



POLITECHNIKA WARSZAWSKA
Wydział Chemiczny
LABORATORIUM PROCESÓW TECHNOLOGICZNYCH

PROJEKTOWANIE PROCESÓW BIOTECHNOLOGICZNYCH

**PODSTAWOWE ELEMENTY
PROJEKTU PROCESOWEGO**

Jerzy Wisiański

PROJEKT PROCESOWY

Projekt procesowy (ang. *Process Design*, niem. *Verfahrensprojekt*) stanowi z jednej strony swego rodzaju podsumowanie w skondensowanej formie badań nad procesem technologicznym, z drugiej zaś jest to pierwsza wizja (konceptcja) instalacji przemysłowej, w której ten proces ma być realizowany

ZAŁOŻENIA ZASADNICZE

ZAŁOŻENIA PRZEMYSŁOWE

PROGRAM PRODUKCJI - informacje na temat:

- liczby dni pracy zakładu w roku;
- liczby zmian produkcyjnych;
- przewidywanej ilości produktu (produktów) do wytworzenia w ciągu doby, roku
- periodycznego lub ciągłego sposobu prowadzenia procesu (związek z założeniami badawczymi).

DEFINICJE

PROCES CIĄGŁY – określenie dotyczące sposobu prowadzenia procesu technologicznego tak, że wszystkie etapy przebiegają równocześnie i w określonym porządku oraz jest zachowana stałość parametrów procesowych w czasie

RUCH CIĄGŁY ZAKŁADU - jest to sposób zorganizowania produkcji polegający na tym, że praca odbywa się na III zmiany produkcyjne (24 godziny na dobę) przez cały rok bez przerw na dni wolne i świąteczne (za wyjątkiem postojów zaplanowanych).

Liczbę dni pracy produkcyjnej instalacji w roku ustala się uwzględniając oprócz przerw świątecznych, również czas przewidywany na czyszczenie, remonty bieżące i okresowe oraz przerwy awaryjne. Dla instalacji pracujących w ruchu ciągłym przyjmuje się na ogół 300 – 330 dni pracy / rok.

ZDOLNOŚĆ PRODUKCYJNA

Ilość produktu możliwą do wytworzenia w jednostce czasu, np:
[kg / h], [kg/dobę], [t/rok] - dla instalacji ciągłych,
[kg / dobę], [kg/szarżę], [t/rok] - dla instalacji periodycznych.

Proces ciągły – godzinowa zdolność produkcyjna [kg/h]

Proces periodyczny - zdolność produkcyjna odniesiona do roku, doby oraz projektowanej szarży produkcyjnej.

Wielkość szarży – zgodnie z:

- optymalnymi możliwościami aparaturowymi;
- min. ryzyka powiększania skali, max. pewność ruchowa

Na ogół program produkcji pokrywa się z projektowaną zdolnością produkcyjną. Inwestor może założyć posiadanie pewnych rezerw zdolności produkcyjnej, czy to dla całej instalacji, czy też niektórych jej części. W takim przypadku powinno to być w założeniach jednoznacznie określone.

ZAŁOŻENIA BADAWCZE, ŹRÓDŁA TECHNOLOGII

MATERIAŁY ŹRÓDŁOWE

Literatura, sprawozdania z badań: literaturowych, laboratoryjnych, póltechnicznych itp. stanowią odrębne opracowania – należy się na nie powołać

Czystość patentowa

Wykaz patentów i know-how dotyczących rozpatrywanych metod.

Czystość patentowa metody proponowanej do wdrożenia.

Sprawozdanie z badania czystości patentowej może stanowić odrębne opracowanie (załącznik).

Instrukcje technologiczne, pomiary ruchowe

- nieocenione materiały źródłowe technologii. !!!

Uzasadnienie wyboru metody technologicznej

Skondensowany przegląd dostępnych metod

Uzasadnienie wyboru drogi przeprowadzenia procesu w skali przemysłowej (synteza - technologia). Kryteria:

- Dostępność i ceny surowców, wydajność procesu,
- Zagadnienia patentowe,
- Pewność (niezawodność) rozwiązań technologicznych,
- **Aspekty ekonomiczne**

Wybór metody technologicznej powinien wynikać ze sprawozdań z prac badawczych. Nie ma potrzeby zamieszczania obszernych analiz ekonomicznych i uzasadnień, wystarczy powołanie się na wcześniej wykonane prace studialne.

ISTOTA PROCESU

(dla wybranej metody technologicznej)

- Sumaryczne równania podstawowych reakcji chemicznych (zarówno głównych jak i ubocznych) w sposób czytelny → różni odbiorcy → w dalszej części bilanse masowe.
- Efekty cieplne poszczególnych reakcji (egzo- lub endotermiczne)
- Wyjaśnić funkcję katalizatora, podać podstawowe parametry (temperatura, ciśnienie, czas), stosowane nadmiary w stosunku do stechiometrii.
- Procesy podstawowe → kolejne procesy i operacje jednostkowe → i ich zasadnicze parametry
- Sposób prowadzenia procesu (periodyczny, ciągły)

**Bardzo pomocny dla prezentacji metody technologicznej jest:
SCHEMAT IDEOWY**

SCHEMAT IDEOWY

Schemat ideowy, zwany też schematem blokowym (ang. *block diagram*), jest to graficzne przedstawienie procesu technologicznego, polegające na zestawieniu poszczególnych procesów i operacji jednostkowych w kolejności ich realizacji oraz wszystkich występujących strumieni masowych.

Jest on szczególnie przydatny w przypadku skomplikowanych technologii, składających się z wielu procesów i operacji oraz licznych, cyrkulujących strumieni masowych. Ułatwia analizę całego procesu oraz opracowywanie bilansu masowego.

Definicje procesu jednostkowego i operacji jednostkowej, zgodnie z terminologią stosowaną w inżynierii chemicznej.

PROCES JEDNOSTKOWY

Proces jednostkowy (ang. *unit process*) jest to wyodrębniony zespół przemian fizycznych i chemicznych materii, charakterystyczny ze względu na zachodzącą reakcję chemiczną.

Wyodrębniając poszczególne procesy jednostkowe nadaje się im nazwy, pozwalające na szybką i łatwą identyfikację w trakcie kolejnych prac w ramach cyklu badawczo – projektowo – wdrożeniowego.

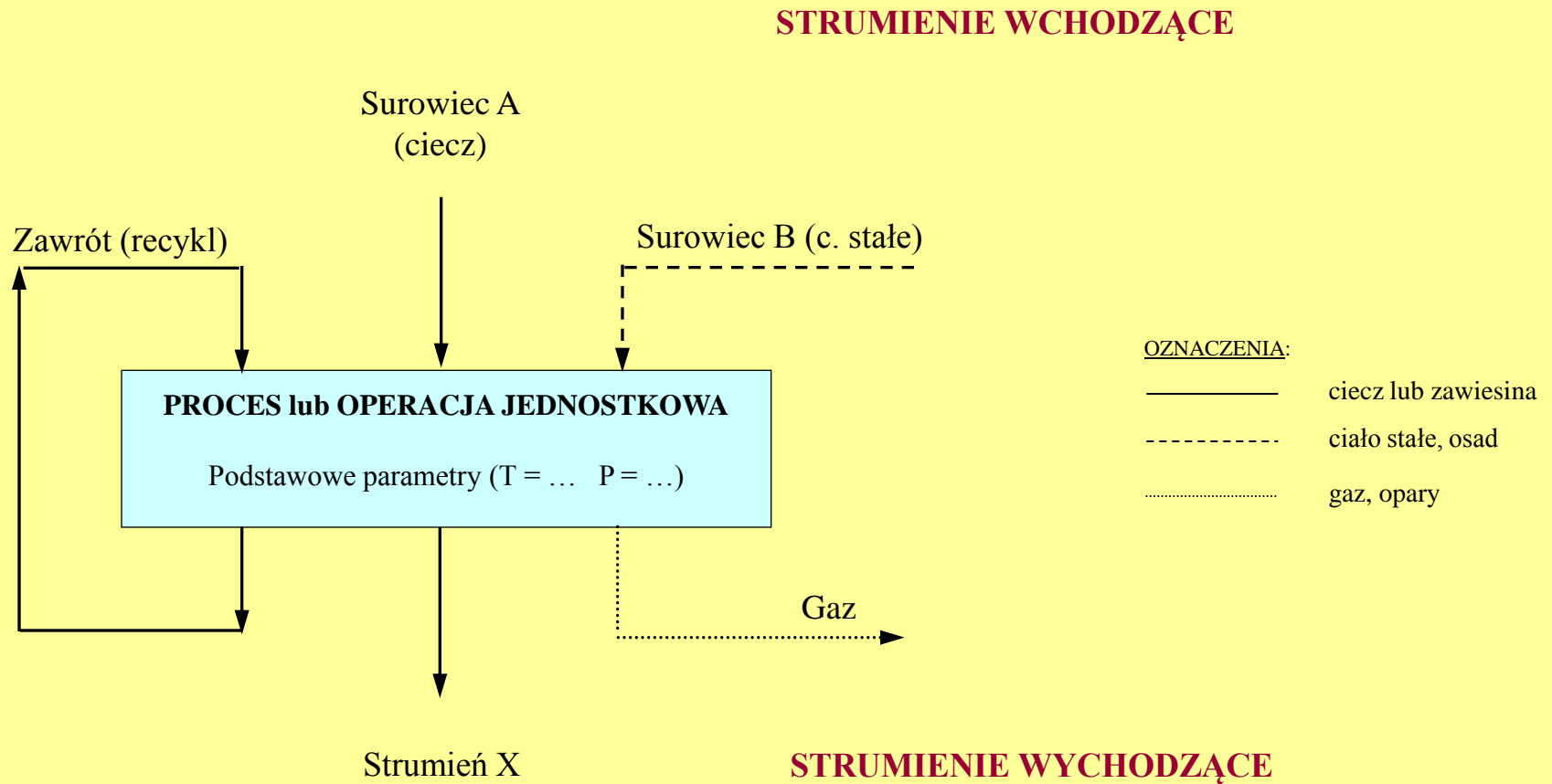
Oprócz ogólnych określeń jak np. „**reakcja syntezy związku X**”, czy „**biosynteza**”, stosuje się nazwy oddające charakter reakcji i specyficzne dla danej branży. W syntezie organicznej będą to na przykład procesy: **sulfonowania**, **nitrowania**, **chlorowania**, **estryfikacji**, **diazowania** itp. Inne przykłady określeń to: **neutralizacja**, **hydroliza** czy **elektroliza**.

OPERACJA JEDNOSTKOWA

Operacja jednostkowa (ang. *unit operation*) jest to wyodrębniony zespół, fizycznych przemian materii (bez reakcji chemicznej), charakterystyczny ze względu na ich skutek.

Będą to znane z inżynierii chemicznej: destylacja i rektyfikacja, absorpcja i desorpcja, mieszanie i homogenizacja, filtracja, suszenie itp. W wyniku tych operacji następuje rozdział lub łączenie strumieni oraz zmiana ich składu, nie pojawiają się natomiast nowe związki chemiczne (i nie znikają istniejące).

Rys. Elementy schematu ideowego

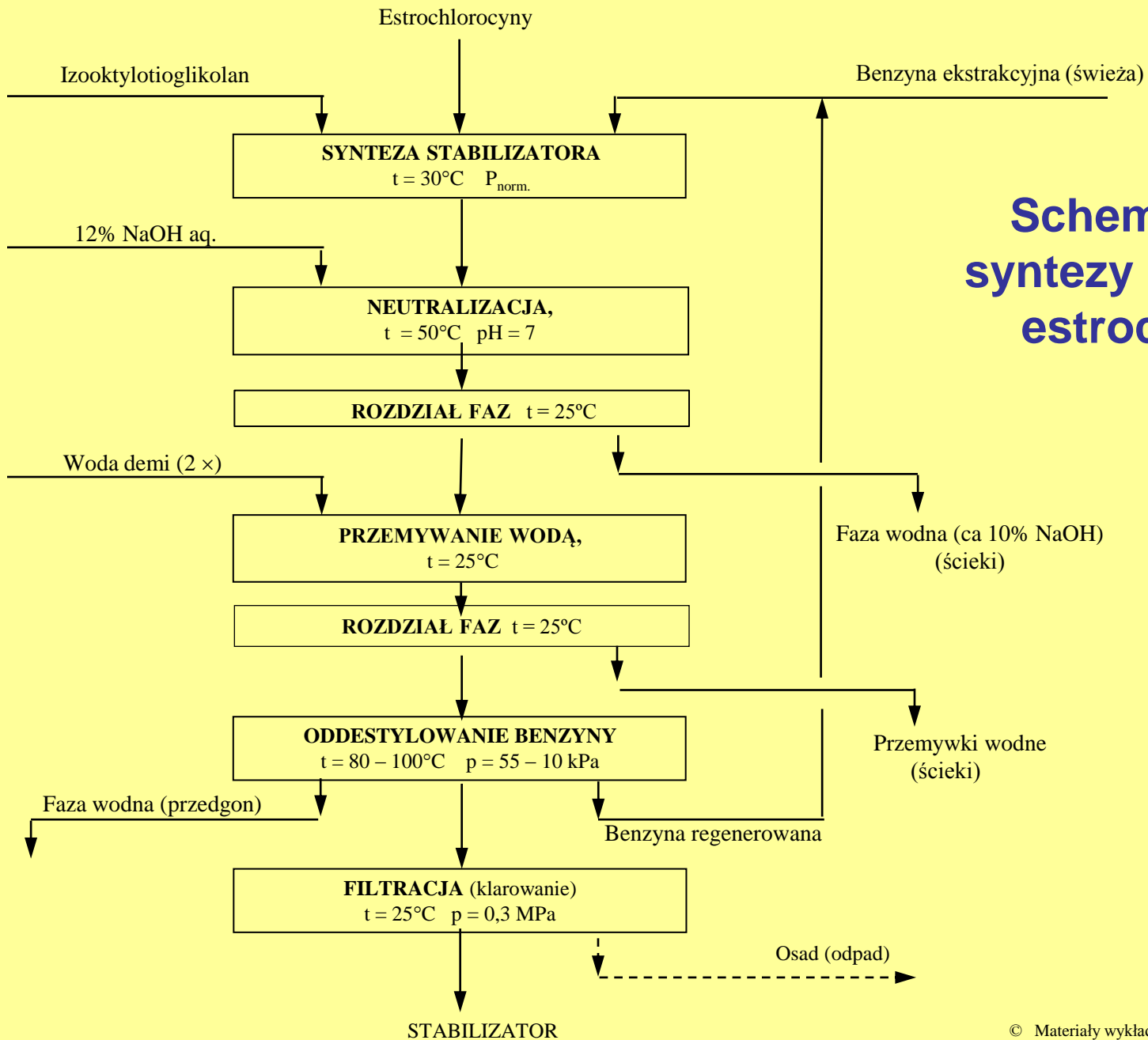


SCHEMAT IDEOWY

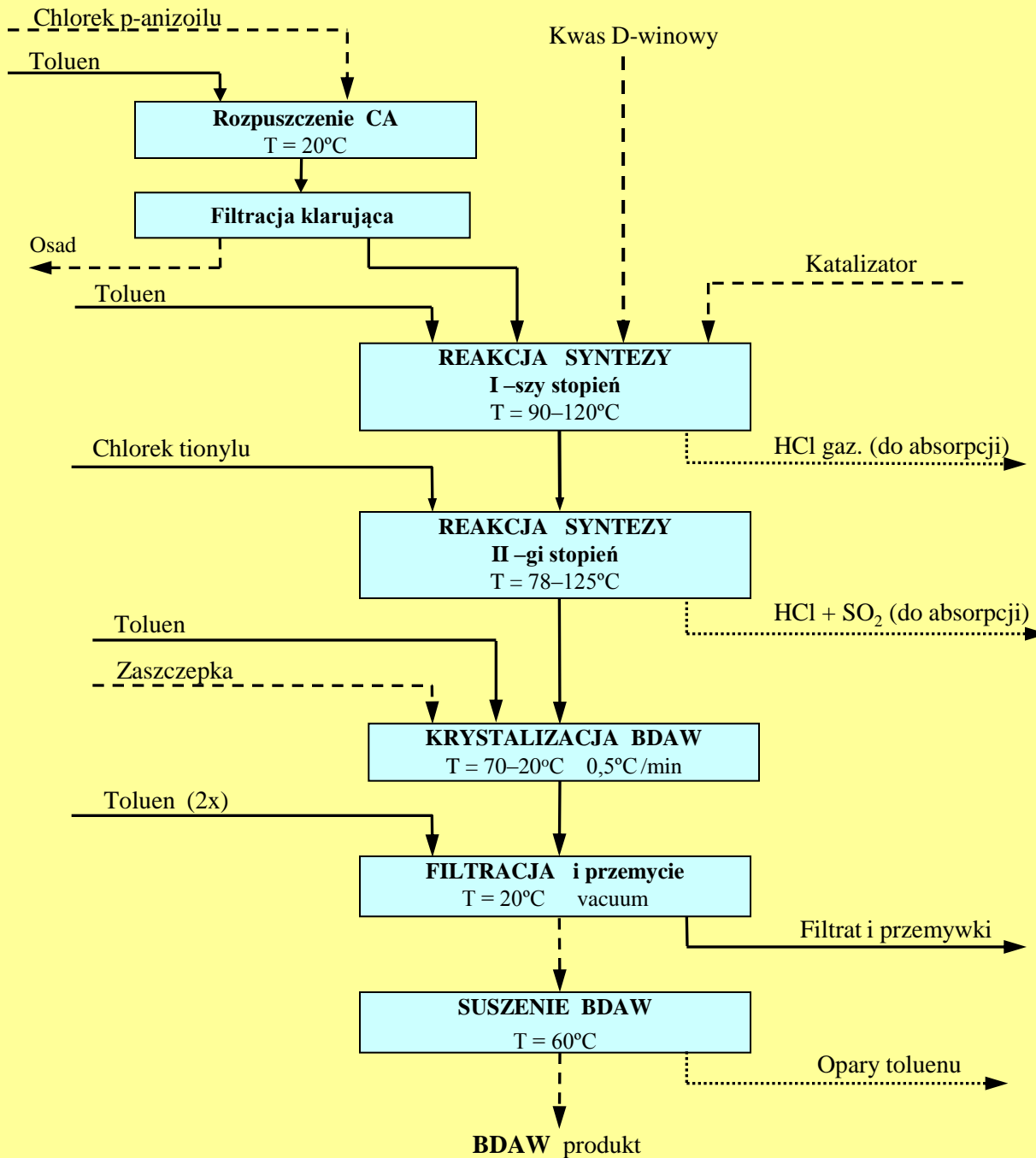
- Schemat ideowy powinien zawierać zestawienie procesów i operacji jednostkowych w kolejności zgodnej z rzeczywistym biegiem całego procesu produkcyjnego.
- Symbole umieszcza się więc w kolejności głównego ciągu technologicznego, w pionowym układzie poczynając od góry arkusza. Ciągi procesów pomocniczych powinno się розміścić obok ciągu głównego lub na odrębnych arkuszach.
- Zwykle, strumienie masowe wchodzące rysuje się „od góry”, natomiast wychodzące „od dołu” prostokątów oznaczających poszczególne procesy i operacje. Ułatwia to późniejsze opracowanie bilansów masowych i wykresu Sankey’a.
- Można również graficznie wyróżnić stan skupienia dla poszczególnych strumieni (ciekłe, gazowe, ciała stałe).

SCHEMAT IDEOWY c.d.

- Istotne jest rozbicie całego procesu technologicznego „na czynniki pierwsze”, to jest procesy i operacje jednostkowe oraz sprecyzowanie ich parametrów.
- Wiele wariantów doboru aparatury dla skali produkcyjnej.
- To, że w jednej kolbie laboratoryjnej było wykonywane wiele kolejnych przemian, nie oznacza wcale, że w instalacji przemysłowej będzie tak samo.
- Czas wykonywania poszczególnych przemian w laboratorium nie zawsze może być traktowany jako istotny parametr procesowy, gdyż w instalacji przemysłowej będzie on wynikał z innych parametrów, jak np. szybkości odbioru ciepła.
- W niektórych specyficznych przypadkach, czas może wystąpić jako istotny parametr procesowy. Będzie to na przykład wymagany czas przebywania mieszaniny reakcyjnej w reaktorze, czas doreagowania itp.
- Niektóre procesy lub operacje jednostkowe mogą być zaprojektowane jako ciągłe, co zmieni podejście do czasu jako parametru.

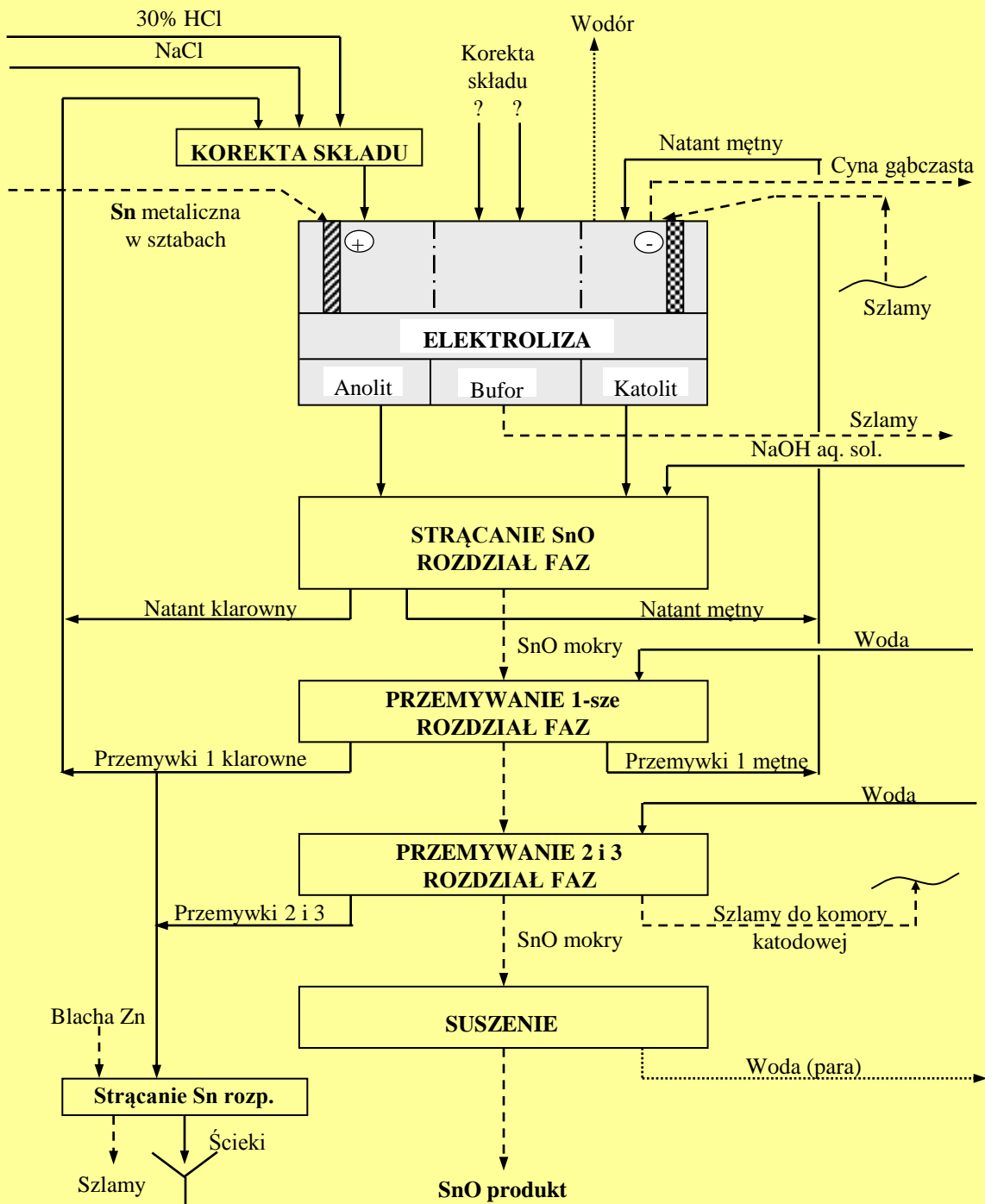


Schemat ideowy otrzymywania BDAW



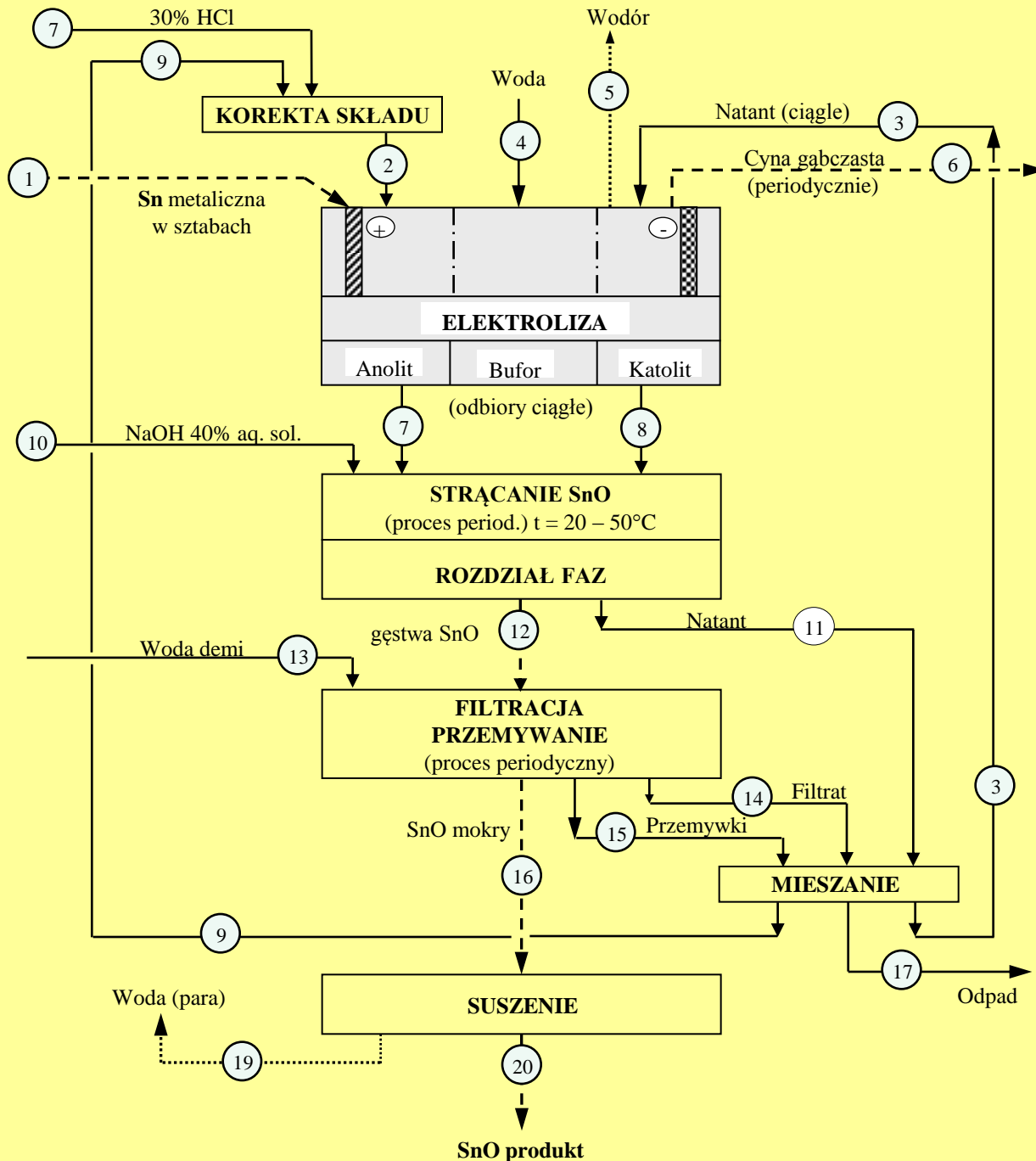
OZNACZENIA:

- ciecz lub zawiesina
- - - - - ciało stałe, osad
- gaz, opary



Schemat ideowy elektrolitycznego otrzymywania SnO (wersja III)

Schemat ideowy elektrolitycznego otrzymywania SnO (wersja V)



BILANS MASOWY

BILANS STRUMIENIOWY - wielkość strumieni masowych, bez ich składu chemicznego

Strumień 1	.....	kg
Strumień 2	.....	kg

BILANS SKŁADNIKOWY PEŁNY - wielkość strumieni masowych, ich skład chemiczny oraz bilanse poszczególnych składników:

Składnik 1	.....	kg
Składnik 2	.....	kg
Inne	.....	kg
<hr/>		
Razem strumień masowy	.....	kg

BILANS SKŁADNIKOWY CZĄSTKOWY - wielkość strumieni masowych oraz bilanse wybranych składników

Strumień P	.....	kg
w tym składnik X	.....	kg

ZASADNICZE ZAŁOŻENIA BILANSOWE

Materiały bazowe: Sprawozdania z badań (literatura, bilanse laboratoryjne, analizy), instrukcje technologiczne (dla procesów modernizowanych).

W PP ekstrakt podstawowych informacji z materiałów bazowych:

- Podstawowe stosunki masowe, nadmiary stechiometryczne,
- Wydajność względna (sprawność) poszczególnych etapów, jak i całego procesu, odniesiona do głównego surowca;

$$n_0 = n_1 \times n_2 \times \dots \times X_n$$

- Selektywność poszczególnych procesów;
- Podstawowe zależności procesowe (np. stała równowagi reakcji chemicznej, równowagi fazowe);
- Straty w procesie (uzasadnienie, adresy).

Straty w procesie technologicznym

Bilans praktyczny (przemysłowy) powinien uwzględniać:

- stosowanie surowców technicznych, a nie chemicznie czystych
- realne wydajności procesów wynikające z osiągniętych stanów równowagi
- występowanie niepożądanych reakcji ubocznych i powstawanie w ich wyniku produktów ubocznych
- występowanie reakcji spowodowanych obróbką termiczną (tzw. zesmolenia
- niedoskonałość operacji jednostkowych i związane z tym straty (np. niepełne wykroplenie oparów)
- występowanie strat mechanicznych (np. przecieki).

Wszystkie te czynniki stanowią **straty procesowe** i powodują **obniżenie ogólnej wydajności** (sprawności).

Nie zamykający się bilans strumieniowy jakiegoś procesu (suma produktów jest mniejsza od sumy wchodzących substratów) → **pytanie:**

Co się dzieje z brakującą różnicą ?

Straty c.d.

Odpowiedź:

Adresatem brakującej różnicy jest środowisko naturalne.

Forma tej straty może być różna, np.

- emisja par do atmosfery,
- pojawienie się określonych substancji w ściekach,
- konieczność okresowego usuwania zesmolonych zanieczyszczeń z wyparki (odpad stały).

Wielkość strat w procesie będzie miała wpływ na późniejsze uzgodnienia dotyczące lokalizacji instalacji i spraw związanych z ochroną środowiska naturalnego.

PODSTAWY BILANSU

- Zgodność ze schematem ideowym, wejście / wyjście
- Zdefiniowanie wierszy i kolumn w projektowanej tabeli bilansowej (np. 1 tona produktu), doba, rok, podział na szarżę (kg/szarżę, dm³/szarżę)
- Podstawa bilansu (np. 1 tona produktu), podstawowe zależności.

Prawo zachowania masy: suma mas wszystkich substratów wprowadzonych do procesu lub operacji musi być równa sumie mas wszystkich substancji otrzymanych w wyniku dokonanej przemiany.

$$\Sigma (G_n)_{\text{substratów}} = \Sigma (G_n)_{\text{produktów}}$$

W przypadku operacji jednostkowych prawo to dotyczy również bilansowania poszczególnych składników. Na przykład dla dowolnego składnika „i” występującego w stężeniu (wagowym) „w_{ni}” w strumieniu „n” powinna być spełniona zależność:

$$\Sigma (G_n w_{ni})_{\text{substratów}} = \Sigma (G_n w_{ni})_{\text{produktów}}$$

Dla procesów jednostkowych należy oczywiście uwzględnić zachodzące reakcje chemiczne przez wprowadzenie do powyższego równania odpowiednich współczynników stechiometrycznych oraz wydajności względnych (sprawności) przemian.

OBSZARY i FORMY BILANSU

Prawo zachowania masy powinno być spełnione zarówno dla całego procesu technologicznego, dla poszczególnych procesów i operacji jednostkowych jak i dla wyznaczonych **obszarów bilansowych** obejmujących wybrane fragmenty całości.

Weryfikacja obliczeniowa bilansu badawczego

Błędy analiz; Straty (sprawność urządzeń, zawroty);
Obliczenia teoretyczne (np. rektyfikacja)

Formy bilansu masowego

Tabelaryczna

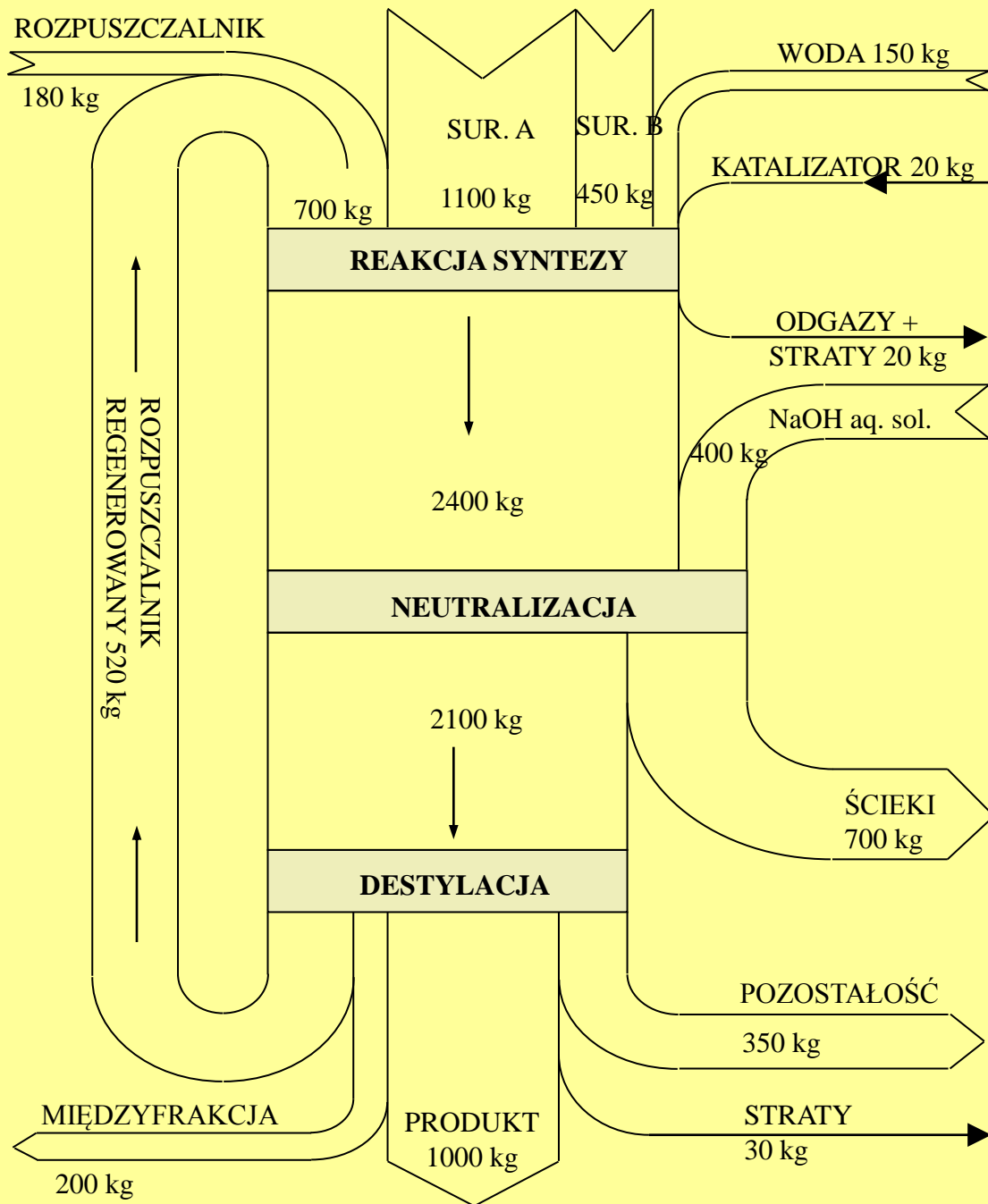
Graficzna – WYKRES SANKEYA

NARZĘDZIA: Excel, ChemCad, Pro II

BILANS PODSTAWĄ DALSZYCH PRAC (aparatura, środowisko, ekonomia, kontrola ruchu masy i wskaźników w czasie rozruchu)

BILANS MASOWY TABELARYCZNY

Nr	Nazwa procesu/ operacji	WCHODZI				WYCHODZI			
		Nazwa strumienia	kg/ 1t produktu	kg/ szarżę	kg/ dobę	Nazwa strumienia	kg/ 1t produktu	kg/ szarżę	kg/ dobę
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
		Razem				Razem			
		Razem				Razem			
		Razem				Razem			



WYKRES SANKEYA

Zestawienie zużycia surowców

Jest to podsumowujące zestawienie zużycia poszczególnych surowców i materiałów pomocniczych. Przedstawiane jest na ogół w formie tabelarycznej, w stosunku do jednostki masy produktu głównego i często również w odniesieniu do doby, miesiąca czy roku.

Zestawienie zużycia surowców nie jest tylko czystym ekstraktem z wykonanego bilansu masowego. Należy tu uwzględnić dodatkowe straty, jakie mogą się pojawić np. w czasie transportu i magazynowania surowców oraz pewną rezerwę na nieudane szarże, czy inne możliwe straty produkcyjne.

Wskaźniki zużycia surowców stanowią materiał wyjściowy do:

- przeprowadzanych kalkulacji i analiz ekonomicznych
- po weryfikacji w trakcie rozruchu technologicznego podstawą do określania przyszłych norm w przemyśle
- W przypadku sprzedaży licencji czy „know-how”, wskaźniki te są jednym z najbardziej istotnych warunków kontraktowych

Wskaźniki zużycia surowców powinny być starannie przemyślane i opracowane w sposób „**bezpiecznie ostrożny.**”

Zawroty strumieni masowych

Problem zawrotu zwanego żargonowo recyklem (ang. *recycling*) wymaga bardzo starannego przeanalizowania w trakcie opracowywania bilansu masowego. Aby unaocznić wagę tego problemu posłużymy się poniższym przykładem:

W latach 60-tych w jednym z instytutów badawczych opracowano dla potrzeb przemysłu technologię syntezy i rozdziału izomerów chloronitrobenzenu. W wyniku nitrowania chlorobenzenu otrzymano do rozdziału mieszaninę izomerów o następującym składzie:

o-CNB 60 % wag.

p-CNB 38 % wag.

m-CNB 0,8 % wag.

Pożądanymi produktami finalnymi procesu są izomery *orto*- i *para*-CNB. Przewidywana skala produkcji, to kilka tysięcy ton mieszaniny ponitracyjnej do przerobu w roku.

Wykres fazowy ciec - ciało stałe dla izomerów *o*-CNB / *p*-CNB

SURÓWKA DO DESTYLACJI

o-CNB 60% wag.*o*-CNB

p-CNB 38% wag.*p*-CNB

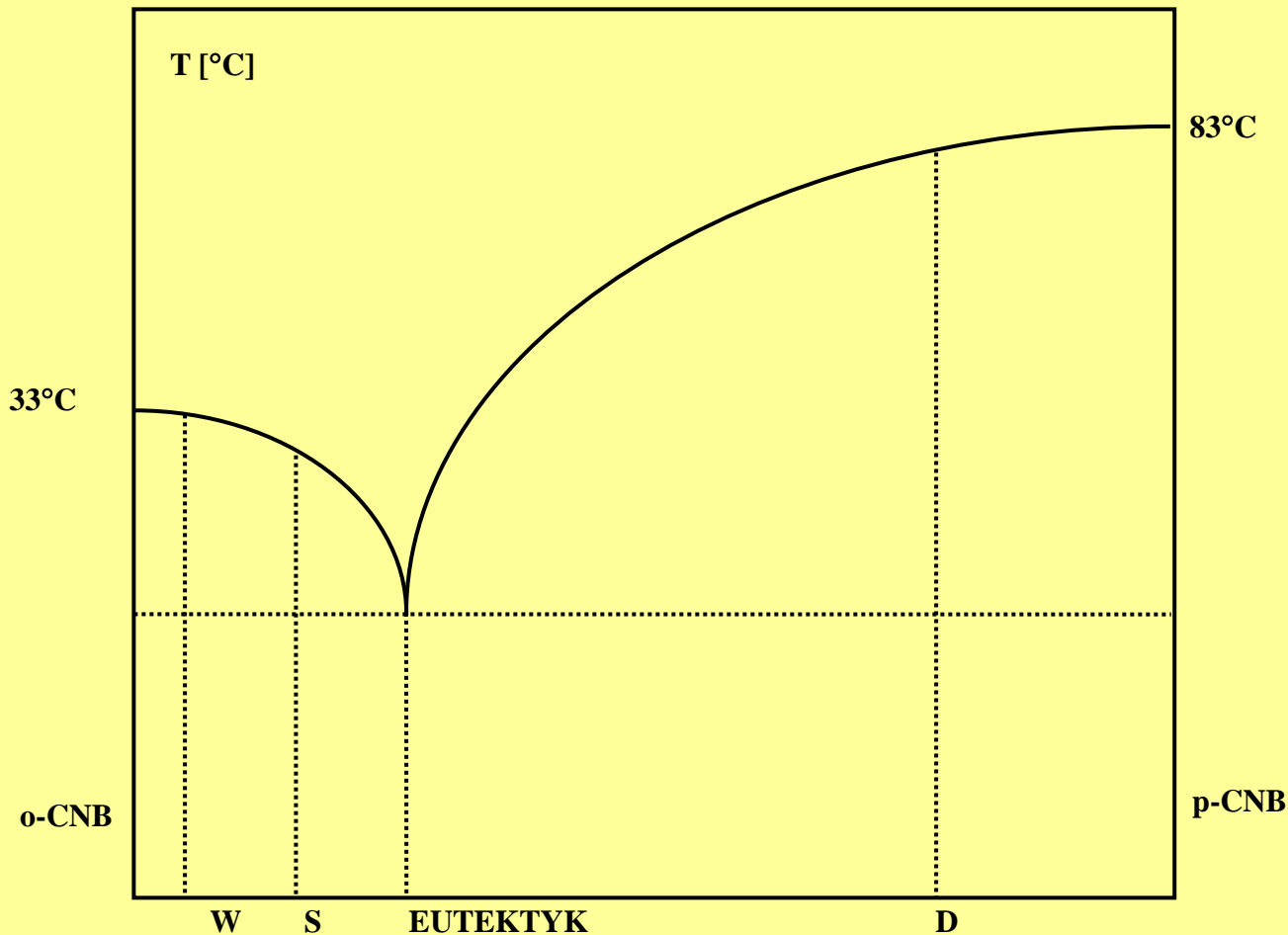
m-CNB 0,8% wag.*m*-CNB

WŁAŚCIWOŚCI IZOMERÓW CNB

$t_{wrz} = 245^{\circ}\text{C}$ $t_t = 33^{\circ}\text{C}$

$t_{wrz} = 242^{\circ}\text{C}$ $t_t = 83^{\circ}\text{C}$

$t_{wrz} = 235^{\circ}\text{C}$ $t_t = 48^{\circ}\text{C}$



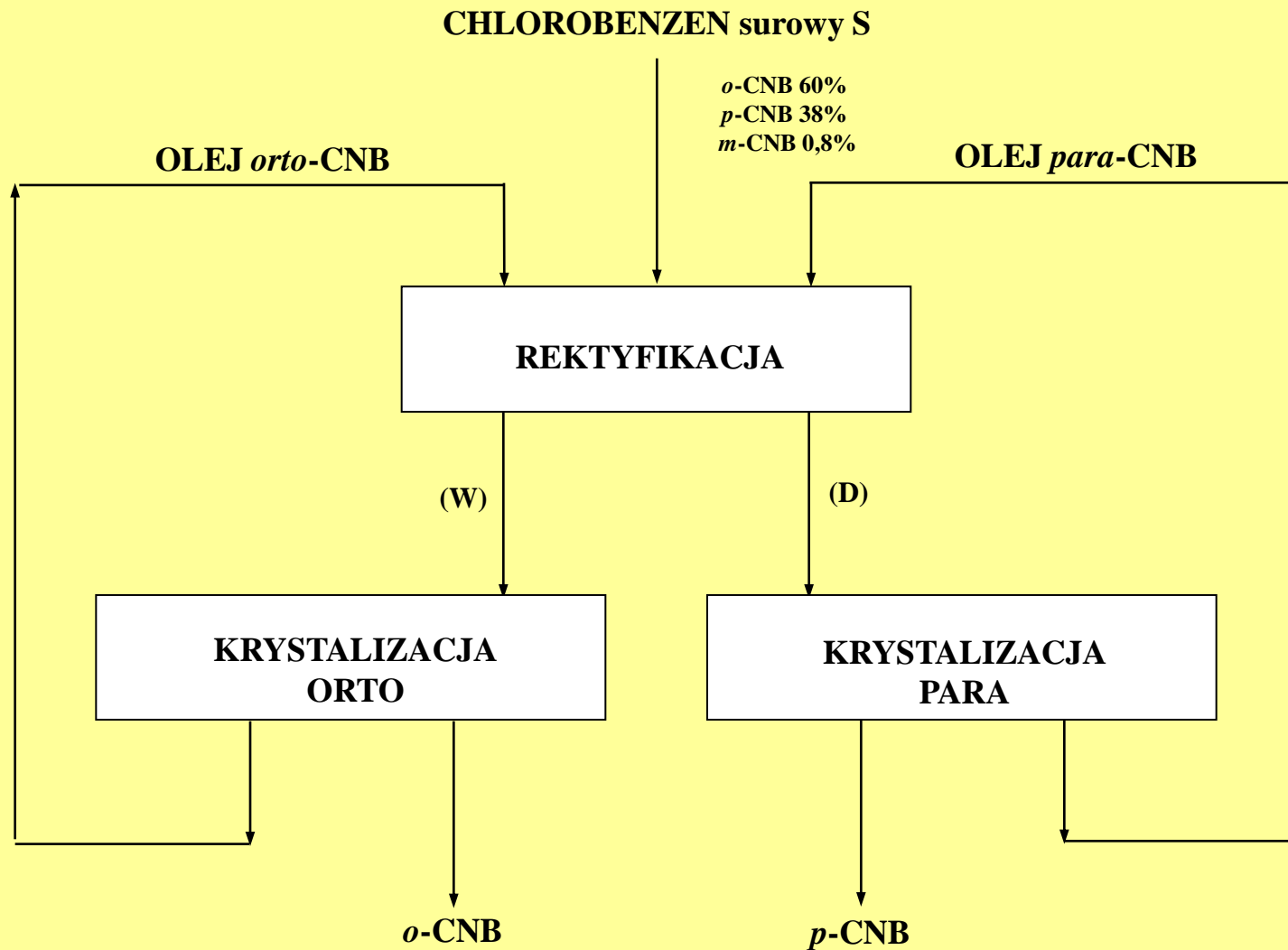
Legenda:

S – skład surówki

D – skład destylatu

W – skład cieczy wyczerpanej

Schemat ideowy rozdziału chloronitrobenzenów (instalacja produkcyjna)



Izomer *meta*-CNB w oleju *para*

Pogarszanie się składu oleju *para*, wzrost stężenia zawartego w nim izomeru *meta*-CNB.

→ Pogarszanie się warunków krystalizacji i jakości otrzymywanego produktu *para*-CNB.

→ Po osiągnięciu stężenia 12% izomeru *meta*-CNB w oleju *para*, prowadzenie zadowalającej krystalizacji stawało się niemożliwe.

→ wyprowadzenie całego strumienia oleju *para* z procesu i jego zmagazynowanie.

→ Ponowne wyprowadzanie oleju *para* zanieczyszczonego *meta*

Przyczyny kumulacji izomeru *meta*

- Nieco zwiększona w stosunku do założeń zawartość *meta*-chloronitrobenzenu w mieszaninie ponitracyjnej (ok. 1,0 – 1,2%),
- Lepsza sprawność operacji w skali przemysłowej w stosunku do wyników laboratoryjnych (mniejszy poziom strat ogólnych, zesmoień itp.)
- Zjawisko kumulacji izomeru *meta* musi występować, jako dający się przewidzieć, immanentny rezultat prowadzonego procesu.
- Próby rozwiązania problemu, na przykład poprzez oddestylowanie tego izomeru, czy też połączenie rektyfikacji i krystalizacji, prowadziły do konieczności wybudowania dodatkowej, dużej i kosztownej instalacji przemysłowej.

Zagrożenia zawrotów

Podany przykład pozwala na zrozumienie zagrożeń, jakie mogą się pojawić w rezultacie zastosowania zawrotów strumieni materiałowych w procesie technologicznym.

Zawroty – jest to rozwiązanie bardzo eleganckie, często narzucające się w sposób oczywisty, poprawiające wydajność procesu, zmniejszające zanieczyszczenie środowiska. Posiada więc bardzo wiele zalet.

Musi jednak być każdorazowo, wnikliwie przeanalizowane, szczególnie pod kątem kumulacji zanieczyszczeń.

Jeśli takie zjawisko może wystąpić, należy zaproponować sposoby oczyszczania strumienia cyrkulującego lub jego okresowej utylizacji.

DOBÓR APARATÓW TECHNOLOGICZNYCH

Różnorodność technologii w przemyśle chemicznym

Inżynieria chemiczna (operacje jednostkowe)

Maszynoznawstwo, konstrukcje aparatury chemicznej

Materiałoznawstwo, korozja

Pomiary i automatyka

Bezpieczeństwo procesów technologicznych

**PROJEKTOWANIE TECHNOLOGICZNE
INŻYNIERIA CHEMICZNA I PROCESOWA**

APARATY PODSTAWOWE mające zasadnicze znaczenie dla przebiegu procesu technologicznego i często decydujące o poziomie kosztów (np. reaktory chemiczne, główne kolumny destylacyjne, absorpcyjne, krystalizatory, główne filtry czy suszarnie).

APARATY I URZĄDZENIE POMOCNICZE jak np: wymienniki ciepła, maszyny przetłaczające (pompy, sprężarki, dmuchawy, wentylatory), maszyny rozdrabniające (młyny, kruszarki), urządzenia do transportu ciał stałych, pomocnicze mieszalniki i zbiorniki, wagi.

SPECYFIKACJA APARATÓW I URZĄDZEŃ

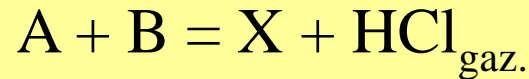
Aparaty typowe - nietypowe

KRYTERIA DOBORU APARATURY PROCESOWEJ

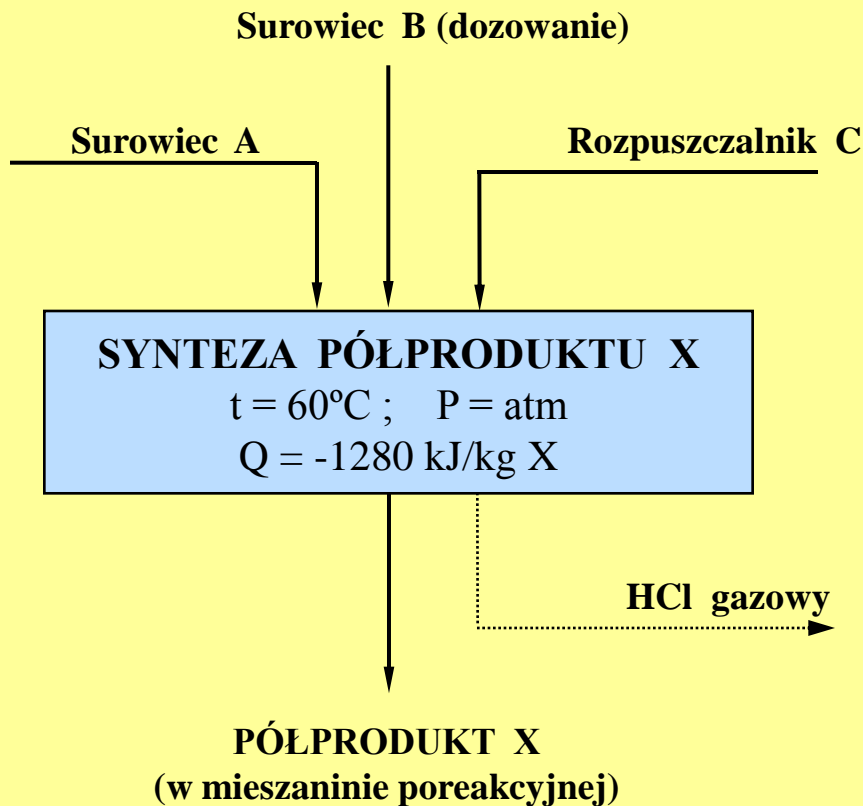
- Parametry procesowe i obliczenia inżyniersko-chemiczne → określenie podstawowych wymagań technologicznych, np.: rodzaj urządzenia, pojemność robocza, temperatura i ciśnienie robocze, liczba półek teoretycznych, powierzchnia wymiany ciepła, wydajność przetłaczania ,itp;
- Wstępne ustalenia i obliczenia konstrukcyjne takie jak: podstawowe wymiary geometryczne, pojemność nominalna i całkowita, liczba i wymiary króćców, typ mieszadła i zapotrzebowanie mocy, liczba półek rzeczywistych, rodzaj wypełnienia, rodzaj i grubość izolacji termicznej itp.;
- Przewidywane materiały konstrukcyjne (korozja, erozja);
- Możliwość monitorowania i automatyzacji procesu i urządzenia;
- Bezpieczeństwo (wykonanie Ex, hermetyczność, UDT);
- Niezawodność ruchowa i wymagane kwalifikacje obsługi;
- Dostępność na rynku i szacunkowa cena danego urządzenia.

PRZYKŁAD DOBORU REAKTORA

Proces syntezy polegający na periodycznym przeprowadzeniu reakcji wg równania:



Proces prowadzony w środowisku rozpuszczalnika C.



Ze względu na egzotermiczny charakter reakcji oraz konieczność odprowadzenia gazowego chlorowodoru, surowiec B - dozowany w tempie umożliwiającym utrzymanie wymaganej temperatury reakcji.

Ilość otrzymywanego półproduktu X stanowiła 50% w stosunku do sumy wprowadzonych substratów (A+B+C).

Proces był prowadzony pod ciśnieniem atmosferycznym.

Składnik X wydzielano z mieszaniny poreakcyjnej w odrębnej instalacji.

Chronometraż szarży laboratoryjnej (5 dm³)

- przygotowanie aparatury	0,25 h
- załadunek surowca A	0,25 h
- załadunek rozpuszczalnika C	0,25 h
- dozowanie surowca B	4,00 h
- analiza półproduktu	4,00 h
- opróżnienie reaktora	0.25 h
- inne (rezerwa)	1,00 h

RAZEM 10 h

Zadanie: Zaprojektować instalację przemysłową o zdolności produkcyjnej:

20 t/dobę

w przeliczeniu na mieszaninę reakcyjną (A + B + C).

Według uzgodnień z inwestorem, instalacja ma pracować w ruchu ciągłym, co oznacza, że:

1 doba = 24 h (3 zmiany produkcyjne po 8 h)

Pierwsze przybliżenie: założono harmonogram zbliżony do laboratoryjnego, to znaczy możliwość wykonania w reaktorze 2 szarż na dobę i co za tym idzie wielkość szarży $G = 10$ ton mieszaniny.

Dla obliczenia pojemności nominalnej aparatury reakcyjnej V_N przyjęto następujące parametry:

- gęstość mieszaniny $d = 900 \text{ kg/m}^3$
- stopień wypełnienia reaktora $e = 70\%$ (umiarkowane pienienie)

$$V_N = \frac{G}{d \times e} = \frac{10000}{0,9 \times 0,7} \text{ [kg} \times \text{m}^3/\text{kg}] = \mathbf{16 \text{ m}^3}$$

Dodatkowe uwarunkowanie:

W surowcu A, jest dopuszczalna zawartość 0,8% H₂O.

To determinuje wybór tworzywa konstrukcyjnego reaktora.

Materiały odporne na chlorowódor w obecności wody to: kwarc, szkło, emalia, materiały ceramiczne, kosztowne metale, np. tantal, czy wysokoprocentowe stopy chromowo – niklowo - molibdenowe (Hastelloy).

Odporne są również niektóre tworzywa sztuczne, ale tutaj wybór jest ograniczony gdyż obecność rozpuszczalnika organicznego, na który z kolei większość tworzyw jest nieodporna (szczególnie w podwyższonej temp.)

Reaktory emaliowane, powszechnie stosowane w przemyśle chemicznym.

- Sposób wymiany ciepła:
poprzez zewnętrzny płaszcz grzewczo – chłodzący.
- Będąca do dyspozycji powierzchnia wymiany ciepła (F).
- Obliczenia cieplne, w celu określenia możliwego do odbioru strumienia ciepła (q) i sprawdzenia rzeczywistego czasu reakcji.

Obliczenia cieplne

Całkowite ciepło reakcji do odebrania z 1 szarży syntezy:

$$Q_R = 10\,000 \text{ kg} \times 50\% \times 1280 \text{ kJ/kg} = 6,4 \text{ GJ}$$

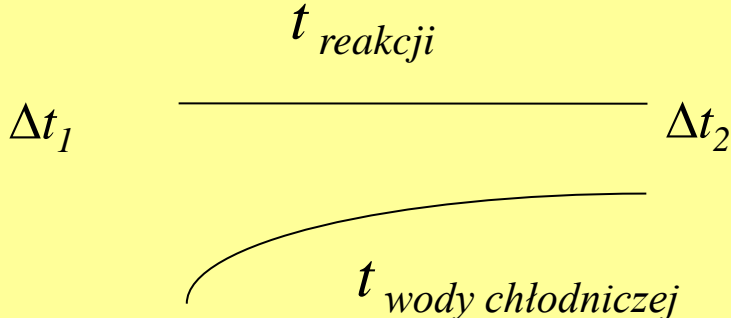
Strumień ciepła do odebrania przez płaszcz reaktora(q)

$$q = k \times F \times \Delta t_m \quad [\text{kJ/h}] \quad \text{równanie Fourier'a}$$

gdzie: k - współczynnik przenikania ciepła $[\text{kJ/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}]$

F - powierzchnia wymiany ciepła $[\text{m}^2]$

Δt_m - średnia logarytmiczna różnica temperatur obliczana w następujący sposób:

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$


The diagram shows a horizontal axis representing the temperature difference Δt , with Δt_1 on the left and Δt_2 on the right. A horizontal line above the axis is labeled $t_{reakcji}$. A curved line below the axis, starting from the origin and rising towards the right, is labeled $t_{wody\ chłodniczej}$. A vertical line connects the point Δt_m on the horizontal axis to the curved line.

W wyniku obliczeń otrzymano:

Strumień cieplny możliwy odebrania przez płaszcz : $q = 0,4 \text{ GJ/h}$

Wymagany czas dozowania substratu B: $\tau_r = Q/q = 16 \text{ h}$

Rzeczywisty czas trwania szarży: $\tau_{sz} = 24 \text{ h}$

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że należy zainstalować:

2 reaktory o pojemności $V_N = 16 \text{ m}^3$ każdy

Czy na tym można zakończyć dobór reaktorów ?

DOBÓR REAKTORA - WERSJE PROJEKTOWE

1. $V_N = 16 \text{ m}^3$ Emalia (f-my Balfour, De Dietrich) 2 szt.
2. $V_N = 16 \text{ m}^3$ Emalia + węzown. Tytan 1 szt.
3. $V_N = 8 \text{ m}^3$ Emalia (f-ma Lampart) 3 szt.
4. $V_N = 8 \text{ m}^3$ Emalia + węzown. Tytan 2 szt.
5. $V_N = 16 \text{ m}^3$ Stal, osuszanie surowca A 1 szt.
6. $V_N = 5 \text{ m}^3$ Emalia + Tytan, metoda. ciągła 1 szt.
7. $V_N = 5 \text{ m}^3$ Stal, metoda ciągła 1 szt.
8. Alternatywy dla wersji 1, 2, 3, 4, 5 analiza produktu poza reaktorem (w zbiorniku pośrednim)

CO WYBRAĆ ?

WYBÓR – zgodnie z zasadą umiaru technologicznego

(min. ryzyka techn.; max. pewność ruchowa; optimum kosztów)

WNIOSKI

PROJEKTOWANIE JEST PROCESEM ITERACYJNYM

Każdy projektant wybierze inne rozwiązanie

Badacz powinien znać metodologię projektowania

SCHEMAT TECHNOLOGICZNY

SCHEMAT TECHNOLOGICZNY - przedstawia przebieg procesu produkcyjnego za pomocą umownych symboli aparatów, urządzeń i armatury oraz wzajemnych powiązań rurociągowych i funkcjonalnych (PiA, czynniki energetyczne, punkty A, itp.).

Podział schematu na części – kryteria:

- węzły technologiczne,
- linie technologiczne,
- lokalizacja,
- długość schematu

SCHEMAT TECHNOLOGICZNY

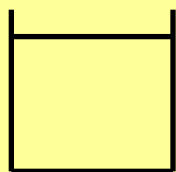
WĘZEL TECHNOLOGICZNY jest to zespół aparatów i urządzeń dla zrealizowania jednego lub kilku procesów i/lub operacji jednostkowych. Będzie to na przykład węzeł syntezy, destylacji czy też suszenia i magazynowania produktu.

Poszczególne procesy i operacje jednostkowe nie ograniczają się do jednego urządzenia lecz w praktycznej realizacji rozrastają do całego węzła technologicznego.

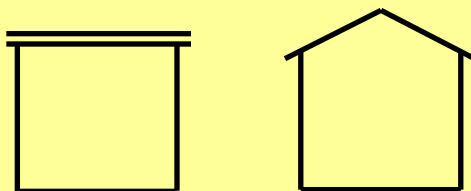
LINIA TECHNOLOGICZNA (zwana też nitką lub ciągiem technologicznym lub produkcyjnym) jest to zespół pojedynczych (na ogół) aparatów i urządzeń dla przeprowadzenia całego procesu technologicznego.

Pojęcia tego używa się w przypadku występowania kilku identycznych lub podobnych, często niezależnych linii produkcyjnych. W takiej sytuacji, na ogół wystarcza narysowanie schematu dla jednego ciągu, sygnalizując jedynie istnienie równoległych.

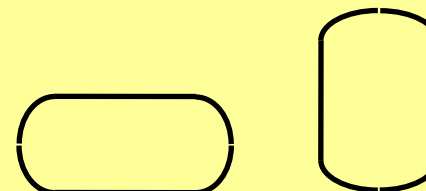
SYMBOLE GRAFICZNE APARATÓW I URZĄDZEŃ PRZEMYSŁU CHEMICZNEGO



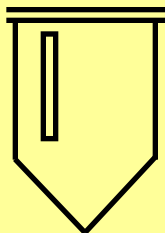
**zbiornik
bezcisnieniowy,
otwarty**



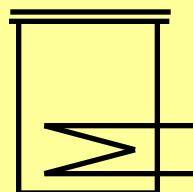
**zbiornik bezcisnieniowy,
zamknięty**



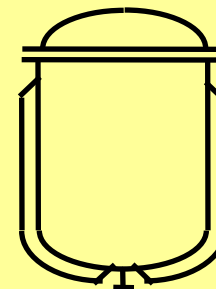
zbiornik ciśnieniowy



miernik / dozownik ciecchy

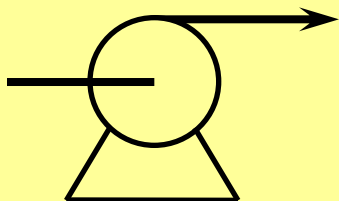


**zbiornik z elementem
grzewczym / chłodzącym**

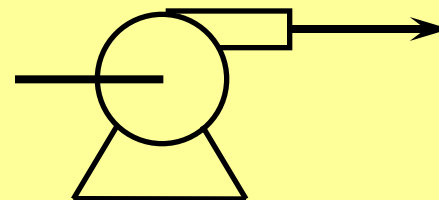


**zbiornik z płaszczem
grzewczym / chłodzącym**

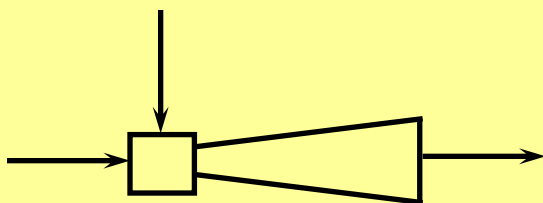
SYMBOLE GRAFICZNE APARATÓW I URZĄDZEŃ PRZEMYSŁU CHEMICZNEGO



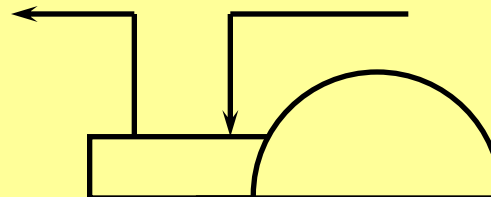
pompa - ogólnie



wentylator

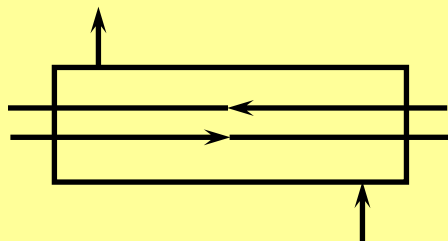


**smoczek
(injektor, ejektor)**

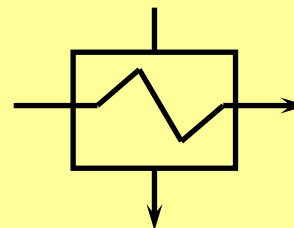


sprężarka (tłokowa)

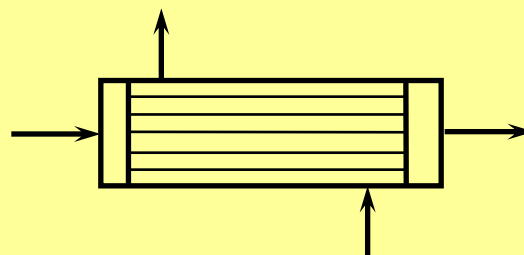
SYMBOLE GRAFICZNE APARATÓW I URZĄDZEŃ PRZEMYSŁU CHEMICZNEGO



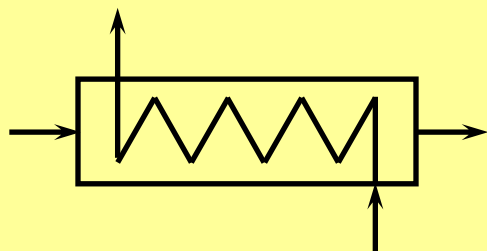
lub



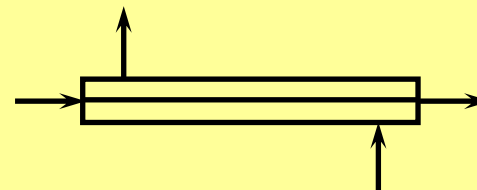
wymiennik ciepła (ogólnie)



wymiennik ciepła
płaszczowo - rurowy

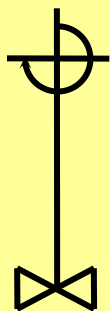


wymiennik ciepła
węzownicowy

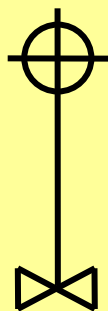


wymiennik ciepła typu „rura w rurze”

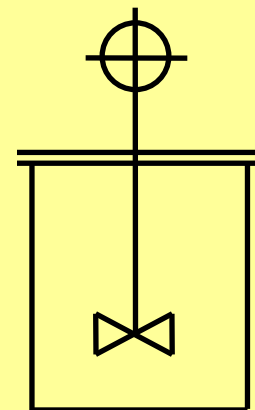
SYMBOLE GRAFICZNE APARATÓW I URZĄDZEŃ PRZEMYSŁU CHEMICZNEGO



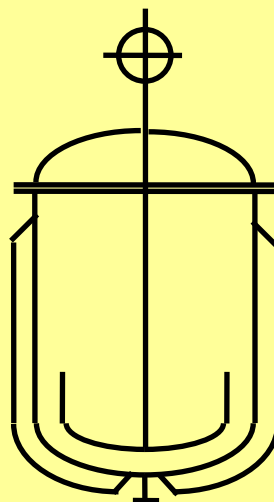
lub



**mieszadło
(ogólnie)**

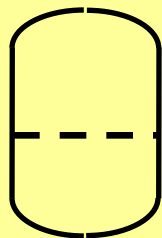


**mieszalnik bezciśnieniowy
z mieszadłem pionowym**

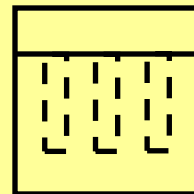


**mieszalnik ciśnieniowy z mieszadłem kotwicznym
i płaszczem grzewczo-chłodzącym**

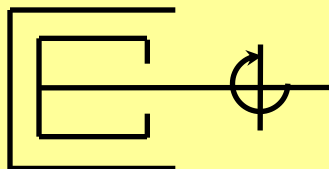
SYMBOLE GRAFICZNE APARATÓW I URZĄDZEŃ PRZEMYSŁU CHEMICZNEGO



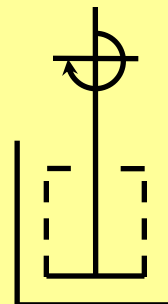
Filtr ciśnieniowy



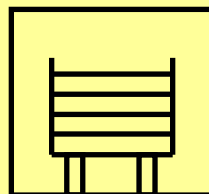
Filtr workowy



Wirówka sedymentacyjna, pozioma

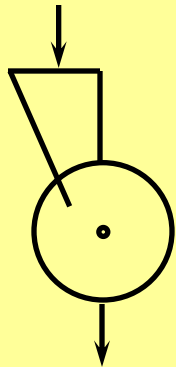


Wirówka filtracyjna, pionowa

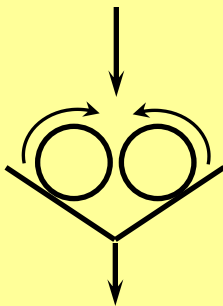


**Suszarka komorowa,
bezcisnieniowa**

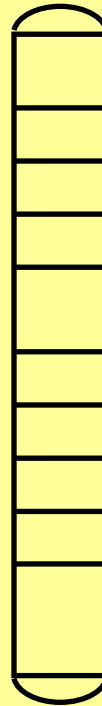
SYMBOLE GRAFICZNE APARATÓW I URZĄDZEŃ PRZEMYSŁU CHEMICZNEGO



Młyn - ogólnie



Kruszarka walcowa



**Kolumna półkowa,
ciśnieniowa**

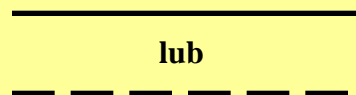


**Kolumna wypełniona,
bezciśnieniowa**

SYMBOLE GRAFICZNE RUROCIĄGÓW I ARMATURY



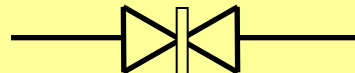
**rurociąg technologiczny,
kierunek przepływu**



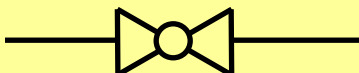
**rurociąg instalacyjny
(czynniki energetyczne i pomocnicze)**



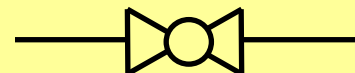
**zawór zwykły
(ogólnie)**



zasuwa



zawór kurek



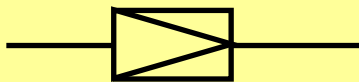
zawór kulowy

SYMBOLE GRAFICZNE RUROCIĄGÓW I ARMATURY

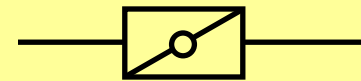


lub

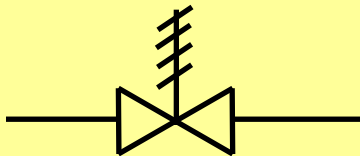
zawór zwrotny



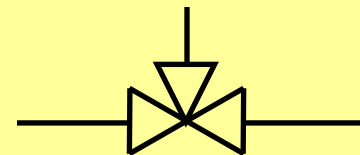
zawór redukcyjny



klapa dławiąca, przepustnica

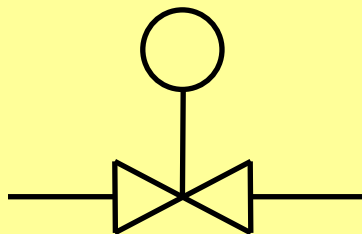


zawór bezpieczeństwa

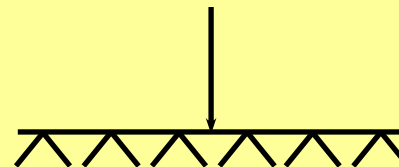


zawór trójdrogowy

SYMBOLE GRAFICZNE RUROCIĄGÓW I ARMATURY



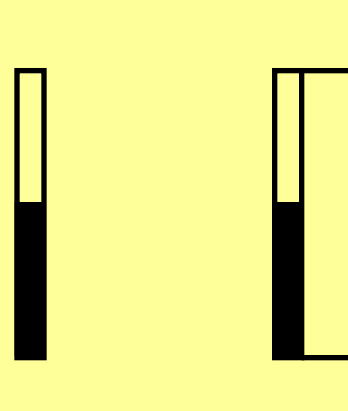
**zawór zdalnie sterowany z
siłownikiem (ogólnie)**



urządzenie zraszające



**odwadniacz
(garnek kondensacyjny)**

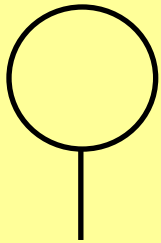


cieczowskaz

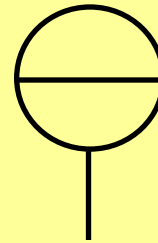
CO POWINIEN ZAWIERAĆ PEŁNY SCHEMAT TECHNOLOGICZNY (TECHNOLOGICZNO-POMIAROWY)

- 1. APARATY TECHNOLOGICZNE** (narysowane symbolicznie) z rozmieszczeniem w (wyżej, niżej) oraz z zachowaniem orientacyjnej skali (duży, mały).
- 2. POŁĄCZENIA RUROCIĄGOWE POMIĘDZY APARATAMI Z ZASADNICZĄ ARMATURĄ.**
- 3. WSZYSTKIE MEDIA TECHNOLOGICZNE WCHODZĄCE I WYCHODZĄCE Z WĘZŁA** (na początku i końcu schematu) z ich oznaczeniem i adresami (skąd, dokąd).
- 4. DOPROWADZENIE (I ODPROWADZENIE) CZYNNIKÓW ENERGETYCZNYCH I POMOCNICZYCH.**
- 5. PUNKTY POMIARÓW I AUTOMATYKI (PiA) oraz główne zawory regulacyjne.**
- 6. PUNKTY POBORU PRÓBEK ANALITYCZNYCH** (analizy międzyoperacyjne).
- 7. NUMERACJĘ POSZCZEGÓLNYCH APARATÓW** (i ewentualnie ich podstawowe parametry np. w formie tabelki).
- 8. WYKAZ STOSOWANYCH SKRÓTÓW I SYMBOLI.**
- 9. TABELKĘ SCHEMATU** (nazwa instalacji i węzła, wykonawcy, data, podpisy).

PRZYKŁADOWE SYMBOLE UKŁADÓW PiA



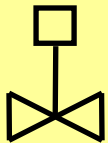
Punkt PA miejscowy



Punkt PA zdalny



**Urządzenie wykonawcze z elementem nastawczym
(ogólnie)**

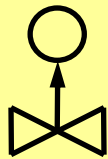


lub

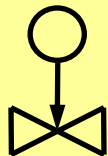


Zawór zdalnie sterowany z siłownikiem (ogólnie)

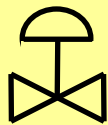
PRZYKŁADOWE SYMBOLE UKŁADÓW PiA



Zawór zdalnie sterowany z siłownikiem o działaniu otwierającym element nastawczy przy zaniku energii pomocniczej lub sygnału sterującego



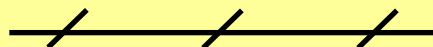
Zawór zdalnie sterowany z siłownikiem o działaniu zamykającym element nastawczy przy zaniku energii pomocniczej lub sygnału sterującego



Tradycyjny symbol zaworu sterowanego pneumatycznie (membranowego)

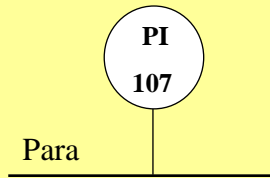


lub

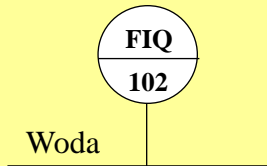


Linia sygnałowa

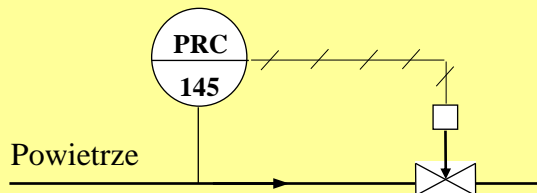
SYMBOLE UKŁADÓW PiA



Układ pomiaru ciśnienia (P) pary z miejscowym wskazaniem wartości (I)



Układ pomiaru (I) strumienia objętościowego (F) wody, ze zliczaniem ilości (Q) i odczytem w sterowni



Układ automatycznej regulacji (C) ciśnienia (P) powietrza ze zdalną rejestracją (R) wartości ciśnienia

Pierwsze litery symbolizują mierzony parametr.

T – temperatura (ang. *temperature*),

P – ciśnienie (ang. *pressure*),

F – natężenie przepływu (ang. *flow rate*),

L – poziom (ang. *level*),

Następne litery są oznaczeniem uzupełniającym (uściślającym) wielkość mierzoną lub sterowaną oraz funkcje punktów PiA.

I – wskazanie, pomiar (*indication*)

R – rejestracja (*registration*)

S – przełączanie (*switching*)

D – różnica (*difference*)

Q – całkowanie lub zliczanie (*quantity*)

C – automatyczne sterowanie, **regulacja** (*controlling*)

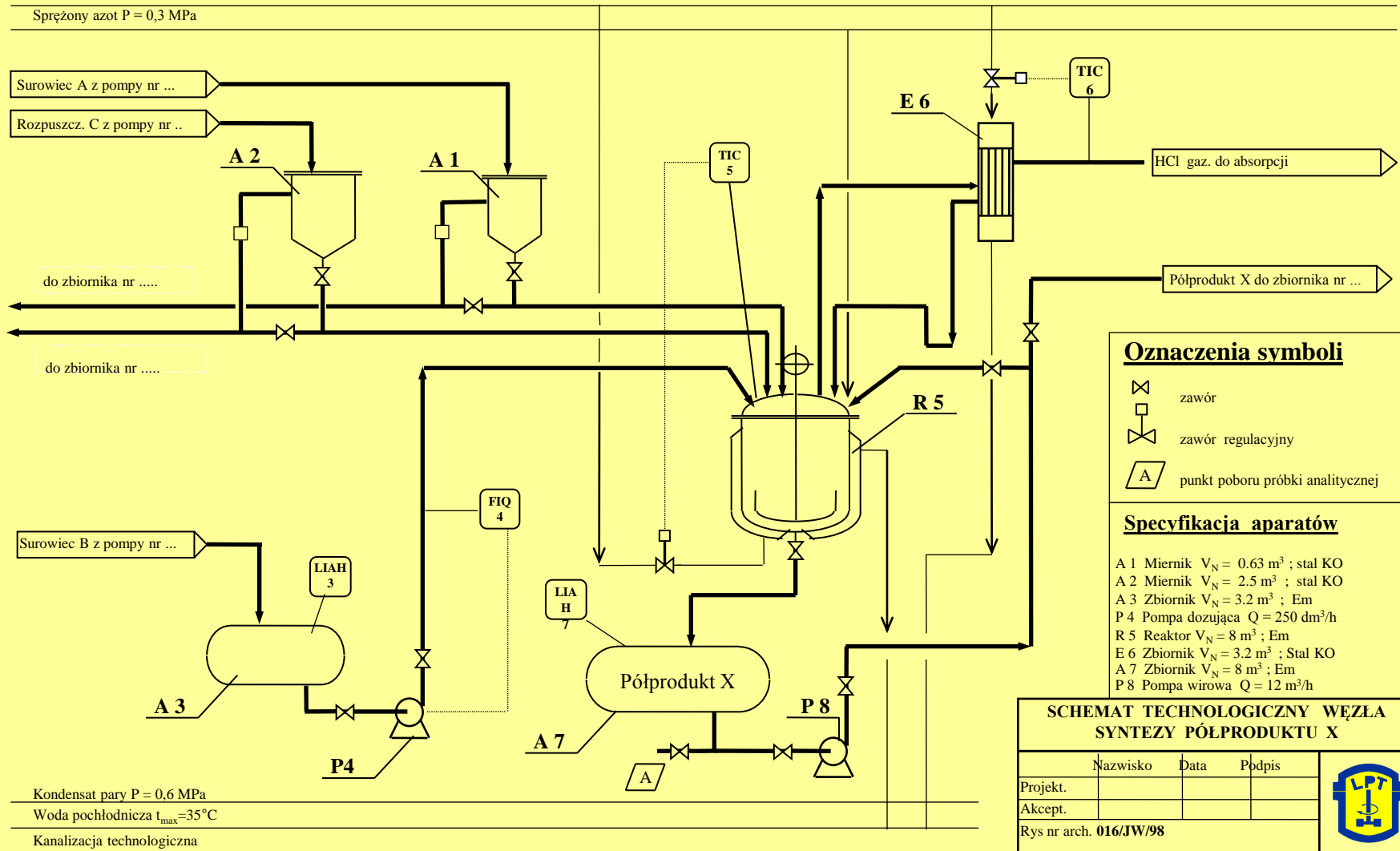
A – sygnalizacja, alarmowanie (ang. *alarm*) w celu określenia: granicy dolnej należy dopisać literę **L** (*low*), a dla granicy górnej literę **H** (*high*).

PRZYKŁADOWY SCHEMAT TECHNOLOGICZNY

Para wodna P = 0,6 MPa

Woda chłodnicza obiegowa $t_{\max} = 25^{\circ}\text{C}$

Sprężony azot P = 0,3 MPa



Kondensat pary P = 0,6 MPa

Woda pochlodnicza $t_{\max} = 35^{\circ}\text{C}$

Kanalizacja technologiczna

OPIS PRZEBIEGU PROCESU TECHNOLOGICZNEGO (SCHEMATU TECHNOLOGICZNEGO)

PRZEBIEG PROCESU SYNTEZY PÓŁPRODUKTU X

A. Przykład negatywny

Do reaktora syntezy ładujemy 2000 kg rozpuszczalnika B. Następnie dodajemy obliczoną ilość surowca A i rozpoczynamy dozowanie surowca C utrzymując w reaktorze temperaturę 60 °C.

Po zakończeniu reakcji zawartość reaktora spuszczaemy do zbiornika pośredniego.

OPIS PRZEBIEGU PROCESU TECHNOLOGICZNEGO (SCHEMATU TECHNOLOGICZNEGO)

PRZEBIEG PROCESU SYNTEZY PÓLPRODUKTU X

B. Przykład prawidłowy

Poniższy opis wykonano w nawiązaniu do schematu technologicznego węzła syntezy półproduktu X nr arch. 016/JW/98.

Przed rozpoczęciem szarży syntezy należy sprawdzić właściwe położenie zaworów na linii odgazów oraz uruchomić węzeł absorpcji HCl.

Do zbiornika namiarowego nr A1 przepompowuje się pompą nr P11 ze zbiornika magazynowego nr A10 surowiec A aż do momentu zaobserwowania przepływu cieczy w latarce na rurociągu przelewowym.

Podobnie, do zbiornika namiarowego nr A2 przepompowuje się pompą nr P21 ze zbiornika magazynowego nr A20 rozpuszczalnik B aż do momentu zaobserwowania przepływu cieczy w latarce na rurociągu przelewowym.

Do zbiornika A3 przepompowuje się surowiec C pompą nr P31 ze zbiornika magazynowego nr A30 aż do momentu zadziałania blokady pompy od poziomu maksimum (układ LIAH 3).

Do rektora syntezy nr R5 spuszcza się z miernika A2 2450 dm³ (2100 kg) rozpuszczalnika B. W reaktorze R5 uruchamia się mieszadło po czym, z miernika A1 spuszcza się do reaktora R5 odmierzoną porcję 525 dm³ (500 kg) surowca A.

Następnie otwiera się doprowadzenia wody chłodniczej do płaszczu reaktora R5 i do chłodnicy zwrotnej nr E6 oraz uruchamia układy regulacji temperatury TIC 5 i TIC 6.

Po wykonaniu powyższych czynności rozpoczyna się dozowanie surowca C z prędkością 200 dm³/h przy pomocy pompy dozującej nr P4. Szybkość dozowania jest kontrolowana przez układ FIQ 4. W reaktorze jest utrzymywana temperatura 60 °C (max. 64 °C) przy pomocy układu regulacyjnego TIC 5 sterującego dopływem wody chłodniczej do płaszczu reaktora R5.

Wydzielający się w czasie reakcji gazowy HCl przepływa wraz z oparami rozpuszczalnika do chłodnicy zwrotnej nr E6. Wykroplony rozpuszczalnik spływa z powrotem do reaktora R5 natomiast gazowy HCl przepływa do węzła absorpcji (schemat technologiczny nr arch. 017/JW/98).

Po zadozowaniu 1650 dm^3 (1320 kg) surowca C zatrzymuje się automatycznie pompa P4 (licznik FIQ 4). Zawartość reaktora miesza się jeszcze przez 0,5 h po czym przedmucha się azotem przez ok. 15 min i spuszcza do zbiornika pośredniego nr A7.

Ze zbiornika A7 pobiera się próbkę do analizy. Jeśli wynik analizy jest pozytywny, zawartość zbiornika przetłacza się pompą nr P8 do zbiornika nr A101 w węźle destylacji. Jeśli natomiast wynik analizy odbiega od normy zawartość zbiornika A7 zawraca się pompą P8 z powrotem do reaktora R5 w celu przeprowadzenia reakcji korekcyjnej.

**Proces periodycznego otrzymywania produktu P w skali 192 t/rok;
Szarża 800kg produktu; 240 szarż/rok; 300 dni rob./rok**

Nr	Aparat, operacja	1 doba			2 doba			3 doba			4 doba			5 doba			6 doba			7 doba					
		I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III			
1.	Otrzymywanie β -Ala ₂ Ca Reaktor Nr CRE601 $V_N = 6,3 \text{ m}^3$				—			—			—			—			—			—					
2.	Filtracja i przemycie Ca(OH) ₂ Filtr Nr CFI 602				↓			↓			↓			↓			↓			↓					
3.	Synteza i krystalizacja Reaktor Nr PRE 606A $V_N = 6,3 \text{ m}^3$				—									—											
3.	Synteza i krystalizacja Reaktor Nr PRE 606B $V_N = 6,3 \text{ m}^3$							—									—								
4.	Wirowanie Wirówka Nr CFI 607										↓			↓			↓			↓					
5.	Suszenie Suszarka Nr CDR 608										↓			↓			↓			↓					
6.	Destylacja ciągła metanolu Kolumna rektyf. Nr DDE 609	—																							

Produkt P co 30 h

BILANS CIEPLNY

PRAWO ZACHOWANIA ENERGII: sumaryczna ilość energii doprowadzonej do przemiany musi być równa sumarycznej ilości energii odprowadzonej.

Jeśli w rozpatrywanym procesie zachodzi przemiana energii cieplnej w inny rodzaj, np. mechaniczną, elektryczną (lub na odwrót), to powinna ona być uwzględniona w równoważnej ilości w bilansowanych strumieniach cieplnych.

Ogólne równanie bilansu cieplnego:

$$\Sigma H_{\text{wejścia}} = \Sigma H_{\text{wyjścia}}$$

RÓWNANIE BILANSU CIEPLNEGO (2)

Po stronie przychodu:

- H_s - entalpia wnoszona z substratami,
- H_{egzo} - entalpia przemian fiz. i chemicznych egzotermicznych,
- H_{ogrz} - entalpia pobierana z otoczenia lub celowo doprowadzana do układu (ogrzewanie),

Po stronie rozchodu:

- H_p - entalpia unoszona z produktami przemiany,
- H_{endo} - entalpia przemian fiz. i chemicznych endotermicznych,
- H_{ch} - entalpia celowo odprowadzana z układu (chłodzenie),
- H_{strat} - wszelkiego rodzaju straty cieplne.

RÓWNANIE BILANSU CIEPLNEGO (3)

Po uwzględnieniu w/w składowych równanie bilansu cieplnego:

$$H_s + H_{egzo} + H_{ogrz} = H_p + H_{endo} + H_{ch} + H_{strat}$$

Strumienie ciepłe wnoszone przez substraty (lub unoszone przez produkty) oblicza się uwzględniając entalpię odniesienia (np. 0°C) oraz stan skupienia (entalpię przemiany fazowej):

$$H_s = G_s (c_{śr} t + \Delta H_f)$$

gdzie:

G_s	- strumień masowy substratu,
$c_{śr}$	- średnie ciepło właściwe substancji,
t	- temperatura przemiany fazowej,
ΔH_f	- entalpia przemiany fazowej.

RÓWNANIE BILANSU (4)

Ciepła reakcji chemicznych podawane w tablicach mogą mieć znak:

- ujemny (reakcje egzotermiczne)
- dodatni (reakcje endotermiczne)

Ciepło wymieniane w przemianie (ogrzewanie lub chłodzenie): są to wszelkie strumienie ciepłne doprowadzane z zewnątrz lub odprowadzane na zewnątrz dla pokrycia jego niedoboru lub utrzymania stałości temperatury (np. mieszaniny reakcyjnej).

Do tej grupy należą też wszelkie straty ciepłne występujące w procesie. Rzeczywista wielkość strat ciepłnych zależy od warunków prowadzenia procesu, jak różnice temperatur czy prędkości przepływów oraz od rozwiązań aparaturowych takich jak tworzywa konstrukcyjne i grubość izolacji.

FORMY BILANSU CIEPLNEGO

- Tabelaryczna: zestawienie przychód – rozchód
(podobna do bilansu masowego)
- Graficzna jako tzw. wykres strumieniowy cieplny
(podobny do materiałowego wykresu Sankey'a)

**Zgodność bilansu cieplnego
ze schematem ideowym i bilansem masowym.**

FORMY BILANSU CIEPLNEGO

- **Dla procesów i operacji periodycznych** bilans w odniesieniu do: szarży, doby i jednostki masy produktu głównego,
- **Dla przemian ciągłych:**
godzinowe strumienie ciepłe,
i w odniesieniu do doby i jednostki masy produktu głównego

W praktyce rzadko udaje się wykonać pełny bilans cieplny:

BILANS CIEPLNY PEŁNY

- dla energochłonnych procesów w dużej skali

ZAŁOŻENIA DO OBLICZEŃ CIEPLNYCH

W projekcie procesowym należy wykonać co najmniej:

- **założenia** do bilansu;
- wszelkie **niezbędne** obliczenia cieplne

DANE DO OBLICZEŃ CIEPLNYCH

- Ciepła reakcji (egzo- , endotermiczna)
- Ciepła przemian fazowych (parowania, topnienia, adsorpcji itp.)
- Ciepła właściwe (czystych substancji, mieszanin, stan skupienia)
- Wykresy cieplne (np. H - S)

CEL OBLICZEŃ CIEPLNYCH

- Wielkość, rodzaj aparatów
 - ➔ Nakłady inwestycyjne
- Bilans zużycia czynników energetycznych
 - ➔ energochłonność [kJ / 1 t produktu]
 - ➔ koszty wytwarzania produktu (udział w TKW)
- Przepływy / zużycie czynników energetycznych [kg / h]
 - ➔ założenia dla branż
 - ➔ nakłady inwestycyjne
- Wpływ na środowisko naturalne

LITERATURA

- ❖ *Projektowanie procesów technologicznych – Od laboratorium do instalacji przemysłowej*, red. L. Synoradzki, J. Wisiański, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2006,
 - rozdział. 8: *Elementy projektu procesowego*,
 - rozdział. 12: *Dojrzałość technologii do wdrożenia przemysłowego*.
- ❖ *Projektowanie procesów technologicznych – Bezpieczeństwo procesów chemicznych*, red. L. Synoradzki, J. Wisiański, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2012.