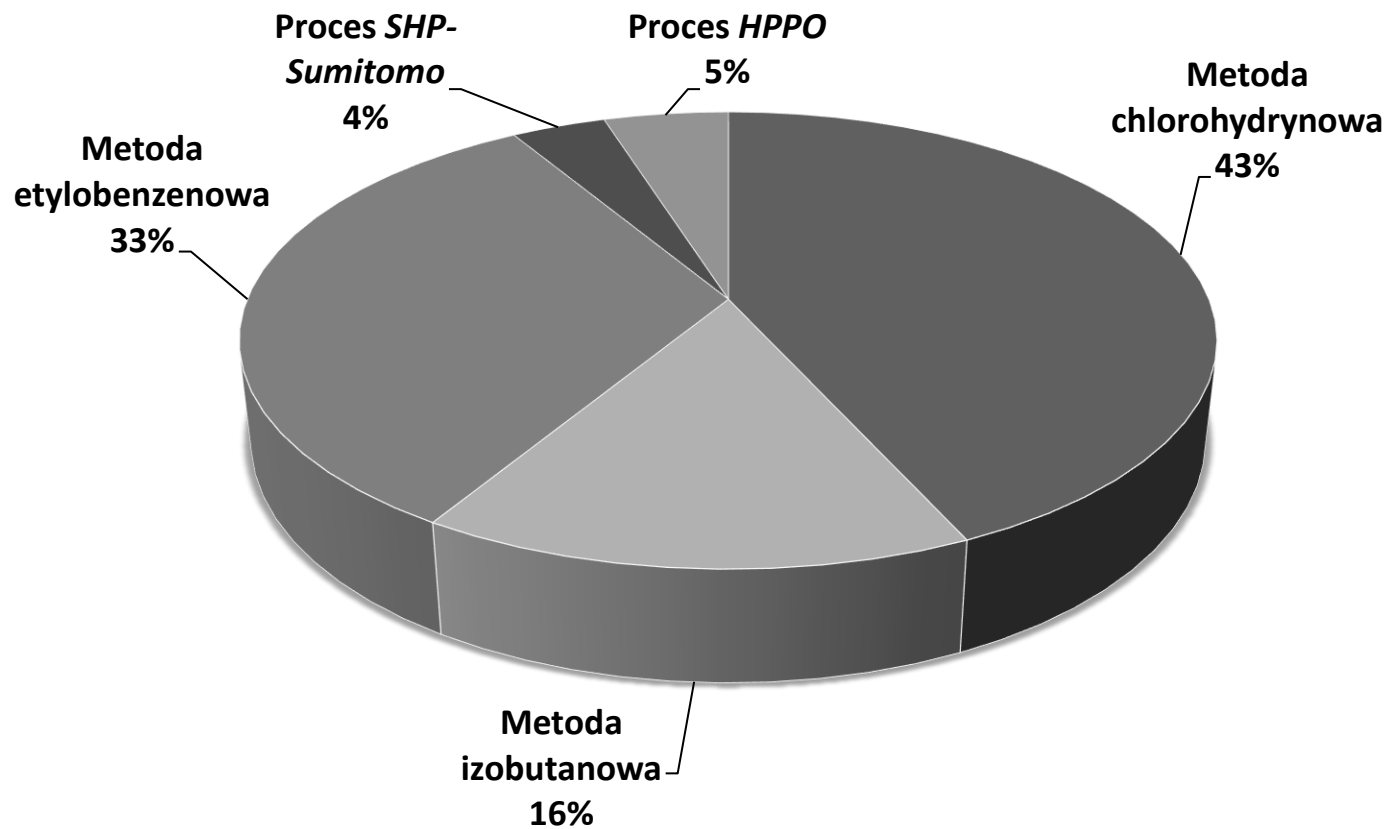


Procesy utleniania cz. 3

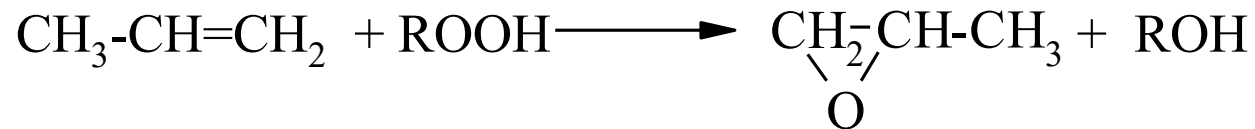
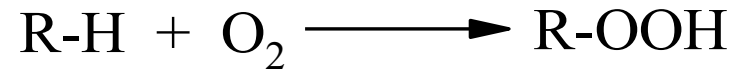
TLENEK PROPYLENU (1,2-epoksypropan)

- 1. W normalnej temperaturze jest bezbarwną, lotną cieczą (temperatura wrzenia wynosi 34,5°C), o nieprzyjemnym, eterowym zapachu.**
- 2. Dobrze rozpuszcza się w acetonie, benzenie, eterze dietylowym, metanolu i etanolu. Jest związkami reaktywnymi chemicznie.**
- 3. Pod wpływem kwasów, alkaliów i soli gwałtownie ulega polimeryzacji – polimeryzacja może mieć charakter wybuchowy.**
- 4. Reaguje gwałtownie z chlorem oraz amoniakiem z uzyskaniem dużego efektu cieplnego.**
- 5. Jest lotną i łatwo palną substancją o bardzo niskiej (-37°C) temperaturze zapłonu i temperaturze samozapalenia wynoszącej 430°C, produktami spalania jest dwutlenek węgla;**
- 6. Jego pary tworzą z powietrzem mieszaniny wybuchowe, cięższe od powietrza, w szerokim zakresie stężeń, o niskiej dolnej granicy wybuchowości (1,9% obj.); górna granica wybuchowości wynosi 27,5% obj;**
- 7. Jest substancją prawdopodobnie rakotwórczą.**

Udziały poszczególnych metod otrzymywania tlenku propylenu na świecie w 2008 r.



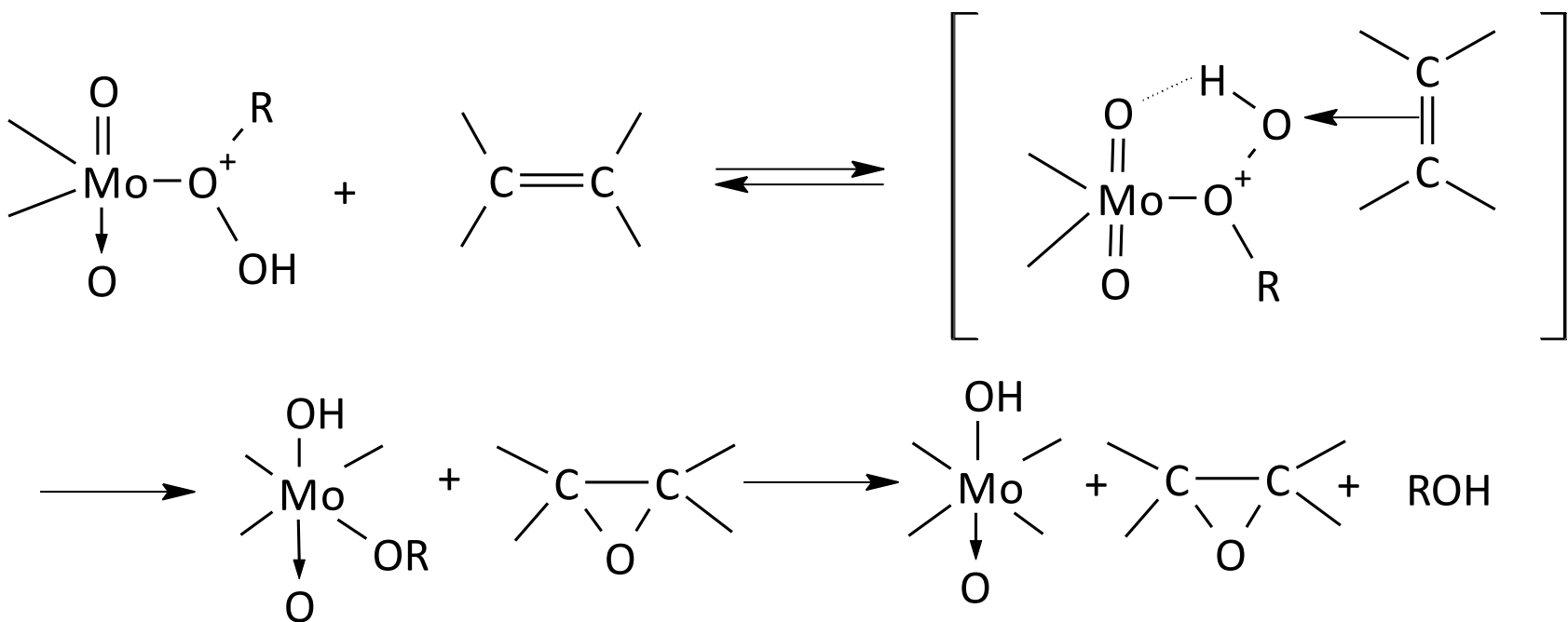
METODY WODORONADTLENKOWE



- z wykorzystaniem wodoronadtlenku *tert*-butylu (WNTB, proces Halcon),
- z wykorzystaniem wodoronadtlenku etylobenzenu (WNEB)
- z wykorzystaniem wodoronadtlenku kumenu (proces Sumimoto).

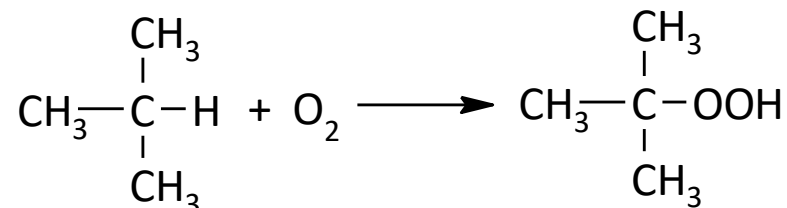
- z wykorzystaniem nadtlenu wodoru (proces HPPO, bezpośrednia epoksydacja)

Uproszczony mechanizm epoksydowania

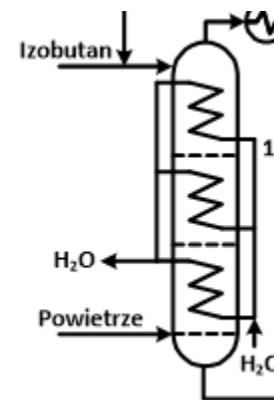


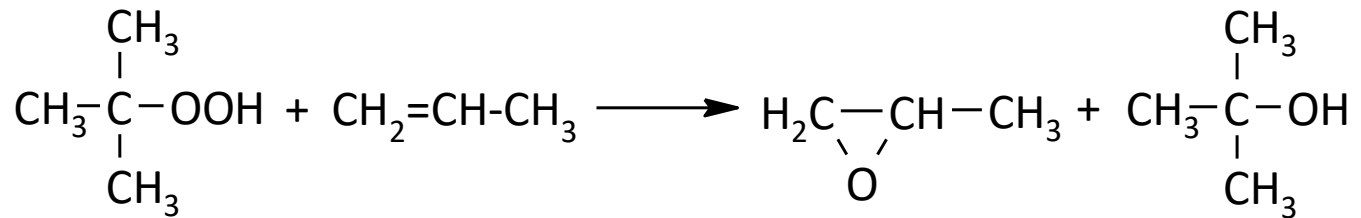
Metoda izobutanowa

I etap:



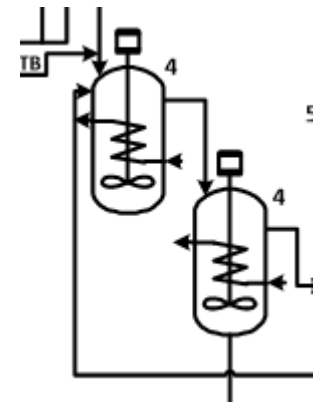
- faza ciekła,
- utleniania w obecności Na_2CO_3 lub NaOH
- temperatura - 110-130°C,
- przereagowanie izobutanu - 10-25 %,
- ciśnienie - 3-3,5 MPa,
- reaktor półkowy, przeciwprąd reagentów.
- czas reakcji – 7 godzin,
- produkty uboczne: aceton, metanol i alkohol *t*-butylowy



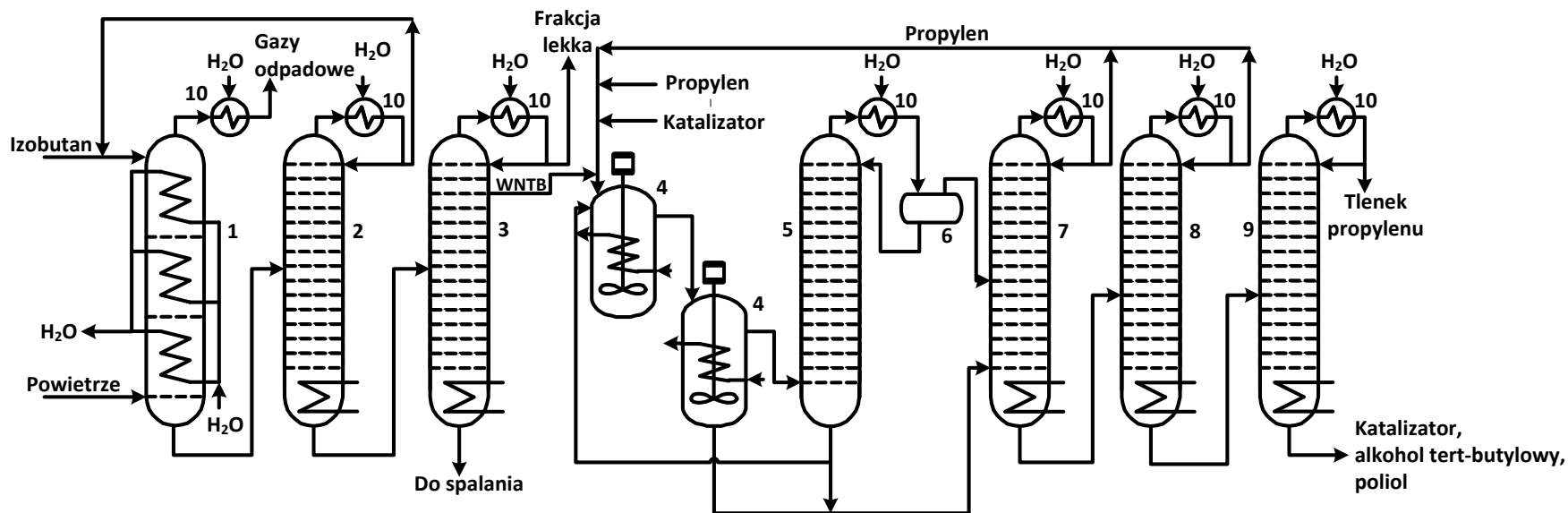


II etap:

- 3-4 reaktory z mieszadłami,
- temperatura – 90-150°C, ciśnienie – ok. 2,7-7 MPa,
- katalizator – homogeniczne (kompleksy molibdenu), lub **heterogeniczne (silikaty tytanowe)**
- stosunek molowy propylenu do wodoronadtlenku - 2÷3:1,
- stosunek molowy katalizatora do wodoronadtlenku - 0,001÷0,006:1.
- czas reakcji 2,5 godz.
- konwersja wodoronadtlenku – 90-95%, propylenu – 15%
- selektywność tlenku propylenu względem nadtlenu 85-95%
- teoretycznie na każdy mol TP powinno tworzyć się 2 mole alkoholu, tj. 2,51 t alkoholu na 1 t tlenku, faktycznie tworzy się ok. 3 t.

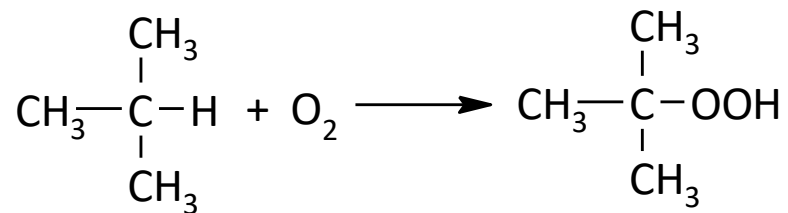
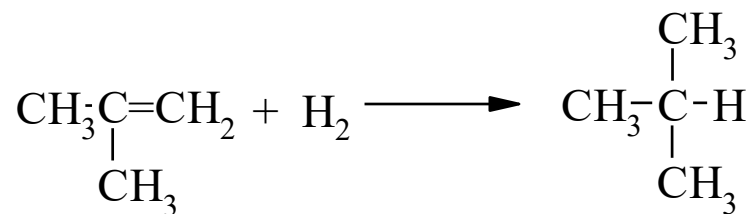
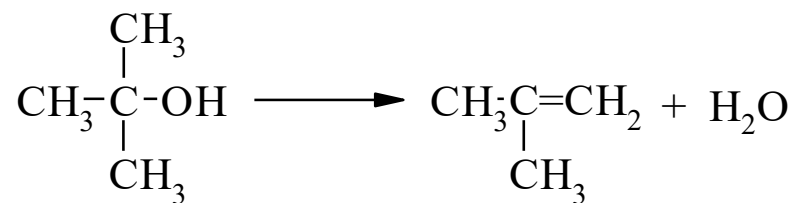


Schemat instalacji produkującej tlenek propylenu metodą izobutanową



1 – reaktor, 2 – kolumna destylacyjna izobutanu, 3 – kolumna destylacyjna wodoronadtlenku *tert*-butylu, 4 – reaktory epoksydowania, 5 – kolumna destylacyjna, 6 – rozdzielacz faz, 7, 8 – kolumny destylacyjne propylenu, 9 – kolumna destylacyjna tlenku propylenu, 10 – chłodnice zwrotne

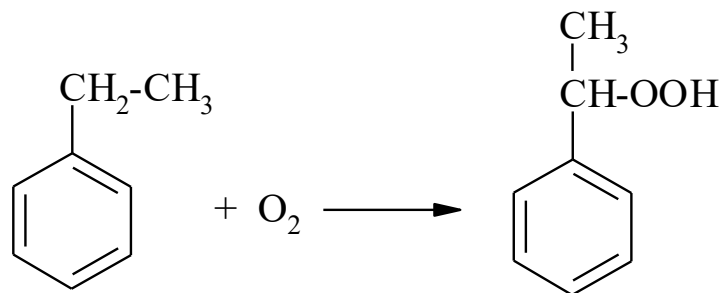
W procesie powstaje od 2,5 do 3 ton alkoholu *tert*-butylowego na tonę tlenku propylenu, stąd niezbędne jest zagospodarowanie alkoholu.



Metoda etylobenzenowa

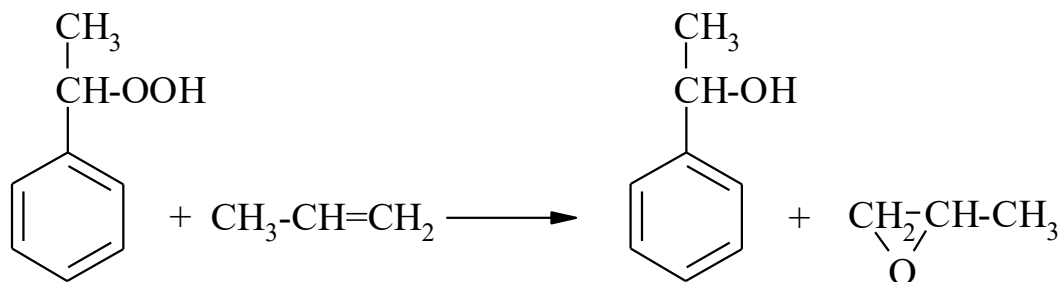
I etap

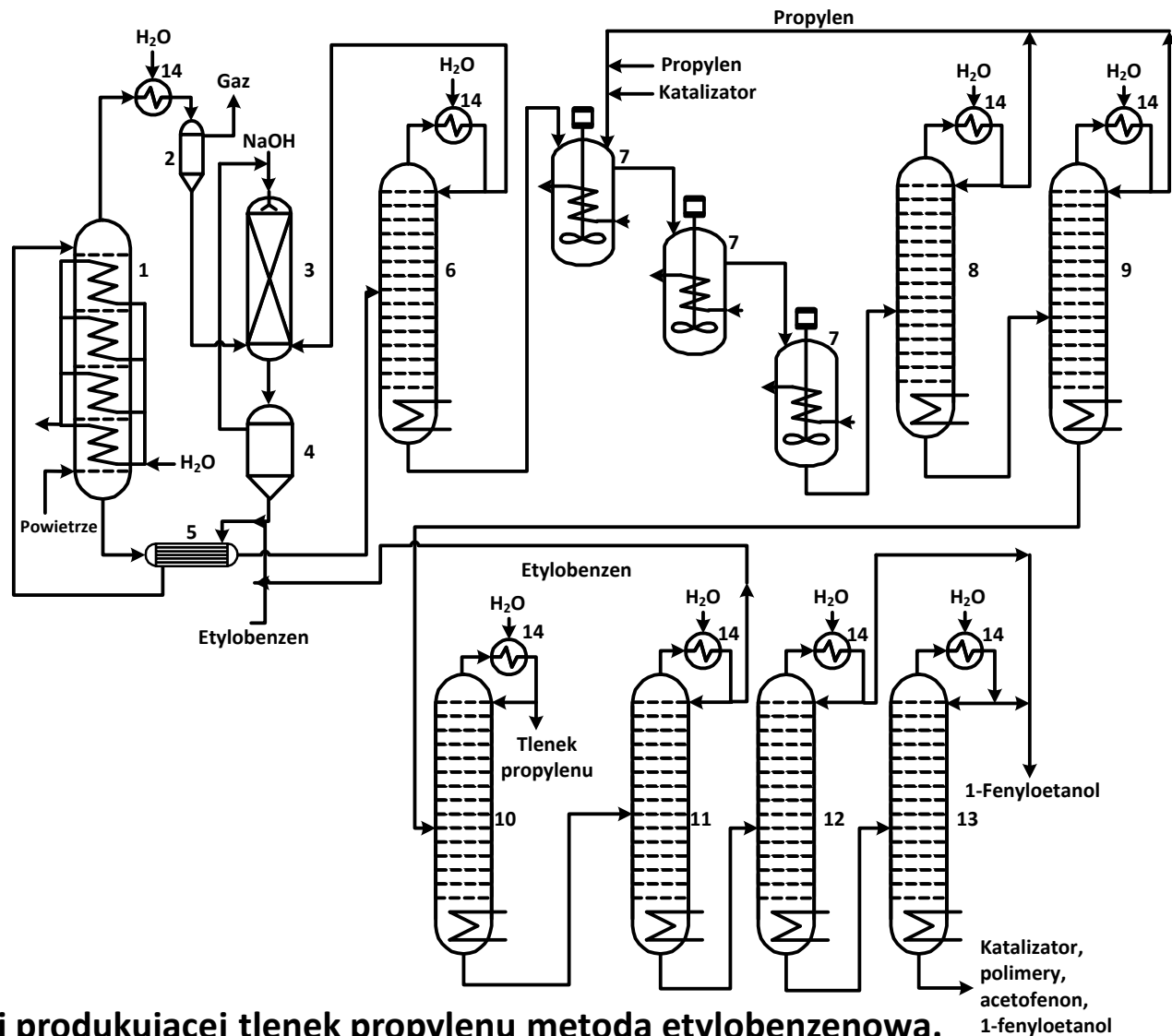
- temperatura - 140-150°C,
- ciśnienie - 0,3-0,5 MPa,
- czas reakcji – ok. 6 godzin.
- konwersja EB - 10-25% mol.
- produkty uboczne: 1-fenyletanol i acetofenon oraz benzaldehyd, kwas benzoowy, kwas mrówkowy, nadtlenek wodoru i 2,3-difenylobutan.



II etap

- temperatura - 100-115°C
- stosunek molowy propylen:WNEB:Mo - 3÷6:1:0,0004

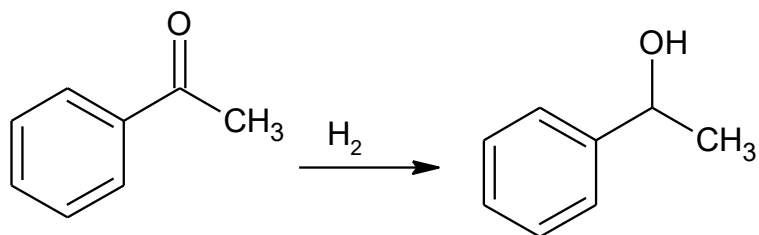




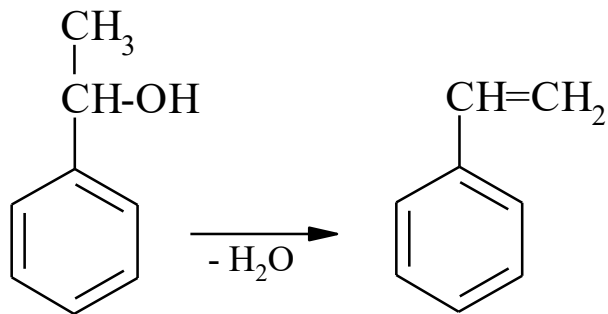
Schemat instalacji produkującej tlenek propylenu metodą etylobenzenową.

1 – reaktor utleniania etylobenzenu, 2 – deflegmator, 3 – skrubler, 4 – rozdzielacz, 5 – wymiennik ciepła, 6 – kolumna destylacyjna etylobenzenu, 7 – reaktory epoksydowania, 8, 9 – kolumny destylacyjne propylenu, 10 – kolumna destylacyjna tlenku propylenu, 12, 13 – kolumny destylacyjne 1-fenyletanolu

1-Fenyletanol wraz z acetofenonem kierowany jest do reaktora uwodornienia, w którym w temperaturze 80-130°C, pod ciśnieniem 8,4 MPa, w obecności katalizatora miedziowego następuje konwersja acetofenonu do 1-fenyletanolu. Osiągana konwersja - ok. 96%.

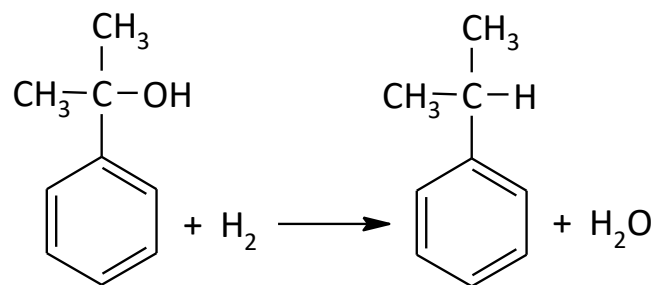
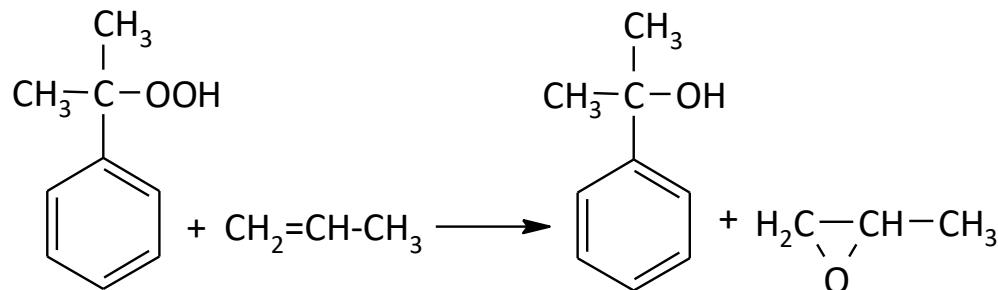
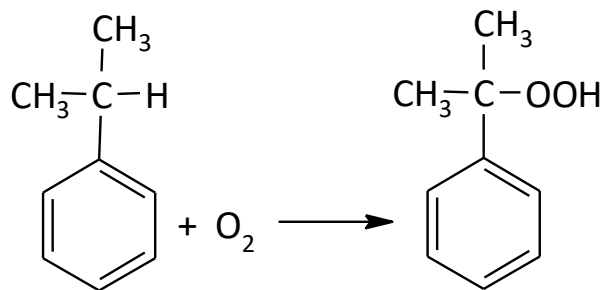


Odwodnienie 1-fenyletanolu, zawierającego acetofenon prowadzi się w temperaturze 200-400°C w obecności TiO₂ (pastylki lub na żelu krzemionkowym).



Proces *Sumitomo* (wariant kumenowy)

Wdrożony do produkcji przez firmę *Sumitomo* w 2003 r.



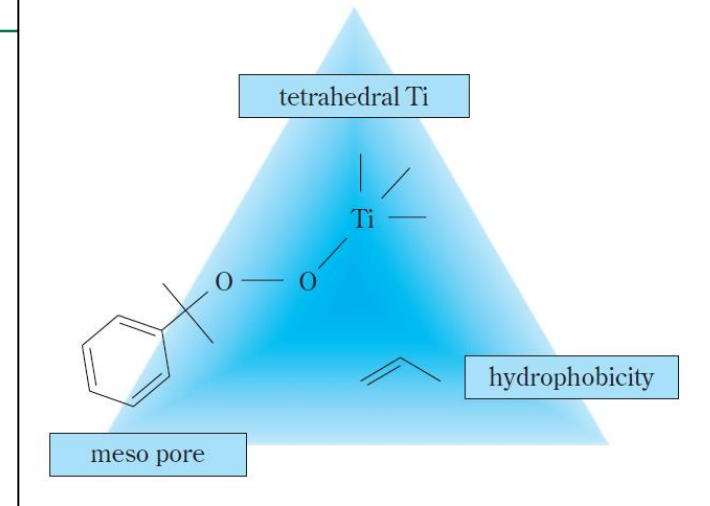
Etapy:

- utlenianie kumenu do wodoronadtlenku kumenu,
- katalityczna epoksydacja propylenu do tlenku propylenu i alkoholu dimetylobenzylowego,
- katalitycznego uwodornienia alkoholu do kumenu,
- oczyszczania kumenu i jego recyklingu do procesu,
- oczyszczania wytworzonego tlenku propylenu.

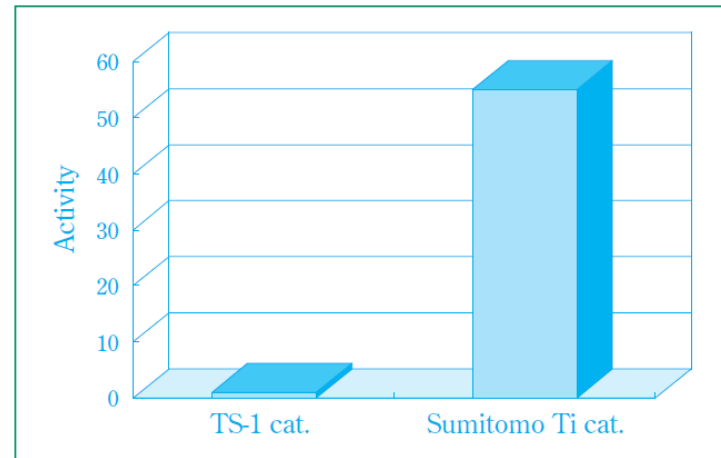
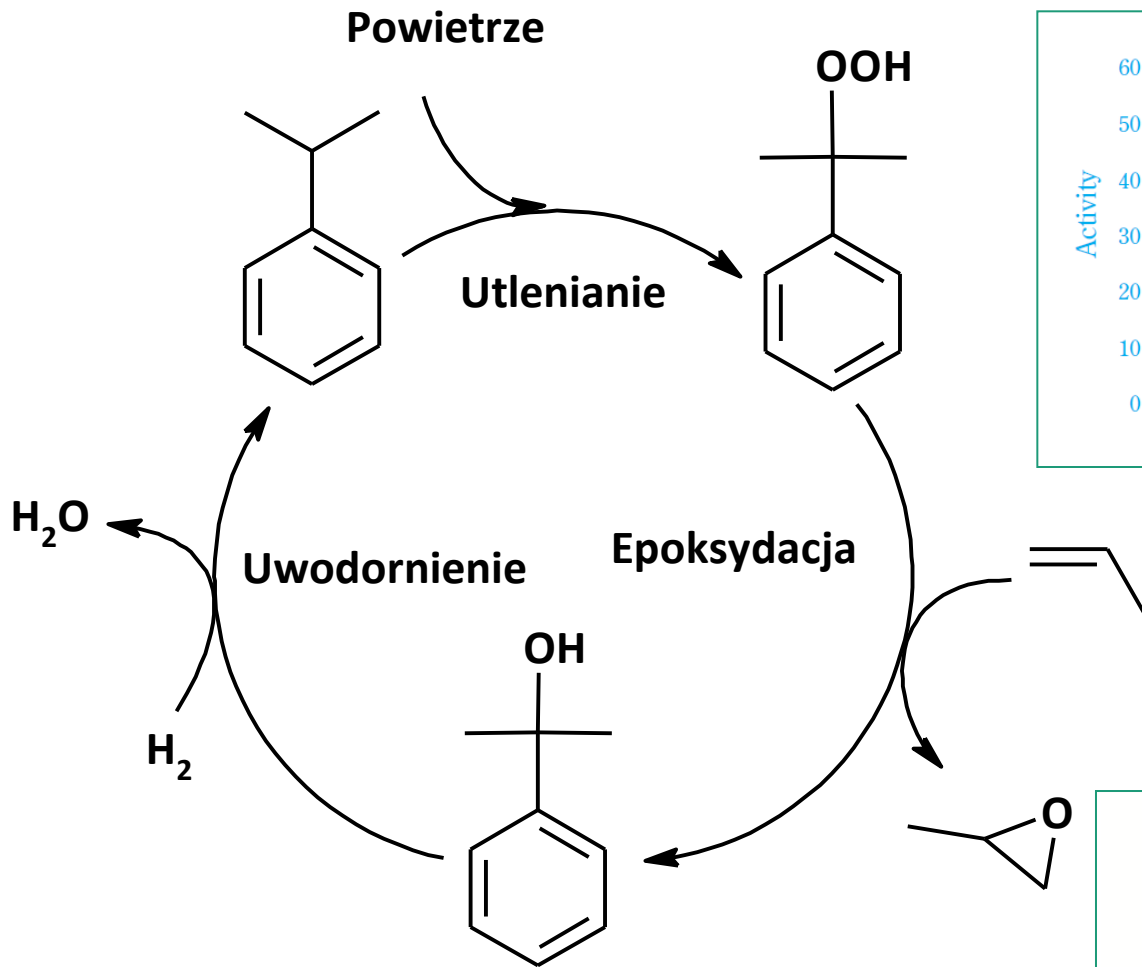
Inne cechy procesu

- ❑ **Utlenianie bez udziału katalizatora (proces autokatalityczny), analogicznie do otrzymywania fenolu i acetonu metodą kumenową.**
- ❑ **Utlenianie w przybliżeniu 7 razy szybsze, niż analogiczny proces z udziałem etylobenzenu.**
- ❑ **wytworzony wodoronadtlenek kumenu bardziej stabilny, niż wodoronadtlenki otrzymywane w klasycznych wariantach wodoronadtlenkowych.**

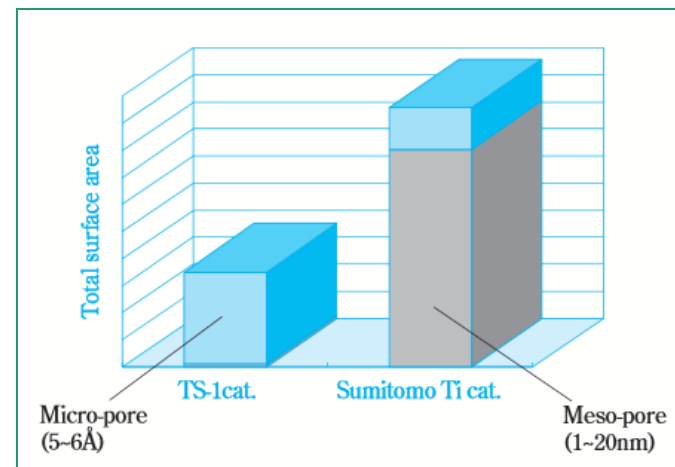
Inne cechy procesu – c.d.



- ❑ **epoksydacja wobec tlenków tytanowo-krzemowych (tzw. silikatów tytanowych)** w łagodnych warunkach temperaturowych,
- ❑ nadmiar propylenu; nieprzereagowany propylen jest odzyskiwany i zawracany do procesu,
- ❑ kontrolę temperatury zapewniają wymienniki ciepła instalowane pomiędzy warstwami katalizatora



Schemat cyklu reakcyjnego procesu *Sumitomo*

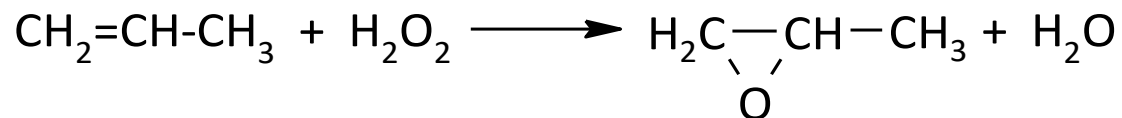


Porównanie komercyjnych procesów wytwarzania tlenku propylenu

Proces	Metoda chlorowa (1-sza generacja) (1910-)	Wariant etylobenzenowy epoksydacji (2-sza generacja) (1960-)	Proces Sumitomo (3-cia generacja) (2003-)
Źródło czynnika utleniającego	Chlor	Etylobenzen	Kumen
Koprodukt	CaCl ₂	Styren	-
Ilość koproduktu, t/t tlenku propylenu	2,0	2,5	~0
Selektywność przereagowania propylenu	Niska	Niska	Wysoka

Technologia HPPO (*Hydrogen Peroxide-to-Propylene Oxide*; Solvay)

Utlenianie propylenu nadtlenkiem wodoru (instalacja **BASF and Dow** w Antwerpii 300 000 ton w 2008)



Korzyści:

- 70-80% redukcja ścieków wodnych w porównaniu z klasyczną technologią
- 35% redukcja zużycia energii
- redukcja kosztów instalacji w wyniku integracji z instalacją nadtlenu wodoru (uniknięcie koproduktów)

- reakcja w autoklawie w środowisku wodno-metanolowym.
- czynnik epoksydujący - 30% wodny r-r H_2O_2
- wagowy stosunek $\text{MeOH}:\text{H}_2\text{O}_2$: propylen 64,5:15,5:20
- temperatura 0°C ,
- katalizator TS-1 (silikat tytanowy),
- praktycznie ilościowa konwersja propylenu,
- bardzo wysoka selektywność i wydajność procesu.
- tlenek propylenu oczyszczany na drodze destylacji;
- metanol zawracany jest do obiegu.



HPPO process scheme total scope

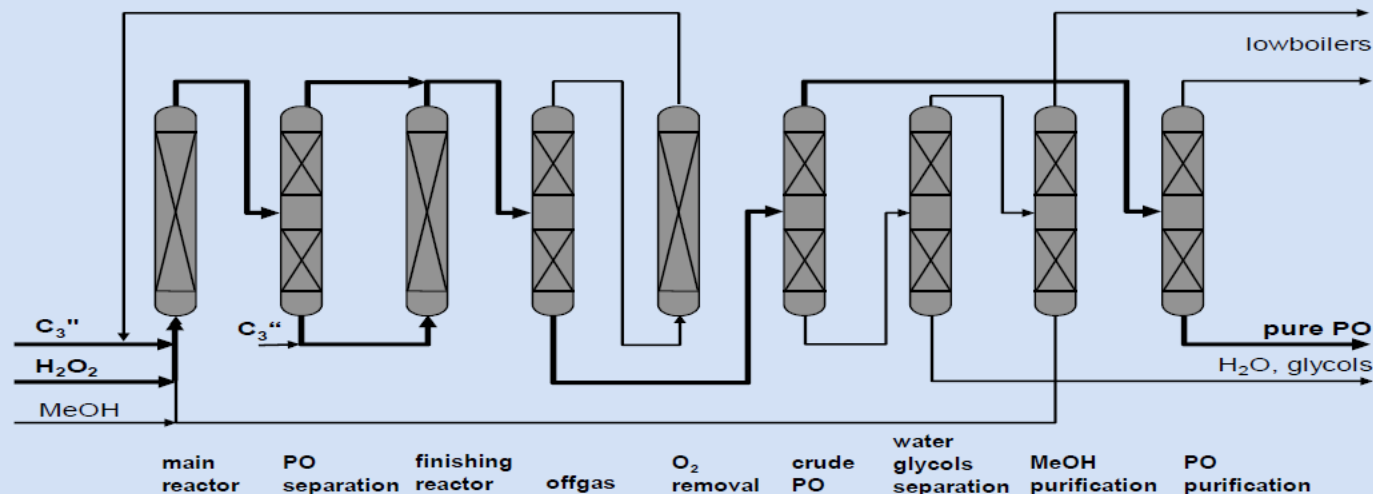


Figure 6: HPPO process scheme total scope

The plant started operation in 2008 representing the first successful commercial application of this novel technology with a 300 kt/a world scale PO capacity. Project venture partner for HP supply on site with a new world scale 230 kt/a HP plant is Solvay S.A.

Construction of additional HPPO plants with external project partners in Middle East, in Asia and in the United States are under investigation. A large number of patent applications have been filed globally for this process by BASF and DOW.

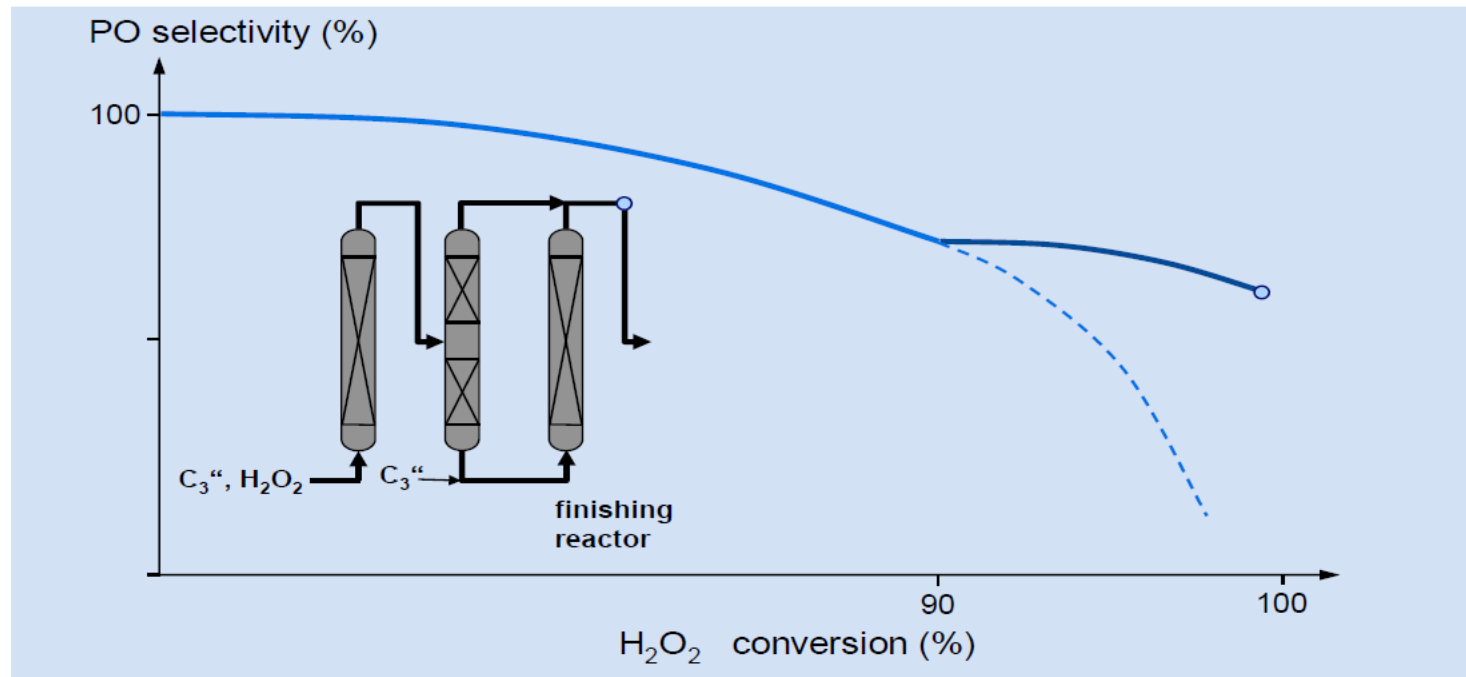


Figure 4: Reactor concept for H₂O₂ conversion and PO selectivity

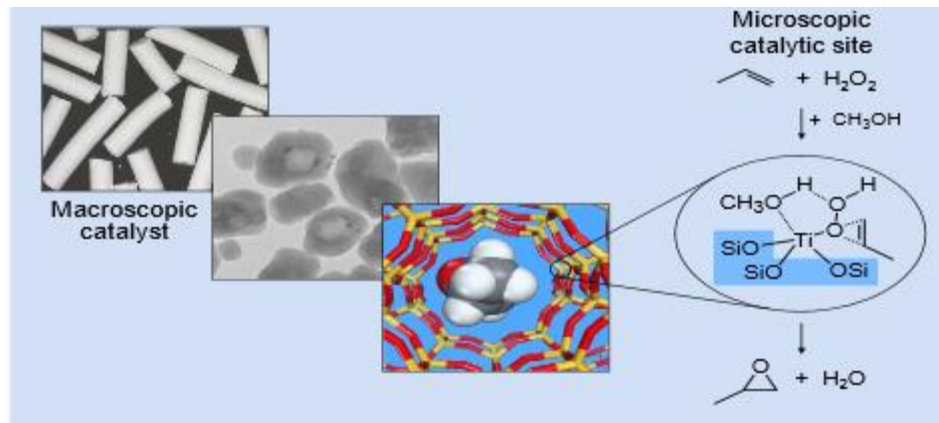


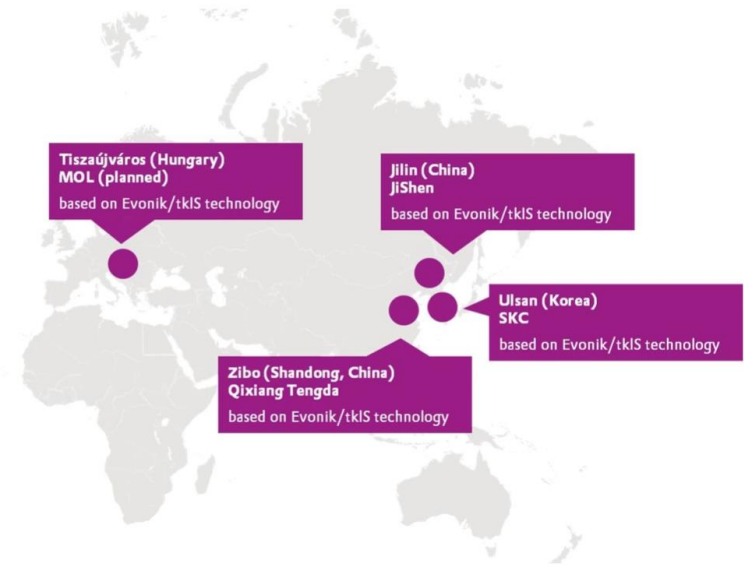
Figure 2: Proprietary TS-1 Ti-zeolite catalyst – HPPO epoxidation mechanism

process	precursors	intermediate	Coproducts / recycle t / t PO
PCH PO	$\text{Cl}_2, \text{H}_2\text{O}$	HOCl, PCH	≥ 2 t Chloride salts ≥ 40 t H_2O
SM PO	Ethylbenzene	EB-hydroperoxide	≥ 2.2 t Styrene
MTBE PO	Isobutane	t-Butylhydroperoxid	≥ 2.4 t t-Butanol
Cumene PO	Cumene	Cumene-hydroperoxide	~ 1.5 t Cumyl-alcohol
HPPO	H_2, O_2	H_2O_2	≥ 0.3 t H_2O

Figure 1: HPPO coproduction fingerprint

The world's first industrial-scale HPPO plant, licensed jointly by Evonik Industries and thyssenkrupp Uhde, was built by SKC in Ulsan, South Korea, in 2008, with an annual output of 100,000 metric tons of propylene oxide. The capacity of this first-of-its-kind HPPO plant was then increased to 130,000 metric tons of propylene oxide per year.

HPPO LICENSED BY EVONIK AND THYSSENKRUPP UHDE



The first-ever world-scale HPPO cooperation in China, with 300,000 metric tons of propylene oxide by Jishen Chemical Industry Co. Ltd., is also using the Evonik-Uhde process. Evonik supplies its H₂O₂ directly to the adjacent propylene oxide plant run by Jishen via a pipeline that links the two facilities. The production plant has an annual capacity of 230,000 metric tons. Evonik has invested over one hundred million euros in the site. To date, hydrogen peroxide has been used mainly as a bleaching agent by the textile and pulp industry. The HPPO process allows this eco-friendly oxidant to also be employed in the direct chemical synthesis of propylene oxide.

HPPO is the technology of choice for either setting up new PO capacity or replacing the PO capacity based on old pollutive chlorohydrin process. Hungarian MOL Group and Chinese Zibo Qixiang Tengda Chemical are two further examples, who are currently building up HPPO capacities, 200kta in Tiszaújváros, Hungary and 300kta in Zibo, China respectively, using Evonik-Uhde technology.



In 2001, Evonik and thyssenkrupp Uhde announced an exclusive partnership to develop the new process. Evonik investigated the process and developed a catalyst optimized for the particular purpose, while thyssenkrupp Uhde contributed its expertise in process engineering and the design and construction of chemical and other industrial plants.

Since 2008, the Evonik-Uhde HPPO technology has been in successful commercial operation in the first plant of its kind at SK picglobal in South Korea, the capacity of which was expanded to 130,000 t/year in 2012. Evonik and thyssenkrupp Uhde were also commissioned to build a 300,000 t/year HPPO plant for JiShen Chemical Industry Co. Ltd. in Jilin City in Jilin Province, P.R.C., which was started up in 2014. In 2022, the cooperation partners gained another reference when Qixiang Tengda Chemical Company's 300,000 t/year HPPO megascale plant in Zibo, China successfully went onstream. And a fourth mega project is also nearing completion: The 200,000 t/year plant for Hungarian customer MOL Group has entered the commissioning phase.

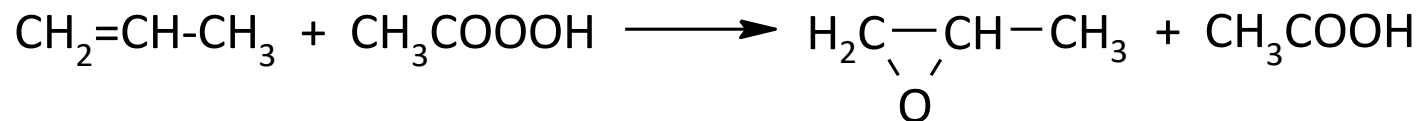
The Evonik-Uhde process produces PO from propylene and hydrogen peroxide (H₂O₂) using a special titanium silicalite (TS-1) catalyst. The advantages of the new process are clear. It is more cost effective to operate than the PO production processes currently used, and the significantly lower capital investment costs allow investors greater flexibility in their investment decisions.

In 2024 will see the finalization of one of the world's largest HPPO facilities in central European Hungary for customer MOL Group. The project is currently in the commissioning phase.

Porównanie nowych metod epoksydowania nadtleniem wodoru

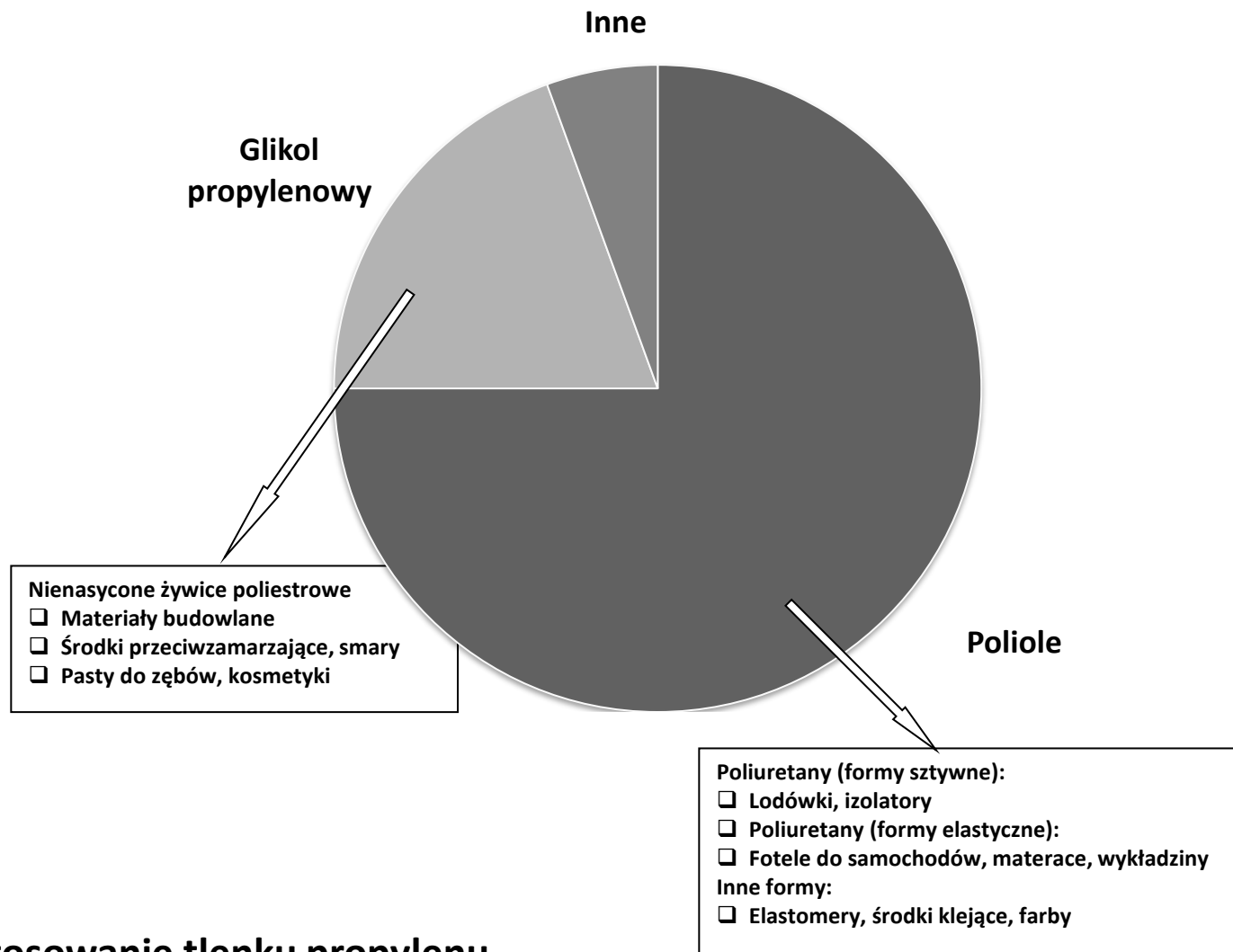
Proces	Firma
<p>Utlenianie H₂O₂ (wytwarzany metodą antrachinonową) kat. – TS-1, rozpuszczalnik – MeOH</p> $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}_2 \longrightarrow \text{H}_2\text{C} \begin{array}{c} \diagup \text{O} \diagdown \end{array} \text{CH}-\text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}$	<p>Dow (Enichem), BASF, Solvay, Degussa, Uhde</p>
<p>Utlenianie H₂O₂ wytwarzanym <i>in situ</i> kat. – Pd/TS-1, rozpuszczalnik – MeOH</p> $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3 + \text{H}_2 + \text{O}_2 \longrightarrow \text{H}_2\text{C} \begin{array}{c} \diagup \text{O} \diagdown \end{array} \text{CH}-\text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}$	<p>Lyondell, BASF</p>
<p>Bezpośrednie utlenianie w fazie gazowej kat. – Au/TS-1, Ag/CaCO₃</p> $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3 + \text{H}_2 + \text{O}_2 \longrightarrow \text{H}_2\text{C} \begin{array}{c} \diagup \text{O} \diagdown \end{array} \text{CH}-\text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3 + 0,5 \text{ O}_2 \longrightarrow \text{H}_2\text{C} \begin{array}{c} \diagup \text{O} \diagdown \end{array} \text{CH}-\text{CH}_3$	<p>Dow, BASF, Bayer, Lyondell, Nippon Shokubai</p>

Epoksydowanie nadkwasami (proces *Daicel*)



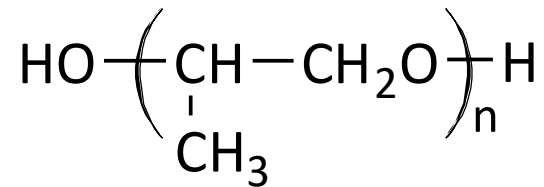
- najczęściej kwasem nadoctowym o stężeniu 20-45% wag. (roztwór w octanie etylu, metylu lub benzenie),
- szereg reaktorów wieżowych,
- współprąd materiałowy roztworu nadkwasu i propylenu
- stosunek molowy propylenu do kwasu nadoctowego 1,2÷5:1,
- temperatura 40-70°C,
- reakcji 60-150 min.

According to forecasts, the yearly demand for PO is expected to surpass 20 Mt by 2025. (J. Mater. Chem. A, 2025, **13**, 5261-5274)



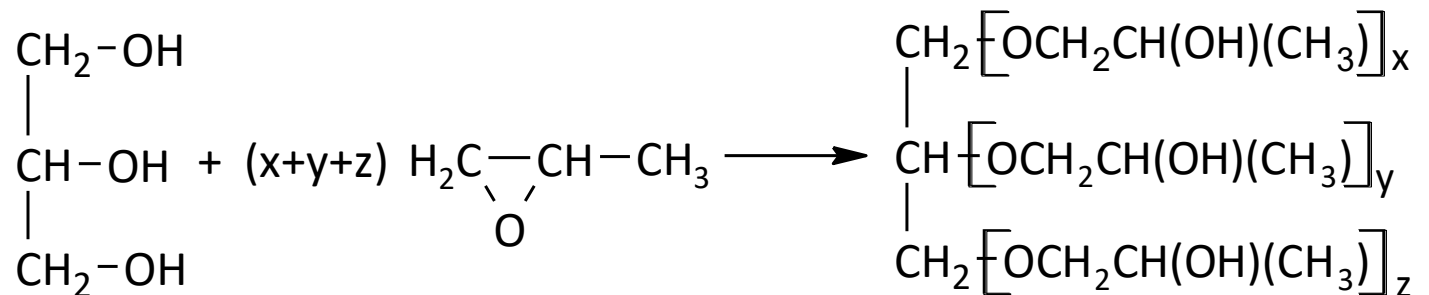
Zastosowanie tlenku propylenu

☐ Glikole polioksypropylenowe



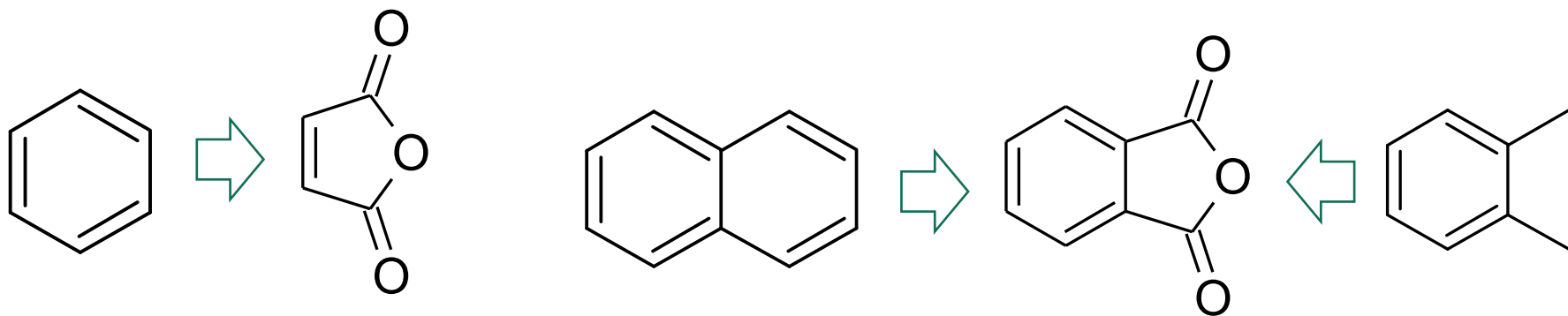
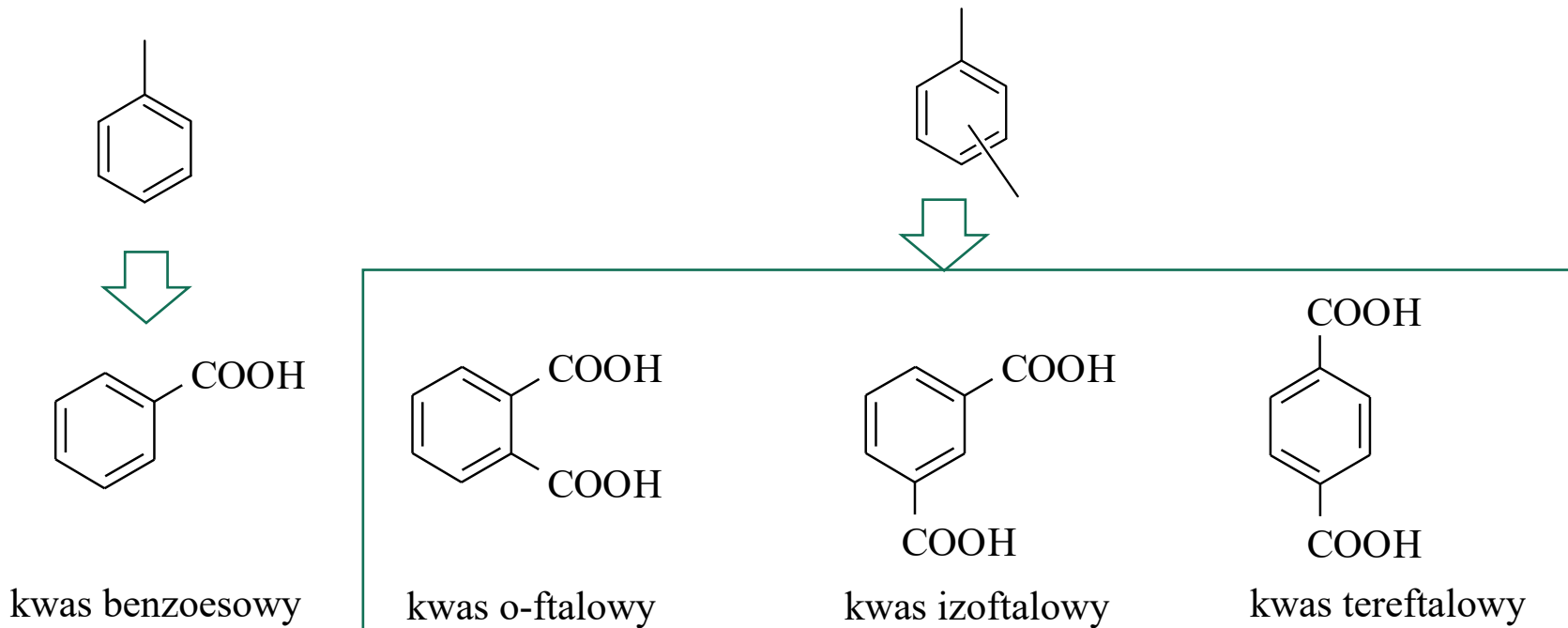
Służą one do otrzymywania detergentów i emulgatorów

☐ Oksypropylenowanie gliceryny tlenkiem propylenu do polieterów

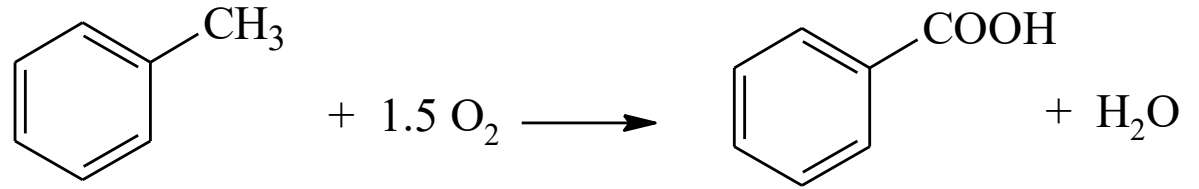


☐ Hydrokylowe pochodne celulozy lub skrobi stosowane są w przemyśle spożywczym, papierniczym i w farmacji.

UTLENIANIE WĘGLOWODORÓW AROMATYCZNYCH



Kwas benzoesowy

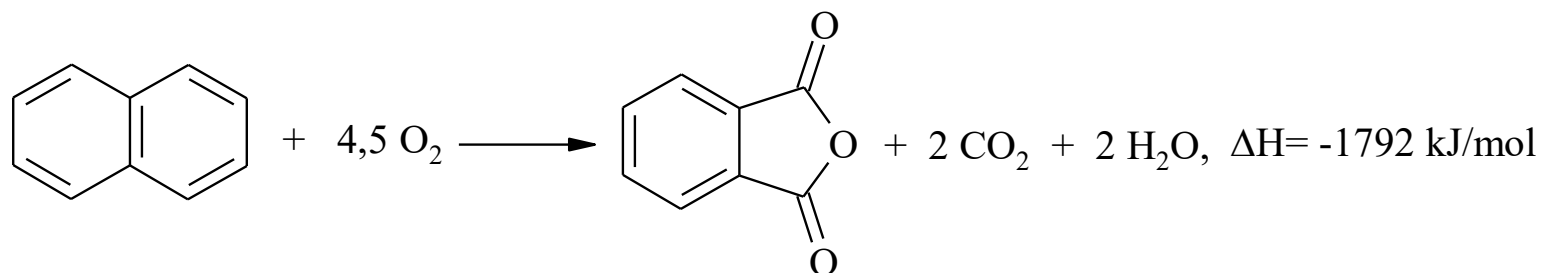


- faza ciekła,
- rozpuszczalnik - kwas octowy,
- katalizator - naftenian kobaltu
- temperatura – 100-140°C
- ciśnienie - 0,4 MPa
- reaktor zbiornikowy barbotażowy

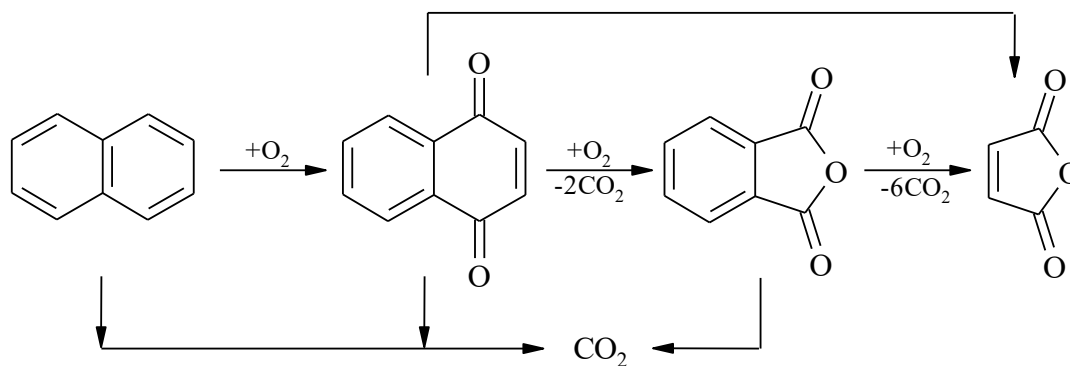
Zastosowanie kwasu benzoesowego:

- benzoesan sodowy – środek konserwujący produkty żywnościowe i pasze; powstrzymuje fermentację i gnicie,
- utlenianie i dekarboksylacja – fenol (USA),
- estryfikacja – estry, plastyfikatory, a także zastosowanie w perfumerii,
- dysproporcjonowanie – kwas tereftalowy (metoda Henkel),
- chlorowanie grupy –COOH – chlorek benzoilu – czynnik benzoilujący,

Utlenianie naftalenu (do 1960 r. główna metoda produkcji BF)



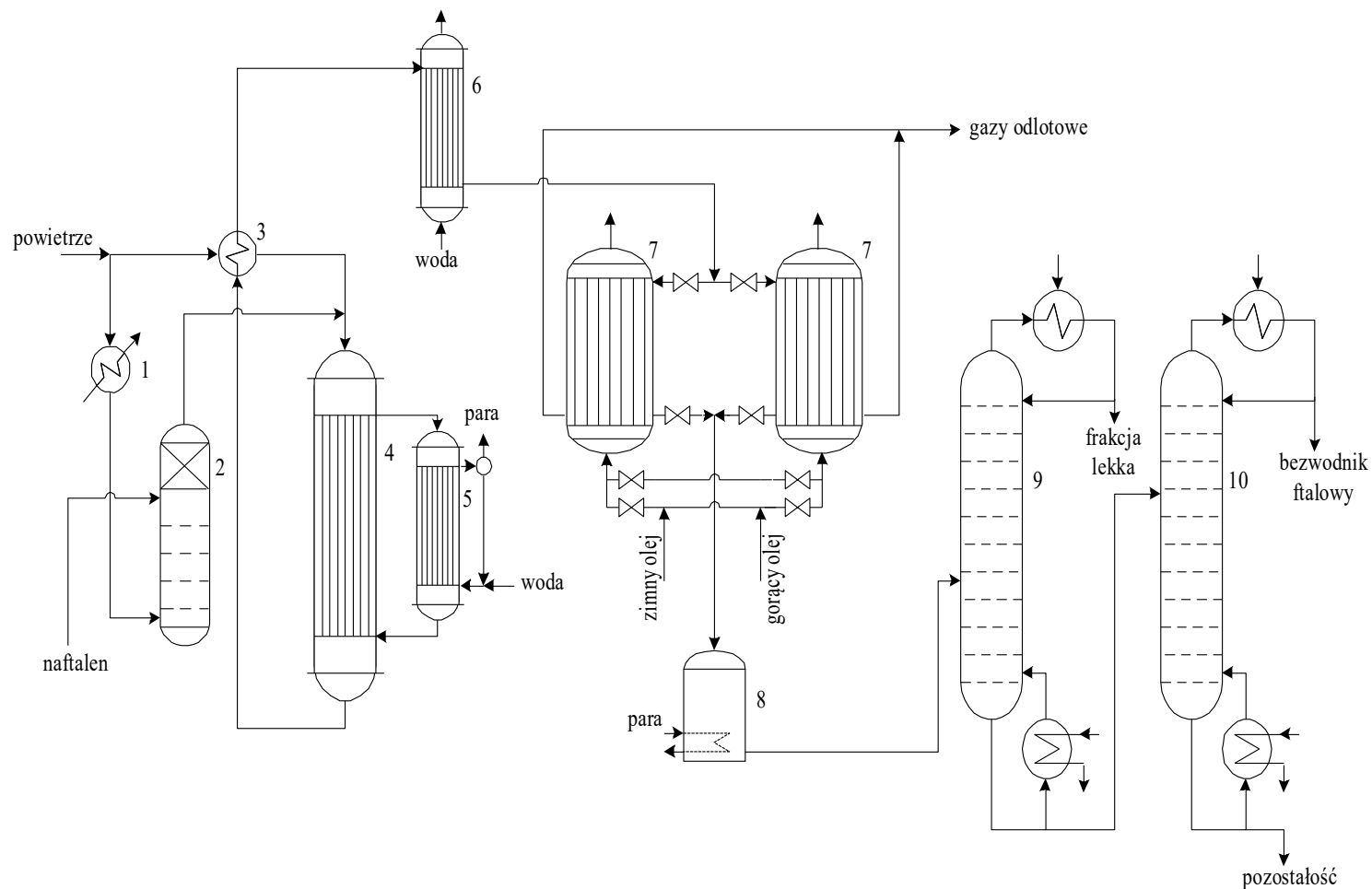
Produkty uboczne: bezwodnik maleinowy, 1,4-naftochinon, wielkocząsteczkowe produkty kondensacji, a także produkty całkowitego utlenienia.



Warunki procesu:

- Czynnik utleniający – powietrze w dużym nadmiarze (50-120 krotnym),
- Stężenie naftalenu w mieszaninie z powietrzem poniżej 1,7 % mol. (poniżej dolnej granicy wybuchowości).

- Metody z katalizatorem w złożu stacjonarnym:
 - niskotemperaturowa (350-400°C), przy użyciu czystego naftalenu,
 - wysokotemperaturowa (400-550°C), przy gorszym gatunkowo naftalenie,
- Metody z fluidalnym złożem katalizatora (w temperaturze powyżej 370°C).
- Katalizator – V_2O_5/SiO_2 promotorowany np. K_2SO_4 ,
- Selektywność bezwodnika ftalowego wynosi 86-91% (60-74% w metodach wysokotemperaturowych).



Schemat instalacji produkującej bezwodnik ftalowy z naftalenu.

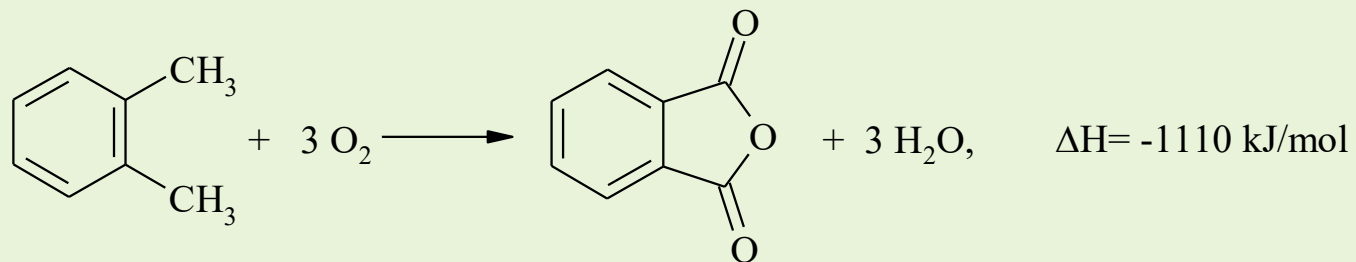
1 – podgrzewacz, 2 – odparowalnik, 3, 6 – wymienniki ciepła, 4 – reaktor, 5 – kocioł-utylicator, 7 – kondensatory, 8 – zbiornik, 9, 10 – kolumny rektyfikacyjne

Utlenianie o-ksylenu (dominujące metody produkcji BF)

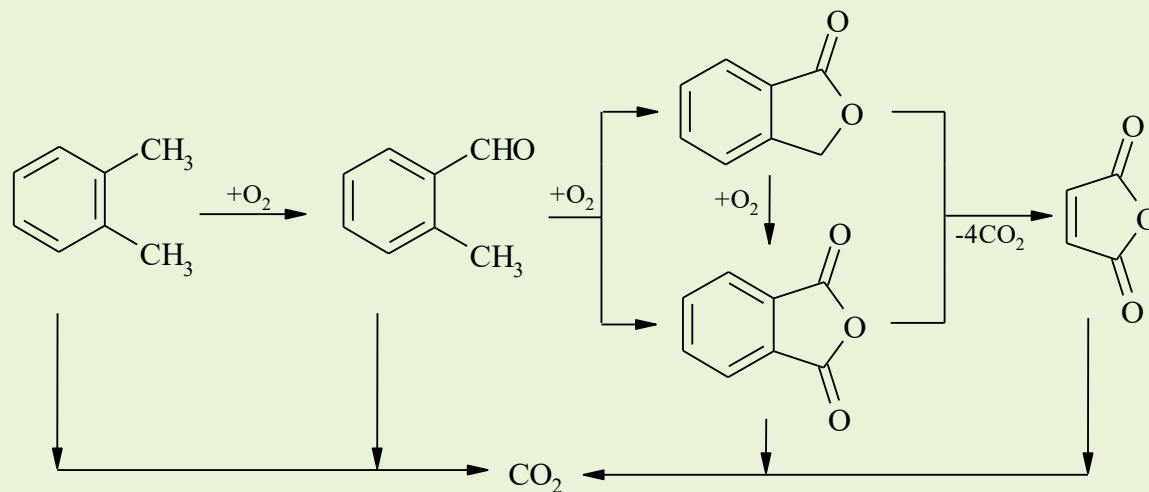
Warianty utleniania o-ksylenu:

- utlenianie w fazie gazowej wobec katalizatora opartego na V_2O_5 w złożu stacjonarny lub fluidalnym,
- utlenianie w fazie ciekłej wobec rozpuszczalnych soli metali jako katalizatorów.

Utlenianie o-ksylenu w fazie gazowej



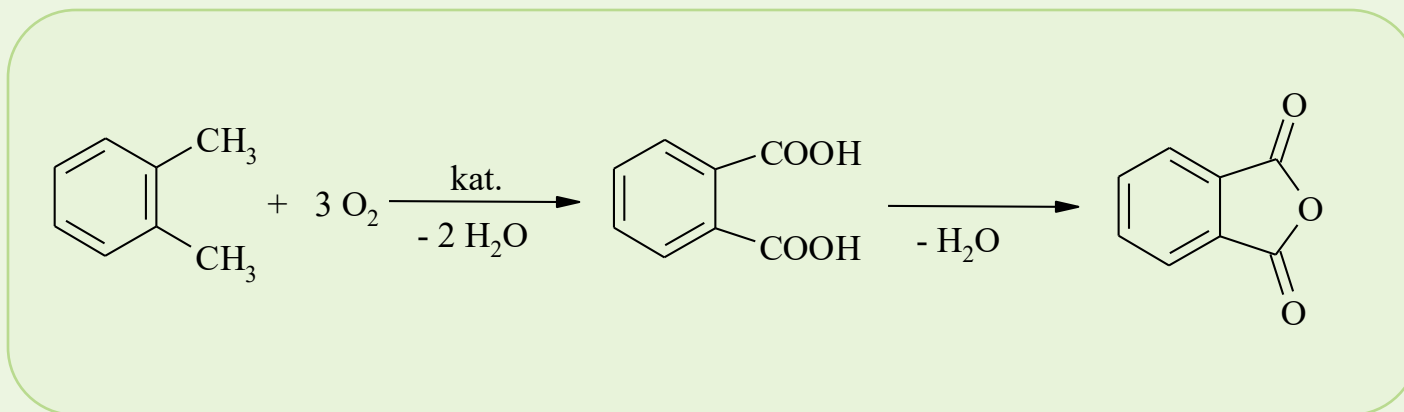
Produkty uboczne:



Warunki procesu:

- reaktory płaszczowo-rurowe, zawierające ok. 10000 – 15000 rur (średnica rurek ok. 25 mm), lub reaktory fluidalne,
- nadmiar powietrza,
- katalizator - V_2O_5 i TiO_2 z promotorami, jak fosforany glinu i cynku; na kulach np. z porcelany, kwarcu albo węgliku krzemu, o gładkiej, ubogiej w pory powierzchni (proces BASF).
- temperatura - 375-410°C.

Utlenianie o-ksylenu w fazie ciekłej (proces Rhône-Progil)



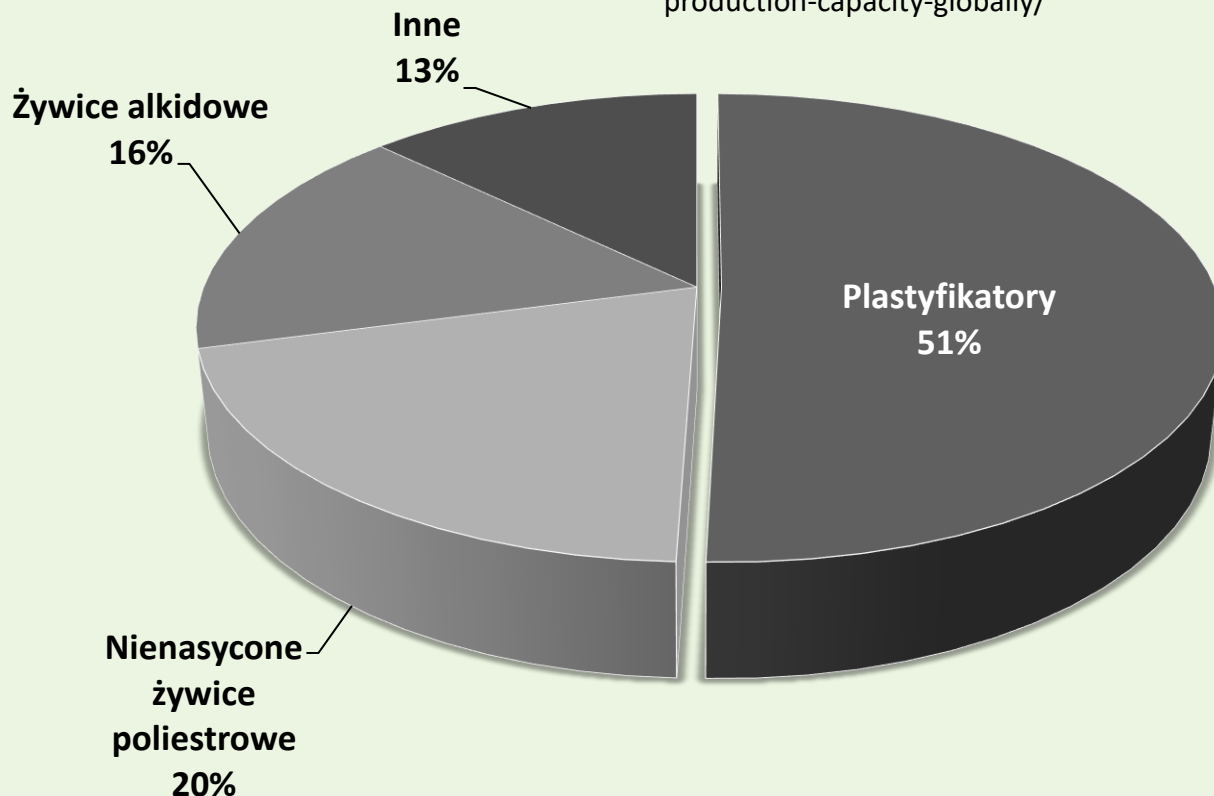
Warunki procesu:

- katalizator - rozpuszczalne octany albo nafteniany Co, Mn lub Mo z dodatkiem kokatalizatorów, zawierających zwykle brom.
- Rozpuszczalnik - kwas karboksylowy, głównie kwas octowy,
- Temperatura - ok. 150°C,
- Ciśnienie – zwiększone,
- Produkt - kwas ftalowy, który wydziela się z roztworu reakcyjnego po oziębieniu w postaci krystalicznego osadu, a następnie odwadnia do bezwodnika i destyluje.
- Selektywność procesu - ok. 90%.

ZASTOSOWANIE BEZWODNIKA FTALOWEGO

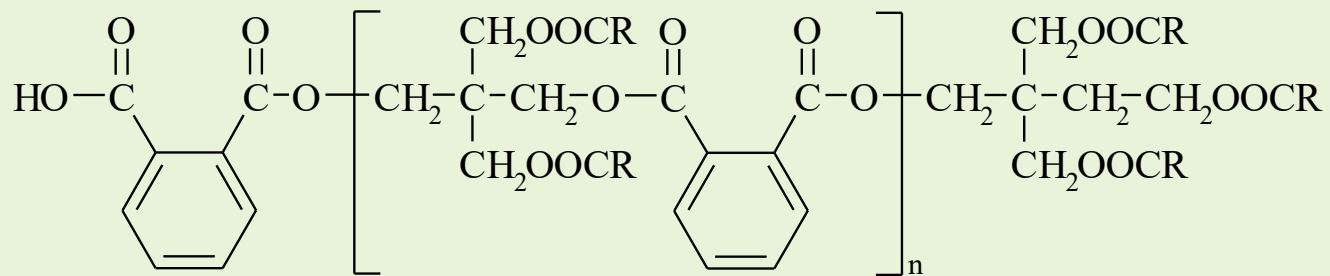
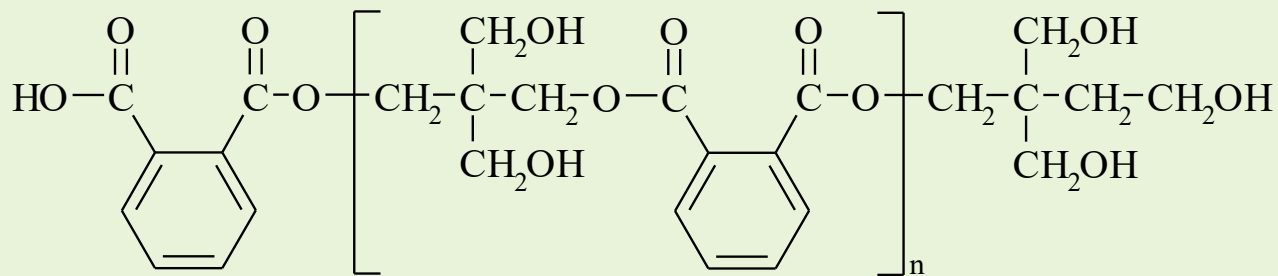
The global production capacity of phthalic anhydride in 2018 amounted to approximately 5.87 million metric tons, and it is projected to slightly increase by 2023 reaching just over six million metric tons.

<https://www.statista.com/statistics/1063138/phthalic-anhydride-production-capacity-globally/>



Struktura zużycia bezwodnika ftalowego w 2010 r. na świecie. **Aktualnie plastyfikatory ftalanowe są częściowo zastępowane odpowiednikami tereftalowymi.**

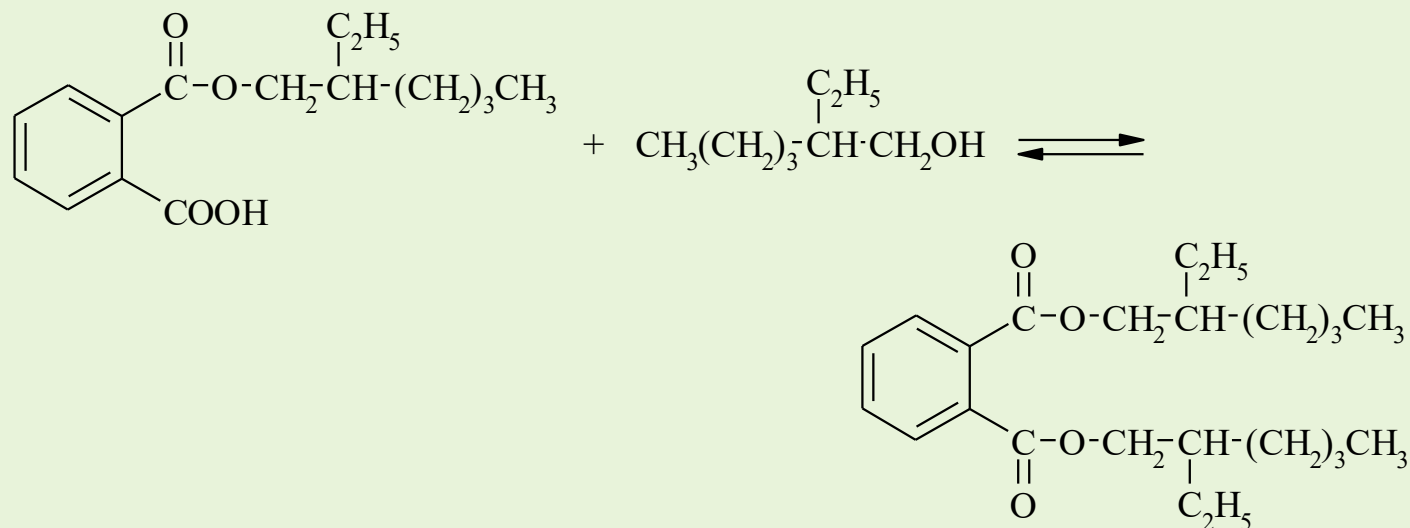
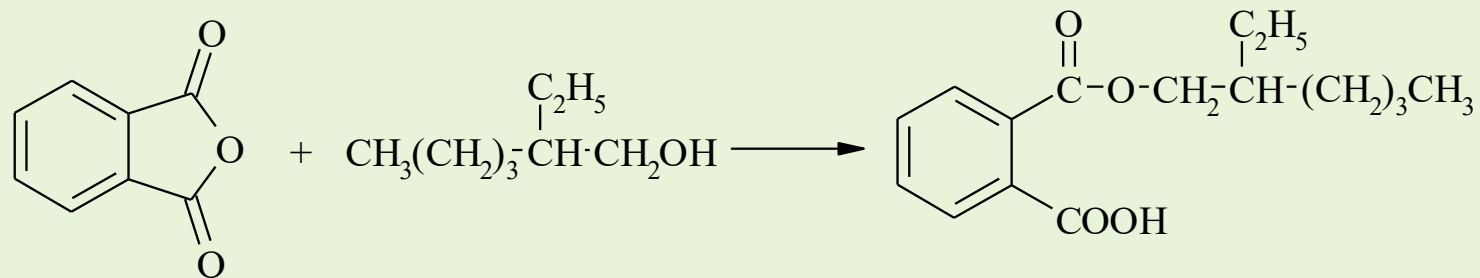
Żywica poliestrowa – pentaftal:



Nienasycone żywice poliestrowe - polikondensaty:

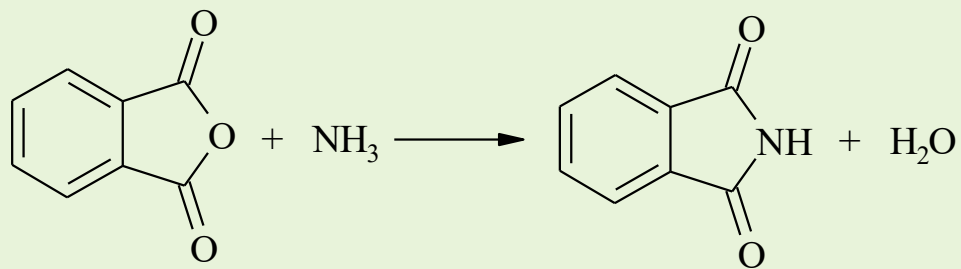
- glikoli (głównie propylenowego i dietylenowego),
- nasyconych kwasów dikarboksylowych lub ich bezwodników (bezwodnik ftalowy, kwas adypinowy),
- nienasyconych kwasów dikarboksylowych lub ich bezwodników (bezwodnik maleinowy i kwas fumarowy).

Plastyfikatory ftalowe – estry kwasu ftalowego z alkoholami C₄-C₁₀
Ftalan di(2-etyloheksylowy) (firma BASF)

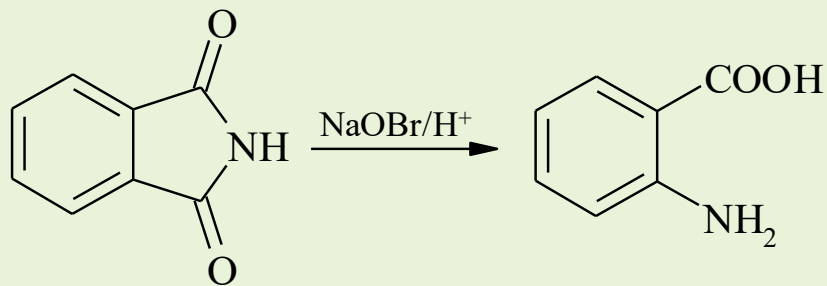


Inne kierunki zastosowania bezwodnika ftalowego

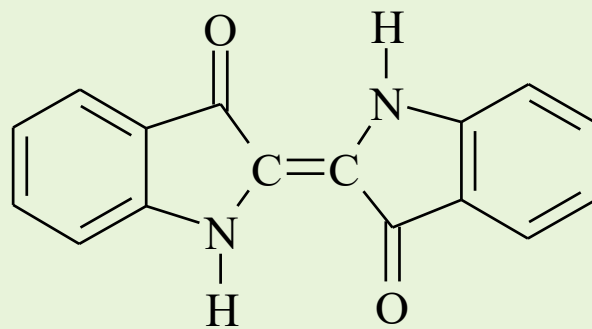
Ftaliimid



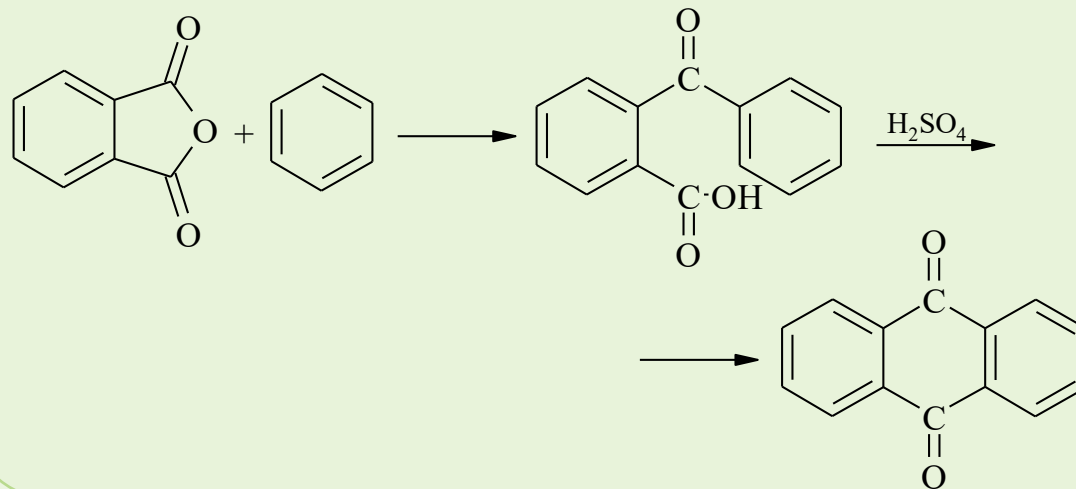
Kwas antranilowy



Indygo – ciemnoniebieskiego barwnika kadziowego, wykorzystywanego głównie do barwienia włókien roślinnych



Atrachinon - półprodukt do syntezy wielu barwników oraz nadtlenku wodoru.



Produkcja bezwodnika ftalowego i jego pochodnych w Polsce produkowany był przez **Zakłady Azotowe "Kędzierzyn" w Kędzierzynie-Koźlu (instalacja wyłączona)**

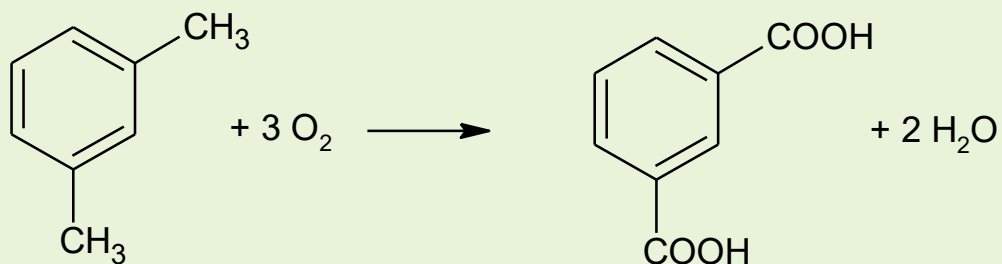
Bezwodnik ftalowy z naftalenu:

- Instalacja pilotowa - bezwodnik ftalowy z naftalenu - lata 1950-52 roku.
- Instalacja techniczna w 1955 r. - Bezwodnik Ftalowy I (poziom technologiczny, odpowiadał technologii z lat trzydziestych; ; w prawie nie zmienionej postaci pracowała do 1981 r.).
- Bezwodnik Ftalowy II - 1961 r.; reaktory fluidalne;**
- Bezwodnik Ftalowy III - 1972 r.

Od 1976 r. w jednym z ciągów utleniania zmieniono **surowiec na o-ksylen** o czystości średnio 97%, wytwarzany w Mazowieckich Zakładach Rafineryjnych i Petrochemicznych w Płocku.

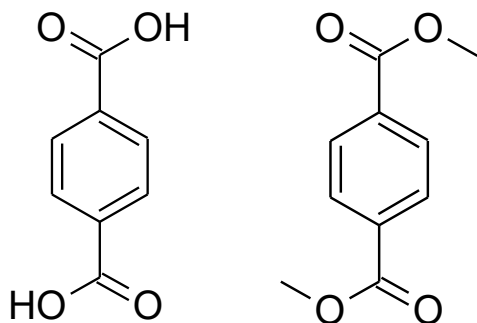
UTLENIE NIE m-KSYLENU DO KWASU IZOFTALOWEGO

Kwas izoftalowy (m-ftalowy) jest ciałem stałym o temperaturze topnienia 345-348°C. Sublimuje bez rozkładu. Rozpuszcza się w alkoholach, lodowatym kwasie octowym, ograniczenie rozpuszcza się w gorącej wodzie, a praktycznie nie rozpuszcza się w benzenie i eterze naftowym.

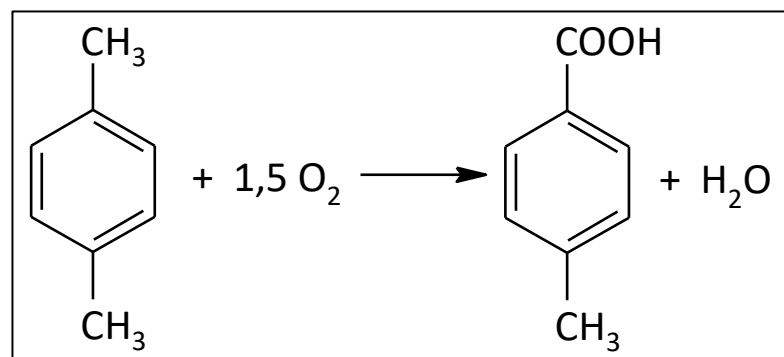


UTLENIE NIE p-KSYLENU DO KWASU TEREFALOWEGO I JEGO ESTRU DIMETYLOWEGO

Kwas tereftalowy jest bardzo trudno rozpuszczalny w gorącej wodzie (100°C) i zwykle używanych rozpuszczalnikach organicznych, jest również nietopliwy. Z tych powodów długo nie można było go otrzymać na wielką skalę o czystości wymaganej dla polikondensacji.



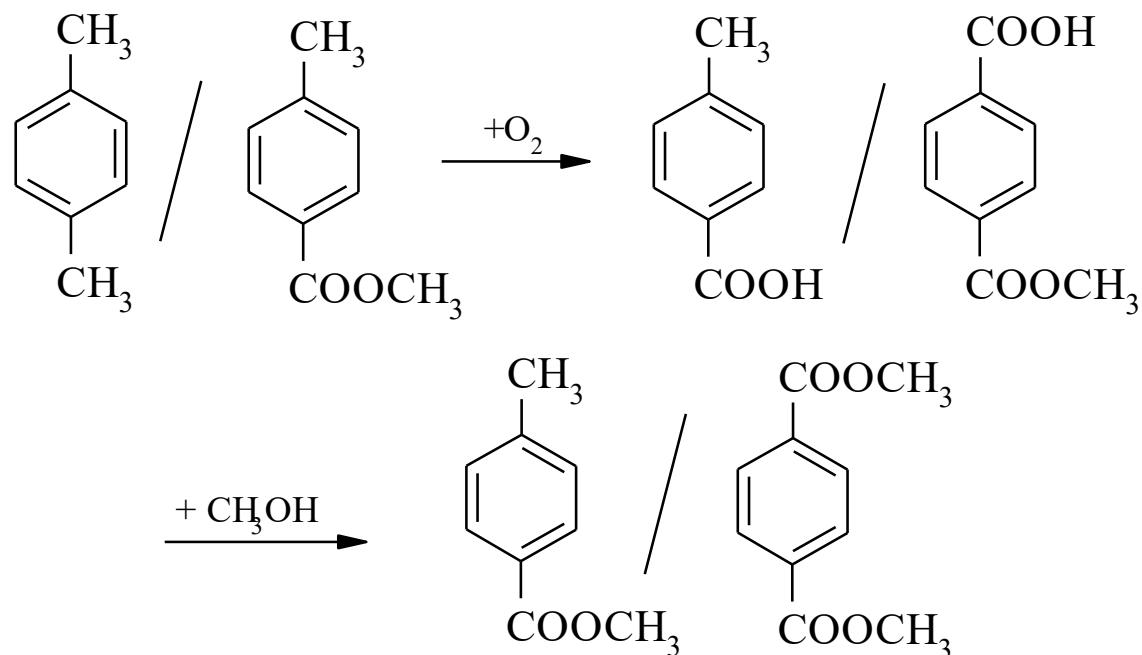
Utrudnione dalsze utlenienie do kwasu tereftalowego



Utlenienie dwóch grup metylowych jest możliwe :

- ❑ po estryfikacji grupy karboksylowej kwasu *p*-toluiloowego w dodatkowym etapie metanolem (*Witten, Hercules, California Research*), dalsze utlenianie prowadzi się w środowisku metanolu, co powoduje równoczesną estryfikację kwasu (*BASF, Montecatini, Du Pont*),
- ❑ utleniając równocześnie substancję pomocniczą, która może wytwarzać wodoronadtlenki w procesie kooksydacji (współutlenienia). Jako współutleniacze wykorzystano aldehyd octowy (*Eastman-Kodak*), paraaldehyd (*Toray Industries*), etylometyloketon (*Mobil Oil i Olin Mathieson*).
- ❑ po zastosowaniu razem z solą Mn lub Co (katalizatory) związków bromu (*Amoco i IFP*), jako promotorów (kokatalizatorów),

TEREFTALAN DIMETYLU – metoda Witten

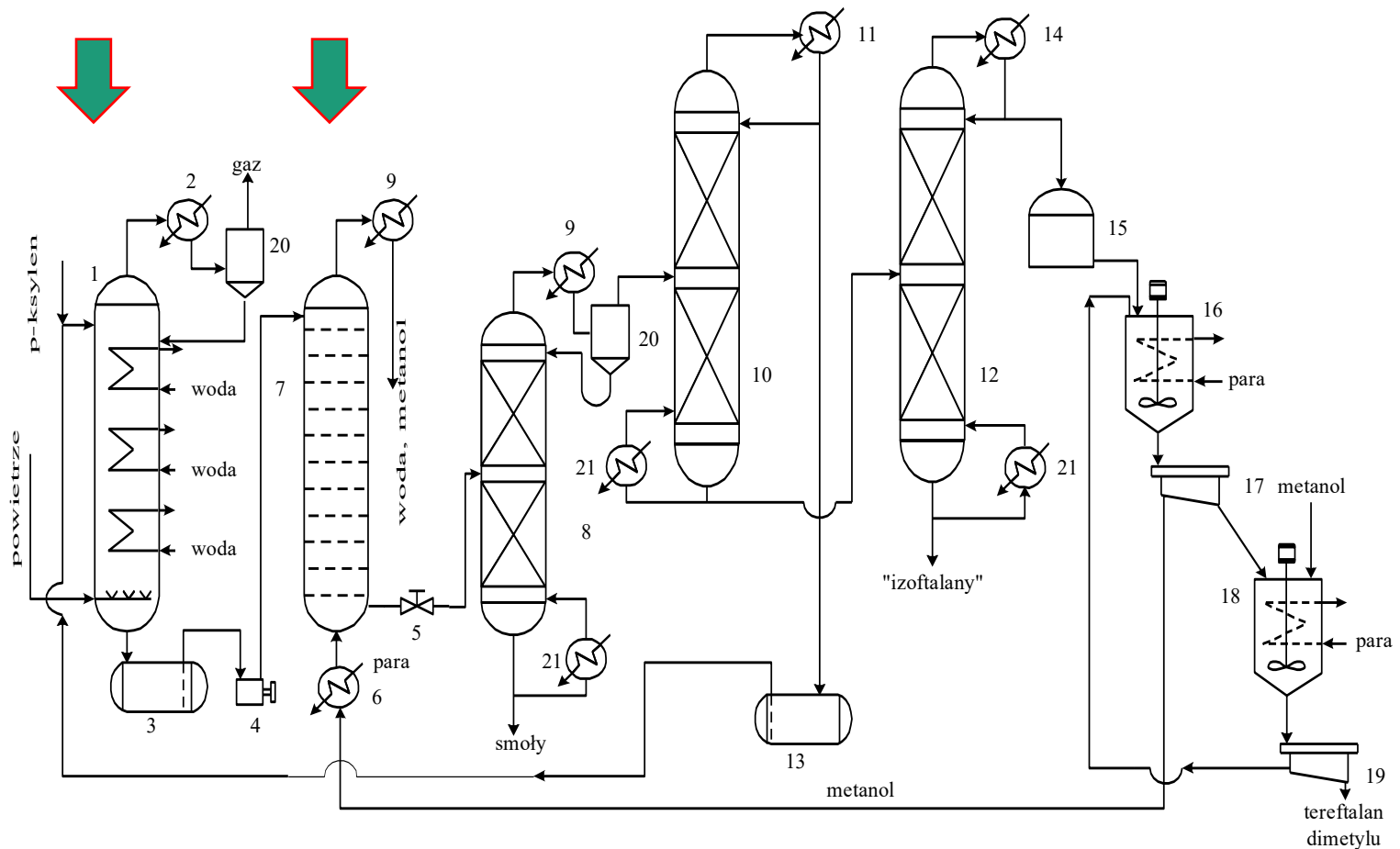


I etap

- czynnik utleniający – powietrze,
- temperatura - 140-160°C,
- ciśnienie - 0,4-0,8 MPa,
- utlenianie w fazie ciekłej,
- katalizator - organiczne sole Co lub Mn,
- produkt uboczny - mała ilość kwasu tereftalowego

II etap - estryfikacja

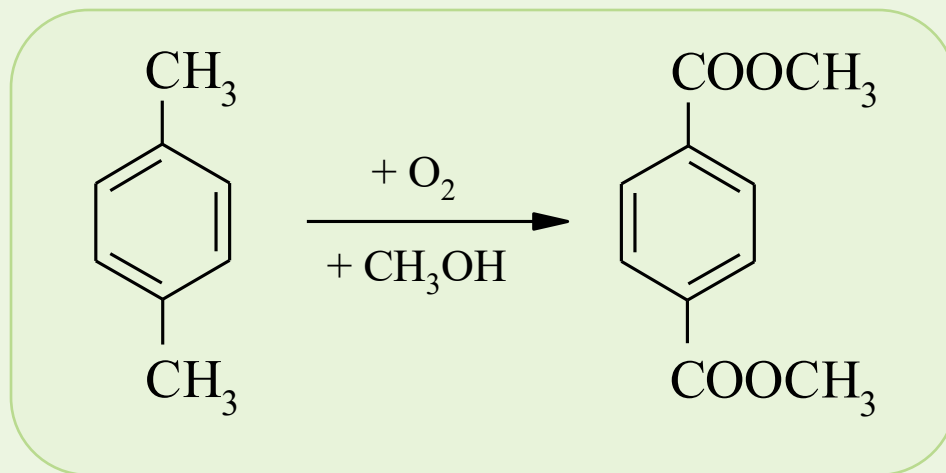
- temperatura - 250-280°C,
- ciśnienie - 2-2,5 MPa,
- bez udziału katalizatora,
- selektywność do tereftalanu dimetylu ok. 85% (*p*-ksylen) i ok. 80% (w przeliczeniu na metanol).



Schemat instalacji produkującej tereftalan dimetylu.

1 – kolumna utleniania, 2 – chłodnica, 3, 13, 15 – zbiorniki, 4 – pompa, 5 – zawór redukujący, 6 – podgrzewacz, **7 – kolumna estryfikacyjna**, 8 – wyparka, 9 – kondensatory, 10, 12 – kolumny rektyfikacyjne, 11,14 – kondensatory-deflegmatory, 16, 18 – autoklawy, 17, 19 – wirówki, 20 – separatory, 21 – podgrzewacze

Modyfikacja metody przez firmy *BASF* i *Du Pont*



- reaktor pracujący na zasadzie przeciwprądu, z góry *p*-ksylen i zwrrotnie produkty częściowego utleniania, a od dołu metanol i powietrze.
- czas utleniania - 22 godziny,
- temperatura - 100-250°C,
- ciśnienie - 0,5-2 MPa,
- katalizator - sole kobaltu,
- selektywność do surowego tereftalanu dimetylu wynosi ok. 90% (w przeliczeniu na *p*-ksylen) i 60-70% (w przeliczeniu na metanol).

Kooksydacja *p*-ksylenu z aldehydami i ketonami

Stosowane kooksydanty:

- acetaldehyd (*Tennessee Eastman*),
- trimer acetaldehydu – paraldehyd (od 1971 r. w Japonii w procesie firmy *Toray*),
- formaldehyd,
- etylometyloketon (proces *Mobil*, zaniechany w 1975 r.).

Warunki metody Toray:

- p*-ksylen razem z paraaldehydem i roztworem octanu kobaltu poddawane są na szczyt kolumny barbotażowej, w której od dołu jest wprowadzane powietrze,**
- utlenianie w roztworze kwasu octowego,
- temperatura 100-140°C, ciśnienie 3 MPa,
- zawiesina surowego kwasu tereftalowego w kwasie octowym oddzielana i oczyszczana lub jest estryfikowana metanolem do tereftalanu dimetylowego,
- oczyszczanie surowego kwasu tereftalowego przez przemywanie świeżym kwasem octowym, odwirowaniu i suszeniu,**
- selektywność procesu wynosi ok. 97% (w przeliczeniu na *p*-ksylen),
- kwas octowy jako produkt uboczny współutleniania paraaldehydu wykorzystany do innych zastosowań

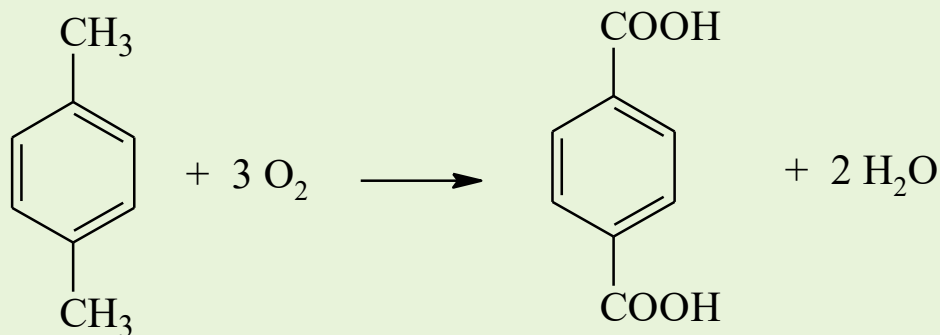
Warunki metody Tennessee Eastman:

- Współutlenienie *p*-ksylenu z acetaldehydem octowym w roztworze kwasu octowego i w obecności soli kobaltu**
- temperatura - 110-130°C, ciśnienie 1,5 MPa,
- wydajność kwasu tereftalowego ok. 97%.

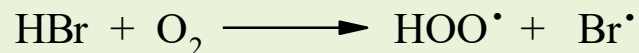
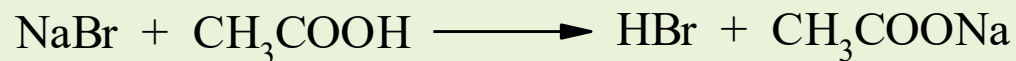
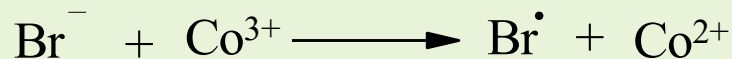
Warunki metody Mobil:

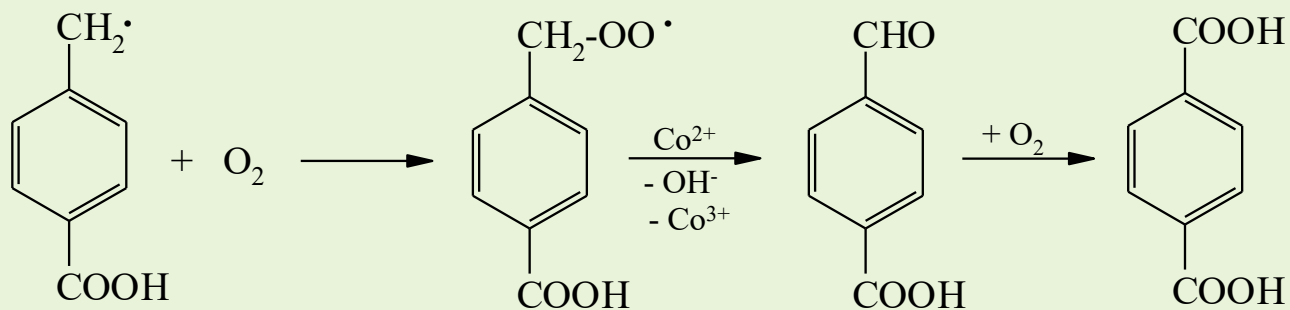
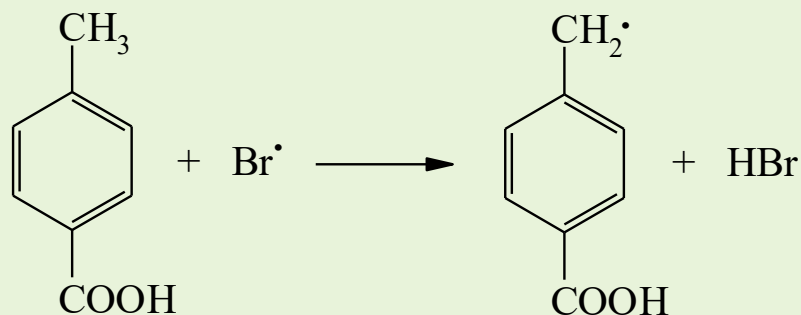
- utlenianie *p*-ksylenu w roztworze kwasu octowego w obecności octanu kobaltu i etylometyloketonu,
- temperatura - 130°C,
- ciśnienie - 1,7 MPa,
- czynnik utleniający – tlen,
- wydajność surowego kwasu tereftalowego w przeliczeniu na *p*-ksylen ok. 94%,
- oczyszczanie kwasu w dwóch etapach: w pierwszym – stosuje się przemywanie kwasem octowym na gorąco, w drugim surowy kwas tereftalowy jest poddawany sublimacji, a następnie uwodornieniu katalitycznemu**

Utlenianie *p*-ksylenu metodą Amoco

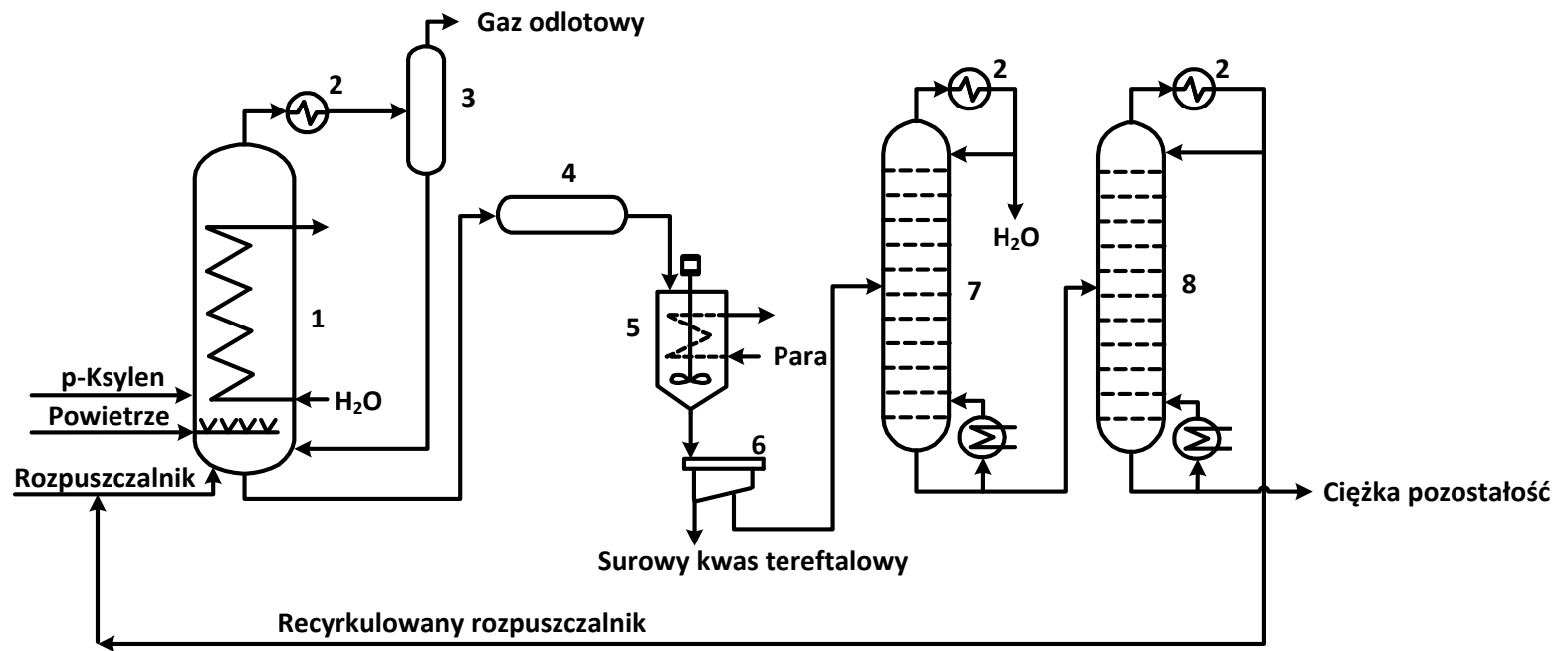


- ❑ układ katalityczny: Co, Mn i Br,
- ❑ kokatalizator: mieszanina NH₄Br i tetrabromoetanu (często katalizator wprowadza się w postaci CoBr₂ albo MnBr₂; czasami stosuje się NaBr)





- ❑ temperatura - 190-205°C,
- ❑ ciśnienie - 1,5-3 MPa,
- ❑ aparatura wyłożona tytanem,
- ❑ konwersja *p*-ksylenu przekracza 95%, przy tym selektywność przereagowania do kwasu tereftalowego osiąga ponad 90%.



Schemat instalacji produkującej kwas tereftalowy metodą *Amoco*.

1 – reaktor utleniania, 2 – chłodnice, 3 – separator, 4 – zbiornik pośredni, 5 – autoklaw, 6 – wirówka, 7, 8 – kolumny rektyfikacyjne

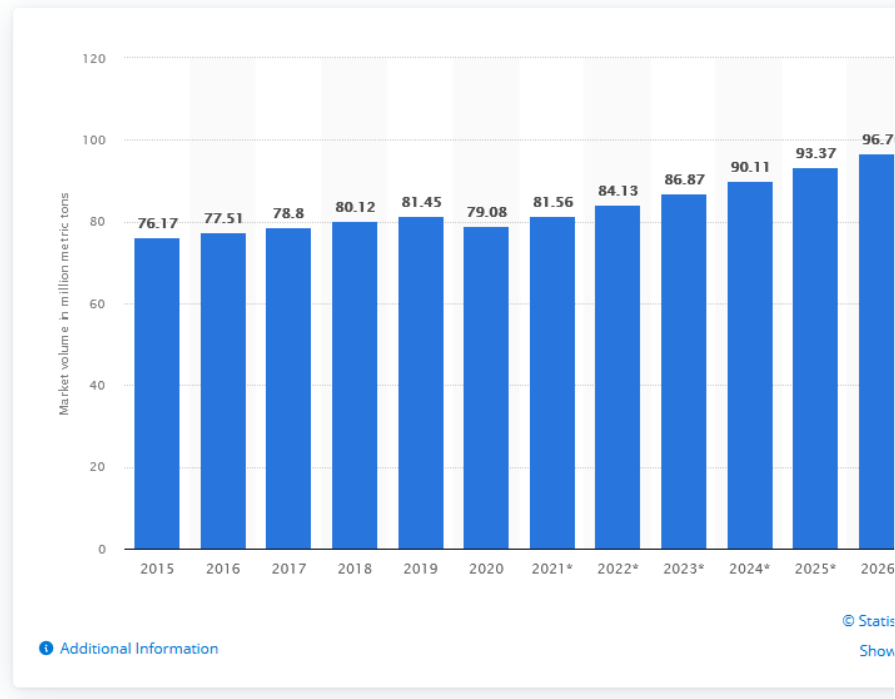
Oczyszczanie

- rozpuszczenie w wodzie w temperaturze 225-275°C, pod zwiększonym ciśnieniem,
- uwodornienie przeszkadzającego w procesie polikondensacji aldehydu 4-karboksybenzoesowego do kwasu *p*-toluiloowego w obecności katalizatora palladowego na węglu aktywnym,
- ochłodzenie roztworu i wykrystalizowanie kwas tereftalowego o czystości 99,99%.

In 2020, the market volume of purified terephthalic acid (PTA) worldwide amounted to nearly 79.1 million metric tons. It is forecast that the market volume of this organic compound will grow to around 96.8 million metric tons worldwide in the year 2026.

Market volume of purified terephthalic acid worldwide from 2015 to 2020, with a forecast for 2021 to 2026

(in million metric tons)



<https://www.statista.com/statistics/1245249/purified-terephthalic-acid-market-volume-worldwide/>

World's Top 10 Manufactures of PTA

World Top 10 Manufacturers of PTA

(In 2016)

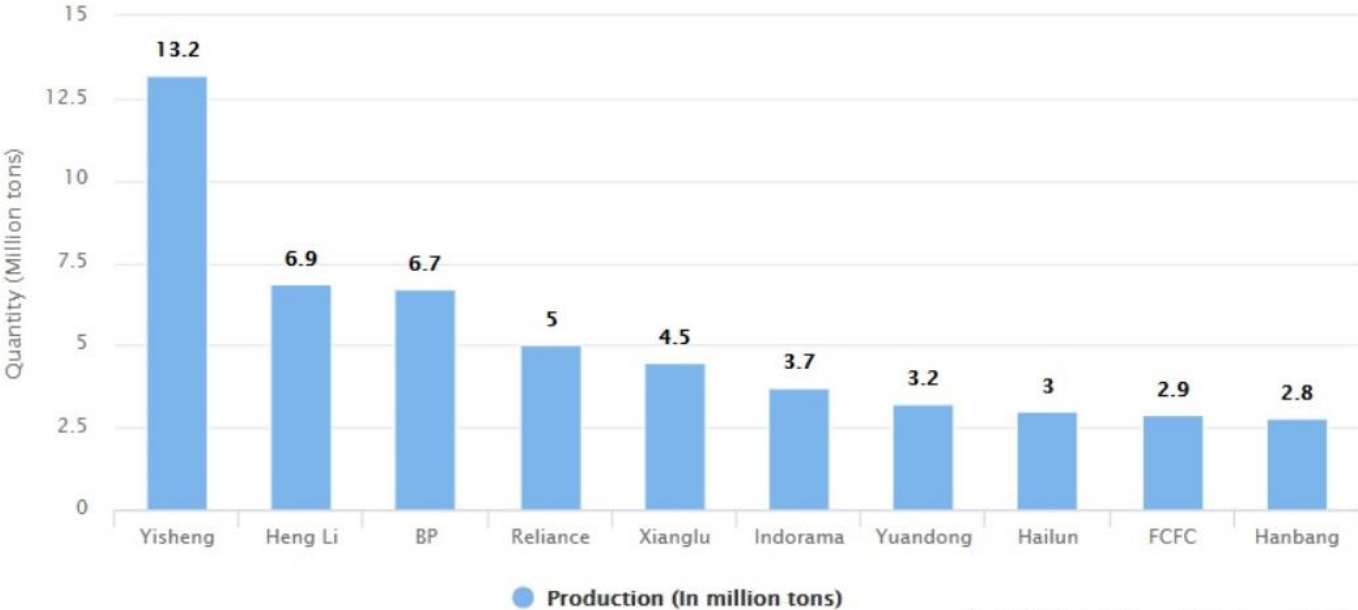
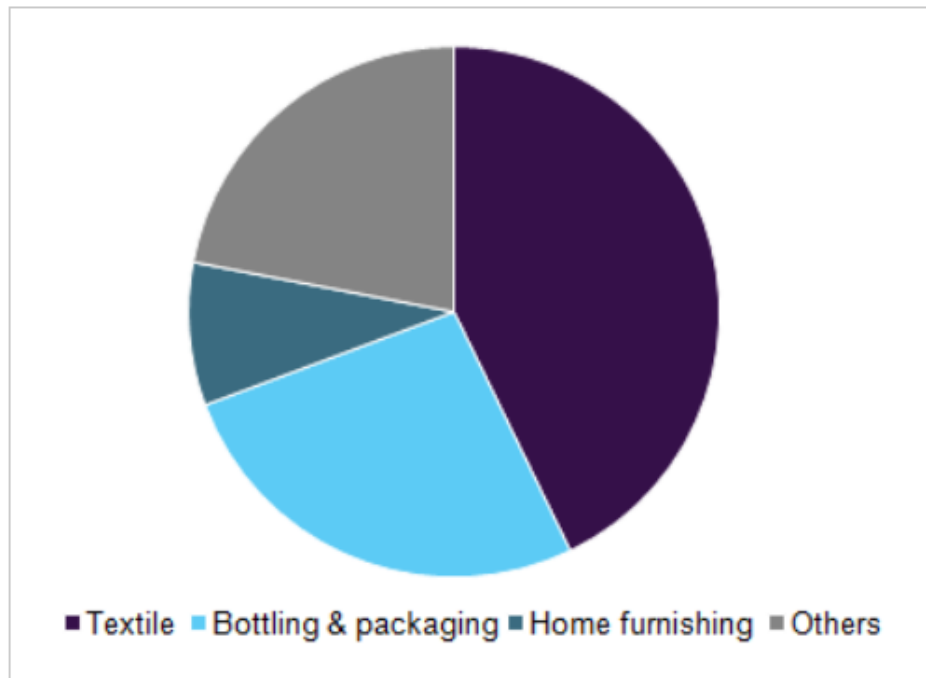


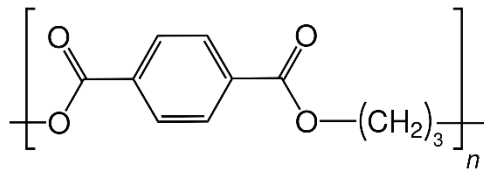
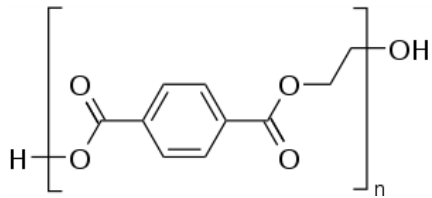
Fig. 3 | PlasticsInsight.com | Data Source: Industry

ZASTOSOWANIE KWASU TEREFTALOWEGO I TEREFTALANU DIMETYLOWEGO

Global purified terephthalic acid (PTA) market volume by end-use, 2016 (%)



ZASTOSOWANIE KWASU TEREFTALOWEGO I TEREFTALANU DIMETYLOWEGO

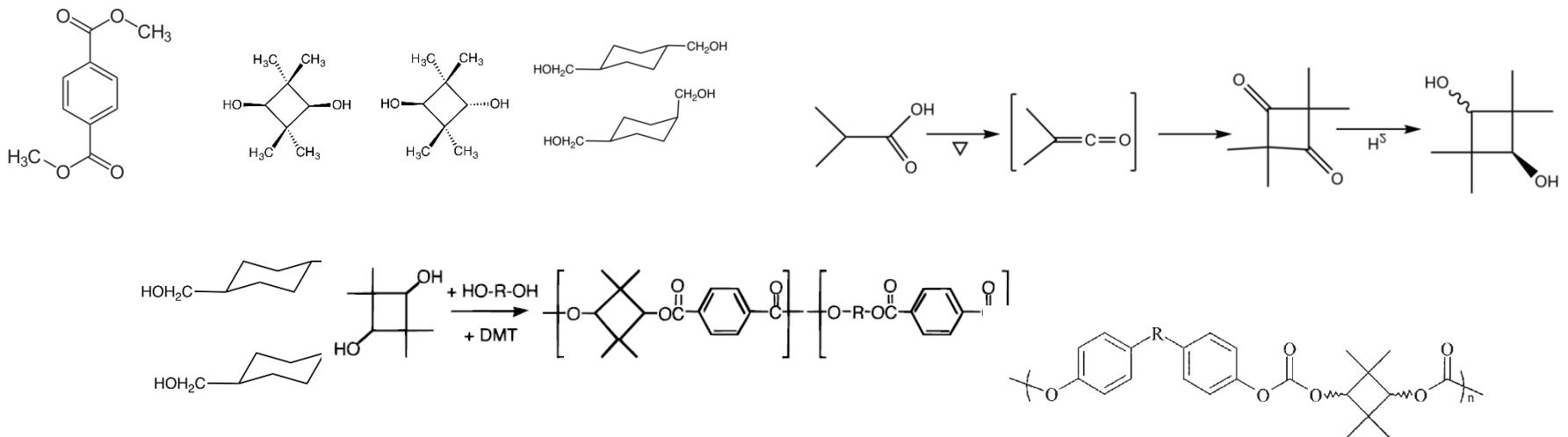


poly(ethylene tereftalate)

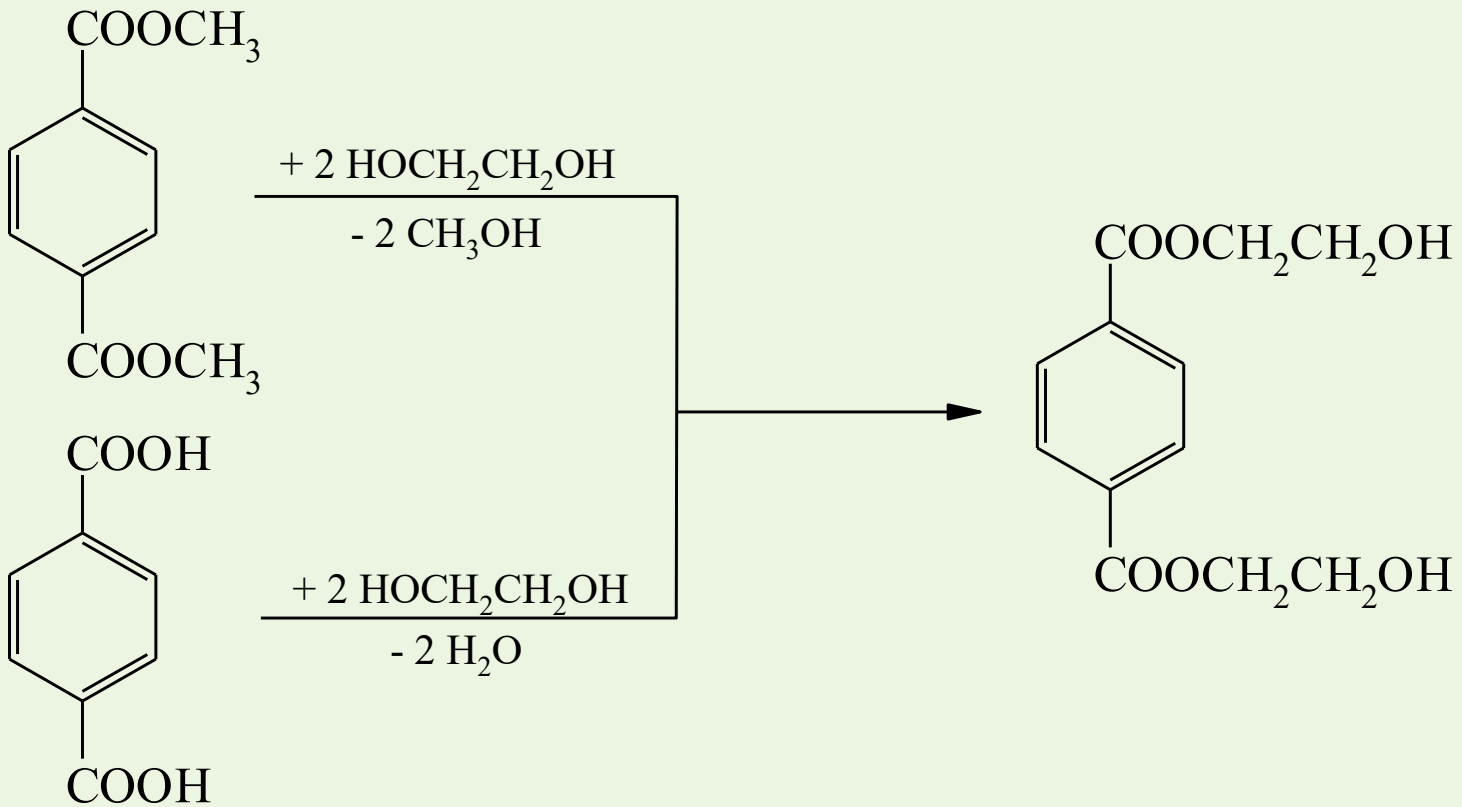
poly(trimethylene tereftalate)

poly(buthylene tereftalate)

Tritan - a copolymer made from three monomers: **dimethyl terephthalate (DMT)**, cyclohexanedimethanol (CHDM), and 2,2,4,4-tetramethyl-1,3-cyclobutanediol (CBDO). Produced by Eastman Chemical Company since 2007. It is a transparent polymer material created to replace the classic polycarbonate based on Bisphenol A (BPA).



Poli(tereftalan glikolu etylenowego) (poli(tereftalan etylen)) - do wyrobu włókien syntetycznych i tworzyw termoplastycznych



Etoksylowanie kwasu tereftalowego

- faza ciekła bez rozpuszczalnika,
- temperatura - 90-130°C,
- ciśnienie - 2-3 MPa,
- katalizatory zasadowe – aminy lub czwartorzędowe sole alkiloamoniowe

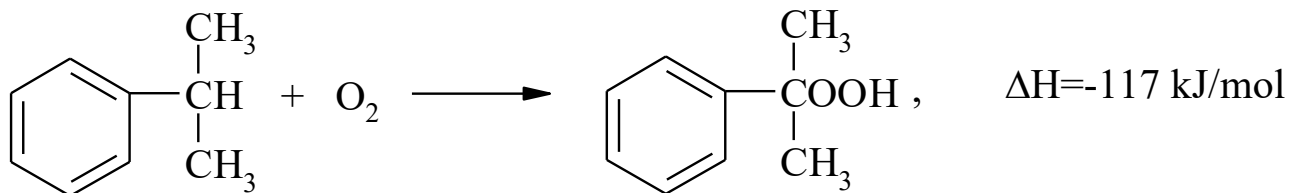
Utlenianie kumenu (metoda kumenowa)

Odkryta w 1943 r. w Niemczech przez *Hocka* i *Langa*

Etapy otrzymywania fenolu:

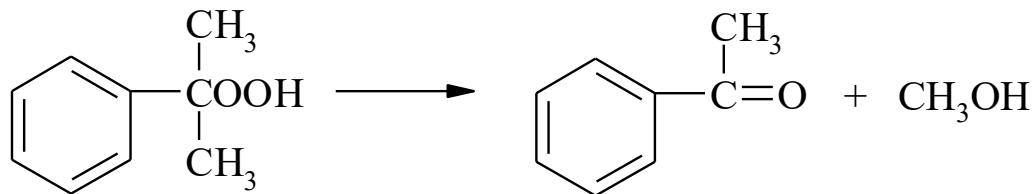
- alkilowanie benzenu za pomocą propylenu do kumenu,
- utlenianie kumenu za pomocą tlenu cząsteczkowego (z powietrza) do wodoronadtlenku kumenu,**
- rozkład wodoronadtlenku kumenu za pomocą silnych kwasów do fenolu i acetonu.

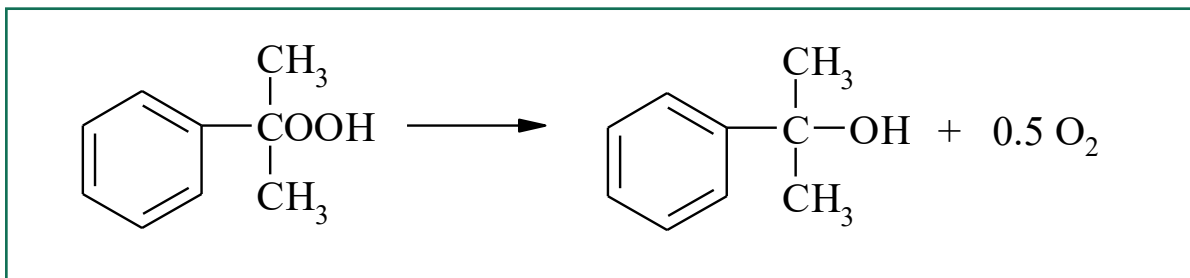
Utlenianie kumenu do wodoronadtlenku kumenu



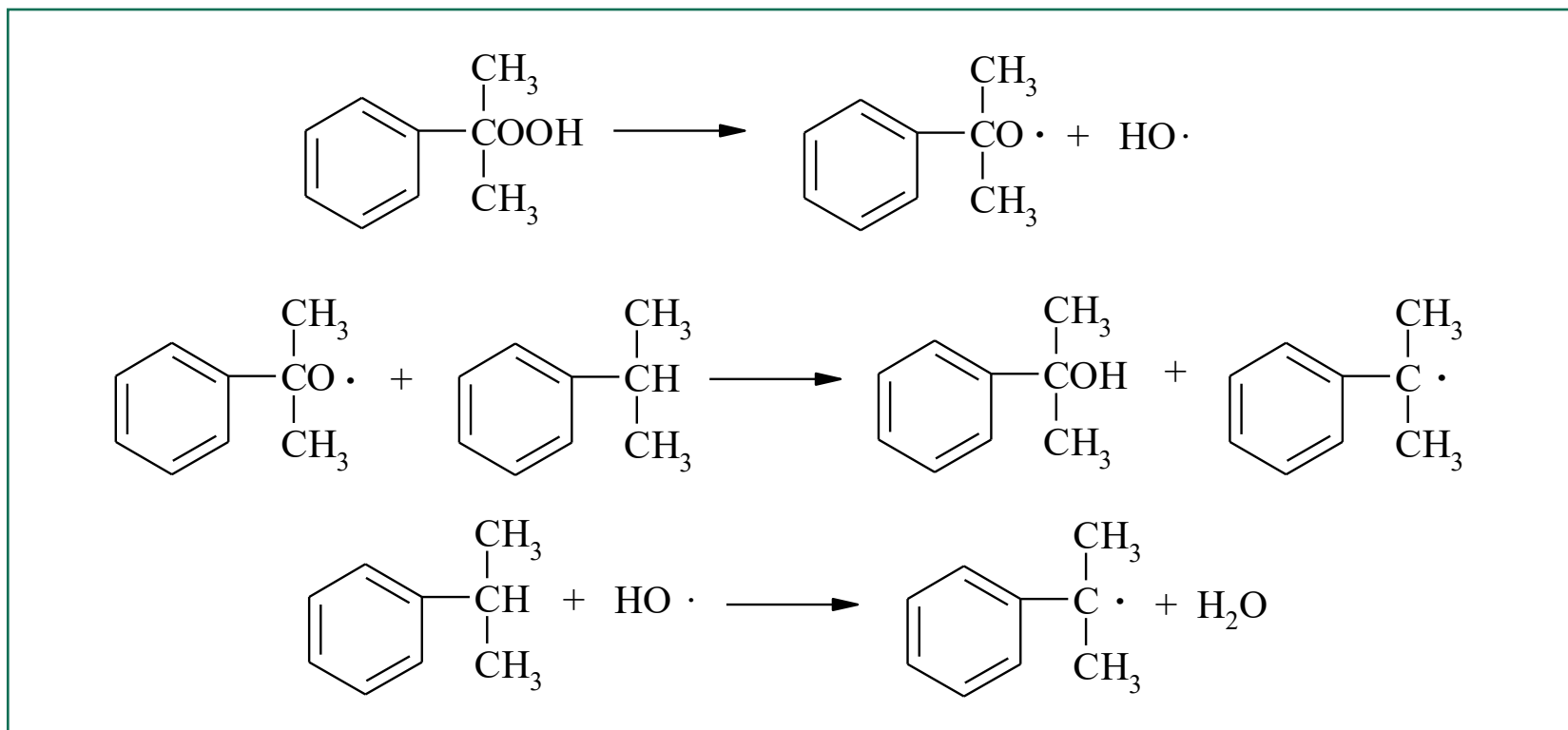
- na ogół bez katalizatora z dodatkiem nadtlenu;** substancje przyspieszające utlenienie - CaCO_3 , HCOONa , sole metali o zmiennej wartościowości (np. sole Fe, Co, Ni, Mn).
- stabilizator - niewielka ilość ługu sodowego
- pH=8,5-10,5.**
- surowy kumen oczyszczony z domieszek (przede wszystkim od związków siarki),
- temperatura - $110\text{-}130^\circ\text{C}$ (przy dalszym zwiększaniu temperatury wydajność maleje).

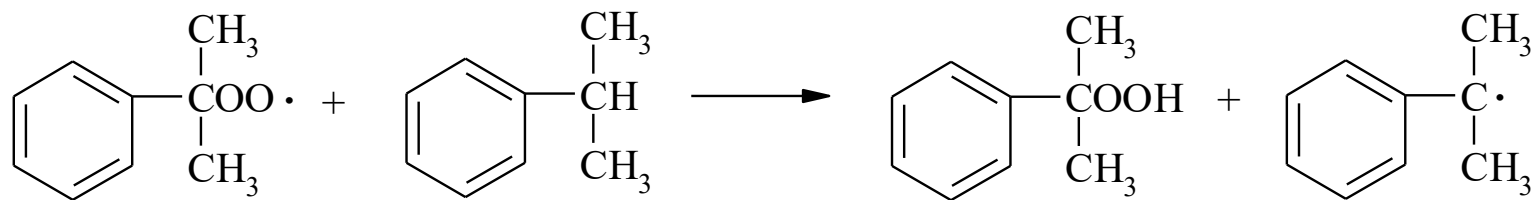
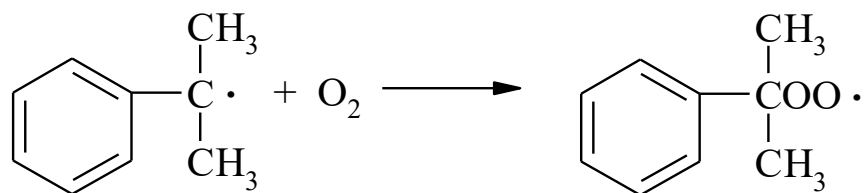
Produkty uboczne:



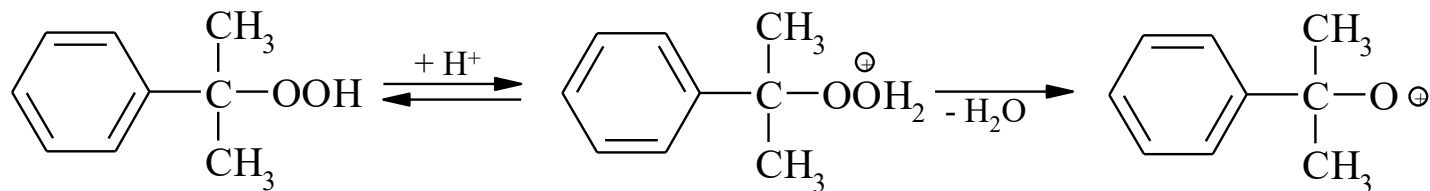


Mechanizm autokatalitycznej reakcji utleniania

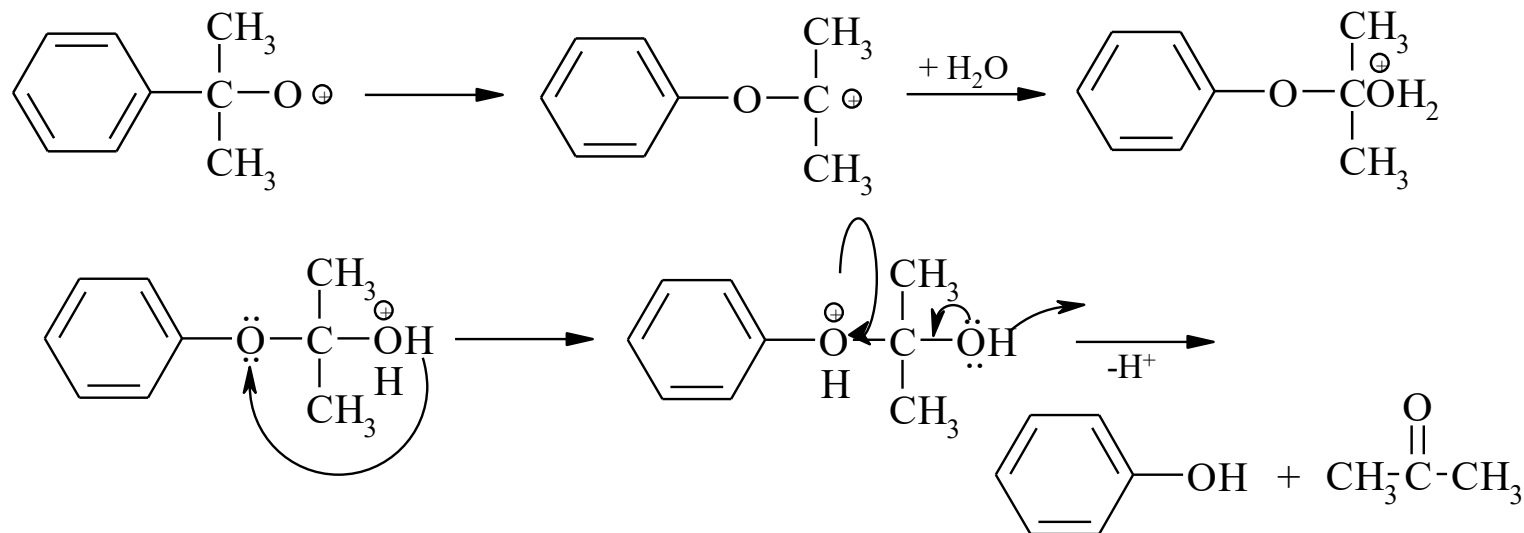




Rozkład wodoronadtlenku kumenu do fenolu i acetonu



Grupa fenylova ulega przegrupowaniu:



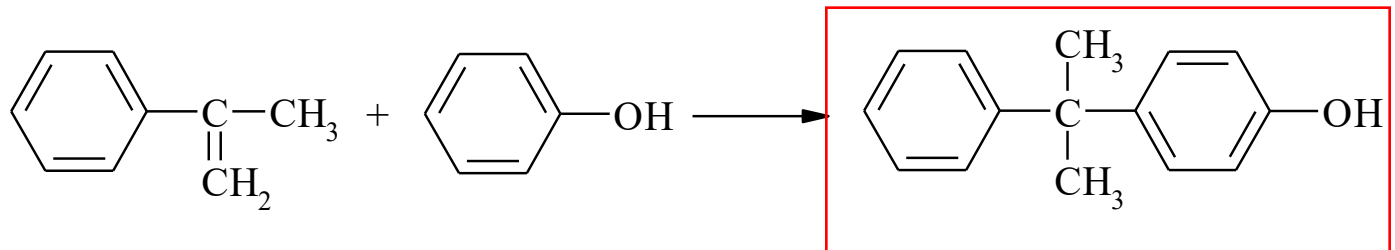
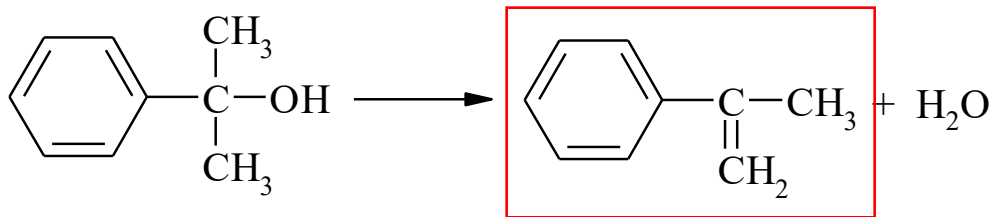
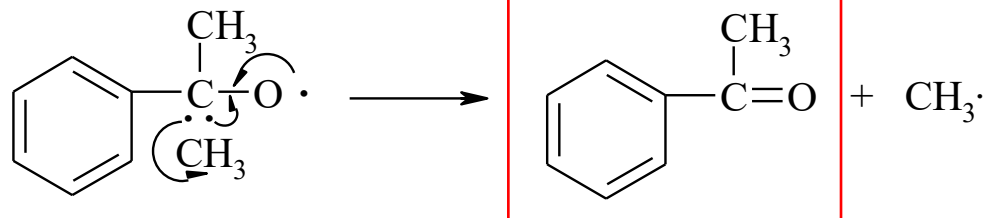
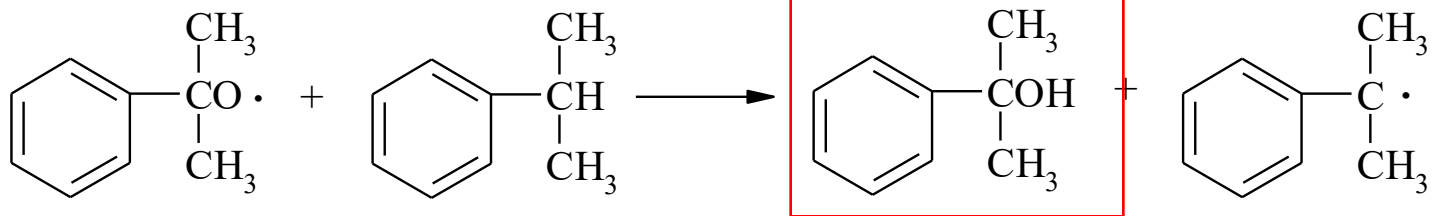
- ❑ rozkład wodorotlenku izopropylobenzenu za pomocą stęż. H_2SO_4 (dodatek 0,02-0,1%),
- ❑ temperatura - 30-60°C.

Firma Mistui Chemicals opracowała proces, w którym aceton powstający ubocznie przy procesie produkcji fenolu jest uwodorniany do alkoholu izopropylowego, który z kolei jest odwadniany do propylenu, a ten może być zawrócony do procesu alkilowania.

Produkty uboczne syntezy fenolu metodą kumenową:

- związki aromatyczne, zawierające szkielet kumenowy,**
- pochodne acetonu,**
- związki różne.**

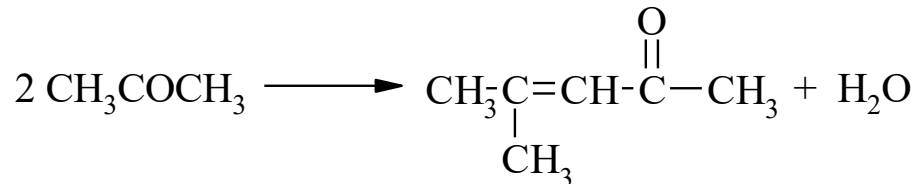
Ad. 1. dimetylofenylometanol i acetofenon, pochodzące z utlenienia utworzonych w reakcji rodników kumoksylowych.

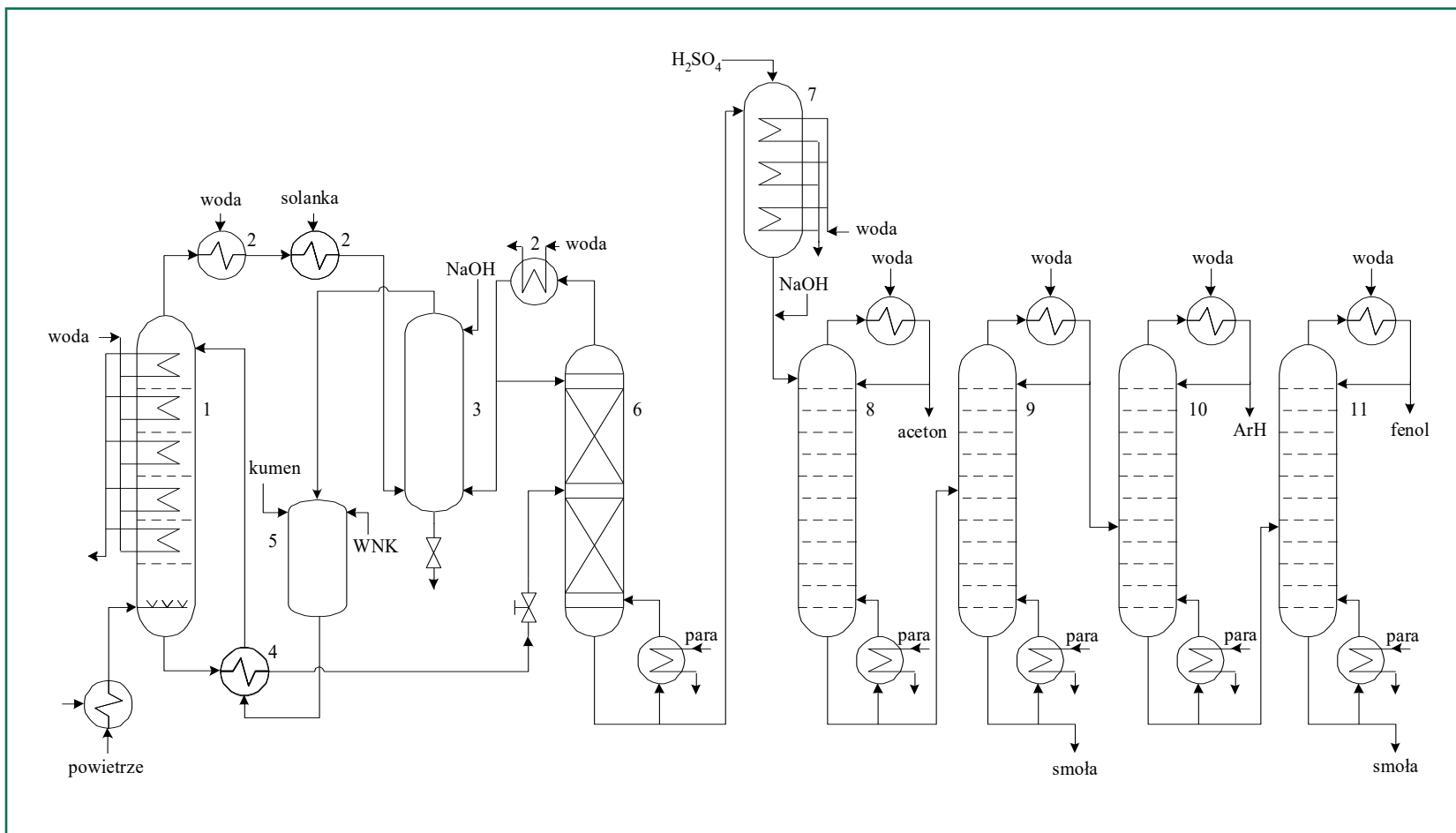


Inne ważne produkty uboczne z aromatycznym szkieletem kumenowym:

- ❑ dikumyl, nadtlenek dikumylu i jego pochodne oraz 2-fenylo-1-buten i 2-fenylo-2-buten.

Ad.2. tlenek mezytylu i hydroksyaceton.





Rys. Schemat instalacji produkującej fenol i aceton metodą kumenową.

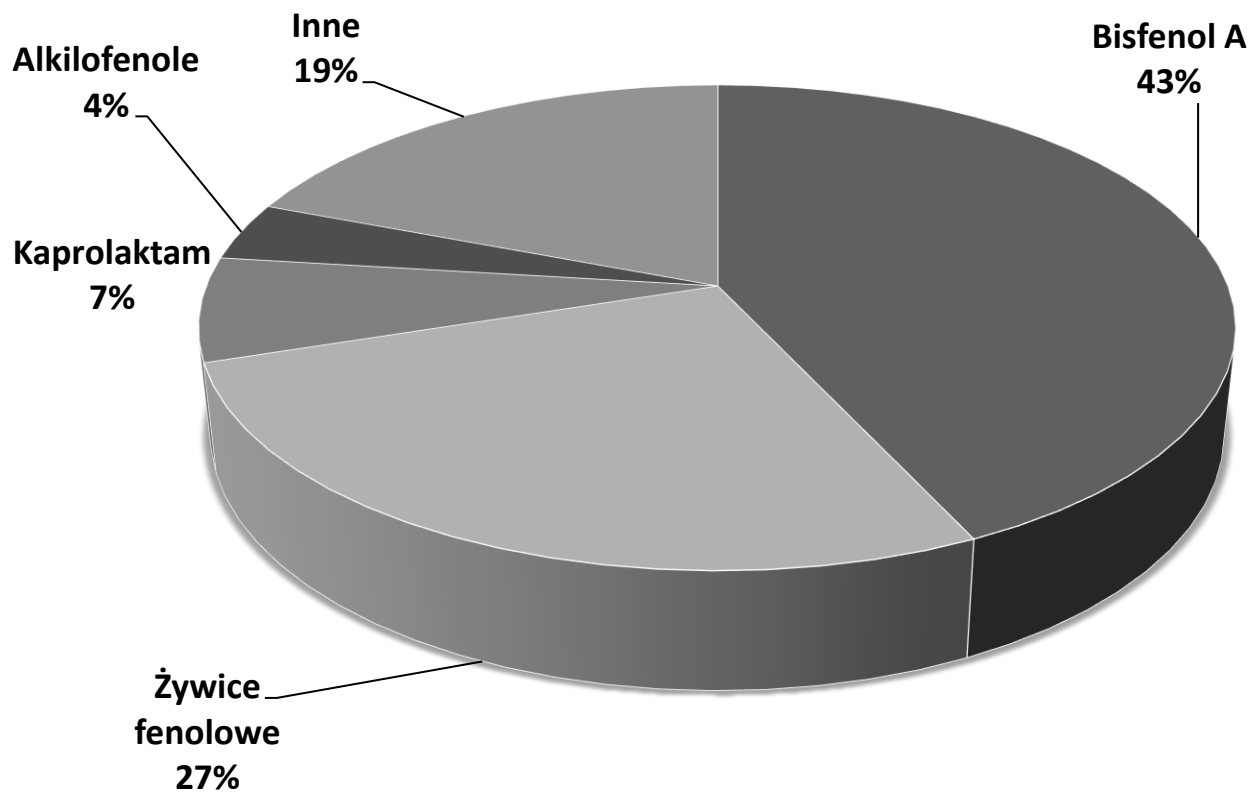
1 – reaktor utleniania, 2 – chłodnice (skraplacze), 3 – neutralizator-separator, 4 – wymiennik ciepła, 5 – zbiornik świeżego i powrotnego kumenu, 6, 8-11 – kolumny rektyfikacyjne, 7 – węzeł kwaśnego rozłożenia wodoronadtlenku kumenu

Główni światowi producenci fenolu w 2008 r.

Firma	Zdolność produkcyjna fenolu w tys. ton na rok
Ineos Phenol	1870
Sunoco	800
Mitsui Chemicals	750
Shell	600
CEPSA Quimica	600
Polimeri Europa	480
FCFC	400
MtVemon Phenol (Sabic)	340
Kumho	330
Dow	300
Taiwan Prosperity	200
Mitsubishi Chemicals	250
Chiba Phenol	230
Georgia Gulf	230
LG Chem	200
Chang Chun PC	200
Rhodia	195
NOVAPEX	180

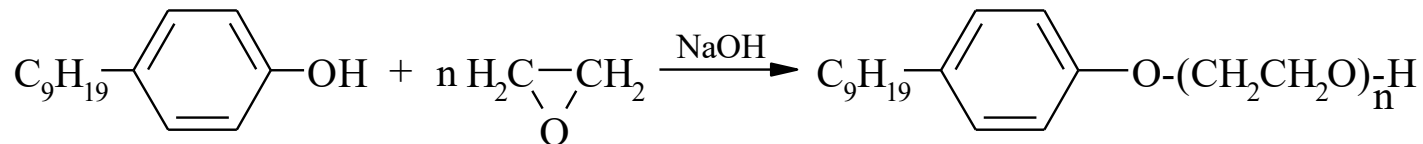
In 2021, the market volume of phenol worldwide was 11.37 million metric tons. It is forecast that the global market volume of phenol will increase to 14.07 million metric tons in 2029.

<https://www.statista.com/statistics/979265/global-phenol-market-volume/>



Struktura zużycia fenolu na świecie w 2010 r.

Alkilofenole zawierające łańcuch alkilowy C₆-C₂₀ (szczególnie C₉) poddaje się β-oksyalkilowaniu za pomocą tlenku etylenu:



niejonowe środki powierzchniowo-czynnymi, wykorzystywane jako składniki wielu środków piorących i emulgatorów.

PRODUKCJA FENOLU I JEGO POCHODNYCH W POLSCE

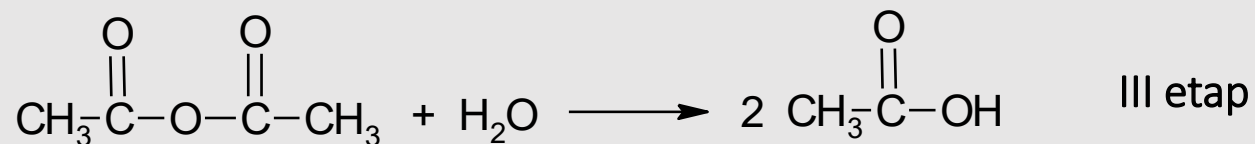
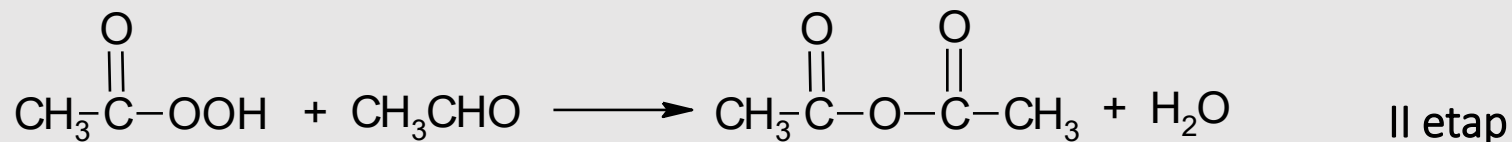
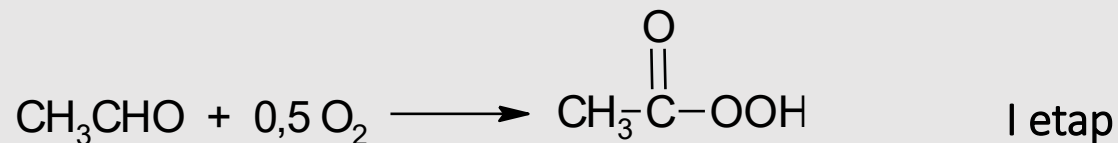
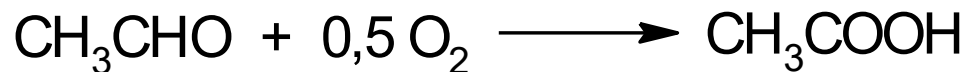
Mazowieckie Zakłady Rafineryjne i Petrochemiczne w Płocku – metodą kumenową.

Dawniej również w Zakładach Chemicznych „Oświęcim” metodą chlorowania benzenu oraz Nadodrzańskich Zakładach Przemysłu Organicznego „Rokita” w Brzegu Dolnym i Bydgoskie metodą sulfonową.

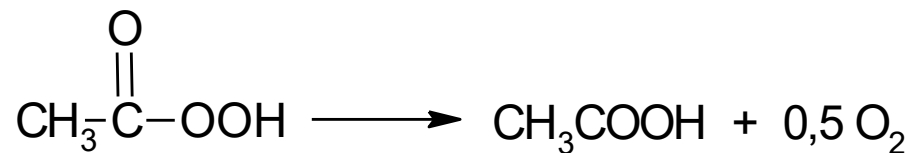
W Polsce fenol zużywany jest głównie do produkcji kaprolaktamu w Zakładach Azotowych w Tarnowie (60%), Bisfenolu A w Blachowni, różnych pochodnych fenolu w Zakładach Chemicznych „Rokita” oraz żywic fenolowo-formaldehydowych w zakładach ERG w Pustkowie.

Kwas octowy z aldehydu octowego

(do końca lat 60-tych XX w. główna metoda produkcji kwasu octowego; obecnie udział tej metody wynosi ok. 35%. W Polsce stosowana była w ZCh w Oświęcimiu.)



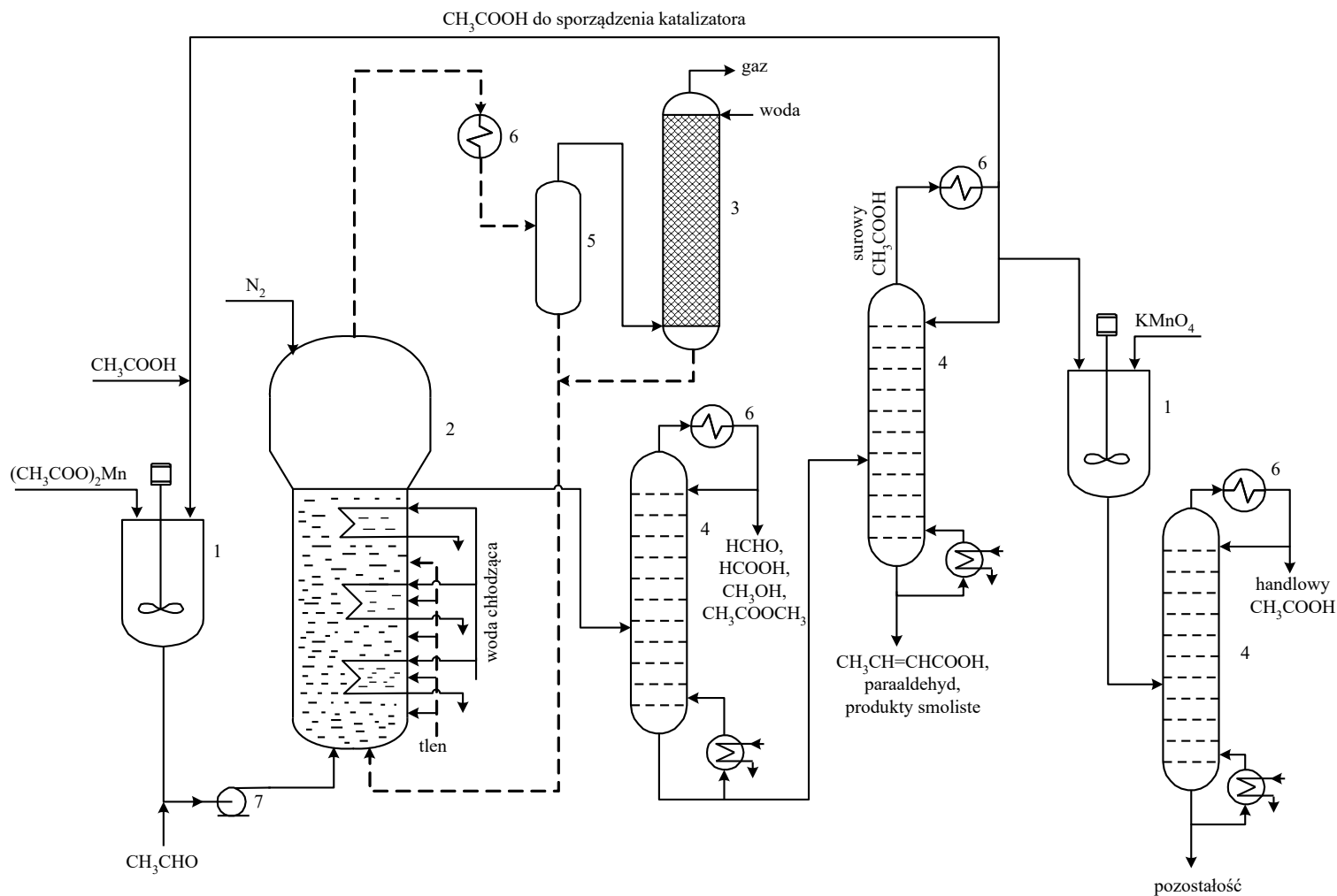
Reakcja uboczna :



Reakcja silnie egzotermiczna; nagromadzenie większych ilości kwasu nadoctowego w mieszaninie reakcyjnej stwarza zagrożenie rozkładu wybuchowego; wydzielający się tlen może przy tym prowadzić do całkowitego utleniania aldehydu

Warunki procesu:

- ❑ rozpuszczalnik - kwas octowy
- ❑ **nadmiar aldehydu**; zapobiega ubocznemu utlenianiu aldehydu; warunkuje jednakową szybkość dwóch pierwszych etapów procesu.
- ❑ katalizator homogeniczny – **sole manganu lub kobaltowo-manganowe w postaci octanu w ilości ok. 0,5% wag.**; można stosować sole żelaza, miedzi, kobaltu lecz przyspieszają dostatecznie tylko proces utleniania aldehydu octowego do kwasu nadoctowego.
- ❑ temperatura - 50-70°C,
- ❑ ciśnienie - 0,2-0,3 MPa,
- ❑ reaktor kolumnowy o wysokości 10-12 m z wewnętrznymi wężownicami do przeponowego chłodzenia środowiska reakcyjnego.
- ❑ selektywność procesu ponad 95%.



Schemat produkcji kwasu octowego z aldehydu octowego

1- mieszalnik, 2 - reaktor, 3- skrubler, 4 – kolumny rektyfikacyjne, 5 – rozdzielacz, 6- wymienniki ciepła

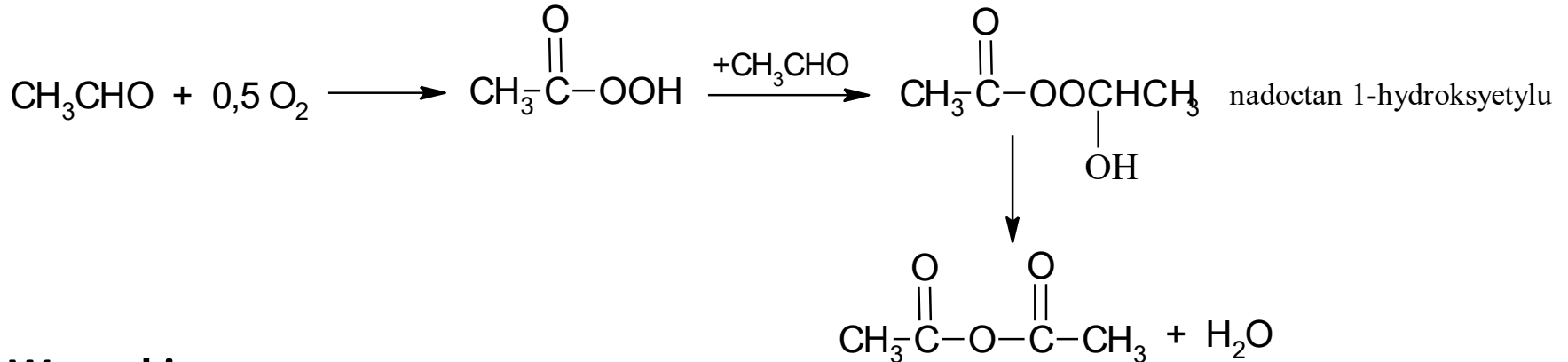
BEZWODNIK OCTOWY

Zagrozenie pożarowe: Ciecz łatwo palna. Pary tworzą z powietrzem mieszaniny wybuchowe. Pary są cięższe od powietrza – gromadzą się przy powierzchni i w dolnych partiach pomieszczeń.

Zagrozenie toksykologiczne: Bezwodnik kwasu octowego i jego pary działają żrąco na żywą tkankę. Bezwodnik octowy i jego pary działają drażniąco na skórę, oczy i drogi oddechowe. Bakteriobójczy.

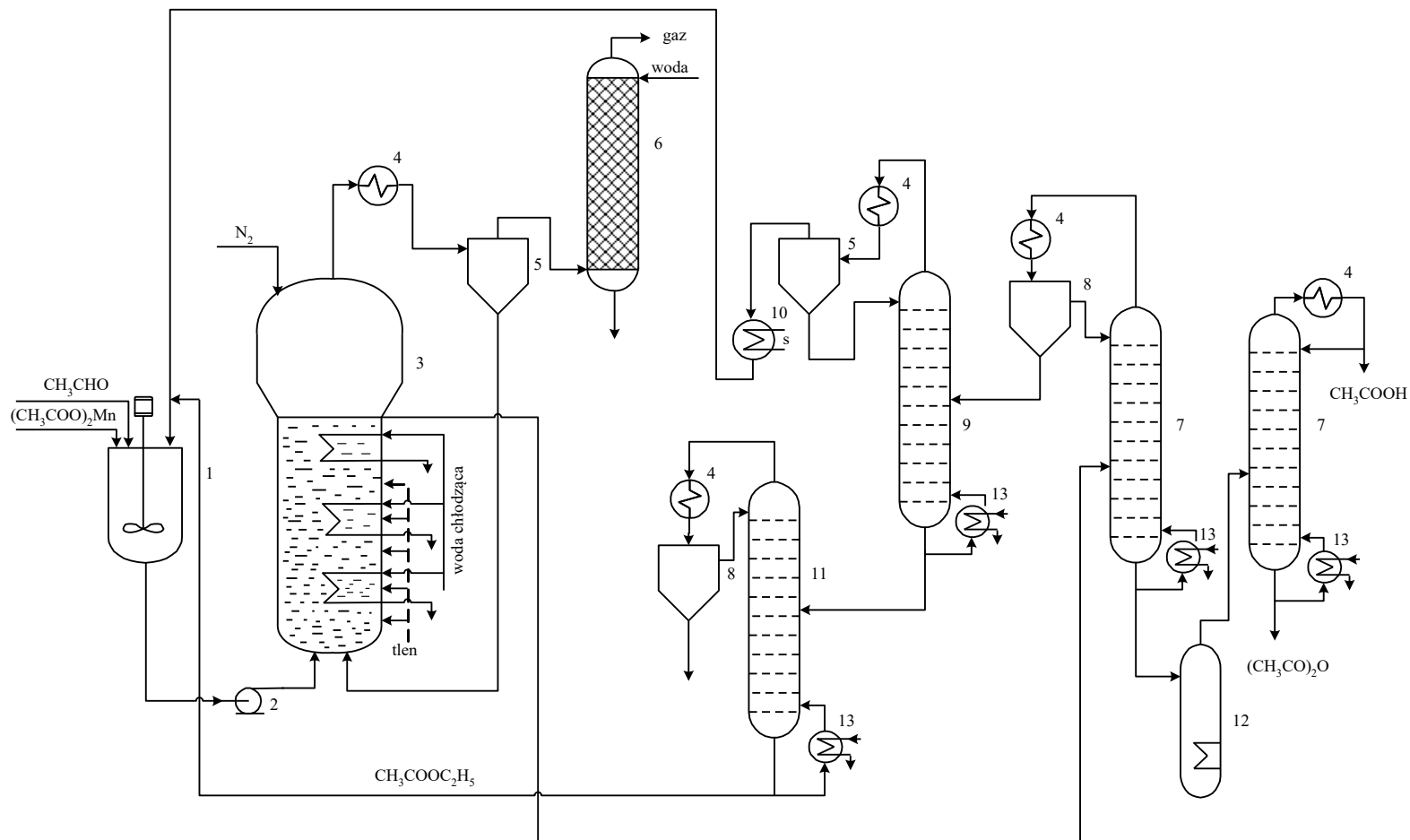
Zagrozenie ekotoksykologiczne: Bezwodnik octowy wywiera stosunkowo słabe szkodliwe działanie w środowisku naturalnym.

Utlenianie aldehydu octowego do bezwodnika octowego



Warunki procesu

- reaktor - kolumna utleniająca, jak przy otrzymywaniu kwasu octowego
- katalizatory - octany kobaltu i miedzi,
- temperatura - 50°C,
- ciśnienie - 0,2 MPa;
- hydratacji bezwodnika octowego zapobiega się poprzez oddestylowanie wody reakcyjnej w postaci mieszaniny azeotropowej z octanem etylu.

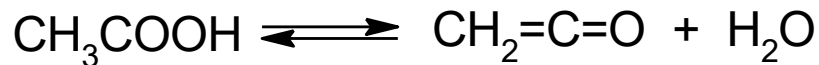


Schemat produkcji bezwodnika octowego z aldehydu octowego

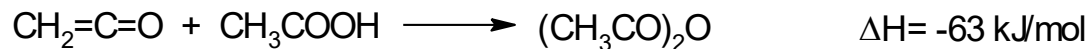
1 – mieszalnik, 2 – pompa, 3 – reaktor, 4 – chłodnice, 5 – rozdzielacze, 6 – skruber, 7, 9, 11 – kolumny rektyfikacyjne,

Inne metody otrzymywania bezwodnika octowego

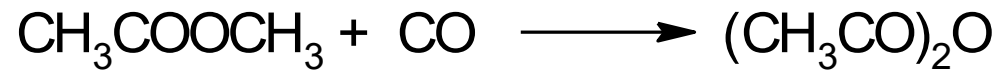
Metoda ketenowa



Termiczne odwodnienie kwasu octowego w temperaturze 700-750°C, w obecności katalizatora fosforanu trietylowego $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_3\text{PO}$, który dodaje się do środowiska reakcyjnego w ilości 0,2%.



Metoda Halcon



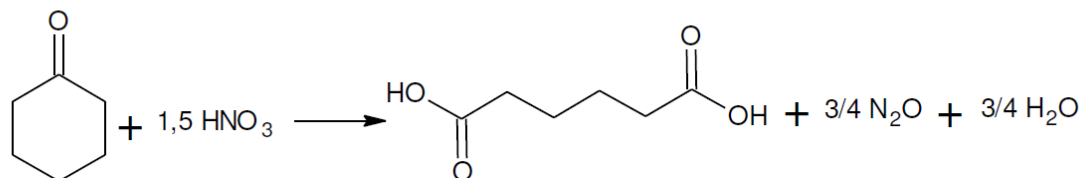
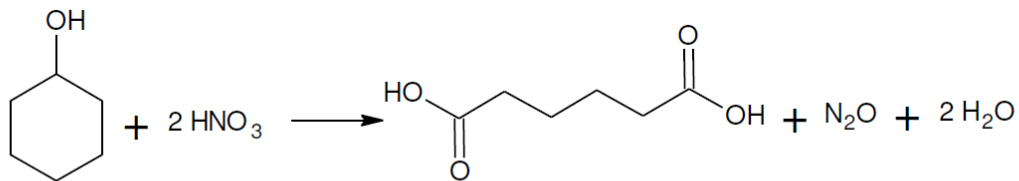
Warunki:

- temperatura 150-220°C,
- $p=2,5-7,5$ MPa,
- homogeniczny katalizator rodowy, aktywowany jodkiem metylu z promotorem $\text{Cr}(\text{CO})_6$ /pikolina.

ZASTOSOWANIE BEZWODNIKA OCTOWEGO

- Acetyloceluloza – do produkcji błon fotograficznych, błon filmowych, taśm magnetofonowych i folii elektrotechnicznych, włókna octanowego, tworzyw sztucznych, farb i lakierów, farb drukarskich,
- Kwas acetylosalicylowy – lek przeciwbólowy i przeciwgorączkowy,
- Kwas cynamonowy – skuteczny środek przeciwświerzbowy, półprodukt do syntezy środków zapachowych,
- Acetanilid – w lecznictwie jako lek przeciwgorączkowy. Do produkcji syntetycznej kamfory, licznych środków farmaceutycznych, barwników, jest stabilizatorem H_2O_2 .
- Acetofenon – rozpuszczalnik estrów, celulozy i innych żywic, substancji zapachowych (do aromatyzowania tytoniu), a także jako środek nasenny,
- Kwas nadoctowy,
- Nadtlenek acetylu,
- Chlorek acetylu – jako czynnik acetylujący,
- Związek odwadniający środki wybuchowe, takie jak: tetranitrometan, heksogen

Kwas adypinowy z cykloheksanolu/cykloheksanonu



Ze stechiometrii reakcji wynika, że stosując cykloheksanol jako surowiec, na 100 tys. t. wyprodukowanego kwasu adypinowego otrzymuje się ubocznie 30,1 tys. t. podtlenku azotu. **O 25% mniejszą ilość gazu otrzymuje się w przypadku zastosowania jako surowca cykloheksanonu i dlatego większość wytwórni kwasu adypinowego stosuje go jako surowiec.**

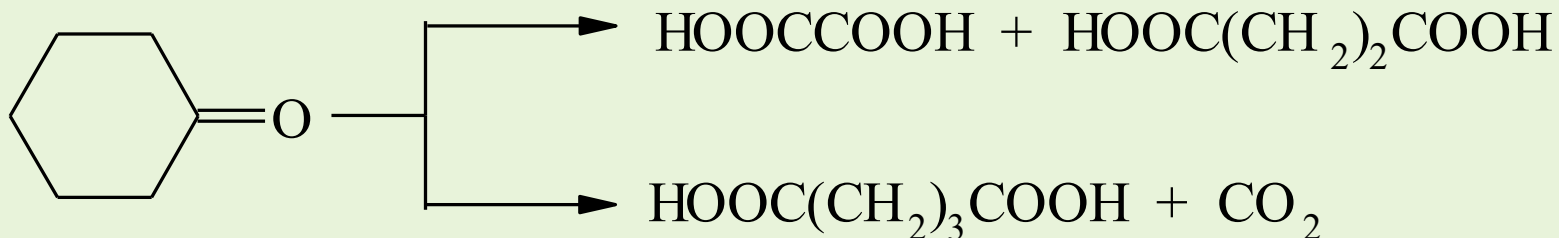
Szacuje się, że w wyniku procesu otrzymywania kwasu adypinowego z cykloheksanonu powstaje 0,9 mln t/r podtlenku azotu. Jest on utylizowany w 80-90% na drodze bezkatalitycznego lub katalitycznego wysokotemperaturowego rozkładu, co wiąże się z dodatkowymi nakładami energetycznymi.

UTLENIANIE CYKLOHEKSANOLU/CYKLOHEKSANONU

Warunki procesu:

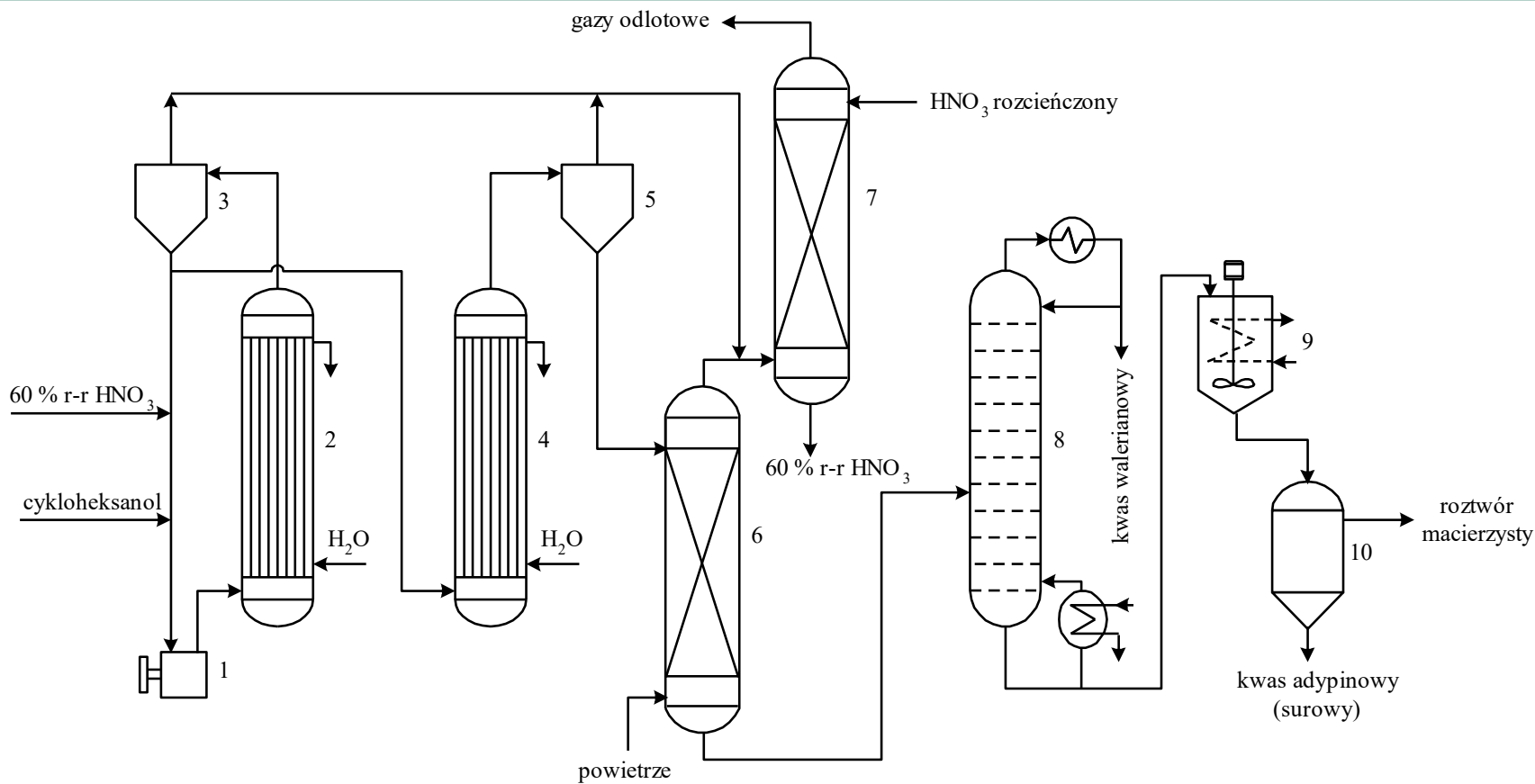
- ❑ Reakcja silnie egzotermiczna, chłodzenie przeponowe,
- ❑ Temperatura 60-80°C pod ciśnieniem 0,3-0,5 MPa (I etap), 105-110°C (II etap),
- ❑ katalizator homogeniczny - układ $\text{Cu}^{2+}/\text{V}^{5+}$; katalizator wprowadza się w postaci CuO (lub $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$) i NH_4VO_3 w ilości $<0,1\%$ (w odniesieniu na cykloheksan). Czynnikiem przyspieszającym reakcję główną jest wanadan amonowy, rola CuO sprowadza się do wiązania tlenków azotu,
- ❑ optymalne stężenie kwasu azotowego 40-60% wag. Reakcje przebiega w ciągu kilku minut.
- ❑ kwas adypinowy wykrystalizowuje po ochłodzeniu mieszaniny reakcyjnej;
- ❑ wydajność surowego kwasu adypinowego 93-95% (na cykloheksanol) lub ok. 85% w przeliczeniu na cykloheksanon w dwustopniowym procesie jego utleniania

Główne przemiany uboczne:



Ponadto:

- kwas walerianowy ($\text{C}_4\text{H}_9\text{COOH}$)
- kwas kapronowy ($\text{C}_5\text{H}_{11}\text{COOH}$) wskutek odzoczenia CO lub CO_2 na jednym ze stadiów przejściowych powstaje.

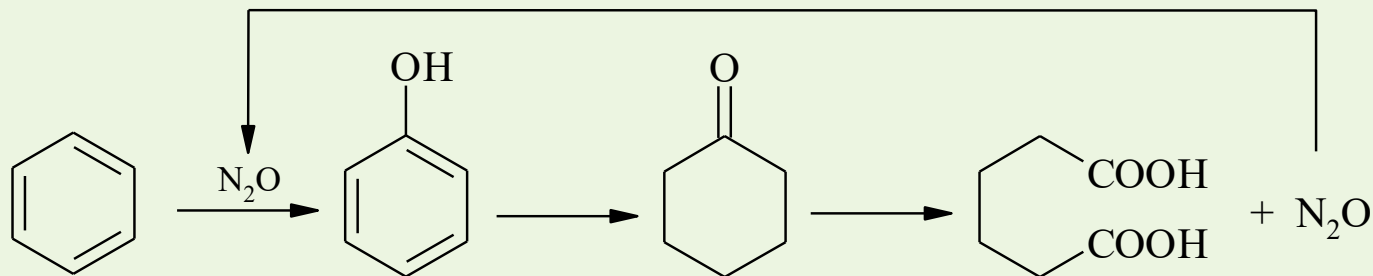


Schemat instalacji produkującej kwas adypinowy: 1 – pompa, 2, 4 – reaktory, 3, 5 – separatory, 6, 7 – skrubery, 8 – próżniowa kolumna rektyfikacyjna, 9 – krystalizator, 10 – wirówka; Na podstawie: Lebediev N.N., Chimija i tehnologija osnovnogo, organicieskiego i neftechimicieskiego sinteza, Moskwa Chimija, 1988.

Główne wady procesu:

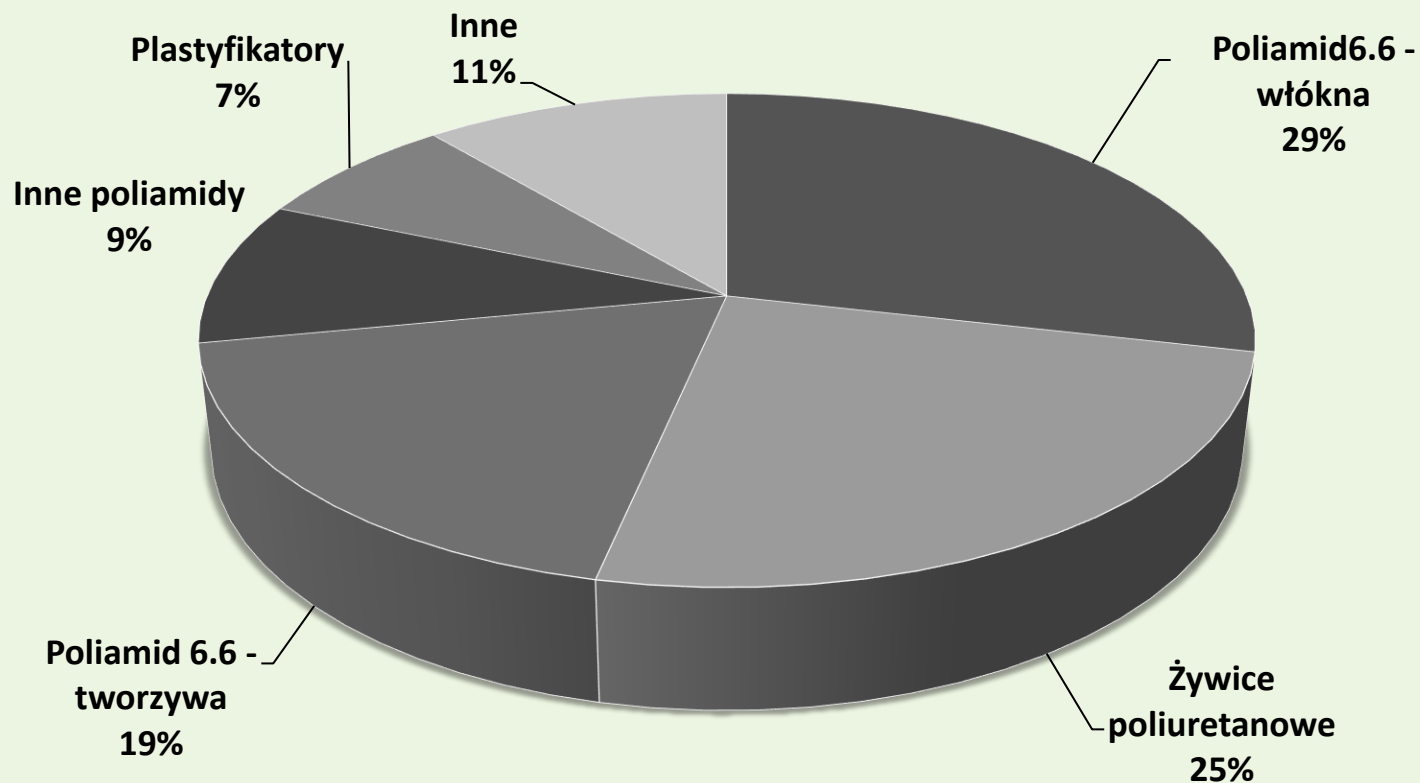
- ❑ stosunkowo duża ilość produktów ubocznych,
- ❑ duża liczba aparatów i operacji technologicznych,
- ❑ korozyjne działanie HNO_3 i potencjalna możliwość zanieczyszczenia atmosfery tlenkami azotu.

Możliwość recyklingu tlenków azotu (2000 r.)



In 2018, the market volume of adipic acid totaled approximately 3.9 million metric tons worldwide.

<https://www.statista.com/statistics/1113587/global-market-size-adipic-acid/>



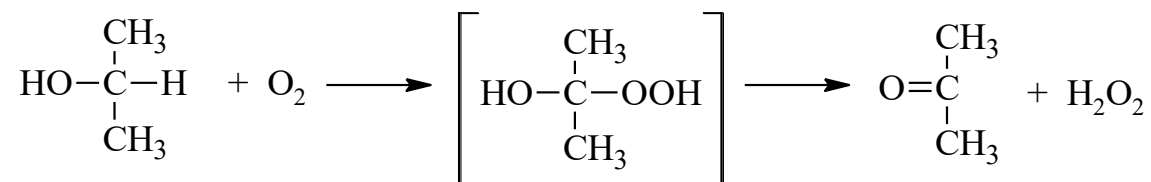
Struktura zużycia kwasu adypinowego na świecie w 2010 r.

Nadtlenek wodoru

Metody otrzymywania:

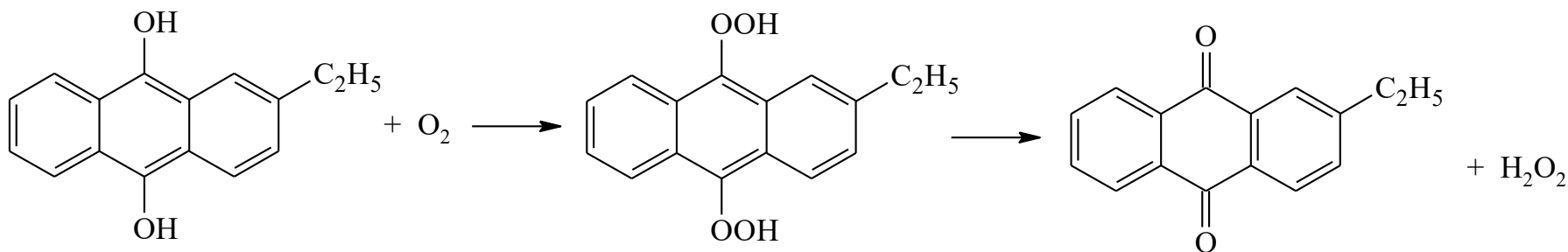
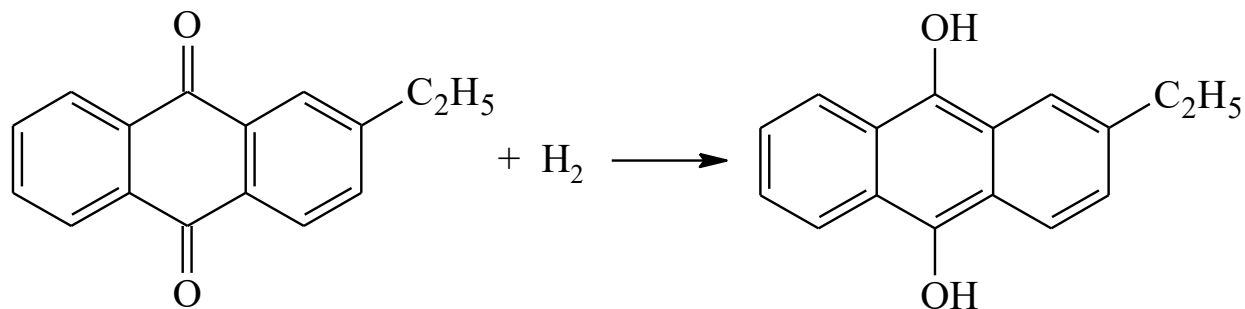
- metoda propanolowa (praktycznie zaniechana),
- poprzez elektrochemiczne utlenianie kwasu siarkowego lub siarczanu amonu (lokalne znaczenie),
- metoda antrachinonowa (dominująca).**

Metoda propanolowa (rzadko wykorzystywana)



- faza ciekła,
- temperatura 90-140°C,
- ciśnienie 1,5-2,0 MPa
- dodatek 0,5-1,0% H₂O₂ jako inicjatora procesu.
- konwersja poniżej 30%,
- selektywność do nadtlenu wodoru - 80%.
- produkt reakcji – 20% roztwór nadtlenu wodoru; oczyszczany nad żywicami jonowymiennymi, zateżany i destylowany.

Metoda antrachinonowa (ponad 95% światowej produkcji)



Oprócz pochodnej etylowej antrachinonu w mniejszym stopniu są stosowane 2-*t*-butylo-, 2-*t*-amylo- i 2-*sec*-amyloantrachinon.

Konieczność stosowania mieszanych rozpuszczalników zapewniających rozpuszczenie zarówno antrahydrochinonu, jak i antrachinonu.

Rozpuszczalniki:

- ❑ naftalen i trimetylobenzen jako rozpuszczalniki chinonu oraz fosforan tris-(2-etyloheksylu), diizobutylometanol lub mieszanina cykloheksanol-octan metylu jako polarne rozpuszczalniki dla hydrochinonu.

Wymagania stawiane mieszaninie rozpuszczalników:

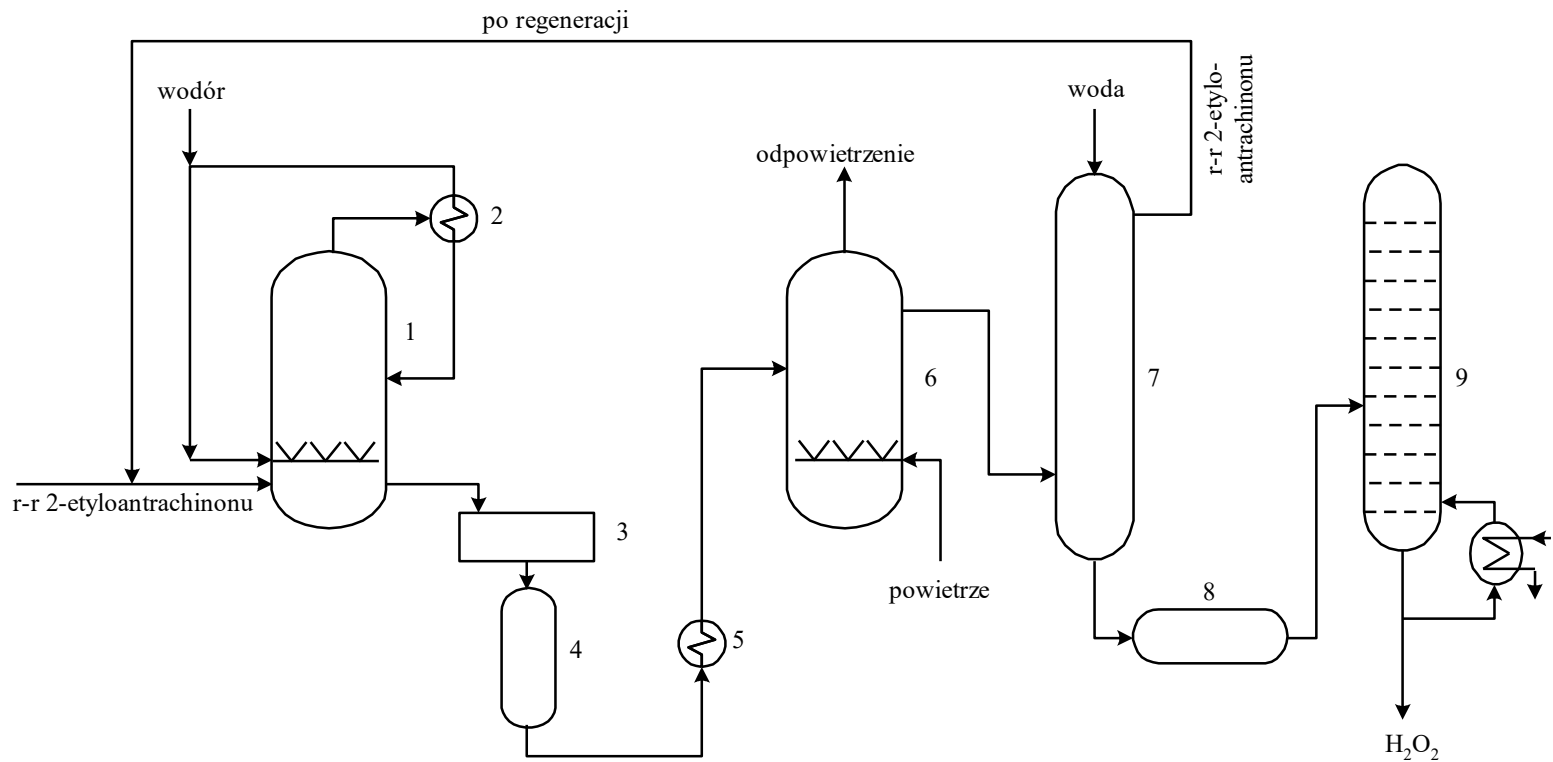
- ❑ niska rozpuszczalność w wodzie,
- ❑ niska lotność,
- ❑ dobra stabilność chemiczna w warunkach reakcji,
- ❑ niska lepkość,
- ❑ dobre właściwości rozpuszczające,

Etap redukcji 2-etyloantrachinonu:

- katalizator palladowy, najczęściej w postaci zawiesiny;
- temperatura ok. 40°C,
- ciśnienie - 0,5 MPa;
- konieczne efektywne chłodzenie układu reakcyjnego;
- konwersja do 50%; niska konwersja ogranicza powstawanie ubocznych produktów uwodornienia antrachinonu – szczególnie 1,2,3,4-tetrahydroantrachinonu;
- nieprzereagowany wodór uwalnia się od par rozpuszczalnika w chłodnicy i zawraca do reaktora uwodornienia
- roztwór zredukowanego hydrochinonu odsącza się od zawiesiny katalizatora na filtrze i kieruje się przez zbiornik przejściowy do reaktora utlenienia

Etap utleniania

- ❑ temperatura - 30-80°C,
- ❑ ciśnienie - 0,5 MPa.
- ❑ ekstrakcja wodoronadtlenku wodą;
- ❑ wydajność ekstrakcji - 98%; uzyskuje się 15-35% roztwór H₂O₂,
- ❑ roztwór antrachinonu zawracany jest do reaktora utlenienia po odwodnieniu azeotropowym.
- ❑ ekstrakt wodny, po usunięciu resztkowych zanieczyszczeń organicznych, zateża się poprzez destylację próżniową do produktu handlowego o stężeniu 30% lub 70-80%, a w razie potrzeby nawet do 95% H₂O₂ (zawiera zawsze stabilizatory, takie jak difosforany, organiczne związki kompleksujące lub związki cyny, które zabezpieczają go przez wybuchowym rozkładem na tlen i wodę).



Schemat instalacji produkującej nadtlenek wodoru metodą antrachinonową
 1 – reaktor uwodornienia, 2 – chłodnica zwrotna, 3 – filtr do oddzielania katalizatora, 4 – zbiornik r-ru antrachinonu, 5 – chłodnica cieczy, 6 – reaktor utleniania, 7 – kolumna ekstrakcyjna, 8 – zbiornik przejściowy ekstraktu, 9 – kolumna destylacyjna

Zastosowanie nadtlenu wodoru

	Zastosowanie
% wag. H ₂ O ₂	
3%, 6%	Woda utleniona, w farmaceutyce, kosmetyce i medycynie
30%	Perhydrol - odczynnik laboratoryjny, do epoksydacji
35%, 50%	Przemysł tekstylny, do bielenia
70%	Utlenianie związków organicznych
90%, >90%	Zastosowanie wojskowe i raketowe, specjalne wojskowe

Inne zastosowania nadtlenku wodoru:

synteza nadboranów – przemysł środków myjących,

synteza gliceryny – metodą allilową,

synteza tlenku propylenu,

synteza związków epoksydowych, np. oleju epoksysojowego (plastyfikator PCV)

synteza nadtlenków organicznych, np. nadtlenku metylo-etyloketonu, nadtlenku benzoilu – używanych jako inicjator wolnorodnikowych reakcji.

do bielenia bawełny, wełny, a także w przemyśle papierniczym.

