

MICHAŁ DYLAĞ, JERZY ROSIŃSKI, JERZY KAMIEŃSKI\*

## REAKTOR ZBIORNIKOWY Z MIESZADŁEM – EWOLUCJA STRUKTUR PROJEKTOWANIA TECHNICZNEGO

---

### STIRRED TANK REACTOR – EVOLUTION OF THE TECHNICAL DESIGN STRUCTURES

---

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono dynamikę ewolucji struktur projektowania technicznego związanego z działalnością inwestycyjną w branży przemysłu chemicznego i pokrewnych. Wzajemne oddziaływania pomiędzy stanem wiedzy i techniki z zakresu budowy i konstrukcji aparatury, projektowaniem instalacji oraz inżynierią chemiczną i procesową – pokazane na przykładzie węzła technologicznego ze zbiornikowym reaktorem chemicznym – wskazały na konieczność prowadzenia projektowania w sposób gwarantujący uwzględnienie wzajemnych powiązań we wszystkich fazach realizacji projektu technicznego.

*Słowa kluczowe: projektowanie, wymiana ciepła, reaktor*

#### Abstract

Evolution of the technical design structures connected with investment activity in the chemical and related industries in the paper is presented. The interactions appearing between the state of knowledge and technique in the field of design and construction of industrial equipment, plant design as well as chemical and process engineering – shown on the example of the technological centre with a chemical tank reactor – pointed at necessity of design in the way guaranteeing to take into consideration reciprocal connections for all stages of the realization of a technical design.

*Keywords: process and plant design, heat transfer, chemical reactor*

---

\* Prof. dr hab. inż. Michał Dylağ, dr inż. Jerzy Rosiński, dr inż. Jerzy Kamieński, Instytut Aparatury Przemysłowej i Energetyki, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

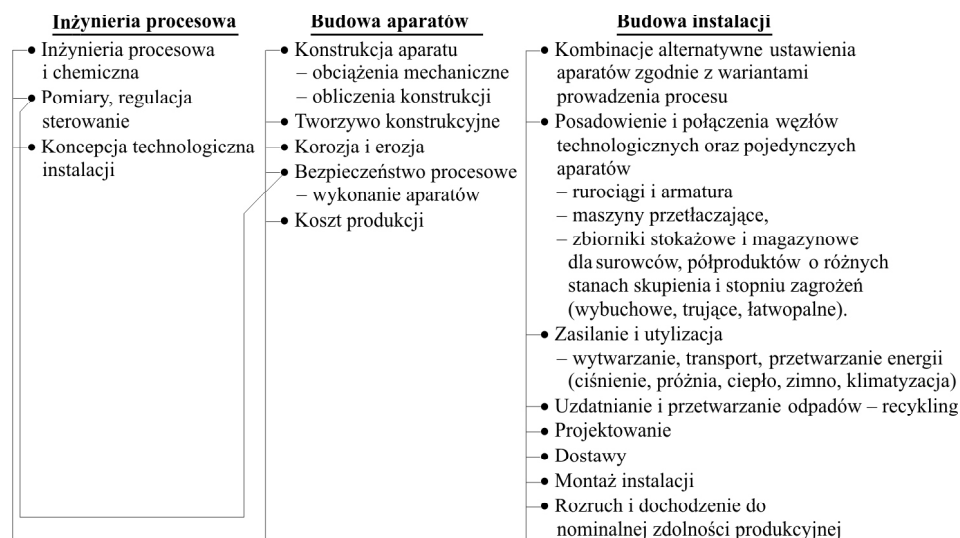
W procesie projektowania instalacji przemysłowych praktycznie od połowy lat 50. ubiegłego wieku inżynierowie i absolwenci nauk przyrodniczych oraz technicznych pracowali oddzielnie. Dotyczyło to zarówno studiów, jak też praktyk przemysłowych. Dla przykładu, w przemyśle chemicznym chemicy uniwersyteccy koncentrowali się na podstawach teoretycznych i optymalizacji procesów technologicznych. Część fizyków skupiała się na technice pomiarów. Zagadnienia sterowania procesu w skali instalacji znajdowały się wówczas w początkowej fazie rozwoju. Inżynierowie zajmujący się budową aparatów i instalacji – będąc absolwentami wydziałów mechanicznych lub budowy maszyn – upatrywali swoich zadań w obszarze mechaniki technicznej, tworzyw konstrukcyjnych oraz doskonalenia rozwiązań i koncepcji konstrukcyjnych pojedynczych aparatów.

Sytuacja taka była możliwa, gdyż zdolności produkcyjne instalacji były małe, a prowadzona produkcja miała charakter okresowy. Oznaczało to, że koszty osobowe były wprawdzie względnie wysokie, globalnie jednak niskie. Podobnie kształtowały się – uwzględniając sens proporcji – koszty inwestycyjne nowych instalacji, czyli były one niskie. Pozwalało to świadomie przewidzieć i wprowadzić do instalacji dodatkowe aparaty, gotowe do włączenia do ruchu (rezerwowe). Dodatkowo należy stwierdzić, że wpływ optymalizacji poszczególnych pojedynczych aparatów na ocenę całej instalacji był nieznaczny, ponieważ nie wszystkie aparaty (urządzenia) realizujące dany proces technologiczny w instalacji były użytkowane w optymalnym reżimie pracy.

Z początkiem lat 60. zaobserwowano w branży budowy aparatów i instalacji przemysłowych trend zwiększający wielokrotnie wydajność produkcji. Budowano duże jednostki, pracujące w ruchu ciągłym, przy wydajności rzędu kilku tysięcy ton produktu dziennie. Dla takich przypadków oddzielne projektowanie aparatu i instalacji nie było możliwe, gdyż nie tylko konstrukcja każdego pojedynczego aparatu musiała być w większym stopniu powiązana z całą instalacją i jej bezpieczeństwem procesowym i technologicznym, lecz w pierwszym rzędzie powinna ona uwzględniać optymalne warunki prowadzenia ruchu. Oznacza to, że przy konstrukcji każdego pojedynczego aparatu należy uzmienniać każdy parametr wpływający na optymalną budowę całej instalacji. Innymi słowy, zakres kompetencji konstruktora każdego pojedynczego aparatu ulega znacznemu rozszerzeniu – jego decyzje wywierają istotny wpływ na projektowanie całej instalacji w rozumieniu wzajemnego oddziaływania na siebie aparatów i urządzeń, zatem na całą instalację. Podobnie działa sprzężenie zwrotne w zakresie projektowania procesowego, gdyż koncepcja konstrukcyjna mieszalnika lub wymiennika ciepła ma wpływ na sposób prowadzenia obliczeń procesowych oraz koncepcja regulacji i sterowania ruchu całej instalacji [1, 2].

Na rysunku 1 przedstawiono wzajemne powiązania i interakcje pomiędzy budową aparatury, instalacji oraz inżynierią procesową i chemiczną. Zestawiono podstawowe elementy i zakresy wiedzy dotyczące technologii budowy, decydujące o powodzeniu w projektowaniu instalacji wielkotonazowych przemysłu przetwórczego.

Przedstawiona próba schematyzacji elementów decyzyjnych i ich efektów – dla każdej z trzech utworzonych grup – oraz wzajemne interakcje wskazują na możliwość zwielokrotnienia strat wywołanych błędnymi decyzjami oraz nieuwzględnieniem strukturalnych interakcji.



Rys. 1. Podstawowe elementy wiedzy i techniki z zakresu budowy aparatury, instalacji oraz inżynierii procesowej

Fig. 1. Fundamentals of know-how for process engineering, plant equipment and apparatus design

### A. Budowa aparatury

Przyjęcie koncepcji konstrukcyjnej aparatu, prowadzenie obliczeń uwzględniających wszystkie obciążenia, obliczenia wytrzymałościowe, dobór tworzyw konstrukcyjnych z uwzględnieniem korozji i erozji, bezpieczeństwo pracy, możliwość wykonania, koszty produkcji, warunki transportu na plac budowy oraz technologiczne i techniczne warunki montażu całej instalacji i jej węzłów z uwzględnieniem remontów awaryjnych i planowanych.

### B. Budowa instalacji

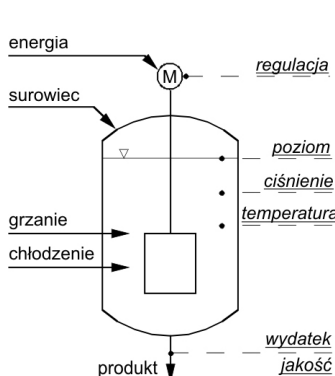
Projekty pojedynczych aparatów i ich wariantowe usytuowanie w opracowanych wariantowych schematach technologicznych – uwzględniających koszt całej instalacji. Analiza połączeń poszczególnych elementów (węzłów) w całość, układy rurociągów, armatura oraz maszyny przetłaczające (transportowe), zbiorniki magazynowe, zasilanie energią, pomiary, regulacja, sterowanie procesem, zamówienia, dostawy oraz rozruch mechaniczny i technologiczny [3].

### C. Inżynieria procesowa

Opracowanie projektów procesowych poszczególnych węzłów i całości instalacji, metody jakościowych i ilościowych pomiarów, zagadnienia optymalizacyjne [4, 5].

Na rysunku 1 wskazano na wzajemne powiązania elementów wszystkich trzech podstawowych obszarów. Wzajemne interakcje oraz ich efekty stają się szczególnie widoczne na konkretnych przykładach.

Przedstawiony schematycznie na rys. 2 reaktor zbiornikowy z mieszadłem stanowi przedmiot analizy możliwości realizacji transportu ciepła z uwzględnieniem jego optymalizacji w dwóch podstawowych wariantach.



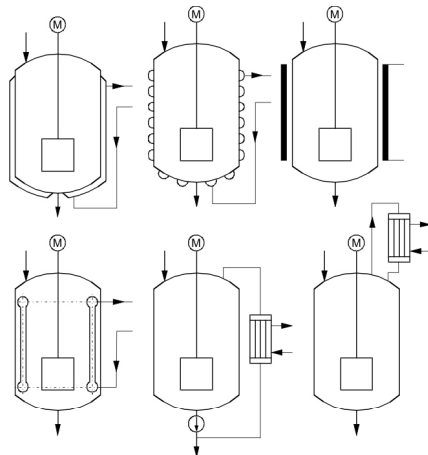
Rys. 2. Sformułowanie problemu oraz jego uwarunkowanie procesowe

Fig. 2. Problem formulating and its process dependences

Rozpatrując zagadnienie transportu ciepła w prostym reaktorze chemicznym, dysponujemy początkowo jedynie założeniami wstępnymi dotyczącymi strumieni doprowadzanego i odprowadzanego ciepła. Transport ciepła przez ściankę reaktora – dla zadanych warunków – oznacza dla przypadku jego doprowadzania ciśnienie obliczeniowe rzędu 10 bar i temperaturę ok. 300°C. Źródła energii dla dwóch analizowanych przypadków mogą stanowić: prąd elektryczny, para wodna, czynnik chłodzący R12 oraz zimna woda. Analiza realizacji zadania wskazuje, że istnieją zaledwie dwie możliwości intensyfikacji wymiany ciepła: drogą zmiany koncepcji konstrukcyjnej lub rodzaju doprowadzanej energii.

Rozważając pierwszą alternatywę, na rys. 3 zestawiono warianty technicznej realizacji zmian koncepcji konstrukcyjnej wykonania powierzchni wymiany ciepła.

Dla pierwszego przypadku na rys. 2 przedstawiono warianty wprowadzanych zmian: reaktor z płaszczem, reaktor z wężownicą zewnętrzną (aparatus Samka, zmodyfik-

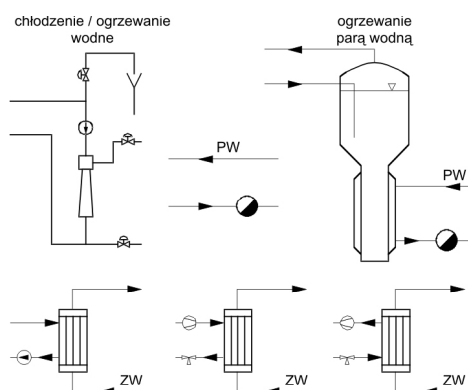


Rys. 3. Warianty konstrukcyjne rozwinięcia powierzchni wymiany ciepła

Fig. 3. Structural variants for heat exchange area development

kowany), ogrzewanie elektryczne, zabudowa przestrzeni wewnętrznej reaktora oraz układ doprowadzenia ciepła (odprowadzenia) z zewnętrznym wymiennikiem ciepła, schładzanie przez odparowanie.

Przedstawione warianty możliwości intensyfikacji przez zmianę odprowadzenia (doprowadzenia) ciepła oparto na założeniu dla uproszczenia niezmienności wartości własności



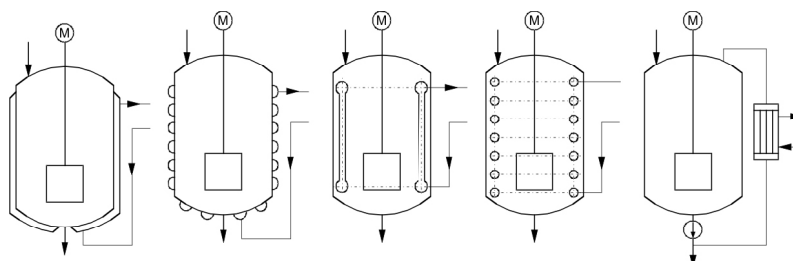
Rys. 4. Wariantowe sposoby rozwiązania węzła technologicznego reaktor-źródło energii-instalacja z wykorzystaniem ciepłej i zimnej wody (ZW), pary wodnej (PW) i modyfikowanej, nośników ciepła (dowterm)

Fig. 4. The variants of reactor – energy source thermal centre for plants using hot and cold (ZW) water and steam (PW)

fizycznych reagentów, zapotrzebowania energii, wydajności, gabarytów reaktora H i D, objętości cieczy oraz wytwarzanych przez mieszadło warunków przepływu oraz ciepła reakcji.

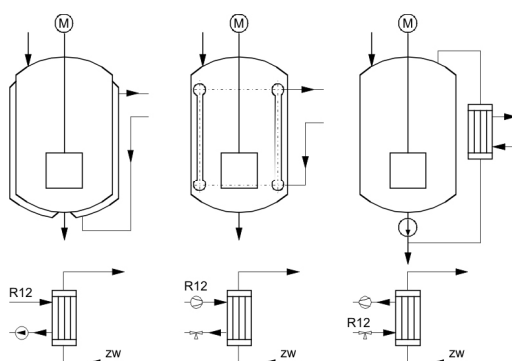
Analiza wykonania zadania projektowego przez zmianę rodzaju i sposobu doprowadzania energii – będąca alternatywnym wariantem realizacji zadania projektowego – została wariantowo przedstawiona schematycznie na kolejnych rysunkach.

W zależności od wybranego rozwiązania oraz zastosowanego nośnika ciepła można uzyskać znaczne obniżenie powierzchni wymiany ciepła. Przykładowo, zastępując koncepcję przedstawioną na rys. 6 rozwiązaniem proponowanym na rys. 5, uzyskujemy zmniejszenie



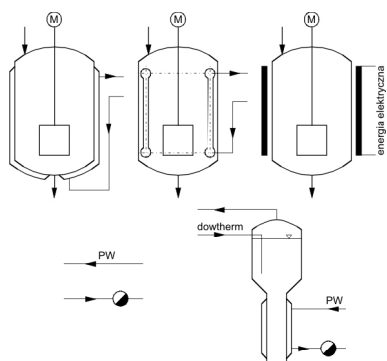
Rys. 5. Łączne systemy cieczowego ogrzewania i chłodzenia

Fig. 5. Combined systems for liquid heating and cooling



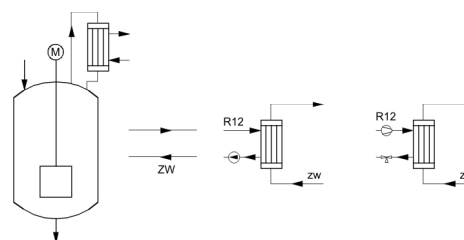
Rys. 6. Zintegrowane układy różnych rozwiązań konstrukcyjnych: płaszcz grzewczy, zabudowa wężownicy, zamknięty układ z zewnętrznym wymiennikiem ciepła

Fig. 6. Integrated systems for different solutions of constructions: heating jacket, coil, closed system with outside heat exchanger



Rys. 7. Ogrzewanie zintegrowane: para wodna, para wodna + nośnik ciepła oraz ogrzewanie elektryczne

Fig. 7. Integrated heating: steam, steam + a heat carrier and the electric heating



Rys. 8. Schładzanie przez odparowanie z zewnętrzną kondensacją oparów – czynnik chłodniczy R12

Fig. 8. Evaporation cooling by the outside vapor condensation – cooler R12

powierzchni ze 100% na 22% lub z 97% na 41%. Dla przypadku przedstawionego na rys. 8 następuje obniżenie powierzchni wymiany ciepła w porównaniu do rozwiązania z rys. 2 o 70% (zimna woda oraz 65% z zastosowaniem rozwiązania z odpowiednim czynnikiem żiębniczym).

Analiza porównawcza przedstawionych wariantów zmiany zabudowy zewnętrznej powierzchni wymiany ciepła oraz różnych nośników ciepła i zimna oznacza dla konkretnej aparatury wybór rozwiązań z najmniejszą powierzchnią wymiany ciepła. Innymi słowami, dominującą tendencją w zakresie konstrukcji aparatów powinno być – ze względu na niskie koszty produkcji – rozwiązanie charakteryzujące się najmniejszą powierzchnią wymiany ciepła. Tendencja ta jest także widoczna w budowie instalacji, jednakże przy spełnieniu trzech warunków:

- 1) gwarancja zapewnienia założonych warunków pracy aparatu, w szczególności wydajności i jakości produktu,
- 2) zadowalające bezpieczeństwo pracy, oznaczające: wystarczające możliwości pomiarów i regulacji parametrów pracy, dostępność i gwarancje obsługi przy określonym zatrudnieniu, wymiennosc części i podzespołów, gwarancje możliwości dostaw części zapasowych,
- 3) minimalizacja kosztów produkcji fabrykatu końcowego, uwzględniająca koszty projektowania instalacji i zakupów jej elementów oraz koszty ruchowe.

Realizacja tych warunków gwarantuje równoczesne zapewnienie właściwego doboru i optymalnych warunków pracy konstruowanych elementów całości instalacji oraz właściwych prac konstrukcyjnych nad aparatami. Oznacza to, że typowe koszty specyfikacji technicznej, stanowiące m.in. zawartość projektów procesowych, nie są jedyną płaszczyzną styku pomiędzy projektowaniem instalacji i konstruowaniem aparatów. Dodatkowo wiąże się to z tym, że konstruktor aparatury musi uczestniczyć jako „krytyczny specjalista” w procesie projektowania instalacji. Ta forma „interdyscyplinarnej infiltracji” została wymuszona przez potrzeby przemysłu i musi znajdować odbicie w planach i programach studiów polskich uczelni technicznych [6].

Rozwój techniki oraz rosnące zapotrzebowanie na produkty, a także zmiany w systemie kształcenia polskich uczelni technicznych zaowocowały m.in., realizacją podstawowego po-

stulatu w formie wprowadzenia do wieloczołowej struktury projektowania, obejmującej założenia techniczno-ekonomiczne (ZTE) łącznie z projektem procesowym oraz projektu technicznego (PT).

Rozwiązanie powyższe, ustawowo usankcjonowane, obowiązywało w Polsce przy realizacji projektów inwestycyjnych i modernizacyjnych praktycznie do końca ubiegłego wieku.

Zmiany systemu politycznego i ekonomicznego oraz ich projekcja na branżę przemysłowe zaowocowały stopniowym wprowadzaniem struktur realizacji zadań opartych na europejskich doświadczeniach.

Na dzień dzisiejszy normą stało się opracowanie 5-etapowe, obejmujące kolejno: opracowanie koncepcji, *Basic Design*, *Basic Engineering*, *Detail-Engineering*, Budowę, Rozruch mechaniczny i technologiczny instalacji. Powyższa struktura działania oraz kolejne elementy składowe (zadania) jej etapów pozwalają na realizację – poczynając od zaistnienia potrzeby uzyskania produktu, aż do jego wykonania oraz przystosowania do transportu na miejsce przeznaczenia.

W artykule przedstawiono ewolucję struktur projektowania technicznego instalacji przemysłowych – wychodząc od czasów rozdzielnego projektowania poszczególnych aparatów, zbiorników i maszyn technologicznych, do czasów dzisiejszych wskazujących na brak uzasadnienia dla rozdzielnego projektowania pojedynczych elementów instalacji (np. aparatów) bez uwzględnienia skutków dla całej instalacji. Oznacza to, że każda pojedyncza konstrukcja musi nie tylko gwarantować bezpieczeństwo i efekt technologiczny, lecz także zapewniać optymalne wykorzystanie możliwości w ramach całej instalacji. W warunkach polskich wiąże się to ze stosowaniem wielofazowej struktury projektowania i realizacji, charakteryzującej się odejściem od sekwencyjnych działań i zastąpienie ich procedurami wielokrotnej optymalizacji całej instalacji. Efektem tych zmian jest znaczne skrócenie cykli inwestycyjnych, wykorzystujących daleko posuniętą specjalizację, unifikację i standaryzację produkcji maszyn i urządzeń oraz prawie całkowitą rezygnację ze stosowania nietypowych rozwiązań konstrukcyjnych.

#### Literatura

- [1] Ludwig E.E., *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants*, Gulf Publishing Company, Houston, Texas 1965.
- [2] Bąbiński Cz., *Elementy nauki o projektowaniu*, WNT, Warszawa 1972.
- [3] Tietze H., Wilke H.-P., *Elemente des Apparatebaues*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1992.
- [4] Weber K.H., *Inbetriebnahme verfahrenstechnischer Anlagen*, VDI-Verlag, Düsseldorf 1996.
- [5] VDI-Wärmeatlas, VDI-Verlag, 5. Auflage, Düsseldorf 1988.
- [6] Blaß E., *Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse*, Verlag-Sawerländer, Frankfurt am Mein, Salzburg 1989.