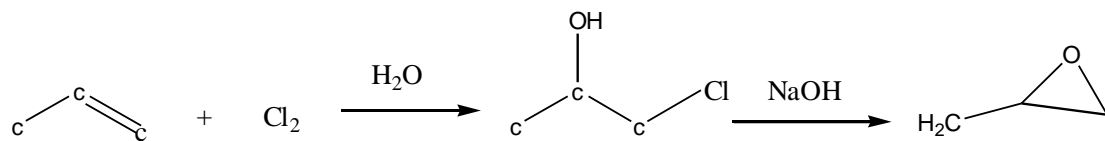
הכימיה הירוקה השתרשה כמדע אקדמי וקיבלה הכרה בתעשייה ובמדיניות ממשלות. בראשית שנות ה-90 של המאה העשרים הופעלה בארה"ב תוכנית מיוחדת לעידוד מדע "הכימיה הירוקה". מאז הצטרפו ליוזמה כמה מדינות בעולם. בארה"ב התעשייה הכבדה פולטת לסביבה, מדי שנה, יותר משלושה מיליארד טונות של פסולת כימית, הכוללת חומרים רעילים. התעשייה מוציאה כ-150 מיליארד דולר כדי להפחית את הנזק הנגרם מפסולת זו, כמתחייב מהחוקים השונים המגדירים ומסדירים את תהליכי העיבוד ואת אחסון הפסולת. נוסחו 12 עקרונות מאפיינים לגישת הכימיה הירוקה, והם מקובלים בעולם כולו. לדוגמה: שימוש בממסים מומלצים ולא

רעילים, ביצוע ריאקציות "נקיות", הימנעות מקבלת פסולת כימית רעילה, שימוש בשיטות סינתזה שתוצריהן אינם רעילים ועוד.

תחום מחקרי זה מתפתח בהתמדה. הוקמו ארגונים עולמיים ומתקיימים כנסים מדעיים בנושא. קיים גם עיתון בתחום ושמו "כימיה ירוקה" בהוצאת האגודה המלכותית הבריטית לכימיה. ניתן למצוא פרסומים בנושא גם בכתב העת המדעי היוקרתי (Nature Sarbu, Styranec and Beckman, 2000). פרסים על עבודות מחקר בתחום מחולקים בארה"ב על פי מדיניות ממשל קלינטון מאז שנת 1995. התפתחותו של תחום הכימיה הירוקה תסייע, בוודאי, גם לשנות את תדמיתו של מדע הכימיה ולקרב אותו לציבור. מחיפוש בספרות המדעית ובאינטרנט ניכר, כי הנושא "כימיה ירוקה וחינוך" התפתח אף הוא והשתלב בתוכניות לימודים. תלמידים וסטודנטים מתעניינים בשימור עולמם וככל שעולה הדאגה העולמית לאיכות הסביבה ולשימורה נראה כי רבים מעוניינים להבין כיצד פעילות האדם משפיעה על הבריאות ועל איכות החיים בעולמנו. (Collins, 1995, Heinhorst and Cannon, 2001, Michael, 1999, Reed and Hutchison, 2000)

דוגמה למחקר מוביל בארץ בתחום זה מתבצע במעבדתו של פרופ' רוני נוימן, מהמחלקה לכימיה אורגנית במכון ויצמן למדע. מטרת המחקר היא לפתח תהליכי חמצון שאינם מזהמים, כלומר שאינם משאירים פסולת כימית ויכולים להיקרא תהליכי "חמצון ירוק". בתהליכי חמצון נוצרת בנוסף על התוצרים המבוקשים גם פסולת רבה מאוד. כך קורה גם בתהליך הייצור של פרופילן אוקסיד, חומר המשמש לייצור של תקליטורים, כיסויים לחממות ומוצרי פלסטיק רבים. היקף המכירות של פרופילן אוקסיד מוערך בכ- 5 מיליארד דולר לשנה.

תגובת הייצור הקלאסית לקבלת פרופילן אוקסיד היא:



אחד מתוצרי הלוואי של התגובה הוא: NaCl, תעשיית הפרופילן אוקסיד בעולם מייצרת בשנה כעשרה מיליון טון של נתרן כלורי וכמאה אלף טון של תרכובות אחרות המכילות כלור ומשגרת אותם לאתרי פסולת שם הם גורמים לנזק סביבתי חמור. אחד הפרויקטים שבו עוסקת קבוצתו של פרופ' נוימן הוא פיתוח תהליך נקי לייצור פרופילן אוקסיד. התהליך קטליטי ומתבסס על תגובה עם חמצן מן האוויר בנוכחות זרז (קטליזטור) המבוסס על קומפלקס הכולל את המתכת רותניום. זוהי דוגמה לאחת הגישות המחקריות בתחום "הכימיה הירוקה", המפתחת תהליכים שבהם חמצן מן האוויר מגיב עם חומרים אורגניים בלי לגרום לשריפתם. תפקיד הזרז הוא להחיש את מהלך תגובות כימיות ולהשפיע על כיווןן.

התגובה פותחה במעבדה, המנגנונים המעורבים נבדקו בשיטות כימיות מתקדמות כמו תהודה מגנטית גרעינית (NMR).

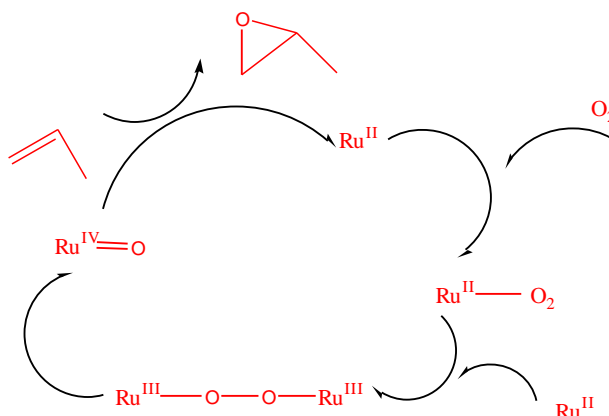
### NMR (Nuclear Magnetic Resonance)

שיטה אנליטית ספקטרוסקופית, המבוססת על התכונות המגנטיות של גרעינים מסוימים. שיטה זו חשובה מאוד לחוקרי הכימיה, שכן היא מספקת מידע על מרכיבי הדוגמה, ניקיונה והמבנה המולקולרי שלה. השיטה אינה מוגבלת למצב צבירה אחד, ניתן למדוד תמיסות, נוזלים, מוצקים וגבישים נוזליים.

התכונות המגנטיות של גרעיני אטומים מסוימים גורמות להם להתנהג כמו מגנט בצורת מוט זעיר כאשר מופעל עליהם שדה מגנטי. הגרעינים המגנטיים החשובים ביותר לכימאים הם גרעין המימן, שבו פרוטון יחיד, וגרעין של פחמן-13. בהעדר שדה מגנטי, ה"מוטות" המגנטיים מסודרים בצורה אקראית, והשדה מגנטי גורם להם להסתדר כך שהדוגמה כולה הופכת להיות בעלת תכונות מגנטיות. השיטה מאפשרת לקבל מידע על הסביבות הכימיות של האטומים השונים ועל הסידור המולקולרי. לפרטים נוספים, ניתן לקרוא באתר האינטרנט:

[http://www1/snunit.k12.il/heb\\_journals/mada/282062/html](http://www1/snunit.k12.il/heb_journals/mada/282062/html)

התגובה מתרחשת במעגל הקטליטי כמתואר להלן:



מתכת רותניום בדרגת חימצון דו ערכית (הקשורה לליגנד) נקשרת היטב לחמצן. במעגל זה הרוטניום משנה את הערכיות מ-2 ל-4+ ובנוסף נשברים ונוצרים קשרים. חשוב לציין, כי זהו הפיתוח השני בעולם לתהליך ייצור פרופילן אוקסיד לשימוש בתעשייה ובכך ניתן להשפיע רבות על היווצרות זיהום סביבתי.

חומרים נוספים הנחקרים במעבדתו של פרופ' נוימן הם אלדהידים ארומטיים המהווים חומרי ביניים חשובים לייצור של תרופות, חומרי טעם וריח וחומרי הדברה לחקלאות. המחקר מבוצע על שרשרת תגובות חמצון שאותן מנסים לעצור באמצע הדרך כדי לקבל את האלדהידים הארומטיים כתוצרי ביניים.

נתאר בקצרה שני מאמרים שפורסמו בכתב העת Nature המדגימים מחקרים מובילים בעולם בתחום.

1. (Sarbu, Styranec and Beckman, 2000) מתאר שימוש בפחמן דו-חמצני כממס המתאים לתהליכים רבים. הממסים הנפוצים היום הם ממסים אורגניים אך אלה רעילים ודליקים וקשים

למחזור. במהלך המחקר על  $\text{CO}_2$  הסתבר כי הוא ממס בעייתי מאוד וכדי להגביר את יכולת ההמסה שלו יש להוסיף לו תוספים. במחקר שהתבצע באוניברסיטת פיטסבורג שבפנסילבניה, פותח תוסף זול שמגביר את יכולת ההמסה של  $\text{CO}_2$  ומאפשר התרחשות של ריאקציות כימיות בתווך הנוצר. תוצאות המחקר פותחו ליישומים מסחריים של  $\text{CO}_2$  כממס.

2. (Aurbach, Schechter, Gofer, Gizbar, Turgeman, Cohen, Moshkovic and Levi, 2000) עבודה שבוצעה בראשותו של פרופ' אורבך, מהמחלקה לכימיה באוניברסיטת בר – אילן. המחקר התמקד בסוללה המכילה מגנזיום ותרכובות נוספות המכילות מגנזיום. התכונות התרמודינמיות של המגנזיום עושות אותו מועמד טבעי לשימוש כחומר לאנודה בסוללות ה ניתנות לטעינה מחדש, בשל צפיפות אנרגטית גבוהה יותר. המגנזיום לא יקר, ידידותי לסביבה ובטוח לשימוש. פיתוח סוללות המגנזיום לא היה פשוט ובעייתי. במאמר מוצג הפיתוח הכימי.

יעוץ פדגוגי: פרופ' אבי הופשטיין

יעוץ מדעי: פרופ' רוני נוימן

### מקורות:

- Aurbach. D, Lu. Z, Schechter. A, Gofer. H, Gizbar. R, Turgeman. R, Cohen. Y, Moshkovich. M, Levi. E, (2000). Prototype systems for rechargeable magnesium batteries. Nature. 407, 724-727.
  - Cann. M.C, (1999). Journal of Chemical Education. Bringing State -of - the Art, Applied, Novel, Green Chemistry to the Classroom by Employing the Presidential Green Chemistry Challenge Awards. 76, 1639-1641.
  - Collins. T.J, (1995). Journal of Chemical Education. Introduction Green Chemistry in Teaching and Research. 72, 965-967.
  - Heinhorst. S, Cannon. G, (2001). Journal of Chemical Education. Nature: "Green" Chemistry, Natural Antioxidants, and a DNA – fueled Mashine. 78, 150-151.
  - <http://pubs.acs.org/cen/coverstory/7929/7929greenchemistry.html>
  - <http://www.chemsoc.org/network/gen.html>
  - <http://www.epa.gov/greenchemistry/whatis.htm>
  - Reed. S.M, Hutchinson. J.E., (2000). Journal of Chemical Education. Green Chemistry in the Organic Teaching Laboratory: An Environmentally Benign Synthesis of Adipic Acid. 77, 1627-1629.
  - Sarbu. R ,Styrane. T, Beckman. E.J, (2000). Nature. Non – fluorous polymers with very high solubility in supercritical  $\text{CO}_2$  down to low pressures. 405, 165-168.
- המכון-חדשות מדע בשפה ידידותית, גיליון 24, עמוד 14-15, אוגוסט 2001