WYDZIAŁ CHEMII
Uniwersytet Łódzki

AKADEMIA CIEKAWEJ CHEMII
2025/2026

KATALIZA I KATALIZATORY

WYKŁAD 4

dr hab. Anna Zawisza, prof. UŁ

Katedra Chemii Organicznej i Stosowanej UŁ

21.01.2026

REAKCJE CHEMICZNE

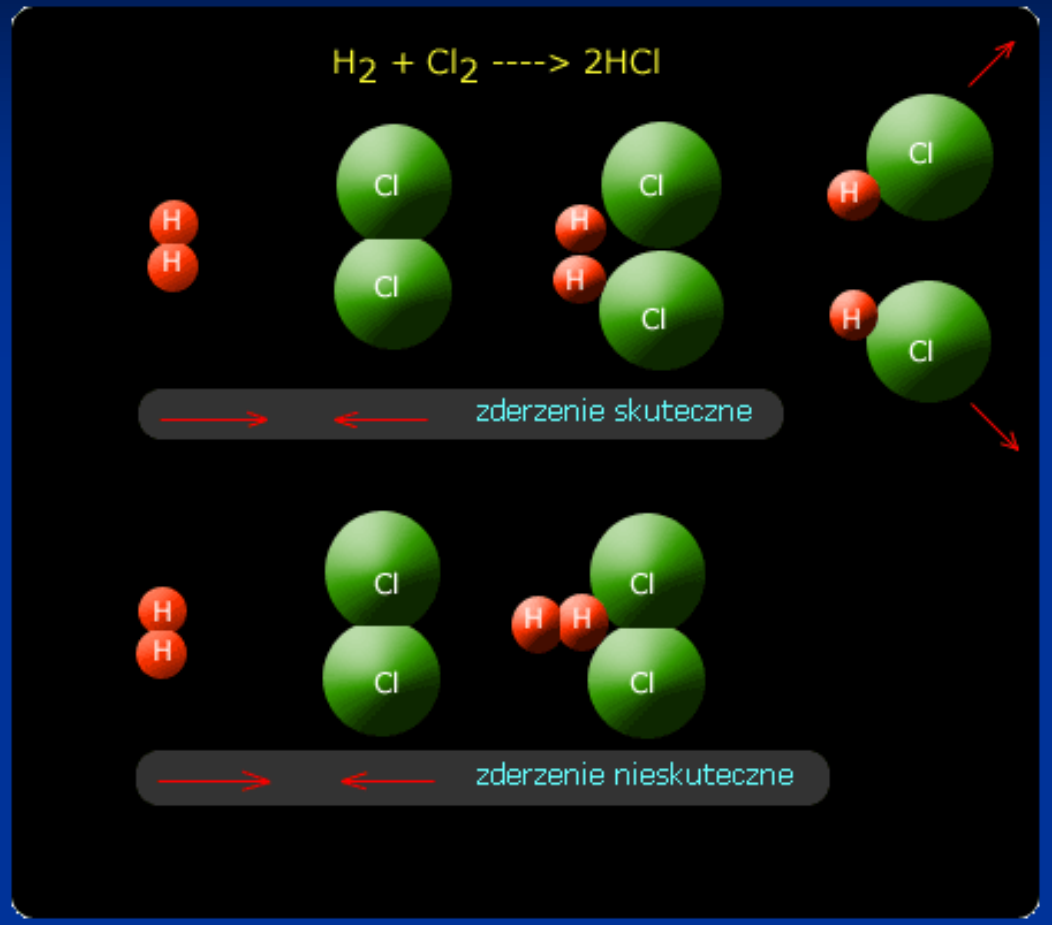
SZYBKIE

Wikimedia Commons/Jon Sullivan/zdj.ilustracyjne

WOLNE

https://polishcustomknives.pl/blog/stale-rdzewne-i-stale-nierdzewne

TEORIA ZDERZEŃ

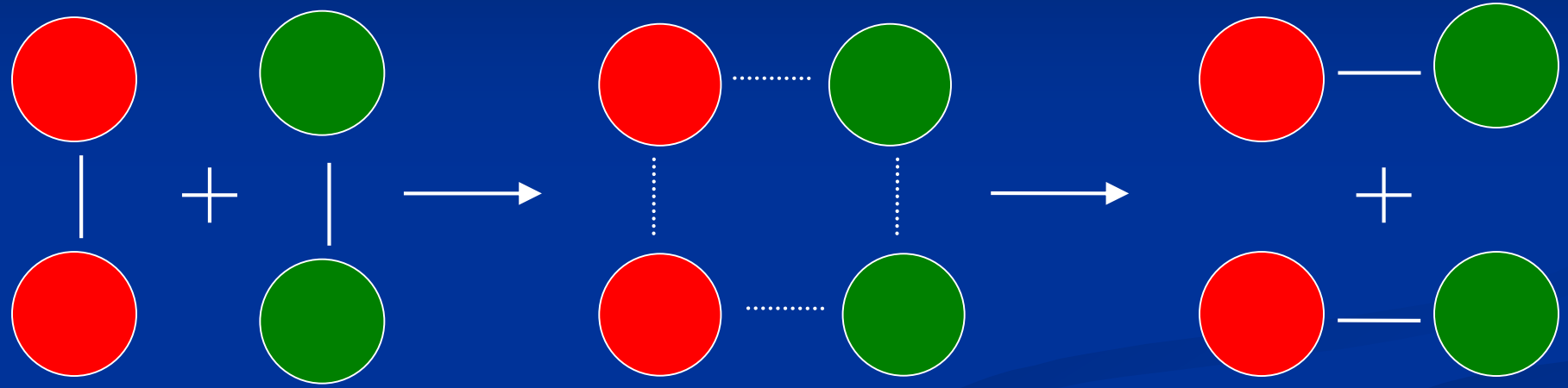


- musi dochodzić do zderzeń między cząstkami
- w momencie zderzenia musi zaistnieć korzystne przestrzenne położenie cząstek względem siebie
- w momencie zderzenia energia kinetyczna cząstek musi być wyższa od określonej energii minimalnej

ENERGIA AKTYWACJI minimalna energia, jaką muszą mieć reagujące cząstki, aby ich zderzenie mogło doprowadzić do reakcji

KOMPLEKS AKTYWNY

$H_2 + I_2 \longrightarrow 2HI$

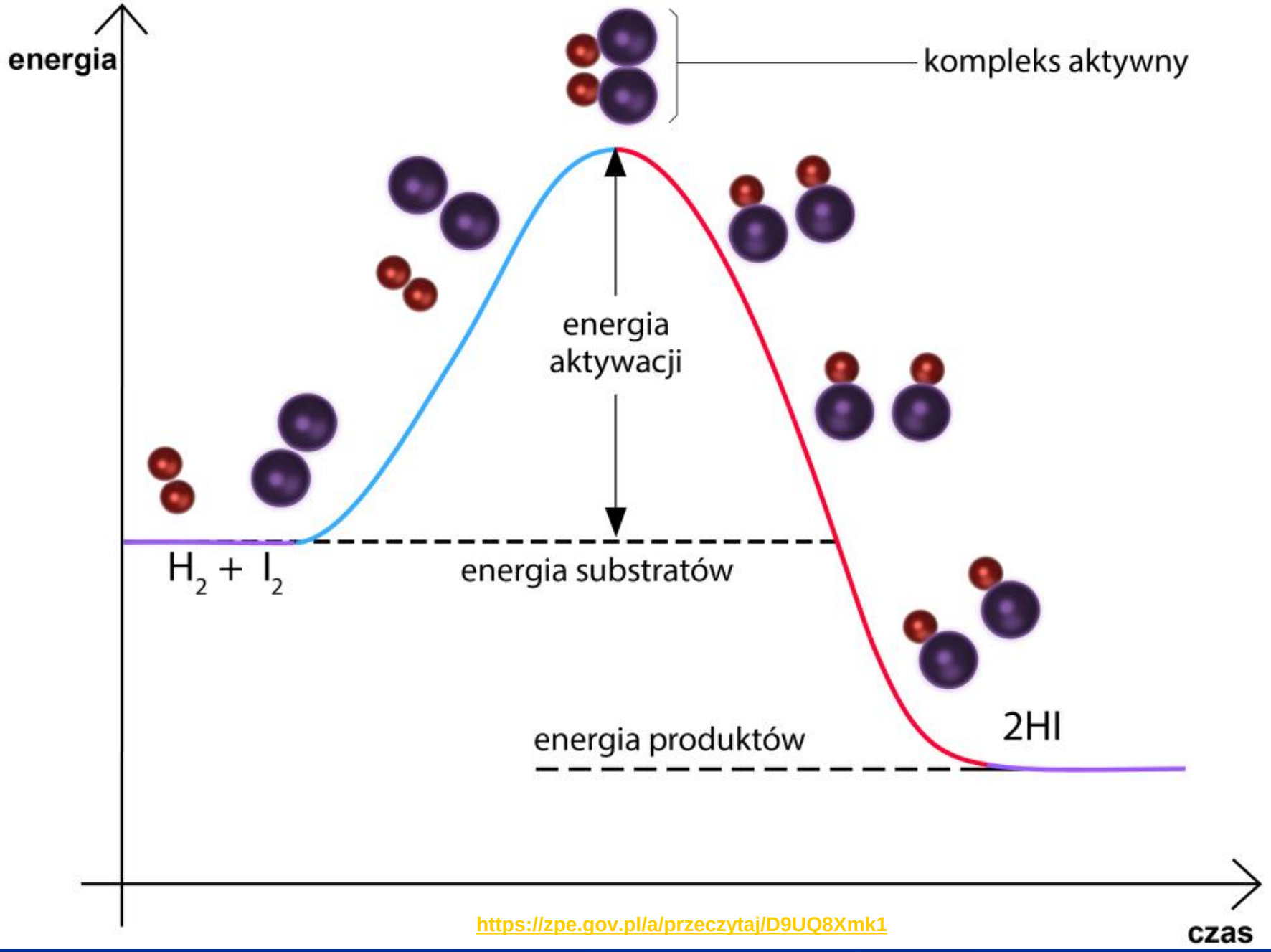


cząsteczki przed zderzeniem

kompleks aktywny

cząsteczki produktu

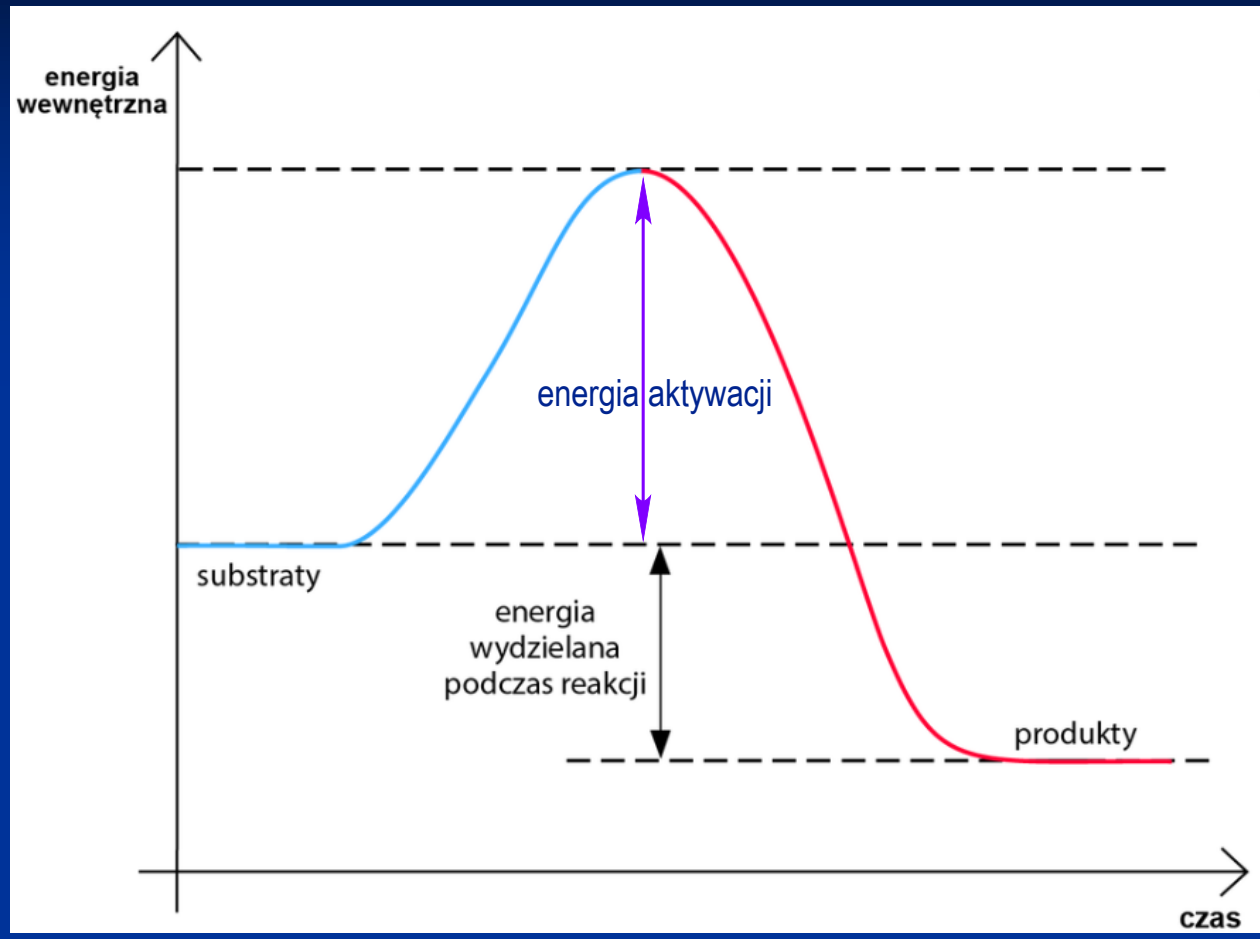
KOMPLEKS AKTYWNY jest nietrwałym połączeniem atomów, powstającym podczas przemiany cząsteczek substratów w produkty

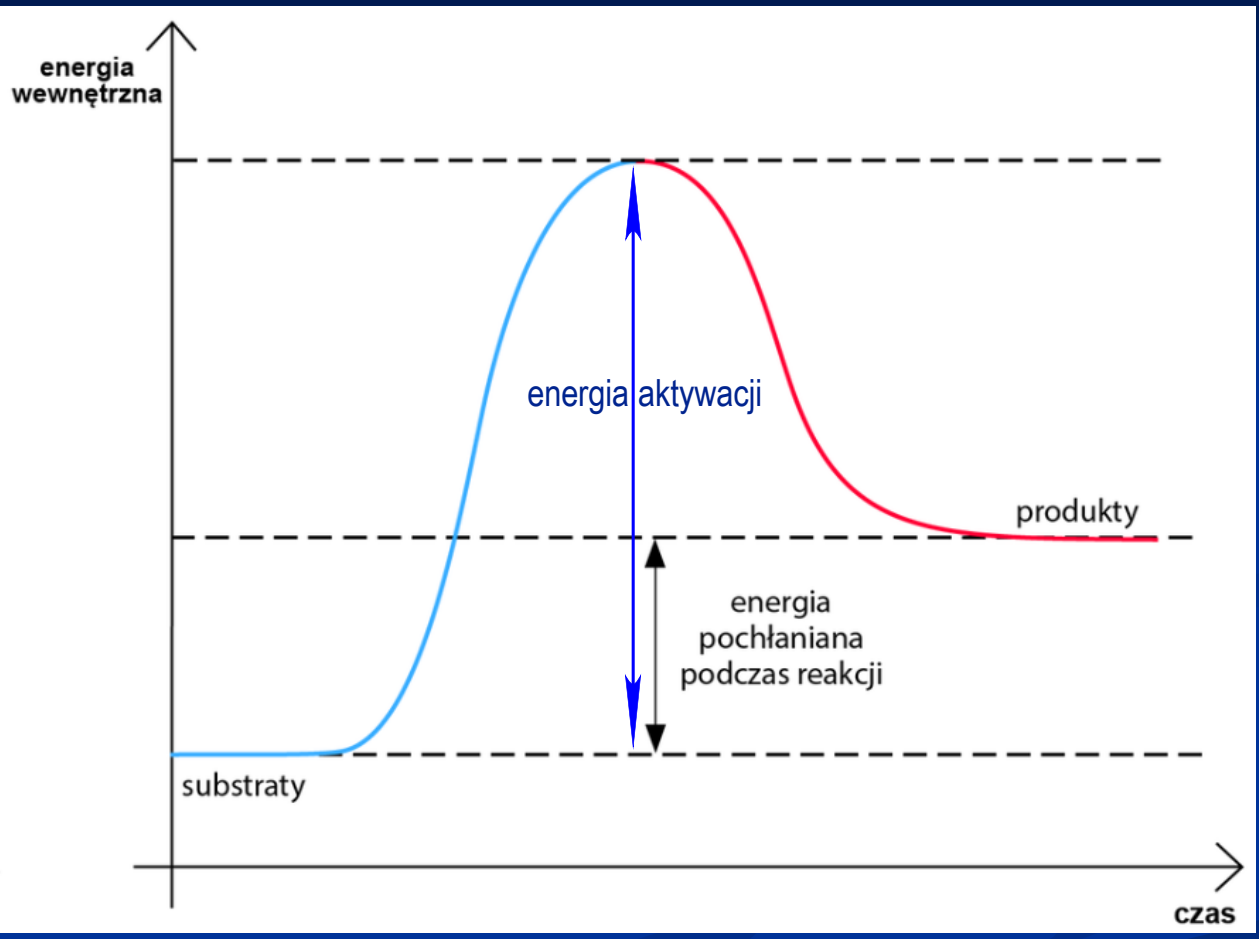


https://zpe.gov.pl/a/przeczytaj/D9UQ8Xmk1

Wykres zależności zmian energii wewnętrznej od czasu dla reakcji egzoenergetycznej

Wykres zależności zmian energii wewnętrznej od czasu dla reakcji:





https://zpe.gov.pl/a/przeczytaj/DOPE87cB5

egzoenergetycznej

endoenergetycznej

CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA SZYBKOŚĆ REAKCJI

- stężenie substratów
- rozdrobnienie substancji
- ciśnienie, jeśli reagenty są gazami
- temperatura środowiska reakcji
- mieszanie
- rozpuszczalnik
- promieniowanie elektromagnetyczne dla reakcji fotochemicznych
- KATALIZATOR

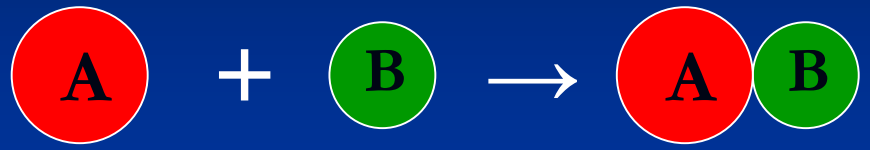
Katalizatorem nazywamy substancję, która przyspiesza reakcję chemiczną, a po jej zakończeniu pozostaje w niezmienionym stanie.

Katalizator może zwiększać selektywność reakcji, jeżeli zwiększa szybkość tworzenia się produktu głównego, a nie przyspiesza lub słabiej przyspiesza reakcje uboczne.

Zjawisko przyspieszania reakcji chemicznej przez katalizator nosi nazwę katalizy.

MECHANIZM DZIAŁANIA KATALIZATORA

Reakcja chemiczna bez katalizatora:



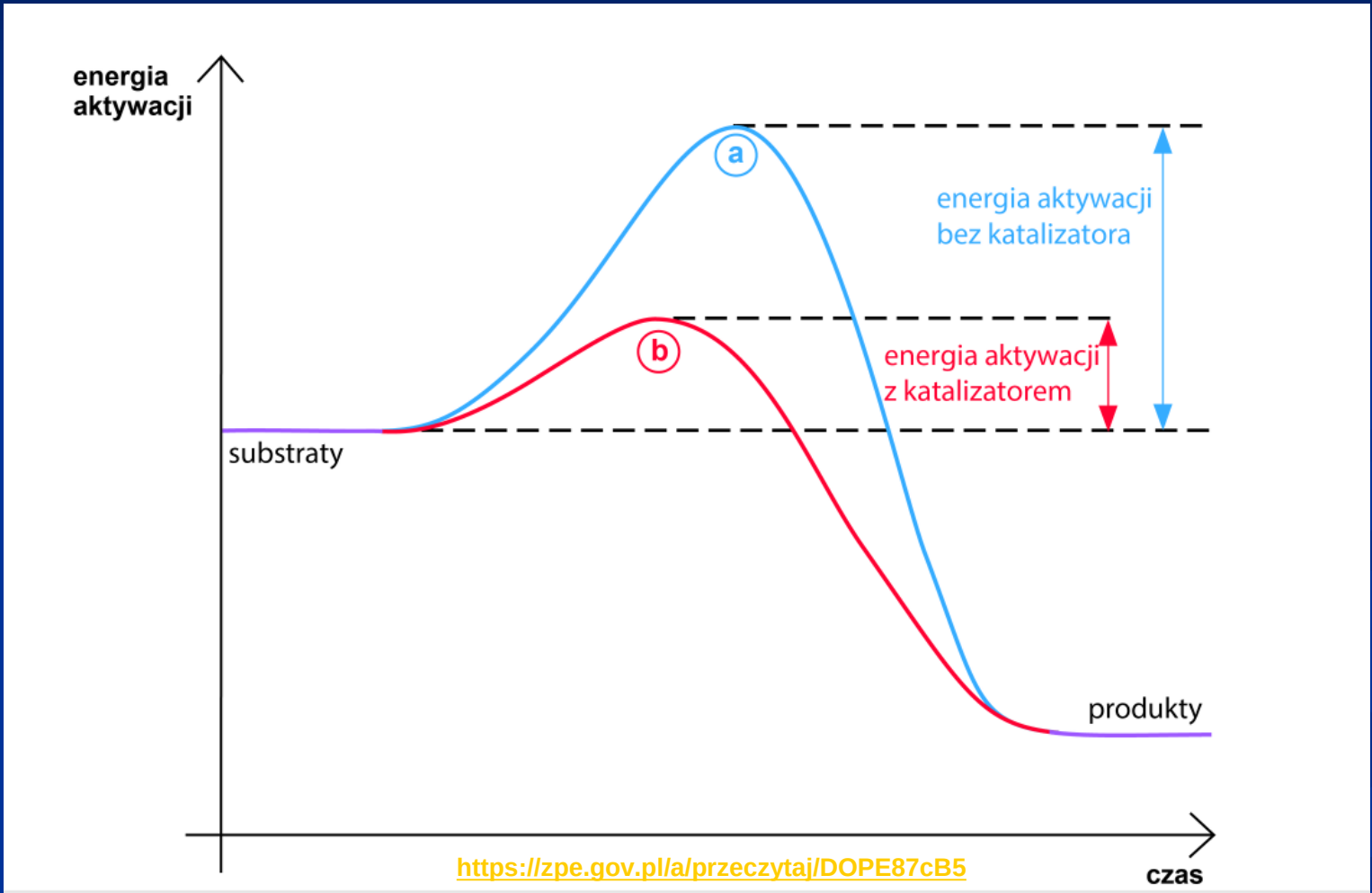
Reakcja chemiczna z katalizatorem:

produkt przejściowy

produkt końcowy + odtworzony katalizator

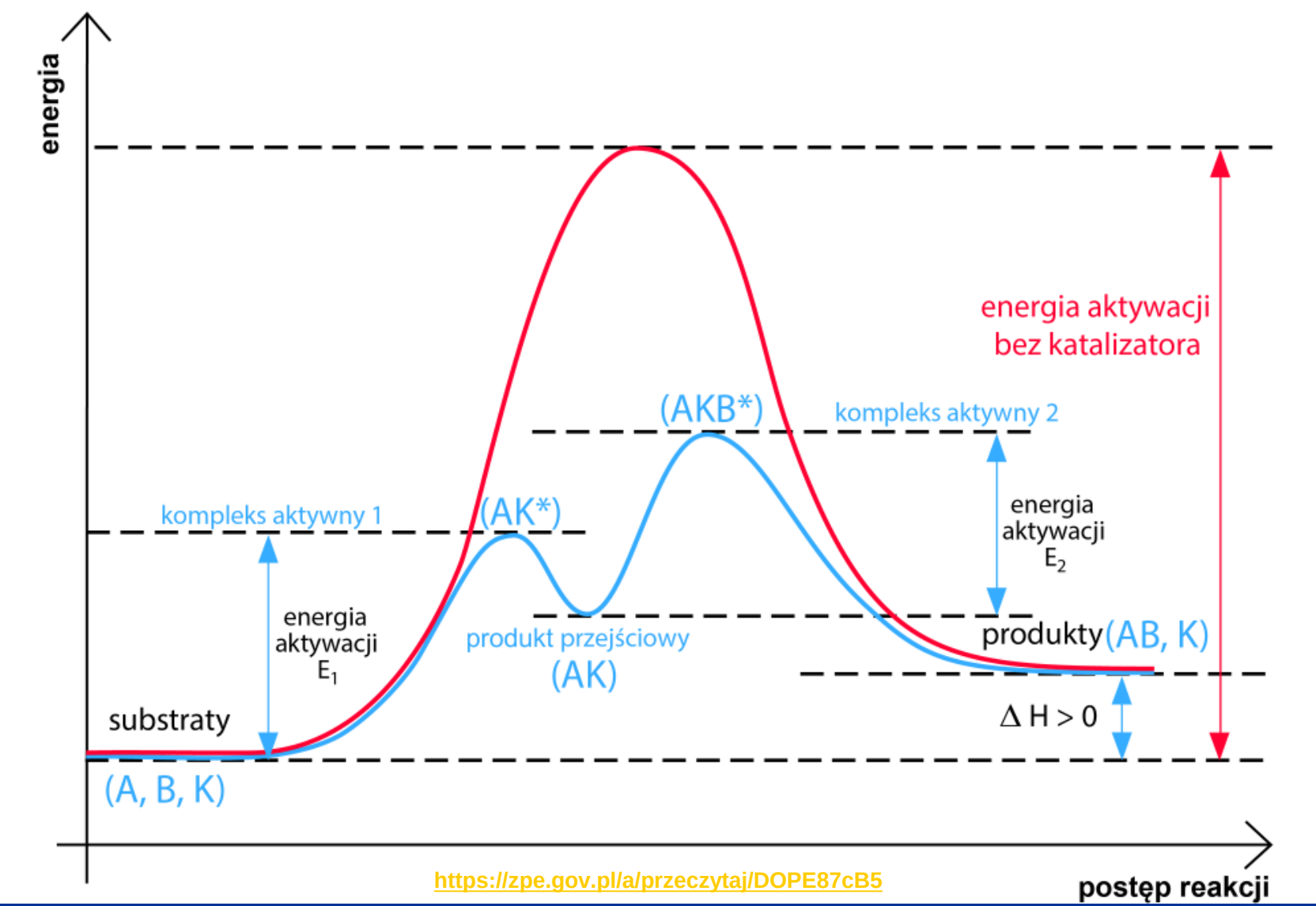
Wykres zależności zmian energii wewnętrznej od czasu:

- bez udziału katalizatora
- z udziałem katalizatora



Katalizator przyspiesza reakcję chemiczną obniżając jej energię aktywacji.

Wykres zależności zmian energii wewnętrznej od czasu z udziałem katalizatora, przebiegający z utworzeniem produktu przejściowego

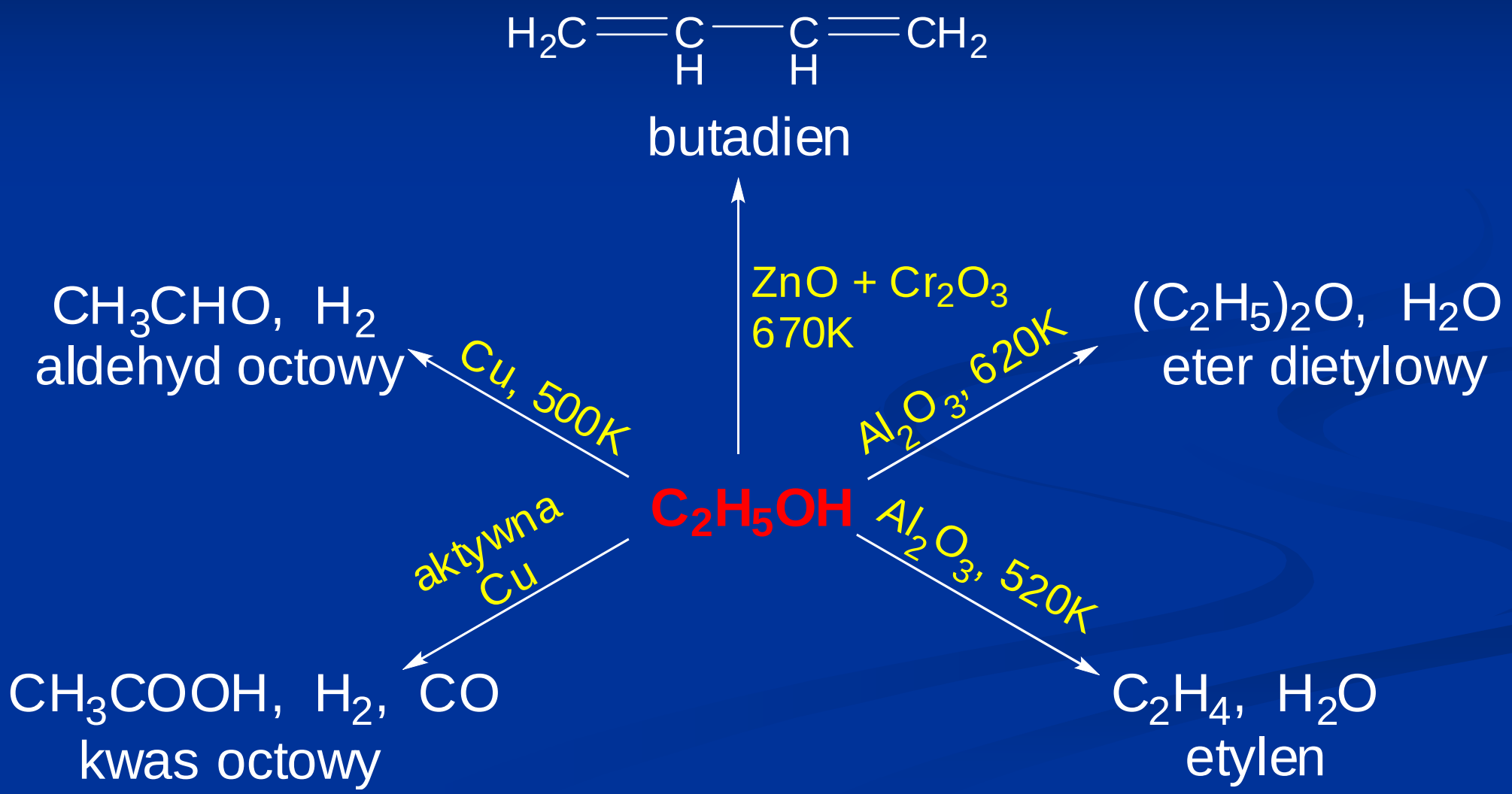


A, B – substraty AB – produkt K – katalizator

WARTOŚCI ENERGII AKTYWACJI WYBRANYCH REAKCJI KATALIZOWANYCH

Równanie reakcji przebiegającej w fazie gazowej	Wartość energii aktywacji bez użycia katalizatora	Wartość energii aktywacji z udziałem różnych katalizatorów
$3H_2 + N_2 \rightarrow 2NH_3$	335 kJ/mol	wolfram: 163 kJ/mol osm: 197 kJ/mol
$2HI \rightarrow H_2 + I_2$	184 kJ/mol	platyna: 105 kJ/mol złoto: 59 kJ/mol
$2N_2O \rightarrow 2N_2 + O_2$	247 kJ/mol	platyna: 138 kJ/mol złoto: 121 kJ/mol

PRODUKTY KATALITYCZNYCH PRZEMIAN ALKOHOLU ETYLOWWEGO



KATALIZA

HOMOGENICZNA
(jednorodna, jednofazowa)

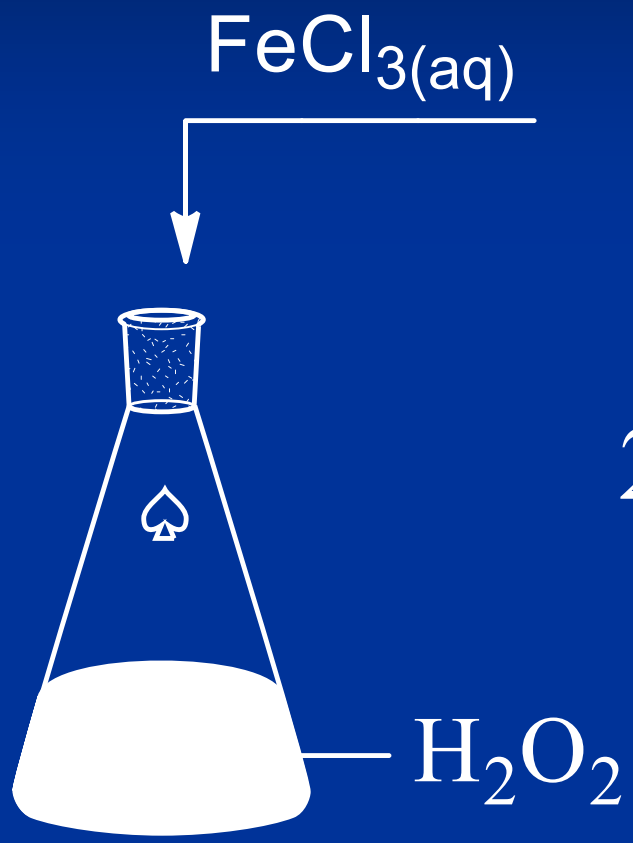
HETEROGENICZNA
(niejednorodna, wielofazowa)

BIOKATALIZA
(kataliza pod wpływem)
enzymów

AUTOKATALIZA
(powstający produkt wpływa)
na szybkość reakcji

KATALIZA HOMOGENICZNA

DOŚWIADCZENIE I



$$2\,H_2O_2 \xrightarrow{FeCl_{3(aq)}} 2\,H_2O + O_2\uparrow$$

KATALIZA HOMOGENICZNA W FAZIE GAZOWEJ

UTLENIANIE SO_2 DO SO_3 W KOMOROWEJ METODZIE PRODUKCJI H_2SO_4

$$SO_2 + NO_2 \longrightarrow SO_3 + NO$$

$$NO + 1/2\ O_2 \longrightarrow NO_2$$

$$SO_2 + 1/2\ O_2 \longrightarrow SO_3$$

reakcja sumaryczna

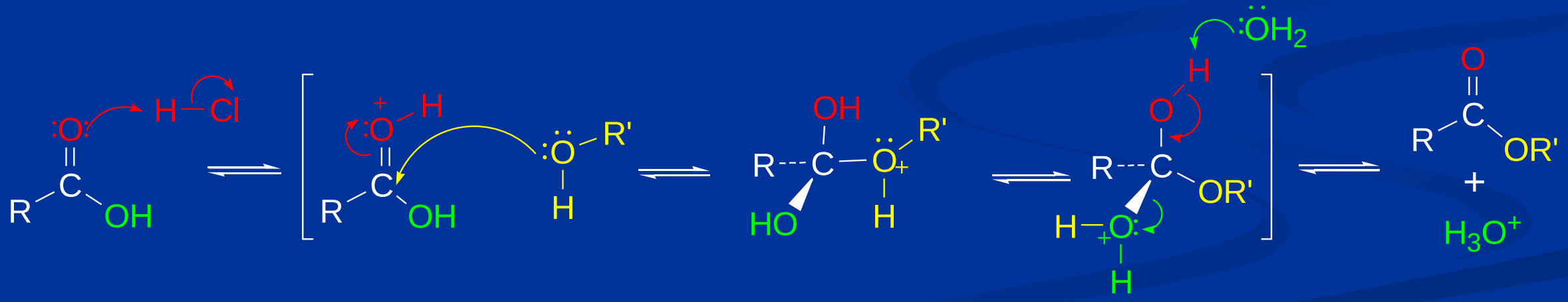
Wszystkie składniki reakcji – substraty (SO_2, O_2), katalizator (NO_2) oraz produkt (SO_3) są substancjami gazowymi i tworzą układ jednofazowy.

KATALIZA HOMOGENICZNA W FAZIE CIEKŁEJ

KATALIZA KWASOWO-ZASADOWA

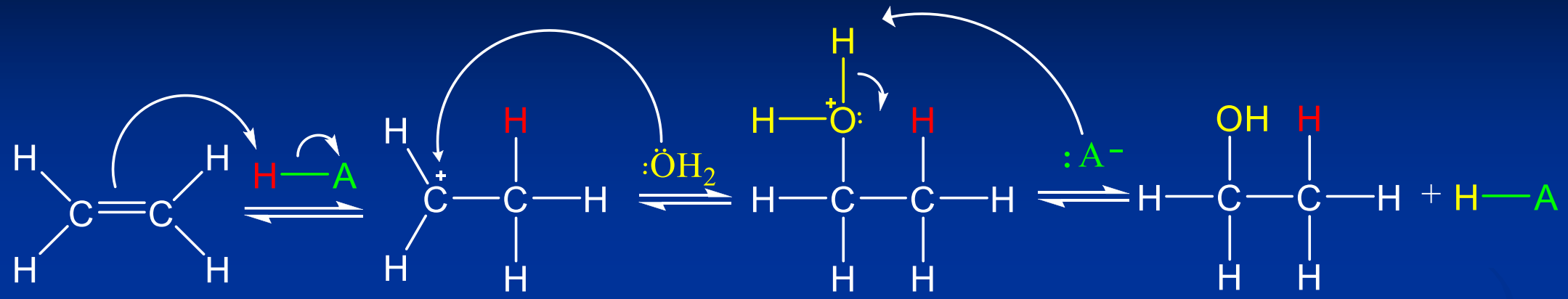
1. Reakcja estryfikacji katalizowana kwasem (HCl lub H_2SO_4)

$$CH_3COOH + CH_3CH_2OH \xrightleftharpoons{H_2SO_4} CH_3COOCH_2CH_3 + H_2O$$

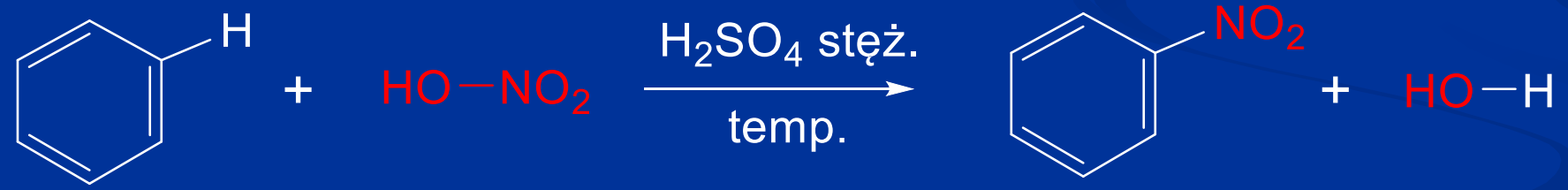


2. Reakcja hydrolizy estrów katalizowana przez kwasy

3. Reakcja addycji wody do alkenu w obecności kwasu.

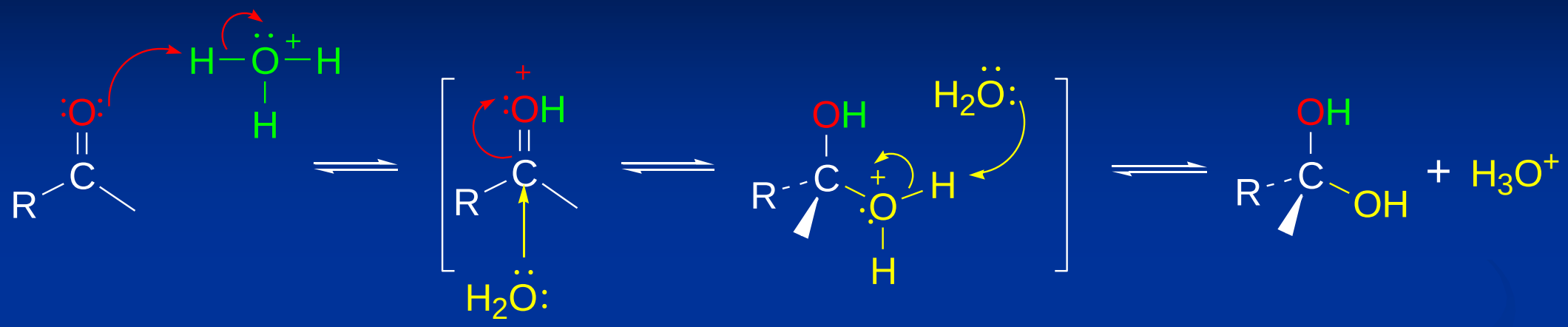


4. Reakcja nitrowania związków aromatycznych.

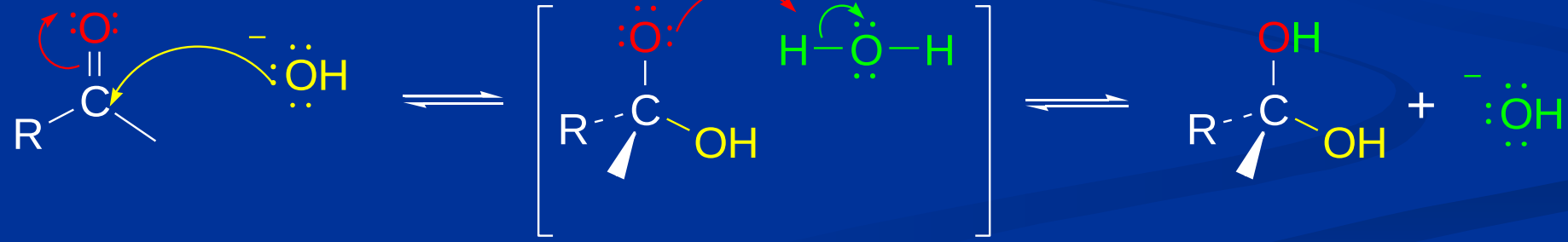


$$HNO_3 + 2H_2SO_4 \rightarrow NO_2^+ + 2HSO_4^- + H_3O^+$$

5. Reakcja hydratacji ketonu lub aldehydu katalizowana kwasem.

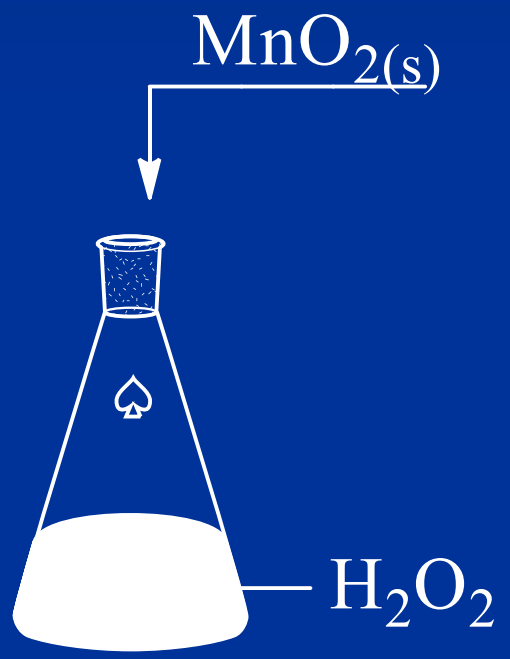


6. Reakcja hydratacji ketonu lub aldehydu katalizowana zasadą.



KATALIZA HETEROGENICZNA

DOŚWIADCZENIE II



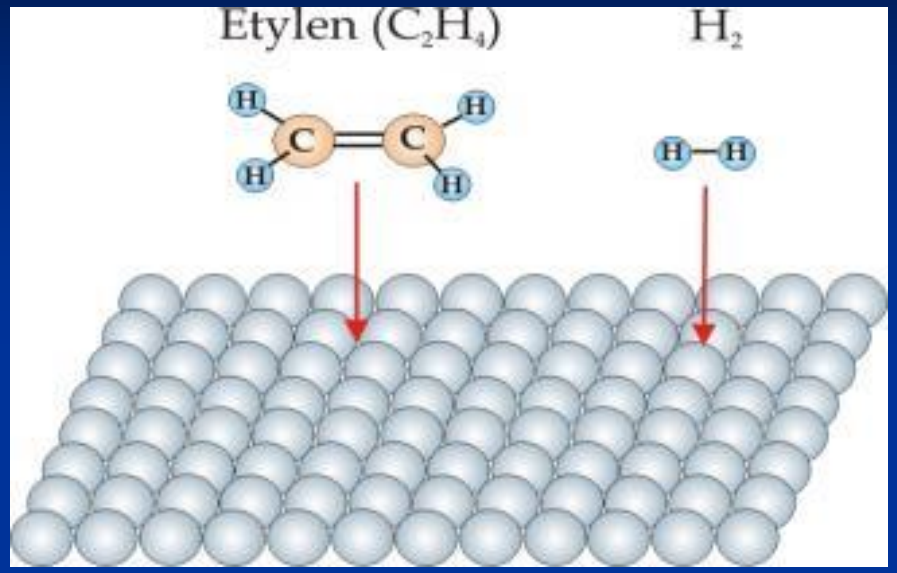
$$2\,H_2O_2 \xrightarrow{MnO_{2(s)}} 2\,H_2O + O_2\uparrow$$

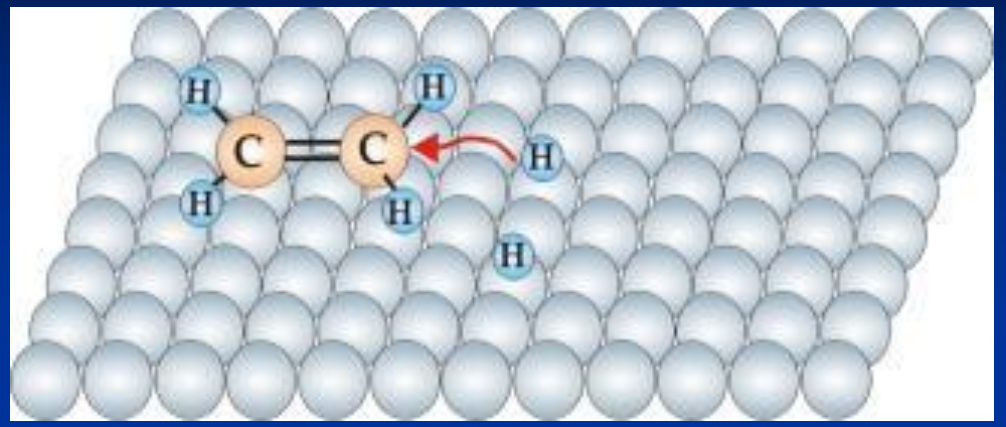
Równanie reakcji przebiegającej w fazie gazowej	Wartość energii aktywacji bez użycia katalizatora	Wartość energii aktywacji z udziałem różnych katalizatorów
$3H_2 + N_2 \rightarrow 2NH_3$	335 kJ/mol	wolfram: 163 kJ/mol osm: 197 kJ/mol
$2HI \rightarrow H_2 + I_2$	184 kJ/mol	platyna: 105 kJ/mol złoto: 59 kJ/mol
$2N_2O \rightarrow 2N_2 + O_2$	247 kJ/mol	platyna: 138 kJ/mol złoto: 121 kJ/mol

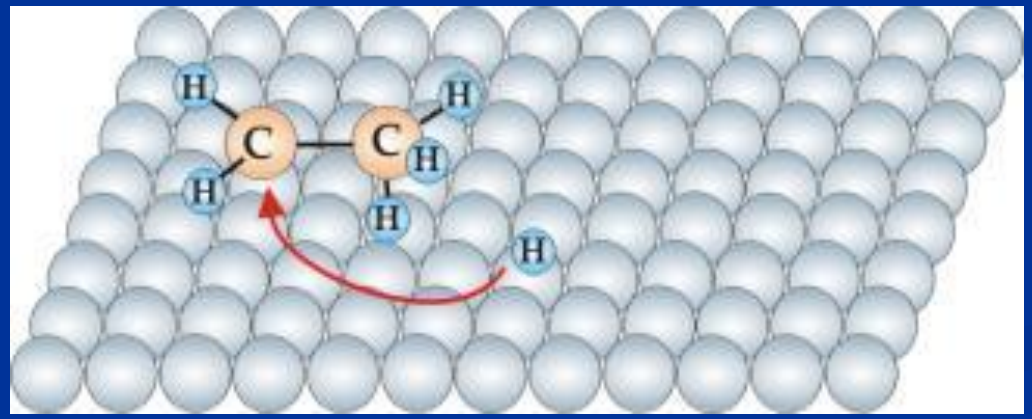
$$SO_2 + 1/2O_2 \xrightarrow{\text{Pt lub } V_2O_5} SO_3$$

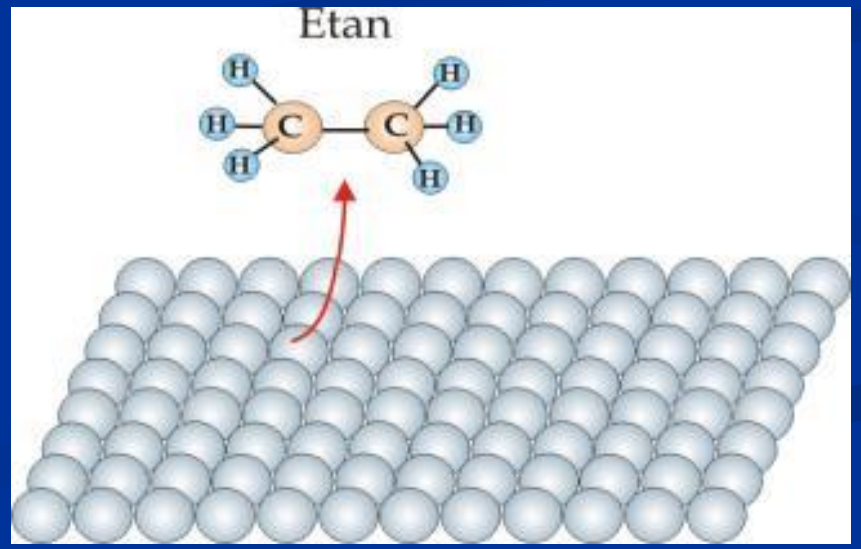
Kontakt – jest to stały katalizator dla reakcji zachodzącej w fazie gazowej.

$$H_2C{=}CH_2 + H_2 \xrightarrow{\text{Pt, Pd lub Ni}} H_3C{-}CH_3$$

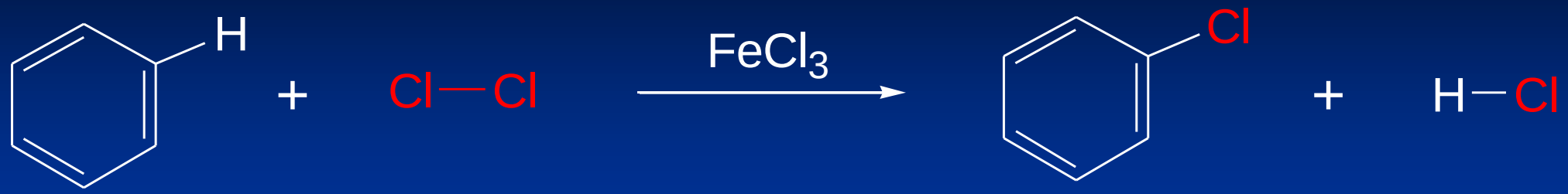








Reakcja halogenowania (chlorowania lub bromowania) benzenu.



Reakcja alkilowania benzenu.

Zjawisko zatruwania katalizatora.

BIOKATALIZA

Biokatalizatory występują w bardzo małych ilościach w tkankach i płynach ustrojowych ludzi, zwierząt i roślin.

Biokatalizatory dzieli się na trzy grupy:

- enzymy,
- witaminy,
- hormony.

Każdy enzym katalizuje ściśle określoną reakcję chemiczną, dotyczącą określonego substratu i określonych warunków (temperatury i pH).

$$2H_2O_2 \rightarrow 2H_2O + O_2\uparrow$$

KATALAZA

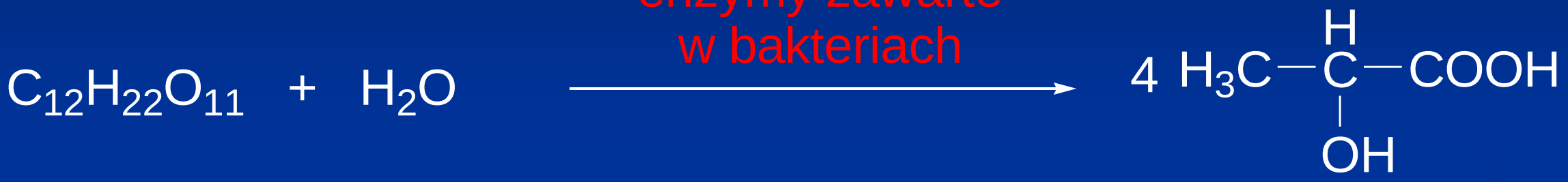
Źródło: https://depositphotos.com/pl/photo/sick-teddy-5874929.html

α-amylaza - enzym rozkładający skrobię, znajduje się m.in. w ślinie

trypsyna i chymotrypsyna - enzymy trawienne, które rozkładają białka

chitynaza - rozkłada chitynę (wielocukier, z którego zbudowane są m.in pancerzyki owadów oraz ściany komórkowe grzybów)

KWAS MLEKOWY



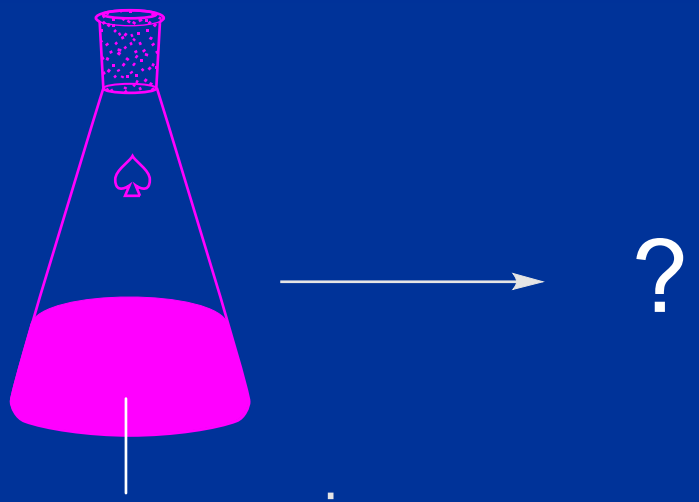
laktoza

kwas mlekowy

AUTOKATALIZA

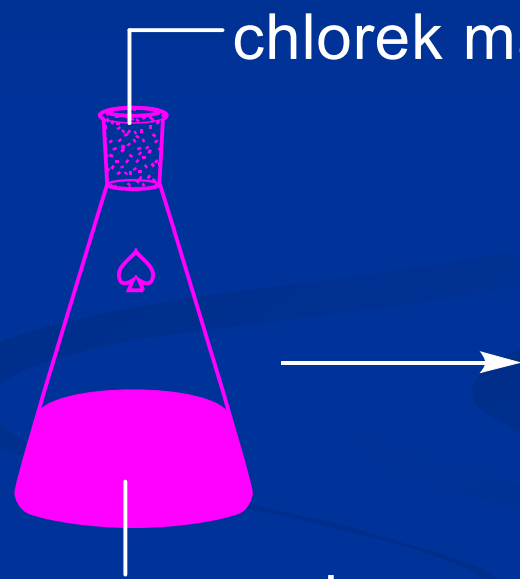
jeden z produktów reakcji jest katalizatorem

Reakcja utleniania kwasu szczawiowego za pomocą manganianu(VII) potasu



?

kwas szczawiowy
kwas siarkowy
manganian(VII)potasu



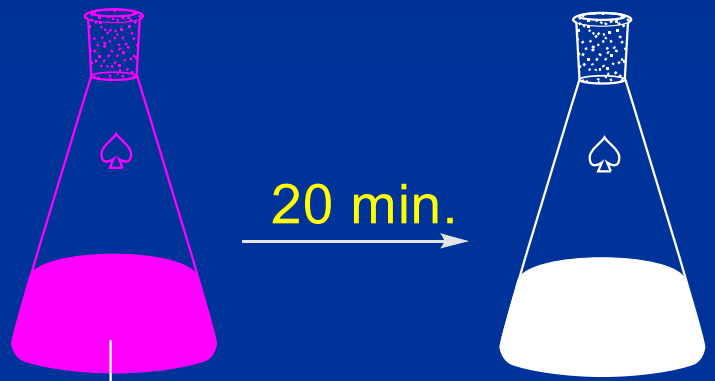
?

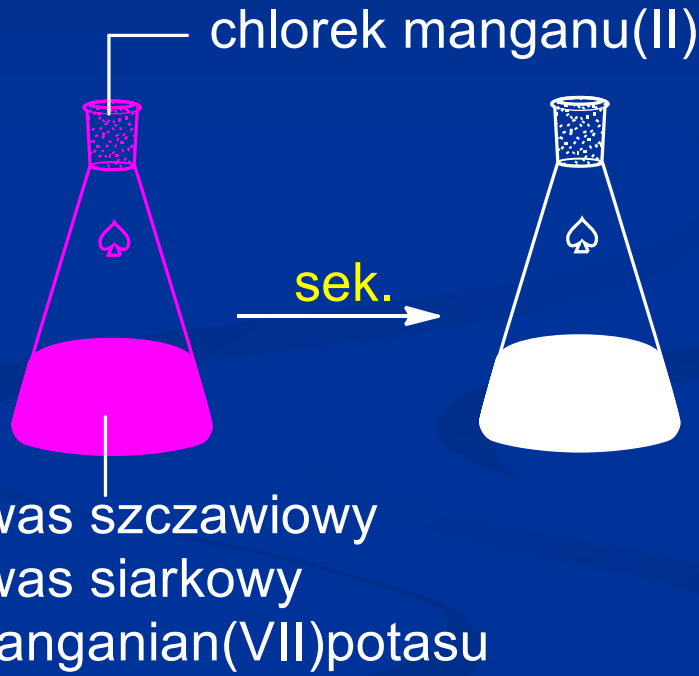
kwas szczawiowy
kwas siarkowy
manganian(VII)potasu

AUTOKATALIZA

jeden z produktów reakcji jest katalizatorem

Reakcja utleniania kwasu szczawiowego za pomocą manganianu(VII) potasu





$$2\ MnO_4^- + 5\ C_2O_4^{2-} + 16\ H^+ \rightarrow 2\ Mn^{2+} + 10\ CO_2 + 8\ H_2O$$

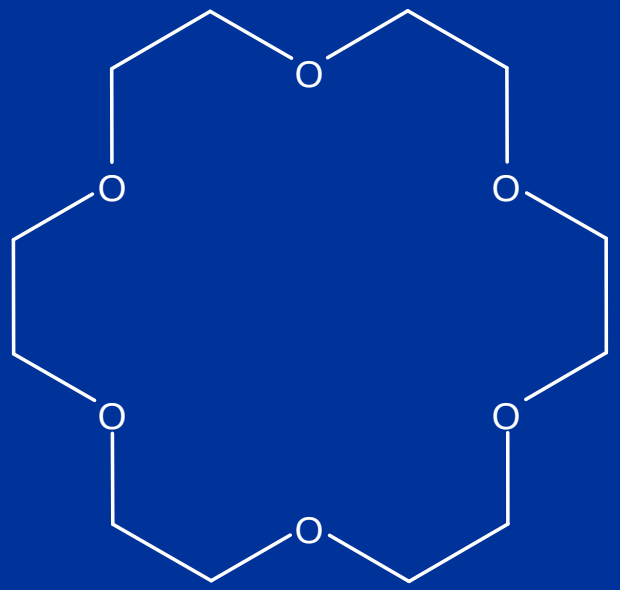
$$2\ KMnO_4 + 5\ H_2C_2O_4 + 3\ H_2SO_4 \rightarrow 2\ MnSO_4 + 10\ CO_2 + K_2SO_4 + 8\ H_2O$$

KATALIZATORY PRZENIESIENIA MIĘDZYFAZOWEGO

To grupa związków chemicznych, które bezpośrednio nie katalizują reakcji chemicznej, lecz ułatwiają lub umożliwiają przechodzenie poszczególnych reagentów z jednej fazy do drugiej. Ma to decydujące znaczenie, gdy jeden lub więcej reagentów jest rozpuszczalnych w jednej fazie, a nierozpuszczalnych w drugiej.

KATALIZATORAMI PRZENIESIENIA FAZOWEGO SĄ:

- dla reagentów anionowych - czwartorzędowe sole amoniowe $R_4N^+X^-$ (R-alkil lub aryl, X-halogen), np. Bu_4NBr
- dla reagentów kationowych – etery koronowe

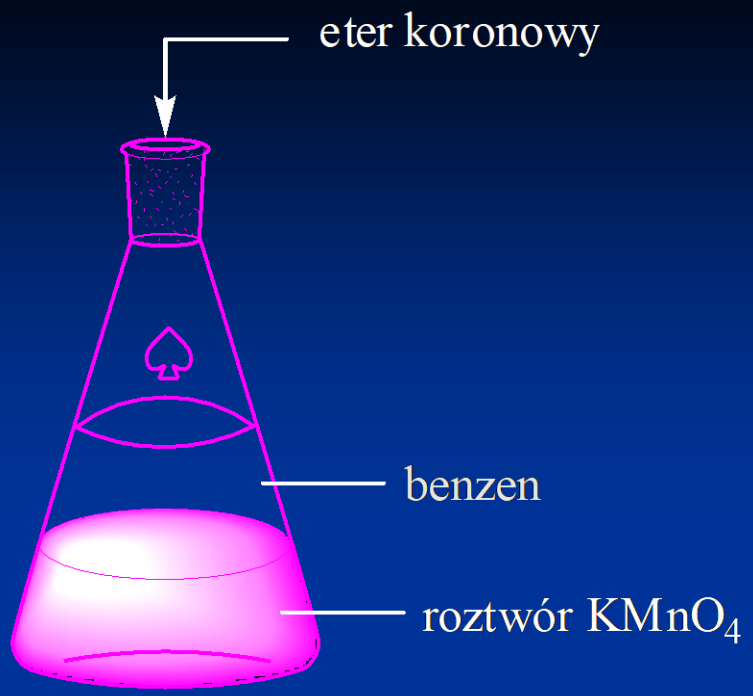


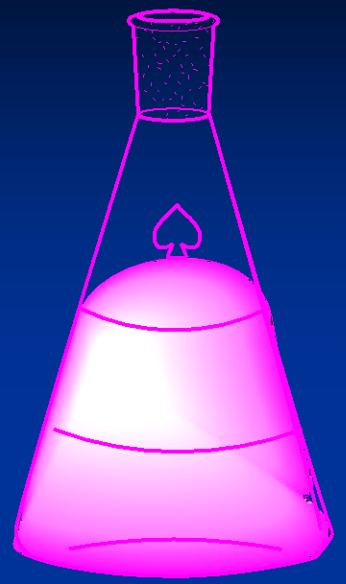
[18]korona[6]

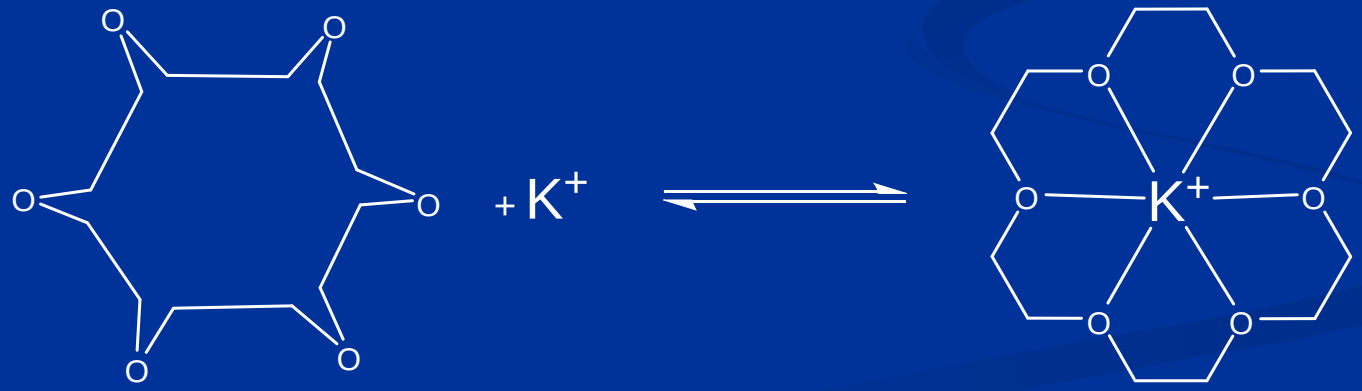
Etery koronowe posiadają unikalną cechę rozpuszczalności w niemal wszystkich znanych rozpuszczalnikach, dzięki zjawisku "zwijania się" i "rozwijania„.

rozpuszcza się w apolarnych rozpuszczalnikach, np. benzynie

rozpuszcza się w wodzie





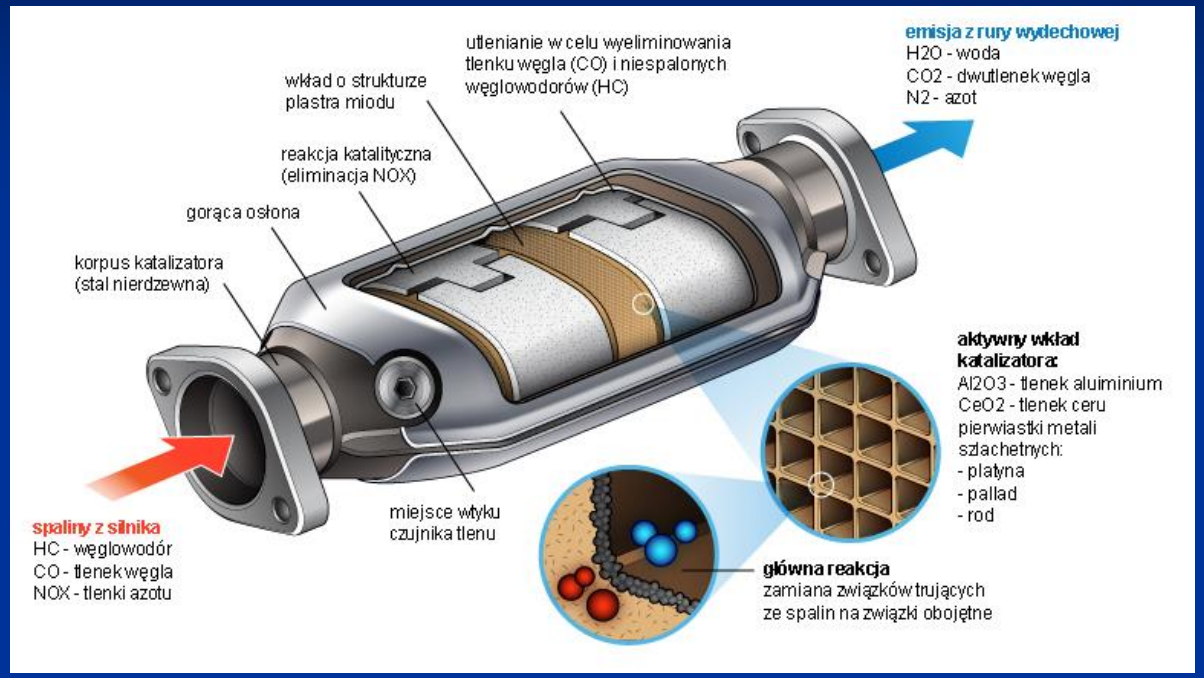


woda - kompleksowanie jonu potasowego

trwały kompleks jonowy w benzenie

KATALIZATOR SAMOCHODOWY

budowa i działanie



Źródło: GroMar Sp. z o.o., licencja: CC BY-SA 3.0.

Katalizator samochodowy zawiera w swojej budowie substancje chemiczne (katalizatory), które pobudzają zawarte w spalinach substancje do reakcji ze sobą, same nie zużywając się.

Odpowiedni dobór substancji katalitycznych powoduje, że w wyniku takich wymuszonych reakcji powstają związki chemiczne mniej (lub wcale) nieuciążliwe dla środowiska.

Katalizatory w silnikach o zapłonie iskrowym:

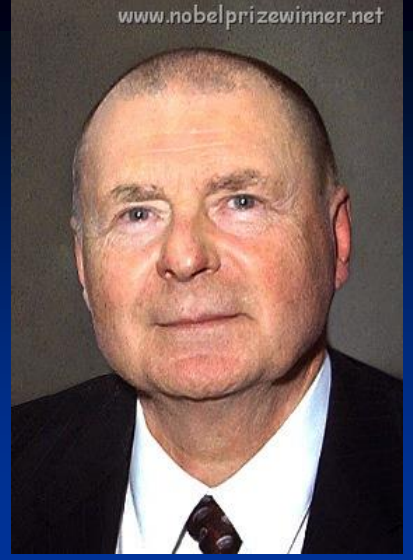
- redukują tlenki azotu, utleniają tlenek węgla do dwutlenku węgla, a węglowodory do wody oraz dwutlenku węgla.

W silnikach Diesela stosowane są katalizatory, które:

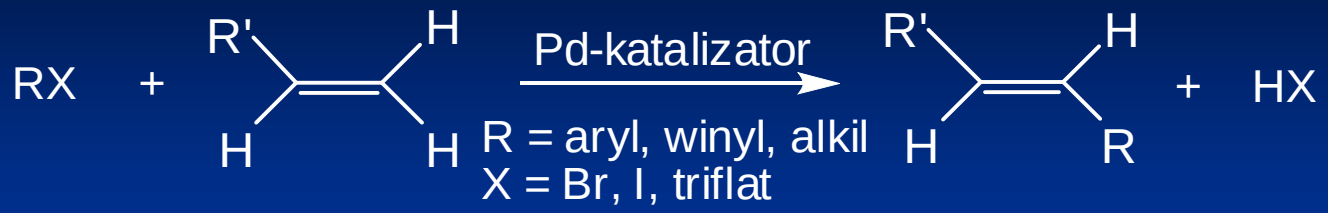
- utleniają tylko tlenek węgla i węglowodory.

NOBEL Z CHEMII 2010

za katalizowane przez pallad reakcje krzyżowego sprzęgania, stosowane w syntezie organicznej.



REAKCJA HECKA

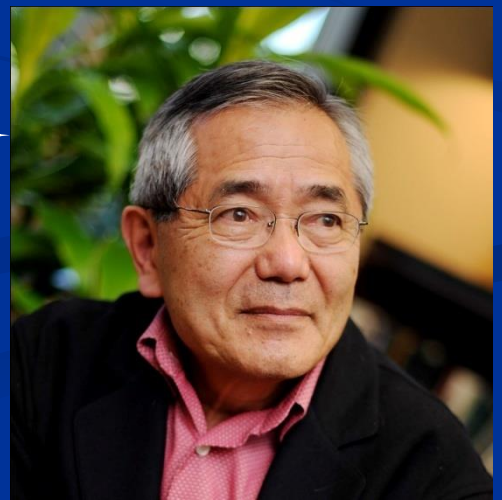


REAKCJA SUZUKI

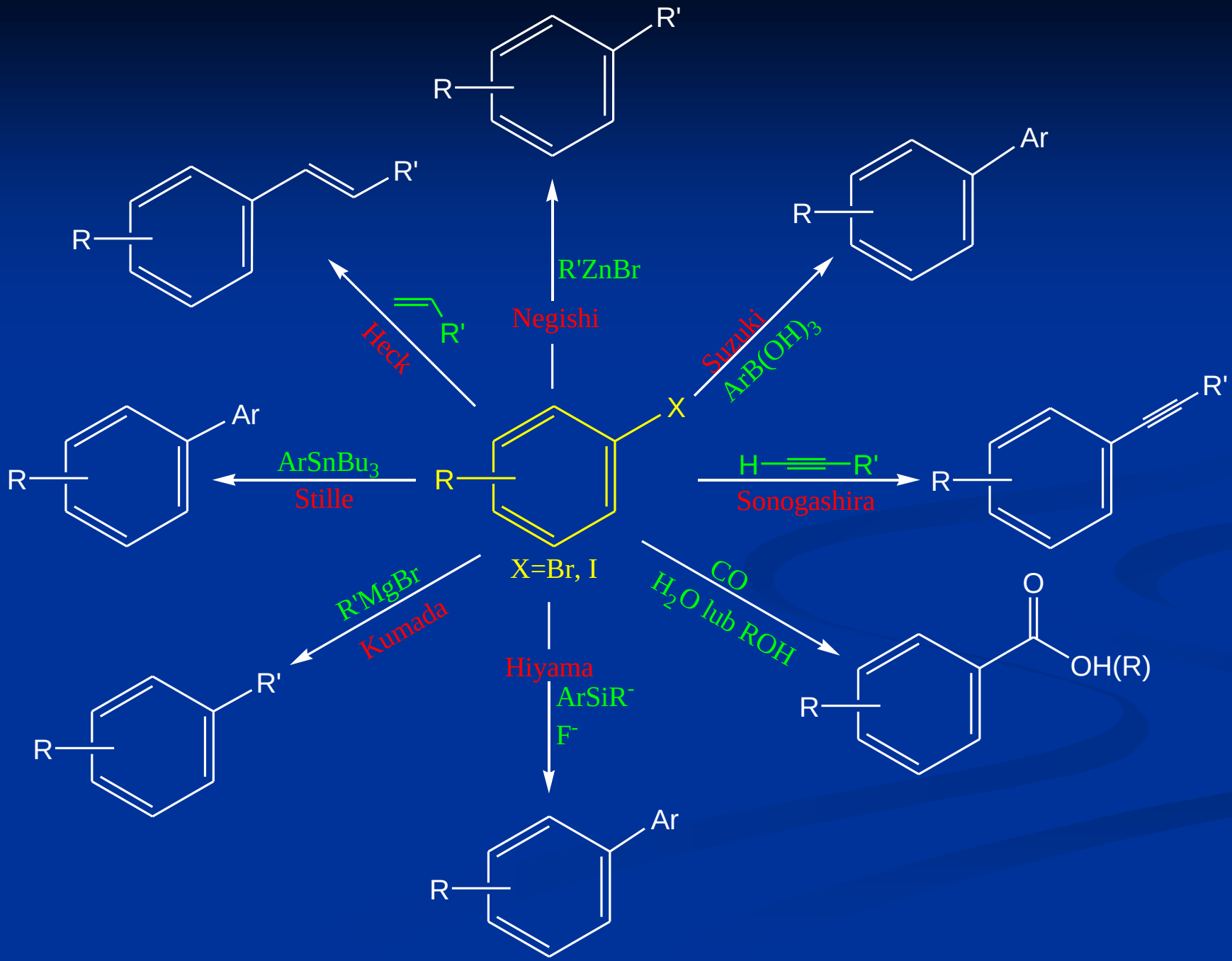
R, R' = aryl, winyl, alkil
X = Br, I, triflat

REAKCJA NEGISHI

R, R' = aryl, winyl, alkil
X = Br, I, triflat



Reakcje tworzenia wiązań C-C katalizowane przez pallad i jego związki.



Związki kompleksowe (inaczej kompleksy, związki koordynacyjne) – związki chemiczne, w których można wyróżnić jeden lub więcej atomów centralnych, otoczonych przez inne atomy lub ich grupy zwane ligandami, przy czym przynajmniej jedno wiązanie atomu centralnego z ligandem ma charakter wiązania koordynacyjnego.

$PdCl_2$ $Pd(OAc)_2$ $Pd_2(dba)_3$ $Pd(Ph_3P)_4$

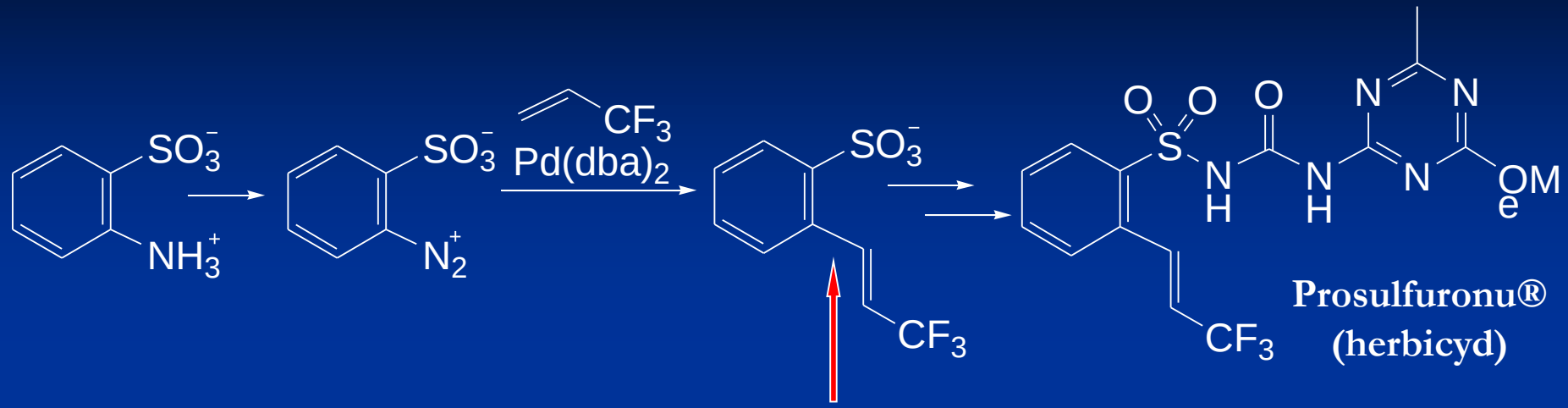
ZASTOSOWANIE REAKCJI HECKA, NEGISHI i SUZUKI

W rolnictwie do ochrony zbiorów przed grzybami.

W elektronice do produkcji supercienkich monitorów OLED.

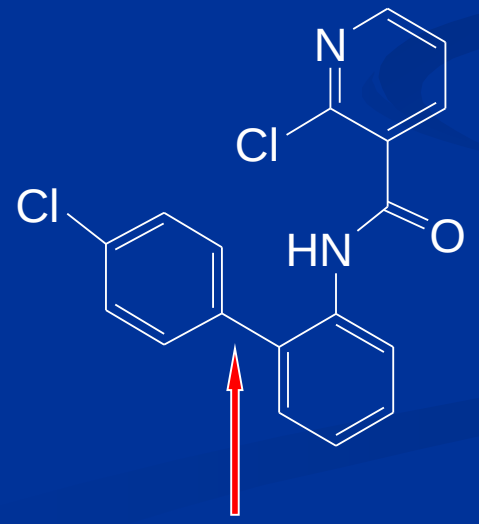
W przemyśle farmaceutycznym wykorzystywane są do produkcji leków przeciwzapalnych i przeciwnowotworowych.

ROLNICTWO



Prosulfuronu®
(herbicyd)

sprzęganie Hecka

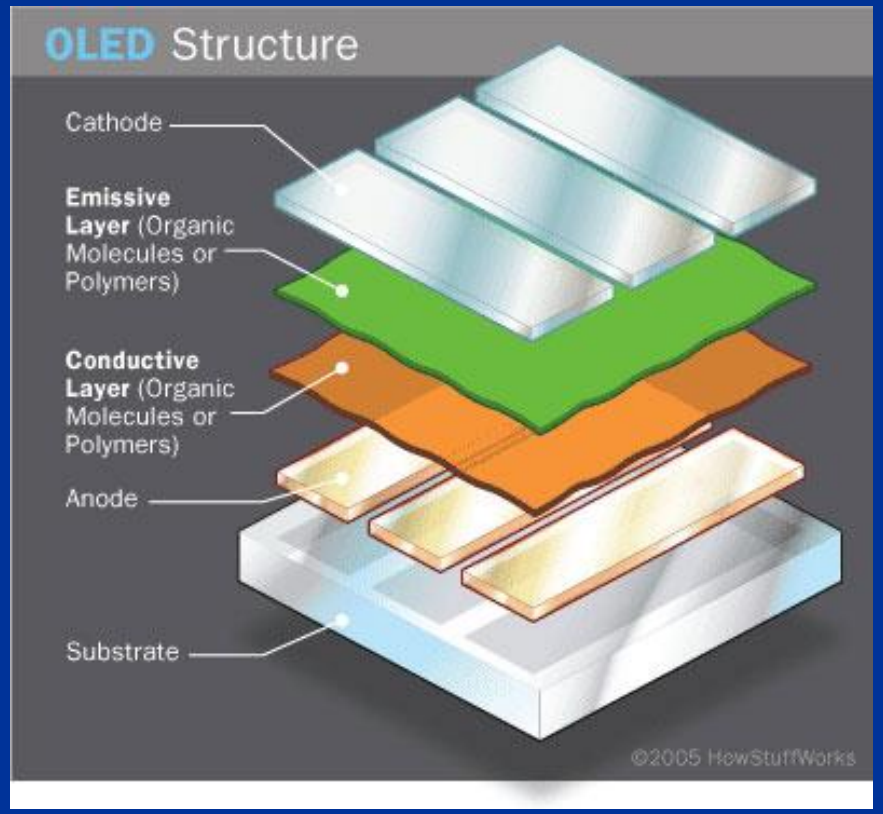


Boscalid (fungicyd)

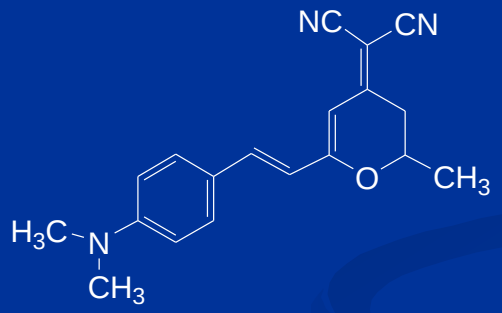
sprzęganie Suzuki

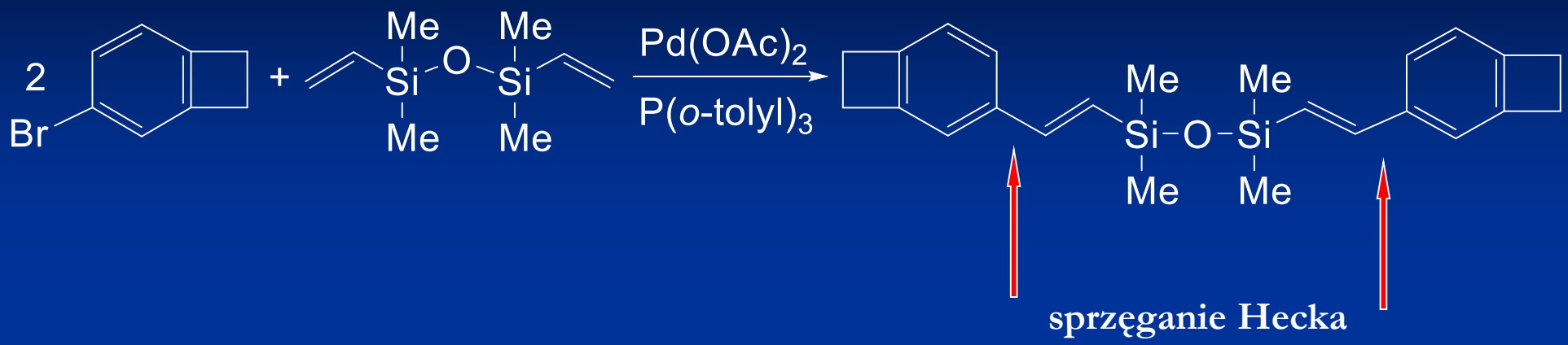
ELEKTRONIKA

Synteza w obecności palladu stosowana jest w nowoczesnej elektronice do produkcji świecących diod organicznych, które służą do produkcji supercienkich monitorów OLED.



https://pl.alfachemsp.com/info/an-overview-of-oled-materials-47277149.html



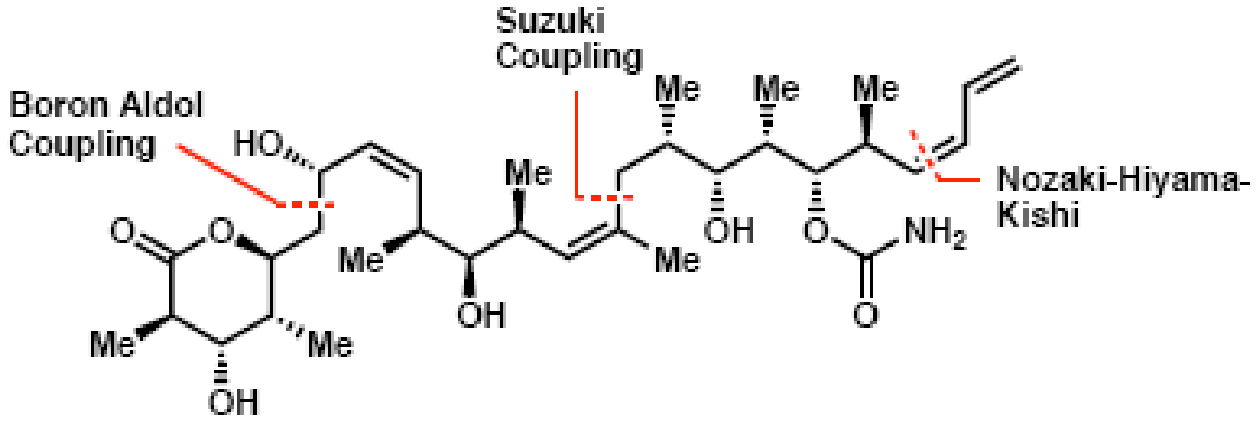


DVS-bis-BCB (Cyclotene®)

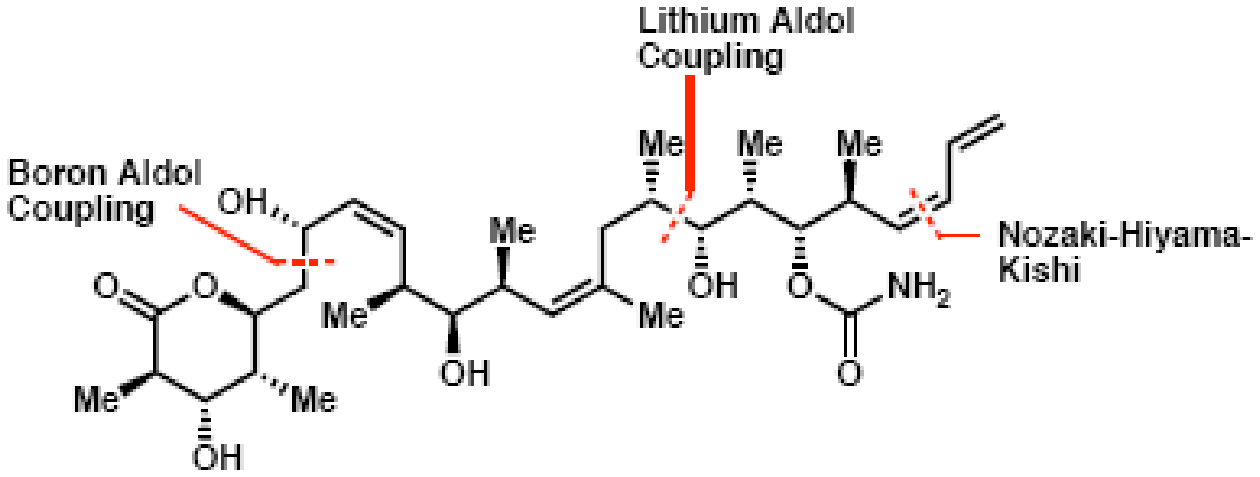
PRZEMYSŁ FARMACEUTYCZNY

Jedna czwarta wszystkich reakcji chemicznych w produkcji leków opiera się na metodzie Hecka-Suzuki-Negishi !!!

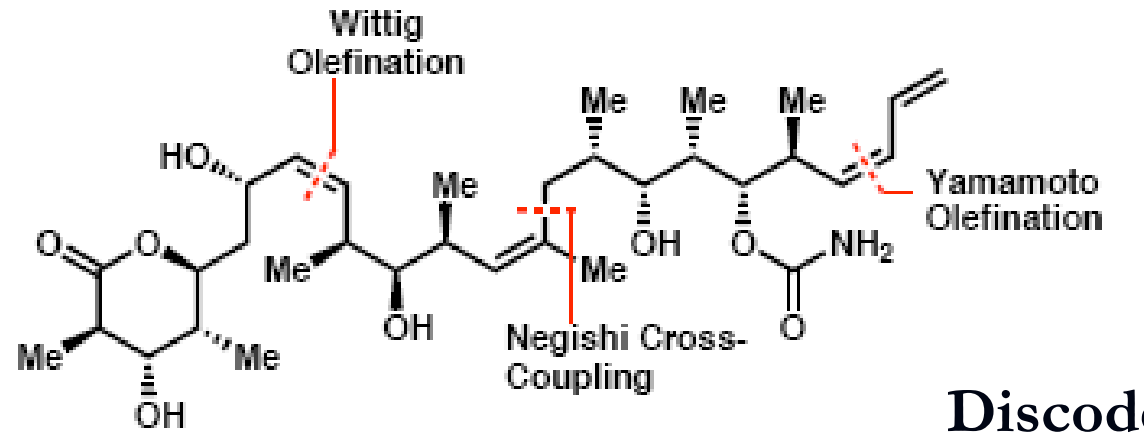
Novartis:



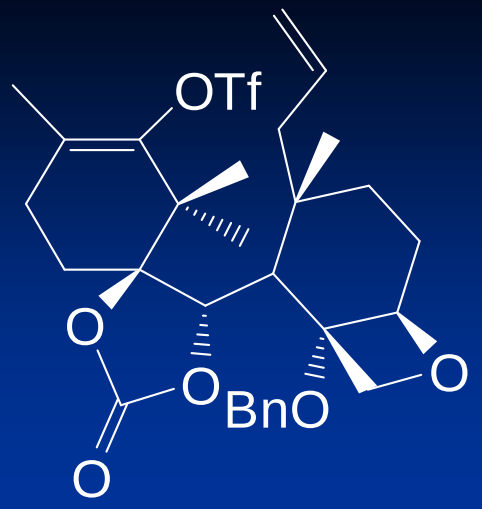
Paterson:



Smith:



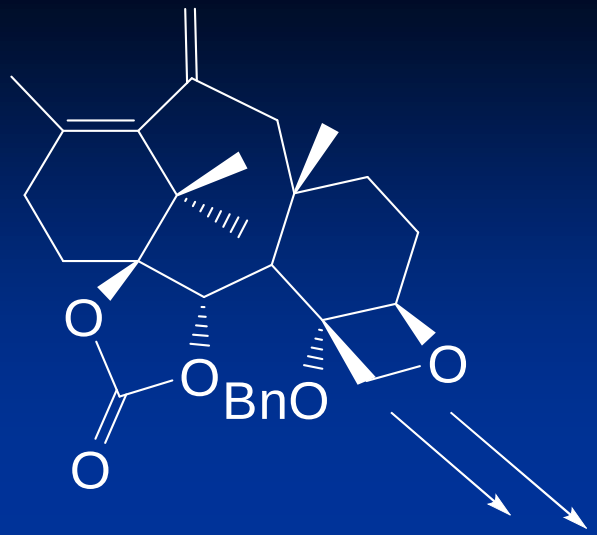
Discodermolid



$Pd(PPh_3)_4$

K_2CO_3, MeCN

Reakcja Hecka

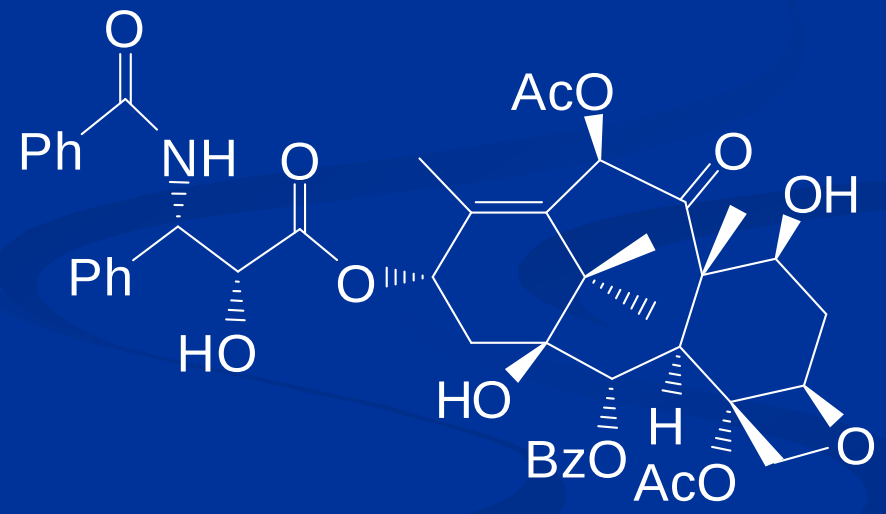


Paclitaxel (Taxol®)

Działanie cytostatyczne.

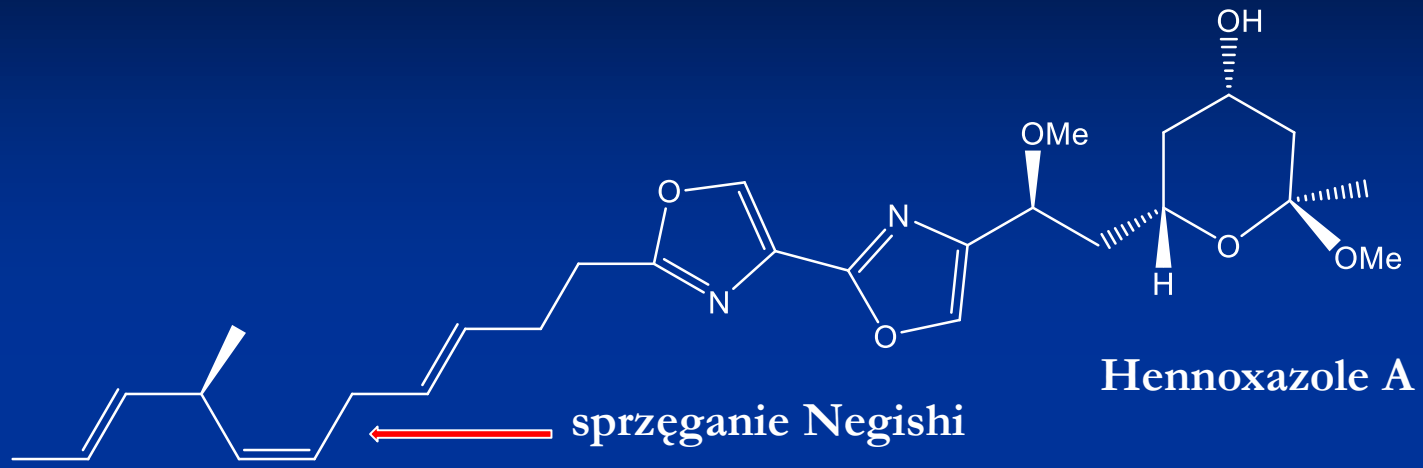
Zastosowanie:

- **rak jajnika,**
- **rak płuc,**
- **rak sutka,**
- **nowotwory w obrębie głowy i szyi,**
- **rak jądra.**



Początkowo lek uzyskiwano z kory cisa zachodniego. Leczenie jednego pacjenta wymagało wycięcia przynajmniej sześciu 100-letnich drzew.

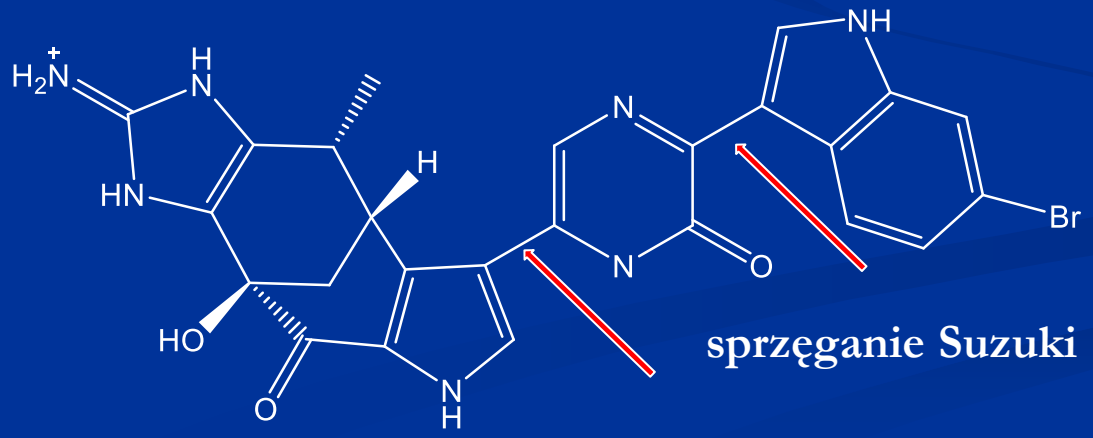
Lek o nazwie Hennoxazole, który pierwotnie został wyizolowany z ciała gąbki żyjącej u wybrzeży wyspy Miyako, posiada działanie przeciwwirusowe opryszczki oraz działanie przeciwbólowe, porównywalne do indometacyny (lek przeciwzapalny).



Hennoxazole A

sprzęganie Negishi

Lek o nazwie Dragamacidin F, który pierwotnie został wyizolowany z ciała gąbki żyjącej u wybrzeży Włoch, zsyntetyzowany w laboratorium ma moc zwalczania wirusów opryszczki i HIV.



Dragamacidin F

sprzęganie Suzuki

NOBEL Z CHEMII 2021

Benjamin List i David W.C. MacMillan

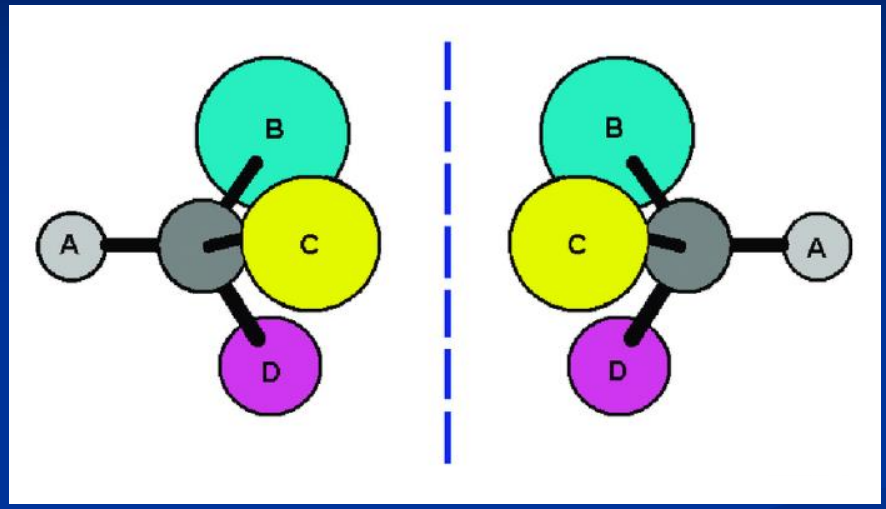
za rozwój asymetrycznej organokatalizy

ASYMETRYCZNA ORGANOKATALIZA opiera się na niewielkich cząsteczkach organicznych związków chemicznych.

ORGANOKATALIZATORY zbudowane są głównie z węgla i wodoru, a także mniejszych ilości pierwiastków takich jak tlen, azot, siarka czy fosfor. Dlatego są łatwe do rozłożenia i nie szkodzą środowisku, tak jak katalizatory metaliczne.

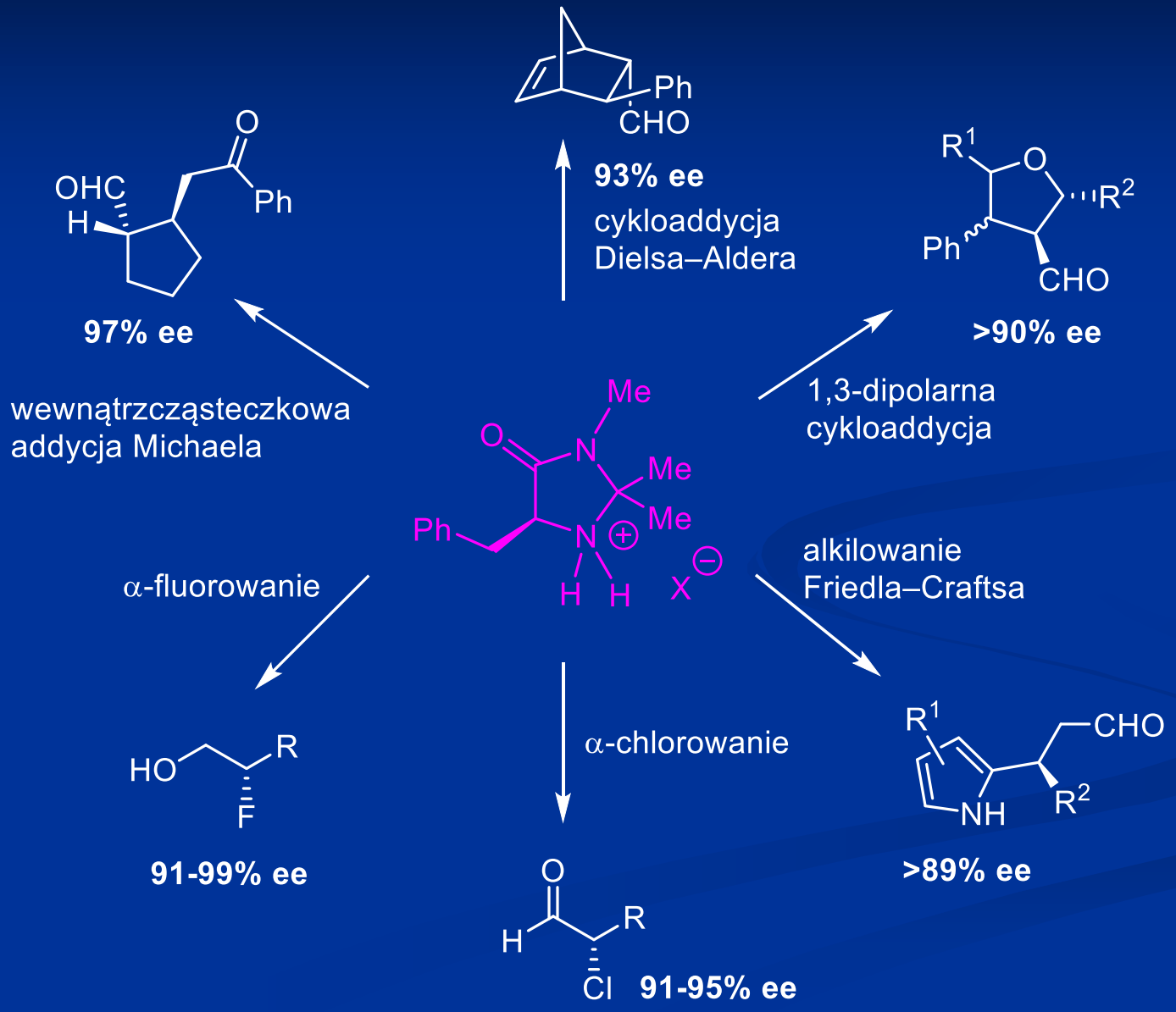
Metoda opracowana przez Benjamina Lista i Davida McMillana pozwala otrzymywać tylko jedną z dwóch możliwych „lustrzanych" form tej samej cząsteczki, zamiast mieszaniny obu form.

ENAANCJOMERY

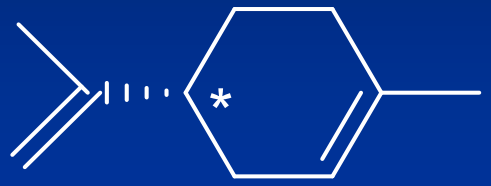


ORGANOKATALIZATOR MacMillana

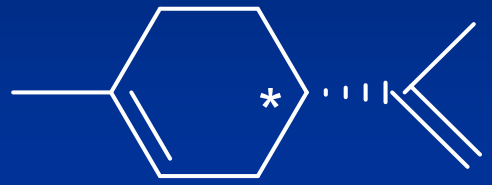
(pochodna imidazolidynonu)



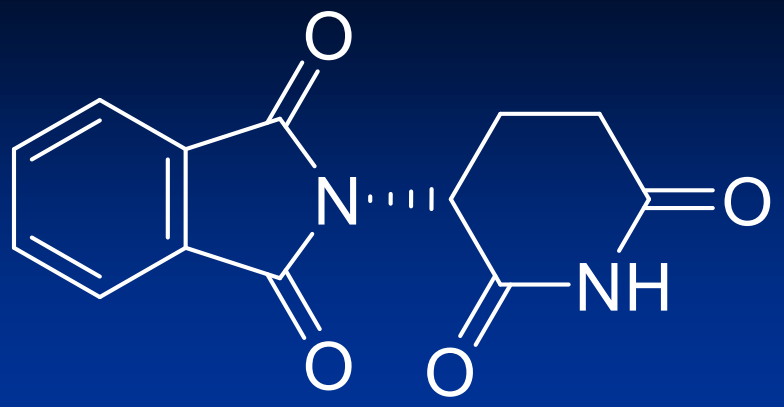
WŁAŚCIWOŚCI ENANCJOMERÓW - PRZYKŁADY



(R)-(+)-limonen



(S)-(-)-limonen



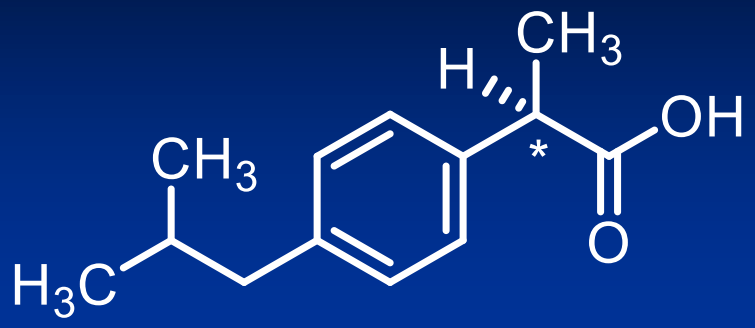
(*R*)-talidomid

lek usypiający ogólnego stosowania, a w większych dawkach - jako lek przeciwbólowy dla kobiet, których ciąża przebiegała z powikłaniami

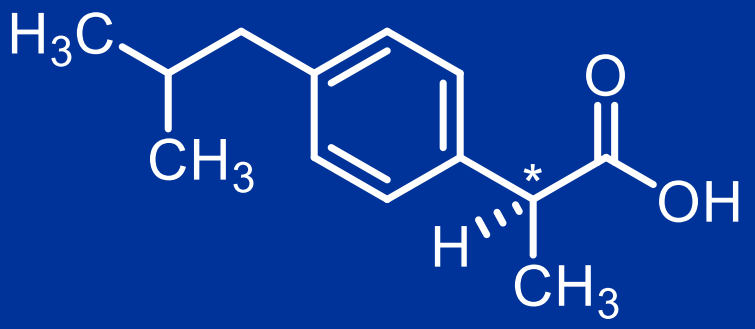
(*S*)-talidomid

silny teratogen działającym na DNA płodu oraz wykazującym działanie hamujące na angiogenezę (tzn. hamuje tworzenie nowych naczyń krwionośnych w kończynach oraz rozwój już istniejących)

IBUPROFEN



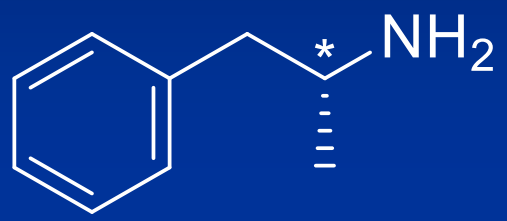
kwas (*R*)-2-(4-izobutylofenylo)propanowy



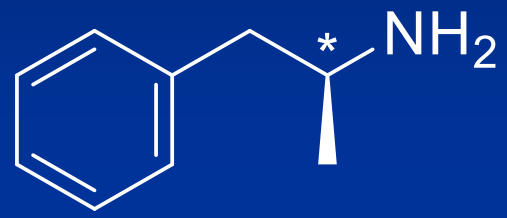
kwas (*S*)-2-(4-izobutylofenylo)propanowy

Na rynku farmaceutycznym preparaty ibuprofenu występują najczęściej w postaci mieszaniny racemicznej składającej się z izomerów *S*(+) i *R*(-). Izomery te różnią się farmakokinetyką i aktywnością terapeutyczną. Wykazano, że *S*(+)-enancjomer ma 160 razy większą aktywność biologiczną w stosunku do izomeru R(-).

AMFETAMINA



(*R*)-1-fenylopropan-2-amina



(*S*)-1-fenylopropan-2-amina

Izomer o absolutnej konfiguracji *S*-(+)-amfetaminy wykazuje działanie euforyzujące, zaś izomer *R*-(−) ma działanie bardziej obwodowe, wykazując szkodliwe działanie na serce. Powoduje zmiany w obrazie EKG charakterystyczne dla zawału mięśnia sercowego.

Katalizatory są to substancje ułatwiające i przyspieszające reakcje chemiczne.

Ich działanie można porównać do relacji międzyludzkich.

Jeśli dwie osoby dojeżdżają do pracy tym samym autobusem, po jakimś czasie mogą się poznać, ale może to zabrać całe lata.

Gdy spotkają wspólnego znajomego, reakcja przebiega natychmiast.

Dziękuję za uwagę!