

הוספנו סיכומים ערוכים וממוקדים בראשי השיעורים והתרגולים הרלוונטיים.
מומלץ לעיין בנוסחים המעודכנים בסיכום הנכחי - בהצלחה!

- התמרות ואלימינציות
- רדיקלים וסיפוחים לקשרים כפולים
- אלקינים, אתרים ונתלים
- קטונים ואלדהידים
- אלפא לקרבוניל

שיעורים 1-2: חומצות ובסיסים, משפחות חומרים אורגניים ואלקנים (Alkanes & Alkenes)

חומציות

גורם	השפעה	דוגמה	הסבר
אלקטרושליליות	$\uparrow$ אלקטרושליליות = $\uparrow$ חומציות	$\text{HF} > \text{H}_2\text{O} > \text{NH}_3 > \text{CH}_4$	אטום אלקטרושלילי מייצב אניון
גודל אטום	$\uparrow$ גודל = $\uparrow$ חומציות	$\text{HI} > \text{HBr} > \text{HCl} > \text{HF}$	אטום גדול מפזר מטען טוב יותר
רזוננס	$\uparrow$ רזוננס = $\uparrow$ חומציות	פנול (10) < אלכוהול (16)	דלוקליזציה מייצבת אניון
אפקט אינדוקטיבי	קבוצות מושכות e^- = $\uparrow$ חומציות	$\text{ClCH}_2\text{COOH} > \text{CCl}_3\text{COOH} > \text{CH}_3\text{COOH}$ (2.9) > (0.7) > (4.7)	משיכת אלקטרונים מייצבת אניון
היברידיזציה	$sp > sp^2 > sp^3$	$\text{CH}_3\text{CH}_3 < \text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2 < \text{HC}\equiv\text{CH}$ (50) < (44) < (25)	יותר אופי s = אלקטרונים קרובים לגרעין

ערכי pKa

תרכובת	pKa	הערות לזיכרון
1,3-דיקרבונל	~ 9	החומצי ביותר - רזוננס כפול
אלכוהול	15-17	זכור: ROH
α -H בקרבונל	17-20	חומציות בינונית
אלקין טרמינלי	~ 25	HC $\equiv$ CH - sp חומצי יותר
אמוניה	38	NH ₃
אלקן	44	H ₂ C=CH ₂
אלקאן	50	CH ₄ - הכי פחות חומצי

כלל מפתח: יותר אופי s = יותר חומצי ($sp > sp^2 > sp^3$)

תרכובת	pKa	הערות
HI	-10	חומצה חזקה מאוד
HCl	-7	חומצה חזקה
H_3O^+	-1.7	הידרוניום
CH_3COOH	4.7	חומצה אצטית
H_2CO_3	6.4	חומצה פחמנית
NH_4^+	9.3	אמוניום
פנול	10	חומצי מאלכוהול
H_2O	15.7	מים
אלכוהול	15 – 17	ROH
$\alpha\text{-H}$ בקרבונל	17 – 20	חומציות α
$\text{HC}\equiv\text{CH}$	25	אלקין טרמינלי
NH_3	38	אמוניה
$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$	44	אלקן
CH_4	50	אלקאן

משפחות תרכובות אורגניות

משפחה	נוסחה כללית	היברידיזציה	זווית קשר	pKa אופייני	תכונות מיוחדות
אלקאנים	$\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$	sp^3	109.5°	~50	רוויים, אינרטיים יחסית
אלקנים	C_nH_{2n}	sp^2	120°	~44	קשר כפול, איזומריה גיאומטרית
אלקינים	$\text{C}_n\text{H}_{2n-2}$	sp	180°	~25	קשר משולש, חומציים יחסית
אלקיל הלידים	R-X	sp^3	109.5°	-	$\text{X} = \text{F}, \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$
כוהלים	R-OH	sp^3	109.5°	~16	קשרי מימן, $3^\circ/2^\circ/1^\circ$
אתרים	R-O-R'	sp^3	110°	-	ממס אינרטי
אלדהידים	R-CHO	sp^2	120°	~17	C=O קוטבי
קטונים	R-CO-R'	sp^2	120°	~19	C=O קוטבי
חומצות קרבוקסיליות	R-COOH	sp^2	120°	3-5	חומצות חלשות
אסטרס	R-COOR'	sp^2	120°	-	נגזרת חומצה
אמידים	R-CONH_2	sp^2	120°	-	נגזרת הכי יציבה
אמינים	R-NH_2	sp^3	107°	~35 (35~: RNH_3^+)	בסיסיים

דרגת אי-רוויון

נוסחה לחישוב	משמעות
$\text{DU} = (2\text{C} + 2 + \text{N} - \text{H} - \text{X})/2$	C =פחמן, N =חנקן, H =מימן, X =הלוגן
$\text{DU} = 0$	רווי לחלוטין
$\text{DU} = 1$	קשר כפול אחד או טבעת
$\text{DU} = 2$	2 קשרים כפולים או קשר משולש או 2 טבעות
$\text{DU} = 4$	טבעת בנזן

שיעור 3: נומנקלטורה, אינטראקציות בין-מולקולריות ומבנה מרחבי (Stereochemistry)

סדרי יציבות וסלקטיביות

קטגוריה	סדר יציבות/חוזק	הסבר
קרבוקטיונים	$3^\circ < \text{בנזילי} \approx \text{אלילי} < 2^\circ < 1^\circ < \text{מתיל}$	היפר-קוניוגציה + רזוננס
רדיקלים	$3^\circ < \text{בנזילי} \approx \text{אלילי} < 2^\circ < 1^\circ < \text{מתיל}$	דומה לקרבוקטיונים
קרבאניונים	$\text{מתיל} < 1^\circ < 2^\circ < 3^\circ$	אפקט אינדוקטיבי הפוך
קבוצות עוזבות	$\text{I}^- > \text{Br}^- > \text{Cl}^- > \text{TsO}^- \gg \text{F}^- > \text{OH}^-$	בסיסיות חלשה = עוזבת טובה
נוקלאופיליות (פרוטי)	$\text{I}^- > \text{Br}^- > \text{Cl}^- > \text{F}^-$	גודל ופולריזביליות
נוקלאופיליות (אפרוטי)	$\text{F}^- > \text{Cl}^- > \text{Br}^- > \text{I}^-$	צפיפות מטען
סלקטיביות הלוגנציה	$\text{Br}_2 \gg \text{Cl}_2$	vs 5:4:1 (Cl) (Br) 1600:80:1 = $1^\circ:2^\circ:3^\circ$

סדר יציבות

$3^\circ < \text{בנזילי} \approx \text{אלילי} < 2^\circ < 1^\circ < \text{ויניל} < \text{מתיל}$

גורמי ייצוב

- היפר-קוניוגציה (יותר קבוצות אלקיל)
- רזוננס (אלילי, בנזילי)
- אינדוקציה

שלבי קביעת קונפיגורציה

- מספור עדיפויות (Cahn-Ingold-Prelog):**
 - מספר אטומי גבוה = עדיפות גבוהה
 - קשרים כפולים נספרים כ-2 קשרים יחידים
- מיקום הקבוצה בעדיפות נמוכה:**
 - אם לא על קו מקווקו (אחורה) - הפוך את התוצאה!
- כיוון הסיבוב:**
 - עם כיוון השעון R =
 - נגד כיוון השעון S =

דיאסטריאומרים vs אננטיאומרים

- אננטיאומרים:** שונים בכל המרכזים הכיראליים (תמונת מראה)
- דיאסטריאומרים:** שונים בחלק מהמרכזים הכיראליים

כללים למבני רזוננס תקינים

- אסור** להזיז אטומים - רק אלקטרונים!
- אסור** להזיז פרוטונים בין מבני רזוננס
- שמור על אוקטט מלא (פרט לקרבוקטיונים)
- מטענים על אטומים מתאימים (O^- יציב, ^+C פחות)

סדר יציבות של קונפורמציות

- Staggered > Eclipsed** (תמיד!)
- Anti (180°) > Gauche (60°) > Eclipsed**
- קבוצות גדולות מעדיפות להיות רחוקות

בציקלוהקסון

- **Chair > Boat** (תמיד!)
- קבוצות גדולות מעדיפות מיקום **equatorial**
- **cis/trans** קובע אם שתי קבוצות באותו צד או בצדדים מנוגדים

שיעור 4: אלקיל הלידים, אלכוהלים, אתרים - התמרות נוקלאופיליות

השוואה בין מנגוני S_N1 ו-S_N2

מאפיין	S _N 1	S _N 2
מנגון	דו-שלבי	חד-שלבי (concerted)
חומר ביניים	קרבוקטיון	מצב מעבר
קינטיקה	סדר ראשון: $k[RX]$	סדר שני: $k[RX][Nu]$
סטריאוכימיה	רצמיזציה	היפוך מלא
סובסטרט מועדף	3° < בנזילי < אליילי < 2° < 1°	מתיל < 1° < 2° < 3°
נוקלאופיל	חלש (H ₂ O, ROH)	חזק (OH ⁻ , CN ⁻ , I ⁻)
ממס	פולרי פרוטי	פולרי אפרוטי
קבוצה עוזבת	חשובה מאוד	חשובה
שחלופים	אפשריים	לא אפשריים



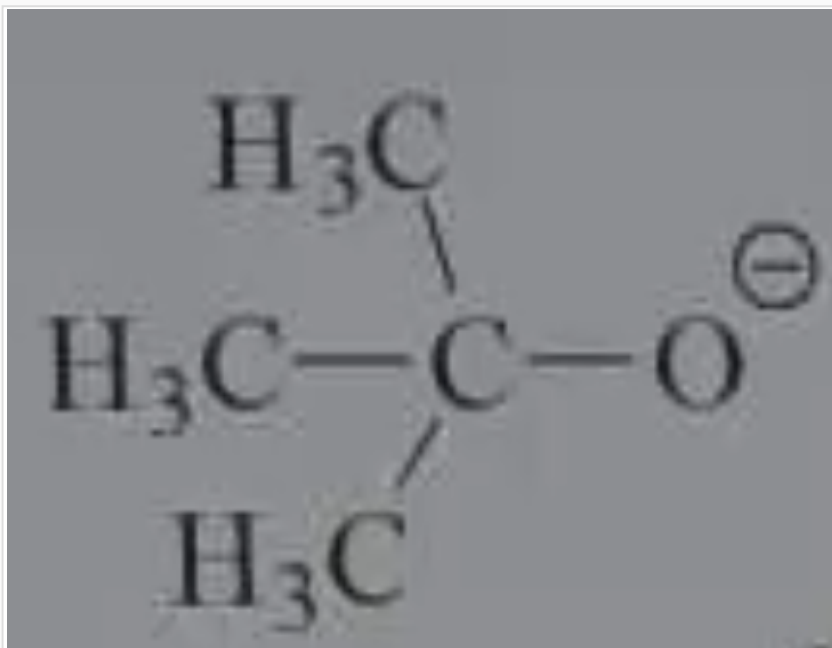
תנאי תגובה / סובסטרט	1°	2°	3°	מתיל CH ₃ X
בסיס חזק נוקלאופיל חזק (OH ⁻ , RO ⁻)	S _N 2 (עיקרי) + מעט E2	E2 (עיקרי) + מעט S _N 2	E2 בלבד (נדרש אנטי-סטאג'רד)	S _N 2 בלבד
בסיס חזק נוקלאופיל חזק גדול ונפחי (tert-BuO ⁻)	E2 (עיקרי) + מעט S _N 2	E2 (הופמן עיקרי)	E2	S _N 2 בלבד
בסיס חלש נוקלאופיל חזק (CN ⁻ , F ⁻)	S _N 2	S _N 2	S _N 1	S _N 2 בלבד
בסיס חלש נוקלאופיל חלש (H ₂ O, ROH)	S _N 2 (איטי מאוד)	E1/S _N 1 ממס פולרי פרוטי	S _N 1 וגם E1	S _N 2 (איטי)
תוצר עיקרי	התמרה (בד"כ)	תלוי בתנאים	אלימינציה (בד"כ)	התמרה תמיד

הערות:

- חימום (Δ) מעודד אלימינציה בכל המקרים
- ממס פולרי **אפרוטי** (אצטון, DMSO) מעודד S_N2
- ממס פולרי פרוטי (מים, אלכוהול) מעודד $E1/S_N1$
- בסיס חזק נוקלאופיל חזק: $\text{NaOCH}_2\text{CH}_3$, $\text{KOC}(\text{CH}_3)_3$, NaNH_2 , NaOCH_3

- OH^- Hydroxide
- RO^- Alkoxide, including CH_3O^- (Methoxide) and $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}^-$ (Ethoxide)
- NH_2^- Amide
- Bulky bases like tert-BuO^- (tert-butoxide) that favor elimination

- גדול ונפחי:

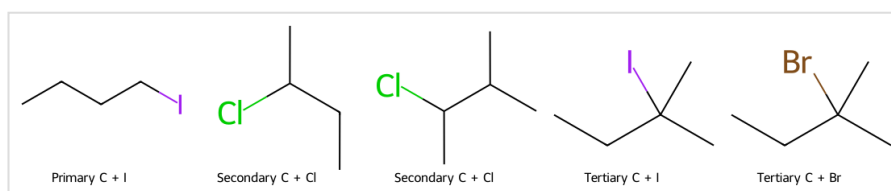


- נקולאופיל חזק בסיס חלש (בפחמן ראשוני ושניוני- S_N2):
 CN^- , Br^- , I^- , SH^- , SR^- , N_3^- , CH_3COO^- , SH_2 , RSH , NRH_2
- בסיס חלש נוקלאופיל חלש:
 H_2O , CH_3OH , $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$

כללי רגיוסלקטיביות

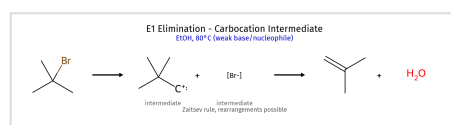
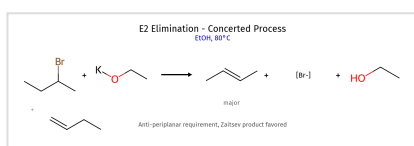
- $E2$: כלל זייצב (אלקן יותר מותמר)
- S_N2 : היפוך סטריאוכימי מלא
- S_N1 : רצמיזציה
- מהירות תגובת S_N2 תלויה בכמה גורמים:
- סוג סובסטרט: מתיל $1^\circ < 2^\circ < 3^\circ$
- חוזק נוקלאופיל: חזק יותר = מהיר יותר

דוגמה לסובסטרטים מסודרים משמאל לימין לפי מהירות תגובת S_N2 (שמאל הכי מהיר):

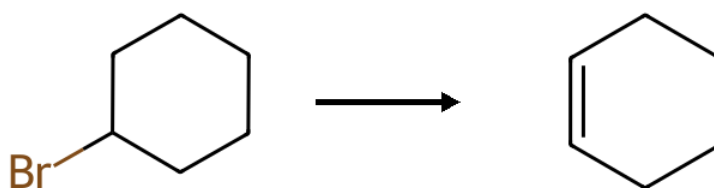


השוואה בין E1 ו-E2

מאפיין	E1	E2
מנגנון	דו-שלבי	חד-שלבי
חומר ביניים	קרבוקטיון	מצב מעבר
קינטיקה	סדר ראשון: $k[RX]$	סדר שני: $k[RX][Base]$
גיאומטריה נדרשת	לא ספציפית	אנטי-פריפלנרית
בסיס	חלש	חזק
רגיוסלקטיביות	זייצב (תערובת)	זייצב (או הופמן עם בסיס נפחי)
סובסטרט מועדף	$1^\circ < 2^\circ < 3^\circ$	$1^\circ < 2^\circ < 3^\circ$
תחרות עם	S_N1	S_N2



2 in Cyclohexane - Antiperiplanar Requirement t-BuOK, t-BuOH



H and Br must be anti (180°) - both axial in chair form

הערות:

- חימום (Δ) מעודד אלימינציה
- בטמפרטורה רגילה - התמרה מועדפת

סדר בדיקה מומלץ

א. זיהוי סוג התגובה

- התמרה או אלימינציה?
- יוני או רדיקלי?

ב. ניתוח התנאים

- סוג הפחמן ($3^\circ/2^\circ/1^\circ$)
- חוזק הבסיס/נוקלאופיל
- סוג הממס

ג. בדיקת דרישות מיוחדות

- אנטי-פריפלרי ב-E2
- שיחלופים בקרבוקטיונים
- סטריאוכימיה

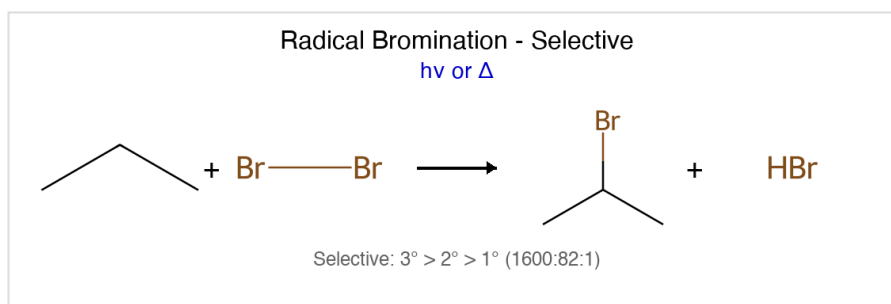
ממסים ותפקידם

סוג ממס	דוגמאות	מעודד	מדכא
פולרי פרוטי	ROH, H ₂ O	E1, S _N 1	S _N 2
פולרי אפרוטי	CH ₃ CN, DMSO, DMF	S _N 2	S _N 1
לא פולרי	הקסן, בנזן	-	כל התגובות היוניות

שיעור 8: תגובת הלוגנציה רדיקלית

המנגנון בשלושה שלבים

שלב	תגובה	הסבר
Initiation	$\text{Cl}_2 \xrightarrow[\Delta]{h\nu} 2 \text{Cl}^\bullet$	פירוק הומוליטי של הלוגן
Propagation 1	$\text{Cl}^\bullet + \text{CH}_4 \longrightarrow \text{CH}_3^\bullet + \text{HCl}$	הרדיקל תולש מימן
Propagation 2	$\text{CH}_3^\bullet + \text{Cl}_2 \longrightarrow \text{CH}_3\text{Cl} + \text{Cl}^\bullet$	יצירת התוצר + רדיקל חדש
Termination	$\text{Cl}^\bullet + \text{Cl}^\bullet \longrightarrow \text{Cl}_2$ $\text{CH}_3^\bullet + \text{CH}_3^\bullet \longrightarrow \text{C}_2\text{H}_6$ $\text{Cl}^\bullet + \text{CH}_3^\bullet \longrightarrow \text{CH}_3\text{Cl}$	סיום התגובה



סלקטיביות ברום מול כלור

עקרון ריאקטיביות-סלקטיביות: יותר ריאקטיבי (כלור) = פחות סלקטיבי

שיעור 9: תגובות סיפוח באלקנים

הידרציה חומצית (H⁺/H₂O)

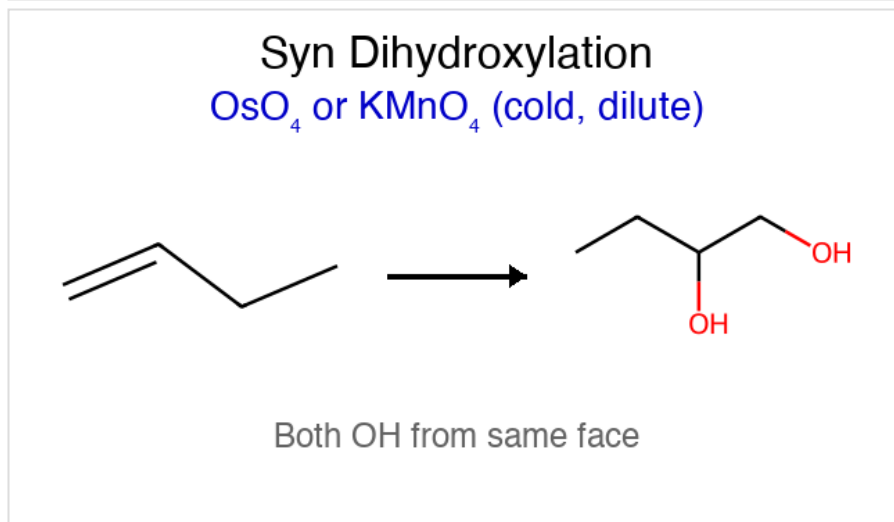
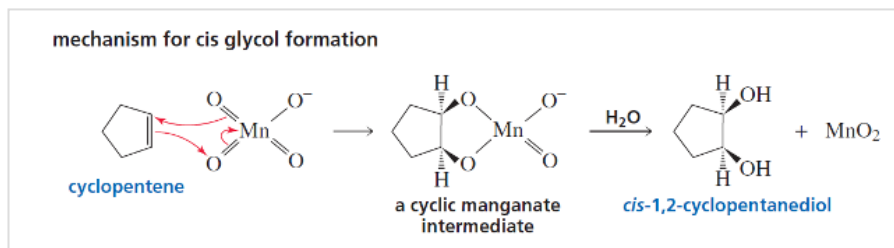
- פרוטונציה של הקשר הכפול
- יצירת קרבוקטיון על הפחמן היותר מותמר
- תקיפת מים
- דה-פרוטונציה

תוצר: כוהל לפי כלל מרקובניקוב (OH על הפחמן היותר מותמר)

- הידרובורציה-חמצון (לא למדנו)

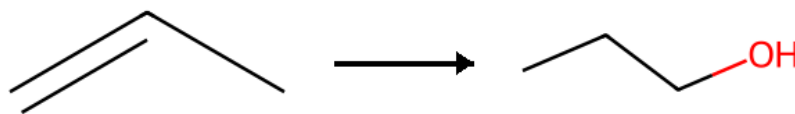
שבירת קשר כפול C=C מאפשרת הוספת קבוצות שונות, עם מנגנונים שונים. התגובה יכולה להיות חד-שלבית או דו-שלבית, תלוי בריאגנטים ובתנאים.

תגובה	ריאגנטים	תוצר	רגיוסלקטיביות	סטריאוכימיה	מנגנון
הידרוגנציה	$\xrightarrow[\text{Pd/Pt/Ni}]{\text{H}_2}$	אלקאן	-	סין	חד-שלבי על משטח מתכת
הידרוהלוגנציה רגילה	HX like HBr	אלקיל הליד	מרקובניקוב	-	דרך קרבוקטיון
הידרציה (מים וחומצה)	$\xrightarrow[\text{H}_2\text{SO}_4]{\text{R}-\text{C}=\text{C}-\text{R} + \text{H}_2\text{O}}$	כוהל	מרקובניקוב	-	דרך קרבוקטיון
הידרציה (עם מתנול - אלכוהוליזה)	$\xrightarrow[\text{H}_2\text{SO}_4]{\text{R}-\text{C}=\text{C}-\text{R} + \text{CH}_3\text{OH}}$	אתר (למשל MTBE)	מרקובניקוב	-	דרך קרבוקטיון
הלוגנציה	$\text{X}_2 \text{ like } \text{C}_2 \text{ Br}_2$	ויק-דיהליד	-	אנטי	דרך יון הלונים
הלוהידרין	$\xrightarrow[\text{X}_2]{\text{H}_2\text{O}}$	הלוהידרין	OH ליותר מותר	אנטי	דרך יון הלונים
הידרוהלוגנציה אנטי מרקובניקוב (רדיקלית)	$\xrightarrow[\text{ROOR}/h\nu]{\text{HBr}}$	אלקיל ברומיד	אנטי-מרקובניקוב	-	מנגנון רדיקלי
חמצון	$\xrightarrow[\text{cold}]{\text{KMnO}_4, \text{OH}^-, \text{H}_2\text{O}}$	דיול	-	סין	דרך אסטר ציקלי
אוזונוליזה בסביבה מחזרת	$\text{O}_3 (1) \text{ Zn } (2)$	אלדהידים/קטונים	-	-	ביקוע מלא
אוזונוליזה בסביבה חומצית	$\text{O}_3 (1) \text{ H}_2\text{O}_2 (2)$	חומצות/קטונים	-	-	ביקוע + חמצון
אפוקסידציה	RCO_3H	אפוקסיד	-	סין?	חד-שלבי



Hydroboration-Oxidation

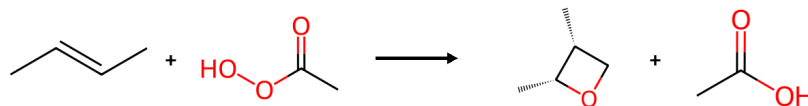
1) $\text{BH}_3 \cdot \text{THF}$ 2) $\text{H}_2\text{O}_2, \text{OH}^-$



Anti-Markovnikov, syn addition

Epoxidation with Peroxyacids

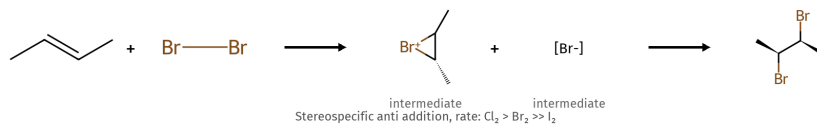
mCPBA, CH_2Cl_2 , 0-25°C



Stereospecific syn addition - retention of alkene geometry

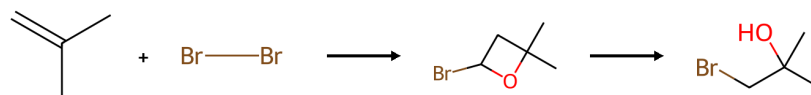
Halogenation - Anti Addition via Halonium Ion

CCl_4 or CH_2Cl_2 , 0°C



Halohydrin Formation - Markovnikov

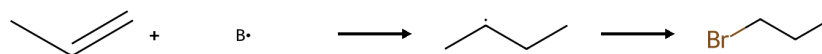
H_2O (large excess)



intermediate
 H_2O attacks more substituted carbon of bromonium ion

Anti-Markovnikov HBr Addition

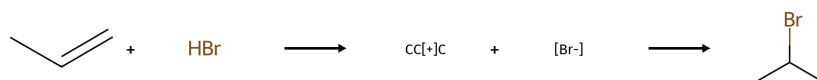
ROOR (peroxides), $h\nu$



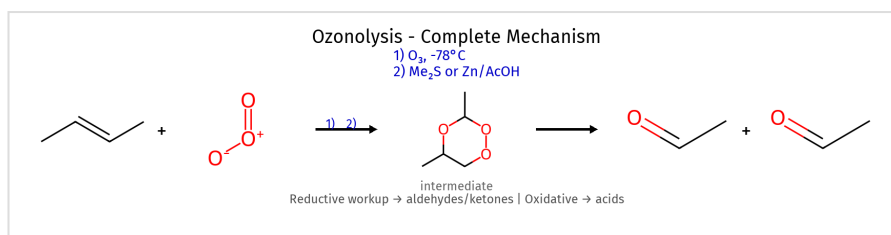
intermediate
Radical mechanism - only works with HBr, not HCl or HI

HX Addition - Markovnikov Regioselectivity

No peroxides, -20°C to 25°C



intermediate
Rate: $\text{HI} > \text{HBr} > \text{HCl} \gg \text{HF}$ | Carbocation stability controls



כללי כיווניות

כלל	תיאור	יישום
מרקובניקוב	H לפחמן עם יותר H	הידרוהלוגנציה, הידרציה
אנטי-מרקובניקוב	H לפחמן עם פחות H	$HBr/ROOR$, הידרבורציה
זיזב	אלקן יותר מותמר	E2 עם בסיס קטן
הופמן	אלקן פחות מותמר	E2 עם בסיס נפחי

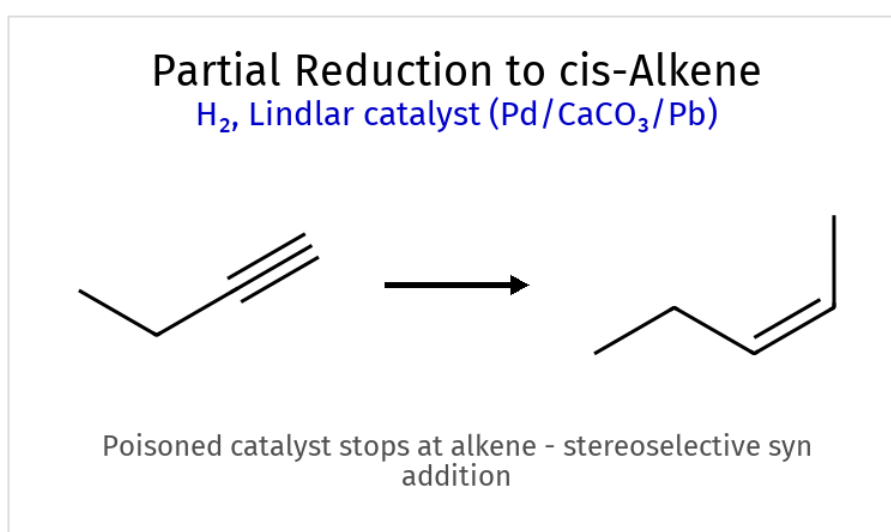


שיעור 10: תגובות אלקינים, אתרים ואלכוהולים

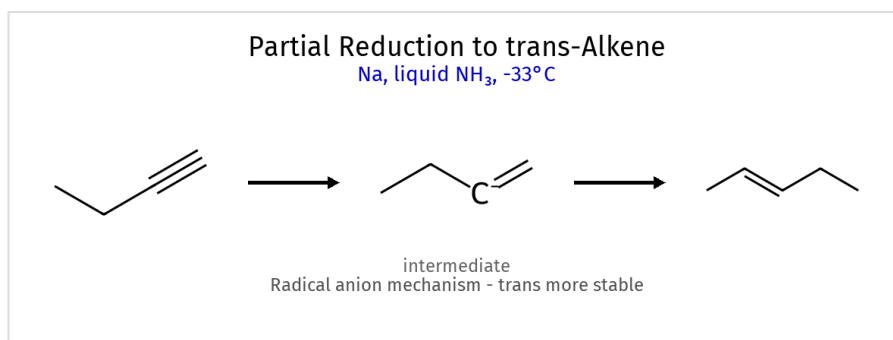
אלקינים ($R-C\equiv C-R'$)

1. חיזור אלקינים (הידרוגנציה)

סוג תגובה	ריאגנטים	תוצר	מספר סיפוחים	סטריאוכימיה	הערות מפתח
הידרוגנציה מלאה	$\xrightarrow[Pd/Pt/Ni]{H_2}$	אלקאן	2	-	לא ניתן לעצור באמצע
הידרוגנציה חלקית	$\xrightarrow[Lindlar]{H_2}$	cis-אלקן	1	cis בלבד	עוצר באלקן, זרז לינדלר



באחת השאלנו נתקלנו גם בתגובה עם $NaNH_2$, NH_3 , ששימשה כדי להאריך שרשרת.



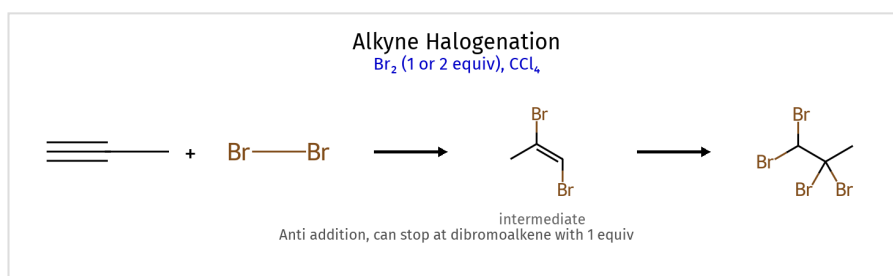
2. תגובות סיפוח לאלקנינים

2.1 סיפוח הלוגנידי מימן (HX)

הערות	כלל	מספר סיפוחים	תוצר	ריאגנטים	כמות ריאגנט
עצירה באלקן	מרקובניקוב	1	ויניל הליד	HX	1 מול
שני X על אותו פחמן	מרקובניקוב	2	דיהלד ג'מינלי	HX	עודף

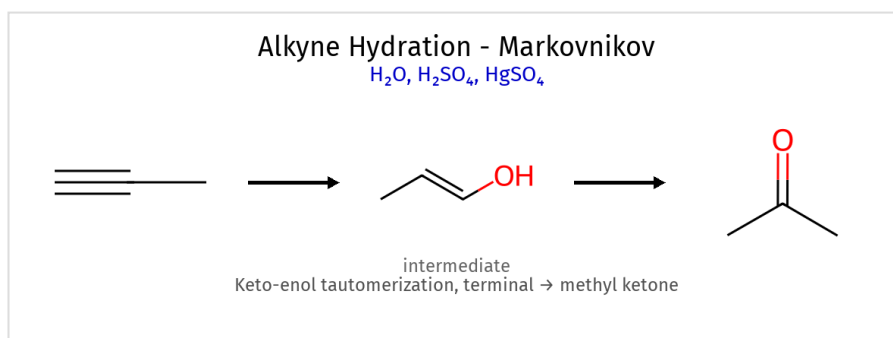
2.2 סיפוח הלוגנים (X₂)

הערות	סטריאוכימיה	מספר סיפוחים	תוצר	ריאגנטים	כמות ריאגנט
trans-דיהלד	אנטי	1	דיהלד ויצינאלי	X ₂	1 מול
ארבע X סה"כ	אנטי	2	טטרההלד	X ₂	עודף



2.3 תגובות עם מים וחמצן

הערות	מנגנון מיוחד	מספר סיפוחים	תוצר	ריאגנטים	תגובה
דרך אנול ביניים	מרקובניקוב + טאוטומריזציה	1	קטון	$\xrightarrow[\text{H}_2\text{SO}_4, \text{HgSO}_4]{\text{H}_2\text{O}}$	הידרציה



3. תגובות של אלקינים טרמינליים (R-C≡C-H)

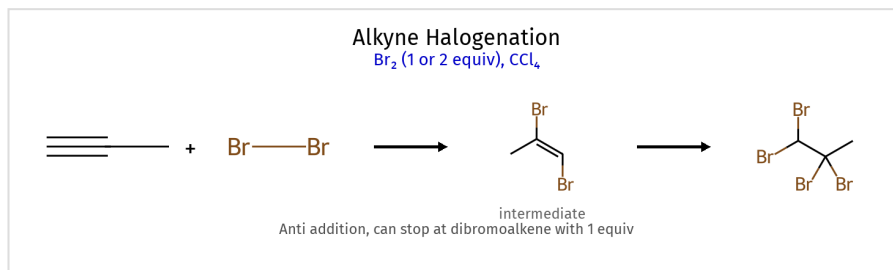
3.1 חומציות ויצירת אצטילידיים

תכונה	ערך	השוואה	הסבר
pKa של אלקין טרמינלי	~25	אלקאן: ~50, אלקן: ~44	אופי s גבוה (50%) באורביטל sp
ריאגנט לדה-פרוטונציה	NaNH ₂	pKa = 38 NH ₃	בסיס חזק מספיק

3.2 אלקילציה (הארכת שרשרת)

שלב	ריאגנטים	תוצר	מנגנון	הגבלות
1	NaNH_2	יון אצטיליד $\text{R}-\text{C}\equiv\text{C}^-$	חומצה-בסיס	-
2	$\text{R}'-\text{X}$ (1° בלבד)	אלקין מותמר $\text{R}-\text{C}\equiv\text{C}-\text{R}'$	$\text{S}_{\text{N}}2$	אלקיל הליד ראשוני בלבד

⚠ אזהרה: אלקיל הליד 2° או 3° יוביל לתגובת E2 במקום $\text{S}_{\text{N}}2$!



4. מנגנונים חשובים באלקנים

4.1 מנגנון טאוטומריזציה קטו-אנול

שלב	תגובה	הסבר	גורם מניע
פרוטונציה	$\text{R}-\text{C}(\text{OH})=\text{CH}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{R}-\text{C}(\text{OH}_2^+)=\text{CH}_2$	החמצן קוטף פרוטון	חומציות התווך
העברת פרוטון	$\text{R}-\text{C}(\text{OH}_2^+)=\text{CH}_2 \rightarrow \text{R}-\text{C}^+(\text{OH})-\text{CH}_3$	שבירת קשר π	יציבות קרבוקטיון
יצירת קטון	$\text{R}-\text{C}^+(\text{OH})-\text{CH}_3 \rightarrow \text{R}-\text{C}(=\text{O})-\text{CH}_3 + \text{H}^+$	יצירת קשר $\text{C}=\text{O}$	$\text{C}=\text{O}$ חזק מ- $\text{C}=\text{C}$

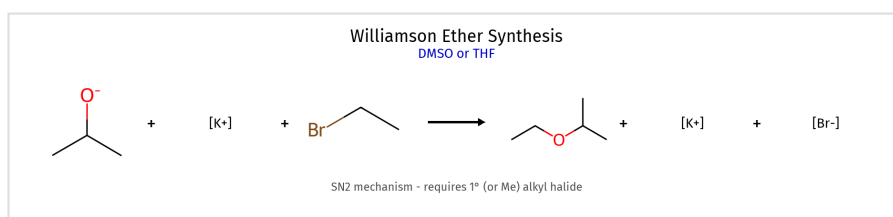
שיווי משקל: קטון « אנול (יחס 1~99)

אתרים (R-O-R')

5. שיטות סינתזת אתרים

5.1 סינתזת וויליאמסון (Williamson Synthesis)

רכיב	דרישות	מנגנון	דוגמה	הגבלות
נוקלאופיל	אלקוקסיד $\text{R}-\text{O}^-$	$\text{S}_{\text{N}}2$	CH_3O^-	יוצר מאלכוהול + בסיס
אלקטרופיל	אלקיל הליד 1°	$\text{S}_{\text{N}}2$	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{Br}$	חייב להיות ראשוני!
תוצר	אתר	-	$\text{CH}_3-\text{O}-\text{CH}_2\text{CH}_3$	-



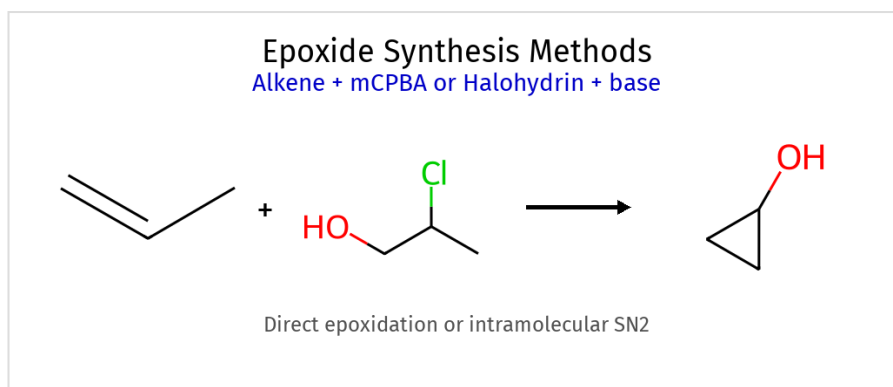
5.2 שיטות נוספות

שיטה	ריאגנטים	תנאים	דוגמה
סיפוח לאלקן	$\text{R}-\text{OH} + \text{H}^+$	חומצי, מרקובניקוב	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{CH}_2=\text{CH}_2$

6. אפוקסידים - אתרים ציקליים מתמחים

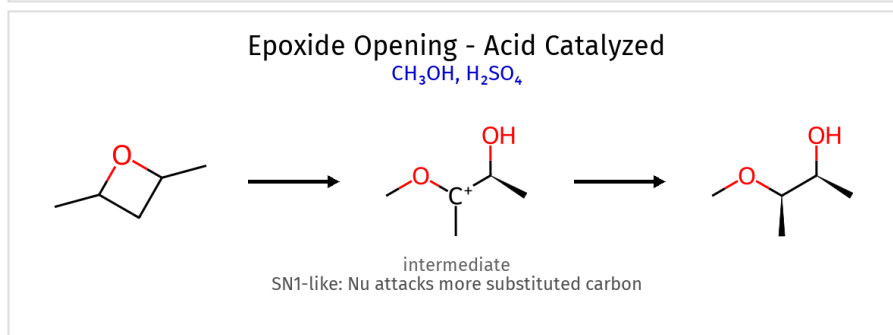
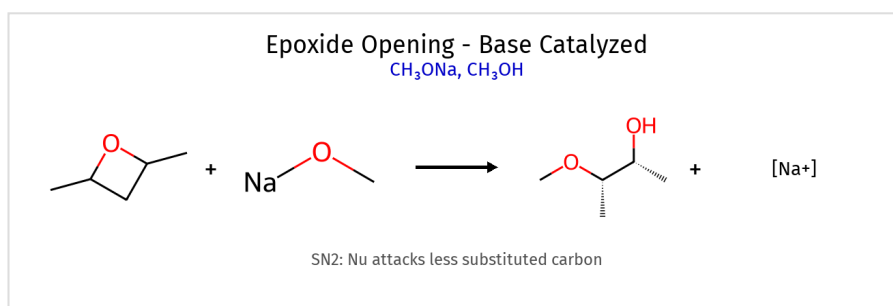
6.1 יצירת אפוקסידים (פחות חשוב)

ריאגנט	מבנה	מנגנון	סטריוכימיה
פר-חומצה	$\text{R}-\text{CO}_3\text{H}$ (כמו mCPBA)	סיפוח syn	נשמרת מהאלקן



6.2 פתיחת אפוקסידים - חשוב!

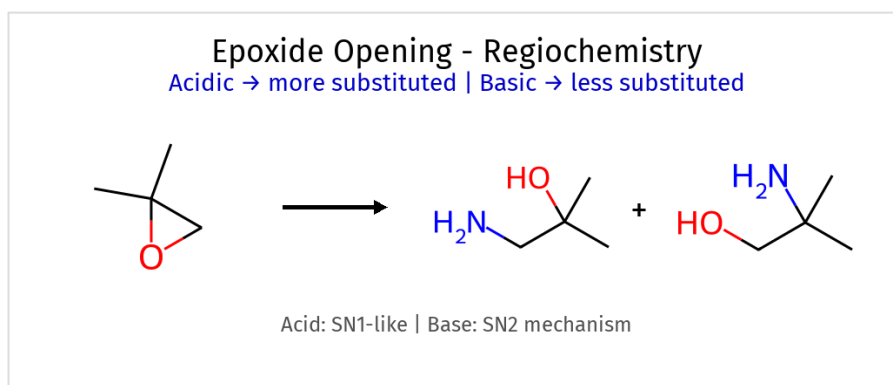
תנאים	מנגנון דומה ל-	נוקלאופיל תוקף ב-	סטריוכימיה	תוצר	זיהוי התנאים
בסיסיים	S_N2	פחמן פחות מותמר	אנטי	Nu-C-C-OH	אין H^+ בתגובה
חומציים	S_N1	פחמן יותר מותמר	אנטי	HO-C-C-Nu	יש H^+ בתגובה



דוגמאות לריאגנטים

- בסיסיים: OH^- , RO^- , NH_3
- חומציים: H^+/H_2O , H^+/ROH

⚠️ טיפ: אם רואים H^+ או H_2SO_4 ← תנאים חומציים!



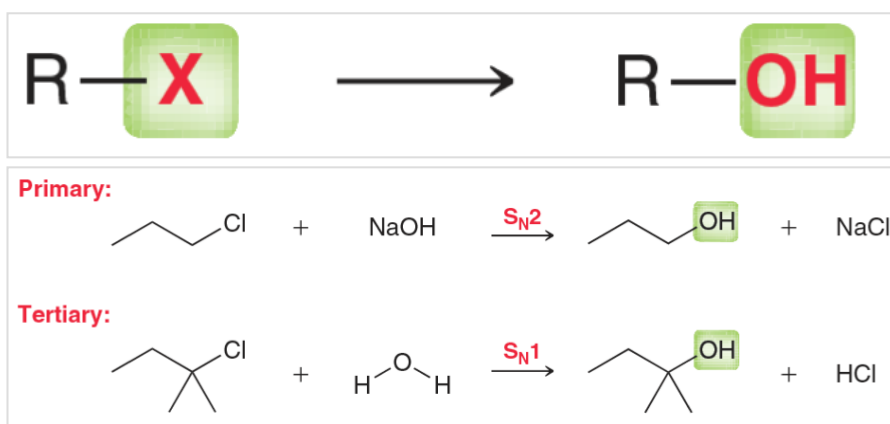
אלכוהולים (R-OH)

7. סיווג וזיהוי אלכוהולים

סוג	מבנה	דוגמה	מספר פחמנים על C-OH	יכולת חמצון
ראשוני (1°)	RCH_2OH	אתנול	1	✓ לאלדהיד/חומצה
משני (2°)	R_2CHOH	איזופרופנול	2	✓ לקטון
שלישוני (3°)	R_3COH	tert-בוטנול	3	✗ אין $H-\alpha$

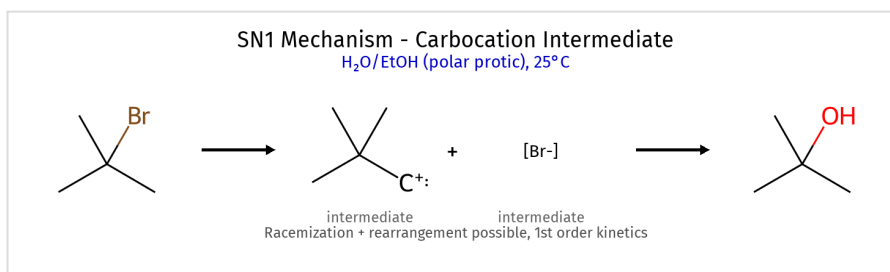
יצירת אלכוהולים דרך התמרה או סיפוח:

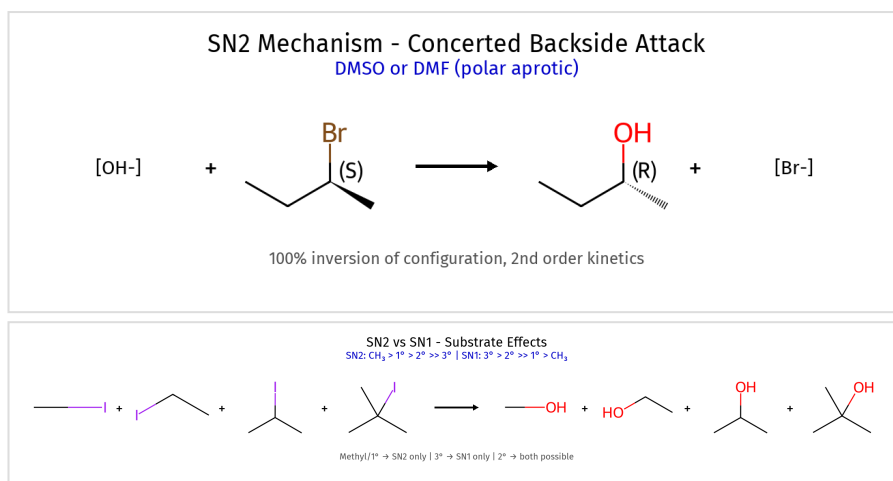
ריאגנטים	תוצר	מנגנון
S_N2	$R-R-Cl + NaOH \xrightarrow{S_N2} R-OH + NaCl$	אלכוהול ראשוני
S_N1	$R-\dots R-X + H_2O \xrightarrow{S_N1} R-OH + HCl$	אלכוהול שלישוני



8. המרת אלכוהולים לאלקיל הלידים

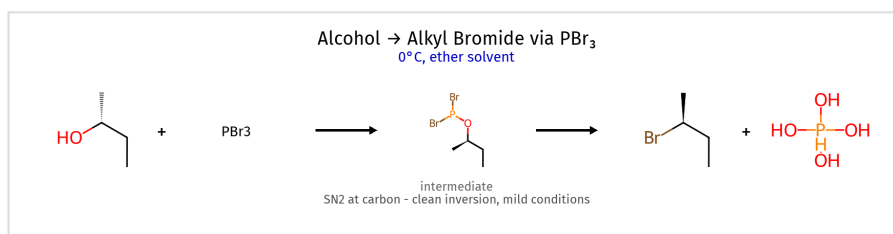
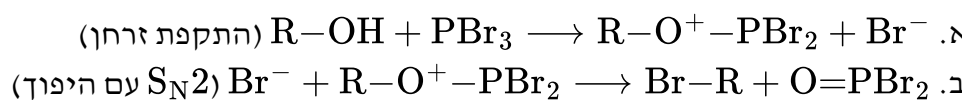
ריאגנט	תנאים	מנגנון	סטרואיכמיה	מתאים ל-	תוצרי לוואי	יתרונות
HX	חומצי + חימום	$(3^\circ) S_N1$ $(1^\circ) S_N2$	רצמיזציה (3°) היפוך (1°)	כל הסוגים	H_2O	פשוט, זול
PBr ₃	ניטרלי	S_N2	היפוך מלא	$2^\circ, 1^\circ$ בלבד	H_3PO_3	סטרואוספציפי
SOCl ₂	+ בסיס (כגון פירידין או טריאתילאמין)	היפוך קונפיגורציה	היפוך	$2^\circ, 1^\circ$ בלבד	$SO_2 \uparrow, HCl \uparrow$	תוצרי לוואי נדיפים



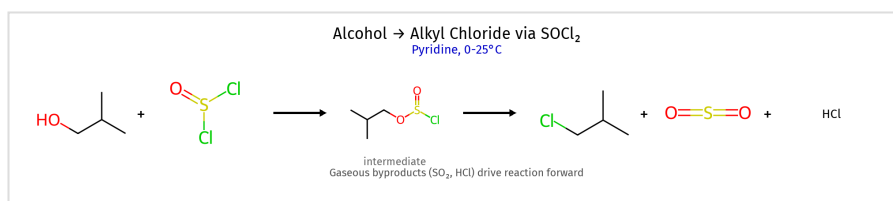
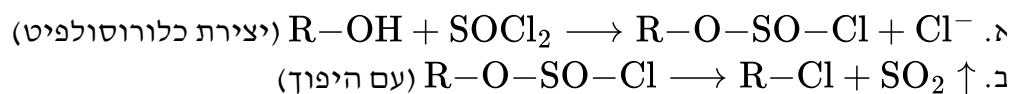


מנגנונים מפורטים

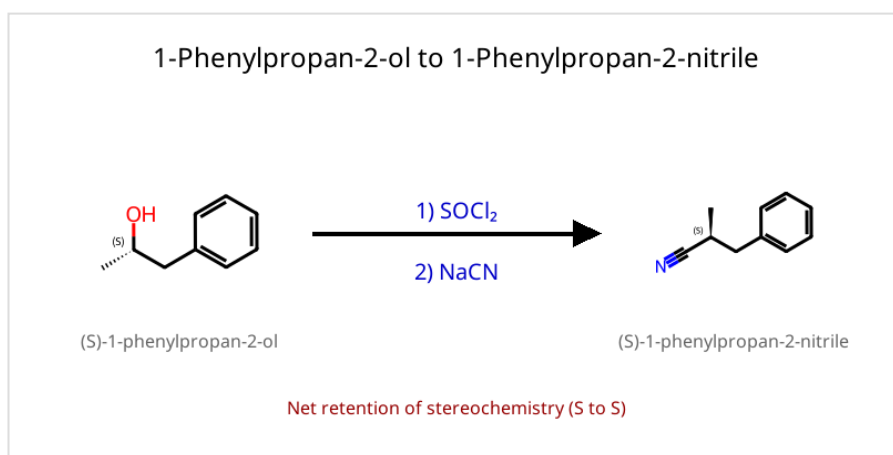
PBr_3

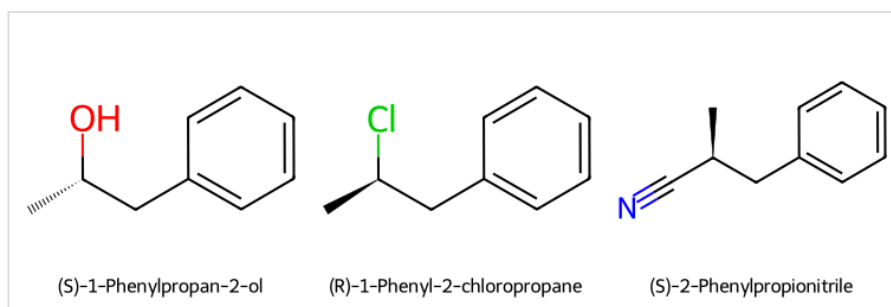


SOCl_2



אם יש בבסיס נוקלאופיל (למשל התגובה עם NaCN): תרחש התקפה נוקלאופילית על הכלור, ויתקבל R-O-SO-CN .
 הקונפיגורציה תישמר, כי מדובר ב- $\text{S}_{\text{N}}2$.

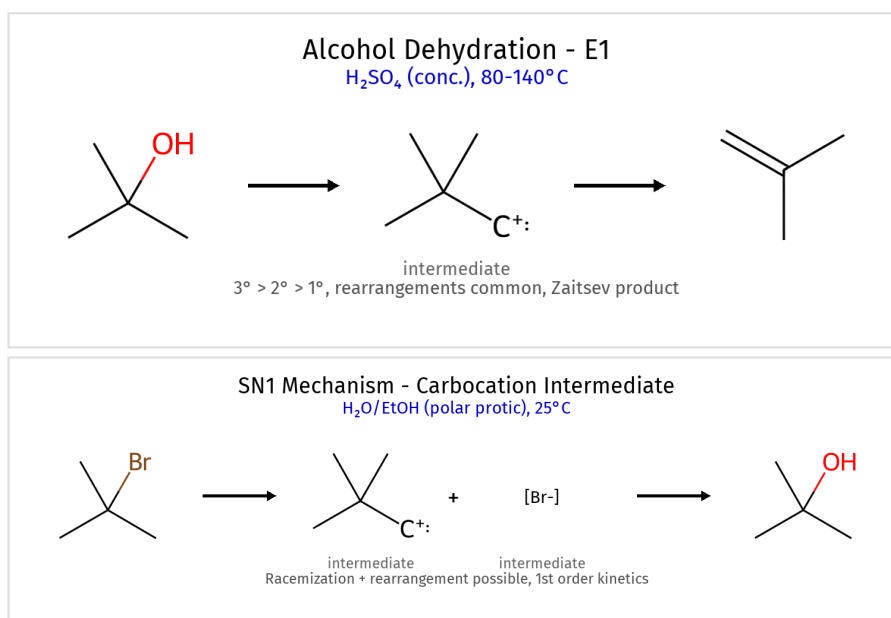




9. דהידרציה של אלכוהולים (יצירת אלקנים)

שלב	תגובה	הסבר	גורמי השפעה
פרוטונציה	$R-OH + H_2SO_4 \rightarrow R-OH_2^+ + HSO_4^-$	הפיכת OH לקבוצה עוזבת טובה	חומציות
יצירת מים	$R-OH_2^+ \rightarrow R^+ + H_2O$	יצירת קרבוקטיון	יציבות: $1^\circ < 2^\circ < 3^\circ$
שיכול אפשרי	רידודים (rearrangements)	יצירת קרבוקטיון יציב יותר	הגירת H או קבוצות אלקיל
אלימינציה	$R^+ \xrightarrow{Base} \text{אלקן} + H^+$	קטיפת פרוטון β	כלל זייצב - האלקן היציב ביותר

תנאים: חימום + חומצה חזקה (H_2SO_4)



10. חמצון אלכוהולים - טבלת הסלקטיביות

פתיחת אפוקסידים

תנאים	נוקלאופיל תוקף	מנגנון
בסיסיים (RO)	פחמן פחות מותמר	SN2
חומציים (H^+)	פחמן יותר מותמר	דמוי-SN1

חמצון אלכוהולים

- PCC: עוצר באלדהיד (מאלכוהול 1°)
- H_2CrO_4 : ממשיך לחומצה קרבוקסילית
- אלקהול 3° : לא מתחמצן (אין $H-\alpha$)

סוג אלכוהול	מבנה	תוצר עם H_2CrO_4 (מימי)	תוצר עם PCC (יבש)	דרישת $\text{H}-\alpha$
ראשוני (1°)	RCH_2OH	חומצה קרבוקסילית RCOOH	אלדהיד RCHO	יש 2 $\checkmark$
משני (2°)	R_2CHOH	קטון $\text{R}_2\text{C=O}$	קטון $\text{R}_2\text{C=O}$	יש 1 $\checkmark$
שלישוני (3°)	R_3COH	אין תגובה	אין תגובה	אין $\times$

מנגנון חמצון (H_2CrO_4)

א. $\text{R}_2\text{CH-OH} + \text{H}_2\text{CrO}_4 \rightarrow \text{R}_2\text{CH-O-CrO}_3\text{H} + \text{H}_2\text{O}$ (יצירת אסטר כרומי)

ב. $\text{R}_2\text{CH-O-CrO}_3\text{H} \rightarrow \text{R}_2\text{CH-O-CrO}_3^- + \text{H}^+$ (דה-פרוטונציה)

ג. $\text{R}_2\text{CH-O-CrO}_3^- \rightarrow \text{R}_2\text{C=O} + \text{HCrO}_3^-$ (E2 - קובע קצב)

בקרת סלקטיביות

• H_2CrO_4 (מימי): חמצון מלא - אלדהיד $\leftarrow$ חומצה דרך הידרט

• PCC (יבש): עצירה באלדהיד - אין מים, אין הידרט

3° Alcohol - No Oxidation Any oxidizing agent No α-hydrogen available for oxidation	2° Alcohol Oxidation $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7/\text{H}^+$ or PCC or Swern Only one product possible - ketone	1° Alcohol Oxidation Pathways PCC $\rightarrow$ aldehyde $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7/\text{H}^+ \rightarrow$ acid PCC stops at aldehyde (anhydrous) Cr(VI) continues to acid
---	---	---

11. ריאגנט גריניאר (R-MgX)

11.1 יצירת ריאגנט גריניאר

שלב	תגובה	הסבר	אופי הקשר
העברת אלקטרון	$\text{R-X} + \text{Mg} \rightarrow \text{R-X}^{\bullet-} + \text{Mg}^{\bullet+}$	מגנזיום מעביר אלקטרון	רדיקלי
שבירת קשר	$\text{R-X}^{\bullet-} \rightarrow \text{R}^{\bullet} + \text{X}^-$	יצירת רדיקל פחמן	הומוליטי
יצירת קשר C-Mg	$\text{R}^{\bullet} + \text{Mg}^{\bullet+} \rightarrow \text{R-Mg}^+$	קשר אורגנומתכתי	יוני/קוולנטי
התארגנות סופית	$\text{R-Mg}^+ + \text{X}^- \rightarrow \text{R-Mg-X}$	מבנה סופי	קוולנטי קוטבי

11.2 שימושי ריאגנט גריניאר

תפקיד	ריאגנט נפגש	תוצר	דוגמה
בסיס חזק	$\text{H}_2\text{O}, \text{ROH}$	אלקאן	$\text{R-MgX} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{R-H}$
נוקלאופיל	קרבונילים (C=O)	אלכוהול	$\text{R-MgX} + \text{R}'\text{CHO} \rightarrow \text{R-CH(OH)-R}'$
נוקלאופיל	אפוקסידים	אלכוהול עם הארכה	יצירת קשר C-C חדש

⚠ דרישות קריטיות:

- תנאים יבשים לחלוטין (אנהידריים)
- שני שלבים נפרדים: (1) תקיפה נוקלאופילית (2) הוספת H_2O לנטרול

כללי אצבע

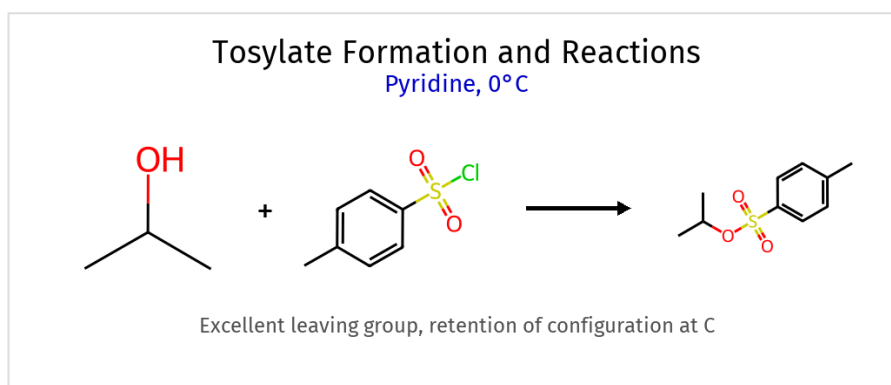
- cis $\leftarrow$ Lindlar-אלקן
- trans $\leftarrow$ Na/ NH_3 -אלקן
- PCC $\leftarrow$ אלדהיד (עוצר)
- $\text{H}_2\text{CrO}_4 \leftarrow$ חומצה (חמצון מלא)
- אפוקסיד + $\text{H}^+ \leftarrow$ תקיפה ביותר מותמר
- אפוקסיד בלי $\text{H}^+ \leftarrow$ תקיפה בפחות מותמר

מלכודות

- **⚠️ אלקיל הלד $3^\circ/2^\circ$ + אניון אצטיליד $\leftarrow$ E2 (לא S_N2 !) ⚠️**
- **⚠️ ריאגנט גריניאר $+ H_2O \leftarrow$ חומצה-בסיס (לא נוקלאופילית!) ⚠️**
- **⚠️ אלכוהול $3^\circ \leftarrow$ לא מתחמצן (אין $H-\alpha$) ⚠️**
- **⚠️ סולפיט ($SOCl_2$) vs סולפט $\leftarrow$ סולפיט נותן תוצרי לוואי נדיפים ⚠️**

עקרונות כלליים

- **מרקובניקוב: $H \leftarrow$ פחות מותמר, $X \leftarrow$ יותר מותמר**
- **אנטי-מרקובניקוב: ההפך (רק בהידרבורציה או תנאים רדיקליים)**
- **S_N2 : היפוך קונפיגורציה, דורש נוקלאופיל חזק ואלקטרופיל לא מוגן**
- **E1: דרך קרבוקטיון, שיחלופים אפשריים, תוצר זייצב**



שיעור 11: אלדהידים וקטונים

מבוא לקבוצת הקרבוניל ($C=O$) 🧪

ריאגנטי חיזור

ריאגנט	קטון $\leftarrow$	אלדהיד $\leftarrow$
$NaBH_4$	אלכוהול 2°	אלכוהול 1°
$LiAlH_4$	אלכוהול 2°	אלכוהול 1°
H_2/Pd	לא מגיב	לא מגיב

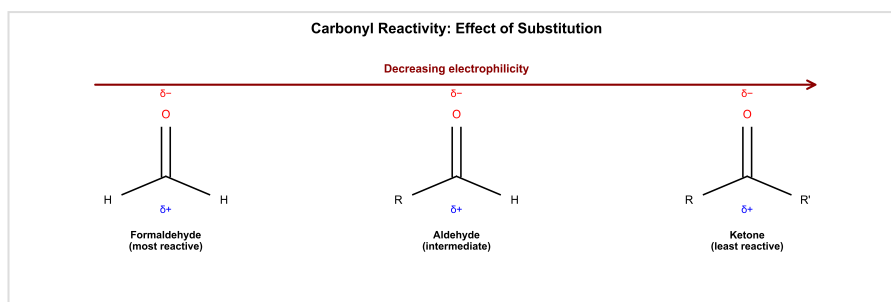
תגובות מיוחדות

- **Wolff-Kishner (H_2NNH_2/KOH): קטון $\leftarrow$ אלקאן**
- **$SOCl_2$: אלכוהול $\leftarrow$ אלקיל כלוריד**

1. מבנה ותכונות בסיסיות

1.1 סיווג קרבונילים

סוג קרבוניל	מבנה כללי	דוגמה	שם	מאפיינים
פורמלדהיד	$H-CHO$	H_2CO	מתנאל	הריאקטיבי ביותר
אלדהיד	$R-CHO$	CH_3CHO	אתנאל (אצטאלדהיד)	H אחד על פחמן קרבונילי
קטון	$R-CO-R'$	CH_3COCH_3	אצטון (פרופון)	שתי קבוצות R על פחמן קרבונילי



1.2 מבנה אלקטרוני וגיאומטריה

תכונה	ערך/תיאור	השלכות
היברידיזציה	sp^2	גיאומטריה מישורית
זוויות קשר	$120^\circ \sim$	מבנה טריגוני
קוטביות קשר	$\text{C}^{\delta+}=\text{O}^{\delta-}$	פחמן אלקטרופילי, חמצן נוקלאופילי
אורכי קשר	$\text{C}=\text{O}: 1.22 \text{ \AA}$	קצר מ- $\text{C}=\text{C}$ ($1.34 \text{ \AA}$)

2. סדר ריאקטיביות קרבונילים

2.1 ריאקטיביות כלפי נוקלאופילים

דירוג	סוג קרבוניל	ריאקטיביות יחסית	סיבות עיקריות
1	פורמלדהיד	הגבוהה ביותר	אין קבוצות אלקיל דוחפות
2	אלדהידים	גבוהה	קבוצת אלקיל אחת + H קטן
3	קטונים	בינונית	שתי קבוצות אלקיל דוחפות
4	אסטרס	נמוכה	רזוננס עם חמצן
5	אמידים	הנמוכה ביותר	רזוננס חזק עם חנקן

2.2 גורמים המשפיעים על ריאקטיביות

גורם	השפעה על ריאקטיביות	הסבר
קבוצות דוחפות אלקטרוניים	מפחיתה	מקטינות δ^+ על פחמן
קבוצות מושכות אלקטרוניים	מגבירה	מגדילות δ^+ על פחמן
הפרעה סטרית	מפחיתה	קושי בגישת נוקלאופיל
קטליזה חומצית	מגבירה	פרוטונציה יוצרת C^+

סינתזה של אלדהידים וקטונים

3. הכנת אלדהידים

שיטה	ריאגנטים	חומר מוצא	תוצר	תנאים חשובים
חמצון אלקוהול 1°	PCC	RCH_2OH	RCHO	ממס יבש - עוצר באלדהיד
חמצון יתר	H_2CrO_4 מימי	RCH_2OH	RCOOH	ממשיך לחומצה
אוזונוליזה מחזרת	O_3 (1) Zn/H^+ (2)	$\text{R}-\text{CH}=\text{CH}-\text{R}'$	$\text{RCHO} + \text{R}'\text{CHO}$	תנאים מחזרים
אוזונוליזה מחמצנת	O_3 (1) H_2O_2 (2)	אלקן	RCOOH	תנאים מחמצניים

4. הכנת קטונים

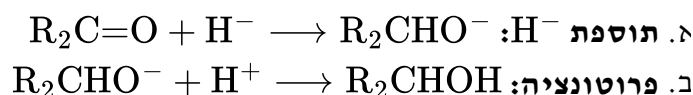
שיטה	ריאגנטים	חומר מוצא	תוצר	הערות
חמצון אלכוהול 2°	PCC או H_2CrO_4	R_2CHOH	R_2CO	לא ממשיך להתחמצן
הידרציה אלקין	$H_2O/H^+/HgSO_4$	$R-C\equiv C-R'$	$R-CO-CH_2-R'$	דרך טאוטומריזציה
אוזונוליזה	O_3 (1) Zn/H^+ (2)	אלקן	קטון	אם פחמן מותמר בשניים

תגובות קרבונליות - תוספת נוקלאופילית

5. חיזור קרבונליות (Reduction of Carbonyls)

ריאגנט חיזור	חוזק	סלקטיביות	תוצר מאלדהיד	תוצר מקטון	תנאים
$LiAlH_4$	חזק מאוד	נמוכה	אלכוהול 1°	אלכוהול 2°	אתר יבש
$NaBH_4$	בינוני	גבוהה	אלכוהול 1°	אלכוהול 2°	פרוטיק או אפרוטיק
H_2/Pd	בינוני	בינונית	אלכוהול 1°	אלכוהול 2°	לחץ ותמפרטורה

מנגנון חיזור עם הידרידים

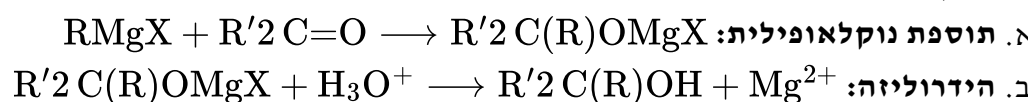


6. תגובות עם ריאגנט גריניאר

6.1 סוגי תוצרים לפי קרבונל

קרבונל מקורי	ריאגנט	תוצר אלכוהול	דוגמה
פורמלדהיד	$RMgX$	ראשוני	$HCHO + CH_3MgBr \rightarrow CH_3CH_2OH$
אלדהיד אחר	$RMgX$	שניוני	$CH_3CHO + CH_3MgBr \rightarrow (CH_3)_2CHOH$
קטון	$RMgX$	שלישוני	$(CH_3)_2CO + CH_3MgBr \rightarrow (CH_3)_3COH$

6.2 מנגנון תגובת גריניאר



7. הידרציה - יצירת הידרטים (gem-diols)

7.1 שיווי משקל הידרציה

קרבונל	שיווי משקל	% הידרט	סיבה
פורמלדהיד	$\leftarrow$	<99%	אלקטרופיליות גבוהה
אצטאלדהיד	$\rightleftharpoons$	~58%	בינוני
אצטון	$\leftarrow$	>1%	אלקטרופיליות נמוכה
קטונים גדולים	$\leftarrow$	~0%	הפרעה סטרית

7.2 מנגנון הידרציה

תנאים	מנגנון	שלבים
בסיסיים	התקפה ישירה	$OH^- + C=O \rightarrow C(OH)O^- \xrightarrow{H_2O} C(OH)_2$
חומציים	הפעלה ואז התקפה	$C=O + H^+ \rightarrow C=OH^+ \xrightarrow{H_2O} C(OH)_2$

אצטלים וקטלים - קבוצות הגנה

8. יצירת אצטלים וקטלים

8.1 תנאים ותוצרים

חומר מוצא	ריאגנט	תוצר	תנאים	שימוש
אלדהיד	$H^+ + ROH$	אצטל $RCH(OR')_2$	H_2O	קבוצת הגנה
קטון	$H^+ + ROH$	קטל $R_2C(OR')_2$	H_2O	קבוצת הגנה
קרבוניל	דיוול H^+	אצטל/קטל ציקלי	H_2O	יציב יותר

8.2 מנגנון יצירת אצטל (2 שלבים)

שלב	תגובה	תוצר ביניים	הערות
1	$RCHO + ROH \xrightarrow{H^+} RCH(OH)(OR)$	המי-אצטל	יציב יחסית
2	$RCH(OH)(OR) \xrightarrow{ROH/-H_2O} RCH(OR)_2$	אצטל מלא	דרך קרבוקטיון

8.3 יתרונות קבוצות הגנה

תכונה	יציבות	תנאי הסרה	יתרון
בפני בסיסים	יציב	לא מגיב	מאפשר תגובות בסיסיות
בפני נוקלאופילים	יציב	לא מגיב	מאפשר S_N2 , גריניאר
בפני מחזרים	יציב	לא מגיב	מאפשר חיזור אתרים אחרים
הסרה	רגיש	H_3O^+	הסרה קלה וסלקטיבית

תגובות עם תרכובות חנקן

9. יצירת אימינים (בסיסי שף)

9.1 סוגי אימינים ותוצרים

אמין	מבנה	תוצר	שם התוצר	יציבות
אמוניה	NH_3	$R_2C=NH$	אימין ראשוני	נמוכה
אמין ראשוני	RNH_2	$R_2C=NR$	אימין שניוני	בינונית
הידרוקסילאמין	$HONH_2$	$R_2C=NOH$	אוקסים	גבוהה
הידרזין	H_2NNH_2	$R_2C=NNH_2$	הידרזון	גבוהה

9.2 מנגנון יצירת אימין

שלב	תגובה	תוצר ביניים	גורם מניע
1	$C=O + RNH_2 \rightarrow C(NHR)OH$	קרבינולאמין	התקפה נוקלאופילית
2	$C(NHR)OH \xrightarrow{H^+} C(NHR)OH_2^+$	פרוטונציה	הפיכה לקבוצה עוזבת
3	$C(NHR)OH_2^+ \rightarrow C^+(NHR) + H_2O$	קרבוקטיון	יציאת מים
4	$C^+(NHR) \xrightarrow{-H^+} C=NR$	אימין	אלימינציה

10. יצירת אנמינים

10.1 תנאים ותוצרים

אמין	קרבניל	תוצר	מאפיינים
אמין שניוני	אלדהיד/קטון	אנמין	קשר $C=C$ + קבוצת NR_2
דוגמה	$(CH_3)_2NH + CH_3CHO$	$CH_2=CHN(CH_3)_2$	נוקלאופיל בפחמן β

10.2 הבדל מאמין

תכונה	אימין	אנמין
קשר כפול	$C=N$	$C=C$
מיקום חנקן	על קשר כפול	סמוך לקשר כפול
ריאקטיביות	אלקטרופילי	נוקלאופילי

חומציות מימני אלפא

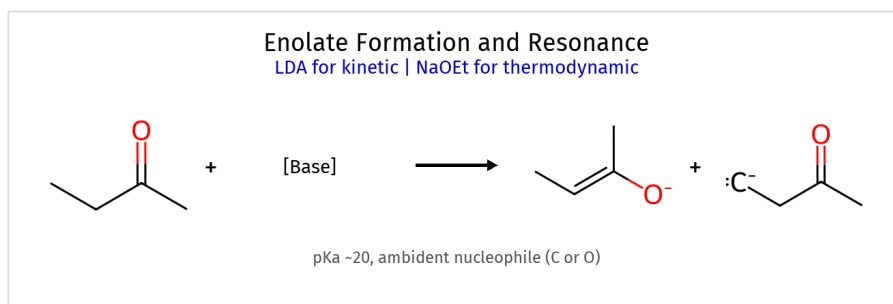
11. חומציות ויצירת אנולטים

11.1 השוואת חומציות

תרבות	pKa	חומציות יחסית	מיוצב על ידי
מתן רגיל	~50	חלש מאוד	אין
מימן α לקטון	~19-20	בינוני	רזוננס עם $C=O$
מימן α לאסטר	~25	חלש	רזוננס חלש יותר
מימן α לניטריל	~25	חלש	רזוננס עם $C \equiv N$

11.2 מבנה אנולט

צורת רזוננס	מבנה	תרומה
אנולט	$R-CH^- - CO-R'$	מטען על פחמן
אוקסי-אניון	$R-CH=CO^- - R'$	מטען על חמצן
היברידי	ביניים	מטען מחולק



תגובות חמצון והפחתה

12. חמצון קרבונילים

12.1 התנהגות בחמצון

סוג קרבניל	ריאגנט חמצון	תוצר	הסבר
אלדהיד	$KMnO_4$ או $K_2Cr_2O_7$	חומצה קרבוקסילית	יש H על פחמן קרבונילי
קטון	חומרי חמצון רגילים	אין תגובה	אין H על פחמן קרבונילי
קטון	תנאים קשים	שבירת קשרים	פירוק לחומצות קטנות

12.2 בדיקת טולנס (מראה כסף)

מגיב	תוצר	תצפית	מסקנה
אלדהיד	חומצה + Ag מתכתי	מראה כסף	חיובי לאלדהיד
קטון	אין תגובה	לא משתנה	שלילי
אלכוהול	אין תגובה	לא משתנה	שלילי

נקודות מפתח

13. כללי אצבע

13.1 זיהוי מהיר של תגובות

ריאגנט	תוצר צפוי	זיכרון
NaBH_4	אלכוהול	"הידריד = מוסיף מימנים"
RMgX	אלכוהול + הארכה	"גריניאר = מוסיף פחמנים"
$\text{ROH} + \text{H}^+$	אצטל	"הגנה הפיכה"
$\text{RNH}_2 + \text{H}^+$	אימין	"C=N במקום C=O"

13.2 מלכודות

- ⚠ **אצטון vs אצטאל:** אצטון זה קטון, אצטל זה קבוצת הגנה!
- ⚠ **PCC vs $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$:** עוצר באלדהיד, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ממשיך לחומצה
- ⚠ **אימין vs אנמין:** אימין יש C=N, אנמין יש C=C ליד חנקן
- ⚠ **שיווי משקל אצטל:** צריך להסיר מים כדי לדחוף קדימה

13.3 אסטרטגיות פתרון

זיהוי קבוצות פונקציונליות:

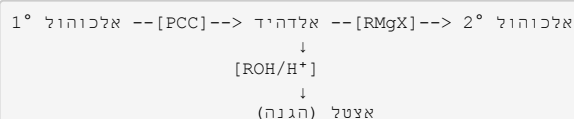
- חפש C=O (קרבוניל)
- זהה H או R על פחמן קרבונילי
- בדוק מימני α (חומציים)

תכנון סינתזה:

- אלדהיד $\leftarrow$ אלכוהול 1° (PCC)
- קטון $\leftarrow$ אלכוהול 2° (חמצון)
- אלכוהול $\leftarrow$ קרבוניל (חיזור)
- הגנה $\leftarrow$ קרבוניל $\leftarrow$ אצטל

14. דוגמאות מיישומיות

14.1 רצף תגובות נפוץ



14.2 זיהוי תוצרים

שאלה טיפוסית: "מה התוצר של אצטון + מתנול + חומצה?"

פתרון:

- אצטון = קטון
- מתנול = אלכוהול
- חומצה = קטליזטור
- תוצר = קטל (קבוצת הגנה)

שיעור 12: תגובות אלפא לקרבוניל

חומציות מימני אלפא ויצירת אנולטים

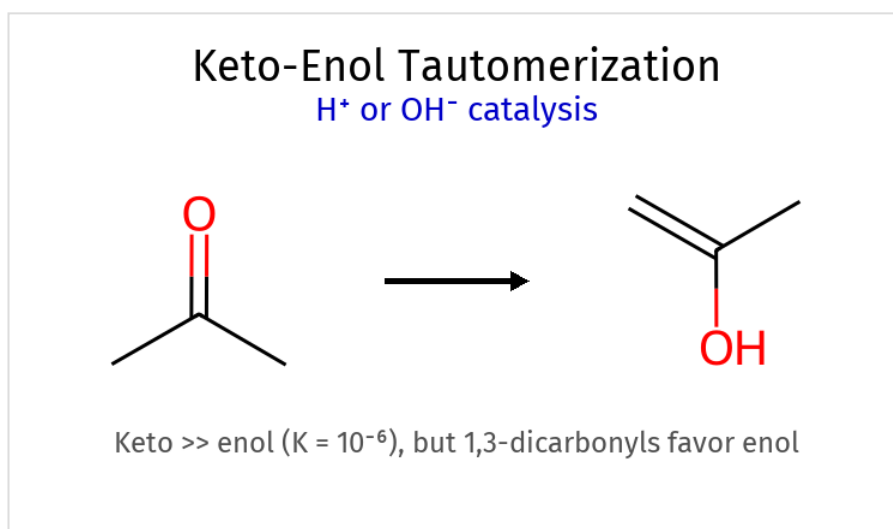
השוואת חומציות לפי מיקום

מיקום המימן	pKa טיפוסי	חומציות יחסית	יציבות הבסיס המצומד	מיוצב על ידי
פחמן רגיל	~50	חלש מאוד	נמוכה	אין
פחמן α לקטון	17-19	בינוני-חזק	גבוהה	רזוננס עם C=O
פחמן α לאסטר	~25	בינוני	בינונית	רזוננס חלש יותר
פחמן β לקרבוניל	~50	חלש מאוד	נמוכה	אין
1,3-דיקטון	~9	חזק מאוד	גבוהה מאוד	שני קרבונילים

מבנה אנולטים - רזוננס

צורת רזוננס	מבנה	תרומה יחסית	מאפיינים
אנולט	$R-CO-CH^--R'$	בינונית	מטען על פחמן (נוקלאופיל)
אוקסי-אניון	$R-C(O^-)=CH-R'$	גבוהה	מטען על חמצן (יציב יותר)
היברידי	-	-	מטען מחולק בין C ו-O

שיווי משקל אנול-קטון (טאוטומריזציה)



גורמים המשפיעים על שיווי המשקל

מקרה	כיוון שיווי משקל	סיבה	דוגמה
קטונים רגילים	← קטון	C=O יציב מ-C=C	אצטון: <99% קטון
1,3-דיקטון	← אנול	קשרי מימן תוך-מולקולריים	אצטילאצטון: ~80% אנול
פנולים	← אנול	יצירת מערכת ארומטית	100% אנול
α-הלוקטון	← קטון	אפקט מושך אלקטרוניים	עדיפות לקטון

מנגנונים לפי סוג קטליזה

קטליזה	שלב ראשון	שלב שני	חומר ביניים	מהירות
חומצית	פרוטונציה C=O	דה-פרוטונציה α	$R-C(OH^+)-CH_2-R'$	איטית
בסיסית	דה-פרוטונציה α	פרוטונציה O	אנולאט $R-CO-CH^--R'$	מהירה

הלוגנציה באלפא (Halogenation-α)

השוואה בין תנאים חומציים ובסיסיים

תנאי קטליזה	חומר ביניים	מספר H מוחלפים	מנגנון	אלקטרופיליות לאחר החלפה
חומצי	אנול	אחד בלבד	דרך אנול	מיקטן (Br מושך e)
בסיסי	אנולאט	כל מימני α	דרך אנולאט	מגביר חומציות ← החלפות נוספות

מנגנון בקטליזה חומצית

שלב	תגובה	תוצר ביניים	הערות
1	$R-CO-CH_2-R' + H^+ \rightleftharpoons R-C(OH^+)-CH_2-R'$	קרבוניל מפרוטן	הפעלה
2	$R-C(OH^+)-CH_2-R' \rightleftharpoons R-C(OH)=CH-R' + H^+$	אנול	דה-פרוטונציה α
3	$R-C(OH)=CH-R' + Br_2 \rightarrow R-C(OH^+)-CHBr-R' + Br^-$	אלקטרופיליות	התקפת אנול על Br ₂
4	$R-C(OH^+)-CHBr-R' \rightarrow R-CO-CHBr-R' + H^+$	α-הלוקסון	דה-פרוטונציה

מגבלה: Br מושך אלקטרונים ← מקשה על יצירת אנול נוסף

מנגנון בקטליזה בסיסית

שלב	תגובה	תוצר ביניים	הערות
1	$R-CO-CH_2-R' + OH^- \rightarrow R-CO-CH^-R' + H_2O$	אנולאט	דה-פרוטונציה
2	$R-CO-CH^-R' + Br_2 \rightarrow R-CO-CHBr-R' + Br^-$	α-הלוקסון	התקפה נוקלאופילית
3	$R-CO-CHBr-R' + OH^- \rightarrow R-CO-CBr^-R' + H_2O$	אנולאט חדש	Br מגביר חומציות
4	חזרה על שלבים 2-3	$R-CO-CBr_3-R'$	טרי-הלוגנציה

תגובת אלדול - יצירת קשרי C-C

סוגי תגובות אלדול

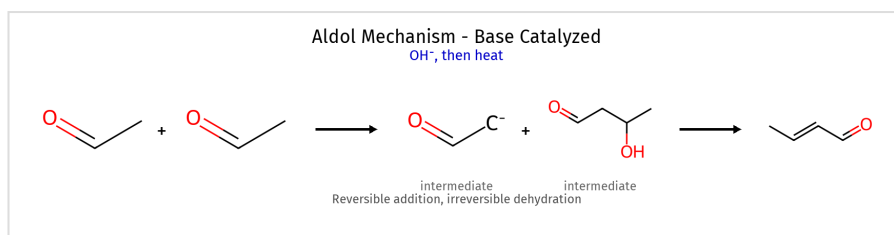
סוג תגובה	חומרי מוצא	תנאים	תוצר ראשוני	תוצר סופי (עם Δ)
אלדול פשוט	קרבוניל זהה	OH ⁻	$R-CH(OH)-CH_2-CO-R$	$R-CH=CH-CO-R$
אלדול מעורב	קטון + אלדהיד	OH ⁻	קטון-CH(OH)-CHO	אלפא, בטא-בלתי רווי
תוך-מולקולרי	דיקרבוניל	OH ⁻	מולקולה ציקלית	טבעת 5-6 איברים

כללי סלקטיביות באלדול מעורב

קרבוניל	תפקיד	סיבה	דרישה
קטון	נוקלאופיל	פחות אלקטרופילי	חייב H באלפא
אלדהיד	אלקטרופיל	יותר אלקטרופילי	לא חייב H באלפא
פורמלדהיד	אלקטרופיל בלבד	הריאקטיבי ביותר	אין H באלפא

מנגנון אלדול בקטליזה בסיסית

שלב	תגובה	תוצר ביניים	גורם מניע
1	$CH_3CHO + OH^- \rightarrow CH_2^-CHO + H_2O$	אנולאט	דה-פרוטונציה
2	$CH_2^-CHO + CH_3CHO \rightarrow CH_3CH(O^-)CH_2CHO$	אלקוקסיד	התקפה C-C
3	$CH_3CH(O^-)CH_2CHO + H_2O \rightarrow CH_3CH(OH)CH_2CHO$	אלדול	פרוטונציה
4	$CH_3CH(OH)CH_2CHO \xrightarrow{\Delta} CH_3CH=CHCHO + H_2O$	α,β-בלתי רווי	אלימינציה



תגובת קלייזן - דחיסת אסטרים

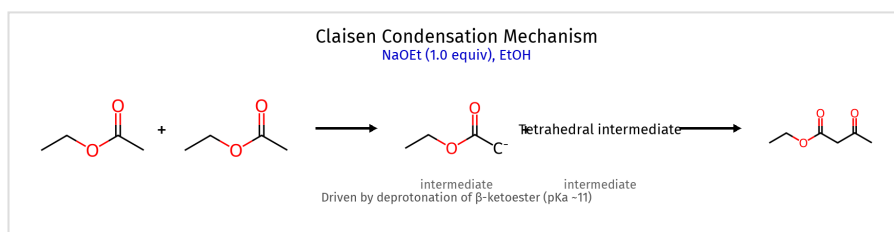
השוואה: קלייזן vs אלדול

תכונה	תגובת אלדול	תגובת קלייזן
חומרי מוצא	קרבונילים	אסטרים
בסיס	OH^-	RO^- (אלקוקסיד)
שלב מפתח	פרוטונציה O^-	אלימינציה OR^-
תוצר	α, β -הידרוקסי-קרבוניל	β -קטו-אסטר

מנגנון קלייזן מפורט

שלב	תגובה	הסבר	קבוצה עוזבת
1	$\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Et} + \text{EtO}^- \rightarrow \text{CH}_2^-\text{CO}_2\text{Et} + \text{EtOH}$	יצירת אנולאט	-
2	$\text{CH}_2^-\text{CO}_2\text{Et} + \text{CH}_3\text{CO}_2\text{Et} \rightarrow \text{CH}_3\text{C}(\text{O}^-)(\text{CH}_2\text{CO}_2\text{Et})\text{OEt}$	התקפה על אסטר	-
3	$\text{CH}_3\text{C}(\text{O}^-)(\text{CH}_2\text{CO}_2\text{Et})\text{OEt} \rightarrow \text{CH}_3\text{COCH}_2\text{CO}_2\text{Et} + \text{EtO}^-$	אלימינציה	EtO^-

הבדל מהותי: באלדול אין קבוצה עוזבת, בקלייזן יש אלימינציה של אלקוקסיד!

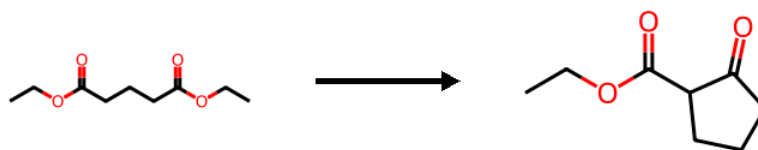


תגובת דיקמן (קלייזן תוך-מולקולרי)

גודל טבעת	יעילות	סיבה	דוגמה
5 איברים	גבוהה	יציבות מקסימלית	גלוטרט $\leftarrow$ ציקלופנטון
6 איברים	גבוהה	יציבות גבוהה	אדיפט $\leftarrow$ ציקלוקסנטון
+7 איברים	נמוכה	מתח זוויתי	לא מועדף

Dieckmann Condensation

NaOEt, EtOH, heat



5 and 6 membered rings favored

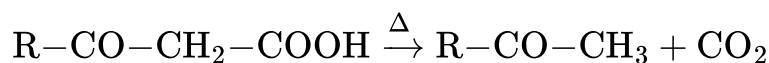
דקרבוקסילציה של β-קטו-חומצות

תנאים מבניים לדקרבוקסילציה

מבנה	יכולת דקרבוקסילציה	טמפרטורה נדרשת	מנגנון
β-קטו-חומצה	✓ ספונטנית	חימום בסיסי	מעבר ציקלי 6-איברים
α-קטו-חומצה	✗ לא	-	אין יציבות
γ-קטו-חומצה	✗ לא	-	מרחק גדול מדי
חומצה רגילה	✗ לא	-	אין קטון סמוך

מנגנון דקרבוקסילציה - מעבר ציקלי

שלב	תיאור מבני	תוצר	גורם מניע
1	יצירת מצב מעבר ציקלי 6-איברים	$R-CO-CH_2-COOH \rightarrow [רבעה]$	יציבות ציקלית
2	הגירת פרוטון ושברית C-C	$R-C(OH)=CH_2 + CO_2$	יצירת אנול
3	טאוטומריזציה	$R-CO-CH_3$	יציבות קטון



זיהוי במולקולות: חפש קרבוניל וחומצה המופרדים על ידי פחמן אחד בדיוק.

אמינים - בסיסיות ותגובות

סיווג אמינים

סוג אמין	מבנה כללי	דוגמה	מספר קבוצות R
ראשוני	$R-NH_2$	מתילאמין	1
שניוני	R_2NH	דימתילאמין	2
שלישוני	R_3N	טרימתילאמין	3

סדר בסיסיות אמינים

דירוג	סוג אמין	pKa של BH ⁺	בסיסיות יחסית	סיבות עיקריות
1	שניוני	~11	הגבוהה ביותר	אפקט אינדוקטיבי אופטימלי + הפרעה מינימלית
2	ראשוני	~10.7	גבוהה	אפקט אינדוקטיבי חיובי
3	שלישוני	~10.8	בינונית	הפרעה סטרית בפרוטונציה
4	אמוניה	9.25	הנמוכה ביותר	אין אפקט אינדוקטיבי

מקרים מיוחדים בבסיסיות

רכובת	pKa	בסיסיות	גורם מכריע
אנילין	~4.6	חלשה מאוד	רזוננס עם טבעת ארומטית
פירידין	5.2	חלשה	היברידיזציה sp ²
אמיד	>0	אין	רזוננס חזק עם C=O

תגובות עיקריות של אמינים

תגובה	ריאגנטים	תוצר	מנגנון	הערות
אלקילציה	RX	אמין מותמר יותר	S _N 2	עם אלקיל הלד 1°
יצירת אימין	קרבוניל + H ⁺	R ₂ C=NR'	תוספת-אלימינציה	תגובת שיף
יצירת אנמין	קרבוניל + אמין 2°	R ₂ C=CHR + NR ₂	שונה מאימין	C=N במקום C=C
אמינציה חוזרת	(1 אימין 2) חיזור	אמין שניוני	הידרוגנציה	H ₂ /Pd

השוואת מנגנונים - תקיפה באלפא

תגובה	נוקלאופיל	אלקטרופיל	תוצר	תכונה ייחודית
הלוגנציה α	אנול/אנולאט	X ₂	α-הלוקסון	בסיסי = כל ה-H
אלדול	אנולאט	קרבוניל	α,β-הידרוקסי	+ אלימינציה בחימום
קלייזן	אנולאט	אסטר	β-קטו-אסטר	אלימינציה של OR ⁻
אלקילציה	אנולאט	RX	α-אלקיל קרבוניל	S _N 2 עם הלד 1°

זיהוי מהיר

רואים בשאלה	חושבים על	ריאגנט מפתח
Br ₂ + בסיס	הלוגנציה α בסיסית	כל מימני α
Br ₂ + חומצה	הלוגנציה α חומצית	מימן α אחד
OH ⁻ + חימום	אלדול + דהידרציה	α,β-בלתי רווי
EtO ⁻ + אסטר	קלייזן	β-קטו-אסטר
β-קטו-חומצה + Δ	דקרבוקסילציה	קטון + CO ₂

נקודות מפתח

כללי אצבע - חומציות ותגובות

נושא	כלל זהב	מלכודת נפוצה
חומציות α	$pK_a \sim 17-19$ (רזוננס עם $C=O$)	לא לבלבל עם β
הלוגנציה	בסיסי = הכל, חומצי = אחד	חומצי לא ממשיד!
אלדול	קטון = נוקלאופיל, אלדהיד = אלקטרופיל	רק H באלפא יכול להיות נוקלאופיל
קלייזן	אלימינציה OR (לא פרוטונציה!)	שונה מאלדול!
דקרבוקסילציה	רק β -קטו (פחמן אחד הפרש)	לא α או γ
בסיסיות אמינים	$NH_3 < 3^\circ < 1^\circ < 2^\circ$	רזוננס באנילין הורס

אסטרטגיות פתרון

זיהוי מהיר של תגובות:

- ראית Br_2 ? $\leftarrow$ הלוגנציה α (בדוק חומצי/בסיסי)
- ראית OH^- + חימום? $\leftarrow$ אלדול עם דהידרציה
- ראית EtO ? $\leftarrow$ קלייזן (אסטרים)
- ראית β -קטו-חומצה + Δ ? $\leftarrow$ דקרבוקסילציה
- ראית אמין + קרבוניל? $\leftarrow$ אימין או אנמין

תכנון סינתזה:

- α -הלוקטון $\leftarrow$ הלוגנציה
- α, β -בלתי רווי $\leftarrow$ אלדול + Δ
- β -קטו-אסטר $\leftarrow$ קלייזן
- קטון $\leftarrow$ דקרבוקסילציה של β -קטו-חומצה

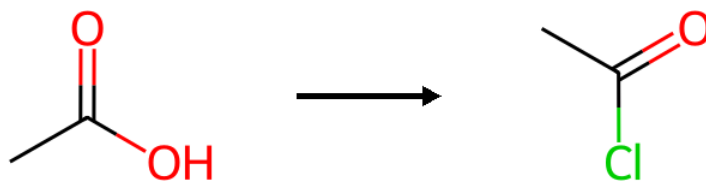
שיעור 13: חומצות קרבוקסיליות ונגזרותיהן

נגזרות חומצות קרבוקסיליות - סדר ריאקטיביות

נגזרה	ריאקטיביות יחסית	קבוצה עוזבת	סינתזה מחומצה	תגובות אופייניות
אציל כלוריד	הכי גבוהה	Cl^-	$SOCl_2$ או PCl_5	$\leftarrow$ כל הנגזרות האחרות
אנהידריד	גבוהה	$RCOO^-$	חימום $RCOOH_2$	$\leftarrow$ אסטר, אמיד
אסטר	בינונית	RO^-	$ROH + H^+$ או $RCOCl$	$\leftarrow$ חומצה, אמיד
אמיד	נמוכה	NH_2^- (גרועה)	$RNH_2 + RCOCl$	הכי יציב

Acid Chloride Formation

SOCl_2 or PCl_5 or $(\text{COCl})_2$



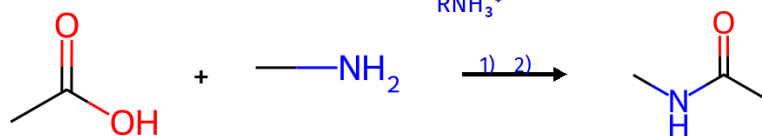
SOCl_2 preferred - gaseous byproducts

Amide Formation - Three Methods

1) $\text{RCOCl} + 2 \text{RNH}_2$

2) DCC coupling

RNH_3^+



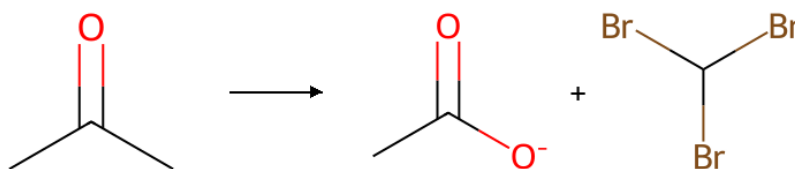
DCC best for peptides - mild conditions

תגובות של נגזרות חומצה

חומר מוצא	ריאגנט	תוצר	מספר התקפות	הערות
אציל כלוריד	LiAlH_4	כוהל 1°	2	דרך אלדהיד
אציל כלוריד	2RMgX	כוהל 3°	2	דרך קטון
אסטר	LiAlH_4	כוהל 1° + כוהל	2	דרך אלדהיד
אסטר	2RMgX	כוהל 3°	2	דרך קטון
אסטר	OH^-	קרבוקסילט	1	ספוניפיקציה
אמיד	LiAlH_4	אמין	-	חיזור, לא החלפה

Haloform Reaction

Br_2, OH^-



Methyl ketone $\rightarrow$ carboxylate

סינתזה של חומצות קרבוקסיליות

שיטת סינתזה	ריאגנטים	מנגנון	הערות
חמצון כוהל ראשוני	$K_2Cr_2O_7/H^+$	חמצון דו-שלבי	$R-CH_2OH \rightarrow R-CHO \rightarrow R-COOH$
קרבוקסילציה של גריניאר	$RMgX + CO_2 \rightarrow H_3O^+$	התקפה נוקליאופילית על CO_2	הארכת שרשרת באטום פחמן אחד

סדר ריאקטיביות נגזרות חומצה קרבוקסילית

סדר ריאקטיביות	נגזרת	סיבת הריאקטיביות	קבוצה עוזבת
1 (הכי ריאקטיבי)	אציל הלד	הלוגן מושך אלקטרוניים אינדוקטיבי	X^- (מצוין)
2	אנהידריד	אפקט אינדוקטיבי מקרבוניל שני	$RCOO^-$ (טוב)
3	אסטר	רזוננס מחמצן מפחית אלקטרופיליות	RO^- (גרוע)
4 (הכי פחות ריאקטיבי)	אמיד	רזוננס חזק מחנקן	R_2N^- (גרוע מאוד)

סינתזה של אציל הלדים

ריאגנט	תגובה	תוצרי לוואי	יתרונות
תיוניל כלוריד	$R-COOH + SOCl_2 \rightarrow R-COCl + SO_2 + HCl$	גזיים (מתנדפים)	בידוד קל של התוצר
פוספור טריברומיד	$3 R-COOH + PBr_3 \rightarrow 3 R-COBr + H_3PO_3$	נוזלי	יצירת אציל ברומידים

תגובות אציל הלדים - המרכז הסינתטי

נוקליאופיל	תוצר	מנגנון	הערות מיוחדות
מים	$R-COCl + H_2O \rightarrow R-COOH + HCl$	החלפה נוקליאופילית אצילית	הידרוליזה
כוהל	$R-COCl + R'OH \rightarrow R-COOR' + HCl$	החלפה נוקליאופילית אצילית	יצירת אסטר
אמין	$R-COCl + 2 R'NH_2 \rightarrow R-CON(R')_2 + R'NH_2^+Cl^-$	החלפה נוקליאופילית אצילית	נדרשות 2 מולקולות אמין
קרבוקסילט	$R-COCl + R'COO^- \rightarrow R-CO-O-CO-R' + Cl^-$	החלפה נוקליאופילית אצילית	יצירת אנהידריד

תגובות רדוקציה ותוספת של אציל הלדים

ריאגנט	תוצר	מספר התקפות	הערות
$LiAlH_4$	$R-COCl \rightarrow R-CH_2OH$	שתיים (דרך אלדהיד)	כוהל ראשוני
ריאגנט גריניאר	$R-COCl + 2 R'MgX \rightarrow R-C(OH)(R')_2$	שתיים (דרך קטון)	כוהל שלישוני

Hydride Reducing Agents Comparison

NaBH_4 : mild, selective | LiAlH_4 : powerful, reactive

Various C=O

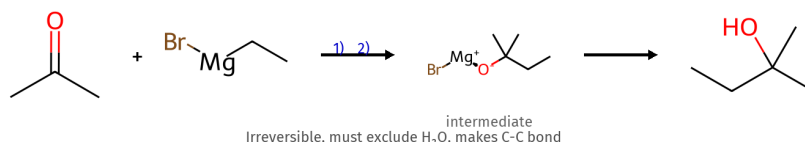


Alcohols

NaBH_4 : aldehydes/ketones | LiAlH_4 : all carbonyls + esters/amides

Grignard Addition Mechanism

1) Et_2O , anhydrous
2) H_3O^+



תגובות אנהידרידים

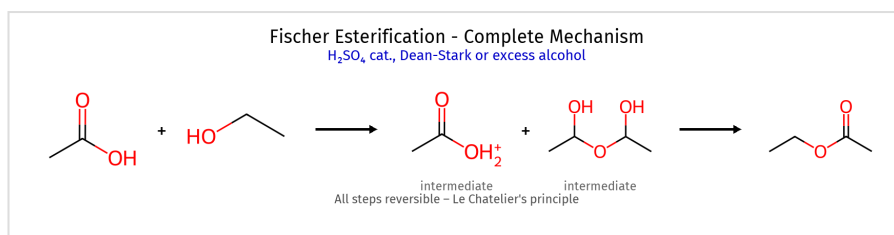
קבוצה עוזבת	תוצר	ריאגנטים	תגובה
RCOO^-	2RCOOH	$(\text{RCO})_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$	הידרוליזה
RCOO^-	$\text{RCOOR}' + \text{RCOOH}$	$(\text{RCO})_2\text{O} + \text{R}'\text{OH}$	אלכוהוליזה
RCOO^-	$\text{RCONHR}' + \text{RCOO}^- \text{NH}_3\text{R}'^+$	$(\text{RCO})_2\text{O} + 2 \text{R}'\text{NH}_2$	אמינוליזה
-	$2 \text{RCH}_2\text{OH}$	$(\text{RCO})_2\text{O} + \text{LiAlH}_4$	רדוקציה

סינתזה של אסטרים - שלוש שיטות עיקריות

שיטה	ריאגנטים	יתרונות	מגבלות
דרך אציל הלד	$\text{R-COOH} \xrightarrow{\text{SOCl}_2} \text{R-COCl} \xrightarrow{\text{R}'\text{OH}} \text{R-COOR}'$	מהיר, יעיל	שני שלבים, HCl קורוזיבי
אלקילציה של קרבוקסילט	$\text{R-COOH} \xrightarrow{\text{base}} \text{R-COO}^- \xrightarrow{\text{R}'\text{X}} \text{R-COOR}'$	שלב אחד	רק עם אלקיל הלדים ראשוניים
אסטרופיקציה של פישר	$\text{R-COOH} + \text{R}'\text{OH} \xrightleftharpoons{\text{H}^+} \text{R-COOR}' + \text{H}_2\text{O}$	ישיר, זול	שיווי משקל, איטי

מנגנון אסטרופיקציה של פישר - 5 שלבים

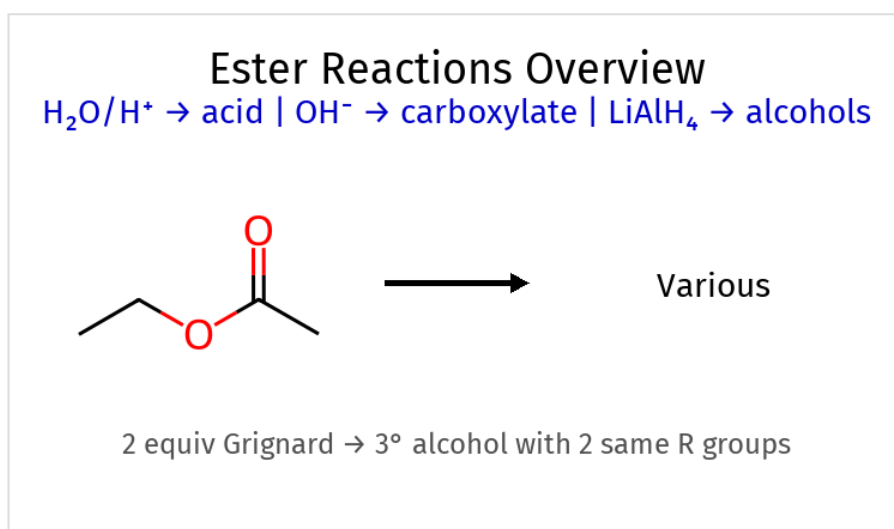
שלב	תהליך	תוצר ביניים	הערה
1	פרוטונציה של קרבונל	$\text{R-C(=OH}^+)-\text{OH}$	הגברת אלקטרופיליות
2	התקפת כוהל	$\text{R-C(OH)(OH)(OR}'\text{H}^+)$	תוצר ביניים טטרהדרלי
3	העברת פרוטון	$\text{R-C(OH)(OH}_2^+)(\text{OR}')$	הכנת קבוצה עוזבת
4	סילוק מים	$\text{R-C(=OH}^+)(\text{OR}')$	שחזור קרבונל
5	דה-פרוטונציה	$\text{R-C(=O)(OR}')$	אסטר סופי



תגובות אסטרים

תגובות עם נוקליאופילים חלשים (דורשות קטליזה חומצית)

תגובה	תנאים	תוצר	שיווי משקל
הידרוליזה חומצית	$\text{H}_2\text{O}/\text{H}^+$	$\text{R}-\text{COOH} + \text{R}'\text{OH}$	הפוך
טרנסאסטרופיקציה	$\text{R}'\text{OH}/\text{H}^+$	$\text{R}-\text{COOR}'' + \text{R}'\text{OH}$	הפוך

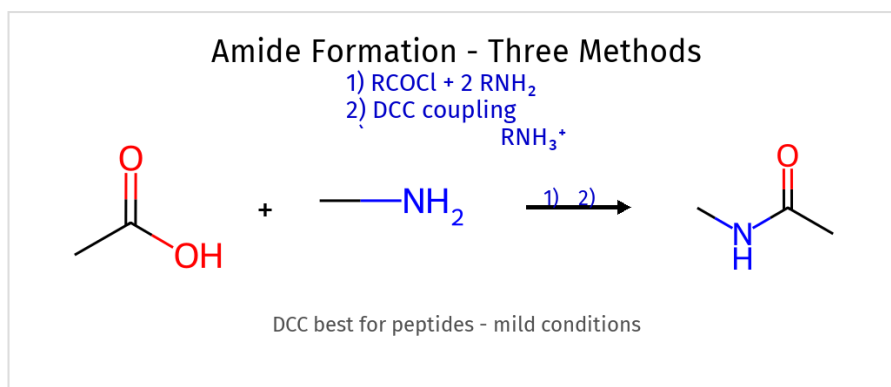


תגובות עם נוקליאופילים חזקים

ריאגנט	תוצר	מספר התקפות	מנגנון
אמין	$\text{R}-\text{COOR}' + \text{R}'\text{NH}_2 \rightarrow \text{R}-\text{CONHR}'' + \text{R}'\text{OH}$	אחת	החלפה נוקליאופילית
LiAlH_4	$\text{R}-\text{COOR}' \rightarrow \text{R}-\text{CH}_2\text{OH} + \text{R}'\text{OH}$	שתיים	דרך אלדהיד
ריאגנט גריניאר	$\text{R}-\text{COOR}' + 2 \text{R}'\text{MgX} \rightarrow \text{R}-\text{C}(\text{OH})(\text{R}')_2 + \text{R}'\text{OH}$	שתיים	דרך קטון

סינתזה של אמידים

שיטה	ריאגנטים	יעילות	הערות
מאציל הלד	$\text{R}-\text{COCl} + 2 \text{R}'\text{NH}_2$	גבוהה	נדרשות 2 מולקולות אמין
מאנהידריד	$(\text{RCO})_2\text{O} + 2 \text{R}'\text{NH}_2$	בינונית	פחות קורוזיבי
מאסטר	$\text{R}-\text{COOR}' + \text{R}'\text{NH}_2$	נמוכה	איטי
צימוד DCC	$\text{R}-\text{COOH} + \text{R}'\text{NH}_2 + \text{DCC}$	גבוהה	תנאים עדינים



מנגנון צימוד DCC

שלב	תהליך	תוצר ביניים
1	הפעלת חומצה	$\text{R}-\text{CO}-\text{O}-\text{DCC}$
2	התקפת אמין	$[\text{R}-\text{C}(\text{O}^-)(\text{NHR}')(\text{O}-\text{DCC})]$
3	העברת פרוטון	$[\text{R}-\text{C}(\text{O}^-)(\text{NR}')(\text{O}-\text{DCC}-\text{H})]$
4	סילוק DCU	$\text{R}-\text{CO}-\text{NR}' + \text{DCU}$

יישומים ביולוגיים מרכזיים

טריגליצרידים

תגובה	תנאים	תוצר	חשיבות
סיפון (הידרוליזה בסיסית)	$3 \text{RCOO}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{R}_3\text{C}-\text{OH} + 3 \text{OH}^-$	סבון	ניקוי
עיכול (הידרוליזה אנזימטית)	ליפזות	גליצרול + חומצות שומן	מטבוליזם

סיווג חומצות שומן - השפעה על בריאות

סוג	מבנה	תכונות פיזיקליות	השפעה בריאותית
רוויות	ללא קשרים כפולים	מוצקות בט"ח	מעלות LDL בינונית
בלתי רוויות cis	קשרים כפולים cis	נוזליות בט"ח	מועילות - מורידות LDL
בלתי רוויות trans	קשרים כפולים trans	מוצקות יחסית	מזיקות מאוד - מעלות LDL

קשרים פפטידיים

מאפיין	ערך	השלכה
רזוננס C-N	$\text{R}-\text{C}(=\text{O})-\text{NR}'_2 \longleftrightarrow \text{R}-\text{C}^+(\text{O}^-)-\text{NR}'_2$	מגבלת סיבוב
גיאומטריה	מישורית	מבנה חלבון יציב
קשרי מימן	חזקים	מבנה משני של חלבונים

כללים מנחים לפתרון תרגילים

זיהוי תבניות תגובה מרכזיות

תבנית בתוצר	ריאגנט מתאים	מספר התקפות
נגזרת חומצה ← כוהל ראשוני	LiAlH_4	שתיים
נגזרת חומצה ← כוהל שלישוני	ריאגנט גריניאר	שתיים
קטון/אלדהיד ← כוהל	LiAlH_4 או גריניאר	אחת

עקרונות מפתח

א. נוקליאופילים חזקים (LiAlH_4 , גריניאר) - לא דורשים הפעלה חומצית

- ב. נגזרות חומצה - תמיד שתי התקפות עם נוקליאופילים חזקים
- ג. אציל הלידים - הריאקטיביים ביותר, מרכז סינתטי
- ד. DCC - לצימוד עדין של חומצה ואמין
- ז. אסטרפיקציה - הפיכה, דורשת הסטת שיווי משקל

מגבלות חשובות

- גרינאר + חומצה קרבוקסילית = תגובת חומצה-בסיס (לא צימוד)
- אמידים = הכי פחות ריאקטיביים (רזוננס חזק)
- קבוצות הגנה = נדרשות לתגובות סלקטיביות

זיהוי מהיר

- ראית אתוקסיד + אלקיל הליד 2° ? $\leftarrow$ E2 (זייצב)
- ראית H^+/H_2O + אלקן? $\leftarrow$ הידרציה מרקובניקוב
- ראית Newman עם קבוצות גדולות? $\leftarrow$ חפש anti/gauche
- ראית pK_a ? $\leftarrow$ זכור: דיקרבונל > אלקין > אלקן > אלקאן

בדיקת תשובות

- א. בסטריאוכימיה - בדוק שכל המרכזים מסומנים
- ב. בקונפורמציות - staggered תמיד יציב יותר
- ג. במנגנונים - SN2 = היפוך, SN1 = רצמיזציה
- ד. בחומציות - חפש רזוננס וייצוב המטען השלילי