הכימיה – אתגר

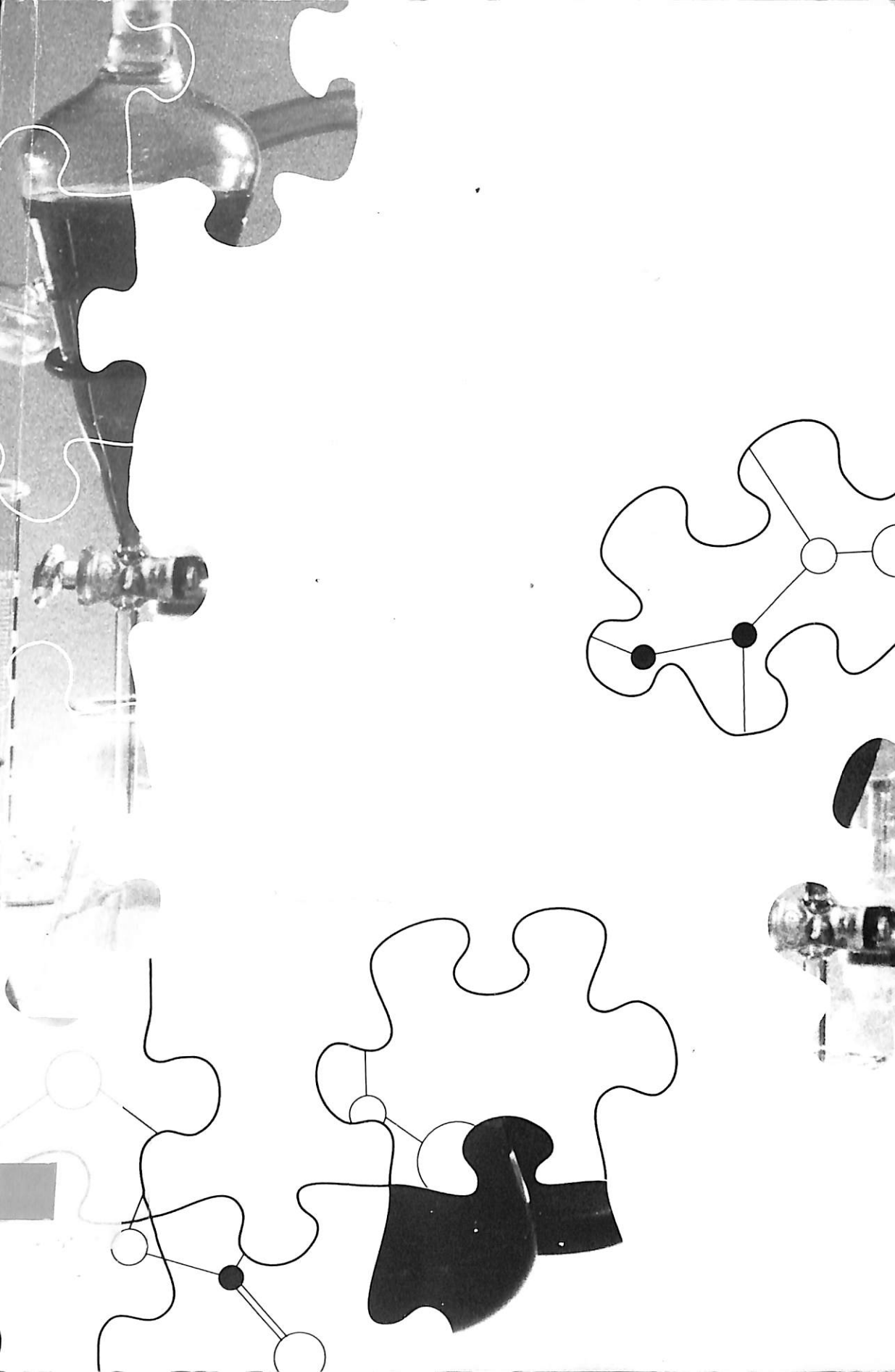
תרכובות הפחמן

נאוה מילנר

מדריך למורה

מהדורה ניסויית

המחלקה להוראת המדעים
מכון ויצמן למדע



תרכובות הפחמן

מדריך למורה

עריכה מדעית: אבי הופשטיין, יהודית זילברשטיין

עיצוב וגרפיקה: נורית מדברי
הדפסה ועריכה במחשב: שלי ליבנה, אבי טל
צילום העטיפה: שלום נידם

הכימיה – אתגר

תרכובות הפחמן

נאוה מילנר

מדריך למורה

מהדורה ניסויית

המחלקה להוראת המדעים מכון ויצמן למדע

יוצא לאור ביוזמתו ובפיקוחו של

המרכז הישראלי להוראת המדעים ע"ש עמוס דה-שליט

מיסודם של

משרד החינוך והתרבות, האוניברסיטה העברית בירושלים ומכון ויצמן למדע, רחובות

בהכנתו של המדריך למורה היו מעורבים אנשים רבים וברצוני להודות לכל אלה אשר תרמו בשלבים השונים בכתיבתו ועריכתו.

תודה מיוחדת

— לפרופ' אבי שנצר מהמחלקה לכימיה אורגנית במכון ויצמן למדע.

— ליהודית זילברשטיין, חברת קבוצת הכימיה במחלקה להוראת המדעים במכון ויצמן למדע, על עזרתה הרבה בכל שלבי הכתיבה והעריכה.

תודה

— לכל חברי קבוצת הכימיה, במחלקה להוראת המדעים במכון ויצמן למדע, על העידוד, על ההערות המועילות והנכונות לעזור בכל עת.

— לנורית ארד על העזרה בהכנת ניסויים וציוד מעבדה.

תוכן

מבוא

מתכונת הספר

הספר "תרכובות הפחמן", מיועד לתלמידים הלומדים כימיה בהיקף של שלוש וחמש יחידות לימוד, בכיתות יא'-יב'.

בכתיבתו נלקח בחשבון, שמושגים, הקשורים למבנה המולקולות והקשרים הבין מולקולריים, הכלולים בפרקים א'-י' בספר "הכימיה — אתגר" ונושאי הפרקים "אנרגיה כימית" ו"שווי משקל כימי", ידועים לתלמידים.

המתכונת בה נכתב ספר זה נועדה:

1. לאפשר לתלמידים להכיר את תרכובות הפחמן ולדון בתכונותיהן על בסיס הקשר בין מבנה המולקולות לבין תכונות החומרים.
2. ליצירת קשר בין כל פרקי הספר ולביסוס הנושאים החדשים על מושגים, שמוכרים לתלמידים מלימודים קודמים.

לימודי כימיה אורגנית כרוכים בהכרת תרכובות רבות, וכדי להפוך את הנושא לבהיר ומענין יותר, מומלץ לגוון את השיטות ואמצעי ההוראה. להלן הצעות אחדות העשויות לשרת מטרות אלה.

א. לדון בבעיות ובשאלות שפתרונן עוזר להעמיק את ההבנה בנושא.

ב. להשתמש במודלים כדי לעזור לתלמידים בראייה המרחבית של המולקולות.

ג. להדגים, ובמידת האפשר, להנחות תלמידים לבצע ניסויים במעבדה.

קיימות מגבלות רבות בעבודה עם חומרים אורגניים במעבדת בית הספר. העדר ציוד מתאים, רעילות ודליקות של תרכובות רבות, כל אלה מאפשרים לבצע רק ניסויים מעטים. כתחליף לחלק מהניסויים מומלץ להשתמש בתוכנת מחשב הקיימת בנושא תרכובות פחמן, לבקר במפעלים (בבתי זיקוק, לדוגמה), להעזר בשאלות חקר ובמאמרים בעתונות המדעית.

אירגון חומר הלמידה בספר התלמיד

א. **פרק מבוא** — כולל סקירה קצרה על התפתחותה של כימיה אורגנית — כימיה של תרכובות הפחמן. כמו כן, מוצגים בסעיף זה המאפיינים הייחודיים של תרכובות אלה.

ב. **חומר הלימוד** — כלול בפרקים א'-ה' המכסים את הסילבוס, כפי שהוצג על ידי ועדת המקצוע של משרד החינוך והתרבות. יחד עם נושאי הלימוד העיקריים, מרבית הפרקים כוללים סעיפים, שנועדו להציג הבט נוסף בנושאים מסוימים הנלמדים בפרק. מוצגות בהם דוגמות, שבאות להראות את הפעילות של חומר מסוים במערכות ביולוגיות או רקע היסטורי קצר, שקשור לתגלית מדעית. סעיפים אלה כתובים בצבע שונה.
בפרקים א' ו-ה' מובא דיון במנגנונים של תהליכי התמרה ותהליכי סיפוח, במטרה להסבירם ברמה מולקולרית. אין לחייב את התלמידים ללמוד לנסח את מנגנוני התגובות, אך הכרתם עשוייה לעזור להבנה טובה יותר של תהליכים אלה.

ג. **שפת הכימאים** — סעיפים, שמופיעים בפרקים ב' ו-ג' ובהם רוכזו הנושאים הבאים:

— ניסוח תגובות בשיטת תרשים זרימה.

— שיטות הכינוי של תרכובות הפחמן.

— גורמים המשפיעים על אנתלפיות האידוי, נקודות הרתיחה והמסיסות של כהלים.

— שיטות לקביעת נוסחה אמפירית ומולקולרית של תרכובות הפחמן.

סעיפים אלה מכילים שאלות ותרגילים לדוגמה עם פתרונות מפורטים.
חלק מהנושאים, שכלולים בשפת הכימאים, מבוססים על עקרונות מוכרים לתלמידים מלימודים קודמים וניתנים ללימוד עצמי על ידם.

ד. **סיכום** — מופיע בסיומו של כל פרק ובו כלולים מושגי היסוד שנלמדו בפרק עצמו.

ה. **שאלות** — מצויות בסיומו של כל פרק ומיועדות לתירגול ולבדיקת ההבנה של החומר הנלמד.

ו. **ניסויים** — בספר כלולים 11 ניסויים. חלק מהם ניסויי מורה וחלק מיועד לעבודה עצמית לתלמידים. בהמשך, במדריך זה, מובאות הנחיות לביצוע הניסויים וגם מספר ניסויי בחירה נוספים.

ז. **חומר רקע** — הפרקים ב', ד' ו-ה' מלווים בחומר רקע בנושאים הבאים:

— הפחמן האסימטרי

— סבון ודטרגנטים

— מסתרי הטבעת הבנזנית

חומר הרקע נועד להעשרת הידע של התלמידים. הוא יכול לעזור להם בהמשך, בלימודי הכימיה בהיקף מורחב. אפשר להמליץ לתלמידים לעיין בו ולדון בנושאים אלה בכיתה בעזרת שאלות מנחות.

להעשרת הידע, מומלץ להפנות את התלמידים למקורות נוספים: אנציקלופדיות, חוברות "לדעת", "מדע", מאמרים בירחונים Science, Chemistry in Britain, Scientific American, עיתונות יומית; כל אלה עשויים לשמש מקור של מידע ולעורר בהם סקרנות ומוטיבציה.
ניתן לעיין בעיתונים אלה בספריות במחלקות למדעים או במחלקות להוראת המדעים במוסדות להשכלה גבוהה.

מתכונת המדריך למורה

מטרתו העיקרית של המדריך למורה לעזור למורים בפתרון בעיות, העשויות להתעורר תוך כדי הוראת הנושא. המדריך מכיל חמישה פרקים בהתאם לפרקי הספר ונספחים א', ב' ו-ג'.

פרקי המדריך כוללים:

א. המלצות הנוגעות לסדר ההוראה והצעות לשילוב ניסויים ושאלות.

ב. הערות והסברים לבעיות, שפתרונן דורש התיחסות לנושאים, שאינם כלולים בתוכנית של שלוש יחידות לימוד.

ג. הנחיות לביצוע ניסויים, שמופיעים בגוף הספר והצעות לניסויי בחירה נוספים.

ד. שאלות בחירה, תוספות והרחבות בנושאים אחדים.

ה. פתרונות לשאלות מובחרות.

בנספחים כלולים:

א. אוסף שאלות, שחלקן הוצע על ידי המורים וחברי קבוצת הכימיה.

ב. דיון בנושא "מסיסות".

ג. חומר העשרה בנושאים "פראונים" ו-"פולרנים".

פרק א - מתאן ונגזרותיו

למידה היא תהליך פעיל, אשר במהלכו מושגים חדשים מתווספים למסגרת של ידע קיים (לפי פיאז'ה, אוסובל). על מנת להגביר את יכולתו של הלומד לקלוט מושגים חדשים, יש להגביל את כמות המידע החדש ולקשרו לנסיונו הקודם. חיוני אם כן, לבסס נושא חדש על עקרונות קיימים אצל התלמיד ו"להלביש" אותו על מסגרת מחשבתית קיימת.

באופן מסורתי, נהוג להתחיל את לימודי הכימיה האורגנית בחלוקה של החומרים לפי קבוצות פונקציונליות, בשינון נוסחות ושמות של תרכובות חדשות רבות ובניסוח תהליכים להפקתן. שיטת לימוד זו יכולה לעורר אצל התלמיד קשיים, שמקורם בהרגשה, כי התחום חדש ואינו קשור למושגים שלמד עד כה. הפרק הנוכחי נועד ליצירת קשר בין המושגים שנלמדו בפרקים קודמים לבין הנושאים החדשים.

מטרות הפרק:

א. להדגיש את חשיבותן של תרכובות הפחמן כמרכיב עקרי של חומרים, שמצויים בכל תחומי חיינו.

ב. להציג את עקרונות הכימיה האורגנית על בסיס דומה לזה של הכימיה האנאורגנית: קישור, שיווי משקל, קינטיקה, תרמודינמיקה, ומיון התגובות לסוגים, כדוגמת, חומצה-בסיס, חמצון-חיזור.

ג. להציג מאפיינים ייחודיים של תרכובות הפחמן.

ד. להבליט את הקשר בין תכונות החומרים לבין מבנה המולקולות שלהם.

הפרק פותח בהצגה של מספר חומרים טבעיים וחומרים סינתטיים, שלקוחים מהעולם הסובב אותנו וכולם מכילים את תרכובות הפחמן. הצגה זאת נועדה להדגיש, כבר בתחילת הספר, את החיוניות של התרכובות והשימוש הרחב בהן בכל תחומי חיינו. בהמשך הפרק נדונות תכונות של תרכובות פחמן פשוטות,

נגזרותיו של מתאן. דיון זה מאפשר להבליט, כיצד שינוים קטנים, לכאורה, במבנה המולקולות גורמים לשינוי ניכר בתכונות החומרים. התכונות מוסברות במונחים של מבנה וקישור, על בסיס עקרונות, שמוכרים לתלמידים מלימודים קודמים.

ניתן לנצל את חלקו הראשון של פרק זה לחזרה על הנושאים הבאים:

— מבנה מרחבי של מולקולות וקוטביותן

— קשרים בין מולקולריים

— אנתלפיית הקשרים וחישוב ΔH° של תהליכים.

המושגים, הכלולים בחלק זה, עוזרים להבנת תהליכים חדשים, אופייניים לתרכובות הפחמן, כדוגמת תגובות התמרה של מתאן ומתאנול. השאלות 1, 2, 3, 4, 7 מיועדות לתרגול בנושאים אלה.

התגובות של מתאן ומתאנול

תגובות ההתמרה של מתאן ומתאנול הן תגובות מסוג חדש מבחינתו של התלמיד. הכרת תהליכים אלה, שדומים להם מופיעים גם בפרקי ההמשך, איננה מטרה עיקרית בשלב זה. תהליכי התמרה המוצגים נועדו להדגיש כיצד משפיעים הבדלי הקוטביות בקשרים הניתקים במולקולות המגיבים על התכונות הכימיות של התרכובות.

מומלץ, אם כן, לציין בסעיף זה את הנקודות הבאות:

א. מתאן, CH_4, שמורכב ממולקולות חסרות דו-קוטב קבוע, מגיב בתגובות התמרה עם הלוגנים (Cl_2 או Br_2), שאף להם מולקולות חסרות דו-קוטב קבוע. התגובות מתרחשות בחימום או הארה, כאשר החומרים המגיבים במצב גזי, במצב נוזלי או מומסים בממס בעל קוטביות נמוכה. **תהליכים אלה לא הפיכים**, ובמהלכם ניתקים הקשרים באופן הומוליטי: נוצרים רדיקלים חופשיים.

ב. ההתמרה של קבוצת OH במולקולות מתאנול, CH_3OH, או של אטום הלוגן במולקולות מתיל הליד, CH_3X, מתרחשת בחימום, בתמיסה מימית או בתמיסת ממס קוטבי. **התהליכים הפיכים** ובמהלכם ניתקים קשרים

באופן הטרוליטי: זוג האלקטרונים נשאר באטום החמצן או אטום ההלוגן. תרכובות, כדוגמת NH_3, HCl, H_2O, שמגיבות עם מתאנול או עם מתיל הליד, מורכבות ממולקולות עם דו-קוטב קבוע. בתהליכי התמרה אלה, אטומי פחמן, בעלי מטען חיובי חלקי, יוצרים קשר חדש עם אטומי חמצן, חנקן והלוגנים.

לדוגמה, ניסוח תגובות התמרה אחדות:

מתאנול מגיב עם HBr או HI בחימום:

$$CH_3OH \xrightarrow{HBr_{(g)}} CH_3Br$$

תגובה דומה, בין CH_3OH ו- HCl, שמתוארת בספר, איטית מאד ויוצאת לפועל רק בחימום ובנוכחות הזרז $ZnCl_2$.

מתיל הלידים, בדרך כלל CH_3Br או CH_3I, יכולים להגיב:

עם תמיסה מימית של NaOH: $CH_3Br \xrightarrow{OH^-_{(aq)}} CH_3OH$

עם אמוניה בעודף: $CH_3Br \xrightarrow{NH_{3\,(g)}} CH_3NH_2$

עם מתאנול: $CH_3Br \xrightarrow{CH_3OH_{(l)}} CH_3OCH_3$

כיצד מתרחשות תגובות ההתמרה?

בסעיף זה נדונים המנגנונים של תהליכי התמרה:

- מנגנון של רדילקים חופשיים.
- מנגנון יוני.

כאמור במבוא, על התלמידים לא חלה החובה ללמוד את המנגנונים, אך הכרתם יכולה לתרום להבנה טובה יותר של תהליכי ההתמרה. לכן מומלץ לדון בהם, אם הזמן מאפשר זאת. הדיון במנגנון רדיקלי עשוי להועיל לתלמידים, הלומדים בשלב מאוחר יותר את הפרק "פולימרים סינטטיים". בפרק זה נדונים תהליכי פילמור

במנגנון רדיקלי ולימוד תהליך ההתמרה של מתאן, המתבסס על עקרונות דומים, עשוי לתרום להבנה טובה יותר של תהליכי הפילמור.
בתרגיל שלהלן מובאות שאלות אחדות, שקשורות למנגנון ההתמרה של מתאן. כדי לענות על השאלות, מומלץ לעיין במנגנון של התהליך, כפי שמתואר בספר, עמוד 21.

תרגיל

נתונים שינויי האנתלפיה בתהליכים הבאים:

I. $Cl_2 \longrightarrow 2Cl\cdot$ $\Delta H^o = 242\ kJ$

II. $Cl_2 \longrightarrow Cl^+ + Cl^-$ $\Delta H^o = 1130\ kJ$

III. $CH_4 \longrightarrow CH_3\cdot + H\cdot$ $\Delta H^o = 416\ kJ$

1. כיצד עוזרים הנתונים הנ"ל לקבוע אלו חלקיקים עשויים להווצר בשלב הראשון בתהליך ההתמרה של מתאן?
2. רשום נוסחות לואיס של רדיקלים חופשיים, שעשויים להווצר במהלך תהליך ההתמרה.
3. התרכבות בין אילו מהחלקיקים יכולה לגרום לסיום השרשרת בתגובת ההתמרה של מתאן? נסח.
4. אילו תוצרי לוואי יכולים להווצר?

מולקולות כבקשתך (1)

הסעיף "מולקולות כבקשתך" נועד:

א. להעשרת חומר הלימוד ולדיון בתרכובות שיש להן שימוש רחב בחיי היום יום.

ב. להדגמת דרכים לניצול מידע אודות המבנה והתכונות של תרכובות מוכרות כדי להפיק חומרים חדשים, עם תכונות מוגדרות מראש.

להשגת יעדים אלה, הובאה בסעיף דוגמה, המעלה שיקולים, שיש לקחת בחשבון

כדי להכין חומר מתאים לניקוי יבש — חומר נוזלי לא דליק ולא רעיל, שיכול להמיס שומנים.
אפשר להמליץ לתלמידים לעיין בסעיף ולאחר מכן לדון בבעיות המועלות בו.
בעיות אלה קשורות לנושאים מוכרים: אנתלפיות קשרים תוך מולקולריים וקשרים בין מולקולריים.
בעקבות הדיון אפשר להרחיב בשני הנושאים הבאים:

1. מסיסות של חומרים במים ובממסים לא מימיים.
2. מבנה, תכונות ושימוש בפלואורו כלורו פחמימנים.

כדי לדון במסיסות של חומרים במים ובממסים לא מימיים מומלץ להתחיל בניסוי.

ניסוי 1: מסיסות במים ובממסים לא מימיים

מטרת הניסוי:

להדגים חומרים, שמתמוססים טוב במים וחומרים, שמתמוססים טוב בממסים לא מימיים.

חומרים:	**ציוד:**
ממס לא מימי — ציקלוהקסאן,	4 מבחנות או
שמן פרפין או פטרול אתר	3 מבחנות ומשפך מפריד
מים מזוקקים	
$I_{2(s)}$,$CuSO_{4(s)}$	

מהלך הניסוי מתואר בספר.

בניסוי נמצא, שחומר יוני, כדוגמת $CuSO_{4(s)}$, מתמוסס טוב במים* ולא מתמוסס טוב בממסים לא מימיים, כדוגמת, 1,1,1-תלת כלורו אתאן (TCE) או שמן פרפין.

---

* כידוע, לא כל החומרים היוניים מתמוססים טוב במים.

לעומתו יוד, $I_{2(s)}$, חומר מולקולרי, שהמולקולות שלו חסרות דו-קוטב קבוע, מתמוסס טוב בממסים לא מימיים, אך במים מסיסותו נמוכה.

הערה: בשנים האחרונות נמצא ל-TCE שימוש רחב כממס במקום פחמן ארבע כלורי ועוד ממסים לא מימיים אחרים. לאחר הכנת המהדורה האחרונה של הספר, התקבל מידע מהמשרד לאיכות הסביבה, הטוען, כי 1,1,1-תלת כלורו אתאן הוא חומר רעיל וחשוד כמסרטן. אי לכך, אנו ממליצים על שימוש בציקלוהקסאן במקום ה-TCE.

שים לב: תוצאות הניסוי יראו שונות במידת מה, בשל ההחלפת הממס.

הצפיפות של ציקלוהקסאן (0.78 ג'/סמ"ק) נמוכה מזו של מים, לכן בניסוי עם ציקלוהקסאן לא ניתן לקבל שלוש שכבות, כפי שמתקבל בניסוי המקורי: שיכבה תחתונה של תמיסת הממס הלא מימי בעל צפיפות גבוהה ממים (הצפיפות של TCE 1.34 ג'/סמ"ק), באמצע השיכבה המימית ושיכבה עליונה של תמיסת ממס לא מימי בעל צפיפות נמוכה ממים (שמן פרפין או פטרול אתר).
כאשר משתמשים בציקלוהקסאן ובשמן פרפין, מתקבלות שתי שכבות בלבד: שיכבה תחתונה — תמיסה מימית ושיכבה עליונה תמיסה, שמכילה תערובת של הממסים הלא מימיים.

אזהרה: יש להקפיד ולהרחיק את התמיסות מלהבה גלויה, כי ציקלוהקסאן ושמן פרפין הם חומרים דליקים.

אחרי ביצוע הניסוי אפשר לדון במסיסות של החומרים ובקשר בין המסיסות והמבנה (ראה נספח ב' "מסיסות").

ניסוי נוסף, הבודק מסיסות של חומרים בממסים שונים, מובא בנספח ב'. המורה יחליט אם לבצעו בפרק זה או בשלב מאוחר יותר.

דיון בפראונים, פלוארו כלורו פחמימנים, מאפשר להדגיש את הקשר בין התכונות המקרוסקופיות של החומרים לבין מבנה המולקולות שלהם. כאמור, הפראונים הם חומרים "אדישים" מבחינה כימית: הם לא רעילים, לא תוקפים מתכות, לא דליקים. תכונות אלה מוסברות על ידי האנתלפיות הגבוהות של קשרי פחמן-פלואור, שגורמות ליציבותן של התרכובות (דיון בנושא "יציבות קינטית

ותרמודינמית" ראה בפרק ב'). פראונים מצאו שימוש רחב בתחומים שונים, אך בשנים האחרונות חל איסור לייצר חלק מהם וצומצם הייצור של האחרים (ראה הרחבה בנושא זה בנספח ג' "פראונים").

שאלת בחירה

השאלה שלהלן מבוססת על עקרונות מבנה וקישור ומעלה בעיות דומות לאלו שבסעיף "מולקולות כבקשתך". היא נועדה לעודד את התלמידים לעיון מעמיק יותר בחומר הלימוד.
השאלה דנה בבעיות, שמתעוררות בהפקת חומר להרדמה כללית. לא נדון במסגרת זו בהבטים הרפואיים והביולוגיים של החומר. בשלב זה נדון בסוגיות אחדות, שקשורות במבנה המולקולות והקשרים הבין והתוך- מולקולריים.

חומר מרדים חייב לעמוד בדרישות הבאות:

א. עליו להיות נדיף, כי בעת השימוש בו אדיו נשאבים בדרכי הנשימה.

ב. עליו להיות לא רעיל ולא דליק.

1. דון בדרישות א ו-ב במונחים של מבנה וקישור.
קבע אילו סוגי חומרים מתאימים למטרה זו? התיחס בתשובתך לחוזק הקשרים הבין מולקולריים ולערכי אנתלפיות הקשרים.

תשובה: חומרים נדיפים, בדרך כלל, מורכבים ממולקולות קטנות והקשרים הבין מולקולריים בהם לא חזקים. לא ניתן לדון במסגרת זו בכל הגורמים המשפיעים על רעילות של חומרים. כפי שצוין בספר התלמיד, האנתלפיות הגבוהות של קשרי פחמן-פלואור תורמות ליציבות ולהפחתת הרעילות של פלואורו אלקאנים. כמו כן, נוכחות אטומי ההלוגנים במולקולות, מפחיתה את הדליקות של התרכובות.

שתי התרכובות ששימשו להרדמה כללית בעבר הן:
כלורופורם (נ.ר 63°C) $CHCl_3$
ואתר דו אתילי (נ. ר. 35°C) $CH_3CH_2OCH_2CH_3$

2. האם חומרים אלה ממלאים אחר הדרישות א ו-ב? נמק תשובתך.
מדוע, לדעתך, התעורר הצורך למצוא להם תחליפים?

תשובה: כלורופורם אינו ממלא אחרי דרישה ב: נוכחות אטומי כלור במולקולות גורמת לרעילות התרכובת. אתר דו-אתילי אינו רעיל אך דליק מאוד.
מסיבות אלה התעורר הצורך למצוא להם תחליפים.

3. כיצד עשויה להשפיע:

I. החלפת אטומי הכלור, שבמולקולות הכלורופורם, באטומי פלואור? הסבר.

II. החלפת אטומי המימן, שבמולקולות האתר, באטומי פלואור? אטומי ברום? הסבר.

תשובה: החלפת אטומי כלור באטומי פלואור מפחיתה את הרעילות של התרכובות ומורידה את נקודת הרתיחה שלהן.
החלפת אטומי מימן שבמולקולות אתר באטומי פלואור, מפחיתה את הדליקות. החלפת אטומי מימן באטומי ברום מפחיתה את הדליקות, מעלה את נקודת הרתיחה, אך מעלה גם את הרעילות של התרכובות.

ד. אלו תרכובות מתוך הרשימה הבאה עשויות להתאים ולשמש תחליף לכלורופורם ולאתר? דון בחסרונות והיתרונות שלהן ביחס לדרישות א ו-ב (בסוגריים נתונות נקודות רתיחה שלהן).

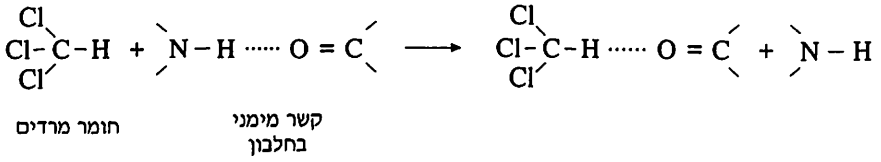
$CH_3OCF_2CHCl_2$	(105°C)
$CF_3CHClBr$	(50°C)
CF_3CClF_2	(–38°C)
$CHClF_2$	(–41°C)

תשובה: ל- CF_3CClF_2 ו- $CHClF_2$ נקודות רתיחה נמוכות, מה שמקשה על השימוש בהם כחומרי הרדמה (יש לאחסנם במיכלים תחת לחץ גבוה).
ל- $CH_3OCF_2CHCl_2$ נקודת רתיחה גבוהה, החומר לא מספיק נדיף.
$CF_3CHClBr$ — נמצא כמתאים ביותר. קשה לתת תשובה ברורה לגבי רעילותו.

ה. כיצד אפשר להסביר את ההבדלים בנקודות הרתיחה של התרכובות הנ"ל?

תשובה: ל-CF_3CClF_2 ו-$CHClF_2$ מולקולות קטנות וקשרים בין מולקולריים חלשים יחסית. נוכחות אטומי ברום במולקולות $CF_3CHClBr$ גורמת לעליה ניכרת בנקודת הרתיחה בהשוואה ל- CF_3CClF_2. למולקולות $CH_3OCF_2CHCl_2$ שטח פנים גדול יחסית וגם מסה מולרית גדולה, לכן נקודת רתיחה גבוהה.
בהסבר לשאלה זאת, אין מקום להתיחס לקוטביות המולקולות, בכל המולקולות הרשומות לעיל קיים דו-קוטב קבוע ואי אפשר להסביר את ההבדלים בנקודות הרתיחה על בסיס זה.

בחיפוש אחר חומרים מתאימים להרדמה כללית סונטזו מאות רבות של תרכובות, הדומות במבנה המולקולות שלהן לזה של כלורופורם ואתר. הלוטאן, $CF_3CHClBr$, נמצא כמתאים ביותר ומשמש כיום כחומר להרדמה כללית בבתי חולים רבים. מחקרים הוכיחו, שנוכחותו של אטום מימן אחד לפחות במולקולה של חומר מרדים, חיונית לפעילותו. הסיבות לכך לא מובנות די צורכן. קיימת הנחה, שתכונה זו קשורה ביכולתם של אטומי מימן אלה להתחרות בקשרי המימן הקיימים בחלבונים, לדוגמה:



קשרי מימן, הנוצרים בין מולקולות החומר המרדים לבין מולקולות החלבון, מתחרים בקשרי המימן בחלבון, שחשובים לפעילותו הביולוגית התקינה. ההפרעה יוצרת שרשרת תגובות במערכת העצבים, שגורמות להרדמה.

תשובות לשאלות פרק א

כאמור, השאלות 1, 2, 3, 4 ו-7 נועדו לחזרה על מושגים שנלמדו בפרקים קודמים, וליישום של מושגים אלה בנושא החדש — תרכובות פחמן.

שאלה 3

א. בתגובה (1) $\Delta H° = -461\ kJ$
בתגובה (2) $\Delta H° = +36\ kJ$

ב. בתגובה (1) משתחררת כמות גדולה של אנרגיה, לכן, ברגע שהתהליך מתחיל, הוא מתבצע מעצמו.
בתגובת (2) יש צורך בהשקעה מתמדת של אנרגיה.

הערה:
כדי לקבוע אם תהליך כלשהו מתרחש מעצמו בתנאים נתונים, יש למצוא את ערך ה- $\Delta G°$ של התגובה. כידוע, $\Delta G° = \Delta H° - T\Delta S°$. אפשר לקבוע (ללא חישוב), שבתהליכים הנדונים (1) ו-(2) אין שינוי משמעותי באנטרופיה של המערכת. לכן, $\Delta H°$ הינו הגורם העיקרי הקובע את ערכי ה- $\Delta G°$ בתגובות אלה.
ההסבר במונחים אלה מתאים רק לתלמידים הלומדים 4 ו-5 יחידות, לאחר לימוד הנושא "תרמודינמיקה".

שאלה 6

שאלה זו נועדה להדגיש את השוני בתגובות של מתאן, מתאנול ומתיל הליד. מתיל אמין מתקבל בדרך כלל בתגובה בין NH_3 לבין CH_3Br.
למולקולות אמוניה דו-קוטב קבוע ניכר והן לא מגיבות עם מולקולות של מתאן. NH_3, בדרך כלל, לא מגיב במישרין עם CH_3OH. הסיבות הן:

א. אנתלפית הקשר C–Br נמוכה יותר מאנתלפית הקשר C–O.

ב. לניתוק הקשר C–O יש להוסיף חומצה, שמזרזת את התהליך. החומצה מגיבה עם אמוניה, נוצרים יונים חיוביים NH_4^+, שלא יכולים להתקשר לאטומי פחמן בעלי מטען חיוב חלקי. מסיבות אלה נהוג לקבל מתיל אמין ממתיל ברומיד ואמוניה. יחד עם זאת, בתנאים מסוימים ניתן לקבל מתיל אמין גם ממתאנול. לדוגמה, חימום מתאנול עם אמוניה בנוכחות $Al_2O_{3(s)}$ כזרז.

בשלב זה אין לתלמידים כלים, כדי לתת הסבר מלא לשאלה. הסיבות המפורטות בסעיף ב נועדו למורה בלבד.

פרק ב - מבנה של תרכובות הפחמן

בפרק הראשון נדונו בעיקר התכונות של מתאן ונגזרותיו — תרכובות פשוטות, שבמולקולות שלהן אטום פחמן אחד. בפרק הנוכחי מוצג כיצד מתקשרים אטומי הפחמן בתרכובות מורכבות יותר. הוא מוקדש לחזרה ולביסוס עקרונות המבנה והקישור של תרכובות הפחמן.

מטרות הפרק:

א. להציג את אפשרויות הקישור של אטומי הפחמן.

ב. לדון באנתלפיות הקשרים בתרכובות הפחמן בהשוואה לתרכובות הצורן.

ג. לדון באיזומריה — אפשרויות הסידור המרחבי של אטומים סביב לאטומי הפחמן.

ד. להציג את הדרכים המקובלות לניסוח תגובות שבהן משתתפות תרכובות הפחמן.

ה. לדון בשיטות הכינוי של תרכובות הפחמן.

בהתאם למטרות, הפרק מכיל שני חלקים עקריים:

I. קישור וסידור מרחבי של אטומים בתרכובות הפחמן.

II. שפת הכימאים, הכולל:

- ניסוח תהליכים בשיטת תרשים זרימה.
- שיטות הכינוי של תרכובות פחמן, על פי כללי IUPAC.

כיצד מתקשרים אטומי הפחמן?

הפרק נפתח בשאלה: "מה מיוחד ליסוד הפחמן, המאפשר לו ליצור תרכובות רבות כל כך?" התשובות לשאלה זו בספר מתבססות על:

א. אפשרויות הקישור הרבות של אטומי הפחמן.

ב. אנתלפיות הקשרים הגבוהות יחסית.

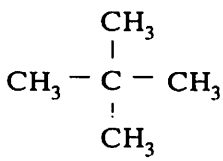
ג. אפשרויות רבות לסידור האטומים במולקולות של תרכובות פחמן וקיום איזומרים.

הדיון ביכולת הקישור של אטומי הפחמן איננו חדש מבחינתו של התלמיד. הנושא מוצג בפרק ו', הקשר הכימי בספר "הכימיה — אתגר". אפשר לנצל את העובדה שהנושא מוכר, ולשתף את התלמידים באופן פעיל בדיון.
מומלץ ללוות את הדיון בבניית מודלים. התלמידים יכולים לבנות מודלים של פחמימנים שרשרתיים וטבעתיים, של תרכובות פחמן עם קשרים יחידים, קשרים כפולים ומשולשים (ראה ניסוי 2). המודלים עוזרים להמחיש את המבנה המרחבי, את אפשרויות סידור האטומים במולקולות ולהגיע למסקנה בדבר קיום איזומרים.
בפרק הנוכחי נדונים איזומרים מיבניים, כדוגמת זוגות האיזומרים הבאים:

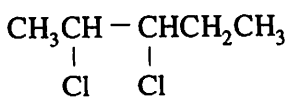
פנטאן

$CH_3CH_2CH_2CH_2CH_3$

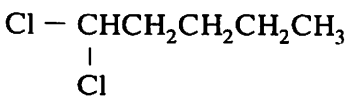
2,2 - דו מתיל פרופאן



3,2 - דו כלורו פנטאן



1,1 - דו כלורו פנטאן



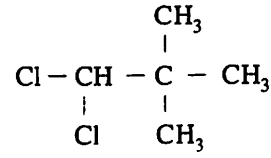
1 - בוטאנול

$CH_3CH_2CH_2CH_2OH$

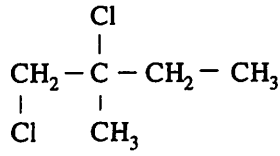
אתר דו אתילי

$CH_3CH_2OCH_2CH_3$

1,1-דו כלורו 2,2-דו מתיל פרופאן



2,1-דו כלורו 2-מתיל בוטאן



שאלות בנושא איזומריה מופיעות בסוף הפרק וגם בפרקי המשך.

בספר מוצגים סוגים נוספים של איזומרים:

- איזומרים גאומטריים, מובאים בפרק האחרון, הדן בתכונות האלקנים.
- איזומרים אופטיים, המורכבים ממולקולות קיראליות, מובאים בחומר רקע בפרק הנוכחי.

יש לציין, שבפרק הנוכחי הובאו דוגמות אחדות של חומרים, שמורכבים ממולקולות טבעתיות. מולקולות כאלה, כדוגמת ציקלוהקסאן או ציקלופנטאן, יכולות להופיע במספר קונפורמציות שונות. הדיון בנושא הקונפורמציות אינו נכלל בתוכנית הלימודים ובדוגמות שהובאו בספר מוצגת קונפורמציה אחת בלבד.

לסיכום הדיון בהערכות האטומים בתרכובות פחמן ובאנתלפיות הקשרים יש להדגיש את הנקודות הבאות:

א. בכל התרכובות אטומי פחמן יוצרים ארבעה קשרים קוולנטיים. האנתלפיות של קשרים אלה גבוהות יחסית (ראה טבלה 6, עמוד 32) ותורמות ליציבותן של התרכובות ולריבויין. אטומי פחמן יוצרים קשרים בינם לבין עצמם וגם מתקשרים לאטומים של יסודות אחרים. הם יכולים ליצור מולקולות, שמכילות מאות ואף אלפי אטומים.

ב. תרכובות פחמן רבות יוצרות איזומרים — תרכובות עם נוסחה מולקולרית זהה אך הערכות האטומים במולקולות שונה. במילים אחרות, אטומים מאותו סוג ובאותו מספר יכולים ליצור מאות ואף אלפי תרכובות. עובדה זו תורמת לריבוי תרכובות הפחמן.

ג מולקולה של איזומר אחד אפשר להפוך למולקולה של איזומר אחר אך ורק על ידי ניתוק קשרים ויצירת קשרים חדשים.

ד. פיתול השרשרת של תרכובות פחמן לא גורם ליצירת איזומרים חדשים; במקרה כזה נוצרות קונפורמציות שונות.

הבט נוסף: יציבות או בקרה קינטית ויציבות תרמודינמית

תרכובות פחמן רבות, כדוגמת פחמימנים או כהלים, הן "תרכובות יציבות", היכולות להשאר באויר בטמפרטורת החדר ללא שינוי במשך שנים רבות. כפי שצוין בספר, בניגוד למולקולות עם קשרי C–C רבים, בטבע לא קיימות מולקולות, שמכילות קשר Si–Si אלא מולקולות או יונים שבהם קיימים קשרי Si–O.

בדיקת נתונים תרמודינמיים מראה, שהסיבות ליציבותן של תרכובות הפחמן, כדוגמת כהלים ופחמימנים, שונות מאלו של תרכובות הצורן.

אנתלפיית הקשר Si–O גבוהה בהרבה מאנתלפיית הקשר Si–Si (ראה טבלה 6, עמוד 32), לכן סיליקטים, שבהם קיימים קשרי Si–O, יציבים מבחינה תרמודינמית. המצב שונה בכהלים ובפחמימנים. לדוגמה, ניסוח תהליכי חמצון (בעירה) של מתאן ושל מתאנול:

$$CH_{4\,(g)} + 2O_{2(g)} \longrightarrow CO_{2\,(g)} + 2H_2O_{(l)} \qquad \Delta G_c^\circ = -818kJ$$

$$CH_3OH_{(l)} + 1.5O_{2(g)} \longrightarrow CO_{2\,(g)} + 2H_2O_{(l)} \qquad \Delta G_c^\circ = -702kJ$$

הערכים השליליים של ΔG_c° מראים, שמבחינה תרמודינמית, התוצרים, CO_2 ו-H_2O, יציבים יותר מהמגיבים. ובכל זאת, מתאן ומתאנול לא מגיבים עם חמצן בטמפרטורת החדר. הסיבה לכך קינטית: לתהליכים המתוארים לעיל, אנרגיית שפעול גבוהה, לכן בטמפרטורת החדר נמנעת הפיכת המגיבים ל-CO_2 ו-H_2O. מתאן ומתאנול ועוד תרכובות פחמן רבות נוספות, הם דוגמות לחומרים יציבים מבחינה קינטית. דליקותן של תרכובות פחמן רבות נובעת מיציבותן התרמודינמית הפחותה מזו של CO_2 ו-H_2O.

המושגים "יציבות קינטית" ו"יציבות תרמודינמית", אינם כלולים בתוכנית של שלוש יחידות לימוד. מסיבה זאת, הנושא לא נדון בספר התלמיד ואין מקום להרחיב את הדיון בו עם תלמידים, הלומדים במסגרת של שלוש יחידות לימוד בלבד. לעתים, מורים המלמדים כימיה בהיקף מורחב, יחידות רביעית וחמישית, בוחרים ללמד תרכובות פחמן בשלב מאוחר יותר. אם הנושא נדון אחרי הפרק "תרמודינמיקה" אפשר להעמיק את המושג "תרכובת יציבה" ולדון ביציבותן של תרכובות פחמן ותרכובות צורן.

לסיכום:

תרכובות פחמן רבות קיימות בגלל הקשרים החזקים בין האטומים המרכיבים את המולקולות שלהן, אך קיומן של תרכובות פחמן לא מעטות (התרכובות הדליקות בעיקר) מתאפשר, בגלל יציבותן הקינטית.

שפת הכימאים

ניסוח תגובות בשיטת תרשים זרימה

כאמור, תגובות, שבהן משתתפות תרכובות פחמן, נהוג לנסח בצורת תרשים זרימה. לפעמים, נוהגים התלמידים לערבב שתי שיטות ניסוח: השיטה הנהוגה בניסוח תגובות אנאורגניות, ניסוח מאוזן, ובו מופיעות נוסחות של כל המגיבים וכל התוצרים, עם שיטת תרשים זרימה. לדוגמה:

א. ניסוח **לא** נכון:

$$CH_{4\,(g)} + Br_{2\,(g)} \longrightarrow CH_3Br_{(g)}$$

ניסוח נכון, שכולל את כל המגיבים והתוצרים:

$$CH_{4\,(g)} + Br_{2\,(g)} \longrightarrow CH_3Br_{(g)} + HBr_{(g)}$$

ב. ניסוח **לא** נכון:

$$CH_3OH \xrightarrow{HBr_{(g)}} CH_3Br_{(g)} + H_2O_{(g)}$$

ניסוח נכון בשיטת תרשים זרימה:

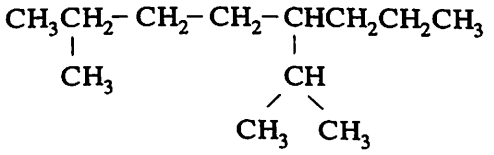
$$CH_3OH_{(l)} \xrightarrow{HBr_{(g)}} CH_3Br_{(g)}$$

כללי הניסוח, מתוארים בספר, עמוד 40. מומלץ להדגים לתלמידים ניסוח של תגובות אחדות בשתי השיטות, להצביע על ההבדלים ולהקפיד על צורת ניסוח אחידה.

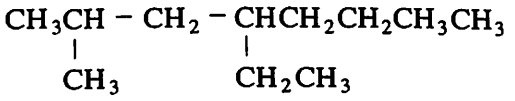
שיטות הכינוי של תרכובות הפחמן

בסעיף זה (פרק ב, עמוד 41) הובאו כללי IUPAC אחדים לקביעת שמותיהן של תרכובות פחמן פשוטות יחסית — אלקאנים ואלקיל חלידים. על מנת לכנות תרכובות רבות אחרות, קיימים כללים נוספים, שאינם כלולים בספר זה. לדוגמה, כאשר לשרשרת של פחמימן יש הסתעפויות אחדות וקבוצות מסתעפות שונות, נהוג לרשום את שמות הקבוצות לפי סדר ה- A, B, C. להלן, כינויים מקובלים של תרכובות אחדות:

5-איזופרופיל 2-מתיל אוקטאן



4-אתיל 2-מתיל אוקטאן



בפרקים הבאים, מובאים כללי כינוי נוספים, שבאים לציין קבוצות פונקציונליות או נוכחות של קשרים כפולים. אין צורך להקדיש זמן רב לתירגול הכללים השונים, ואין גם צורך להכיר את כולם. המטרה בשלב זה, לתת לתלמידים מושגים בשיטות הכינוי הנהוגות, אך אלה בסך הכל פעולות טכניות ותרומתן להבנת הנושא קטנה.

אפשר להמליץ לתלמידים לעיין בסעיפים אלה ואחר כך לדון בהם תוך פתרון שאלות. תרגילים לדוגמה מופיעים ב"שפת הכימאים" ובשאלות בסוף הפרק.

לסיכום:

שני הפרקים הראשונים בספר נועדו בעיקר לחזרה ולביסוס עקרונות המבנה והקישור של תרכובות הפחמן. בפרקים אלה התלמידים מכירים תרכובות חדשות ודנים בתכונותיהן ובמאפייני המבנה שלהן. אפשר להוסיף גם, שלתרכובות רבות, הנדונות בפרקים אלה, יש שימוש רחב ובתחומים שונים. על-ידי הצגת השימושים

אפשר להדגיש את חשיבותן של התרכובות ולעורר אצל התלמידים עניין רב יותר בנושא.

לדוגמה:

CH_4 — המרכיב העיקרי של גז טבעי (כ-85%). משמש כמקור אנרגיה לצרכים ביתיים ותעשיתיים וכחומר גלם בסינתזה של תרכובות פחמן רבות.

CH_2Cl_2 — ממס חשוב של צבעי שמן וחומרים הידרופוביים אחרים.

CH_3Br — חומר משמיד חרקים ומשמש בחקלאות לאיוד קרקעות (החומר מיוצר במפעלי ברום בים המלח, ראה פרטים בספרה של מירי קסטנר "ברום ותרכובותיו" בהוצאת מכון ויצמן למדע).

CH_3OH — תוספת לדלק, ממס, מקור להפקת מתאנאל CH_2O, מרכיב חשוב בייצור פולימרים ועוד.

ראוי להוסיף, שאטומי הפחמן לא מפסיקים "להפתיע" באפשרויות הקישור שלהם. בשנים האחרונות התגלו מולקולות של היסוד פחמן, C_{60}, שצורתן כדורית ושלא היו ידועות עד כה. חומרים, המורכבים ממולקולות כאלה, מכונים פולרנים ומנבאים להם שימוש רחב בתחומים שונים. (ראה הרחבה בנספח ג' — "פולרנים").

חומר רקע

כאמור, מולקולות שמכילות אטומי פחמן אסימטריים (בדרך כלל, אטומי פחמן שקשורים לארבע קבוצות שונות), יוצרות שני איזומרים — אחד בבואה של השני. מומלץ להפנות את התלמידים לעיין בחומר הרקע ואף לדון בו בכיתה, למרות שנושא זה לא נכלל בתוכנית של שלוש יחידות לימוד. הנושא של הפחמן האסימטרי הינו מרכזי בכימיה אורגנית. בסינטזה של חומרים אורגניים חשוב, ולעתים אף חיוני, לדעת מהו הסידור המרחבי של אטומים סביב לאטומי פחמן אסימטריים. כאמור, פעילותם של שני אנטיומרים — מולקולות בבואה, יכולה להיות שונה, במיוחד במערכות ביולוגיות, ולכן חשוב ביותר להפריד ביניהם. בספר התלמיד מוצגת השאלה "כיצד מקבלים את האיזומר, שבו מעונינים?" (עמוד 33) אך לא נדונות בו השיטות להפרדה וישנה המלצה לקריאת מאמר בחוברת "לדעת".

כיום ידועות שיטות הפרדה נוספות ומגוונות. בשנים האחרונות פותחו שיטות המבוססות על טכניקות חדישות, שמאפשרות הפרדה טובה בין שני האננטיומרים. לדוגמה, בשיטה כרומטוגרפית חדישה משתמשים בקולונות, שלחומר המילוי שלהן קשורים סוכרים (דקסטרינים) המותמרים בקבוצות פונקציונליות מגוונות, או קולונות, שלחומר המילוי שלהן קשורות תרכובות שמכילות קבוצות אמיניות ונגזרותיהן. בכל סוגי המילוי קיימים מרכזים כיראליים (אטומי פחמן אסימטריים).בקולונות כאלה מתאפשרת הפרדה ברמה גבוהה מאד בין אננטיומרים של חומצות אמיניות, של תרופות ועוד.

ביחידות רביעית וחמישית בפרקי הבחירה "סוכרים" ו"מקרומולקולות ביולוגיות", הנושא של פחמן האסימטרי נדון ביתר הרחבה וחומר הרקע יכול לעזור לתלמידים הלומדים פרקים אלה.

תשובות לשאלות פרק ב

השאלות 1, 2, 4 ו-7 נועדו:

א. ללימוד רישום נוסחות האיזומרים.

ב. להדגשת המבנה הטטראהדרי של המולקולות.

ג. לתירגול שיטות הכינוי של תרכובות פחמן.

תוך פתרון השאלות 1 ו-2 יש להדגיש ש:

פיתול השרשרת של מולקולות פחמימן אינו גורם ליצירת איזומר חדש.

איזומר חדש נוצר רק כאשר ניתקים קשרים ונוצרים קשרים חדשים.

קבוצה מתילית (או קבוצה אלקילית ארוכה יותר), שקשורה לאטום הפחמן הראשון (או אחרון) בשרשרת של פחמימן, לא מהווה הסתעפות; קבוצה זו נכללת בקביעת אורכה של שרשרת הפחמימן.

להמחשה מומלץ להעזר במודלים.

שאלה 3

ב"שפת הכימאים" בפרק ג' מפורטת שיטה לקביעת נוסחה אמפירית ונוסחה מולקולרית של תרכובות המכילות אטומי C, H ו-O.
שאלה זו מדגימה שיטה לקביעת נוסחה אמפירית ומולקולרית של פחמימנים. לשם כך יש לחשב את יחסי המולים בין אטומי הפחמן והמימן ולקבוע את המסה המולרית של התרכובת.

בהתאם לנתוני השאלה, החישוב נעשה באופן הבא:

מספר מולים של אטומי מימן: $17.2\ mol$

מספר מולים של אטומי פחמן: $\frac{82.8\ g}{12\ g \cdot mol^{-1}} = 6.9\ mol$

היחס בין מספר מולים של אטומי פחמן ומימן:

C	:	H
1		2.5

נוסחה אמפירית $(CH_{2.5})_n$

המסה המולרית של A: $2.0\ g \cdot mol^{-1} \cdot 29 = 58\ g \cdot mol^{-1}$

חמסה "המולרית", של $CH_{2.5}$: $14.5\ g \cdot mol^{-1}$

$14.5\ n = 58\ ;\quad n=4$

ב. הנוסחה המולקולרית של A: C_4H_{10}

ג. שני האיזומרים בעלי הנוסחה המולקולרית C_4H_{10} הם:

בוטאן: $CH_3CH_2CH_2CH_3$

2 - מתיל פרופאן: $CH_3-\underset{\underset{CH_3}{|}}{CH}-CH_3$

שאלה 6

שאלה זאת נועדה לחזרה על שני הגורמים המשפיעים על חוזק הקשרים הבין מולקולריים: גודל המולקולות (מסה מולרית) ושטח המגע בינהן. כדי להקל על פתרון השאלה, אפשר להמליץ לתלמידים לעיין בפרק י' — כוחות בין מולקולריים, "הכימיה — אתגר".

א. נקודות הרתיחה של הפחמימנים הנתונים הן:

הקסאן — 69°C

2,2-דו מתיל בוטאן — 50°C

פנטאן — 36°C

2,2-דו מתיל פרופאן — 9.5°C

ב. בגלל ההבדלים בשטח המגע בין המולקולות, נקודת הרתיחה של 2-מתיל פנטאן נמוכה יותר מזו של הקסאן וגבוהה יותר מזו של 2,2-דו מתיל בוטאן, (שלושת הפחמימנים הם איזומרים).

פרק ג - כהלים

בפרק הנוכחי מוצגת שיטת המיון הנהוגה של תרכובות פחמן — חלוקתן לקבוצות/משפחות, לפי הקבוצה הפונקציונלית שלהן. בפרק מודגשת העובדה, שקבוצה פונקציונלית זהה מקנה למספר רב מאד של תרכובות תכונות משותפות והמיון של תרכובות פחמן רבות כל כך, מקל על לימוד תכונותיהן. בפרק נדונים המאפיינים והתכונות של הכהלים.

מטרות הפרק:

א. להגדיר קבוצה פונקציונלית מהי.

ב. לדון בתכונות הכהלים ובמאפיינים היחודיים שלהם.

ג. להדגיש את הקשר ביך תכונות הכהלים ומבנה המולקולות שלהם.

ד. לדון בשיטות הפקה ובשימושים של מספר כהלים נפוצים.

הדיון בתכונות הכהלים מתחיל באיפיון הקבוצה הפונקציונלית שלהם, קבוצת OH, שנוכחותה יוצרת דו-קוטב קבוע ניכר במולקולות הכוהל ומקנה להן תכונות מגוונות. הכהלים מוצגים בספר כחומרי מוצא לסינטזה של תרכובות פחמן רבות. ברוב התגובות, שבהן הכהלים לוקחים חלק, משתתפת הקבוצה הפונקציונלית בלבד. יחד עם זאת, גם למבנה של השייר במולקולות הכהלים השפעה ניכרת על תכונותיהם. התרשים בעמוד 58 מדגים אילו סוגי תרכובות ניתן לקבל מכהלים. בשלב זה התלמידים לא מכירים עדיין את השיטות להפקתן. הן מוצגות בהמשך, בפרק זה וביתר פרקי הספר.

ניתן לחלק את הפרק הנוכחי לשני חלקים עיקריים:

I. תכונות הכהלים, שכוללות:

א. תגובות התמרה — שיטות להפיכת כהלים לאלקיל הלידים וגם להפיכת אלקיל הלידים לכהלים.

ב. סווג הכהלים לראשוניים, שניוניים ושלישוניים ודיון בהשפעת מבנה השייר R על התכונות.

ג. תגובות חמצון של כהלים לאלדהידים, לקטונים ולחומצות קרבוקסיליות.

ד. שימושים במספר כהלים נפוצים.

רוב הנושאים, הנכללים בחלק זה של הפרק, הינם חדשים מבחינת התלמידים.

II. שפת הכימאים.

בחלק זה נדונים:

א. מצבי צבירה, אנתלפיות אידוי ומסיסות של כהלים.

ב. שיטות לקביעת נוסחה אמפירית, נוסחה מולקולרית ונוסחת מבנה של תרכובות פחמן.

רוב הנושאים בשפת הכימאים מוסברים על-ידי כללים, שמוכרים לתלמידים מפרקים קודמים: מבנה, קישור וחישובים סטויכיומטריים.

תכונות הכהלים

ברוב התגובות האופייניות של כהלים משתתפת, כאמור, הקבוצה הפונקציונלית OH ובמהלכן היא מתחלפת בקבוצה פונקציונלית אחרת. הדיון בתכונות הכהלים מתחיל בתגובות התמרה.

המורים יכולים לשנות את סדר ההוראה ולהתחיל את הפרק בנושאים, הכלולים בשפת הכימאים: מצבי צבירה, אנתלפיות אידוי ומסיסות הכהלים.

תגובות התמרה

הניסויים 3 ו-4 מדגימים תגובות התמרה של כהלים ושל אלקיל הלידים. התגובות מבוססות על עקרונות דומים לאלה שנדונו בתגובות התמרה של מתאנול ושל מתיל הלידים בפרק א'. בתגובות אלה ניתקים ונוצרים קשרים קוולנטיים בין אטומי פחמן ואטומי יסוד אחר בעל אלקטרושליליות גבוהה יותר.

ניסוי 3: הפיכת אתאנול לברומו אתאן

מטרת הניסוי:

להדגים תנאי הפיכת אתאנול לברומו אתאן.

חומרים:	**ציוד:**
5 מ"ל אתאנול	בקבוק בנפח 100 מ"ל או
6 ג' KBr	מבחנה גדולה עם צינור צדדי
5 מ"ל H_2SO_4 מרוכזת	מערכת זיקוק
5 מ"ל 2M NaOH	בקבוק קוני עם מים קרים
5 מ"ל 2M HNO_3	מבער
2 מ"ל 0.2M $AgNO_3$	טפי
נייר pH	

ניסוי זה יבוצע כהדגמת מורה.

המערכת המורכבת מתוארת בציור בעמוד 59.

מהלך הניסוי:

הכנס את האתאנול לתוך בקבוק או מבחנה קשת היתוך עם צינור צדדי. הוסף בזהירות את החומצה הגפרתית המרוכזת, במנות בנות כ-0.5 מ"ל.
ערבב וקרר תחת מי ברז זורמים. הוסף $KBr_{(s)}$. הרכב את המערכת כמתואר בציור והקפד, שהצינור היוצא ימצא בתוך מים. חמם בזהירות והבא את התערובת עד לרתיחה. אסוף את התוצר לתוך בקבוק קוני, שמכיל מים קרים עד כשליש מנפחו. בתום התהליך דאג להוציא את הצינור הצדדי מתוך המים וכבה את המבער. בתחתית הבקבוק מבחינים בהצטברות טיפות שמנוניות של ברומו אתאן.

אזהרה: חמם את תערובת המגיבים בזהירות רבה. הוסף חומצה גופרתית מרוכזת בזהירות רבה, במנות קטנות, תוך קירור הכלי במי ברז. **הרכב משקפי מגן.**

את התוצר המתקבל בניסוי אפשר לבדוק באופן הבא:

בעזרת טפי העבר מספר טיפות של התוצר לתוך 2-3 מ"ל תמיסת 2M NaOH. ערבב היטב וחמם מעט, הוסף מספר טיפות תמיסת $2M\ HNO_3$, עד שמתקבלת תמיסה ניטראלית (בדוק בעזרת נייר pH). הוסף טיפות אחדות של $0.2M\ AgNO_3$ ונער.

לאחר הוספה של תמיסת $AgNO_3$ מתקבל משקע צהבהב של $AgBr_{(s)}$. חומר זה נוצר כתוצאה של התגובות הבאות:

$$C_2H_5Br_{(l)} + OH^-_{(aq)} \longrightarrow C_2H_5OH_{(l)} + Br^-_{(aq)}$$

$$Ag^+_{(aq)} + Br^-_{(aq)} \longrightarrow AgBr_{(s)}$$

בעקבות הניסוי מומלץ להדגיש את הנקודות הבאות:

א. ניתן להחליף את הקבוצה OH שבמולקולות אתאנול באטומי ברום. מקור אטומי הברום ב-$HBr_{(g)}$, שניתן לקבל בתגובת $KBr_{(s)}$ עם H_2SO_4 מרוכזת.

ב. אפשר להפריד בין ברומו אתאן לבין אתאנול על ידי זיקוק. כידוע, בין מולקולות אתאנול קיימים קשרי המימן ולכן נקודת הרתיחה של אתאנול גבוהה יותר (78°C) מזו של ברומו אתאן (38°C).

ג. ברומו אתאן, חומר הידרופובי, למרות שלמולקולות שלו יש דו-קוטב קבוע (ראה נספח ג' "מסיסות").

ניסוי 4: תגובה בין 2-מתיל 2-כלורו פרופאן ומים

מטרת הניסוי:

להדגים תגובת התמרה ביך אלקיל הליד לבין מים.

חומרים:	**ציוד:**
מים מזוקקים	2 בקבוקים בנפח 250 מ"ל
3 מ"ל 2-מתיל 2-כלורו פרופאן	משורה בנפח 2 מ"ל
10 מ"ל תמיסת 0.1M NaOH	טפי
אינדיקטור אוניברסלי, בתחום pH = 3-10	

הניסוי יכול להתבצע על ידי התלמידים או כהדגמת מורה.

במהלך הניסוי, שמתואר להלן, הוכנסו שינוים אחדים בהשוואה לזה שמובא בספר.

הכנס לתוך הבקבוק 220 מ"ל מים מזוקקים ו-4 מ"ל אינדיקטור אוניברסילי ושמור את התמיסה לביקורת.
לבקבוק אחר הכנס 220 מ"ל מים, 4 מ"ל אינדיקטור אוניברסלי וכ-1 מ"ל 2-מתיל 2-כלורו פרופאן. נער. המתן רגעים מספר והשווה לצבע תמיסת הביקורת.

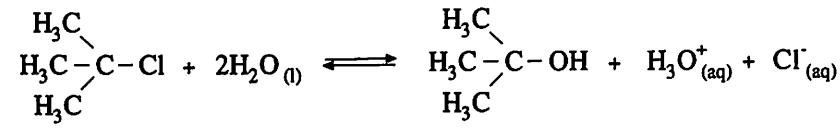
בעזרת טפי הוסף לתערובת שהתקבלה כ-10 טיפות תמיסת 0.1M NaOH. נער ושים לב לשינויים בצבע התמיסה במשך דקות אחדות. אפשר לחזור על הפעולה פעמים מספר.

לאחר הוספה של תמיסת NaOH אפשר להבחין בשינוי צבע התמיסה מכתום-אדום לכחול, אך כעבור רגעים אחדים חוזר הצבע לכתום-אדום.

בעקבות הניסוי מתעוררות שאלות אחדות:

1. מדוע משתנה צבע התמיסה אחרי הוספת 2-כלורו 2-מתיל פרופאן?

תשובה: בין 2-כלורו 2-מתיל פרופאן לבין מים מתרחשת התגובה הבאה:



יוני $H_3O^+_{(aq)}$, שנוצרים בתגובה, מגיבים עם האינדיקטור וגורמים לשינוי צבעו לאדום.

2. מה גורם לשינויים בצבע התמיסה לאחר הוספה של תמיסת NaOH ?

תשובה: במהלך הניסוי חלים שינויים בריכוז יוני $H_3O^+_{(aq)}$.
מיד עם ההוספת תמיסת NaOH, נוצר עודף יוני $OH^-_{(aq)}$, הגורמים לשינוי צבע האינדיקטור לכחול. כעבור רגעים מספר, ריכוז יוני $OH^-_{(aq)}$ יורד, כי הם מגיבים עם יוני $H_3O^+_{(aq)}$, שנוצרים בתגובה. כתוצאה מהפרה בשווי המשקל בתגובה, ריכוז יוני $H_3O^+_{(aq)}$ עולה מחדש וצבע התמיסה חוזר לאדום.

לסיכום:

התגובה בין 2-כלורו 2-מתיל פרופאן לבין מים היא תגובה הפיכה, שמגיעה לשווי משקל. שינויים בריכוז יוני $H_3O^+_{(aq)}$ בתמיסה גורמים להטיית שיווי המשקל.

בניסוי זה אפשר להצביע על מספר נקודות נוספות:

א. אלקיל הליד לא מתמוסס טוב במים והטיפות שלו צפות על פני המים. אפשר להדגים את המסיסות בצורה ברורה יותר, על-ידי ערבוב של כ-1 מ"ל מים עם כ-1 מ"ל 2-כלורו 2-מתיל פרופאן במבחנה.

ב. למרות שהתגובה בין יוני $OH^-_{(aq)}$ ו-$H_3O^+_{(aq)}$ מיידית, צבע האינדיקטור משתנה רק אחרי רגעים מספר ולאחר ניעור התמיסה. הסיבה לכך היא, שהתגובה בין 2-כלורו 2-מתיל פרופאן ומים מתרחשת רק בשטח המגע בין שני הנוזלים והיא איטית יחסית.

כהלים ראשוניים, שניוניים ושלישוניים

כאמור, בהתאם למבנה השייר R, נהוג לסווג את הכהלים לראשוניים, שניוניים ושלישוניים. אפשר להבחין ביניהם בדרכים מספר. בניסויים 5 ו-7 מודגם כיצד מבחינים בין כהלים ראשוניים, שניוניים ושלישוניים בעזרת מפעיל לוקס ובתגובות חמצון.

ניסוי 5: תגובות התמרה של כהלים בעזרת מפעיל לוקס

מטרת הניסוי:

להדגים שיטה להבחנה בין כוהל ראשוני, שניוני ושלישוני.

חומרים (לכל זוג תלמידים):	**צ י ו ד:**
כ-2 מ"ל של כל אחד מהכהלים:	3 מבחנות
1-פרופאנול	כוס בישול בנפח 250 מ"ל
2-פרופאנול	עם מים עד כ-1/2 מנפחה
2-מתיל 2-פרפאנול	משורה בנפח 10 מ"ל
10 מ"ל תמיסת מפעיל לוקס	עפרון לסימון מבחנות
	מבער

הכנת מפעיל לוקס:

להכנת 400 מ"ל מפעיל מערבבים 340 ג' $ZnCl_2$ אל-מימי (אנהידרי) עם 262 מ"ל HCl מרוכזת תוך קירור באמבט קרח. אם ה-$ZnCl_2$ אינו יבש יש לייבשו בתנור בכ-130°C או על ידי חימום בזהירות בכורית מעל להבה.

ניסוי זה יכול להתבצע על ידי התלמידים.

מהלך הניסוי מתואר בספר התלמיד.

תוצאות הניסוי מלמדות, שכהלים שונים מגיבים בתגובות התמרה בקצב שונה. בתגובות המתוארות, הכוהל מגיב עם מימן כלורי ויוצר אלקיל הליד מתאים; אבץ כלורי משמש זרז. האלקיל הליד, שמסיסותו במים נמוכה וצפיפותו גבוהה מזו של המים, מצטבר כנוזל שמנוני בתחתית המבחנה.

כידוע, המנגנונים של תהליכי ההתמרה אינם כלולים בתוכנית הלימודים, לכן אין מקום לדון בהם ולא ניתן להסביר את ההבדלים בקצב תגובות התמרה אלה.

הניסוי נועד להדגים שיטת הבחנה בין כהלים ראשוניים, שניוניים ושלישוניים. כמובן, שאפשר ליצפות באלקיל הליד הנוצר בתגובות הנדונות, רק אם הכוהל המגיב מתמוסס היטב. מסיבה זאת, בניסוי זה ניתן להבחין בין כהלים שמתמוססים טוב בתערובת של מפעיל לוקס. המסיסות של כהלים בתערובת של מפעיל לוקס טובה יותר מאשר במים; אפשר להמיס בה כהלים, שמכילים עד שישה אטומי פחמן במולקולה. כדי לקבל תוצאות ברורות יותר בניסוי, מומלץ להשתמש בעודף של המפעיל.

חמצון הכהלים

כהלים אפשר לחמצן בקלות יחסית ובהתאם למבנה הכוהל ולתנאי החמצון, מקבלים תוצרים שונים.
הניסוים 6 ו-7 מדגימים תגובות חמצון של כהלים.

ניסוים אלה יכולים להתבצע על ידי התלמידים או כהדגמה על ידי המורה.

ניסוי 6: חמצון של אתאנול לאתאנאל באמצעות נחושת חמצנית

מטרת הניסוי:

להדגים תגובת חמצון של כוהל ראשוני לאלדהיד.

חומרים:	**ציוד:**
10 מ״ל אתאנול	מבחנה
סליל נחושת נקי	מחזיק מבחנה
	מבער

מהלך הניסוי מתואר בספר.

כאמור, אתאנול מגיב בתגובת חמצון-חיזור עם תחמוצת נחושת מחוממת (ניסוח התהליך בעמוד 65 בספר התלמיד).

התנאים בהם מבוצע הניסוי לא מאפשרים לזהות את התוצר, פרט לריחו האופייני. השינוי בצבע משחור (CuO) לחום-אדום מבריק (Cu) מעיד על התרחשות התגובה.

ניסוי 7: חמצון כהלים באמצעות תמיסת $KMnO_4$

מטרת הניסוי:

להדגים שיטה נוספת לחמצון כהלים וגם להדגים הבדלים בתגובות החמצון של כהלים ראשוניים, שניוניים ושלישוניים.

חומרים:	**ציוד:**
כ- 10 מ"ל של כל אחד מהכהלים הבאים:	3 מבחנות
1-פרופאנול	
2-פרופאנול	
2-מתיל 2-פרופאנול	
כ-10 מ"ל $0.01M\ KMnO_4$	
כ-2 מ"ל $1M\ H_2SO_4$	

מהלך הניסוי מתואר בספר.

הערה: אפשר להוסיף לתמיסת $KMnO_4$ מספר טיפות $1M\ H_2SO_4$. בתום תגובת החמצון הופכת התמיסה הסגולה לחסרת צבע (נוצרים יוני $Mn^{2+}_{(aq)}$ חסרי צבע, במקום משקע חום של $MnO_{2(s)}$ בתמיסה ניטראלית).

תוצרי הניסוי הם:

חומצה קרבוקסילית בחמצון של כוהל ראשוני וקטון בחמצון של כוהל שניוני. כוהל שלישוני לא מגיב. מכאן, שבתגובות חמצון המתוארות, אפשר להבחין בין כוהל ראשוני או שניוני לבין כוהל שלישוני. תנאי הניסוי לא מאפשרים להבחין בין תוצרי החמצון של הכהלים, ולכן לא ניתן להבחין בין כהל ראשוני ושניוני על-ידי תגובות חמצון אלה.

במסגרת הלימודים הנוכחית לא כלולות התכונות של קטונים ואלדהידים, לכן לא נדונות תגובות שמבחינות ביניהם.

כאמור, האלדהיד, שנוצר בחמצון כוהל ראשוני, בדרך כלל ממשיך להתחמצן, ויוצר חומצה קרבוקסילית. בחמצון כוהל ראשוני אפשר לקבל אלדהיד רק אם מבצעים את התגובה בתנאים המונעים את חמצונו.

לדוגמה:

1. זיקוק והרחקת האלדהיד מתערובת המגיבים. (כאמור, אלדהידים רותחים בטמפרטורה נמוכה יותר מכהלים מתאימים ומחומצות קרבוקסיליות מתאימות). שיטה זו לא תמיד יעילה ולעתים האלדהיד מתפרק לפני שמגיעים לטמפרטורת הרתיחה שלו.
2. הוספת ממס, שממצה באופן בררני את האלדהיד הנוצר. על-ידי כך מפרידים אותו מתערובת המגיבים ומונעים את המשך חמצונו.
3. שימוש במחמצן סלקטיבי לקבוצה פונקציונלית נתונה. בשנים האחרונות הצליחו לפתח שורה של מחמצנים שמצטיינים בתכונות כאלה. לדוגמה, פירידין כלורוכרומט — $C_5H_5 - NH^+CrO_3Cl^-$ מחמצן באופן בררני כוהל ראשוני לאלדהיד.

הבט נוסף: תוצרי החמצון של כהלים

הדיון שלהלן מתאים לתלמידים, שלמדו פרק "תרמודינמיקה".

נדון בהבטים אחדים, שקשורים בתוצרים אפשריים בתהליכי חמצון של כהלים.
להלן ניסוח תגובות חמצון של מתאנול וערכי ה-$\Delta G°$ שלהן:

(א) $CH_3OH_{(l)} + \frac{1}{2}O_{2\,(g)} \longrightarrow CH_2O_{(g)} + H_2O_{(l)}$ $\Delta G° = -180kJ$

(ב) $CH_3OH_{(l)} + O_{2(g)} \longrightarrow HCOOH_{(l)} + H_2O_{(l)}$ $\Delta G° = -416kJ$

(ג) $CH_3OH_{(l)} + \frac{3}{2}O_{2\,(g)} \longrightarrow CO_{2\,(g)} + 2H_2O_{(l)}$ $\Delta G° = -702kJ$

ערכי ה-$\Delta G°$ מראים, כי כל אחת משלוש תגובות החמצון אפשרית. מבחינה תרמודינמית עדיפים תוצרי תגובה (ג) ($\Delta G°$ בתגובה זו השלילי ביותר). התוצרים האחרים — מתאנאל (ניסוח א) וחומצה מתאנואית (ניסוח ב), יכולים להתקבל רק אם תנאי החמצון מאפשרים לתהליך המתאים להתבצע במהירות ואילו התהליכים האחרים בתנאים אלה איטיים מאד או לא יוצאים כלל לפועל. במילים אחרות, ניתן לקבל את התוצר המבוקש על ידי בקרת תנאי התגובה (בקרה קינטית). לדוגמה, שמוש בזרז מתאים, שיכול להפחית באופן בררני את אנרגיית השפעול של תהליך מסוים.

השיטה הנהוגה בתעשיה להפקת מתאנאל ממתאנול, מדגימה שמוש כזה:

תערובת של מתאנול ואויר מעוברת מעל זרז $Cu_{(s)}$ או $Ag_{(s)}$ בטמפרטורה של (600-450)°C:

$$CH_3OH_{(g)} \xrightarrow{\text{זרז}} CH_2O_{(g)}$$

לסיכום:

תנאי התגובה: זרז, טמפרטורה ולעתים גם ממס, יכולים לקבוע את סוג התוצרים שמתקבלים בתהליך.

יש לציין, שקטונים ואלדהידים ניתן לחזר לכהלים מתאימים, באמצעות מחזרים כדוגמת $LiAlH_4$, $NaBH_4$ או $H_{2(g)}$ על פני זרז מתכתי (Ni ,Pt ,Pd). בשיטה זאת מפיקים לעתים כהלים מאלהידים או מקטונים, שמצויים בחומרים טבעיים. לדוגמה:

$$\underset{\text{קינמאלדהיד (נמצא בקינמון)}}{C_6H_5CH = CHCHO} \xrightarrow{H_{2\,(g)} / Ni_{(s)}} \underset{\text{3-פניל 1-פרופאנול}}{C_6H_5CH_2CH_2CH_2OH}$$

חומצות קרבוקסיליות לא ניתן לחזר בתנאים דומים לאלה של האלדהידים והקטונים; חומצת חומץ אף משמשת לעתים ממס בתהליכי החיזור.

התגובות האופייניות של כהלים, שנדונות בפרק זה, מסוכמות בתרשים בעמוד 70. התרשים זהה לזה שבעמוד 58, אך הפעם התהליכים, שתלמידים למדו בפרק ג', מסומנים באדום. אפשר לנצל תרשים זה לתירגול שיטות להפקת תרכובות פחמן מכהלים. נציין, שבפרק ג' מובא רק חלק מתכונות הכהלים. הדיון בתכונותיהם נמשך גם בפרקים ד' ו-ה'. בדרך זו נוצר קשר בין הפרקים ומתאפשרת הצגת הנושאים ברצף הגיוני.

שימושים של כהלים

הנושאים, שכלולים בספר בסעיף זה, מומלצים לקריאה עצמית לתלמידים.
להלן דוגמות נוספות, שמציגות שימושים במתאנול ואתאנול.
כאמור, למתאנול ולאתאנול נמצא שימוש כדלק למכוניות או כתוספת לדלק לשיפור איכותו. בשריפת כהלים במנוע של מכונית נוצרים פחות גזים רעילים מאשר בשריפת פחמימנים (אחוז הפחמן בכהלים קטן יותר); כמות הפחמן הדו חמצני, הנפלט לאטמוספירה, נמוכה יותר וכמעט ולא נוצר פיח, מה שמפחית את איבודי האנרגיה בתהליך השריפה (חלקיקי הפיח קולטים אנרגיה רבה), וגם מהווה יתרון אקולוגי חשוב.

בדוגמה נוספת מתואר שימוש, שנעשה בתהליך האידוי של אתאנול, לרווחתו של האדם בחיי היומיום. לאחרונה ניתן למצוא בחנויות לאביזרי רכב תרסיס, שמיועד להורדת הטמפרטורה במכונית. לכל אחד מאיתנו מוכרת הרגשת אי הנוחות והמחנק ברגע שניכנסים למכונית, שהתחממה שעות מספר בשמש הקייצית והטמפרטורה בתוכה יכולה להגיע ל- 60-55°C!
ריסוס פנים המכונית בנוזל, שמכיל תמיסת אתאנול במים, והאידוי המהיר באויר של טיפות הכהל והמים הזעירות, גורם להורדת הטמפרטורה עד ל-25°C תוך שניות ספורות.

מצבי צבירה, אנתלפיות אידוי, נקודות רתיחה ומסיסות של כהלים

כאמור, רוב הנושאים הנדונים בסעיף זה, מבוססים על כללים מוכרים מלימודים קודמים ואין צורך ללמד נושאים אלה מחדש. אפשר להמליץ לתלמידים לעיין בפרק י "הכימיה-אתגר" ולדון בתכונות הכהלים, שתלויות בחוזק הקשרים הבין-מולקולריים, תוך פתרון שאלות.

בטבלה 9*, עמוד 76, נתונים ערכי אנתלפיות האידוי ונקודות הרתיחה של תרכובות פחמן אחדות. לפי נתונים אלה, אנתלפיות האידוי ונקודות הרתיחה של כהלים גבוהות יותר מאלה של התרכובות האחרות, למרות שהמסות המולריות

ערכי ה-ΔH_b^o בטבלות 9 ו-10 מראים מהי אנתלפית אידוי של חומר בטמפרטורת הרתיחה שלו. שים לב, ערכי אנתלפיות האידוי בטמפרטורת החדר גבוהות יותר ויתכנו, לכן, הבדלים בערכי ה- ΔH_b^o בטבלות ממקורות שונים.

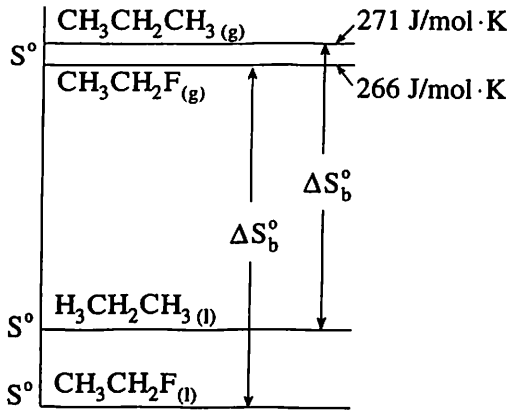
שלהם קרובות. הסיבה לכך: בין המולקולות של הכהלים קיימים קשרי מימן, בנוסף לקשרי ון-דר-וואלס, לכן יש להשקיע אנרגיה רבה יותר לניתוקם.

הבט נוסף: אנתלפיות אידוי ונקודות רתיחה

הדיון הבא מיועד לתלמידים שלמדו את הפרק "תרמודינמיקה".

כידוע, נקודות הרתיחה ואנתלפיות האידוי מבטאות את חוזק הקשרים הבין-מולקולריים. בדרך כלל, ככל שעולה חוזק קשרים אלה, עולות גם נקודות הרתיחה ואנתלפיות האידוי בהתאם.
הנתונים בטבלה 9 מראים, שנקודת הרתיחה של פרופאן גבוהה יותר מזו של פלואורו אתאן, אך אנתלפיית האידוי שלו נמוכה יותר. כדי להסביר "אי התאמה" זו יש להביא בחשבון את אנטרופיות האידוי ΔS_b° של שתי התרכובות.

ΔS_b° מראה מהו השינוי באנטרופיה של המערכת, כאשר מול חומר במצב נוזלי הופך לגז בטמפרטורת הרתיחה שלו.
באידוי מול פלואורו אתאן חל שינוי גדול יותר באנטרופיה מאשר באידוי מול פרופאן. למולקולות פלואורו אתאן דו-קוטב קבוע, לכן במצב נוזלי הן "מסודרות" יותר ממולקולות פרופאן, שחסרות דו-קוטב קבוע. במצב גזי האנטרופיה של שתי התרכובות כמעט זהה.
להלן תאור סכמתי של שינויי האנטרופיה בתהליכי אידוי אלה:



$\Delta S_b^\circ = \frac{\Delta H_b^\circ}{T_b}$; מכאן טמפרטורת הרתיחה: $T_b = \frac{\Delta H_b^\circ}{\Delta S_b^\circ}$

למרות שאנתלפיית האידוי ΔH_b° של פלאורו אתאן גבוהה יותר, טמפרטורת הרתיחה שלו מעט נמוכה יותר, כי גם ΔS_b° של פלואורו אתאן גבוה יותר מ-ΔS_b° של פרופאן. דוגמה זו, יכולה להדגיש, כי אנתלפיית אידוי (ולא נקודת רתיחה), משקפת באופן מדויק את חוזק הקשרים הבין מולקולוריים.
כמובן, שאין מקום לתת הסבר זה לתלמידים הלומדים שלוש יחידות כימיה בלבד. במידה ומתעוררת שאלה לגבי "הסתירה" בנתונים, חשוב שהמורים יהיו מודעים לסיבה.

שאלות 4, 9 ו-13 בסוף הפרק דנות בחוזק הקשרים הבין מולקולריים בכהלים ובהשפעת קשרים אלה על תכונותיהם.
טבלה 10 מכילה, בנוסף לאנתלפיות אדוי ונקודות רתיחה, גם נתוני המסיסות של כהלים במים. לפי נתונים אלה, רק כהלים, שהשייר שלהם מכיל עד 4 אטומי פחמן, נמסים טוב במים. ככל שעולה אורכו של השייר ההידרופובי R, המסיסות במים יורדת.

את הדיון במסיסות הכהלים אפשר להתחיל בהדגמה.

ניסוי בחירה: מסיסות של כהלים

מטרת הניסוי:

לבדוק מסיסות של כהלים במים ובממס לא מימי, ואת סוג החלקיקים שנוצרים בתהליך ההמסה.

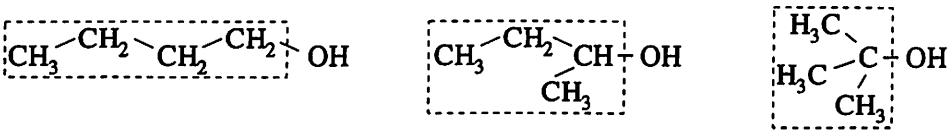
חומרים:	**ציוד:**
כ-5 מ"ל של הכהלים הבאים:	12 מבחנות
אתאנול	מד מוליכות
1-פרופאנול	6 כוסות בנפח 50 מ"ל
1-בוטאנול	
2-בוטאנול	
2-מתיל 2-פרופאנול	
1-פנטאנול (כוהל אמילי)	
ממס לא מימי: ציקלוהקסאן	
מים מזוקקים	

מהלך הניסוי:

לתוך שש מבחנות נפרדות הכנס כ-3 מ"ל של כל אחד מהכהלים שברשימה.
הוסף לכל מבחנה נפח דומה של מים מזוקקים. רשום את התצפיות.
בעזרת מד מוליכות בדוק את המוליכות החשמלית של התמיסות. רשום את תצפיותך.
חזור על הניסוי אך במקום מים הוסף ממס לא מימי, כדוגמת ציקלוהקסאן.
אחרי הניסוי אפשר לדון במסיסות של הכהלים במים ובממסים לא מימיים ובהשפעת מבנה השייר R על המסיסות במים.

בדיון זה אפשר להדגיש:

א. בין מולקולות כוהל ומולקולות מים נוצרים קשרי מימן. על מנת לערבב כוהל ומים יש "לפנות" למולקולות הכוהל מרחב בין מולקולות המים. ככל שהשייר R ארוך יותר, קשה יותר למולקולות הכוהל לפלס את דרכן בין מולקולות המים; כמו כן, בכהלים כאלה רק חלק קטן של המולקולה ממוים ולכן מסיסותם במים נמוכה. על-ידי השוואת מבנה המולקולות של כהלים איזומריים, אפשר להדגיש את השפעת שטח המגע בין השיירים על המסיסות של כהלים במים.



ככל ששטח המגע בין השיירים ההידרופיביים גדול יותר, המסיסיות במים נמוכה יותר.
למסיסות הטובה של הכהלים בציקלוהקסאן תורמים הקשרים הבין מולקולריים (ון דר וואלס) וגם העליה באנטרופיה לאחר הערבוב. (במסגרת זו לא נרחיב את הדיון בנושא).

ב. כוהל ומים לא מגיבים בתגובות חומצה-בסיס והמסת כוהל במים לא מלווה בהווצרות יונים. לדוגמה, ניסוח תהליך המסה של כוהל:

$$RCH_2OH_{(l)} \longrightarrow RCH_2OH_{(aq)}$$

התרגילים 3 ו-4 בעמוד 78 מיועדים לדיון בנושאים אלה.

קביעת נוסחה אמפירית ומולקולרית של תרכובות פחמן

שאלה המדגימה שיטה לקביעת נוסחה אמפירית ומולקולרית של תרכובות פחמן, מתוארת בספר בעמוד 79. שאלות נוספות מופיעות בעמודים 81, 85 ובאוסף השאלות בנספח א'.

להלן דוגמה נוספת לפתרון — שאלה 5, עמוד 81.

כדי לקבוע נוסחה אמפירית ונוסחה מולקולרית של תרכובת X יש לחשב את יחסי המולים בין האטומים בכל מולקולה.

א. בדומה להסבר בעמוד 79, אפשר להעזר בניסוח תגובת שריפה:

$$C_xH_yO_z + n\,O_{2(g)} \longrightarrow xCO_{2(g)} + \frac{y}{2}H_2O_{(l)}$$

חישוב מספר המולים של אטומי C ואטומי H בתרכובת X:

מספר מולים של אטומי C: $\frac{10.03\times10^{-3}\ g}{44\ g\cdot mol^{-1}} = 0.228\ mmol$

מספר מולים של אטומי H: $\frac{6.15\times10^{-3}\ g}{18\ g\cdot mol^{-1}} = 0.34\ mmol$ $H_2O = 0.68\ mmol$

תרכובת X מכילה אטומי C, H ו-O בלבד; כדי למצוא את מספר המולים של אטומי חמצן יש לחשב:

מסת הפחמן: $0.228\times10^{-3}\ mol \times 12\ g\cdot mol^{-1} = 2.74\ mg$

מסת המימן: $0.68\ mg$

מסת החמצן: $7.07 - (2.74 + 0.68) = 3.65\ mg$

מספר מולים של אטומי O: $\frac{3.65\times10^{-3}\ g}{16\ g\cdot mol^{-1}} = 0.228\ mmol$

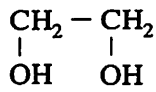
היחס בין מספרי המולים של אטומים

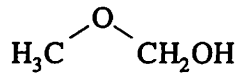
C	:	O	:	H
0.228		0.228		0.68
1		1		3

ב. מסת מול גז X: $31\ g\cdot mol^{-1} \cdot 2\ mol = 62\ g$

הנוסחה המולקולרית של X: $C_2H_6O_2$

ג. לפי הנתונים בשאלה, חומר X הינו כוהל ונוסחות המבנה האפשריות הן:





תשובות לשאלות פרק ג

השאלות בסוף פרק זה נועדו לתירגול תכונות הכהלים בהתאם לנושאים שנדונו בחומר הלימוד.
להלן תשובות לשאלות מובחרות.

שאלה 7

א. לקביעת נוסחה אמפירית ומולקולרית של תרכובת Y, עיין בהסבר לשאלה 5, עמוד 81.

היחס בין מספר המולים של האטומים:

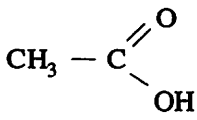
C	:	O	:	H
0.228		0.456		0.228
1		2		1

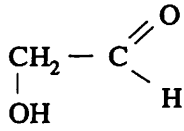
הנוסחה האמפירית: CH_2O

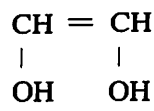
המסה המולרית של Y: $60\ g{\cdot}mol^{-1}$

הנוסחה המולקולרית: $C_2H_4O_2$

התלמידים עשויים להציע נוסחות מבנה אחדות:







בשלב זה לא ניתן לקבוע בוודאות איזו נוסחת מבנה נכונה. שאלה 1 בסוף פרק ד מהווה המשך לשאלה 7. רק אחרי פרק ד' יש לתלמידים מידע לקביעת נוסחת המבנה של Y.

שאלה 9

בשריפה של אתאנול ושל אתר דו-מתילי מתקבלים תוצרים זהים, מכאן, שנפלטת אותה כמות אנרגיה ביצירת הקשרים. בשריפת אתאנול נפלטת פחות אנרגיה, כי יש להשקיע יותר אנרגיה בניתוק הקשרים: קשרים תוך מולקולריים ובין מולקולריים. העובדה ששני החומרים נמצאים במצב צבירה שונה בטמפרטורת החדר, לא סותרת את התשובה.

פרק ד - חומצות ובסיסים של תרכובות פחמן

פרק ג' עסק במאפייני המבנה ובתכונות של כהלים. פרק ד' מהווה המשך ישיר לפרק ג'.
הוא פותח בהצגת תרכובות פחמן, שמגלות תכונות של חומצה ובהשוואה בין תכונות הכהלים והחומצות הקרבוקסיליות.
גם בפרק זה מוצגת הקבוצה הפונקציונלית כמאפיין עיקרי, המקנה תכונות משותפות למספר רב של תרכובות.

מטרות הפרק:

א. לדון במבנה של תרכובות פחמן, שמגלות תכונות של חומצה ותכונות של בסיס.

ב. להשוות בין תכונות הכהלים והחומצות הקרבוקסיליות על ידי הדגשת ההבדלים במבנה הקבוצות הפונקציונליות שלהם.

ג. לדון בתכונות הבאות של החומצות הקרבוקסיליות והאמינים:
   I. מסיסות
   II. תגובות חומצה-בסיס
   III. תגובות דחיסה: יצירת אסטרים ואמידים

ד. להדגים שימושים בחומצות הקרבוקסיליות ובמלחיהן, באסטרים, באמינים ובמלחיהם.

השוואה בין כהלים לבין חומצות קרבוקסיליות

כאמור, הפרק פותח בהצגה של תרכובות פחמן אחדות, שיש להן תכונות של חומצה. המולקולות של תרכובות אלה מכילות קבוצה קרבוקסילית. הקבוצה הקרבוקסילית COOH– כוללת קבוצת OH–, לכן מתעוררת השאלה: האם קיים דמיון בתכונות הכהלים והחומצות הקרבוקסיליות? בניסוי 8 נעשית בדיקת התכונותיהם.

ניסוי 8: תכונות של כהלים ושל חומצות קרבוקסיליות

מטרת הניסוי:

להדגים כיצד משפיע המבנה של הקבוצות הפונקציונליות במולקולות הכהלים והחומצות הקרבוקסיליות על התכונות של התרכובות.

חומרים:	**ציוד:**
אתאנול	4 כוסות בנות נפח 50 מ"ל
חומצה אתאנואית (חומץ) 0.1 M	5 מבחנות
חומצה פרופאנואית 0.1 M	מד מוליכות
מים מזוקקים	
$NaHCO_{3\,(s)}$	
0.1M NaOH	
תמיסת פנול פטאלאין	
$Mg_{(s)}$ ו- $Na_{(s)}$	
נייר pH	

מהלך הניסוי מתואר בספר.

תוצאות הניסוי מלמדות על הבדלים ניכרים במוליכות חשמלית, ב-pH ובתגובות חומצה-בסיס של התמיסות המימיות של כהלים ושל חומצות קרבוקסיליות. נשאלת השאלה: מדוע לקבוצה COOH– יכולת גדולה יותר "לשחרר" פרוטון H^+ מזו של הקבוצה OH– בכוהל? בספר התלמיד ניתנת תשובה חלקית לשאלה זו. נביא מספר נימוקים נוספים. חוזק של חומצה ושל בסיס הוא גודל יחסי, שתלוי במספר גורמים. לדוגמה, בתגובת חומצה-בסיס נוצרים חומצה ובסיס חדשים והמערכת מגיעה לשיווי משקל:

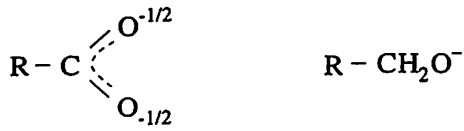
$$\underset{\text{חומצה I}}{RCOOH} + \underset{\text{בסיס I}}{HB} \rightleftharpoons \underset{\text{בסיס II}}{RCOO^-} + \underset{\text{חומצה II}}{H_2B^+} \qquad (1)$$

קבוע שיווי המשקל, בטמפרטורה נתונה, תלוי בחוזק היחסי של שתי החומצות ושל שני הבסיסים. ככל שבסיס II מושך פרוטון חלש יותר, החומצה I חזקה יותר ו- Ka שלה גדול יותר. או להפך, ככל שבסיס II חזק יותר, החומצה I חלשה יותר.

לפי הניסוח המתואר לעיל, הבסיס הצמוד של חומצה קרבוקסילית RCOOH הוא יון קרבוקסילי $RCOO^-$. במקרה של כוהל RCH_2OH, המגיב כחומצה לפי הניסוח שלהלן, הבסיס הצמוד הוא יון אלכאוקסיד $[RCH_2O]^-$:

$$RCH_2OH + HB \rightleftharpoons RCH_2O^- + H_2B^+ \qquad (2)$$

מבנה היונים $RCOO^-$ ו- RCH_2O^- משפיע על יכולתם לקלוט פרוטון, ובהתאם, על ערכי קבועי שווי המשקל בתגובות (1) ו-(2).
ביון $RCOO^-$ המטען השלילי מתחלק באופן שווה בין שני אטומי חמצן — קיים בו אל-איתור, ואילו ביון RCH_2O^- המטען השלילי מרוכז על אטום החמצן:



חוקי אלקטרוסטטיקה קובעים, שפיזור המטען בחלקיק טעון גורם לייצובו. מכאן, שיוני $RCOO^-$ יציבים יותר מיוני RCH_2O^-. כמו כן, יוני RCH_2O^-, שהמטען בהם מרוכז, מושכים פרוטונים חזק יותר ולכן הם בסיס חזק יותר מיוני $RCOO^-$. הגורמים האמורים לעיל תורמים לכך, שחומצות קרבוקסיליות נוטות לשחרר פרוטונים יותר מכהלים.

גורמים נוספים, כגון מבנה השייר R וסוג הממס בו מתרחשת התגובה, משפיעים גם כן על חוזק החומצות.
ההסבר המובא לעיל, יכול להיות בעייתי לחלק מהתלמידים. מומלץ, לכן, להרחיב בנושא זה מעבר לכתוב בספר התלמיד, רק אם רמת הכיתה מאפשרת זאת. הדבר נתון, כמובן, לשיקולו של המורה.

באופן כללי, תגובות חומצה-בסיס של החומצות הקרבוקסיליות אינן שונות מאלו של החומצות האנאורגניות. שאלה 10 בעמוד 111 נועדה לתירגול תגובות אחדות של חומצות קרבוקסיליות.

קשרי מימן בין המולקולות של חומצות קרבוקסיליות

המסיסות של חומצות קרבוקסיליות במים ונקודות הרתיחה הגבוהות יחסית, מוסברות על ידי עקרונות מוכרים לתלמיד: קיום קשרי מימן בין המולקולות. ראוי להדגיש, שקשרי מימן בין מולקולות של חומצות קרבוקסיליות, חזקים יותר ורבים יותר מאלה שבין מולקולות של כהלים מתאימים והם אחראיים לקיום דימרים. בטבלה שלהלן נתונות אנתלפיות האידוי ונקודות רתיחה של כהלים אחדים ושל חומצות קרבוקסיליות אחדות.

טבלה 1 — אנתלפיות אידוי ונקודות רתיחה של כהלים ושל חומצות קרבוקסיליות.

סוג החומר	נוסחה	אנתלפית אידוי ΔH_b° kJ/mol	נקודת רתיחה ΔT_b (°C)
מתאנול	CH_3OH	35.0	64.6
אתאנול	CH_3CH_2OH	38.0	78.0
חומצה מתאנואית	$HCOOH$	22.7	100.5
1-פרופאנול	$CH_3CH_2CH_2OH$	41.4	97.0
חומצה אתאנואית	CH_3COOH	23.7	118.0
1-בוטאנול	$CH_3CH_2CH_2CH_2OH$	43.3	117.8
חומצה פרופאנואית	CH_3CH_2COOH	31.0	141.4
חומצה בוטאנואית	$CH_3CH_2CH_2COOH$	38.0	164.0

הנתונים בטבלה מראים, שנקודות הרתיחה של החומצות הקרבוקסיליות גבוהות יותר מנקודות הרתיחה של הכהלים המתאימים (לפי מסה מולרית), אך אנתלפיות האדוי שלהן נמוכות יותר. בשעת אידוי חלק ממולקולות החומצה נשאר בצורת דימרים גם במצב גזי, מכאן, שלא כל קשרי המימן בין המולקולות ניתקים. מסיבה זאת אנתלפיות האידוי של החומצות הקרבוקסיליות נמוכות באופן יחסי.

היבט נוסף: אנתלפיות אידוי ונקודות רתיחה של חומצות קרבוקסיליות

ההסבר שלהלן נועד לתלמידי היחידות רביעית וחמישית, שלמדו פרק "תרמודינמיקה".

כדי לתת הסבר מעמיק יותר ל"אי התאמה" בין אנתלפיות האידוי ונקודות הרתיחה של חומצות קרבוקסיליות, יש להתיחס פעם נוספת לאנטרופיית האידוי שלהן. בטבלה שלהלן נתונות אנטרופיות אידוי ΔS_b^o של כהלים ושל חומצות קרבוקסיליות אחדות.

כאמור, ΔS_b^o — השינוי באנטרופית המערכת באידוי מול נוזל בטמפרטורת הרתיחה שלו ($\Delta S_b^o = \frac{\Delta H_b^o}{T_b}$).

טבלה 2 — אנטרופיות אידוי של כהלים ושל חומצות קרבוקסיליות.

כוהל	ΔS_b^o kJ/mol	חומצה	ΔS_b^o kJ/mol
מתאנול	114	מתאנואית	60.8
אתאנול	110	אתאנואית	60.6
1-פרופאנול	112	פרופאנואית	74.8
1-בוטאנול	111	בוטאנואית	86.7

הנתונים בטבלה מראים, שערכי ה-ΔS_b^o של כהלים גבוהים בהרבה מערכי ה-ΔS_b^o של החומצות הקרבוקסיליות. בין המולקולות של כהלים ושל חומצות קרבוקסיליות, קיימים קשרי מימן, שגורמים למבנה "מסודר" במצב נוזלי, ואנטרופיה נמוכה יחסית. בעת האידוי ניתקים רוב קשרי המימן בין מולקולות הכהלים וחלה עליה ניכרת באנטרופיה. לעומתם, אידוי של חומצה קרבוקסילית, מלווה בשינוי קטן יחסית באנטרופיה, כי חלק ממולקולות החומצה נשאר בצורת דימרים. לפי הנתונים בטבלה אפשר לראות, שככל שהשייר R של החומצה גדול יותר, פחות מולקולות קיימות בצורת דימרים במצב גזי, (שייר גדול מפריע מרחבית ליצירת דימרים). מסיבה זאת, לחומצות מתאנואית ואתאנואית ΔS_b^o זהה כמעט, אך ΔS_b^o של חומצה פרופאנואית וחומצה בוטאנואית עולה עליה ניכרת.

השאלות 2, 3, 4 בסוף הפרק נועדו לדיון בהשפעת קשרי מימן על התכונות של התרכובות.

תגובות דחיסה

לגבי התלמידים, תגובות דחיסה — יצירת אסטרים ואמידים, הן תגובות מסוג חדש. ניסוח תגובות דחיסה, מובא בספר התלמיד. קשרים אסטריים וקשרים אמידיים קיימים בתרכובות רבות, בין היתר, בחומרים חיוניים ביותר מבחינה ביולוגית: שמנים ושומנים הם אסטרים, חלבונים הם פוליאמידים. הדיון בתכונות של חומרים אלה לא נכלל במסגרת לימודים זו. במטרה להדגיש את החשיבות של תהליכי הדחיסה ולהמנע מלהפוך את הנושא לאוסף של נוסחות, מובא בספר דיון קצר במספר חומרי טבע ותוארו נוסחות המבנה שלהם.

בתגובות איסטור, כאמור, יש לחמם את תערובת המגיבים, כוהל וחומצה קרבוקסילית, בנוכחות חומצה חזקה H_2SO_4 (או HCl), הפועלת כזרז. איסטור הוא תהליך איטי, שמגיע לשווי משקל, כשבמערכת נמצאות כמויות ניכרות של המגיבים. כדי לקבל ניצולת טובה של אסטר, אפשר להטות את שווי המשקל לכיוון התוצרים בדרכים מספר. בבחירת השיטה יש להתחשב בגורמים כגון סוג המגיבים והתוצרים, נקודות הרתיחה והמחיר שלהם. להלן מובאות שיטות אחדות להטית שווי משקל בתהליך איסטור:

א. הוספת אחד המגיבים בעודף גדול.
השיטה מקובלת כאשר מחירו של המגיב הנמצא בעודף, נמוך. לדוגמה, לקבלת ניצולת טובה (כ-90%) של האסטר אתיל פניל בוטירט $C_6H_5(CH_2)_3COOC_2H_5$, בתגובה בין חומצה קרבוקסילית, שמחירה גבוה לבין אתאנול, נהוג להוסיף 8 מול אתאנול לכל מול חומצה.

ב. הרחקת אחד התוצרים מתערובת התגובה.
לאסטרים רבים נקודות רתיחה נמוכות מאלה של חומרי המוצא שלהם, לכן אפשר לזקקם. כמו כן, אפשר לזקק את המים, המתקבלים בתהליך האיסטור.

ג. ביצוע תגובת האיסטור בין כוהל לבין כלוריד של חומצה $R-\overset{\overset{\large O}{\|}}{C}-Cl$.
התגובות, שבהן מגיב כלוריד של חומצה במקום החומצה עצמה, מהירות יותר ולא הפיכות. החיסרון העיקרי של השיטה: יש צורך להפיק את הכלוריד, מה שהופך את תהליך האיסטור לדו-שלבי:

(א)
$$R-C(=O)OH \xrightarrow[\text{חימום}]{SOCl_2} R-C(=O)Cl$$

(ב)
$$R-C(=O)Cl + R'OH \longrightarrow R-\overset{\overset{\large O}{\|}}{C}-OR' + HCl$$

כאמור, אסטרים מצויים בחומרי טבע רבים, אך גם מיוצרים באופן סינטטי. הם מקנים ריחות אופייניים לפירות ולפרחים. בשמים וגם תרופות רבות מיוצרים בתהליכי איסטור.

לדוגמה, אחת התרופות החשובות והנפוצות מאד — אספירין. אספירין הוא אסטר של חומצה אתאנואית (חומצת חומץ) CH_3COOH וחומצה סליצילית $HO-C_6H_4-COOH$ (אורטו הידרוקסי בנזואית). מולקולות החומצה הסליצילית מכילות קבוצת OH ולכן יכולות להגיב עם מולקולות של חומצה אתאנואית. בייצור של אספירין נהוג להשתמש באל-מימה (אנהידריד) של חומצה אתאנואית במקום החומצה עצמה. האנהידריד מגיב בתהליך איסטור מהר יותר.
ניסוח התגובה:

$$HOC_6H_4COOH + (CH_3CO)_2O \longrightarrow \underset{\text{אספירין}}{CH_3COOC_6H_4COOH} + CH_3COOH$$

אפשר להכין אספירין במעבדת בית הספר בשיטה שמתוארת להלן, בניסוי 9א. את הניסוים 9 ו-9א, שנועדו להדגמת שיטות להכנת אסטרים, מומלץ לבצע כניסוי מורה. בניסוים אלה משתמשים בחומצות חזקות ויש לחמם את תערובת המגיבים, לכן במהלך הניסוי יש לנקוט באמצעי זהירות קפדניים.

ניסוי 9: הכנת אסטר

אפשר להכין שורה של אסטרים ריחניים על-ידי בחירת כהלים וחומצות קרבוקסיליות שונות.

חומרים:

חומצה	כוהל	ריח האסטר	ציוד:
אתאנואית	אתאנול	תפוז	בקבוק בישול או מבחנה גדולה עם יציאה צדדית
אתאנואית	2-מתיל 1-בוטאנול (כוהל איזואמילי)	בננה	פלטת חימום או מבער
אתאנואית	1-פנטאנול	אפרסק	שלוש פיפטות או משורות בנפח 5 מ"ל
אתאנואית	1-אוקטאנול	תפוז	בקבוק קוני קטן
בוטאנואית	אתאנול	אננס	כוס עם מים קרים

חומצה גפרתית מרוכזת

מהלך הניסוי:

לפני תחילת הניסוי **הרכב משקפי מגן**. ערבב 5 מ"ל חומצה ו-5 מ"ל כוהל (לפי בחירה) בתוך בקבוק בישול. הוסף לתערובת 2 מ"ל חומצה גפרתית מרוכזת **בזהירות רבה!** הרכב מערכת כמתואר בציור, בעמוד 96. חמם את התערובת **בזהירות** ואסוף מספר מ"ל תזקיק למבחנה או בקבוק קוני קטן. את הנוזל שנאסף, אפשר לשפוך לתוך כוס עם מים קרים. אסטר, שבדרך כלל לא מתמוסס טוב במים, מתאדה ואפשר לזהותו לפי הריח.

ניסוי בחירה פא: הכנת אספירין

חומרים:

11 גי חומצה סליצילית

14 מ"ל אל-מימה של חומצה אתאנואית

מעט חומצה גפרתית מרוכזת

30 מ"ל אתאנול

מים מזוקקים

ציוד:

ארלנמייר בנפח 200 מ"ל

פלטת חימום

כוס בנפח 200 מ"ל

מד-טמפרטורה

משפך ביכנר עם גומיה

בקבוק יניקה

הניסוי יכול להתבצע על ידי התלמידים או כהדגמת מורה.

מהלך הניסוי :

לתוך ארלנמייר בעל נפח 200 מ"ל הכנס את החומצה הסליצילית $o\text{-}C_6H_4(OH)COOH$ ואת האל-מימה של החומצה האתאנואית $(CH_3CO)_2O$. הוסף 5 טיפות חומצה גופרתית מרוכזת. בחש מעט בעזרת מד-טמפרטורה וחמם באמבט מים ב- $(60\text{-}50)°C$ במשך כרבע שעה, תוך בחישה. הוסף 150 מ"ל מים מזוקקים, בחש בחוזקה וסנן בעזרת משפך סינון ומשאבת יניקה. את המוצק שהתקבל, המס בתערובת של כ- 30 מ"ל אתאנול ו- 75 מ"ל מים חמים. אם לא התמוסס כל המוצק חמם שנית עד להמסתו המלאה. מומלץ לקרר לאט את הכלי ולהשאירו עד לשיעור הבא, כדי לאפשר לגבישים הלבנים בצורת מחטים להצטבר בתחתית.

פרט לתהליך ההפקה של האספירין, הניסוי מדגים שיטת גיבוש, המאפשרת לקבל גבישים גדולים על-ידי המסה חוזרת של המוצק ושיקועו האיטי.

אספירין, $o\text{-}CH_3COOC_6H_4COOH$, הופק בשנת 1893 בחברת התרופות הגרמנית בייר (Bayer). כ-30 שנה לפני כן, הצליחו החוקרים למצות חומצה סליצילית (אורטו-הידרוקסי בנזואית) מקליפות עץ הערבה (עוד בשנת 400 לפני הספירה, המליץ היפוקרטס על לעיסת קליפות עץ ערבה לשיכוך כאבים). עד מהרה הוכח,

שחומצה זאת יעילה לשיכוך כאבים. אך לחומצה טעם רע והיא גורמת לגירוי בפה ובקיבה. רק כעבור שלושים שנה, לאחר הפיכתה לאסטר, דבר ששיפר את טעם התרופה ואף הגביר את יעילותה, נעשה האספירין לאחת התרופות הנפוצות ביותר לשיכוך כאבים וגם כחומר אנטידלקתי.

בתהליכי דחיסה מפיקים גם פולימרים סינטטיים — פוליאסטרים ופוליאמידים. מפולימרים אלה מייצרים סיבים, תחליפים לעץ ועוד מוצרים רבים נוספים. תהליכי הפקה ותכונות של פוליאסטרים ופוליאמידים נידונים בפרק "מקרומולקולות סינטטיות".

הידרוליזה של אסטרים ושל אמידים

אסטרים ואמידים עוברים הידרוליזה בנוכחות חומצה או בנוכחות בסיס, המזרזים את התהליכים. להלן ניסוח תגובות הידרוליזה:

$$RCOOR'_{(l)} + H_2O \xrightleftharpoons{H_3O^+_{(aq)}} RCOOH_{(l)} + R'OH_{(l)}$$

$$RCOOR'_{(l)} + OH^-_{(aq)} \longrightarrow RCOO^-_{(aq)} + R'OH_{(l)}$$

$$RCONHR'_{(l)} + H_3O^+_{(aq)} \longrightarrow RCOOH_{(l)} + R'NH^+_{3\,(aq)}$$

$$RCONHR'_{(l)} + OH^-_{(aq)} \longrightarrow RCOO^-_{(aq)} + R'NH_{2\,(aq)}$$

תהליך הידרוליזה של אסטר בסביבה חומצית הוא תהליך הפיך. כאמור, החומצה מזרזת את התגובה הישירה ואת התגובה ההפוכה. לעומת זאת, תהליכי הידרוליזה של אסטרים בנוכחות בסיס, ושל אמידים בנוכחות חומצה או בסיס בלתי הפיכים. בתהליכים אלה נוצרים יוני RNH_3^+ או $RCOO^-$ בהתאם, שלא מגיבים בתגובות דחיסה.

להידרוליזה של אסטרים ושל אמידים חשיבות מיוחדת במערכות ביולוגיות: חלבונים, שומנים או תרופות רבות, מתפרקים בתהליכי הידרוליזה, שמזורזים על-ידי אנזימים מתאימים.

סבון ודטרגנטים

כפי שמתואר בספר התלמיד, בהידרוליזה של שומן או שמן, בנוכחות NaOH (סיבון) נוצר סבון — מלח נתרן של חומצה שומנית $RCOO^-Na^+$. פעולת הסבון והדטרגנטים מתוארת בחומר רקע בסוף פרק ד'.

למרות שנושא זה לא נכלל בתוכנית הלימודים, מומלץ לדון בתכונות של סבון ודטרגנטים, אם הזמן מאפשר זאת. הדיון בחומרים אלה, בעלי שימוש רחב בחיי היומיום, יכול לעורר סקרנות אצל התלמידים. אפשר להכין סבון במעבדה, לבדוק את תכונותיו ולנצל את הניסויים לחזרה על נושאים, כדוגמת, תגובות חומצה-בסיס, מסיסות ועוד.

ניסוי בחירה 10א: הכנת סבון

חומרים:	ציוד:
15 ג' שמן מאכל	כוס בנפח 250 מ"ל או 2 כוסות בנפח 200 מ"ל
20 מ"ל אתאנול	
20 מ"ל 2.5M NaOH	מחט תפירה
100 מ"ל תמיסה רוויה של NaCl	מבחנה גדולה
כ-5 מ"ל 0.1M HCl	משורה בנפח 50 מ"ל
מים מזוקקים	5 מבחנות
שמן פרפין או נפט	מבער
כ-5 מ"ל $CaCl_2$ או 0.1 M $MgCl_2$	מקל זכוכית
פנול פטלאין	משפך ונייר סינון
נייר pH	

מהלך הניסוי:

הכנס את שמן המאכל לתוך מבחנה גדולה או כוס בישול. **הרכב משקפי מגן.**

הוסף 15 מ"ל אתאנול ו-15 מ"ל 2.5M NaOH. בחש את התערובת בעזרת מקל זכוכית וחמם בעזרת מבער **בזהירות רבה!** יש להרחיק את הלהבה מפי המבחנה (או הכוס) כדי למנוע התלקחות הכוהל. המשך לבחוש את התמיסה בזמן החימום. חמם במשך כ-1/2 שעה עד שנעלם ריח הכוהל ומתקבלת תערובת צמיגה מאד. לאחר הפסקת החימום קרר מעט את המבחנה והעבר את תוכנה לתמיסה הרוויה של NaCl. ערבב היטב בעזרת מקל זכוכית. יוני המלח קושרים מולקולות מים ומולקולות גליצרול וגורמים ל-"salting out" של הסבון: עוזרים להפריד את הסבון מהגליצרול, שנוצר בתהליך הסיבון של השמן. סנן את הסבון בעזרת משפך ונייר סינון ושטוף אותו עם מים מזוקקים.

בדיקת תכונות הסבון:

1. קח כמות קטנה של סבון ונסה לשטוף את הידיים. אם להכנת הסבון השתמשת בעודף שמן, תשאר תחושה שמנונית לאחר שטיפת הידיים; אם השתמשת בעודף בסיס תשאר תחושה חלקלקה.

2. המס מעט סבון בכ-50 מ"ל מים מזוקקים. כאשר התמיסה צלולה, שפוך מעט מתוכה לשלוש מבחנות נפרדות. ערוך את הבדיקות הבאות:
למבחנה ראשונה הכנס פיסת נייר pH. בדוק את צבע הנייר.
מהי התגובה לתמיסת הסבון?
הוסף טיפה אחר טיפה תמיסת 0.1M HCl עד לקבלת תגובה חומצית.
איזה שינוי חל בתמיסת הסבון? מה הסיבה לשינוי זה?
למבחנה שניה הוסף מספר טיפות של תמיסת $CaCl_2$ או תמיסת $MgCl_2$.
איזה שינוי חל בתמיסה?
למבחנה שלישית הוסף מעט שמן פרפין או נפט. נער. מה קורה?

3. הכן שתי כוסות. כוס אחת מלאה עד חצי במים מזוקקים וכוס שניה עם נפח דומה של מי סבון. הנח בזהירות מחט על פני הנוזל בכל אחת מהכוסות. רשום תצפיותך.

תוצאות הניסוי מלמדות:

א. לתמיסת סבון תגובה בסיסית.
לאחר הוספה של תמיסת HCl, נוצר במבחנה נוזל שמנוני. נוזל זה הוא החומצה השומנית, שמסיסותה במים זניחה:

$$RCOO^-_{(aq)} + H_3O^+_{(aq)} \rightleftharpoons RCOOH_{(l)} + H_2O_{(l)}$$

ב. סבון יוצר עם יוני Ca^{2+} או Mg^{2+} מלחים קשי תמס $(RCOO)_2M_{(s)}$. מסיבה זאת, כאשר מכניסים סבון למים קשים, שמכילים כמויות ניכרות של יונים אלה, נוצר בהם משקע.

ג. סבון יוצר תחליב עם שמן (או שומן) וגורם לפיזורו על ידי יצירת טיפות קטנות, שנשטפות עם המים.

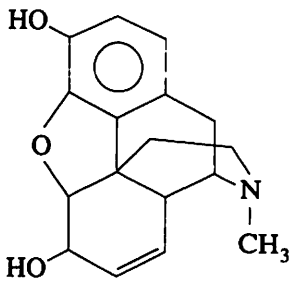
ד. סבון גורם להורדת מתח הפנים במים. מחט צפה על פני המים בגלל מתח הפנים הגדול בהם. מולקולות סבון מסתדרות על פני שטחם של המים ומורידות את מתח הפנים.

לאחר ביצוע הניסוי אפשר לדון גם בייצור דטרגנטים וביתרונות שלהם בהשוואה לסבון.

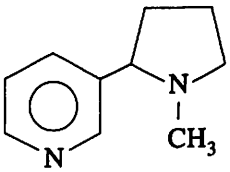
כדי לענות על השאלות העשויות להתעורר בעקבות הניסוי, מומלץ להפנות את התלמידים לעיין בחומר רקע, עמוד 113 "סבון ודטרגנטים".

אמינים

האמינים הם הבסיסים העקריים של תרכובות הפחמן ואפשר להציגם כנגזרות של אמוניה.
קבוצות אמיניות מצויות בחומרי טבע רבים, בצמחים ובבעלי חיים. לרוב אלה תרכובות בעלות מבנה מורכב, שלא נכללות במסגרת לימודים זאת. לדוגמה, נוסחות של חומרי טבע אחדים, שבמולקולות שלהם קבוצות אמיניות:



מורפין



ניקוטין

הנקודות העקריות שיש להדגיש:

א. הפקת האמינים בתגובת התמרה בין אלקיל הלידים ואמוניה.

ב. התכונות הבסיסיות של אמינים, שנובעות מנוכחותו של אטום חנקן עם זוג אלקטרונים לא קושרים בכל מולקולה של אמין (בדומה לאמוניה).

ג. נקודות הרתיחה ואנתלפיות האידוי של אמינים ראשוניים ושניוניים שמושפעות מקשרי המימן בין המולקולות (בדומה לכהלים).
קשרי מימן, שיוצרים אטומי חנקן, חלשים יותר מאלה של אטומי החמצן, לכן נקודות רתיחה של האמינים נמוכות יותר מאלה של הכהלים ושל החומצות הקרבוקסיליות.

ד. מסיסות של אמינים ומלחיהם במים (ראה בהמשך).

הפקת אמינים

כפי שמתואר בספר התלמיד, אמינים ניתן להפיק בתגובת התמרה בין אלקיל הליד ועודף אמוניה.

לדוגמה:

(א) $CH_3CH_2I_{(l)} + NH_{3\,(g)} \longrightarrow CH_3CH_2NH_3^+I^-_{(s)}$

(ב) $CH_3CH_2NH_3^+I^-_{(l)} + NH_{3\,(g)} \longrightarrow CH_2NH_2 + NH_4^+I^-_{(s)}$

(ג) $CH_3CH_2NH_2 \xrightarrow{CH_3CH_2I} (CH_3CH_2)_2NH \xrightarrow{CH_3CH_2I} (CH_3CH_2)_3N$

הניסוח מראה ש:

א. בשלב ראשון נוצר מלח.

ב. בעודף NH_3 המלח מגיב בתגובת חומצה-בסיס ובסיומה נוצר אמין.

ג. אמין ראשוני יכול להמשיך להגיב עם מתיל הליד וליצור אמין שניוני וגם אמין שלישוני.

תהליך דומה מתואר בספר, עמוד 98.

כאמור, לקבלת אמין ראשוני דרוש עודף גדול של אמוניה. הסיבות לכך הן:

1. בנוכחות עודף אמוניה גדלים הסיכויים לתגובה בין אמוניה לבין האלקיל הליד וקטנים הסיכוים לתגובה בין האלקיל הליד לבין האמין הנוצר.

2. יכולה להתרחש תגובת חומצה-בסיס בין אמוניה לבין המלח הנוצר בשלב הראשון בתהליך ההתמרה, שבסיומו מתקבל האמין הראשוני.

בשיטה המתוארת לעיל, קשה למנוע יצירת תערובת של אמינים ראשוניים, שניוניים ושלישוניים. לקבלת ניצולת טובה של אמין ראשוני %(70-60) בתהליך תעשייתי, נהוג להוסיף 60 מול אמוניה על כל מול של אלקיל הליד. לעתים מפיקים אמינים ראשוניים בשיטות אחרות, כדוגמת חיזור אמידים או חיזור של תרכובות, שמכילות קבוצת ניטרו, $-NO_2$.

מסיסות של חומצות קרבוקסיליות, אסטרים, אמינים ואמידים

מולקולות של חומצות קרבוקסיליות, של אמינים ושל אמידים יוצרות קשרי מימן עם מולקולות מים. תרכובות אלה מתמוססות היטב במים, בתנאי, שהשייר ההידרופובי R אינו ארוך. רוב האסטרים לא מתמוססים טוב במים, כי בדרך כלל, בכל מולקולת אסטר שתי קבוצות אלקיליות R–COO–R, שגורמות להפרעה מרחבית בתהליך יצירת קשרי מימן עם מולקולות מים. אסטרים אחדים אף משמשים ממסים לא מימיים.

כאמור, חומצות קרבוקסיליות מגיבות עם NaOH או KOH, ויוצרות מלחים כדוגמת RCOONa או RCOOK, שמתמוססים טוב במים.

אמינים מגיבים עם חומצות אנאורגניות ויוצרים מלחים $RNH_3^+X^-$, (בדומה לאמוניה), שמתמוססים טוב במים.

מסיסות נמוכה במים	מסיסות טובה במים
$RCOOH$	$RCOO^-Na^+$
RNH_2	$RNH_3^+X^-$
R_2NH	$R_2NH_2^+X^-$
R_3N	$R_3NH^+X^-$

R — שייר הדרופובי, שמכיל יותר מארבעה אטומי פחמן במולקולה.
X — יון הלידי או אניון אחר של חומצה אנאורגנית.

תכונות המסיסות של תרכובות אלה מנוצלות לעתים להפרדת אמינים או חומצות קרבוקסיליות מתערובת עם תרכובות הידרופוביות אחרות, שלא מגלות תכונות של בסיס או תכונות של חומצה, כדוגמת קטונים, אלדהידים ואסטרים. חומצות קרבוקסיליות, אמידים ואמינים מתמוססים גם בממסים לא מימיים.
השאלות 3, 5, 6 ו-12 בסוף הפרק דנות במסיסות של התרכובות במים ובממסים לא מימיים.

מולקולות כבקשתך (2)

בסעיף זה נדונו בעיות, שקשורות במסיסות של תרופות. הסעיף מומלץ לקריאה עצמית לתלמידים. הובאו בו דוגמות אחדות, המתארות כיצד אפשר להפוך מולקולות של חומר, להידרופוביות יותר על-ידי הפיכת קבוצה קרבוקסילית לקבוצה אסטרית ואחרי הידרוליזה של האסטר להחזיר את התכונות ההידרופיליות. דוגמה אחרת מתארת שיטה להפיכת תרכובת בלתי מסיסה במים, שהמולקולות שלה מכילות קבוצה אמינית, למלח מסיס.

בדומה למטרות הסעיף "מולקולות כבקשתך (1)", גם הסעיף הנוכחי נועד להעשרת חומר הלימוד. יתרה מזאת, בדוגמות שהובאו מוצגות דרכים לניצול מידע אודות מבנה המולקולות ליצירת חומרים עם תכונות מוגדרות מראש.

התרשים בעמוד 102 נועד לתירגול תהליכים, שהתלמידים למדו בפרקים א'-ד'.

השאלות בסוף פרק ד' כוללות נושאים מהפרקים א'-ד'.

תשובות לשאלות פרק ד

שאלה 1

השאלה כוללת תגובות אופייניות, שבעזרתן אפשר לזהות קבוצות פונקציונליות של כהלים ושל חומצות קרבוקסיליות ולקבוע נוסחת מבנה של התרכובת Y. השאלה מהווה המשך לשאלה 7, שבפרק ג', עמוד 85. בשאלה 7 נקבעה הנוסחה המולקולרית של תרכובת Y($C_2H_4O_2$), אך לא היו בה מספיק נתונים לקביעת נוסחת המבנה שלה. לפי הנתונים בשאלה הנוכחית אפשר לקבוע את נוסחת המבנה באופן הבא:

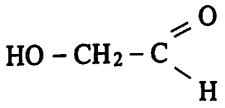
א. המסה המולרית של Y — 60 גרם למול.

בתגובה בין Y ו-$Na_{(s)}$:

0.05 מול (3 ג') תרכובת Y יוצרים 0.025 מול $H_{2\,(g)}$ (0.625 ל' בתנאי החדר).

כלומר, 1 מול Y מכיל 1 מול קבוצות OH.

נוסחת המבנה של Y עשויה להיות:

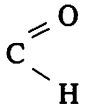


תוצר החמצון של Y — חומצה Z (pH< 7), שנמסה טוב במים.

ב. נתון ש-3.6 גי חומצה Z יוצרים בתגובה עם 0.04 Mg מול $H_{2\,(g)}$ (1 ליטר);

מכאן, שהמסה המולרית של Z — 90 גרם למול.

Z — חומצה אוקסלית, HOOC–COOH שמתקבלת, כאשר הקבוצות OH–

ו-  , מתחמצנות עם תמיסת $KMnO_4$.

שאלה 2

שאלה זו מציגה נתונים ניסויים המעידים, בעקיפין, על קיום של דימרים.

המסה המולרית של CH_3COOH — 60 גרם למול.
לפי תוצאות הניסוי נמצא, שהמסה המולרית של החומצה — 70 גרם למול. הסבר: במצב גזי חלק מהמולקולות נמצאות בצורת דימרים (ראה עמוד 94), לכן, בממוצע, המסה המולרית של החומצה גבוהה יותר.

שאלה 3

השאלה נועדה להראות את השפעת מבנה המולקולות — סוג הקבוצות הפונקציונליות ומבנה השייר R — על מסיסות החומרים במים. מתוך הרשימה הנתונה, החומרים ב, ד, ו-ה מתמוססים טוב במים. חומרים אלה מורכבים ממולקולות קטנות שיכולות ליצור קשרי מימן עם מולקולות המים.
אפשר להבחין בין שלושת החומרים באמצעות תכונות אופיניות שנלמדו בפרק זה ובפרקים קודמים.

שאלה 5

השאלה דנה בשיטות הפרדה בין התרכובות הנתונות. לשם כך יש לבצע את הפעולות הבאות:

א. זיקוק — בוטאנאל, הרותח בטמפרטורה הנמוכה ביותר מבין שלושת החומרים הנתונים, נפרד ראשון.

ב. הוספת תמיסה של NaOH לתערובת של החומרים א ו- ב. מתקבלות שתי שכבות: שיכבה מימית, שמכילה יוני $CH_3CH_2COO^-_{(aq)}$ ושיכבה לא מימית, שמכילה 1-פנטאנול.

אחרי ההפרדה בין שתי השכבות (בעזרת משפך מפריד), יש להוסיף לשיכבה המימית חומצה, כדוגמת HCl, כדי לקבל את החומצה הפרופאנואית:

$$CH_3CH_2COO^-_{(aq)} + H_3O^+_{(aq)} \longrightarrow CH_3CH_2COOH_{(aq)} + H_2O_{(l)}$$

שאלה 6 (ראה דף תיקונים)

השאלה דנה בהידרוליזה של אסטר ובמסיסות של החומרים במים ובממס לא מימי.

א. בחימום עם תמיסת NaOH האסטר עובר הידרוליזה (סיבון), לפי הניסוח הבא:

$$CH_3(CH_2)_4COOCH_2CH_{3(l)} + OH^-_{(aq)} \longrightarrow CH_3(CH_2)_4COO^-_{(aq)} + CH_3CH_2OH_{(aq)}$$

ב. לא כל האסטר מגיב.

ג. בשיכבה מימית נמצאים: $CH_3CH_2OH_{(aq)}$, $CH_3(CH_2)_4COO^-_{(aq)}$, $Na^+_{(aq)}$

בשיכבה הלא מימית: $CH_3(CH_2)_4COOCH_2CH_{3\,(l)}$

ד. אחרי הפרדה בין השכבות והוספת HCl לתמיסה מימית, עד לקבלת תמיסה ניטראלית, נוצרת חומצה הקסאנואית: $CH_3(CH_2)_4COOH$. החומצה לא מתמוססת טוב במים ויוצרת שיכבה נפרדת.

השאלות 7 ו-8 נועדו לתירגול תגובות אופייניות של קבוצות פונקציונליות שונות, שבעזרתן אפשר להפוך תרכובת פחמן אחת לאחרת.

שאלה 8

כדי לענות על השאלה מומלץ לעיין בדיון שבעמודים 62-63 במדריך זה.

שאלה 11

השאלה נועדה לתירגול מבנה ותכונות של אסטרים וגם לחזרה על שיטות זהוי של כהלים.

לפי הנתונים בשאלה, התרכובת $C_5H_{10}O_2$ היא אסטר של חומצה אתאנואית ושל 1-פרופאנול או 2-פרופאנול:

א. $CH_3COOC_3H_7$

ב. $CH_3CH_2CH_2OH$ או $CH_3CH(OH)CH_3$

ג. לאחר הפרדה מיתר החומרים בתערובת, אפשר לבדוק את סוג הכוהל על-ידי תגובה עם מפעיל לוקס. יש לבקש מהתלמידים לציין מה יראו בבדיקה המזהה ולא להסתפק רק בציון החומר המזהה. אם הוצע לזהות את הכהלים בעזרת תגובת חמצון, יש לציין, שבחמצון כהלים אלה עם תמיסה מימית של $KMnO_4$, נוצרים אומנם תוצרים שונים — אלדהיד או קטון, אך התלמידים לא מכירים שיטות להבחנה ביניהם, לכן תגובה זאת לא מתאימה לזהוי.

פרק ה - פחמימנים כמוצרים פטרוכימיים

בפרק הנוכחי נדונות התכונות של פחמימנים — תרכובות פשוטות בהרכבן המולקולרי, אך חשובות ביותר כמקור אנרגיה וכמקור לייצור מירב החומרים הנמצאים בשימוש יום יומי. פרק זה סוגר מעגל המתאר את דרכי ההפיכה של תרכובת פחמן אחת לאחרת וגם מציג פעם נוספת את הקשר בין מבנה החומרים ותכונותיהם, נושא, שעובר כחוט מקשר בין כל פרקי הספר.

מטרות הפרק

א. לדון במקורות העיקריים של פחמימנים ובשימושים בהם.

ב. להשוות בין תכונות האלקאנים והאלקנים על-ידי השוואת מבנה המולקולות שלהם.

ג. לדון בתגובות סיפוח של אלקנים ובשימושים בתהליכים אלה.

ד. לדון באיזומרים גאומטריים ובהשפעת המבנה המרחבי שלהם על התכונות.

ה. להדגים דרכים להפקת האלקנים מכהלים ומאלקיל הלידים.

פחממנים כחומרי דלק

בסעיף הראשון בפרק זה מתוארת, בקווים כלליים, ההפרדה בין מרכיבי הנפט הגולמי בתהליך זיקוק למקוטעין. התוצרים העיקריים בזיקוק הם תערובות של פחמימנים, שמנוצלים בעיקר לייצור סוגי דלק שונים. בהמשכו של הסעיף, מתוארים תהליכי פיצוח, פירוק והתרכבות על פני זרז של הפחמימנים, שמתקבלים בשלבים שונים בזיקוק למקוטעין. במהלך תהליכים אלה הופכים הפחמימנים למוצר, שמתאים לשמש דלק למכוניות. ניסוח התהליכים מובא בספר

ונועד לתת לתלמידים מושגים כלליים בדרכי ההפקה של מוצר חיוני זה, אך אין צורך לדרוש מהם לזכור את ניסוח התהליכים או לבחון אותם בנושא זה.

תרגיל הבחירה שלהלן דן בחומרי דלק ומציג בעיות ושיקולים שיש לקחת בחשבון בבחירת דלק למטרות שונות. השאלות הכלולות בו מתבססות על עקרונות מוכרים לתלמידים: חישובי אנתלפיה, קשרים בין-מולקולריים ומסיסות. התרגיל מכיל סעיפים רבים והמורים יכולים לנצל את כולו, או חלקים ממנו, לדיון בנושאים אלה.

תרגילי בחירה:

1. מנה ארבע תכונות לפחות, שנדרשות מחומר המיועד לשמש דלק למכוניות, להסקה ולמבערים ניידים.

תשובה: חומר כזה צריך להיות לא רעיל, קל להצתה, לספק אנרגיה רבה בעת הבעירה, לא ליצור תוצרים רעילים, זמין ובמחיר סביר.

2. רשום ניסוח מאוזן של תהליך בעירה של פרופאן, שהוא אחד המרכיבים של "גז בישול".

אחד הנתונים החשובים ביותר, שקובעים את הבחירה בדלק כלשהו — כמות האנרגיה שמשתחררת בעת בעירתו (ΔH_c^o).

3. העזר בספר הנתונים, טבלה 15, ורשום את אנתלפיות השריפה של מתאן, פרופאן, בוטאן, מתאנול ואתאנול.

4. האם אפשר להסיק, מערכי ה-ΔH_c^o, שפחמימנים בעלי מסות מולריות גבוהות, הם חומרי דלק עדיפים?

תשובה: אם לוקחים בחשבון רק את כמות האנרגיה, שמשתחררת בבעירת מול פחמימן, התשובה חיובית. אך למעשה, אופן השימוש בדלק דורש התחשבות בגורמים נוספים, כגון: נדיפותו של החומר, רעילות תוצרי הבעירה שלו וגם כמות האנרגיה, שמשתחררת בשריפה ליחידת מסה או ליחידת נפח של הדלק. (בעת צריכת הדלק, כידוע, מודדים את הנפח או את המסה שלו).

הנתונים בטבלה הבאה מציגים את כמות האנרגיה, שמשתחררת בשריפת חומרי דלק אחדים ביחידות kJ/g.

חומר הדלק	האנרגיה המשתחררת kJ/g
פרופאן	50.6
בוטאן או 2-מתיל פרופאן	49.5
בנזין (בעיקר C_8H_{18})	46.4
קרוסין (תערובת פחמימנים $C_{10} - C_5$)	43.1
אתאנול	29.7

5. האם הנתונים בטבלה מתאימים לתשובתך בשאלה 4? הסבר.

6. זון ביתרונות ובחסרונות של פרופאן, בוטאן ובנזין (4,2,2-תלת מתיל פנטאן) כדלק למבערים ניידים.

תשובה: בתשובה יש להתיחס למצבי הצבירה, לשיטות האיחסון של הדלקים, לכמות האנרגיה שמשתחררת בשריפה, למידת ההתאמה של הדלק למבנה המתקן, לזמינותו של הדלק ולמחירו.
הנתונים בטבלה מלמדים, שפרופאן ובוטאן (או 2-מתיל פרופאן) הם הדלקים היעילים ביותר (לפי חישוב כמות אנרגיה ליחידת מסה). פחמימנים אלה בוערים בלהבה נקיה ומספקים אנרגיה רבה. הם מצאו שימוש רחב בתנורי שדה, "גזיות" וכירות פיקניק ניידות מסוגים שונים. הדלק במתקנים אלה מאוחסן במיכלים מתכתיים, שמצוידים בשסתומים ובברזים מתאימים. במיכלים, הפחמימן נמצא במצב נוזלי תחת לחץ מוגבר. המיכלים אינם מלאים ובחלל שמעל הנוזל מתאסף הפחמימן הגזי לפני שהוא עובר למבער.

כדי להחליט איזה דלק מתאים יותר, בנוסף לנתונים בטבלה שלעיל, המעידים כי בשריפת גרם פרופאן או גרם בוטאן משתחררת כמות זהה כמעט של אנרגיה, יש להתחשב לעתים בנקודות הרתיחה של החומרים; לדוגמה, 2-מתיל פרופאן רותח ב-12°C– ופרופאן ב-42°C–.

7. איזה פחמימן, פרופאן או 2-מתיל פרופאן, מתאים יותר לשימוש במבערים ניידים באיזורים חמים? איזה מתאים לאזורים קרים, שבהם הטמפרטורה בחורף יורדת הרבה מתחת ל-0°C? נמק.

תשובה: 2-מתיל פרופאן פחות נדיף מפרופאן, לחץ האדים שלו נמוך יותר (בטמפרטורה נתונה) ואפשר לאחסן אותו במיכל דק וקל יותר (למסת מיכל הדלק במיתקן נייד יש חשיבות לא מבוטלת). בארצות קרות, שבהן הטמפרטורה בחורף יורדת הרבה מתחת ל-0°C, השימוש ב-2-מתיל פרופאן במבער נייד, יכול לעורר בעיות. בתנאים, שבהם 2-מתיל פרופאן נמצא במצב נוזלי ולחץ האדים שלו נמוך מאד, קשה להפעיל את המבער בעזרתו. במקרים כאלה עדיף, כמובן, להשתמש בפרופאן או בפחמימן אחר בעל נקודת רתיחה נמוכה יותר.

8. חשב, בעזרת ספר נתונים, את כמות האנרגיה, שמשתחררת בשריפה של 1 גרם מתאן.
מדוע נהוג להשתמש במבערים ניידים בפרופאן או בבוטאן (לא במתאן)? מה עשויות להיות הסיבות העיקריות לכך? (שים לב: נקודת רתיחה של מתאן — 161°C–).

9. במבערים ניידים, ניתן להשתמש גם באתאנול. לאתאנול יתרון בטיחותי, שהופך אותו לדלק מועדף בספינות. מנה מספר יתרונות וחסרונות של אתאנול כחומר דלק בהשוואה לבנזין.

תשובה: לאתאנול יתרונות וחסרונות אחדים בהשוואה לבנזין:

א) המסיסות המצוינת של אתאנול במים, עוזרת לכבות להבה, שעלולה לפרוץ במיכל עם אתאנול.
קשה מאוד לכבות, בעזרת מים, דליקה שפורצת במיכל עם בנזין.
יתרון זה של אתאנול חשוב למשתמשים במיתקן או במבער נייד על ספינות, שבהן, מיכל הדלק מאוחסן על הסיפון העליון ובמקרה הצורך אין מחסור במים לכיבוי דליקה.

ב) אתאנול בוער בלהבה נקיה יותר ולא מפייחת בהשוואה לבנזין: אחוז הפחמן באתאנול (לפי המסה) קטן יותר (כ- 48%) מאחוז הפחמן בבנזין (כ- 83%).

ג) אתאנול דלק מעט נחות מבנזין (ראה טבלה).

ד) לרוב, בנזין דלק זמין יותר (בכל תחנת דלק) ומחירו נמוך יותר.

השאלות 1 ו-2 בסוף הפרק מתאימות לדיון בשלב זה (ראה פתרונן בהמשך).

השוואה בין תכונות האלקאנים והאלקנים

הנפט, כאמור, הוא תערובת של פחמימנים מסוגים שונים: פחמימנים רוויים ובלתי רוויים, שרשרתיים וטבעתיים. בספר נדונים המבנה והתכונות של אלקאנים ואלקנים. פחמימנים אלה משמשים חומר מוצא להפקה של חומרים חיוניים רבים כדוגמת, כהלים, חומצות קרבוקסיליות, אלקיל הלידים, אסטרים, פולימרים סינטטיים ועוד.

הדיון באלקאנים ובאלקנים מתחיל בניסוי שבו נבדקות תכונותיהם.

ניסוי 10: תכונות של אלקאנים ושל אלקנים

חומרים:	ציוד:
כ-10 מ"ל ציקלוהקסאן	4 מבחנות עם פקקים תואמים
כ-3 מ"ל הקסן או ציקלוהקסן	טפי
תמיסת Br_2 בממס לא מימי *	פיסות נייר שחור לעטיפה
תמיסה מרוכזת של אמוניה	מקל זכוכית
פיסות נייר לקמוס כחול	

* מסיבות אקולוגיות מומלץ להשתמש בתמיסת ברום בציקלוהקסאן, במקום תמיסת ברום ב-TCE. יש להקפיד לא לחשוף את תמיסת הברום לאור. רצוי להכין אותה זמן קצר לפני הניסוי ולשמור את הכלי במקום חשוך.

מהלך הניסוי מתואר בספר התלמיד.

הניסוי יכול להתבצע על-ידי התלמידים, אבל, בגלל הריח החריף של הפחמימנים והבעיות שכרוכות בשימוש בתמיסת הברום, מומלץ לבצעו כניסוי הדגמה על-ידי המורה.
בעקבות הניסוי מתעוררת השאלה: "מה גורם להבדלים בתגובות האלקאנים והאלקנים?"
כדי לענות על השאלה יש להדגיש את ההבדלים במבנה מולקולות האלקאן ומבנה מולקולות האלקן כפי שמתואר בספר התלמיד, עמוד 126. חשוב להשתמש במודלים להמחשת ההבדלים במבנה המרחבי של המולקולות.

הקשר בין מבנה המולקולות לתכונות הפחמימנים

המבנה המישורי של מולקולות האלקנים וריכוז גבוה של אלקטרונים בין אטומי הפחמן, שקשורים בקשר כפול, גורמים לפעילות כימית גבוהה. האלקאנים לעומתם, אדישים מבחינה כימית. הסידור המרחבי של האטומים במולקולות שלהם טטראהדרי וכל אלקטרוני הערכיות של אטומי הפחמן מנוצלים בקשרים. פרט לתהליכי בעירה ותהליכי התמרה עם הלוגנים, האלקאנים לא מגיבים כמעט עם אף חומר אחר. הם לא מגיבים עם חומצות, בסיסים ומחמצנים שונים. בגלל הפעילות הכימית הנמוכה, כונו האלקאנים בעבר "פאראפינים". מקור השם בלטינית ומשמעותו — "פעילות נמוכה". לעתים מנוצלים האלקאנים להגנה בפני פעולה של חומרים, שעלולים לגרום לנזק. לדוגמה, ווזלין, חומר, שמורכב בעיקר מפחמימנים רוויים בעלי מסות מולריות גבוהות ($C_{30} - C_{20}$). ווזלין לא נמס במים, לא נתקף על-ידי חומצות, בסיסים או מחמצנים ומשמש להגנה על עור ידיים ובשפתונים. באופן דומה, לשמן פאראפין או לשמני סיכה, שמורכבים אף הם מאלקאנים בעלי שרשרות ארוכות, פעילות כימית נמוכה ומסיסות במים זניחה. חומרים אלה מתאימים להגנה על עור או להגנה על חלקי מתכות בפני קורוזיה. כידוע, המתכות האלקליות נשמרות בנפט או שמן פראפין.

יש לציין, שהמבנה והתכונות של אלקאנים אינו נושא חדש לתלמידים. בפרקים קודמים נדון מבנה המולקולות, הקשרים הבין-מולקולריים, איזומריה ותגובות התמרה של מתאן. אפשר לנצל את הידע הקודם של התלמידים, ליצירת קשר בין פרק זה והפרקים הקודמים ולהקל על תהליך הלמידה.

לעומת האלקאנים, האלקנים מגיבים בתהליכי סיפוח, חמצון וגם בינם לבין עצמם.
השאלות 3, 6, 8-13 ו-15 בסוף הפרק נועדו לתירגול של מגוון תגובות האלקנים.

אתֵן – תכונות ושימושים

אתן הוא האלקן הנפוץ ביותר ואחד המוצרים הפטרוכימיים החשובים ביותר. בקנה מידה תעשייתי אתן מופק מנפטא, מקטע, המכיל תערובת של פחמימנים $C_8 - C_5$.

נפטא ⟵ פיצוח ⟵ זיקוק ⟵ אתן

אחד השימושים באתן הוא כחומר להבשלת פירות.
כמות קטנה של אתן מפעילה את תהליך ההבשלה והפרי ממשיך לייצר אתן מעצמו. ההבשלה היא תהליך מורכב ותפקיד האתן בו לא ברור די הצורך.

מתקן ההבשלה מופעל באופן הבא:
כמות קטנה של אתן מוזרמת לתוך חדר איחסון מחומם. כידוע, אתן הינו גז דליק, לכן נהוג להפיק אותו, למטרות האמורות, בכמויות מבוקרות על-ידי העברת אתאנול במצב גזי מעל זרז מחומם (טיבו של הזרז – סוד מסחרי). במשך הזמן מצטבר עודף אתן בחדר. את העודף נהוג לספוג על מצע נקבובי, שמכיל תמיסה חומצית של $KMnO_4$. המפעיל של המיתקן יודע, שפעולת הספיגה של אתן הסתיימה, כאשר הצבע הסגול של המצע נעלם.

איזו תגובה גורמת להעלמות הצבע הסגול של המצע?

הערה:
תמיסת $KMnO_4$, גורמת לחמצון האתן, לפי הניסוח הבא:

$$CH_2 = CH_2 \xrightarrow{MnO^-_{4\,(aq)}/H_3O^+_{(aq)}} COOH - COOH$$

היות והתלמידים לא למדו ניסוח תהליכים מסוג זה, יש לקבל את ההסבר הבא:

$$CH_2 = CH_2 \xrightarrow{H_2O_{(l)}} CH_3CH_2OH \xrightarrow{MnO^-_{4\,(aq)}/H_3O^+_{(aq)}} CH_3COOH$$

הצבע הסגול נעלם, כי בתהליך חמצון-חיזור יוני $MnO^-_{4\,(aq)}$, שצבעם סגול, הופכים ליוני $Mn^{2+}_{(aq)}$ חסרי צבע.

בטבלה שלהלן מתוארים תהליכים תעשייתיים להפיכת האתן למוצרים שונים והשימושים במוצרים אלה.

התהליך	השימושים בתוצר
$CH_2=CH_2 \xrightarrow[\text{קיטור}]{H_2O} CH_3CH_2OH$	אתאנול שמופק בשיטה זאת, משמש בעיקר ממס בתעשיה.
$CH_2=CH_2 \longrightarrow CH_3CH_2OH \longrightarrow$ $\xrightarrow[\text{זרז}]{O_{2(g)}} CH_3COOH$	חומצה אתאנואית משמשת בתעשיית המזון (חומץ ביתי), בייצור תרופות, כמוצר ביניים בתעשיות כימיות.
$CH_2=CH_2 \xrightarrow[\text{זרז}]{HCl} CH_3CH_2Cl$	כלורואתאן, משמש חומר להרדמה מקומית ומאוכסן במיכל כתרסיס. את הכלורואתאן מתיזים על המקום המיועד להרדמה; האידוי המהיר של החומר גורם לירידה משמעותית מאוד בטמפרטורה ולהקפאת המקום.
$CH_2=CH_2 \xrightarrow{Br_{2(sol)}} CH_2Br-CH_2Br$	דו ברומו אתאן משמש לייצור קוטלי חרקים (ביוצידים).
$CH_2=CH_2 \xrightarrow{O_{2(g)}/H_2O_{(l)}} \underset{OH}{CH_2}-\underset{OH}{CH_2}$	אתאן דיאול משמש כחומר מונע קיפאון (אנטיפריז), וכמרכיב בייצור פולימרים.

$CH_2=CH_2 \xrightarrow{Cl_{2(g)}} CH_2Cl-CH_2Cl \longrightarrow$ $\xrightarrow{KOH_{(alc)}} CH_2=CHCl \longrightarrow$ $\xrightarrow{\text{יום}} \left[CH_2-CHCl\right]_n$	ויניל כלורי — מונומר, ממנו מופק PVC, חומר פלסטי לייצור תקליטים, וילונות, לינולאום, כלים ועוד.
$CH_2=CH_2 \xrightarrow{\text{זרז/יום}} \left[CH_2-CH_2\right]_n$	פוליאתן, החומר הפלסטי הנפוץ ביותר. משמש לייצור שקיות לאריזת מזון, סיבים, כלים ועוד.

מנגנון הסיפוח לקשר הכפול וכלל מרקובניקוב

מנגנון הסיפוח לקשר הכפול, המתואר בפרק זה, נועד לתרום להבנה טובה יותר של תהליכי הסיפוח. כאמור, מנגנון הסיפוח לקשר הכפול לפי כלל מרקובניקוב, והסברים במונחים של הבדלי היציבות של יוני קרבוניום, הנוצרים בשלבי ביניים בתהליכי הסיפוח, אינם כלולים בתוכנית הלימודים.

הערכות מרחבית של האטומים סביב לקשר הכפול

כפי שמתואר בסעיף ה-3, עמוד 134, האלקנים יוצרים איזומרים מרחביים — סטראואיזומרים, המכונים גם איזומרים גאומטריים — ציס וטרנס. בדיון באיזומרים גאומטריים אפשר להדגיש את השפעת המבנה המרחבי של המולקולות על תכונות החומרים.

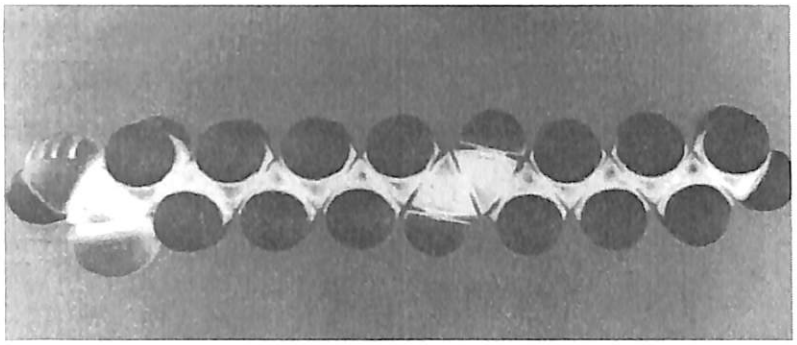
מומלץ להציג את ההבדלים במבנה מולקולות האיזומרים בעזרת מודלים ולהדגיש את הנקודות הבאות:

א. איזומרים ציס וטרנס קיימים אך ורק כאשר כל אחד משני אטומי הפחמן C=C קשור לשני אטומים שונים או שתי קבוצות שונות.

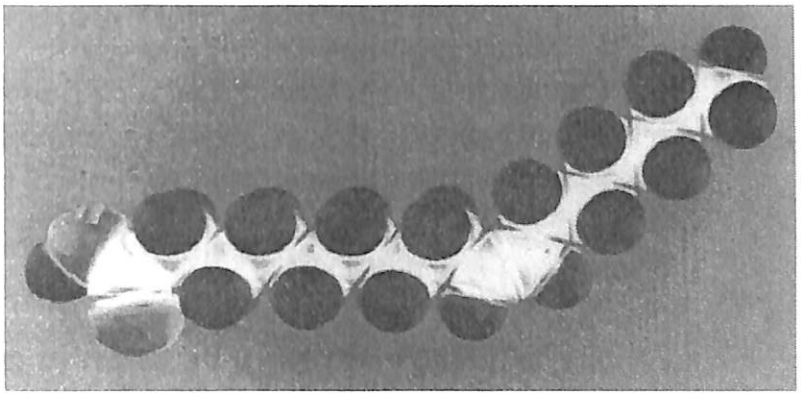
ב. במולקולות של איזומרים ציס וטרנס כל הקשרים זהים, אך ההערכות השונה של האטומים סביב לקשר הכפול משפיעה על תכונותיהם.

נביא דוגמות אחדות, בנוסף לאלה שבספר.

1. להלן נוסחות מבנה של מולקולת חומצה טרנס-9-הקסאדקאנואית:



ומולקולת חומצה ציס-9-הקסאדקאנואית:



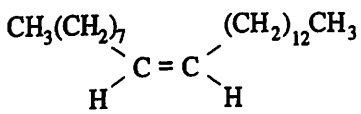
שיירים של שתי חומצות אלה מצויים בשומנים ושמנים.
אפשר להבחין, שהמולקולות של איזומר טרנס יוצרות שרשרות ישרות, שיכולות להסתדר באריזה צפופה. לעומתן, "הכיפוף" במקום הקשר הכפול, מפריע למולקולות של איזומר ציס להארז באריזה צפופה. כתוצאה, נקודת היתוך של האיזומר טרנס גבוהה יותר מזו של איזומר ציס. שומנים, המכילים שייר של איזומר טרנס, מוצקים, ואילו השייר של איזומר ציס מצוי בשמנים נוזליים.

2. הפעילות של חומרים במערכות ביולוגיות תלויה, לעיתים במידה מכרעת, בסידור המרחבי של אטומים במולקולות; לכן טבעי הוא, שאיזומרים ציס וטרנס מגלים פעילות שונה במערכות אלה.

לדוגמה:

פֵרומונים, תרכובות המופרשות על ידי חרקים ותפקידם העיקרי — משיכה מינית. ריח הפרומון המופרש על-ידי הנקבות בכמות זעירה ביותר, כ-10^{-9} מ״ג, גורם למשיכת החרקים הזכריים. כל חרק רגיש אך ורק לפרומונים של הזן שלו. פרומונים רבים הם תרכובות פשוטות למדי.

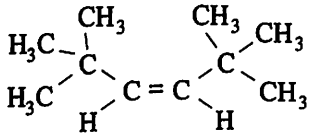
לדוגמה, ציס 9-טריקוסן, פרומון המין של זבוב-בית ניקבי:



מסתבר, שהנקבות מפרישות אך ורק את האיזומר ציס והזכרים לא נמשכים כלל לטרנס-9-טריקוסן. כלל ידוע בטבע: כאשר חומר יוצר מספר סטראואיזומרים, הטבע מנצל באופן בררני רק אחד מהם.

עם גילוי הפרומונים ויצורם באופן סינטטי, פותחו שיטות פשוטות ללכוד את החרקים הזכריים ועל-ידי כך להדביר חרקים, המזיקים לחקלאות. היתרון בשיטה, שאין בה שימוש בחומרי הדברה, היוצרים בעיות אקולוגיות חמורות.

3. אנתלפיית הקשר הכפול C=C באיזומר ציס ובאיזומר טרנס אינה זהה. הקבוצות הקשורות לאטומי הפחמן C=C במולקולות של איזומר ציס נמצאות באותו הצד של המישור. קבוצות אלה יכולות להמשך אחת לשניה וליצור קשרים תוך מולקולריים, כמו בדוגמה של החומצה המלאית, ובמקרים אחרים לדחות אחת את השניה. לדוגמה, ב-5,5,2,2-ארבע מתיל-ציס-3-הקסן:



אנתלפיית הקשר C=C נמוכה יותר מזו שבאיזומר טרנס. הקבוצות האלקיליות הגדולות באיזומר ציס דוחות זו את זו וגורמות לירידה באנתלפיית הקשר C=C.

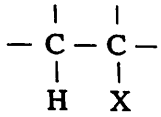
הפקת אלקנים מכהלים או מאלקיל הלידים

כאמור, בתהליכי זיקוק בתעשיות פטרוכימיות מקבלים, בדרך כלל, תערובת של הפחמימנים. אפשר להפיק אלקן טהור בשיטות מספר:

א. פיצוח אלקאן בנוכחות זרז מתאים:

$$CH_3CH_2CH_2CH_2CH_2CH_3 \xrightarrow[\text{חימום}]{\text{זרז}} CH_2=CHCH_2CH_2CH_2CH_3 + H_2$$

ב. אלימינציה — חילוץ, תהליך שבו משתתף כוהל או אלקיל הליד. ניסוח התהליכים מתואר בספר התלמיד, בעמוד 137. יש לציין, שתהליך אלימינציה מתאפשר רק כאשר למולקולות הכוהל או האלקיל הליד, מבנה מהסוג:



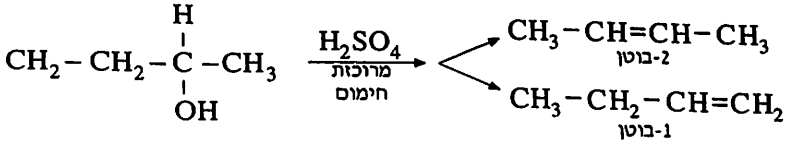
(X מסמל OH או אטום הלוגן).

כלומר, בכל מולקולה אטום פחמן אחד קשור לקבוצה OH או לאטום הלוגן ואטום הפחמן הסמוך קשור לאטום מימן אחד לפחות.

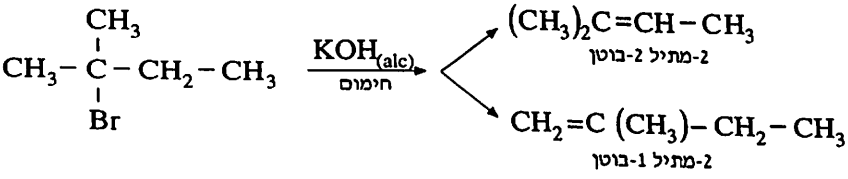
1-כלורו 2,2-דו מתיל פרופאן, לדוגמה, לא יכול ליצור אלקן בתהליך אלימינציה.

כאשר קבוצה X קשורה לאטום פחמן שניוני או שלישוני, והמולקולה לא סימטרית, מתקבלת, בדרך כלל, תערובת של אלקנים. לדוגמא:

(א)



(ב)



קיים הבדל ביציבות המולקולות של שני האיזומרים, שנוצרים בכל אחת מהתגובות; לכן, כמות האיזומרים בתערובת התוצרים אינה זהה (התוצר העיקרי בתגובה (א) — 2-בוטן ובתגובה (ב) — 2-מתיל 2-בוטן); אך אין מקום לדון בהבדלי היציבות של תרכובות אלה במסגרת הנוכחית.

ניסוי 11: הפקת אתַן

מטרת הניסוי:

להדגים הפקת אתן מאתאנול.

חומרים:	ציוד:
כ-3 מ"ל H_2SO_4 מרוכזת או שברי חרס או $Al_2O_{3(s)}$	מבחנה קשת היתוך עם פקק שדרכו עובר צינור (ראה ציור).
כ-10 מ"ל אתאנול או פרופאנול	צמר זכוכית
תמיסת ברום בממס אל-מימי	מבער

מהלך הניסוי מתואר בספר התלמיד.

אפשר להשתמש בניסוי בחומצה H_2SO_4 מרוכזת במקום שברי חרס.
למבחנה קשת היתוך עם צינור צדדי מכניסים כ-10 מ"ל אתאנול או פרופאנול ומוסיפים כ-3 מ"ל חומצה. **יש להקפיד על כללי הזהירות בעבודה עם החומצה!**
מחממים את תערובת המגיבים בעזרת מבער בזהירות רבה ומבעבעים את הגז שנוצר לתוך מבחנה עם תמיסת ברום בציקלוהקסאן.

אזהרה!
לפני הפסקת החימום יש להוציא את הצינור מתמיסת הברום.

הערה:
בציור בספר התלמיד, בעמוד 138, מתואר אותו ניסוי ובו אוספים את האלקאן במבחנה מעל אמבט מים. אחרי האיסוף סוגרים את המבחנה בפקק ומוסיפים לתוכה תמיסת ברום בציקלוהקסאן.

אחרי דיון בתכונות אלקנים ואלקאנים, ניתן להשלים את התרשים בעמוד 139. כעת התלמידים הכירו את כל התהליכים הכלולים בתרשים זה ואפשר לנצלו לתירגול שיטות להפיכת תרכובת פחמן אחת לתרכובת פחמן אחרת.

חומר רקע - מסתרי הטבעת הבנזנית

בחומר הרקע בפרק האחרון מוצג המבנה של מולקולת בנזן ושל מספר תרכובות ארומטיות נוספות. לקבוצת החומרים הארומטיים שייכות אלפי תרכובות, אך אלה לא כלולות בתוכנית הלימודים.
המטרה העיקרית של חומר הרקע — להציג את המבנה הייחודי של בנזן ולדון בהשפעת מבנה זה על התכונות שלו. מבנה המולקולות בצורת טבעת משושה וסידור האלקטרונים בה מקנים לבנזן ולתרכובות ארומטיות אחרות יציבות יוצאת דופן. למורים המעוניינים להעמיק את ידיעותיהם בנושא, ממולץ לעיין בירחון Scientific American, מרץ 1992, בספר של Morrison and Boyd Organic Chemistry, הוצאה 1992 או בספרי כימיה אורגנית אחרים.

בפרק "פולימרים סינטטיים" התלמידים דנים בתרכובות, שהמולקולות שלהן מכילות טבעת בנזנית ובהשפעת מבנה הטבעת על תכונותיהם. חומר הרקע יכול לתרום להבנה טובה יותר של נושאים אלה.

תשובות לשאלות פרק ה

השאלות 1 ו-2 דנות בתהליכי בעירה של אלקאנים.

שאלה 1:

א. בגרף מתקבל קו ישר.

ב. השיפוע $\frac{\Delta H_c^o}{\Delta n}$ מראה את ΔH_c^o עבור כל קבוצת $-CH_2$ במולקולה של פחמימן.

השיפוע: $\frac{\Delta H_c^o}{\Delta n} = 655kJ$

ג. $\Delta H_c^o = (-655) + (-3509) = -4164kJ$

אפשר לקבוע את ΔH_c^o של הקסאן גם לפי הגרף.

ד. נקודת החיתוך של הקו עם ציר ה-y מראה את אנתלפיית השריפה, כאשר לחומר אפס אטומי פחמן, כלומר למעשה ΔH_c^o של מימן או אנתלפיית התהוות של מים.

$$\Delta H^o_{c(H_{2(g)})} = \Delta H^o_{f(H_2O_{(l)})} = -286kJ$$

שאלה 2:

א. ניסוח מאוזן של תהליך השריפה של אוקטאן:

$$C_8H_{18\,(l)} + 12.5\,O_{2\,(g)} \longrightarrow 8CO_{2\,(g)} + 9\,H_2O_{(l)}$$

ב. אפשר לחשב את ΔH_c^o של אוקטאן באופן הבא:

$$\Delta H^o_{c(C_8H_{18})} = \Delta H^o_{c(C_5H_{12})} + 3(-655) = -5474kJ$$

ג. מסת 1 ליטר בנזין — 750 גרם.
מסה מולרית של C_8H_{18} — 114 גרם למול.
ב-1 ליטר בנזין יש 6.6 מול של C_8H_{18}.

ד. לפי הניסוח ב-א, לשריפת 1 מול C_8H_{18} דרושים 12.5 מול O_2.
נפח האוויר הדרוש לשריפת 1 ליטר C_8H_{18}:

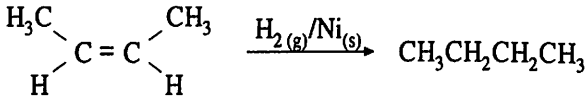
$$25\ l\cdot mol^{-1}\times 5\times 12.5\times 6.6\ mol = 10.3\ l$$

ה. בשריפת 1 מול C_8H_{18} משתחררים 5774kJ; לכן כמות האנרגיה המשתחררת בשריפת 1 ליטר בנזין:

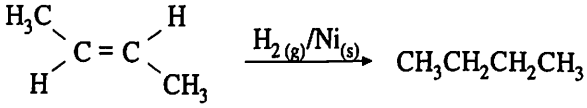
$$5774\ kJ\cdot mol^{-1}\times 6.6\ mol = 36020\ kJ$$

שאלה 4:

ניסוח תגובות הידרוגנציה:

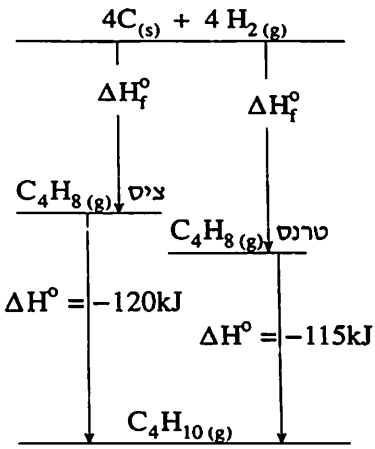


$\Delta H^o = -120kJ$



$\Delta H^o = -115kJ$

א. אפשר להראות את ההבדלים בערכי ה-ΔH_f^o של שני האיזומרים לפי התרשים הבא:



ניתן לראות ש-ΔH_f^o של האיזומר טרנס גבוה יותר בערכו המוחלט.

ב. אנתלפיית השריפה של איזומר ציס גבוהה יותר בערכה המוחלט (אפשר לצייר תרשים דומה לזה שב-א' לתהליך השריפה).

שאלה 10:

1. בשריפת שני האיזומרים נוצרים $CO_{2(g)}$ ו-$H_2O_{(l)}$, אך ניתקים בהם קשרים שונים.

א. בשריפה של ציקלופנטאן ניתקים הקשרים: $5\times(C-C)$
$10\times(C-H)$

ב. בשריפה של 2-פנטן ניתקים הקשרים: $3\times(C-C)$
$1\times(C=C)$
$10\times(C-H)$

לניתוק שני קשרי $C-C$ יש להשקיע יותר אנרגיה מאשר לניתוק קשר $C=C$, לכן אנתלפיית השריפה של 2-פנטן גבוהה יותר.

2. ציקלופנטאן לא מגיב עם תמיסה מימית של חומצה גפרתית.
2-פנטן מגיב בתגובת סיפוח.

נספח א - שאלות נוספות

שאלה 1

א. העזר בספר הנתונים וחשב את אנתלפית ההתהוות ΔH_f^o של $CBrCl_{3(g)}$ ושל $CBrF_{3(g)}$.
$CBrCl_3$ תרכובת רעילה ואילו $CBrF_3$ לא רעילה ומשמשת לכיבוי שריפות.

ב. הסבר מה גורם להבדל בערכי ה-ΔH_f^o של שתי התרכובות.

ג. מה גורם להבדל ברעילות של $CBrCl_3$ ושל $CBrF_3$?

שאלה 2

א. רשום נוסחות ייצוג אלקטרוניות של אתאן C_2H_6 ושל דו סילאן Si_2H_6.

ב. שתי התרכובות גזיות בטמפרטורת החדר. הסבר.

ג. דו סילאן Si_2H_6 לא קיים בטבע באופן חופשי, הוא מתלקח מעצמו באויר.
לעומתו, אתאן C_2H_6 קיים בטבע כאחד המרכיבים של נפט או של גז טבעי.
הוא מתלקח רק לאחר הצתה או חימום.

ד. נסח את תהליכי השריפה של שתי התרכובות.
מה גורם להתנהגותן השונה באוויר? הסבר.

שאלה 3

א. באיזה מהתהליכים הבאים מתרחשת תגובת חמצון של המגיב האורגני?

$$CH_3Cl \xrightarrow{HBr_{(g)}} CH_3Br$$

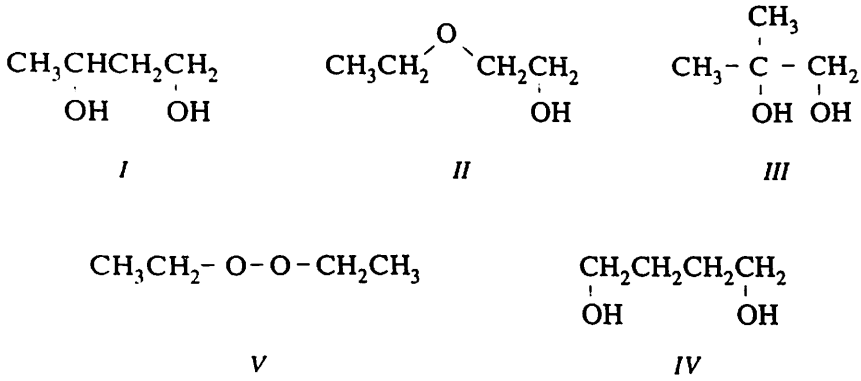
$$CH_3OH \xrightarrow{HBr_{(g)}} CH_3Br$$

$$CH_4 \xrightarrow{Br_{2\,(g)}} CH_3Br$$

$$CH_3Br \xrightarrow{NH_{3\,(g)}} CH_3NH_2$$

שאלה 4

לפניך נוסחות המבנה הבאות:



אלו נוסחות מייצגות איזומרים?

א. I, III ו-V

ב. I, II ו-III

ג. I, II, III ו-V

ד. כולן

שאלה 5

רשום נוסחות מבנה של: 1-פרופאנול, 3,1-פרופאן די-אול, 3,2,1-פרופאן טרי-אול. (גליצרול).

א. אחד החומרים ברשימה הוא חומר צמיגי וצפיפותו גבוהה ממים (1.26 ג'/סמ"ק). איזהו? נמק.

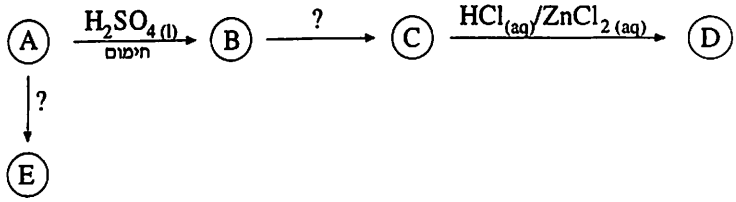
ב. לאחד הכהלים שברשימה צפיפות נמוכה מזו של מים. איזהו? נמק.

ג. לגליצרול שימושים רבים, בין היתר נהוג להוסיפו לדבקים ולרסס בו עלי טבק. תוספת הגליצרול נועדה למנוע התייבשות כיצד מושגת מטרה זו?

ד. מנה מוצרים נוספים שבהם משתמשים בגליצרול.

שאלה 6

לפניך התרשים הבא:



נתון כי:

הנוסחה המולקולרית של B: C_4H_8.

E נמס טוב במים ולתמיסתו $pH < 7$.

D מתקבל מ-C בתגובה מיידית, ללא חימום.

א. רשום נוסחות מבנה אפשריות של התרכובות A עד D.

ב. איזה חומר נוסף דרוש להפקת E מ-A? באילו תנאים?

ג. איזה חומר נוסף דרוש להפקת C מ-B? באילו תנאים?

ד. אילו מבין התרכובות A עד E מגיבות עם $Na_{(s)}$? נסח את התגובה/ות המתאימה/ות.

ה. איזו מבין התרכובות A עד E גז בטמפרטורת החדר? הסבר.

ו. לאיזו מבין התרכובות A עד E מסיסות זניחה במים? הסבר.

ז. לתרכובת B שלושה איזומרים נוספים. רשום את נוסחות המבנה שלהם.

ח. כיצד תבחין בין A לבין C? פרט מה תעשה ומה תראה.

שאלה 7

תרכובת A מורכבת מפחמן מימן וחמצן בלבד. הנתונים שלהלן מתייחסים למסת היסודות ב-100 גרם תרכובת:

C	H	O
40.0 גי	6.67 גי	53.33 גי

א. מצא את הנוסחה האמפירית של התרכובת.

נמצא שהמסה המולרית של A – 90 גרם למול.

ב. מהי הנוסחה המולקולרית של A?

ג. רשום נוסחות מבנה אפשריות.

להלן תוצאות ניסויים שבוצעו כדי לקבוע את נוסחת המבנה של A.

I. תרכובת A נמסה טוב במים ולתמיסתה pH < 7.

II. 0.005 מול תרכובת A מגיבים עם 25 מ"ל 0.2M NaOH עד שמתקבלת תמיסה ניטראלית.

III. תרכובת A מגיבה עם תמיסה מימית של $KMnO_4$ ולתמיסת התוצר B pH<7. 0.005 מול תוצר B מגיבים עם אותו נפח 0.2M NaOH כמו התרכובת A.

ד. בהסתמך על התוצאות I עד III קבע את נוסחת המבנה של A.

שאלה 8

השאלה דנה באיזומרים A ו-B להם הנוסחה המולקולרית $C_5H_{11}Cl$.

I. A אינו מגיב עם תמיסת KOH בכוהל.

II. שני האיזומרים A ו-B מגיבים עם תמיסה מימית של KOH.
תוצרי תגובות אלה מגיבים עם תמיסה מימית של $KMnO_4$ ויוצרים חומצות מתאימות.

III. B מגיב עם תמיסת KOH, בכוהל. בתגובה מתקבל C שממנו ניתן לקבל את D לפי התרשים הבא:

$$B \xrightarrow[\text{חימום}]{KOH_{(alc)}} C \xrightarrow{H_2O_{(l)}} D$$

התוצר D אינו מגיב עם תמיסה מימית של $KMnO_4$.

א. הצע נוסחות מבנה אפשריות של A ו-B.

ב. מדוע A אינו מגיב עם תמיסת KOH בכוהל אך מגיב עם תמיסה מימית של KOH ?

ג. רשום נוסחות מבנה של C ו-D.

ד. נסח את התגובות של D עם: i) $Na_{(s)}$ ii) $HBr_{(g)}$.

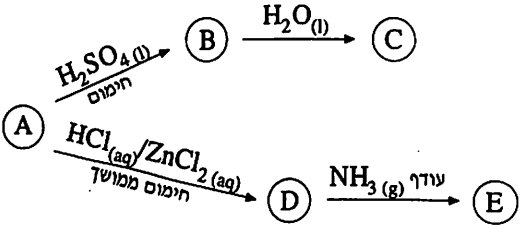
שאלה 9

השאלה מתייחסת לתרכובת A בעלת התכונות הבאות:

I. מסה מולרית 88 גרם למול.

II. מגיבה עם Na תוך שיחרור גז דליק ומגיבה עם מפעיל לוקס רק אחרי חימום ממושך.

לפניך תרשים הזרימה הבא:



B הוא התוצר היחיד המתקבל בתגובת A עם H_2SO_4 מרוכזת. ל-B אין איזומרים גיאומטריים.

C מגיב עם $Na_{(s)}$, אך לא מגיב עם תמיסה מימית של $KMnO_4$.

א. הצע נוסחות מבנה לתרכובות A עד E.

ב. E מתמוסס יותר טוב בתמיסת HCl מאשר במים. נסח את התגובה המתאימה.

ג. רשום נוסחות מבנה של התוצר העיקרי המתקבל בתגובה בין:

I. B ו-HCl.

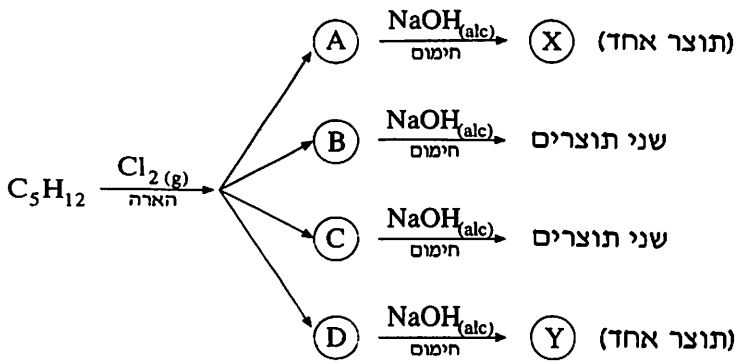
II. A וחומצה אתאנואית.

III. D ותמיסת KOH בכוהל.

שאלה 10

אלקאן שנוסחתו C_5H_{12} מגיב עם $Cl_{2(g)}$ בהארה. מתקבלים ארבעה תוצרים חד-כלוריים $C_5H_{11}Cl$ המסומנים באותיות A עד D.

תוצרים אלה מגיבים בחימום עם תמיסה כהלית של NaOH. בתרשים הבא מתוארים פירטי התגובות:



רשום נוסחות מבנה אפשריות לתרכובות A עד Y.

שאלה 11

א. נסח את התגובות שבעזרתן אפשר להפיק כלורואתאן באמצעות החומרים הבאים:

$H_{2\,(g)}$,$Cl_{2\,(g)}$,$C_2H_{4\,(g)}$

ב. חשב את כמות האנרגיה הנפלטת או הנקלטת בתהליכים אלה (העזר באנתלפיות הקשרים).

ג. כלורו אתאן אפשר להפיק בתגובה בין אתאן לבין $Cl_{2(g)}$. נסח את התהליך ומצא את ה-ΔH^o שלו. מה היתרון בהפקת הכלורואתאן לפי תהליך א? נמק.

שאלה 12

לפניך נוסחות מבנה של ארבע תרכובות:

$$CH_3CH_2Br \quad , CH_3CH_2CH_2OH \quad , CH_3-\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}-CH_3 \quad , CH_3CH_2COOH$$

התרכובות נמצאות בארבע מבחנות נפרדות לא מסומנות.

אלו בדיקות תבצע (פרט לקביעת טמפרטורת הרתיחה של החומרים) על מנת לזהות מהו החומר בכל אחת מארבע המבחנות?
בכל מקרה רשום מה תעשה ומה תראה. במקרה של תגובה כימית, רשום את ניסוחה.

שאלה 13

לשתי מבחנות נפרדות מכניסים 20 מ"ל חומצה הקסאנואית $C_5H_{11}COOH$ (צפיפות 0.93 גרם לסמ"ק). מוסיפים:

למבחנה (1) 20 מ"ל מים מזוקקים.

למבחנה (2) 20 מ"ל אתאנול.

רק במבחנה (1) נוצרות שתי שכבות. הסבר.

למבחנה (1) מכניסים מספר גבישים של NaOH עד שמגיבה כל החומצה.

א. מהו השינוי שתראה? הסבר מה גרם לשינוי זה?

ב. כמה גרם NaOH יש להוסיף לתגובה עם כל הכמות הנתונה של החומצה? חשב.

שאלה 14

נתונות נקודות רתיחה של שלוש תרכובות: A, B ו-C:

	$(CH_3)_3N$	$(CH_3)_3CH$	$(CH_3)_3COH$
	C	B	A
נקודת רתיחה (°C)	3	-10	83

א. הסבר מה גורם להבדל בנקודות הרתיחה של A ו-B?

ב. לאיזו/אלו מהתרכובות מסיסות גבוהה במים? נמק.

ג. איזה/אלו תרכובת/ות מגיב/ות עם $HBr_{(g)}$? נסח את התגובה/ות.

ד. איזה מבין תוצרי התגובה בסעיף ג הינו מוצק, בעל מסיסות גבוהה במים ותמיסתו המימית מוליכה זרם חשמלי? נסח את תגובת ההמסה.

שאלה 15

בחימום תרכובת X עם תמיסה מימית של NaOH, התקבלו שני תוצרים: CH_3COONa ותרכובת Y.

כדי לזהות את Y נעשו מספר בדיקות והתקבלו התוצאות הבאות:

i. בשריפה של 1.2 גרם Y נוצרו 2.64 גרם CO_2 ו-1.44 גרם H_2O.

ii. נמצא, שבתנאי תקן המסה של 37.3 ליטר אדי Y היא 100 גרם.

iii. Y מגיבה עם תמיסת מפעיל לוקס לאחר חימום במשך כ-5 דקות.

א. קבע את הנוסחה האמפירית והמולקולרית של Y. פרט חישובך.

ב. הצע נוסחת מבנה של Y. הצע דרכים לאמת את קביעתך.

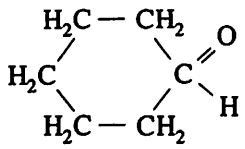
ג. רשום את נוסחת המבנה של X.

שאלה 16

א. כמה איזומרים חד-ברומיים אפשר לקבל מציקלוהקסאן?

ב. כמה איזומרים חד-ברומיים אפשר לקבל ממתיל ציקלוהקסאן?

ג. רשום תגובות בצורת תרשים זרימה, שבעזרתן אפשר להפוך אחד האיזומרים החד-ברומיים שבסעיף ב' לאלדהיד שנוסחתו:



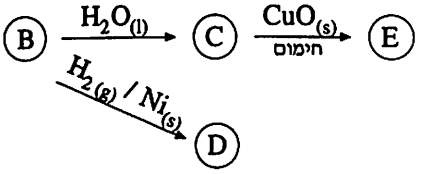
שאלה 17

פחמימן A מכיל 85.6% פחמן לפי המסה. מסתו המולרית – 70 גרם למול.

א. מהי נוסחתו המולקולרית של A?

ב. רשום נוסחות מבנה של האיזומרים הלא טבעתיים והלא מסועפים של A.

ג. אחד האיזומרים שרשמת, נסמנו B, מתקבל בחימום של 1-פנטאנול עם $H_2SO_{4(l)}$, ומגיב בשרשרת תגובות המופיעות בתרשים הזרימה הבא:



ד. רשום את נוסחות המבנה של B עד E.

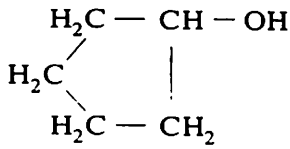
ה. כיצד תבחין בין B ו-D? ציין מה תעשה ומה תראה.

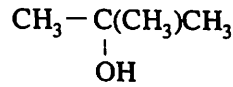
שאלה 18

לפניך נוסחותיהן של ארבעה כהלים:

$CH_3CH_2CH_2CH_2CH_2OH$

$CH_3C(CH_3)_2CH_2OH$





איזהו המשפט הנכון?

כל אחד מהכהלים:

א. עשוי להגיב עם $Al_2O_{3(s)}$ בחימום.

ב. עשוי להתקבל בתגובת סיפוח מים לאלקן מתאים.

ג. עשוי להגיב עם תמיסה מימית של $KMnO_4$.

ד. עשוי להגיב עם $HBr_{(g)}$.

שאלה 19

לפניך נוסחות המגיבים בארבעה התהליכים הבאים:

1. $CH_3COOH_{(l)} \xrightarrow[\text{חימום}]{NH_{3\,(g)}} ?$

2. $CH_3COOH_{(l)} \xrightarrow{NH_{3\,(g)}} ?$

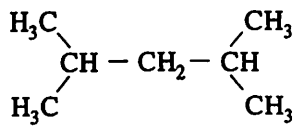
3. $CH_3CH_2OH_{(aq)} \xrightarrow{NH_{3\,(g)}} ?$

4. $CH_3CH_2Br_{(l)} \xrightarrow[\text{חימום}]{NH_{3\,(g)}\ \text{עודף}} ?$

אילו תגובות מתרחשות?
רשום נוסחות מבנה של תרכובות הפחמן הנוצרות.

שאלה 20

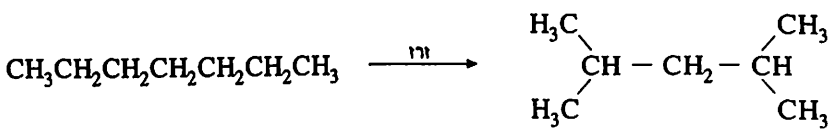
לפניך נוסחת אלקאן



א. רשום את שמו השיטתי.

ב. כמה איזומרים חד כלוריים אפשר לקבל בתגובה בין האלקאן לבין $Cl_{2(g)}$ בהארה או בחימום.

ג. בתהליך איזומריזציה של מול n-הפטאן נקלטים 9.8 kJ:



איזה משני האיוומרים חומר דלק טוב יותר? הסבר.

שאלה 21

כיצד תהפוך כל אחד מהחומרים הבאים לאלקן מתאים:

א. 1-פרופאנול

ב. 2-ברומו בוטאן

ג. 1-יודו פרופאן

ד. 2-מתיל 2-בוטאנול

בכל מקרה ציין את המגיב המתאים, את תנאי התגובה ורשום את ניסוח התהליך בצורת תרשים זרימה.

שאלה 22

לפניך הנוסחות של שלוש תרכובות:

CH_3NH_3Cl , CH_3NH_2 , $CH_3(CH_2)_5NH_2$

בטמפרטורת החדר אחת התרכובות גז, אחת נוזל ואחת מוצק.

א. התאם את מצבי הצבירה לכל תרכובת והסבר את קביעתך.

לכל אחת מהתרכובות הוסיפו מים.

ב. ציין את המסיסות של כל התרכובת, את המוליכות החשמלית של כל תמיסה ואת ה-pH שלה. נמק.

שאלה 23

הסבר את העובדות הבאות:

א. נקודת רתיחה ב- °C:

של מתאנול	CH_3OH	+46
של מתיל ברומי	CH_3Br	+4
של מתיל אמין	CH_3NH_2	−6

ב. תמיסה מימית של חומצה פרופאנואית CH_3CH_2COOH מוליכה זרם חשמלי ואילו תמיסת החומצה בהקסאן $C_6H_{14(l)}$ אינה מוליכה. נסח את התגובות המתאימות.

ג. אנתלפיית אידוי של 1-בוטאנול גבוהה מזו של 2-מתיל 2-פרופאנול.

ד. אנתלפיית השריפה של ציקלוהקסאן נמוכה יותר מאנתלפיית השריפה של 1- הקסן.

שאלה 24

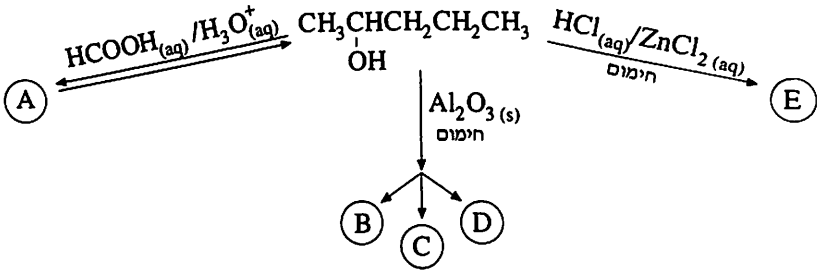
נתונה תמיסה, שמכילה חומצה קרבוקסילית RCOOH וקטון RCOR ב-$CH_2Cl_{2(l)}$.
לשני המומסים מסיסות נמוכה במים. החומצה RCOOH מוצקה בטמפרטורת החדר. כדי לקבל את החומצה הטהורה, מבצעים שרשרת של פעולות:

1. לתמיסה הנתונה מוסיפים תמיסה מימית של 1M NaOH. לאחר נעור נוצרות שתי שכבות. מוודאים שלשיכבה המימית תגובה בסיסית חלשה.
2. מפרידים בין השכבות.
3. לשיכבה מימית מוסיפים תמיסת 1M HCl עד שמתקבלת תגובה חומצית חלשה.
4. לתמיסה שמתקבלת ב-3 מוסיפים $CH_2Cl_{2(l)}$. שוב נוצרות שתי שכבות.
5. מנערים, מפרידים בין השכבות ומזקקים את תמיסת הממס הלא מימית.
6. מיבשים את המוצק.

הסבר את שרשרת הפעולות הנ"ל. ציין מה מתקבל בכל פעולה, איזה חומר נמצא בכל שיכבה ומדוע היה צורך בכל הפעולות המתוארות.

שאלה 25

לפניך תרשים של תגובות אחדות של 2-פנטאנול:



א. רשום נוסחות מבנה אפשריות של התוצרים: A עד E.

ב. נמצא שכל אחד מהתוצרים B, C ו-D מגיב בחימום עם תמיסה מימית של $HCl_{(aq)}$. C יוצר 2-פנטאנול כתוצר עיקרי, B ו-D יוצרים שני תוצרים כל אחד: 2-פנטאנול ו-3-פנטאנול.
נסח את התגובות וקבע את נוסחות המבנה של B, C ו-D.

נספח ב - מסיסות

נספח זה בא להבהיר סוגיות אחדות בנושא מסיסות. אין כאן כוונה להוסיף חומר לימוד חדש, אלא לדון בשורה של בעיות, שעשויות להתעורר בכיתה במהלך דיון בנושא.

רוב התהליכים הכימיים המתבצעים במעבדה, בתעשיה וגם בטבע מתרחשים בתמיסה.
כידוע, תמיסה היא תערובת אחידה של מספר מרכיבים. התערובת יכולה להיות גזית (אוויר) או מוצקה (סגסוגת), אך רוב התמיסות הן נוזליות ובהמשך נדון רק באלה. תמיסות מתקבלות, כאשר בנוזל כלשהו מומס מוצק, גז או נוזל אחר. המרכיב הנוזלי, המצוי בעודף, מכונה ממס והמרכיב(ים) האחר(ים) מומס(ים). הממס יכול להיות גם תערובת של נוזלים אחדים. המסיסות של חומר בממס נתון היא תכונה קבועה, שתלויה בטמפרטורה (ובלחץ, במידה והמומס הינו גז). בנפח נתון של נוזל אפשר להמיס כמות מסוימת של מוצק או גז (בטמפרטורה נתונה), עד שמתקבלת תמיסה רוויה. כאשר מנסים ליצור תמיסות של נוזל בנוזל, יתכנו שלושה מצבים שונים:

א. נוזלים, שלא מתערבבים (כמעט) ויוצרים שכבות ניפרדות, כדוגמת שמן ומים.

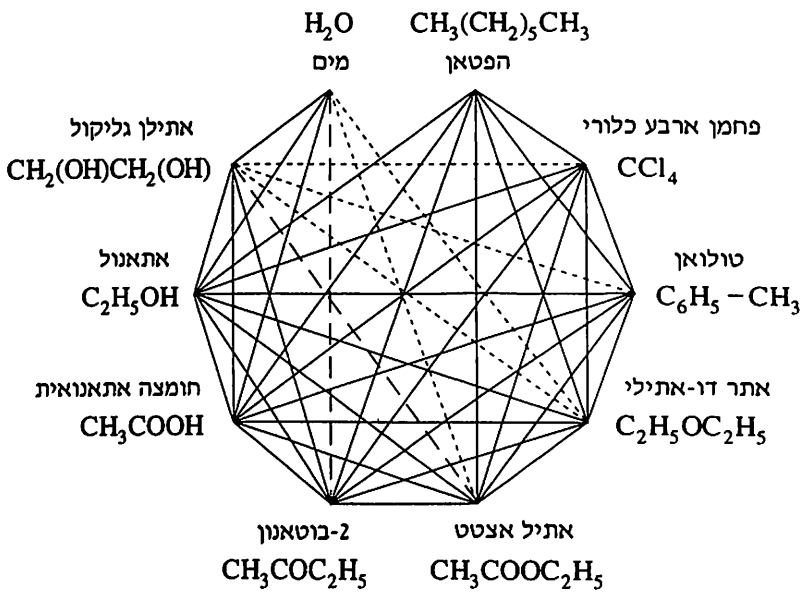
ב. נוזלים, שהמסיסות של האחד בשני מוגבלת, עד לקבלת תמיסה רוויה. לדוגמה, ב-100 גרם מים אפשר להמיס כ-4 גרם של אתר דו אתילי (ב-25°C). כל תוספת אתר תגרום להתהוות שתי שכבות.

ג. נוזלים שמתערבבים בכל היחסים, כדוגמת אתאנול ומים.

בתהליך המסה ניתקים הקשרים הקיימים בין חלקיקי המומס וחלק מהקשרים בין מולקולות הממס, ובין הממס והמומס נוצרים קשרים חדשים. לעתים, הממס מהווה לא רק סביבה שבה מתפזרים חלקיקי המומס, אלא משתתף באופן פעיל בתהליכים שונים שמתרחשים בתמיסה. מסיבות אלה לממס יכולה להיות השפעה ניכרת על מהלכן של התגובות, ובחירת ממס מתאים חשובה ביותר בביצוע של כל תהליך כימי. (בהמשך נביא דוגמות אחדות לכך).

נשאלת השאלה: כיצד נדע לבחור ממס מתאים?

כלל ניסיוני קובע: "דומה נמס בדומה". במילים אחרות, אם לממס ולמומס מבנה מולקולרי דומה, כגון קבוצות פונקציונליות דומות ו/או אטומים בעלי אלקטרושליליות קרובה, צפוי שהם יתערבבו אחד בשני. לדוגמה, מתאנול או אתאנול מתערבבים עם מים בכל היחסים. למולקולות כוהל ולמולקולות מים מבנה דומה — קבוצה משותפת OH—. אחרי הערבוב מתקבלת תמיסה, ש"הסדר" והקשרים הנוצרים בה, דומים לאלה הקיימים בכל אחת מהמרכיבים. אבל, מסתבר, שמתאנול מתערבב עם הקסאן וגם עם בנזן בכל היחסים, חומצת חומץ מתערבבת עם פחמן ארבע כלורי, מים מתערבבים עם דו-מתיל פורמאמיד, ואפשר להביא עוד דוגמות של תמיסות, שבהן אין, לכאורה, דמיון רב במבנה המולקולרי של המרכיבים. יתרה מזאת, קיימים חומרים, שדומים במבניהם המולקולרי לזה של הממס ובכל זאת לא מתמוססים בו. לדוגמה, רוב הכהלים לא מתמוססים טוב במים. בין המצבים הקיצוניים המתוארים קיימים אין ספור מצבי ביניים של מסיסות חלקית. בתרשים שלהלן מתוארת המסיסות של תרכובות אחדות.



——— מתערבבים בכל היחסים

— — — מסיסות מוגבלת

- - - - - - - מסיסות נמוכה

ללא קו - בלתי מסיס

מה קובע, אם כן, את המסיסות? מדוע חומר אחד נמס טוב בממס מסוים ומסיסותו של האחר בו חלקית או זניחה? אילו נתונים עלינו לקחת בחשבון בבחירת ממס?

מסתבר, שלמרות המחקרים הרבים והידע הרב, שהצטבר בנושא המסיסות, עדיין לא ניתן ליצור מודל אחיד, ובעזרתו לקבוע את כושר ההמסה של חומרים שונים בנוזל זה או אחר. בדומה לכל התהליכים הכימיים, דיון כמותי בתהליכי המסה דורש התיחסות לשינוי האנתלפיה ולשינוי האנטרופיה של המערכת. תמיסה מתקבלת כאשר המערכת הנוצרת עדיפה מבחינה תרמודינמית בהשוואה למרכיביה הנפרדים; במילים אחרות, השינוי באנרגיה החופשית בהתליך ההמסה $\Delta G^o_{sol} < 0$;

$$\Delta G^o_{sol} = \Delta H^o_{sol} - T\Delta S^o_{sol}$$

בהעדר נתונים תרמודינמיים מתאימים לגבי רוב התמיסות, לא ניתן לדון בהבטים הכמותיים של המסיסיות.

מסיבות אלה נתיחס בהמשך למספר נתונים, שקשורים למבנה המולקולות ולקשרים בין מולקולריים, ובעזרתם נבדוק הבטים איכותיים אחדים שקשורים לתהליכי המסה.

אלו קשרים ניתקים ואלו נוצרים בתהליך ההמסה?

כאמור, בעת ההמסה ניתקים קשרים קיימים ונוצרים קשרים חדשים.

- בין חלקיקי המומס ניתקים קשרים יוניים, או בין מולקולריים (קשרי מימן או קשרי ון דר וואלס) .
- בין חלקיקי הממס ניתקים קשרים בין מולקולריים מהסוג הנ"ל.

הקשרים שנוצרים בין חלקיקי המומס והממס עשויים להיות:

- בין יונים של המומס לבין מולקולות בעלות דו-קוטב קבוע של הממס.
- קשרי מימן, שנוצרים, כידוע, בין מולקולות עם דו-קוטב קבוע, שבהן אטומי מימן קשורים לאטומי N,O,F.
- קשרי ון דר וואלס, שיכולים להיווצר בין מולקולות עם דו-קוטב קבוע, בין מולקולות עם דו-קוטב קבוע ומולקולות חסרות דו-קוטב קבוע ובין מולקולות חסרות דו-קוטב קבוע, עקב יצירת בהן דו-קוטביים מושרים (רגעיים).

כל סוגי הקשרים שצוינו, נדונו בפרקים קודמים, בספר "הכימיה — אתגר". מומלץ להפנות את התלמידים לעיין בפרקים ו' ו-י' ולדון בגורמים המשפיעים על חוזק קשרים אלו.

בטבלה שלהלן מובאים נתונים אודות אינטראקציות בין חלקיקים שונים.

סוגי אינטראקציה	תלות האינטראקציה במרחק	סדרי גודל של האינטראקציה kJ/mol
יון—יון	$1/r$	4000 — 400
יון—דו-קוטב קבוע	$1/r^2$	600 — 40
קשרי מימן	—	40 — 10
דו-קוטבים קבועים	$1/r^3$	25 — 5
דו-קוטב קבוע — דו-קוטב מושרה	$1/r^6$	10 — 2
דו-קוטבים מושרים	$1/r^6$	40 — 0.05

נתוני הטבלה מלמדים כי:

האינטראקציה, המהווה מדד לחוזק כוחות המשיכה, תלויה בסוג החלקיקים ובמרחק ביניהם.

יש לציין, שכל סוגי הקשרים, הנוצרים בין מולקולות הממס לבין חלקיקי המומס, חלשים בהשוואה לקשרים יוניים, אבל, כאשר מספר רב של קשרים כאלה פועל יחדיו, השפעתם משמעותית מאד.

מדדים לקוטביות הממס

כוחות המשיכה בין מולקולות המומס והממס תלויים בקוטביותן וגם ביכולתן ליצור דו-קוטבים מושרים.

מידע חלקי אודות קוטביות הממסים, ניתן לקבל מערכי מומנט דיפול μ וקבוע דיאלקטרי ε_r (ראה הגדרות בטבלה 1, עמוד 113).

מומנט דיפול — מדד מיקרוסקופי, מראה מה ערכו של הדו-קוטב הקבוע במולקולה.

קבוע דיאלקטרי — מדד מקרוסקופי, המראה מה מידת הקוטביות של הממס. קוטביות זו תלויה בגודל הדו-קוטבים הקבועים במולקולות וגם ביכולתן לקטב ולהקטב. מומנט דיפול וקבוע דיאלקטרי הם גדלים משלימים.

הנתונים בטבלה 1 בעמוד 113 מראים, שלעתים אין הקבלה בין ערכי ה-μ וה-ε_r. לדוגמה, למולקולות מתאנול ולמולקולות 1,1,1-תלת כלורו אתאן (TCE) מומנט דיפול זהה, אך יש הבדל ניכר בערכי ה-ε_r שלהם. במילים אחרות, למולקולות של שתי התרכובות דו-קוטבים קבועים זהים, אך למולקולות מתאנול יכולת גדולה יותר לקטב מזו של מולקולות ה- TCE.

מומנט דיפול וקבוע דיאלקטרי, עוזרים לאפיין ולסווג ממסים באופן איכותי, כפי שנדגים בהמשך.

סווג של ממסים

קיימות שיטות אחדות לסווג ממסים: לפי נקודות רתיחה, צפיפות, קוטביות, יכולת ליצור קשרי מימן, לפי תכונות חומצה-בסיס ועוד. במסגרת הנוכחית, נסווגם לממסים של תרכובות יוניות וממסים של תרכובות מולקולריות.

ממסים של תרכובות יוניות

רוב התמיסות היוניות הן תמיסות מימיות. כידוע, בתמיסה מימית כל יון קושר אליו מספר מולקולות מים בתהליך המכונה מיום*. חוזק הקשרים, שנוצרים בתהליך המיום, תלוי בצפיפות המטען של היון (המנה של גודל המטען לגודל היון). ככל שצפיפות המטען גדולה יותר, אנתלפיית המיום גבוהה יותר.
ברוב תהליכי ההמסה של מוצק בנוזל או נוזל בנוזל האנטרופיה עולה. הערבוב בין החלקיקים השונים תורם לעליה באנטרופית המערכת. אולם, יונים בעלי צפיפות מטען גבוהה, כדוגמת Li^+, Ca^{2+}, F^-, יוצרים קשרים חזקים עם מולקולות המים. כתוצאה, מתקבלת מערכת מסודרת יותר מזו הקיימת לפני הערבוב, דבר הגורם לירידה באנטרופיית המערכת. המסיסות של מוצקים כאלה במים טובה, בתנאי, שהאנרגיה המשתחררת בתהליך המיום גדולה יותר מהירידה באנטרופיית המערכת.

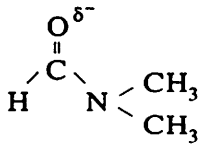
ממסים נוספים, בעלי קבוע דיאלקטרי גבוה, מתאימים גם כן, להמסת תרכובות יוניות. לדוגמה, אמוניה נוזלית, $NH_{3(l)}$ או אצטוניטריל, CH_3CN, המשמש אלקטרוליט בסוללות ליתיום, ויכול להמיס $SO_{2(g)}$ ומלחי ליתיום.

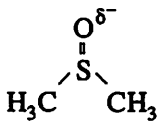
---

* בין חלקיקי המומס ומולקולות הממס נוצרים קשרים בתמיסות מכל סוג ולא רק בתמיסות יוניות במים. התהליך מכונה בשם כללי — סולבטציה.

ממסים אחדים, כדוגמת אתאנול, אמוניה נוזלית, אמינים, שבהם אטומי המימן במולקולות קשורים לאטומי חנקן או חמצן, עשויים להגיב כבסיס או כחומצה עם חלקיקי המומס. כאשר תהליכים כאלה אינם רצויים, משתמשים בממסים כדוגמת,

דו מתיל פורמאמיד (DMF) ודו מתיל סולפאוקסיד (DMSO)





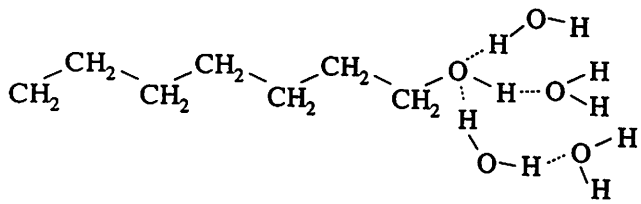
לשני ממסים אלה קבוע דיאלקטרי גבוה (ראה טבלה 1 עמוד 113) ואפשר להמיס בהם תרכובות יוניות. לאטומי החמצן שבמולקולות שלהם, מטען שלילי חלקי חזק, המאפשר סולבטציה חזקה של היונים החיוביים. הסולבטציה של היונים השליליים חלשה יותר, כי האטומים בעלי מטען חיובי חלקי, C או S, שבמולקולות הממס, קשורים לקבוצות אלקיליות, המקשות על הגישה אליהם.

מולקולות של ממסים בעלי קבוע דיאלקטרי נמוך ו/או מומנט דיפול נמוך, יכולות ליצור רק קשרים רופפים עם יונים, ולכן לא מתאימים, בדרך כלל, להמסת תרכובות יוניות.

ממסים של תרכובות מולקולריות

רוב התרכובות האורגניות הן תרכובות מולקולריות. חלקן מורכב ממולקולות חסרות דו-קוטב קבוע וחלק אחר, ממולקולות עם דו-קוטב קבוע ניכר, אך מרביתן לא מתמוסס טוב במים.
המולקולות של תרכובות, כדוגמת אלקיל כלורידים, אסטרים, אמידים, מכילות אטומים בעלי אלקטרושליליות גבוהה, שיכולים ליצור קשרים חזקים עם הקטבים החיוביים שבמולקולות המים. אולם, במולקולות אלה, אטומי הפחמן בעלי מטען חיובי חלקי, "חבויים", כי הם מוקפים באטומי מימן או בקבוצות אלקיליות, שגורמות לפיזורו של המטען החיובי ומפריעות לגישה של מולקולות המים אליהם. מסיבות אלה, המולקולות של התרכובות האמורות לא יוצרות קשרים חזקים עם מולקולות המים ומסיסותן במים נמוכה. חלקן אף משמש ממס לא מימי.

מים יכולים להמיס תרכובות פחמן שמכילות עד 3-4 אטומי פחמן במולקולה ויוצרות קשרי מימן עם מולקולות המים. לדוגמה, אצטון, אתר דו-מתילי, אתאנול, חומצה אתאנואית מתמוססים טוב במים. כאשר מספר אטומי פחמן במולקולות של תרכובות הפחמן עולה, המסיסות במים יורדת, גם אם הן מכילות קבוצות, שעשוייות ליצור קשרי מימן עם מולקולות המים. לדוגמה, ל-1-הפטאנול מסיסות נמוכה במים: כל מולקולה מכילה שייר פחמימני הידרופובי ארוך ורק חלק קטן בה ממוים:

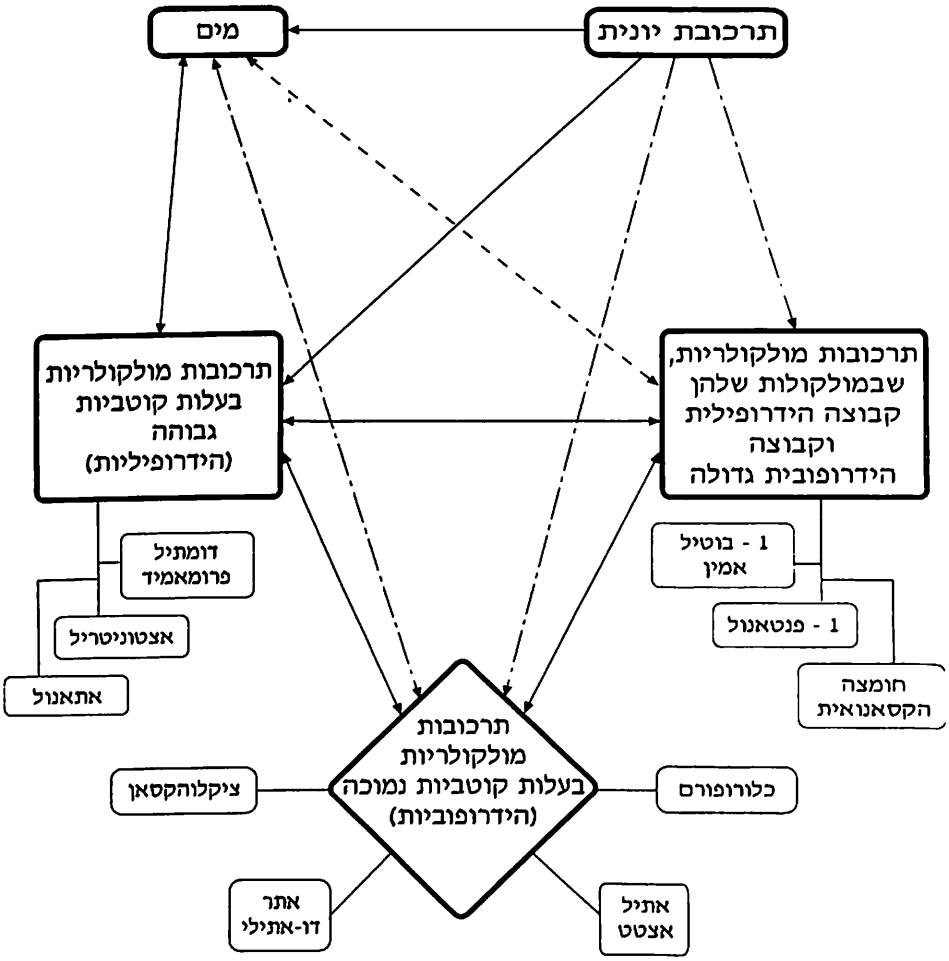


בגלל השייר ההידופובי, 1-פנטאנול מתמוסס בממסים לא מימיים, כדוגמת הפטאן, אתר דו-אתילי, אצטון.
באופן כללי, לא קיימת חוקיות, המאפשרת לקבוע את המסיסיות של תרכובת פחמן אחת בתרכובת פחמן אחרת ולעתים הדבר נקבע בדרך ניסויית.
בהתאם לגודל היחסי של הקבוצה ההידרופילית והקבוצה ההידרופובית במולקולות של תרכובות הפחמן, נוח לסווגן להידרופיליות והידרופוביות או ליפופיליות (אוהבות שומן).

בעת ההמסה של חומרים, שמורכבים ממולקולות עם שייר הידרופובי ארוך (מעל 4 אטומי פחמן) וקבוצה הידרופילית, כדוגמת, $-NH_2$, $-COOH$, $-OH$ המולקולות מסתדרות כך, שהקבוצות ההידרופוביות נדחות מהמים ונצמדות זו לזו והקבוצות ההידרופיליות יוצרות קשרים עם מולקולות המים. התנהגות זו מקנה לסבון ולדטרגנטים את כושר הניקוי שלהם, קובעת את צורת כיפולן של מולקולות החלבון במים, משפיעה על התארגנותן של מולקולות בקרום התא ועוד.

להלן מובא תרשים (מפת מסיסות), שמציג מסיסות של חומרים יוניים וחומרים מולקולריים במים ובממסים לא מימיים.

מפת מסיסות



עשוי להתמוסס ————

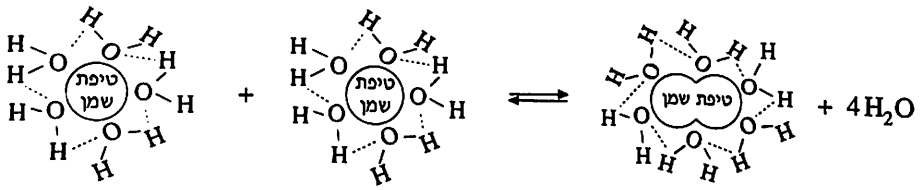
מסיסות מוגבלת - - - - - -

לא מתמוסס —·—·—

מדוע שמן ומים לא מתערבבים?

כידוע, שמן ומים לא מתערבבים. גם לפחמימנים מסיסות זניחה במים, אולם נמצא, שכמות זעירה של פחמימן מתמוססת במים בתהליך אקסותרמי: $\Delta H^o_{(sol)} < 0$. מכאן, שבעת ההמסה נוצרים קשרים בין מולקולריים חזקים יותר מאלה הקיימים בכל אחד ממרכיבי התמיסה. (?) ובכל זאת פחמימן (או שמן) ומים יוצרים שתי שכבות נפרדות ובתהליך ההמסה $\Delta G^o_{(sol)} > 0$. מה מונע, אם כן, את המסיסות של שמן במים? כדי לענות על השאלה, נבדוק אילו שינויים חלים במערכת כאשר טיפת שמן מתפזרת בין מולקולות המים.

לכאורה, נראה, שפיזור טיפות שמן (או מולקולות פחמימן) במים צריך להיות מלווה בעליה באנטרופית המערכת. אך מסתבר, שמולקולות המים מקיפות את טיפות השמן, מצטופפות סביבן ויוצרות בינן לבין עצמן קשרי מימן נוספים לאלו הקיימים במים טהורים; ולכן בתהליך ההמסה $\Delta H^o_{(sol)} < 0$. האירגון החדש משאיר פחות מולקולות מים חופשיות וגורם לירידה ניכרת באנטרופית המערכת. כתוצאה, $\Delta G^o_{(sol)} > 0$, והמסיסות של שמן במים זניחה. הפרדת השמן והמים לשכבות מתרחשת כי מולקולות השמן ניצמדות זו לזו וניתקות ממולקולות המים. מספר מולקולות המים החופשיות עולה, האנטרופייה במערכת עולה ו- $\Delta G^o_{(sol)} < 0$.



מבחינה תרמודינמית עדיף, אם כן, מצב, שבו שמן (פחמימן) ומים, יוצרים שתי שכבות נפרדות.

בתמיסה מימית, התלכדותן של מולקולות חסרות דו-קוטב קבוע או של קבוצות הידרופוביות גדולות במולקולות, עדיפה מבחינה תרמודינמית $\Delta G^o < 0$. התופעה מכונה — **הצמדה הידרופובית**. על מנת לפזר טיפות שמן במים (ליצור תחליב) יש לבצע עבודה — לערבב. עם הפסקת פעולת העירבוב, הנוזלים נפרדים מעצמם לשתי שכבות. להצמדה הידרופובית יש חשיבות רבה בהתארגנותן המרחבית של מקרומולקולות (חלבונים, לדוגמה) בתמיסה מימית (על נושא זה בספר חלבונים). ההצמדה ההידרופובית קיימת גם בממסים אחרים, הדומים במבניהם למים כגון אתאנול או גליצרול.

השפעת סוג הממס על תהליכים כימיים

עד עתה דנו בגורמים המשפיעים על המסיסות של חומרים בממסים שונים. נביא דוגמות אחדות המעידות על כך שלממס יכולה להיות השפעה גם על מהלכן של תגובות כימיות שמתרחשות בתמיסה: הרכב המערכת במצב שווי המשקל, מהירות התגובה וסוג התוצרים המתקבלים בתגובה.

השפעת הממס על הרכב המערכת במצב שווי משקל:

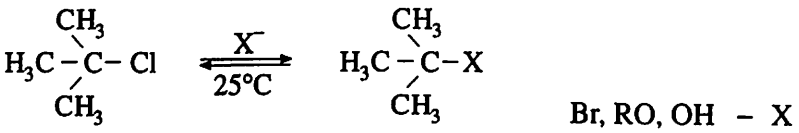
א. הרכב המערכת במצב שווי המשקל תלוי במקרים רבים בסוג הממס. לדוגמה, נמצא, שקבועי שווי משקל Ka של חומצות קרבוקסיליות RCOOH במים, גדולים בערך פי 10^6 מ-Ka של חומצות אלה באתאנול.

$$RCOOH_{(l)} + H_2O_{(l)} \rightleftharpoons RCOO^-_{(aq)} + H_3O^+_{(aq)} \qquad \text{א)}$$

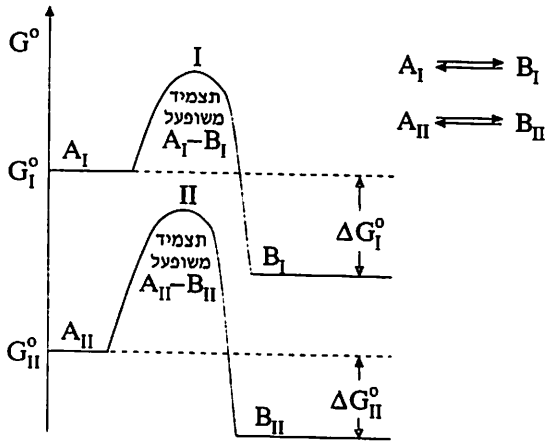
$$RCOOH_{(l)} + R'OH_{(l)} \rightleftharpoons RCOO^-_{(alc)} + R'OH^+_{2\,(alc)} \qquad \text{ב)}$$

הקבוע הדיאלקטרי של מים ($\varepsilon_r = 78.3$) גבוה מזה של אתאנול ($\varepsilon_r = 24.6$). המיום, חזק יותר מהסולבטציה באתאנול ותורם לייצוב היונים הנוצרים בתגובה (א) ולהטיית שווי המשקל לכוון התוצרים יותר מאשר בתגובה (ב).

ב. ממס עשוי להשפיע על מהירות התגובה. לדוגמה, בתגובת ההתמרה של 2-כלורו 2- מתיל פרופאן:



נמצא, שהמהירות במים גבוהה פי 330000 מהמהירות באתאנול. באופן כללי, כאשר תגובה מהסוג: $A \rightleftarrows B$ מתבצעת בשני ממסים שונים, נסמנם I ו-II, הסולבטציה של A, B ושל התצמיד המשופעל בממסים אלה, שונה, לכן התהליכים מתבצעים בקצב שונה. בדיאגרמה הבאה מתואר מהלך התגובה בשני הממסים I ו-II:



בממס, שבו אנרגיית שפעול (האנרגיה החופשית של התצמיד המשופעל) נמוכה יותר, התגובה מתבצעת בקצב מהיר יותר. לפי הגרף, בממס I התגובה מהירה יותר.

ג. בתגובות, שיכולות להתרחש במספר מסלולים במקביל, ממס יכול להשפיע להעדפת מסלול אחד על פני האחר. כתוצאה, בממסים שונים מתקבלים לעתים תוצרים שונים. לדוגמה, בתגובה של אלקיל הליד עם תמיסה מימית של KOH, מתקבל כוהל בתהליך התמרה, ובתגובה עם תמיסה כהלית של KOH, התוצר העיקרי הוא אלקן, שמתקבל בתהליך אלימינציה (חילוץ). התמרה ואלימינציה כמעט תמיד תהליכים מתחרים. העדפת תהליך אחד על פני השני תלויה בגורמים קינטיים ותרמודינמיים: סוג המגיבים והתוצרים (מבנה המולקולות), סוג הממס והטמפרטורה.

בתגובה של אלקיל הליד עם בסיס (ראה ניסוח להלן), יוני OH^- יכולים להגיב בשני אופנים:

א. להתמיר אטומי הלוגן תוך יצירת קשר עם אטומי $C^{\delta+}$.

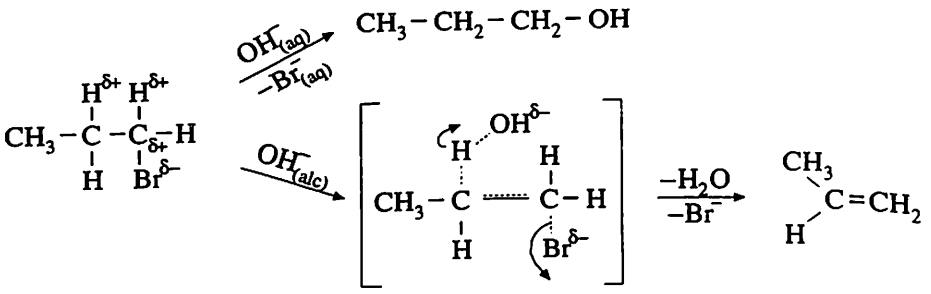
ב. למשוך פרוטון (H^+), תוך ניתוק הטרוליטי של הקשר $C^{\delta-}—H^{\delta+}$.

כאמור, בתגובה בין אלקיל הליד לבין תמיסה מימית מהולה של KOH מועדפת תגובת ההתמרה.

בתגובת האלקיל הליד עם תמיסה מרוכזת של KOH (4M) באתאנול, בטמפרטורה גבוהה יותר מתקבל, אלקן כתוצר עיקרי.

יוני OH^- יוצרים קשרים רופפים יותר עם מולקולות אתאנול מאשר עם מולקולות המים, מכאן, שיוני OH^- בכוהל חופשיים יותר, רכוזם בתמיסה גבוה

יותר והתגובה מתבצעת בטמפרטורה גבוהה יותר. בתנאים אלה יוני $OH^-_{(alc)}$ מושכים חזק יותר את הפרוטונים (H^+). באופן כללי, תהליכי אלימינציה מועדפים על תהליכי התמרה כאשר אלקיל הליד מגיב עם בסיס חזק מאוד, כדוגמת KOH או אלכוקסיד RO^-K^+, בריכוז גבוה, בטמפרטורה גבוהה ובממס בעל קוטביות נמוכה יותר.



ניסוי בחירה - ממיסות של חומרים בממסים שונים

הניסוי שלהלן מבוסס על נסוי דומה, שבוצע בבית ספר מקיף כללי ע"ש רוטוירט, בשדרות, על ידי המורה חיה שיפמן.

מטרת הניסוי:

להדגים מסיסות של חומרים, שנמצאים בשימוש בחיי היום יום, וליישם את העקרונות של קשרים בין מולקולריים בתהליכי המסה.

חומרים:	**ציוד:**
עטים צבעוניים מסוגים שונים (ראה מהלך הניסוי)	נייר שקפים
ממסים שונים, כדוגמת, מים, אצטון, אתאנול, שמן פרפין ועוד. (ראה מהלך הניסוי)	קסמי עץ עטופים בצמר גפן
חומרים שמכילים שמנים ושומנים למיניהם	
חומרי איפור	

מהלך הניסוי:

את הניסוי ניתן לבצע בדרך המוצעת להלן, אך אפשר גם לצמצמו ולבצעו בדרך אחרת, לפי ראות עניו של המורה. חלק את התלמידים לקבוצות בדיקה שונות, כמתואר להלן:

קבוצה 1

מסיסות צבעי עטים.

בקש מהתלמידים להכין על שקף טבלה, כדוגמת הטבלה הבאה, שאותה ימלאו במהלך הניסוי.

ממס / מספר העט	מים	אצטון	אתאנול	פטרול אתר	ממס אחר
1					
2					
3					
4					
5					

הצע לתלמידים:

א. לכתוב בכל שורה שעל השקף בטושים ועטים צבעויים (לורדים) שונים. בחר בעטים שמכילים צבעים מסיסים במים ובאחרים (עטי שקפים) שעמידים במים (מהסוג permanent).

ב. לנסות למחוק את הכתוב בעזרת קיסמים עטופים בצמר גפן, טבולים בממסים שונים.

קבוצה 2

הצע לתלמידים:

א. להכתים את הידיים או חפץ כלשהו בשמן מכונות (גריז, ניתן לקבלו במוסך למכוניות), או שמנים ושומנים מהבית (מרגרינה, ממרחים, חמאה ועוד).

ב. לנסות ל"נקות" בעזרת: מים, שמן פרפין או שמן תינוקות, פטרול אתר, אצטון, אתאנול ועוד.

קבוצה 3

הצע לתלמידים:

א. להביא (או הכן מראש) איפור מסוגים שונים.

ב. לנסות ל"נקות" את האיפור בעזרת: מים, שמן פרפין או שמן תינוקות, חלב פנים ועוד.

בעקבות הניסוי אפשר להציג את השאלות הבאות:

1. איזו מסקנה ניתן להסיק על סוג הקשרים הנוצרים בין מולקולות הממסים לבין מולקולות המומסים השונים שנבדקו בניסוי?

2. על שפת הים אפשר למצוא מברשות טבולות בנפט. למה הן משמשות? הסבר.

3. מדוע חלב פנים מסיר איפור טוב יותר ממים?
(חלב פנים הוא תחליב, שבו טיפות שומניות מפוזרות במים ומכאן, שיש לו תכונות הידרופיליות וליפופיליות).

שים לב: א. בכל הניסויים, שתוארו לעיל, מושקעת עבודה, המסייעת לפעולת ההמסה.

ב. פעולת הניקוי בעזרת סבון ודטרגנטים מבוססת על פיזור הליכלוך השומני והרחקתו על ידי שטיפה במים (ראה חומר רקע בפרק ד') ואילו בדוגמאות המובאות בניסוי, פעולת הניקוי נעשת בדרך כלל על-ידי המסת החומר בממס מתאים.

טבלה 1 - קבועים דיאלקטריים וערכי מומנט דיפול

מומנט דיפול μ — מדד של דו-קוטב קבוע, הנובע מהפרדת מטענים במולקולה לא סימטרית. זהו גודל וקטוריאלי ונהוג למדוד אותו ביחידות קולון-מטר C·m או ביחידות דבאי (Debye): $1D=3.336\cdot10^{-30}$ C·m.

קבוע דיאלקטרי ε_r — מראה פי כמה קטנה המשיכה בין מטענים מנוגדים בנוזל, יחסית למשיכה החשמלית, שקיימת ביניהם בריק.

הממס		טמפרטורה (°C)	קבוע דיאלקטרי ε_r	μ ($\cdot10^{-30}$ C·m)
דימתיל פורם-אמיד	$HCON(CH_3)_2$	25	182.4	12.9
פורם-אמיד	$HCONH_2$	20	111.0	11.2
מים	H_2O	25	78.3	5.9
דימתיל סולפוקסיד	$OS(CH_3)_2$	25	46.5	13.5
חומצה מתאנואית	$HCOOH$	16	58.5	4.7
אצטו-ניטריל	CH_3CN	25	35.9	11.8
מתאנול	CH_3OH	25	32.7	5.7
אתילן גליקול	CH_2OHCH_2OH	20	31.7	7.7
אתאנול	C_2H_5OH	25	24.6	5.8
אצטון	CH_3COCH_3	25	20.6	9.0
1-פרופאנול	$CH_3(CH_2)_2OH$	25	20.5	5.5
2-פרופאנול	$CH_3CH(OH)CH_3$	25	19.9	5.5
1-בוטאנול	C_4H_5OH	25	17.5	5.8
2-בוטאנול	$CH_3CH(OH)C_2H_5$	25	16.6	5.5
1-פנטאנול	$C_5H_{11}OH$	25	13.9	5.7

דו-כלורו-מתאן	CH_2Cl_2	25	8.9	5.2
1,1,1-טריכלורו אתאן	CCl_3CH_3	20	7.3	5.7
מתיל אצטט	CH_3COOCH_3	25	6.7	5.7
חומצה אתאנואית	CH_3COOH	20	6.2	5.6
אתיל אצטט	$CH_3COOC_2H_5$	25	6.0	6.1
כלורופורם	$CHCl_3$	20	4.8	3.8
דו-אתיל אתר	$C_2H_5OC_2H_5$	25	4.2	3.8
פחמן דו-גופרי	CS_2	20	2.6	0.0
בנזן	C_6H_6	25	2.3	0.0
פחמן ארבע כלורי	CCl_4	25	2.3	0.0
ציקלו-הקסאן	C_6H_{12}	20	2.0	0.0
הקסאן	C_6H_{14}	25	1.9	0.0

נספח ג - חומר העשרה

פראונים - פלאורו כלורו פחמימנים

פיתוח הפראונים התחיל בשנות השלושים של המאה, כאשר בארה"ב חברות לייצור מערכות קירור חיפשו חומר מתאים למערכות כאלה. הדרישה היתה לחומר בעל התכונות הבאות:

א. גז עם נקודת רתיחה גבוהה יחסית, או נוזל נדיף (כדי לאפשר אידוי ועיבוי החומר בשעת הפעולה של מערכות הקירור).

ב. לא רעיל, לא דליק, נטול ריח, לא תוקף מתכות.

אמוניה וגפרית דו חמצנית, שהיו בשימוש במערכות הקירור עד אז, הן תרכובות רעילות, מדיפות ריח חריף ותוקפות מתכות.
בשנת 1929, Thomas Midgley מהנדס אמריקאי צעיר, פנה לבחון את המערכה המחזורית, כדי להחליט אלו תרכובות עשוייות לענות על הדרישות המוצגות לעיל. עד מהרה הובהר, שעליו להתרכז במחקרו בתרכובות פחמן (תרכובות מולקולריות) עם מסות מולריות לא גבוהות (בהתאם לדרישה א). היה ברור, שבגלל דליקותם, הפחמימנים אינם עומדים בדרישות א ו-ב למטרה זו. בדיקת תרכובות פחמן, שמכילות אטומי הלוגן הראתה, שאלה המכילות אטומי פלואור, עונות על כל הדרישות: הן לא דליקות, חסרות ריח, לא תוקפות מתכות, לא רעילות. תוך פרק זמן קצר פותחו עשרות תרכובות מסוג זה, שמצאו שמוש רחב בתחומים שונים, וכונו בשם כללי "פראונים". לדוגמה, נוסחות של פראונים שימושיים אחדים:

$$CH_2F_2\ ,\ CHF_3\ ,\ CClF_3\ ,\ CCl_2F_2\ ,\ CF_3CH_2F$$

פרט למערכות הקירור, הפראונים נוצלו במיכלי תרסיסים, בתעשיית חומרים פלסטיים, בייצור פולימרים מוקצפים ובתעשיית מוצרי אלקטרוניקה לניקוי חלקי מתכת ומעגלים מודפסים. בעשרות השנים האחרונות פותחו תרכובות רבות נוספות, הדומות במבניהן לפראונים. לדוגמה, תרכובות שמשמשות במערכות לכיבוי שריפות: CF_3CF_3, $CBrF_3$. לתרכובות כאלה יש יתרון בולט — בזכות אדישותן הכימית, פעולת הכיבוי אינה הורסת את אשר הותירה האש. ברפואה

משתמשים כיום בהלוטאן $CF_3CHClBr$ להרדמה כללית. חומר זה תפש את מקומם של חומרי ההרדמה העיקריים, שהיו בשימוש בעבר: הכלורופורם $CHCl_3$, שעלול לגרום לתופעות לוואי קשות ונזקים בכבד, והאתר $C_2H_5OC_2H_5$, שמתלקח בקלות. נראה היה, שפלואורו כלורו פחמימנים, הם חומרים מושלמים למטרות רבות ומגוונות וייצורם הגיע למליוני טון בשנה.

אפשר להפיק פראונים בדרכים מספר. לדוגמה:

תגובה בין פחמן ארבע כלורי CCl_4 ו-HF בנוכחות זרז $SbCl_5$:

$$CCl_{4\,(g)} + 2\,HF_{(g)} \xrightarrow{SbCl_{5\,(g)}} CF_2Cl_{2\,(g)} + 2\,HCl_{(g)}$$

או תגובה בין מתיל כלורי ו- Hg_2Cl_2:

$$2CH_3Cl_{(g)} + Hg_2F_{2\,(s)} \longrightarrow 2CH_3F_{(g)} + Hg_2Cl_{2\,(s)}$$

בשנות ה-70 התחילו חוקרים בארה"ב לבחון מה קורה לאותו גז "בלתי מזיק", שנפלט בכמויות אדירות לאטמוספרה. נמצא, שהגז עמיד באטמוספרה במשך עשרות שנים, לא נשטף בגשם (מסיסותו במים זניחה) ולא מתרכב עם חומרים אחרים. החוקרים הלכו צעד נוסף ובחנו מה קורה למולקולות הפלואורו כלורו אלקאנים בשכבות העליונות של האטמוספרה, שם הן חשופות לקרינה בעלת עוצמה גבוהה (קרינה אולטרה סגולית). הניסויים הראו, שהקרנת פראון באור אולטרה סגול, גורמת לחלק מהמולקולות להתפרק. התעוררה שאלה מדאיגה: האם התכונות "החיוביות" של הפראונים טומנות בחובן סכנה?
הועלתה השערה, שמולקולות פראון, עולות לשכבות העליונות של האטמוספרה ובהשפעת הקרינה, מתפרקות לאט ומשחררות אטומי Cl, שמגיבים עם מולקולות האוזון. להלן מנגנון משוער של התהליך:

$$CF_2Cl_2 \xrightarrow{\text{הארה}} CF_2Cl\cdot + Cl\cdot$$

$$^{*}Cl\cdot + O_3 \longrightarrow ClO\cdot + O_2$$

$$ClO\cdot + O_3 \longrightarrow Cl\cdot + 2\,O_2$$

$$2O_{3\,(g)} \longrightarrow 3O_{2\,(g)}$$

---

* תגובה אפשרית נוספת: $Cl\cdot + CH_4 \longrightarrow CH_3Cl + HCl$
ה-HCl הוא אחד הגורמים ל"גשם חומצי".

בתהליכים מן הסוג המתואר, שמתרחשים בסטרטוספרה, עשויים להווצר כ-40 חלקיקים שונים, כדוגמת:

$$ClONO_2 \ , \ CH_2Cl_2 \ , \ CH_3Cl \ , \ HCl \ , \ ClO\cdot \ , \ Cl\cdot$$

קיים חשש, שחלקיקים אלה עלולים לגרום נזקים חמורים: להדלדלות שכבת האוזון וחדירת קרינה מזיקה לפני כדור הארץ, להורדת גשם חומצי, המהווה בעיה אקולוגית חמורה ולשינויים אקלימיים משמעותיים.

המדענים סבורים, שהפגיעה בשיכבת האוזון גדולה במיוחד מעל הקטבים, בגלל עננים הקוטב הסטרטוספריים. עננים אלה מכילים חלקיקי קרח, שיוצרים משטחים מתאימים לתגובות ההרסניות לשיכבת האוזון. בעקבות המחקרים הרבים שנעשו בשנים האחרונות וההתראות הרבות של החוקרים, נחתמה ב-1987 אמנה בינלאומית, שבה התחייבו 24 מדינות תעשייתיות להפסיק את הייצור של חלק מהפראונים המזיקים ביותר, ולצמצם למחצית את התפוקה הכוללת של פראונים עד סוף המאה. במקביל, החל מחקר, שמטרתו לפתח שיטות לייצור חומרים חלופיים. אחד מכיווני המחקר פונה לפיתוח שיטות ליצור חומרים, שמגיבים לפני הגעתם לשכבות העליונות של האטמוספרה, כדוגמת תרכובות שמכילות קשרי פחמן-מימן, המגיבות בתהליכי חמצון. חברות הענק, המיצרות את הפראונים, ביניהן Dupont, ICI, בודקות שורה של תרכובות, העשויות להחליף את הפראונים ובמקביל מפתחות שיטות להקטנת הנזק הנגרם על ידם. לדוגמה, הפעלת מערכות למיחזור פראונים, המשמשים במערכות לקירור, וגם אלה המשמשים כממסים בתעשיות האלקטרוניקה. קיימות עדיין בעיות לא מעטות בשיטות הייצור של התרכובות החלופיות. בניגוד לפראונים, המיוצרים, בדרך כלל, בתהליכים פשוטים וזולים יחסית, תהליכי הייצור של החומרים החדשים, מורכבים ויקרים יותר.

לדוגמה, שיטה להפקת CF_3CH_2F (HFCl34), תרכובת, שמוצעת כתחליף אפשרי ל- CF_2Cl_2 כוללת מספר שלבים והשקעת אנרגיה:

א) $$CCl_2 = CHCl \xrightarrow{HF} CF_3CH_2Cl$$

ב) $$CF_3CH_2Cl \xrightarrow[400°C]{HF} CF_3CH_2F$$

רוב התהליכים דורשים זרזים (כדוגמת Cr_2O_3), מערכות מיחזור ויוצרים בעיות נוספות, שמייקרות את הייצור ומעכבות את שיווק החומרים לשימוש רחב.

אמנם השימוש בפראונים צומצם בתחומים רבים, אך עדיין לא נמצאו תחליפים זולים, יעילים ונוחים לשימוש, שמשתווים באיכותם לפראונים ומתאימים

למערכות קירור, לממסים בתעשיות האלקטרוניקה ועוד. המחקר בתחום זה עדיין בעיצומו.

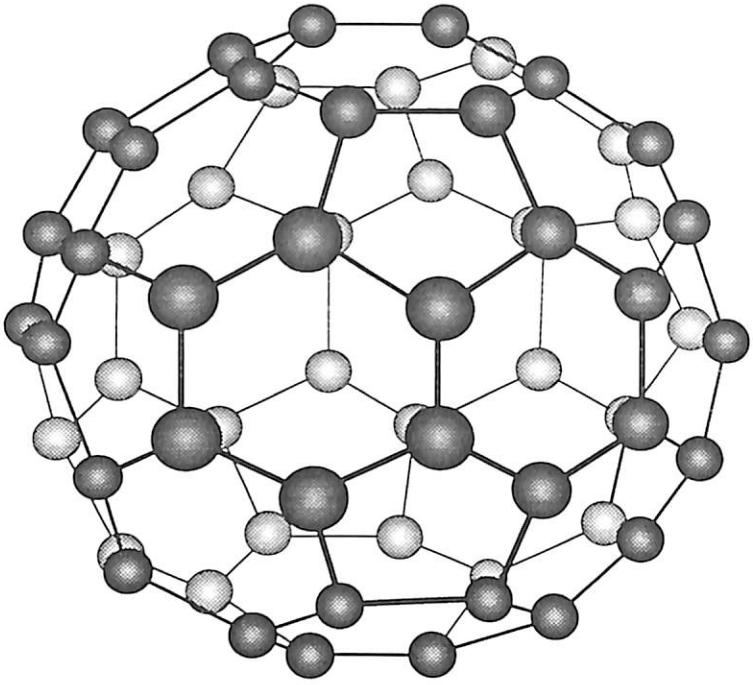
מולקולת כדור – פולרֶנים

עד עתה נדונו אפשרויות הקשור השונות של אטומי הפחמן והוצגו תרכובות רבות, שאבן הבניין שלהן הוא אטום הפחמן. פחמן כיסוד היה מוכר בשתי צורותיו האלוטרופיות – גרפיט ויהלום. והנה, בשנת 1991 פורסמה תגלית מדעית, שמדגימה עד כמה רבות הן אפשרויות הקישור של אטומי הפחמן. נמצא, שאטומי הפחמן יוצרים מולקולות כדור C_{60}, המורכבות כל אחת מ-60 אטומי פחמן, מסודרים במעין כדור סגור, שמורכב מ-20 משושים ו-12 מחומשים. גילוי המולקולות עורר התרגשות רבה בעולם המדע. נוטים להתיחס אל התגלית כאל נקודת מפנה במדע, שעשויה להביא להבנה חדשה של תהליכים רבים בטבע וגם לשימושים מעשיים חשובים.

החומר נחשב לצורה אלוטרופית שלישית של פחמן ומכונה "כדור בקי" Buckyball או Buckminster fullerene. הכינוי לחומר ניתן על שם בקמינסטר ריצ'ארד פולר Buckminster R.Fuller – אדריכלה של הכיפה הגיאודזית – geodestic dome. לכיפה הגאודזית מבנה כדורי והעקרונות האדריכליים שלה, שפותחו עוד בשנות ה-50, דומים להפליא לעקרונות המבנה הכדורי ולסימטריה של מולקולות ה-C_{60}.

המבנה של הכיפה הגיאודזית נראה בעיני הכימאים ריצ'ארד סמוליי Richard Smally והרולד קרוט Harold Kroto, מגלי מולקולת הכדור, כראיה נבואית של תמונת ה"מיקרו" של ה"מקרו" והוכחה נחרצת של הקשר בין מבנה ותיפקוד. מולקולות "כדורי בקי" התגלו עוד בשנת 1985. הן נוצרו כחומר לוואי, בניסויים בהם ביקשו מדענים לבדוק את התנהגותו של פחמן במצב גזי, בתנאי החלל החיצון. אך מחקר מעמיק בחומרים אלה החל בשנת 1990. נמצא, שמולקולות C_{60} נוצרות לדוגמה, בחימום מוט גרפיט בגז אציל הליום, או בהמסת פיח (שהוכן בתנאים מיוחדים) בבנזן. החומרים מסוג "כדורי בקי" מגלים תכונות ייחודיות בזכות המבנה החלול הבלתי רגיל של המולקולות, הסימטריה המושלמת וסידור אלקטרוני יוצא הדופן.

כדור בקי:



נמצא, שמבחינה כימית החומר מגלה תכונות הפכפכות בצורה בלתי רגילה. הוא מגיב עם מתכות אלקליות ויכול גם "לכלוא" אטומים בודדים של מתכות בתוך החלל הפנימי של הכדור; הוא מגיב עם הלוגנים ויכול ללכוד רדיקלים חופשיים. החומר עצמו ונגזרותיו נמסים בממסים אורגניים לא מימיים, אך לאחרונה דווח על נגזרות, שמכילות קבוצות אמיניות ומתמוססות טוב במים. מצד שני, החומר מגלה אדישות כימית ולא מגיב ללא חימום.

כיצד ניתן להסביר את התכונות הבלתי רגילות של "כדורי בקי"?

כאמור, מולקולות C_{60} מורכבות ממשושים ומחומשים מחוברים, שיוצרים מבנה חלול של כיפה גאודזית. סידור כזה יוצר צפיפות אלקטרונים שווה בין כל 60 אטומי הפחמן. חלק מהאלקטרונים לא מאותרים ויכולים לנוע על פני שטחה של המולקולה כולה. תופעת האל איתור מורגשת בפולרן אף יותר מאשר בבנזן. יתרה מזאת, לבנזן ולנגזרותיו מבנה שטוח ואילו המבנה הכדורי של הפולרן מכניס מימד נוסף לכימיה של התרכובת. הכימאים למדו ליצור ניגזרות של פולרן תוך שמירה על

הסידור האלקטרוני של החומר. נמצא, ש-C_{60} פועל כ"ספוג", של רדיקלים חופשיים ומספח על פני שטחו כמויות גדולות של חלקיקים פעילים אלה. בזכות תכונה זאת הפולרן ותרכובותיו יכולים להיות יעילים ביותר בתהליכי הייצור של פולימרים.

מחקרים נוספים הראו, שמולקולות כדור – פולרנים, טומנות בחובן אפשרויות שימוש נדירות. דווח על אפשרות השימוש בחומרים אלה לייצור סרטי יהלומים, גידול יהלומים על מצע של פולרן, על השמוש בהם כבחומרי סיכה אידאליים, עמידים בפני לחצים גבוהים, שמידת השחיקה שלהם נמוכה ביותר. נמצא שלמולקולות C_{60}, לאחר עיבוד מתאים, יש תכונות מגנטיות וגם תכונות של מוליכי על. נמצא, שתרכובותיו עם מתכות, כמו K, Cs, Rb, Tl, מגלות תכונות מוליכות חשמלית משתנות והפכפכות. לדוגמה, C_{60} – מבודד, K_3C_{60}, – מוליך על, K_6C_{60} שוב מבודד. הודות למבנה הפשוט יחסית של הפולרנים, המדענים מקווים לפתוח בעזרתם אשנב להבנת תופעת העל מוליכות. משפחת הפולרנים התרחבה גם לחומרים בעלי צורות נוספות. ניגזרות החדשות, כדוגמת C_{70}, בעלי צורה של כדור רגבי, סיבים גליליים – bucky tubes, מולקולות שמורכבות ממספר רב יותר של אטומים C_{240}, C_{540} (כפולות של 60) ועוד.

נערכים מחקרים, הבודקים את אפשרויות השמוש בחומרים אלה ברפואה, לפיתוח ננו-טכנולוגיה – ייצור "מכונות מולקולריות" ועוד תחומים רבים נוספים. תכונות החומרים שפותחו עד כה, מצביעות על אפשרויות שמוש מגוונות ביותר בחומרים אלה וכל זה רק התחלה. המדענים מאמינים שעם גילוי הפולרן נפתח תחום חדש בכימיה ו-C_{60} הוכתרה כמולקולת השנה (1992).

לקריאה נוספת:

1) Cure R. F. & Smally R. F. (1991) "Fullerens", *Scientific American,* Oct., p. 32-41.

2) Culotta E. & Koshland Jr. D. E. (1991) "Buckyballs: Wide open Playing Fields for Chemists", *Science,* Vol. 254, Dec., p. 1705-1707.

3) Kroto H. (1990) "Giant Fullerenes", *Chemistry in Britain,* Jan., p. 40-45.

דף תיקונים לספר התלמיד

עמוד 8, פיסקה שניה, צ"ל :

השקפה זו הופרכה בשנת 1828 כאשר הכימאי הגרמני וולר (Woller, 1800-1882) הבחין שבשעת חימום של ...

עמוד 14, טבלה 1, צ"ל :

אנטלפית האידוי $\Delta H_b°$ kJ/mol

ברומואתאן CH_3Br 23.9

מתאנול CH_3OH 35.2

מתיל אמין CH_3NH_2 25.6

הנתונים בטבלה 1 מתאימים לאנטלפיות האידוי של החומרים בטמפרטורת החדר.

עמוד 77, טבלה 10,

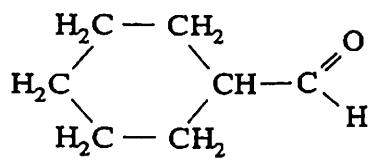
במקום 3-מתיל 2-פרופאנול
צ"ל 2-מתיל 2-פרופאנול

עמוד 110, שאלה 6,

הטקסט מתחת לנוסחה, צ"ל:
.... תרכובת זו חוממה במשך זמן מה עם תמיסה מימית של NaOH; נוצרו שתי שכבות: שיכבה מימית ושיכבה לא מימית.
א. רשום ניסוח של התהליך.
ב. מדוע נוצרו שתי שכבות לדעתך?
בהמשך הסעיפים הם ג ו-ד.

תיקון טעות

בנספח א שאלה 16, עמוד 92 נפלה טעות בנוסחת המבנה.
נוסחת המבנה של האלדהיד צריכה להיות:



SYSTEM NO. מס' מערכת
18441-2-1