

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

**Wydział Budownictwa, Mechaniki i
Petrochemii**

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Piotr Kisielewski

**Dynamika przeponowego wymiennika ciepła służącego do
rektyfikacji substancji**

**Dynamic of diaphragm heat exchanger serving for rectification of
substances**

Promotor
dr hab. inż. Mariusz Markowski, prof. uczelni

Promotor pomocniczy
dr inż. Marian Trafczyński

Płock, 2021

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono matematyczny model dynamiki wymiennika kanałowego, gdzie termicznemu rozdziałowi substancji towarzyszy przeponowa wymiana ciepła (H&MPE - Heat and mass plate exchanger). Należy dodać, że wymienniki tego typu nie są stosowane w przemyśle, gdyż nadal są w fazie badań. Z drugiej strony tego rodzaju rozwiązanie, nawiązujące do technologii, występującej w literaturze anglojęzycznej pod nazwą: heat-integrated distillation column (HIDiC), umożliwia zmniejszenie zużycia ciepła o 40-60% w stosunku do istniejących rozwiązań przemysłowych.

W celu zapewnienia stabilnych parametrów eksploatacyjnych rozważanego w pracy wymiennika H&MPE, wymagane jest zaprojektowanie odpowiedniego układu regulacji. Do tego celu niezbędne jest opracowanie matematycznego modelu dynamiki badanego obiektu.

Celem pracy jest potwierdzenie poprzez symulacje numeryczne, odporności wymiennika H&MPE na zmienne warunki eksploatacji przemysłowej, polegającej na zachowaniu wymaganej czystości rozdzielanych produktów. Zmianom mogą ulegać parametry wejściowe (temperatura, ciśnienie oraz strumienie masowe cieczy i oparów), stopień zapełnienia kanału wymiennika cieczą oraz zanieczyszczenie powierzchni wymiany ciepła osadami, co ma wpływ na czystość uzyskiwanych produktów destylacji.

W pracy przedstawiono matematyczny model wymiennika H&MPE w stanie ustalonym oraz nieustalonym - dynamicznym. Na podstawie równań bilansu energii i masy wyznaczono parametry dla stanu ustalonego funkcjonowania wymiennika, natomiast stosując teorię oporów cieplnych dla wymiany ciepła wyznaczono jego geometrię.

Matematyczny model dynamiki wymiennika opracowano w oparciu o powszechnie stosowany w praktyce inżynierskiej model sekcyjny o parametrach skupionych. Dalej wyznaczono transmitancje operatorowe, które wiążą ze sobą sygnały wejściowe i wyjściowe układu. Wykorzystując transmitancje, opracowano schemat blokowy wymiennika H&MPE, a następnie zaimplementowano i poddano symulacji jako model Simulinka w środowisku MATLAB. Z przeprowadzonych symulacji pracy modelu uzyskano charakterystyki dynamiczne - krzywe przedstawiające przebieg czasowy sygnału wyjściowego na zakłócenie wywołane przez określoną zmianę sygnału wejściowego.

Uzyskane z symulacji numerycznej wyniki świadczą o stabilności pracy badanego modelu wymiennika H&MPE a jego wykorzystanie może być podstawą przy opracowywaniu układów regulacji wymienników typu kanałowego do termicznej separacji substancji.

Zakres pracy obejmuje:

- przegląd literatury przedmiotu, sformułowanie problemu badawczego oraz określenie celu pracy,
- określenie bazy danych (parametrów termodynamicznych, takich jak: ciśnienie, temperatura, strumienie masowe oraz właściwości fizykochemiczne cieczy i oparów: gęstość, lepkość, ciepło właściwe, przewodność cieplna, ciepło parowania) na podstawie symulacji utworzonego modelu wymiennika H&MPE w stanie ustalonym,
- określenie parametrów geometrycznych wymiennika H&MPE z wykorzystaniem modelu oporów cieplnych oraz modelu półki teoretycznej w wymianie ciepła i masy,
- określenie sygnałów wejściowych i wyjściowych dla modelu sekcyjnego dynamiki wymiennika H&MPE,
- wyznaczenie transmitancji operatorowych wiążących sygnały wejściowe i wyjściowe dla wymiennika H&MPE,
- opracowanie schematu blokowego wymiennika H&MPE,
- symulacje numeryczne wymiennika H&MPE w stanie nieustalonym,
- analizę uzyskanych charakterystyk, pod względem stabilności dynamicznej układu na zmianę sygnałów wejściowych, na podstawie przebiegu czasowego sygnałów wyjściowych,
- analizę uzyskanych charakterystyk pod względem stabilności dynamicznej układu na typowe uwarunkowania przemysłowe, takie jak stopień zatrzymania cieczy w aparacie oraz narastanie oporu cieplnego osadów,
- weryfikację hipotezy badawczej w oparciu o przebieg symulacji i uzyskane wyniki,
- opracowanie wniosków końcowych.

Słowa kluczowe: rektyfikacja, dynamika, HiDIC, integracja cieplna, wymiana ciepła

SUMMARY

The paper presents a mathematical model of the dynamics of a channel exchanger, where thermal separation of substances is accompanied by membrane heat exchange (H&MPE - Heat and mass plate exchanger). It should be added that exchangers of this type are not used in industry, as they are still in the research phase. On the other hand, this type of solution, referring to the technology used in the English-language literature under the name: heat-integrated distillation column (HIDiC), allows to reduce heat consumption by 40-60% compared to existing industrial solutions.

In order to ensure stable operating parameters of the H&MPE exchanger considered in operation, it is required to design an appropriate control system. For this purpose, it is necessary to develop a mathematical model of the dynamics of the tested object.

The aim of the work is to confirm, through numerical simulations, the resistance of the H&MPE exchanger to changing conditions of industrial operation, consisting in maintaining the required purity of the separated products. The input parameters (temperature, pressure and mass streams of liquids and vapors), the degree of filling the exchanger channel with liquid and contamination of the heat exchange surfaces with sediments may change, which has an impact on the purity of the distillation products obtained.

The paper presents a mathematical model of the H&MPE exchanger in steady and transient dynamic states. Based on the energy and mass balance equations, the parameters for the steady-state operation of the exchanger were determined, while using the thermal resistance theory for heat transfer, its geometry was determined.

The mathematical model of the exchanger dynamics was developed on the basis of the lumped-parameter approach, commonly used in engineering practice. Next, the transfer functions, connecting the input and output signals of the system with each other, were determined. Using transfer functions, a block diagram of the H&MPE exchanger was developed, and then implemented and simulated as a Simulink model in the MATLAB environment. Dynamic characteristics were obtained from the simulations of the mathematical model - curves showing the time course of the output signal to the disturbance caused by a specific change in the input signal.

The results obtained from the numerical simulation prove the stability of the tested H&MPE exchanger model and its use may be the basis for the development of channel-type exchanger control systems for thermal separation of substances.

The scope of work includes:

- review of the literature on the subject, formulation of the research problem and definition of the aim of the work,
- determination of the database (thermodynamic parameters, such as pressure, temperature, mass flow rate and properties of liquids and vapors: density, viscosity, specific heat, thermal conductivity, heat of vaporization) based on the simulation of the created H&MPE exchanger model in a steady state,
- determination of the geometric parameters of the H&MPE exchanger using the thermal resistance model and the theoretical plate model in heat and mass transfer,
- determination of input and output signals for the lumped-parameter model of the dynamics of the H&MPE exchanger,
- determination of transfer functions connecting input and output signals for the H&MPE exchanger,
- development of a block diagram of the H&MPE exchanger,
- numerical simulations of the H&MPE exchanger in a transient state,
- analysis of the obtained characteristics, from the point of view of the dynamic stability of the system to the change of input signals, based on the time behaviour of the output signals,
- analysis of the obtained characteristics from the point of view of the dynamic stability of the system for typical industrial conditions, such as: the degree of liquid retention in the apparatus and increase of thermal fouling resistance,
- verification of the research hypothesis based on the course of the simulation and the obtained results,
- preparation of final conclusions.

Keywords: rectification, dynamics, HiDIC, thermal integration, heat transfer

Dziękuję:
Panu
prof. dr hab. inż. Mariuszowi Markowskiemu
za poświęcony czas i nieocenioną pomoc w opracowaniu niniejszej pracy;
Panu
dr inż. Marianowi Trafczyńskiemu
za pomoc w realizacji symulacji.

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE	2
1. Geneza pracy	13
2. Stan wiedzy	15
2.1. Konwencjonalny układ do rozdziału substancji	15
2.2. Metody ograniczenia energochłonności w procesie rektyfikacji	16
2.2.1. Metody zwielokrotnionego efektu	17
2.2.2. Sekwencja rozdziału substancji	18
2.2.3. Kolumna destylacyjna z przegrodą pionową	18
2.2.4. Kolumna destylacyjna wspomagana sprężarką	20
2.2.5. Diabatyczna kolumna destylacyjna	22
2.2.6. Koncentryczna cieplnie zintegrowana kolumna destylacyjna	23
2.2.7. Wymienniki ciepła w układzie do rozdziału substancji	23
2.2.8. Zintegrowana cieplnie kolumna rektyfikacyjna	24
2.3. Dynamika aparatów do przeponowej wymiany ciepła oraz wymiany ciepła i masy ...	27
2.3.1. Dynamika aparatów do wymiany ciepła – przeponowe wymienniki ciepła	28
2.3.2. Dynamika aparatów do wymiany masy - kolumny destylacyjne	31
2.4. Osady	38
3. Zadania i cel pracy	40
3.1. Cel i zakres pracy	40
3.2. Hipoteza badawcza	42
4. Model analityczny wymiennika H&MPE	43
4.1. Wprowadzenie	43
4.2. Wyznaczenie rzeczywistych profili kolumny	45
4.3. Obliczenia cieplne	48
5. Dynamika wymiennika H&MPE	49
5.1. Opis matematyczny dynamiki wymiennika H&MPE	49

5.2.	Model sekcyjny dynamiki wymiennika H&MPE	50
5.3.	Uwzględnienie wpływu ciśnienia na funkcjonowanie aparatu	56
5.4.	Wyznaczanie transmitancji operatorowych.....	57
5.5.	Schemat blokowy wymiennika H&MPE	66
6.	Dynamika wymiennika H&MPE na przykładzie rozdziału termicznego mieszaniny propan-butan.....	68
6.1.	Określanie bazy danych parametrów termodynamicznych, właściwości fizykochemicznych substancji oraz geometrii aparatu w stanie ustalonym.....	68
6.2.	Akwizycja danych dla parametrów procesowych	69
6.3.	Określenie parametrów geometrycznych wymiennika H&MPE	75
7.	Wykorzystanie modelu matematycznego wymiennika H&MPE do analizy jego pracy w warunkach nieustalonych	79
7.1.	Analiza wrażliwości aparatu na stopień wypełniania cieczą.....	81
7.2.	Analiza wrażliwości aparatu na stopień zanieczyszczenia osadami	86
8.	Kontynuacja prac nad modelem dynamiki wymiennika H&MPE	88
9.	Wnioski.....	90
10.	BIBLIOGRAFIA	92

Ważniejsze oznaczenia i jednostki stosowane w pracy

Wykaz oznaczeń:

A	-	pole powierzchni wymiany ciepła [m^2] / składnik mieszaniny [-]
B	-	składnik mieszaniny [-]
C	-	składnik mieszaniny [-]
\bar{c}_p	-	ciepło właściwe molowe [$J \cdot kmol^{-1} \cdot K^{-1}$]
f	-	liczba faz [-]
H	-	ciepło molowe parowania [$J \cdot kmol^{-1}$] / strumień entalpii [W]
h	-	entalpia właściwa molowa [$J \cdot kmol^{-1}$]
J	-	liczba składników jednorodnych w mieszaninie [-]
K	-	współczynnik wzmocnienia [-]
N	-	liczba moli [mol]
\dot{N}	-	strumień molowy [$kmol \cdot s^{-1}$]
P	-	ciśnienie [Pa]
\dot{Q}	-	strumień wymienianego ciepła [W]
r	-	ciepło parowania [$J \cdot kg^{-1}$]
R_f	-	opór cieplny osadów [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$]
s	-	liczba stopni swobody [-]
t_{oz}	-	czas opóźnienia [s]
T	-	temperatura [K] / stała czasowa [s]
U	-	współczynnik przenikania ciepła [$W \cdot m^{-2}K^{-1}$]
V	-	objętość sekcji [m^3]
x	-	ułamek molowy składnika w cieczy [-]

- y - ułamek molowy składnika w oparach [-]
- α - współczynniki przejmowania ciepła [$W \cdot m^{-2} K^{-1}$]
- β - współczynnik określający procentową zawartość cieczy w danej sekcji [%]
- ΔP - różnica ciśnienia [Pa]
- ΔT - różnica temperatury [K]
- Δu - wartość wymuszenia / zakłócenia [-]
- Δy - wartość ustalona odpowiedzi skokowej [-]
- λ - współczynnik przewodzenia ciepła [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
- ρ - gęstość płynu [$kg \cdot m^{-3}$]

Indeksy:

- c - dotyczy powierzchni bez osadów
- f - dotyczy powierzchni z osadami
- h - dotyczy składnika ciężkiego
- i - sekcja części wzmacniającej
- j - sekcja części odpędowej
- l - dotyczy składnika lekkiego
- L - dotyczy cieczy
- n - n-ta półka teoretyczna / stopień kontaktu
- m - dotyczy fragmentu ściany wymiennika H&MPE dzielącej sąsiadujące sekcje „i” oraz „j”
- s - dotyczy przestrzeni wewnątrz płaszczka
- skr - dotyczy skraplacza
- reb - dotyczy reboilera

- t - dotyczy przestrzeni wewnątrz rurek
- V - dotyczy oparów
- z - oznaczenie przy wyznaczeniu zastępczych współczynników

Wykaz skrótów:

- AHP Absorpcyjna pompa ciepła
- CDiC - Konwencjonalna kolumna destylacyjna
- DWC - Podzielona kolumna destylacyjna
- H&MPE Wymiennik ciepła i masy
- HIDiC Zintegrowana kolumna do wymiany ciepła i destylacji substancji
- HPAD - Kolumna destylacyjna wspomagana pompą ciepła
- i-HIDiC Idealna, zintegrowana kolumna do wymiany ciepła i destylacji substancji
- MHP Mechaniczna pompa ciepła
- MPC Sterowanie predykcyjne
- O1 - Część odpędowa kolumny rektyfikacyjnej według technologii stosowanej w przemyśle
- O2 - Część odpędowa kolumny rektyfikacyjnej według nowej technologii
- PID Regulator proporcjonalno całkująco różniczkujący
- SRV Powtórny refluks i odparowanie
- VRC - Kolumna z rozprężeniem pary
- W2 - Część wzmacniająca kolumny rektyfikacyjnej według technologii stosowanej w przemyśle
- W1 - Część wzmacniająca kolumny rektyfikacyjnej według nowej technologii

Z uwagi na brak pozycji polskojęzycznych w omawianej w pracy tematyki, posłużono się w pracy angielskimi akronimami układów i aparatów służących pośrednio lub bezpośrednio do wymiany ciepła i masy.

1. Geneza pracy

Zakład Aparatury Przemysłowej, będący częścią Politechniki Warszawskiej filia w Płocku, zajmuje się opracowaniem technologii przeponowego wymiennika ciepła służącego do jednoczesnej rektyfikacji substancji (H&MPE). Jest to innowacyjne podejście do tematu budowy aparatu spełniającego wymienione założenia. Za pracę zespołu odpowiada promotor niniejszej dysertacji prof. dr hab. inż. Mariusz Markowski. W toku studiów dołączyłem do prac zespołu, zajmując się zagadnieniem dynamiki i sterowania rozważanego aparatu.

Jednym z ważniejszych powodów podjęcia się tematyki rozwoju nowych technologii dla przemysłu jest zmniejszenie energochłonności wybranych procesów technologicznych. Zespół od dawna uczestniczy w projektach związanych z przemysłem rafineryjnym, stąd wywodzi się nowa idea termicznego rozdziału substancji i wymiany ciepła. Aparaty wykorzystujące termiczny rozdział substancji w przemyśle zużywają ok. 3% światowego zapotrzebowania na energię [23,54]. Przechodząc do zdefiniowania problemu energochłonności polskiej gospodarki przemysłowej autorzy Szargut i Ziębik [123] podają dwa powody:

- zbyt wysokie zużycie materiałów, głównie stali,
- duża liczba przemian cieplnych.

W przybliżeniu 2/3 energii potrzebnej do zaspokojenia potrzeb energetycznych przemysłu jest wykorzystywane w cieplnych procesach technologicznych. Gospodarka Polski jest bardziej energochłonna w porównaniu z krajami Europy zachodniej. Niska efektywność wykorzystania energii powoduje zaniżony rozwój gospodarki dodatkowym importem surowców energetycznych, kapitałochłonnością czy w końcu deficytem w zaspokojeniu potrzeb energetycznych kraju. Niekorzystnym czynnikiem dla naszej gospodarki jest również wysoki udział paliw nieodnawialnych w produkcji energii pierwotnej.

Wszystkie powyższe czynniki, a także potrzeba racjonalnego gospodarowania energią i ciepłem oraz aspekty ekonomiczne funkcjonowania zakładów produkcyjnych stale determinują postęp technologiczny w dziedzinie aparatury przemysłowej.

Konwencjonalna kolumna destylacyjna (CDiC) [144], jako powszechnie stosowany aparat przemysłowy (rys. 2.1) do rozdziału termicznego substancji, jest stosowana w wielu gałęziach przemysłu. Układy tego typu charakteryzują się dużym zużyciem ciepła (Q_{reb}) dostarczanego do reboilera oraz jednocześnie dużym zrzutem ciepła (Q_{skr}) do otoczenia poprzez skraplacz.

Nowa technologia wymiennika H&MPE, w porównaniu z technologią CDiC, charakteryzuje się mniejszą energochłonnością procesu ze względu na zastosowanie integracji cieplnej polegającej na kojarzeniu cieplnym strumieni procesowych schładzanych ze strumieniami podgrzewanymi. W ten sposób zasoby ciepła są używane bardziej efektywnie [23, 52, 82].

Porównując układ zbudowany z kolumn CDiC z wymiennikiem H&MPE, Storczyk [112] zaprojektowała układy do rozdziału mieszaniny substancji etan - etylen. Kojarząc ze sobą część wzmacniającą pierwszej kolumny z częścią odpędową drugiej (rys. 4.3) autorka pracy zaproponowała wymiennik H&MPE o specjalnej konstrukcji. w poszczególnych kanałach odpowiadających za część wzmacniającą i odpędową kolumny dochodzi do przeciwprądowej wymiany masy a ciepło między kanałami wymieniane jest przez płyty wymiennika. Jako wynik pracy autorka uzyskała model wymiennika H&MPE w stanie ustalonym. Zaprojektowany przez Storczyk układ został szczegółowo opisany i przytoczony w dalszej części pracy. Rozdział mieszaniny z zastosowaniem kolumn CDiC oraz wymiennika H&MPE, wykazały 10% zmniejszenie energochłonności rozdziału substancji w wymienniku nowej technologii. Głównym celem niniejszej pracy badawczej było opracowanie matematycznego modelu dynamiki wymiennika H&MPE. Zaproponowany w pracy model będzie można wykorzystać do oceny funkcjonowania aparatu w warunkach rzeczywistej pracy w eksploatacji przemysłowej, gdzie parametry pracy mogą odbiegać od wartości dla stanu ustalonego aparatu. Analiza funkcjonowania aparatu w pętli otwartej, przez zbadanie wpływu zakłóceń na parametry strumieni zasilających wymiennik H&MPE, ma na celu potwierdzenie stabilności układu. A ponadto jest to powszechnie stosowana już praktyka, która umożliwia na etapie projektowania dobór układu regulatorów.

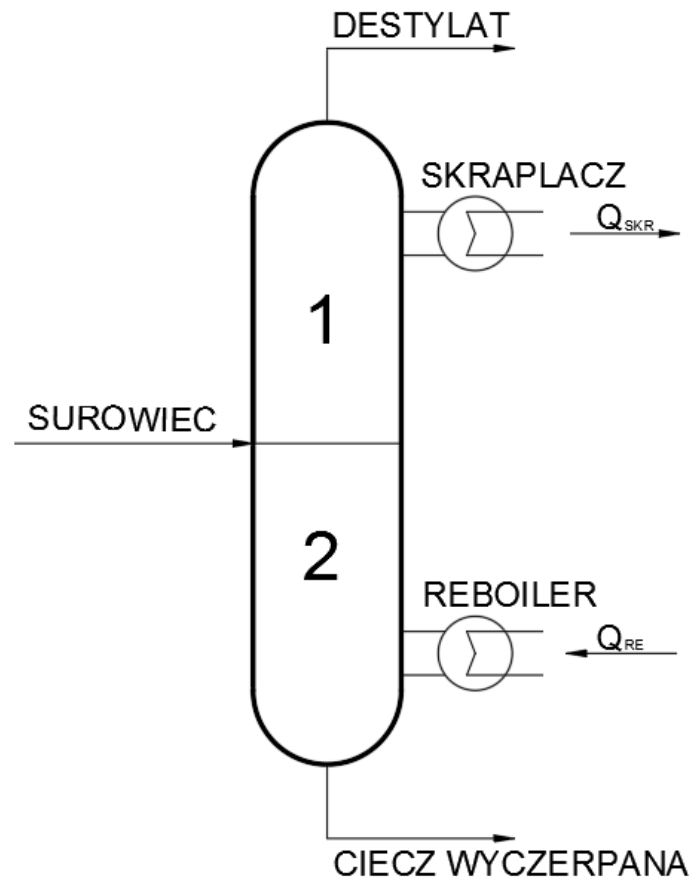
2. Stan wiedzy

Rozdział substancji na poszczególne składniki jest procesem powszechnie wykorzystanym w wielu gałęziach przemysłu. Destylacja jako proces rozdziału mieszaniny ciekłej na składniki, bazuje na wykorzystaniu różnicy temperaturowej ich wrzenia. Proces rektyfikacji może być w prosty sposób opisany jako wielokrotnie powtarzana destylacja [83, 136].

2.1. Konwencjonalny układ do rozdziału substancji

Niezbędnymi elementami procesu rektyfikacji są [14, 83, 99, 100, 132]:

- kolumna rektyfikacyjna (rys. 2.1),
- skraplacz (deflegmator) – służy do częściowego lub całkowitego skroplenia oparów,
- reboiler (kocioł destylacyjny) – służący do odparowania cieczy.



Rys. 2.1. Schemat ideowy kolumny CDiC

Przedstawiony na rys. 2.1 schemat układu do termicznego rozdziału substancji, stosowanego w przemyśle, dotyczy aparatu pracującego w sposób ciągły. Charakterystyczną cechą procesów wymiany masy prowadzonych w tym aparacie jest przeciwprądowy przepływ cieczy i oparów. Ciekły surowiec podgrzany do temperatury nasycenia spływając w dół wrze co sprawia, że odparowuje składnik lżejszy (destylat), a spływająca w dół ciecz wzbogaca się coraz bardziej w składnik cięższy (ciecz wyczerpana). Powyżej dopływu surowca do kolumny skraplają się cięższe składniki oparów, przez co destylat stopniowo osiąga pożądany skład na szczycie kolumny. Ciepło niezbędne do prowadzenia tego procesu jest dostarczane do wymiennika ciepła zwanego reboilerem.

Kolumny tego typu charakteryzują się dużymi wymiarami zewnętrznymi - wysokościami dochodzącymi nawet do ponad stu metrów oraz kilkumetrowymi średnicami.

Wymiary kolumny oraz zużycie ciepła związane z podgrzewaniem cieczy wyczerpanej w reboilerze, a także zrzut ciepła ze skraplacza do atmosfery skłonił wiele ośrodków badawczych do podjęcia prac nad nową technologią aparatów do rozdziału substancji.

2.2. Metody ograniczenia energochłonności w procesie rektyfikacji

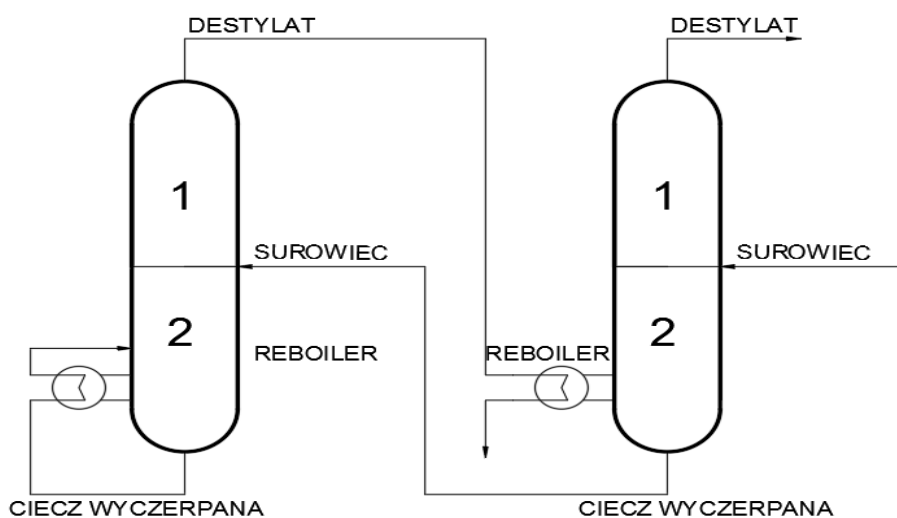
Na przestrzeni ostatnich dekad zostało opracowanych kilka metod podejścia do problemu ograniczenia energochłonności w procesie rektyfikacji [23, 34÷35, 39, 52, 82]:

- metody zwielokrotnionego efektu,
- kolumna destylacyjna wspomagana sprężarką,
- sekwencyjny rozdział substancji,
- kolumna destylacyjna z przegrodą pionową:
 - kolumna Petlyuka (modyfikacja patentu Wright i in.);
 - kolumna Petlyuka – układ dwu kolumnowy (modyfikacja patentu Brugma i in.);
- diabatyczna kolumna destylacyjna,
- zintegrowana cieplnie kolumna rektyfikacyjna (HIDiC),
- wymienniki ciepła w układzie do rozdziału substancji:
 - płaszczowo - rurowe;
 - płytowe.

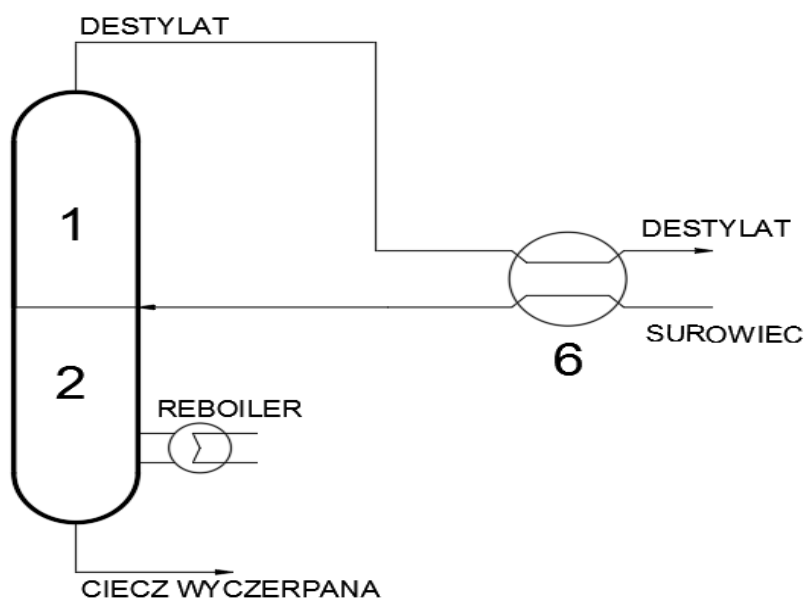
2.2.1. Metody zwielokrotnionego efektu

Od początku prac nad ograniczeniem energochłonności procesu destylacji w latach 30. XIX wieku, zwrócono uwagę na ilość ciepła powstałego w wyniku skraplania oparów destylatu, opuszczających część wzmacniającą kolumny [13]. Ciepło to może być wykorzystane do podgrzania cieczi wyczerpanej w reboilerze kolejnej kolumny destylacyjnej (przy odpowiednim zróżnicowaniu ciśnień w obu kolumnach) lub do podgrzania surowca zasilającego kolumnę (rys. 2.2a i 2.2b),

a)



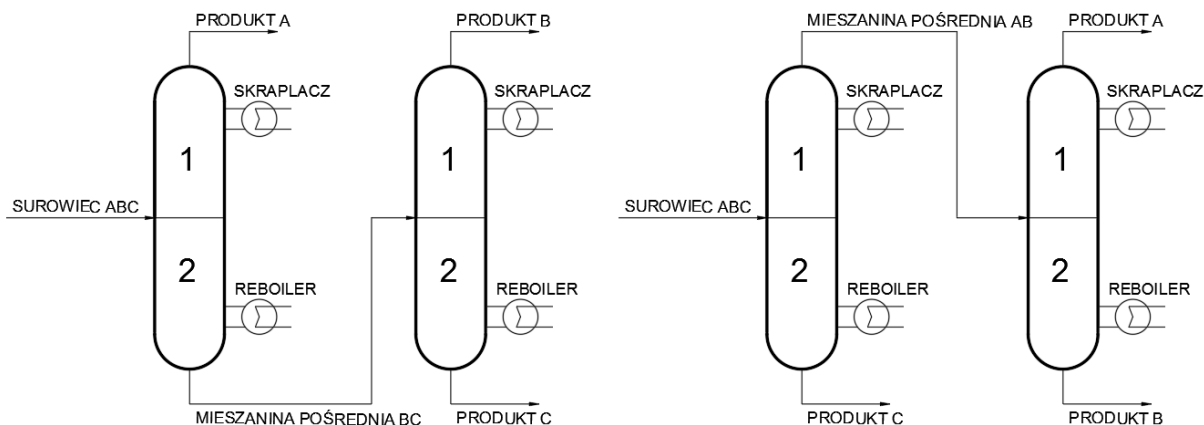
b)



Rys. 2.2. Schemat układów wykorzystujących metody zwielokrotnionego efektu w wymianie ciepła: a) dostarczanie ciepła do reboilera w wyniku skraplania oparów destylatu, b) podgrzewanie surowca w wyniku skraplania oparów destylatu

2.2.2. Sekwencja rozdziału substancji

W podejściu, gdzie stosowana jest sekwencja zbioru konwencjonalnych kolumn destylacyjnych (rys. 2.1), do rozdziału wieloskładnikowych mieszanin, potrzebne są przynajmniej dwie kolumny, które mogą pracować w celu bezpośredniego (rys. 2.3a) bądź pośredniego (rys. 2.3b) rozdziału substancji [23, 52, 82].



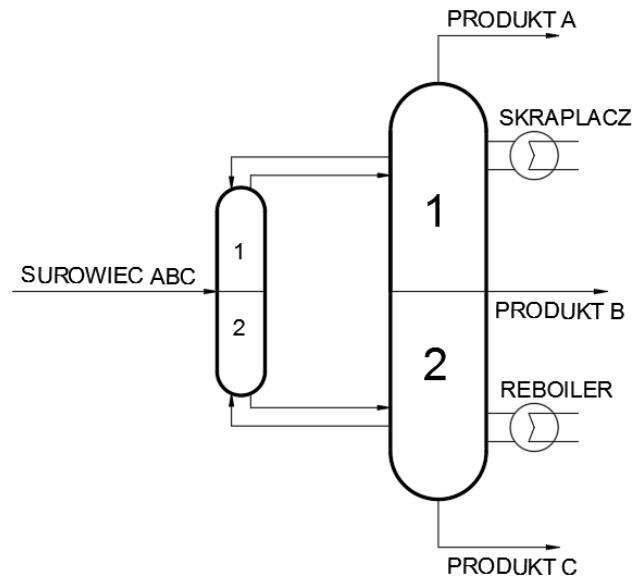
Rys. 2.3. Przykład sekwencji rozdziału mieszaniny trójskładnikowej w kolumnach: a) rozdział bezpośredni składników b) rozdział pośredni składników

2.2.3. Kolumna destylacyjna z przegrodą pionową

W 1937 roku Brugma [13, 14] opisuje podejście do rozdziału mieszaniny trójskładnikowej, poprzez wykorzystanie sekwencji dwóch kolumn. Pierwsza kolumna rozdziela mieszaninę trójskładnikową (ABC) na mieszaniny składników AB oraz BC. Następnie mieszaniny te trafiają w konkretne miejsca w drugiej kolumnie, gdzie następuje rozdział na składniki A, B oraz C. Zaproponowany przez Brugma układ zakłada dodatkowe (względem późniejszej koncepcji przedstawionej przez Petloyuk i in. (rys. 2.4) [95]) wykorzystanie skraplacza i reboilera dla oparów i cieczy wychodzących z pierwszej kolumny.

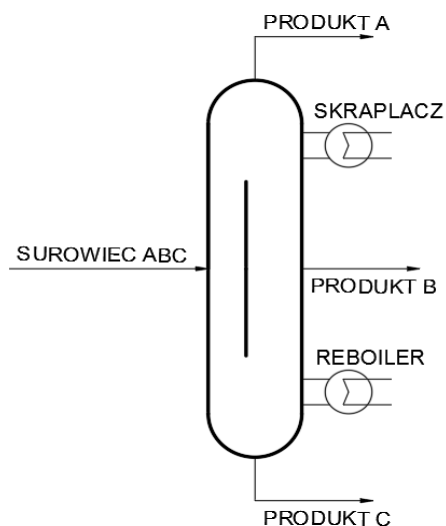
Prace nad rozdziałem trójskładnikowej mieszaniny strumienia zasilającego kolumnę rektyfikacyjną kontynuował Wright [138]. Pomysłem jego zespołu było zmniejszenie kosztów inwestycji układu poprzez zastosowanie jednej kolumny z pionową przegrodą, w środkowej części kolumny. Podobnie jak w przypadku patentu Brugma i in. [13], składnik najlżejszy opuszcza górną część kolumny, najcięższy dolną część, natomiast pośredni składnik opuszcza kolumnę w środkowej części. Koncepcja ta dała początek grupie rozwiązań kolumn destylacyjnych z pionową przegrodą (DWC).

Prace nad patentami Brugma [13, 14] i in. oraz Wright [138] do rozdziału substancji trójskładnikowych w 1965 roku ponowił Petlyuk i in. [95]. Od tego czasu rozważane kolumny (rys. 2.4 i 2.5) są potocznie nazwane w literaturze kolumnami Petlyuka.



Rys. 2.4. Kolumna Petlyuka (zmodyfikowana konfiguracja Brugma i in.)

Kolejna konfiguracja kolumny Petlyuk i in. przedstawiona na rys. 2.5, zakłada rozdział surowca w wydzielonej części kolumny na mieszaninę składników AB oraz BC. Po czym następuje rozdział na składniki A, B oraz C.



Rys. 2.5. Kolumna Petlyuka (konfiguracja Wright i in.)

Według pracy Schultz i in. [98], zastosowanie rozwiązań przedstawionych na rys. 2.4 i 2.5 pozwala na ograniczenie energochłonności procesu rozdziału substancji trójskładnikowej

aż o 30% w stosunku do bezpośredniej lub pośredniej sekwencji rozdziału substancji (rys. 2.3).

Kaibel i in. zaproponowali w swoich pracach rozdział mieszaniny czteroskładnikowej, wykorzystując koncepcję kolumny DWC [55]. Wraz ze wzrostem ilości składników do rozdziału w mieszaninie, rośnie liczba konfiguracji kolumny DWC. W wielu innych pracach podjęto się analizy kolumn DWC, pod względem:

- projektowania i funkcjonowania [5, 60],
- porównania efektywności energetycznej [1, 107],
- sterowania i kontroli [137].

Sharma i in. stworzyli model układu DWC ze sprężarką oparów destylatu w celu wykazania oszczędności związanych z zużyciem energii oraz inwestycją [110].

Dokładny przegląd rozwiązań, bazujących na idei kolumny DWC, został opublikowany w kilku artykułach przeglądowych [5, 20, 141].

2.2.4. Kolumna destylacyjna wspomagana sprężarką

Wśród wielu technik, pozwalających na ograniczenie energochłonności procesu destylacji, zastosowanie znalazła sprężarka służąca do wykorzystania ciepła ze skraplania oparów destylatu w reboilerze. Destylat w układzie kolumny CDiC skrapla się w niższej temperaturze niż temperatura panująca w reboilerze kolumny. Aby podnieść temperaturę skraplania destylatu należy podnieść jego ciśnienie i do tego zabiegu stosowana jest sprężarka oparów. Dzięki temu rozwiązaniu destylat można skraplać bezpośrednio w reboilerze. Użycie energii cieplnej ze skroplenia oparów destylatu wydaje się być naturalną drogą, mającą na celu ograniczenie energochłonności procesu rozdziału substancji z wykorzystaniem kolumny CDiC. Zaletą tego rozwiązania jest niewątpliwie możliwość implementacji do wielu rozwiązań rozdziału substancji w tym np. do kolumny DWC.

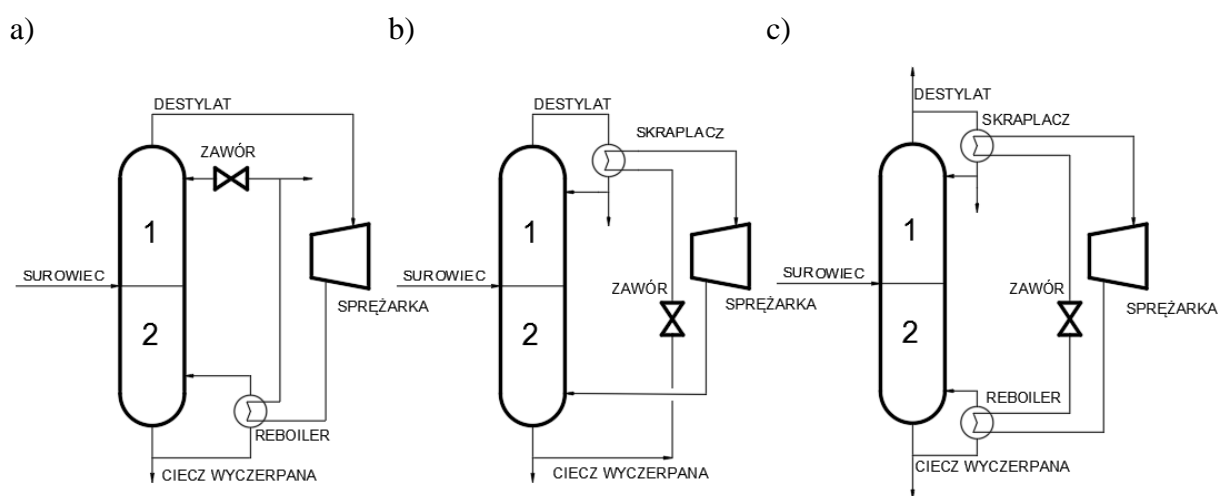
Praktyczne przykłady opisywane w literaturze problemu [106÷107] wykazały znaczne oszczędności w zużyciu energii procesowej, a co za tym idzie także w emisji szkodliwych związków powstałych wskutek spalania paliw konwencjonalnych.

Wykorzystanie sprężarki w połączeniu z kolumną destylacyjną ogranicza się do układu z jedną kolumną. Rozwiązanie to można podzielić na dwie grupy [30]:

- ze sprężarkową pompą ciepła,
- z absorpcyjną pompą ciepła.

W układzie ze sprężarką, gdzie nie występuje skraplacz lub reboiler, występują trzy podstawowe konfiguracje układu (rys. 2.6):

1. strumień oparów opuszczający górną część kolumny jest sprężony do wyższego ciśnienia, a następnie użyty do podgrzania cieczy, opuszczającej część odpadową kolumny (rys. 2.6a),
2. na zaworze redukcyjnym następuje zmniejszenie ciśnienia strumienia cieczy opuszczającej dolną część kolumny i następnie wykorzystanie go do skroplenia destylatu (rys. 2.6b),
3. zastosowanie czynnika pośredniczącego w wymianie ciepła pomiędzy skraplaczem a reboilerem (rys. 2.6c).



Rys. 2.6. Schematy zastosowania sprężarki w kolumnach destylacyjnych: a) bezpośrednie sprężanie oparów destylatu, b) sprężanie oparów cieczy wyczerpanej, c) sprężanie oparów czynnika pośredniczącego

Ekonomiczna opłacalność zastosowania układu z rys. 2.6, zarówno w przypadku kolumny CDiC jak i DWC, zależy od różnicy temperatury pomiędzy kubem a szczytem kolumny. Im mniejsza różnica temperatury tym mniejsze zapotrzebowanie na energię dostarczaną do sprężarki.

Pracę nad porównaniem różnych rozwiązań kolumny CDiC wspomaganej konfiguracjami z pompą ciepła prowadzili Fonyo i in. [30]. W swojej pracy porównali siedem różnych układów:

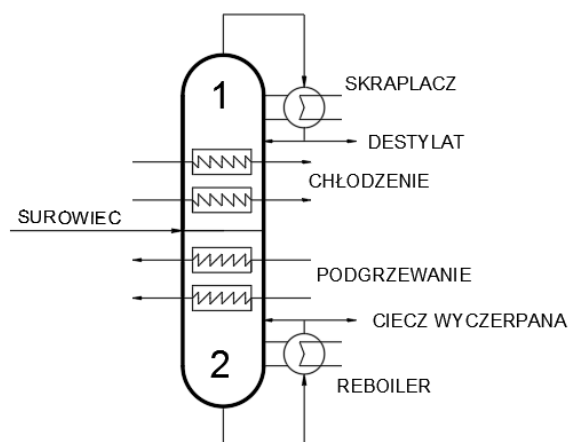
- z klasyczną kolumnę (rys. 1),
- trzy z mechaniczną pompą ciepła (rys 6),
- trzy z absorpcyjnym układem z pompą.

Autorzy porównali wymienione konfiguracje stosując technologię pinch. Uwzględnili także aspekty ekonomiczne: oszczędności oraz koszty energii, nakłady inwestycyjne.

Badania nad układem kolumny destylacyjnej wspomaganej pompą ciepła zostały przedstawione w wielu publikacjach [17, 26, 30 ÷ 32, 34 ÷ 35, 63, 69 ÷ 71, 83, 85, 110]. Badacze na czele z Xu [139] zaproponowali połączenie układu sprężarki z kolumną DWC w celu opracowania nowego układu ograniczającego energochłonność procesu [139]. Porównanie opracowanych rozwiązań ukazało się w często cytowanym przeglądzie literatury przedmiotu autorstwa Jana [56].

2.2.5. Diabatyczna kolumna destylacyjna

W kolumnach CDiC (rys. 2.1) zakłada się adiabatyczny układ, w związku z czym ciepło dostarczane jest do reboilera i odbierane w skraplaczu. Przedstawione rozwiązanie jest energochłonne [70] i może być udoskonalone przez odbieranie oraz dostarczanie ciepła odpowiednio w części wzmacniającej i odpędowej kolumny (rys. 2.7). Idea ma swój początek w pracach Fonyo i in. [30, 31].



Rys. 2.7. Konfiguracja diabatycznej kolumny destylacyjnej

Istotną wadą przedstawionej konfiguracji jest trudne projektowo i kosztochłonne zastosowanie „pierścieniowych” wymienników ciepła w strefie podgrzewania i chłodzenia, wewnątrz kolumny. Problem projektowy został rozwiązany w pracach Rivero [99] oraz Le Goff i in. [64]. Wprowadzono w nich dwa oddzielne układy wymieniające ciepło, dla części wzmacniającej oraz odpędowej. W wymianie ciepła pomiędzy częścią wzmacniającą a odpędową użyto pośredniczący czynnik w fazie ciekłej.

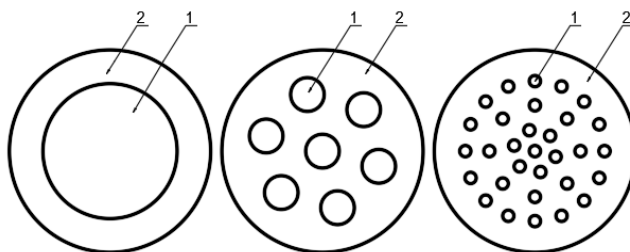
2.2.6. Koncentryczna cieplnie zintegrowana kolumna destylacyjna

Autorzy Govind [40,41] oraz Glenchur i Govind [38] przedstawili koncentryczną zintegrowaną cieplnie kolumnę rektyfikacyjną, w której pierścieniowa sekcja odpędowa jest skonfigurowana wokół sekcji wzmacniającej. W tej koncentrycznej kolumnie, ciepło przenika przez ścianę z sekcji wzmacniającej o wyższej temperaturze i ciśnieniu do sekcji odpędowej o niższej temperaturze i ciśnieniu. Zabieg ten znacznie zmniejsza energochłonność układu.

2.2.7. Wymienniki ciepła w układzie do rozdziału substancji

W 1986 r. Govind i in. [40] wprowadzili rozwiązanie kolumny destylacyjnej opartej na konfiguracji wymiennika ciepła typu rura w rurze. Następnie pomysł ten rozwinęli Aso i in. [4] do postaci wymiennika ciepła typu płaszczowo-rurowego w celu poprawienia wymiany ciepła między częścią wzmacniającą, a odpędową.

Zintegrowana cieplnie kolumna destylacyjna – HIDiC, została przedstawiona w pracy Cong i in. [18], w formie analogicznej do wymiennika ciepła płaszczowo – rurowego (rys. 2.8). Rury wewnętrzne stanowią odpowiednik części wzmacniającej natomiast rura zewnętrzna - płaszcz części odpędowej.



Rys. 2.8. Konfiguracja różnych wariantów rur tworzących część wzmacniającą w kolumnie HIDiC: 1 – część wzmacniająca, 2 – część odpędowa

Mah i in. skorzystali z kompaktowych właściwości płytowego wymiennika ciepła [75]. Następnie zespół Tung i in. w warunkach laboratoryjnych przeprowadzili walidację

modelu płytowego wymiennika ciepła i masy [134]. Dalej Hugill i in. [53] wykorzystali w pracy rozdział substancji oparty o wtórne wrzenie i odparowywanie w celu zwiększenia wydajności cieplnej. Niskie temperatury robocze, blisko wrząca mieszanina i ścisłe specyfikacje produktu wydają się faworyzować ten schemat w stosunku do konwencjonalnej destylacji (rozdzielanie mieszaniny w kolumnie CDiC).

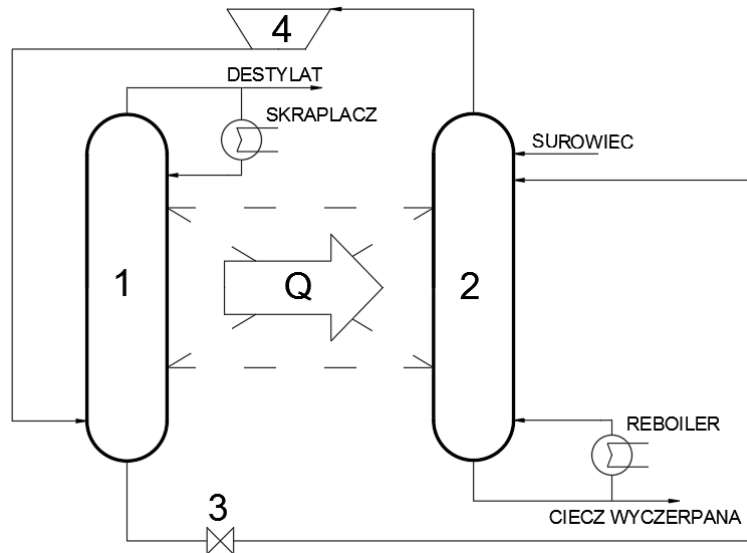
2.2.8. Zintegrowana cieplnie kolumna rektyfikacyjna

Kolejnym krokiem w celu ograniczenia energochłonności procesu rozdziału substancji jest pomysł integracji cieplnej części odpędowej i wzmacniającej występujących w kolumnie CDiC przedstawionej na rys. 2.1.

Haselden [43] jako pierwszy przedstawił zintegrowaną cieplnie kolumnę destylacyjną (HIDiC) do separacji mieszaniny gazów. Następnie Mah i in. zaproponowali, opracowany na podstawie idei Haselden układ SRV [71]. W ich pierwszych pracach tylko fragment części wzmacniającej i odpędowej jest zintegrowany cieplnie. Kolejne prace dotyczyły integracji cieplnej całego układu [107, 124].

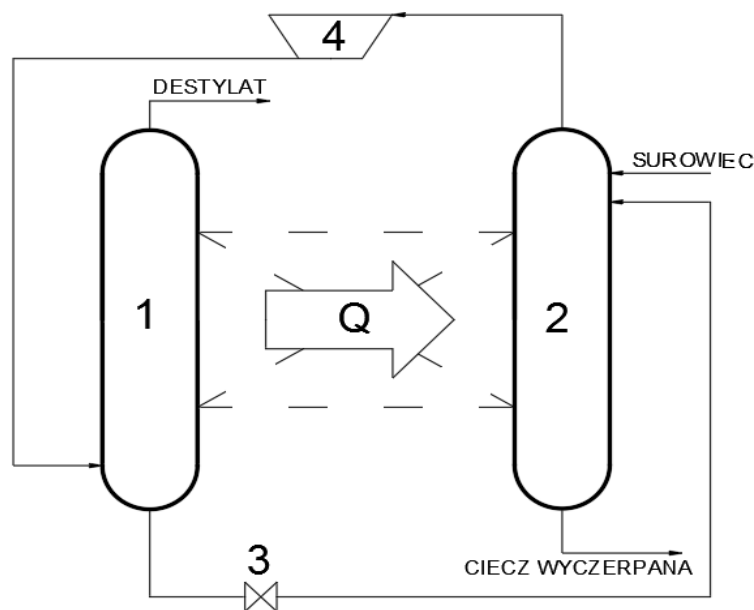
Schemat ideowy funkcjonowania omawianego układu HIDiC przedstawia rys. 2.9. Opary wypływające z części odpędowej „2” są sprężane w sprężarce „4”, a następnie kierowane do części wzmacniającej „1”. Przy odpowiednio dobranej wartości ciśnienia oparów opuszczających sprężarkę występuje dodatnia różnica temperatury pomiędzy dwoma wyizolowanymi częściami 1 i 2 kolumny, co umożliwi dostarczenie ciepła Q z części wzmacniającej do części odpędowej. Ponieważ pomiędzy częścią 1 i 2 występuje dodatnia różnica ciśnienia, funkcją zaworu dławiącego „3” jest obniżenie ciśnienia mieszaniny przed wejściem do części 2.

Iwakabe i in. [55] porównali technologię HIDiC z konwencjonalną CDiC dla mieszanin dwuskładnikowych o niskiej temperaturze wrzenia. Technologia HIDiC umożliwia zmniejszenie zużycia energii, w porównaniu z CDiC o 30% dla mieszaniny benzen - toluen oraz 50% dla mieszaniny cyklopentan - 2-metylopentan.



Rys. 2.9. Schemat ideowy kolumny HIDiC

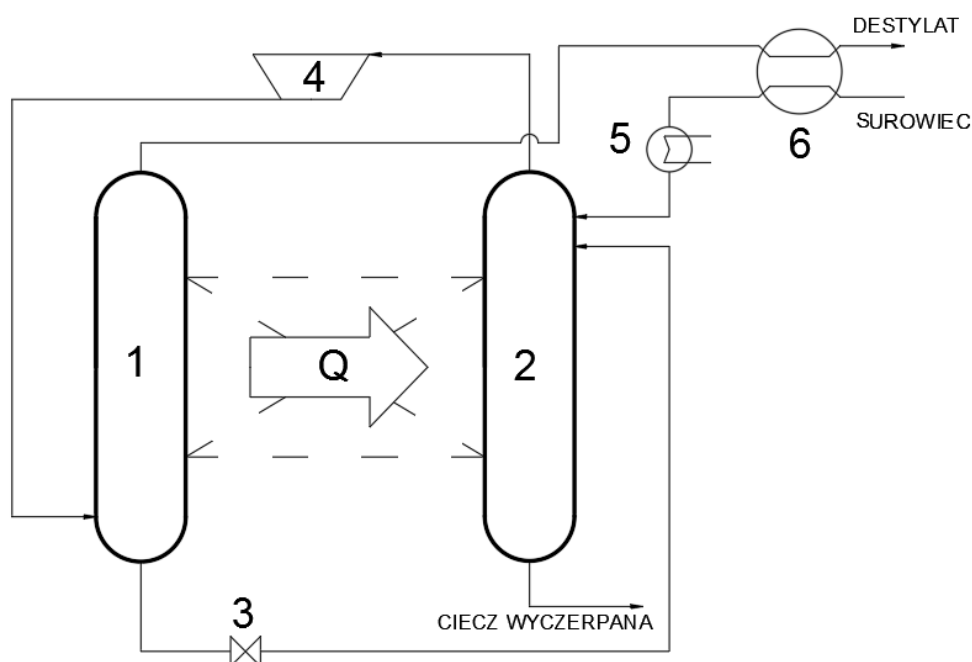
W latach 80. Nakaiava i in. [88] przeanalizowali układ zintegrowanej cieplnie kolumny, zaproponowany przez Mah i in. [71], w odniesieniu do kolumny CDiC (rys. 2.1). Analiza korzyści wynikająca z porównania nowej technologii kolumny HIDiC oraz kolumny CDiC, pozwoliła autorom na konkluzję, że w technologii HIDiC można wyeliminować skraplacz i reboiler, dzięki czemu konstrukcja układu ulegnie uproszczeniu. Nowe rozwiązanie zyskało w literaturze miano idealnej, zintegrowanej cieplnie kolumny destylacyjnej - i-HIDiC która przedstawiona jest na rys. 2.10. Badacze Huang K. i in. [31] udowodnili, że kolumna i-HIDiC jest mniej energochłonna w stosunku do HIDiC.



Rys. 2.10. Schemat ideowy kolumny i-HIDiC

Również w pracy [88], Nakaiava i in. wykazali, że układ i-HiDiC jest bardziej energooszczędny niż układ HiDiC ze skraplaczem i reboilerem. Jednak po przeanalizowaniu różnych wartości parametrów funkcjonowania układów zaobserwowano, że kolumna HiDiC jest bardziej oszczędna, przy przekroczeniu nominalnego obciążenia kolumny surowcem.

Dalsze etapy pracy nad rozwiązaniem zaproponowanym przez Nakaiava i in. wykazały, że do zbilansowania cieplnego układu i-HiDiC, konieczne jest odpowiednie podgrzanie surowca. W przypadku, gdy destylat służy bezpośrednio do podgrzania surowca (wymiennik ciepła „6” - rys. 2.11), kolumna i-HiDiC zyskuje przedrostek „zintensyfikowana”. W przypadku, gdy surowiec, w wymienniku ciepła „5”, nie zostanie podgrzany do wymaganej temperatury, zamieszcza się dodatkowy wymiennik ciepła „5”. W pracy Gadalla i in. [36] wprowadzona została koncepcyjna metoda modelowania kolumny i-HiDiC oraz zintensyfikowanej kolumny i-HiDiC.



Rys. 2.11. Schemat ideowy zintensyfikowanej kolumny i-HiDiC

Zagadnienie ograniczenia energochłonności procesu rozdzielania substancji determinuje wielu naukowców do podjęcia próby rozwiązania tego problemu, więc z racji na obszerne rozwinięcie problemu w literaturze pojawiają się artykuły przeglądowe [24, 57, 82, 89, 93-94]. Dzięki temu można w jednej pracy prześledzić aktualne trendy oraz rozwiązania powstałe na przestrzeni ostatnich lat. Wielu badaczy podejmuje również próbę porównania

poszczególnych rozwiązań w celu wyznaczenia najlepszych zastosowań dla danego układu [42, 84, 105, 107].

2.3. Dynamika aparatów do przepionowej wymiany ciepła oraz wymiany ciepła i masy

Zaproponowany w pracy sposób modelowania wymiennika H&MPE opracowano na podstawie analogii do opisanych w literaturze modeli dynamiki wymiennika ciepła [80, 130] oraz kolumny rektyfikacyjnej [142].

Własności dynamiczne aparatów należy uwzględniać już we wczesnych stadiach projektowania, najlepiej w pracach nad układem doświadczalnym. Można wówczas łatwo i tanio tak zaprojektować aparaturę procesową, aby wyeliminować późniejsze kłopoty z układami automatycznej regulacji. Jeśli w pracach projektowych nie bierze się pod uwagę własności dynamicznych procesu, wówczas sterowanie procesem wymaga stosowania bardzo skomplikowanych układów regulacji.

Analiza dynamiki aparatu wymaga znajomości matematycznego opisu zachowania aparatu w stanie nieustalonym. W tym celu, wykorzystywane są równania bilansowe masy, energii i pędu [73].

Dalszy etap modelowania aparatu polega na jego podziale na sekcje w obrębie, których przyjmuje się założenia zgodnie z przyjętym modelem. W literaturze przyjmuje się trzy rodzaje modeli [96]:

- model o parametrach skupionych – parametry termodynamiczne płynów wymieniających ciepło i masę nie zależą od współrzędnych przestrzennych,
- model sekcyjny o parametrach skupionych – stosuje się w nim podział aparatu na sekcje, gdzie każda sekcja podlega założeniom zgodnie z modelem o parametrach skupionych,
- model o parametrach rozłożonych – cechuje się tym, że parametry termodynamiczne płynów, są funkcjami współrzędnych przestrzennych aparatu.

Na podstawie rozwiązania układu równań bilansowych masy, energii i pędu dla przyjętego modelu, można uzyskać zależności zachodzące między zakłóceniami na wlocie do aparatu oraz odpowiedziami na wylocie z aparatu. W rozwiązywaniu równań bilansowych stosowany jest opis typu wejście-wyjście dla układów dyskretnych. Uzyskane równania

podlegają linearyzacji, a następnie po przekształceniach Laplace'a sprowadzane są do równań algebraicznych [28, 67, 73, 96]. Na podstawie uzyskanych w ten sposób równań określone są transmitancje dyskretne. Uwzględniając znajomość transmitancji układu można określić odpowiedzi wymuszone przez zakłócenia oddziałujące na aparat.

Do zaprojektowania systemu automatycznej kontroli i regulacji systemu produkcyjnego złożonego z wielu aparatów, niezbędne jest dysponowanie pełną informacją, dotyczącą dynamiki każdego z tych aparatów, czyli informacją o ich zachowaniu w warunkach nieustalonych.

2.3.1. Dynamika aparatów do wymiany ciepła – przeponowe wymienniki ciepła

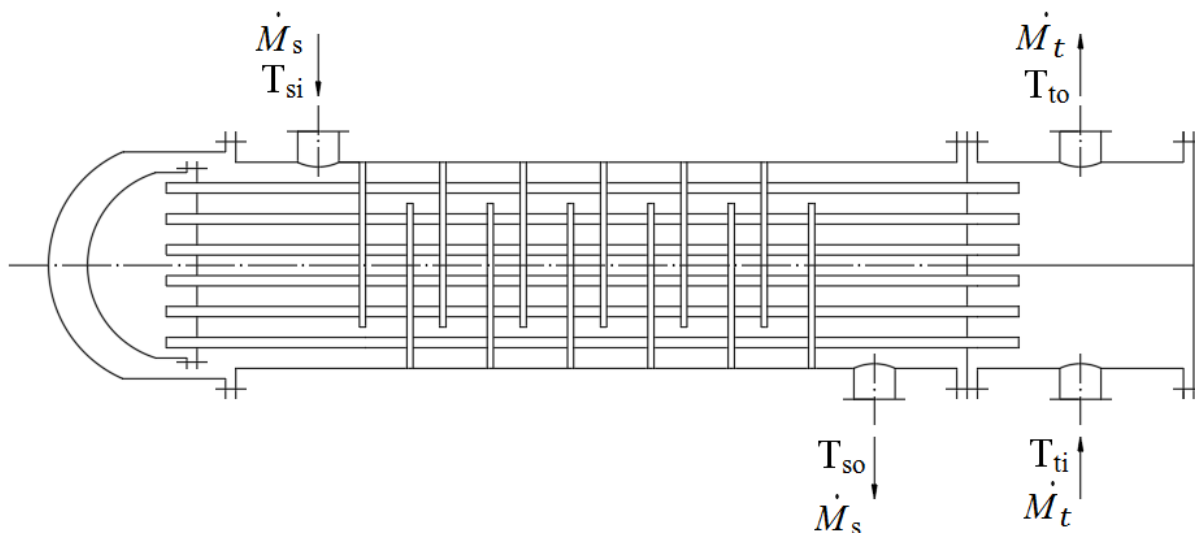
Wymienniki ciepła [45] stanowią istotne elementy składowe prawie wszystkich instalacji przemysłowych. Występują pod wieloma postaciami, np. jako chłodnice, skraplacze, podgrzewacze, czy też jako składowe części innych zespołów, np. kolumn destylacyjnych, wyparek itd.

W wymienniku ciepła najczęściej regulowaną wielkością [21, 119] jest temperatura wylotowa czynnika procesowego. Takiej regulacji można dokonać poprzez zmianę temperatury lub strumienia masowego jednego z płynów. Właśnie dlatego istotnym jest uzyskanie sposobu określenia odpowiedzi wymiennika, czyli zmian w czasie temperatur wylotowych wywołanych zmiennymi w czasie parametrami wlotowymi czynników do wymiennika. Wielkościami wejściowymi, wpływającymi na funkcjonowanie obiektu regulowanego (rys. 2.12), są:

- temperatura wlotowa po stronie rurek T_{ri} ,
- strumień masowy płynu po stronie rurek \dot{M}_t ,
- temperatura wlotowa po stronie płaszczu T_{si} ,
- strumień masowy płynu po stronie płaszczu \dot{M}_s .

Wielkościami wyjściowymi, które ulegają zmianie na skutek oddziaływań wielkości wejściowych to:

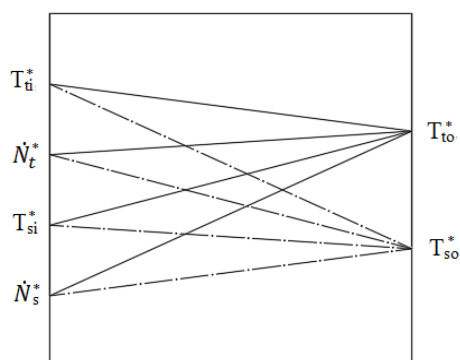
- temperatura wylotowa po stronie płaszczu T_{so} ,
- temperatura wylotowa po stronie rurek T_{to} .



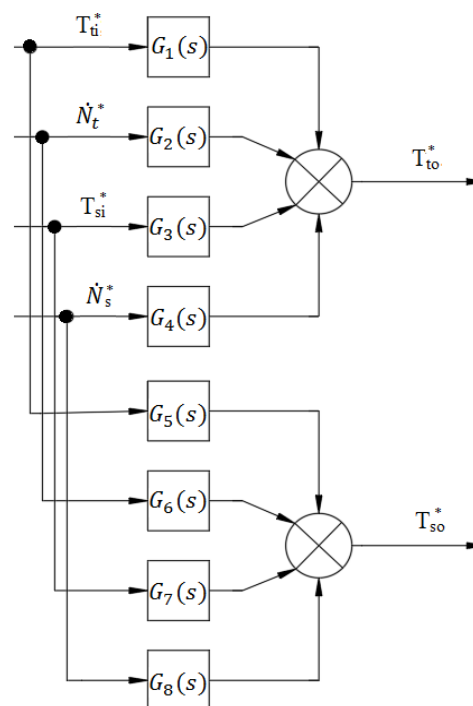
Rys. 2.12. Schemat płaszczowo – rurowego, wymiennika ciepła

W spotykanych w literaturze matematycznych opisach dynamiki wymiennika ciepła stosowany jest model sekcyjny o parametrach skupionych, gdzie w każdej sekcji można wyodrębnić osiem transmitancji operatorowych (rys. 2.13)

a)



b)



Rys. 2.13. Schemat interakcji pomiędzy sygnałami wejściowymi oraz wyjściowymi dla wybranej sekcji: a) graficzne przedstawienie oddziaływania sygnałów wejściowych na wyjściowe b) schemat blokowy dynamiki dla wybranej sekcji wymiennika

W pracy [80] Markowski i in. przedstawili model sekcyjny o parametrach skupionych dynamiki wymiennika wykorzystując układ równań bilansowych energii dla wyodrębnionych trzech obszarów: obszar wewnątrz rurek, obszar wyznaczony przez ścianki rurek, obszar w płaszczu.

W pracach [61, 68, 78 ÷ 79] Markowski oraz Trafczyński i in. opracowali model dynamiki sieci wymienników ciepła (HEN) bazując na modelu wymiennika z pracy [80]. Opracowany model umożliwia operatorowi instalacji planowanie okresowego czyszczenia wymienników z osadów oraz przeglądu instalacji.

W pracach [127, 131, 140] Trafczyński i in. oraz Yeap i in. dokonali analizy ilościowej i jakościowej charakterystyk dynamicznych sieci wymienników ciepła płaszczowo – rurowych (HEN) pod kątem narastania osadów.

Własności dynamiczne płytowych wymienników ciepła zostały ukazane w pracy Brodowicz i in. [8]. W pracy Al-Dawery i in. [2] przedstawiono model sekcyjny dynamiki wymiennika płytowego. W oparciu o uzyskany model autorzy pracy, wykazali, że zastosowanie logiki rozmytej w sterowaniu zwiększa szybkość reakcji układu regulacji na zmiany parametrów pracy wymiennika. Dynamiczna analiza wymiennika ciepła Fielda została opracowana w pracy [97]. Szopa w pracy doktorskiej zaprezentował wyniki analizy dynamicznej spiralnego wymiennika ciepła [123]. Symulacja funkcjonowania wymiennika ciepła z przepływem krzyżowym znalazła się w pracy Gao i in. [37],

W pracach Brodowicz i in. [7, 9] autorzy przedstawili dwa rozwiązania budowy modeli dynamiki dla wymienników ciepła z rurami koncentrycznymi stosując modele o parametrach skupionych i rozłożonych. Badacze Verbanov i in. [135] podjęli się próby obliczenia sekcji potrzebnych dla modelu dynamiki danego wymiennika. Ustalili, że ich liczba powinna być zwiększana od dolnej granicy aż do momentu wyrównania się czasu opóźnienia odpowiedzi na zakłócenie w symulacji z czasem opóźnienia z pomiaru rzeczywistego.

Grupa badawcza na czele z Sahoo [101] podjęła badania nad wymiennikami płaszczowo-rurowymi. Aby optymalnie wykorzystać energię cieplną strumieni procesowych, zajęli się ich kontrolą. W pracy zamodelowali wymiennik ciepła przy użyciu metod identyfikacji systemu oraz eksperymentalnej oceny skuteczności dwóch metod dostrajania regulatora PID, takich jak sterowanie modelem wewnętrznym (IMC) i automatyczne dostrajanie przekaźnika do sterowania temperaturą.

2.3.2. Dynamika aparatów do wymiany masy - kolumny destylacyjne

Rozdział masy w warunkach przemysłowych odbywa się metodą destylacji lub rektyfikacji, które są w dużym stopniu spokrewnione ze sobą. Aparaty w postaci kolumn rektyfikacyjnych (rys. 2.1) są powszechnie stosowane w przemyśle [144]. Istotą rozdziału substancji jest jej wielokrotne skroplenie i odparowanie, które może odbywać się w zależności od rodzaju kolumny: na półkach lub wypełnieniu [90].

Proces rozdziału substancji podlega stałej kontroli i regulacji parametrów w celu uzyskania założonej czystości produktów. Dlatego niezbędne jest wykonanie analizy właściwości dynamicznych danego aparatu. Na podstawie przeprowadzonej analizy można opracować odpowiedni układ automatycznej regulacji.

Układ do rektyfikacji substancji jest złożony z kilku aparatów wzajemnie oddziałujących na siebie poprzez strumienie materiałowe:

- kolumny – złożonej z części odpędowej i wzmacniającej,
- reboilera,
- skraplacza.

Dynamiką i sterowaniem układu rektyfikacyjnego jest tematem nieprzerwanych badań szeregu naukowców. W pracy Taqvi i in. [125] przedstawiono model kolumny rektyfikacyjnej sprzężony z modelem sieci neuronowej, który ma wykrywać anomalie w funkcjonowaniu kolumny. W celu przeciwdziałania wszelkiego rodzaju zakłóceniom na czystość produktów należy monitorować parametry wejściowe surowca jak również inne wielkości [117]:

- strumień masowy pary dostarczanej z reboilera,
- strumienie masowe produktów parowych i ciekłych odbierane z części wzmacniającej i odpędowej kolumny,
- strumienie masowe i temperatury surowców dostarczanych do kolumny destylacyjnej,
- stan techniczny kolumny.

Do oceny układu regulacji procesu zachodzącego w kolumnie CDiC wykorzystywane są następujące informacje [33]:

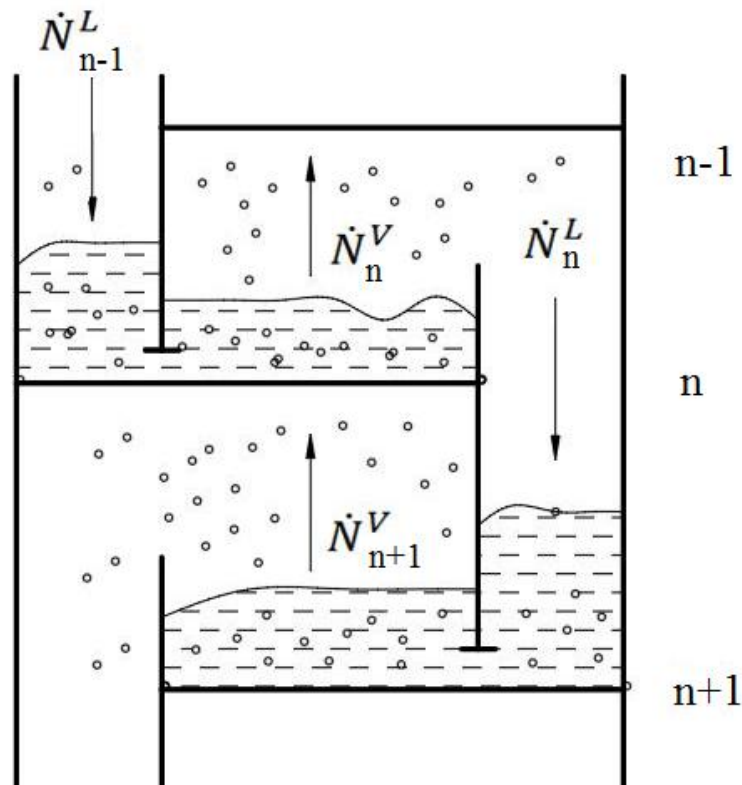
- skład destylatu opuszczający górną część kolumny,
- skład cieczy wyczerpanej opuszczającej dolną część kolumny,

- ciśnienie w skraplaczu.

Wg literatury przedmiotu [96] występuje kilka matematycznych modeli kolumn, które zakładają szereg różnych uproszczeń do obliczeń:

- doskonałe mieszanie cieczy na półce,
- doskonałe mieszanie cieczy na półce z opóźnieniem czasowym w elemencie spływowym;
- mieszanie burzliwe,
- jednorodne pole prędkości cieczy na półce,
- istnienie na półce strefy martwej i doskonałe mieszanie cieczy w tej strefie.

Bilans energii i masy dla kolumny CDiC opiera się na pojęciu „n-tej” półki teoretycznej [142]. Fragment kolumny przedstawia rys. 2.14.



Rys. 2.14. Schemat fragmentu kolumny przedstawiający przepływ strumieni cieczy i oparów

Wielkościami wejściowymi wpływającymi na funkcjonowanie regulowanego aparatu są (rys. 2.15):

- ułamek molowy składnika lżejszego w cieczy wpływającej na półkę – x_{n-1} ,

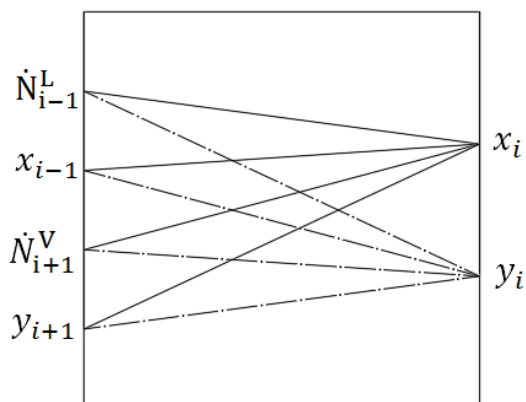
- ułamek molowy składnika lżejszego w oparach wpływających na półkę – y_{n+1} ,
- strumień cieczy wpływającej na półkę - \dot{N}_{n-1}^L ,
- strumień oparów opuszczających półkę - \dot{N}_{n+1}^V ,

Wielkości wyjściowe, które ulegają zmianie na skutek oddziaływań wielkości wejściowych to:

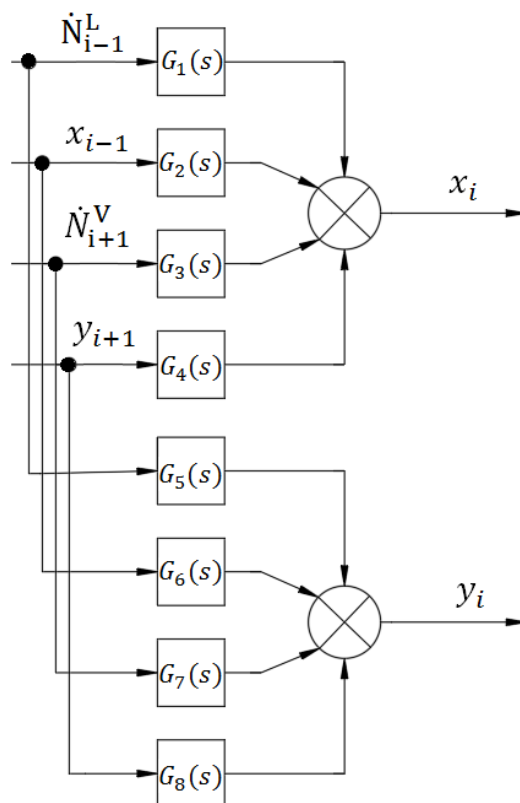
- ułamek molowy składnika lżejszego w cieczy wypływającej z półki – x_n ,
- ułamek molowy składnika lżejszego w oparach wypływających z półki – y_n .

2.3.2. Dynamika aparatów do wymiany masy - kolumny destylacyjne

a)



b)



Rys. 2.15. Schemat interakcji pomiędzy sygnałami wejściowymi oraz wyjściowymi dla i-tej sekcji: a) graficzne przedstawienie oddziaływania sygnałów wejściowych na wyjściowe b) schemat blokowy dynamiki dla i-tej sekcji wymiennika

Autorzy Choe i in. [16] przeprowadzili symulacje numeryczne kolumny CDiC w stanie dynamicznym, skupiając się na wpływie stosowanych uproszczeń w modelu dynamiki

aparatu, związanych ze stałym ciśnieniem i brakiem akumulacji ciepła w oparach, w celu ograniczenia błędu symulacji.

W pracy [142] Zalewski bada dynamikę kolumny CDiC. Autor przeprowadził szereg symulacji numerycznych związanych ze zmianą parametrów wejściowych do modelu tj. strumieni masowych na wejściu na półkę: szczytową, surowcową i najniższą położoną w kolumnie. Wygenerowane charakterystyki dynamiczne odpowiedzi sygnałów wyjściowych w czasie przedstawiają przebieg zmian stężenia składnika lżejszego w funkcji czasu. Jako wymierny wynik pracy autor podaje czas jaki mija od zakłócenia do ustabilizowania się pracy kolumny, dzięki temu można dobrać odpowiednie nastawy układów automatycznej regulacji.

W pracy Sivieri i Teixeira [113] przeprowadzono symulację kolumny CDiC w stanie dynamicznym. Do budowy modelu wykorzystano transmitancje, gdzie sygnałami wejściowymi są strumienie masowe cieczy kierowane na półkę szczytową oraz oparów kierowane na półkę najniższą położoną w kolumnie, a wyjściowymi stężenie destylatu oraz cieczy wyczerpanej.

Badacze Shin i in. [112] porównali regulację MPC oraz PID dla kolumny CDiC i wykazali korzyści związane z zastosowaniem regulacji MPC: krótszy czas ustalenia nowej wartości stanu ustalonego oraz czasu narastania sygnału w charakterystykach odpowiedzi sygnału wyjściowego na zadane zakłócenie.

Oddzielny problem w analizie dynamicznej stanowią kolumny rektyfikacyjne o pracy okresowej. W artykule przedstawionym przez Elgue i in. [22] zaproponowano dwa proste modele matematyczne do symulacji zachowania dynamicznego podczas operacji rozruchu kolumny.

Poniewski i Piekarski [96] podali przykłady budowy szeregu modeli matematycznych kolumny CDiC w stanie dynamicznym wraz z narzuconymi uproszczeniami. Omówili alternatywne sposoby opisu własności dynamicznych kolumn z wykorzystaniem: transmitancji operatorowych, równań różniczkowych lub równań stanu.

Skogestad i Morari [115] skupili się na charakterystyce zmian dynamicznych składu produktów w kolumnie CDiC. Autorzy położyli nacisk na przepływy zewnętrzne z dominującą stałą czasową τ_1 , która jest stosunkowo duża i ma znaczny wpływ na kompozycję produktów kolumny, oraz na przepływy wewnętrzne ze stałą τ_2 . Druga z przytoczonych stałych czasowych jest znacznie krótsza i z punktu widzenia kompozycji produktów nie ma

dużego znaczenia i najprawdopodobniej nie jest wykrywana w otwartej pętli sterowania. Skogestad w pracy [114], badał pojedynczą pętlę z kolumną sterowaną układem PI. Przy zastosowaniu modelu z jedną stałą czasową τ_1 , określił czas całkowania dla układu sterowania. Z symulacji wynika, że czas całkowania ulega kilkudziesięciokrotnemu skróceniu przy zastosowaniu modelu o dwóch stałych czasowych. Model z dwoma stałymi ma szczególne znaczenie dla układu kolumny pracującego w układzie sterowania ze sprzężeniem zwrotnym.

Omówienie różnych sposobów sterowania pracą kolumny zostało ponownie przedstawione przez Skogestad oraz Hovd i in. w publikacjach [47, 114] przy zastosowaniu różnych konfiguracji parametrów użytych do analizy sterowania kolumną:

- przepływu cieczy i oparów,
- przepływu destylatu i oparów,
- przepływu cieczy na poszczególnych półkach kolumny i cieczy wyczerpanej,
- przepływu destylatu i cieczy wyczerpanej,
- refluks destylatu / cieczy wyczerpanej.

Charakterystyki dynamiczne układu do rozdziału substancji w konfiguracji SRV dla binarnej mieszaniny zaprezentowali badacze na czele z Shimizu i in. [111]. W publikacji [86] Mutalib i in. przedstawili wybrane konfiguracje dynamiki i sterowania kolumny DWC.

Dynamika aparatów do wymiany ciepła i masy – Zintegrowana cieplnie kolumna destylacyjna

Sposób modelowania dynamiki wymiennika H&MPE opisano szczegółowo w rozdziale 5, poświęconym części obliczeniowej niniejszej dysertacji. Model H&MPE opracowano w sposób analogiczny do przedstawionych już w literaturze przedmiotu modeli wymiennika ciepła [80, 130] oraz kolumny rektyfikacyjnej [142].

Dynamika kolumny HiDiC została przedstawiona w pracach Tsung-Jen [132 ÷ 133]. Autorzy w badaniach wykorzystali powszechnie wykorzystywany w praktyce inżynierskiej regulator PID. Huang i in. [48 ÷ 52] badali dynamikę kolumny HiDiC i jej modyfikację w różnych konfiguracjach mających na celu zmniejszenie energochłonności układu. W pracy [52] do budowy modelu dynamiki kolumny i-HiDiC wykorzystali równania bilansu masy i energii przy założeniu równowagi termodynamicznej ciecz - opary. W badaniach zaobserwowano dużą nieliniowość pomiędzy sygnałami wejściowymi i wyjściowymi w stanie

dynamicznym, np. współczynnik wzmocnienia w stanie ustalonym rośnie w różnych warunkach pracy.

Tsung-Jen H. i in. [44] zbudowali model kolumny i-HiDiC na podstawie równań bilansu masy oraz wymiany ciepła. Autorzy uwzględnili również wpływ ciśnienia na czystość produktów. Wpływ czasu opóźnienia, przy skokowej zmianie ciśnienia, na funkcjonowanie układu w stanie dynamicznym został zaimplementowany odpowiednim równaniem z założonym czasem oddziaływania na układ, wynoszącym kilka sekund. Ponadto autorzy w swoich badaniach porównali dynamikę rozdziału trójskładnikowej mieszaniny o zbliżonej temperaturze wrzenia w układzie z kolumną i-HiDiC oraz CDiC. Wykazano, że kolumna i-HiDiC może działać ze zbliżonymi parametrami dynamicznym jak kolumna CDiC co oznacza, że wysterowanie kolumny HiDiC nie powinno stwarzać problemów technicznych w zastosowaniu przemysłowym. Autorzy artykułu dodają, że, w celu skutecznego tłumienia zakłóceń na wlocie do HiDiC, spowodowanych zmiennością parametrów surowca, dolny skład produktu powinien być dopasowany do wzrostu ciśnienia z sekcji odpędowej do sekcji wzmacniającej dla kolumny i-HiDiC.

Nakaiwa i in. przedstawili w swojej pracy [87] szereg konfiguracji sterowania zintensyfikowanej, kolumny i-HiDiC – rys. 2.11). Autorzy twierdzą, że spośród przedstawionych w pracy wariantów sterowania ze sprzężeniem zwrotnym, najlepszymi parametrami do wysterowania kolumny i-HiDiC są: refluks destylatu oraz refluks cieczy wyczerpanej.

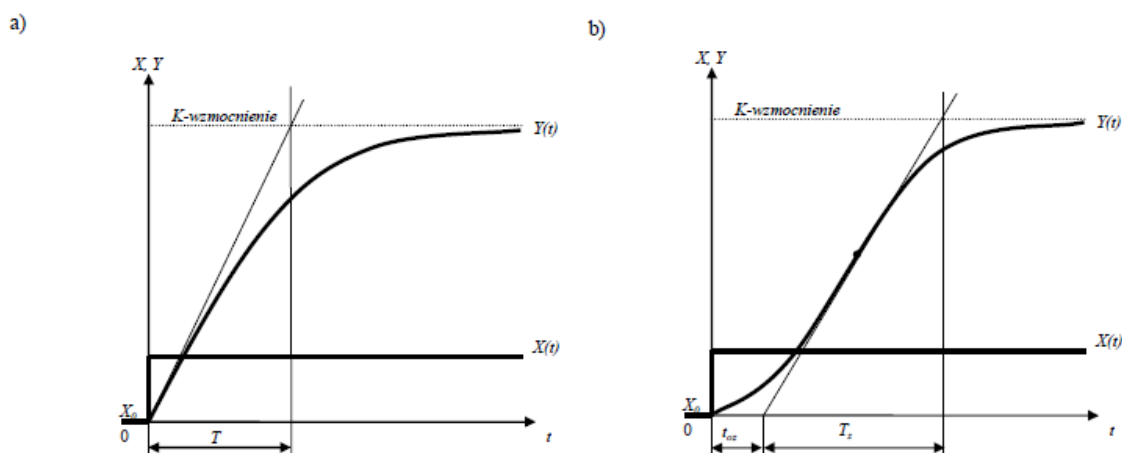
Autorzy Fo i Liu w pracy [30] zbadali na podstawie symulacji dynamikę wysokociśnieniowej zintegrowanej cieplnie kolumny do separacji powietrza (HIASC). Autorzy wykazali że w przeciwieństwie do konwencjonalnej destylacji wspomaganej pompą w ich rozwiązaniu, energia przepuszczana przez kolumnę nie amortyzuje się całkowicie, ale nadaje się do wielokrotnego użytku.

2.3.3. Analiza ilościowa i jakościowa charakterystyk dynamicznych

Charakterystyka dynamiczna jest funkcją przejścia (tzw. transmitancją) między dwoma stanami ustalonymi pracy aparatu [3]. Przejście to ma związek z zakłóceniami jednego lub kilku naraz parametrów wejściowych, przez które następuje strojenie pracy aparatu. Precyzując jest to odpowiedź sygnału wyjściowego np. temperatury na wyjściu z wymiennika ciepła na zmianę sygnału wejściowego, np. zmianę strumienia cieczy chłodzącej w

wymienniku. Przed wprowadzeniem zakłócenia do modelu obiektu, sygnały wejściowe i wyjściowe znajdują się w stanie ustalonym.

Na rys. 2.17 przedstawione zostały typowe charakterystyki skokowe. Występują one również w opisywanych przypadkach dotyczących aparatury przemysłowej. Na ich podstawie można zbadać czy obiekt w pętli otwartej (bez regulacji) znajdzie się w „w nowym stanie ustalonym”, wymuszonym przez zakłócenie – analiza ilościowa.



Rys. 2.16. Wykresy przedstawiające graficzny sposób wyznaczania wskaźników dynamicznych właściwości badanego obiektu na przykładowych charakterystykach dynamicznych dla: a) układu inercyjnego I – rzędu (tu mamy stałą czasową T oraz współczynnik wzmacnienia K) b) układu inercyjnego II – rzędu (oprócz wymienionych wcześniej wskaźników T , K , występuje tu stała opóźnienia t_{oz})

Oprócz tego na podstawie graficznej analizy wykresów możliwa jest jakościowa oceny charakterystyk poprzez wykorzystanie tzw. wskaźników dynamicznych:

- współczynnika wzmacniania K :

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u};$$

- stała czasowa T ,
- czas opóźnienia t_{oz} .

2.4. Osady

Potocznie nazywane w technice przemysłowej osady są to substancje, które osiadają na powierzchni wymiany ciepła, co wpływa negatywnie na wymianę ciepła przez przeponę, gdyż stanowią dodatkowy opór cieplny. Zanieczyszczenie wymienników ciepła w przemyśle rafineryjnym jest chronicznym problemem operacyjnym, który zagraża odzyskiwaniu energii i ochronie środowiska. Łagodzenie tego zjawiska jest często ograniczone przez niedostateczną wiedzę na temat podstawowych mechanizmów powstawania osadów oraz przejściowy i zmienny wpływ osadu na działanie wymiennika ciepła. W praktyce inżynierskiej w obliczeniach, opór cieplny osadów jest składową współczynnika przenikania ciepła U i może uwzględniać wpływ zanieczyszczeń po jednej lub obydwu stronach przepony. Przyjmuje się, że współczynnik ten uwzględnia tylko opór przewodnictwa cieplnego spowodowany warstwą osadów po obu stronach czynników wymieniających ciepła w aparacie. Wszystko to ma wymierny, negatywny wpływ na koszty, bezpieczeństwo, zdrowie i aspekty środowiskowe [62]:

- straty produkcyjne, generowane spadkiem wydajności, zmniejszoną przepustowością i utratą produkcji podczas planowanych lub nieplanowanych przestojów,
- większe koszty utrzymania, powodowane usuwaniem osadów za pomocą chemikaliów i / lub mechanicznymi urządzeniami przeciwporostowymi lub wymiana zatkanego bądź skorodowanego sprzętu,
- zwiększone zużycie wody, energii elektrycznej, paliw kopalnych i innych zasobów,
- konieczność nadmiernej powierzchni wymiany ciepła przy projektowaniu wymienników ciepła,
- zmniejszenie zdolności systemu do dostarczania projektowanej mocy wyjściowej,
- zwiększone zagrożenie bezpieczeństwa podczas czyszczenia oraz obsługi,
- zwiększone emisje szkodliwych gazów w wyniku nadmiernego zużycia paliw.

Sposoby uzyskania wartości oporu cieplnego osadów:

- wyliczając ze wzoru uwzględniającego przenikanie ciepła przez przegrodę,
- doświadczalnie lub z pomiarów przemysłowych,
- ze standardów TEMA [126].

Odnosząc się do wymiany ciepła przez przeponę, obustronny opór cieplny osadów można wyliczyć ze wzoru:

$$R_f = \frac{1}{U_f} - \frac{1}{U_c};$$

Wpływ osadów uwzględniany jest przy wyznaczeniu wartości współczynnika przenikania ciepła U_f , określa go równanie:

$$U_f = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + R_i + \frac{1}{\alpha_j} + R_j};$$

W literaturze znajduje się wiele pozycji, odnoszących się do wpływu osadów na wymianę ciepła w wymiennikach [10 ÷ 12, 59, 81, 102, 127 ÷ 128]. Z uwagi na dużą rolę wymiany ciepła w instalacjach, koszty związane z narastaniem osadów, wielu autorów zwróciło uwagę na opracowanie schematów czyszczenia wymienników pracujących w sieci (HEN) [92, 100, 105, 130].

3. Zadania i cel pracy

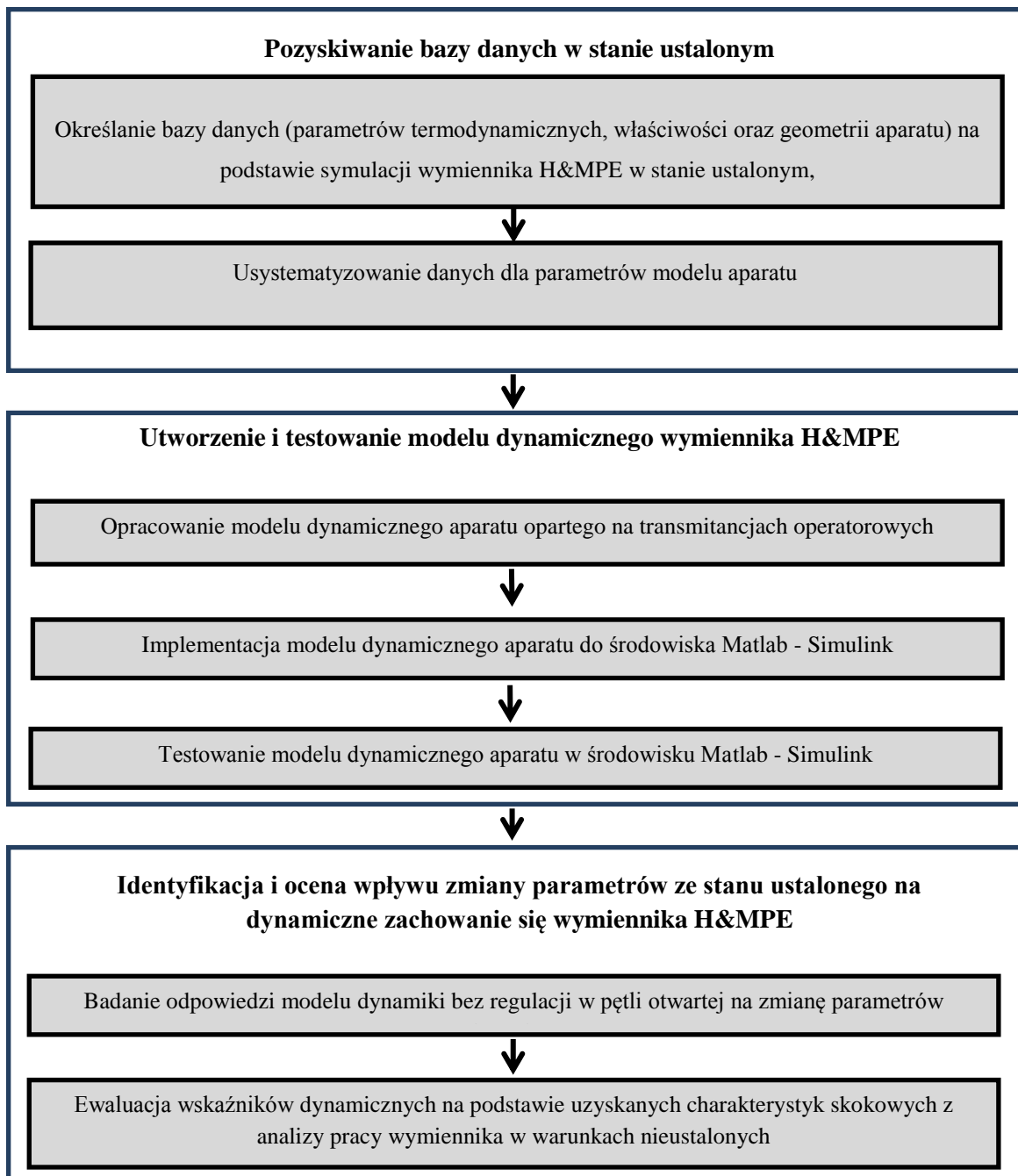
3.1. Cel i zakres pracy

Celem przewodnim niniejszej dysertacji jest opracowanie i wykorzystanie modelu wymiennika H&MPE do analizy dynamiki rozważanego aparatu z uwzględnieniem uwarunkowań przemysłowych, takich jak, opory cieplne osadów oraz masa zatrzymanej cieczy w aparacie.

Zakres pracy obejmował w kolejnych krokach:

- określanie bazy danych (parametry termodynamiczne oraz właściwości rozdzielanych substancji w wyodrębnionych sekcjach aparatu, parametry geometryczne aparatu) na podstawie symulacji utworzonego modelu wymiennika H&MPE w stanie ustalonym,
- opracowanie modelu dynamiki wymiennika H&MPE,
- uwzględnienie w modelu dynamiki wymiennika H&MPE zanieczyszczenia powierzchni wymiany ciepła osadami,
- badania symulacyjne dynamiki wymiennika H&MPE z uwzględnieniem wpływu oporu cieplnego osadu oraz masy zatrzymanej cieczy w aparacie na parametry eksploatacyjne,
- weryfikację hipotezy badawczej w oparciu o uzyskane wyniki symulacji wymiennika H&MPE w stanie dynamicznym,
- opracowanie wniosków końcowych.

Część badawcza pracy poświęcona dynamice wymiennika H&MPE, zakłada jej przebieg wg. harmonogramu prac przedstawionego na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Harmonogram prac nad dynamiką przeproponowego wymiennika ciepła i masy

3.2. Hipoteza badawcza

Z metodologicznego punktu widzenia, realizacja pracy sprowadza się do sprawdzenia hipotez o treści:

1. Możliwe jest opracowanie uniwersalnego modelu dynamiki wymiennika H&MPE, zbudowanego z płyt o dowolnym kształcie, stosując: model idealnej kolumny opisany za pomocą profili kolumny, model oporów cieplnych w wymianie ciepła oraz model półki teoretycznej w wymianie masy.
2. Możliwe jest opracowanie wymiennika H&MPE, utrzymującego stabilne parametry pracy przy zmiennych warunkach eksploatacyjnych, związanych ze zmianą masy cieczy zalegającej w aparacie oraz narastaniem osadów w aparacie.

4. Model analityczny wymiennika H&MPE

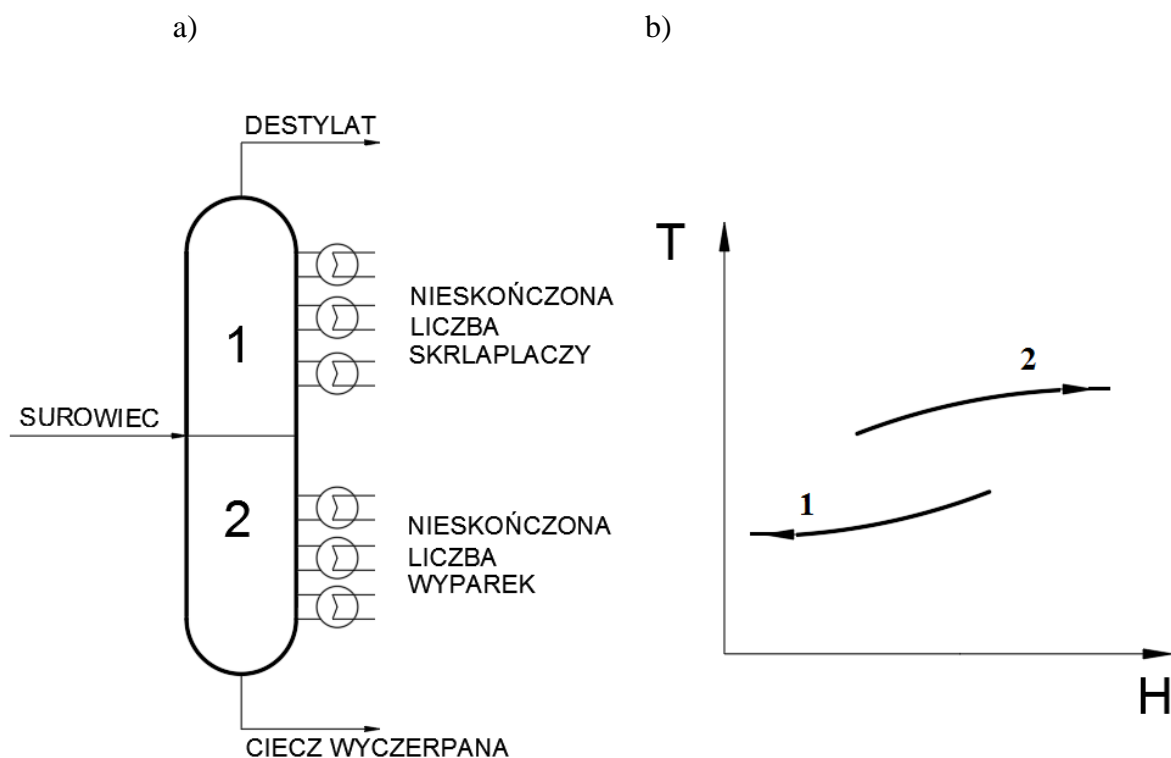
W celu określenia dynamicznych odpowiedzi wymiennika H&MPE na zakłócenia trzeba wyznaczyć jego parametry dla stanu ustalonego oraz jego geometrię. Niniejsza dysertacja stanowi kontynuację prac Zakładu Aparatury Przemysłowej Politechniki Warszawskiej, w ramach których powstała między innymi praca doktorska pt. „Metoda obliczeniowa aparatu do przeponowej wymiany ciepła z równoczesną rektyfikacją substancji”, wykonana przez Storczyk [121]. Ze wspomnianej pracy zapożyczona została metoda obliczania wymiennika H&MPE w stanie ustalonym. Autorka opracowała matematyczny model aparatu w oparciu o:

- teorię oporów cieplnych w przeponowej wymianie ciepła,
- model półki teoretycznej w termicznym rozdziale substancji.

4.1. Wprowadzenie

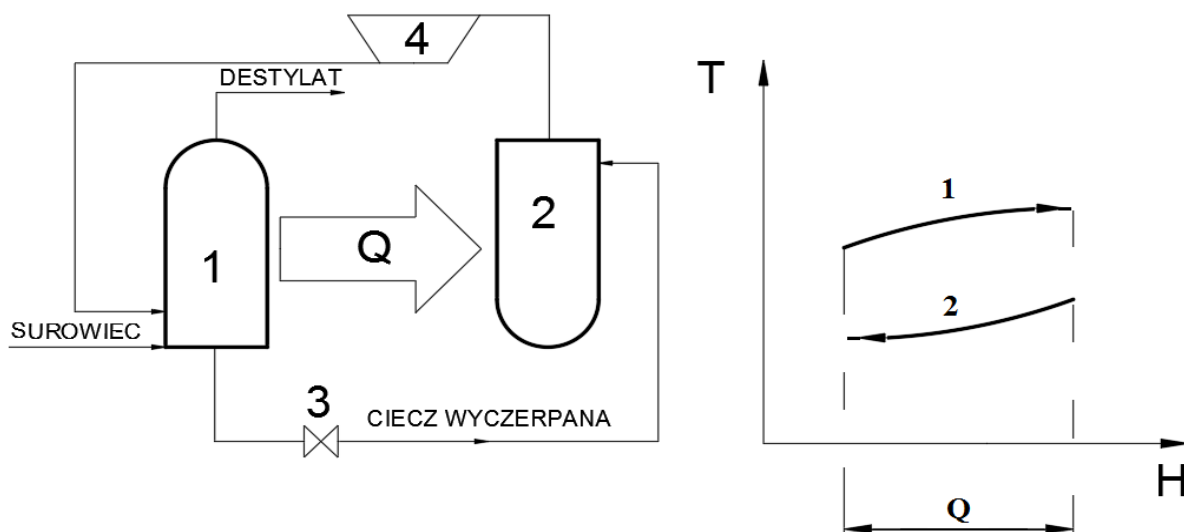
W przeglądzie literatury (rozdział 2) starano się wykazać ciągły trend rozwoju gałęzi rektyfikacji substancji. Szczególny wpływ na rozwój badań miały poszczególne prace autorów, takich jak: Brugma, Petloyuk, Lianghua, Haselden, Mah i Nakaiava. Celem badań wymienionych autorów było ograniczenie energochłonności procesu rozdziału substancji.

Kierując się aspektami ograniczenia energochłonności procesu rozdziału substancji, Markowski i in. w pracy [77] przedstawili metodę obliczania wymiennika H&MPE. W powyższej pracy autorzy przedstawili wady kolumny CDiC, takie jak duży zrzut ciepła ze skraplacza do otoczenia oraz duży pobór ciepła przez reboiler z zewnętrznego źródła ciepła. Można do nich dodać wiele innych niekorzystnych uwarunkowań, jak wymiary samego aparatu czy trudności eksploatacyjne związane z konserwacją. Wykorzystując wyidealizowany układ, przedstawiony na rys. 4.1 a - składający się z nieskończonej liczby skraplaczy w części wzmacniającej oraz nieskończonej liczby wyparek w części odpędowej, autorzy pracy starają się rozwiązać problem związany z niską efektywnością cieplną kolumny CDiC. Na rys. 4.1 b, przedstawiono wykres temperatura – strumień entalpii, obrazujący tzw. profile kolumny.



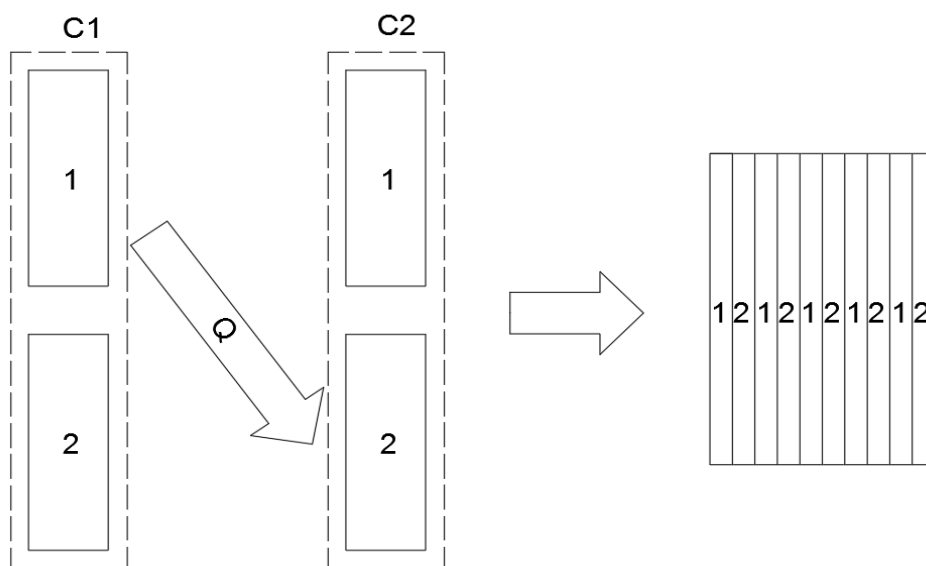
Rys. 4.1. Idealna kolumna rektyfikacyjna: a) graficzna prezentacja idei modelu, b) wykres temperatura – strumień entalpii (T-H) [77]

Jeśli w część wzmacniającej „1” zostanie odpowiednio zwiększone ciśnienie, w stosunku do części odpędowej „2”, przy użyciu sprężarki „4”, zaistnieje możliwość przeponowej wymiany ciepła przez ścianę kolumny z części „1” do „2”. (rys. 4.2).



Rys. 4.2. Kolumna HIDiC: a) graficzna prezentacja idei modelu b) wykres przedstawiający wymianę ciepła między częścią wzmacniającą „1” i odpędową „2” [77]

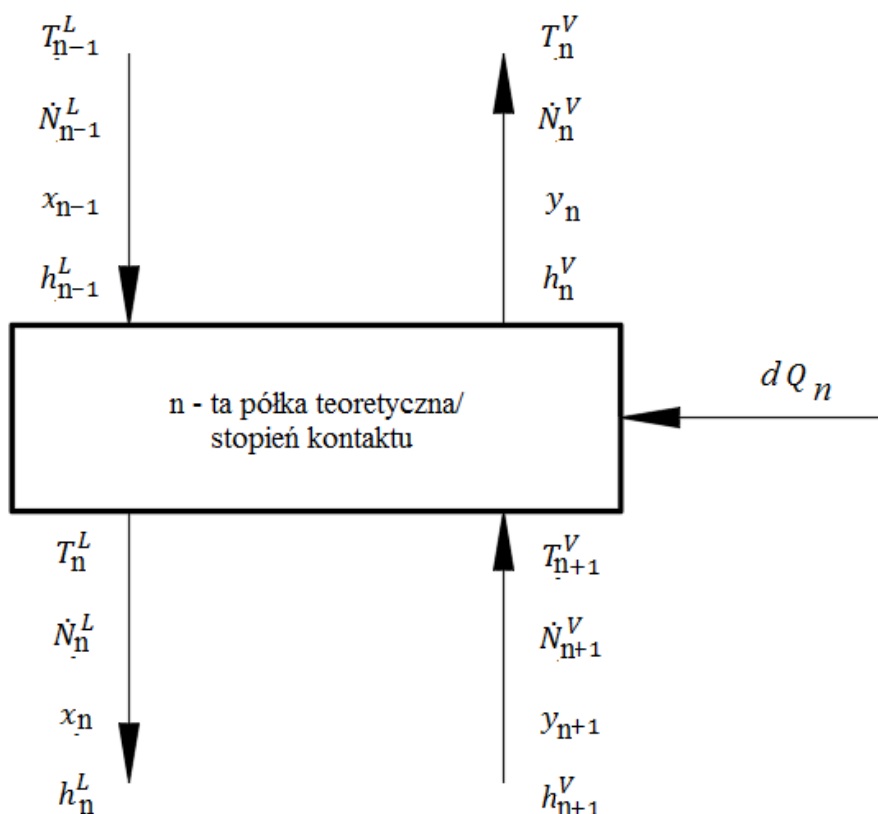
Wykorzystując rys. 4.2, na rys. 4.3 zamieszczono schemat, przedstawiający ideę tworzenia wymiennika H&MPE poprzez zestawienie części wzmacniającej i odpędowej dwóch kolumn C1 i C2 do postaci płytowego wymiennika ciepła i masy o budowie wielokanałowej.



Rys. 4.3. Schemat ideowy integracji cieplnej części wzmacniającej i odpędowej dwóch kolumn C1 i C2 [77]

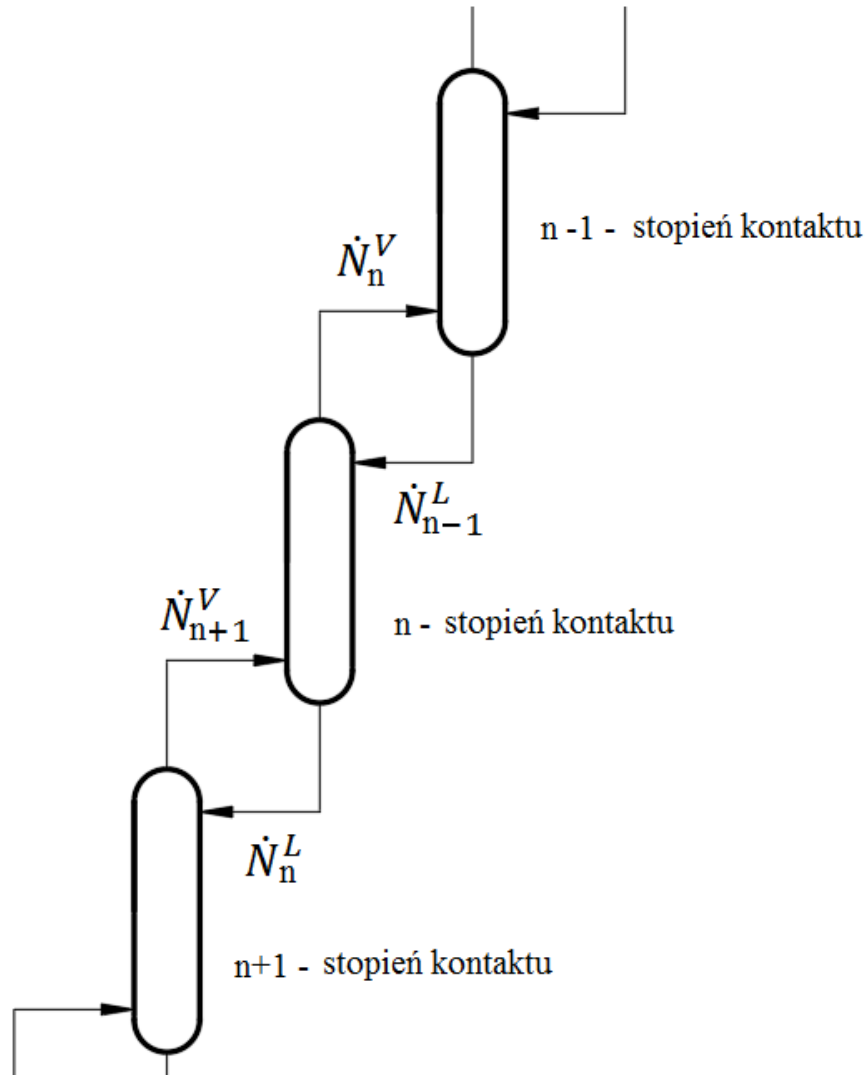
4.2. Wyznaczenie rzeczywistych profili kolumny

Matematyczny opis rektyfikacji substancji w kolumnie CDiC bazuje na pojęciu półki teoretycznej (rys. 4.4). W modelu wymiennika H&MPE pojęcie „półka teoretyczna” zastąpiono pojęciem „stopień kontaktu” (obszar o intensywnym mieszaniu cieczy z oparami, gdzie występuje stan równowagi termodynamicznej), niemniej w dysertacji zakłada się ich równoważność pod względem termodynamicznym.



Rys. 4.4. Schemat bilansowania n-tego stopnia kontaktu

Na rys. 4.5 przedstawiono schemat oddziaływania sąsiadujących ze sobą stopni kontaktu poprzez strumienie procesowe cieczy i oparów (na rysunku stopień kontaktu przedstawiono w postaci symbolu zbiornika). W każdym zbiorniku dochodzi do kontaktu cieczy z oparami, a opuszczające zbiornik strumienie procesowe posiadają nowe parametry intensywne i ekstensywne.



Rys. 4.5. Schemat przedstawiający oddziaływanie pomiędzy trzema wybranymi stopniami kontaktu

Aby uzyskać parametry termodynamiczne oparów i cieczy dla stanu ustalonego funkcjonowania wymiennika H&MPE, należy zacząć od sporządzenia schematu bilansowania dla n-tego stopnia kontaktu (rys. 4.4). Na jego podstawie można wyprowadzić równania bilansu masy i energii:

Bilans energii dla n-tego stopnia kontaktu (rys. 4.4):

$$\dot{N}_{n-1}^L \cdot h_{n-1}^L + \dot{N}_{n+1}^V \cdot h_{n+1}^V + \Delta Q_n - \dot{N}_n^V \cdot h_n^V - \dot{N}_n^L \cdot h_n^L = 0 \quad (4.1)$$

Bilans masowy dla n-tego stopnia kontaktu:

$$\dot{N}_{n-1}^L + \dot{N}_{n+1}^V - \dot{N}_n^V - \dot{N}_n^L = 0 \quad (4.2)$$

Bilans masowy w – tego składnika dla n-tego stopnia kontaktu:

$$\dot{N}_{n-1}^L \cdot x_{w,n-1} + \dot{N}_{n+1}^V \cdot y_{w,n+1} - \dot{N}_n^V \cdot y_{w,n} - \dot{N}_n^L \cdot x_{w,n} = 0 \quad (4.3)$$

Na n-tym stopniu kontaktu założono stan równowagi termodynamicznej między oparami a cieczą:

$$y_{w,n} = k_{w,n} \cdot x_{w,n} \quad (4.4)$$

$$T_n^L = T_n^V \quad (4.5)$$

4.3. Obliczenia cieplne

Na podstawie przeprowadzonych w rozdziale 4.1 rozważań, w integracji cieplnej układu do rozdziału mieszaniny substancji aparatu można zastosować technologię kanałową. W rozważaniach nasunęło się wykorzystanie do tego celu wymiennika płytowego do zastąpienia dwóch zintegrowanych cieplnie części kolumny (części wzmacniającej i odpędowej). Podobnie jak w pracy Markowski i in. [77], model wymiany ciepła w wymienniku H&MPE bazuje na teorii oporów cieplnych, analogicznie jak w opisie przeponowego wymiennika ciepła.

Powierzchnię wymiany ciepła opisuje powszechnie wykorzystywane równanie dla przeponowego wymiennika ciepła [45]:

$$Q = \int U_f \cdot \Delta T \cdot A \quad (4.6)$$

gdzie:

- współczynnik przenikania ciepła dla wymiennika zanieczyszczonego osadów:

$$\frac{1}{U_f} = \frac{1}{U_c} + R_f \quad (4.7)$$

- współczynnik przenikania ciepła dla wymiennika bez osadów:

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_j} \quad (4.8)$$

Do wyznaczenia różnicy temperatury w wymienniku wykorzystywane są profile kolumny (rys. 4.2).

5. Dynamika wymiennika H&MPE

Matematyczny model dynamiki wymiennika H&MPE został opracowany w niniejszej pracy w typowy sposób, powszechnie znany w literaturze przedmiotu. Mianowicie, aparat podzielono na odpowiednią liczbę sekcji w ten sposób, że każdej sekcji o określonych parametrach geometrycznych przypisano uśrednione parametry termodynamiczne. W każdej sekcji, zjawiska wymiany ciepła i masy opisano wykorzystując równania bilansowe masy i ciepła oraz równania równowagi termodynamicznej pomiędzy oparami i cieczą. Następnie równania zlinearyzowano wokół wartości średnich parametrów termodynamicznych. Ostatecznie równania poddano transformacji Laplace'a uzyskując transmitancje operatorowe. Pozwoliło to w dalszej kolejności na sporządzenie schematu blokowego dynamiki wymiennika H&MPE.

5.1. Opis matematyczny dynamiki wymiennika H&MPE

Przeponowy wymiennik H&MPE łączy w sobie sygnały sterowania dla wymiennika ciepła jak i kolumny rektyfikacyjnej. W tej sytuacji jako wielkości w nim regulowane można przyjąć:

- temperaturę wylotową oparów destylatu z części wzmacniającej;
- temperaturę wylotową cieczy wyczerpanej z części odpędowej.

W przypadku rozdziału mieszanin binarnych, temperaturze o określonej wartości odpowiada jednoznacznie określony skład destylatu w części wzmacniającej i cieczy wyczerpanej w części odpędowej.

Wielkościami wejściowymi oddziałującymi na wymiennik po stronie części wzmacniającej są:

- temperatura oparów wypływających z części odpędowej;
- strumień molowy oparów wypływających z części odpędowej;
- ciśnienie oparów;

oraz po stronie części odpędowej:

- temperatura cieczy wypływającej z części wzmacniającej;
- strumień molowy cieczy wypływającej z części wzmacniającej;
- ciśnienie cieczy.

Wielkości wyjściowe zmieniające się na skutek działania wielkości wejściowych to dla części wzmacniającej:

- temperatura oparów destylatu;
- strumień molowy oparów destylatu;

oraz dla części odpędowej:

- temperatura cieczy wyczerpanej;
- strumień molowy cieczy wyczerpanej.

5.2. Model sekcyjny dynamiki wymiennika H&MPE

Do analizy dynamiki wymiennika H&MPE zastosowano model sekcyjny o parametrach skupionych.

Bazując na opisie literaturowym modeli kolumn rektyfikacyjnych i wymienników ciepła, w których występuje zmiana stanu skupienia czynników [96], w proponowanym modelu przyjęto założenia, mające na celu uproszczenie opisu:

- pominięto straty ciepła do otoczenia,
- wymiennik H&MPE podzielono na sekcje obejmujące kilka stopni kontaktu,
- w każdej sekcji założono uśrednione wartości parametrów termodynamicznych,
- w dowolnym stopniu kontaktu występuje równowaga termodynamiczna pomiędzy cieczą i oparami w stanie dynamicznym,
- wszystkie stopnie kontaktu posiadają taką samą sprawność rozdziału substancji,
- stała czasowa procesów wymiany ciepła i ustalania równowagi hydrodynamicznej jest pomijalnie mała w porównaniu ze stałą czasową wymiany masy;
- pomija się akumulację ciepła w oparach,
- zawartość cieczy we wszystkich stopniach kontaktu jest taka sama,
- współczynnik przenikania ciepła wyznaczony dla warunków ustalonych obowiązuje również dla warunków nieustalonych.

W modelowaniu wymiennika H&MPE wyodrębniono sekcje „i” oraz „j”, odpowiednio dla kanału części wzmacniającej i odpędowej (rys. 5.1). W modelu przyjęto następujące sygnały wejściowe, oddziałujące na sekcję „i” (rys. 5.1):

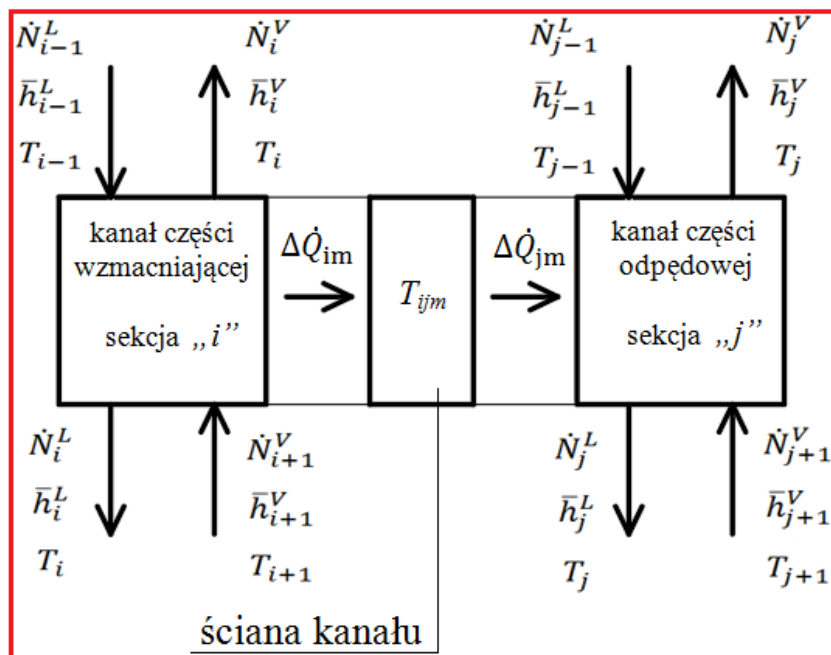
- strumień molowy cieczy spływającej do danej sekcji: \dot{N}_{i-1}^L ;
- temperatura cieczy: T_{i-1} ;

- strumień molowy oparów wpływających do sekcji: \dot{N}_{i+1}^V ;
- temperatura oparów: T_{i+1} ;
- dodatkowo na sekcje oddziałuje ciśnienie: P_i ; - tak jak wspomniano w rozdziale 6.3 – charakter oddziaływania ciśnienia jest impulsowy i zanika po czasie – τ .

W modelu przyjęto następujące sygnały wyjściowe dla sekcji „i” (rys. 5.1):

- temperatura sekcji: T_i ;
- strumień molowy cieczy opuszczającej sekcję: \dot{N}_i^L ;
- strumień molowy oparów opuszczających sekcję: \dot{N}_i^V ;

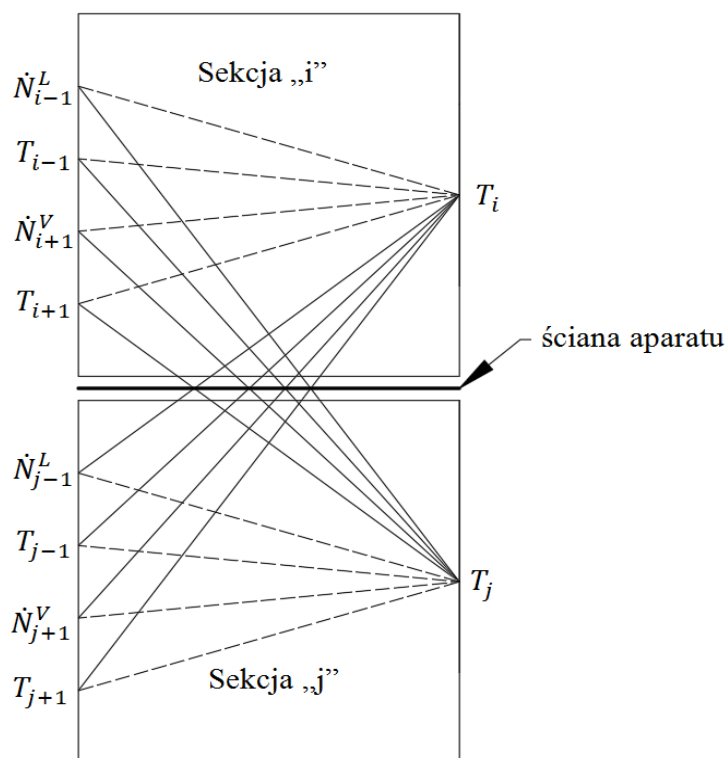
Analogiczne sygnały wejściowe i wyjściowe występują dla sekcji „j” wymiennika.



Rys. 5.1. Schemat bilansowania elementu wymiennika H&MPE

Na podstawie analizy literatury przedmiotu, wyniki symulacji modelu aparatu powinny dokładnie odwzorowywać rzeczywiste procesy, a interakcje pomiędzy sygnałami w modelu powinny być opisane w możliwie prosty sposób [96]. W związku z tym zaproponowany został model dynamiki gdzie związki między sygnałami w obrębie jednego kanału (związki oznaczone na rys. 5.2 linią przerywaną) opisywane są układem równań [5.1÷5.3], natomiast ze względu na niepomijalny wpływ oddziaływań sygnałów pomiędzy kanałami (związki oznaczone linią ciągłą na rys. 5.2) zastosowano układ równań [5.4÷5.6]. Zastosowana kombinacja dwóch układów równań pozwoliła w możliwie prosty sposób określić matematycznie zależności pomiędzy sygnałami wejściowymi a sygnałami (temperaturami) wyjściowymi sekcji „i” oraz „j” w obrębie jednego kanału oraz kanału

sąsiedniego. W układzie równań [5.1÷5.3] zastosowano uproszczenie, w którym nie występuje oddziaływanie cieplne pomiędzy sekcjami sąsiednich kanałów „i” oraz „j”.



Rys. 5.2. Schemat interakcji pomiędzy sygnałami wejściowymi i wyjściowymi dla sekcji „i” oraz „j” wymiennika H&MPE

W matematycznym opisie dynamiki wymiennika H&MPE wykorzystano równania bilansowe masy i ciepła.

MODEL BEZ AKUMULACJI CIEPŁA W ŚCIANCE APARATU

Bilans cieplny (rys. 5.1)

$$\frac{d(N_i \bar{h}_i^L)}{dt} = \dot{N}_{i-1}^L \cdot \bar{h}_{i-1}^L + \dot{N}_{i+1}^V \cdot \bar{h}_{i+1}^V - \dot{N}_i^L \cdot \bar{h}_i^L - \dot{N}_i^V \cdot \bar{h}_i^V - d\dot{Q}_{ij} \quad (5.1)$$

$$\frac{d(N_j \bar{h}_j^L)}{dt} = \dot{N}_{j-1}^L \cdot \bar{h}_{j-1}^L + \dot{N}_{j+1}^V \cdot \bar{h}_{j+1}^V - \dot{N}_j^L \cdot \bar{h}_j^L - \dot{N}_j^V \cdot \bar{h}_j^V + d\dot{Q}_{ij} \quad (5.2)$$

$$d\dot{Q}_{ij} = d\dot{Q}_{im} = d\dot{Q}_{jm} = U_{ij} \cdot (T_i - T_j) \cdot dA_{i,j} \quad (5.3)$$

MODEL Z AKUMULACJĄ CIEPŁA W ŚCIANCE APARATU

Bilans cieplny (rys. 5.1)

$$\frac{d(N_i \bar{h}_i^L)}{dt} = \dot{N}_{i-1}^L \cdot \bar{h}_{i-1}^L + \dot{N}_{i+1}^V \cdot \bar{h}_{i+1}^V - \dot{N}_i^L \cdot \bar{h}_i^L - \dot{N}_i^V \cdot \bar{h}_i^V - d\dot{Q}_{im} \quad (5.4)$$

$$\rho_m \cdot V_m \cdot c_{pm} \cdot \frac{dT_{ijm}}{dt} = d\dot{Q}_{im} - d\dot{Q}_{jm} \quad (5.5)$$

$$\frac{d(N_j \cdot \bar{h}_j^L)}{dt} = \dot{N}_{j-1}^L \cdot \bar{h}_{j-1}^L + \dot{N}_{j+1}^V \cdot \bar{h}_{j+1}^V - \dot{N}_j^L \cdot \bar{h}_j^L - \dot{N}_j^V \cdot \bar{h}_j^V + d\dot{Q}_{jm} \quad (5.6)$$

gdzie:

$$d\dot{Q}_{im} = \alpha_{iz} \cdot (T_i - T_{ijm}) \cdot dA_{ij}$$

$$d\dot{Q}_{jm} = \alpha_{jz} (T_{ijm} - T_j) \cdot dA_{ij}$$

BILANS MASY

$$\frac{dN_i^L}{dt} = \dot{N}_{i-1}^L - \dot{N}_i^L + \frac{d\dot{Q}_{im}}{B_i}; \quad (5.7)$$

$$\frac{dN_j^L}{dt} = \dot{N}_{j-1}^L - \dot{N}_j^L - \frac{d\dot{Q}_{jm}}{B_j}; \quad (5.8)$$

$$\frac{dN_i^V}{dt} = \dot{N}_{i+1}^V - \dot{N}_i^V - \frac{d\dot{Q}_{im}}{B_i}; \quad (5.9)$$

$$\frac{dN_j^V}{dt} = \dot{N}_{j-1}^V - \dot{N}_j^V + \frac{d\dot{Q}_{jm}}{B_j}; \quad (5.10)$$

W modelowaniu wymiennika H&MPE przyjęto stan ustalony w przepływie strumieni masowych:

$$\frac{dN_i^L}{dt} = 0; \quad \frac{dN_i^V}{dt} = 0;$$

$$\frac{dN_j^L}{dt} = 0; \quad \frac{dN_j^V}{dt} = 0;$$

Stąd równania (5.7 ÷ 5.10) można uprościć do postaci:

$$\dot{N}_{i-1}^L - \dot{N}_i^L = -\frac{d\dot{Q}_{im}}{B_i}; \quad (5.11)$$

$$\dot{N}_{j-1}^L - \dot{N}_j^L = \frac{d\dot{Q}_{jm}}{B_j}; \quad (5.12)$$

$$\dot{N}_{i+1}^V - \dot{N}_i^V = \frac{d\dot{Q}_{im}}{B_i}; \quad (5.13)$$

$$\dot{N}_{j+1}^V - \dot{N}_j^V = -\frac{d\dot{Q}_{jm}}{B_j}; \quad (5.14)$$

Uwzględniając w równaniach (5.11 ÷ 5.14) zależność opisaną równaniem (5.3) otrzymano:

$$\dot{N}_i^L = \dot{N}_{i-1}^L + \frac{U_{ij} \cdot (T_i - T_j) \cdot dA_{i,j}}{B_i}; \quad (5.15)$$

$$\dot{N}_j^L = \dot{N}_{j-1}^L - \frac{U_{ij} \cdot (T_i - T_j) \cdot dA_{i,j}}{B_j}; \quad (5.16)$$

$$\dot{N}_i^V = \dot{N}_{i+1}^V - \frac{U_{ij} \cdot (T_i - T_j) \cdot dA_{i,j}}{B_i}; \quad (5.17)$$

$$\dot{N}_j^V = \dot{N}_{j+1}^V + \frac{U_{ij} \cdot (T_i - T_j) \cdot dA_{i,j}}{B_j}; \quad (5.18)$$

Występujące w równaniach (5.1 ÷ 5.2) entalpie właściwe molowe opisano przy użyciu następujących zależności:

$$h_i^L = C_i \cdot T_i; \quad (5.19)$$

$$h_i^V = C_i \cdot T_i + B_i; \quad (5.20)$$

$$h_j^L = C_j \cdot T_j; \quad (5.21)$$

$$h_j^V = C_j \cdot T_j + B_j; \quad (5.22)$$

gdzie:

$$C_i = \bar{c}_{pi}^l \cdot x_i^L + \bar{c}_{pi}^h \cdot (1 - x_i^L);$$

$$C_j = \bar{c}_{pj}^l \cdot x_j^L + \bar{c}_{pj}^h \cdot (1 - x_j^L);$$

$$B_i = H v_i^l \cdot y_i^l + H v_i^h \cdot (1 - y_i^l);$$

$$B_j = H v_j^l \cdot y_j^l + H v_j^h \cdot (1 - y_j^l);$$

Wstawiając równania (5.19 ÷ 5.22) do równań (5.1 ÷ 5.2) otrzymano:

$$\begin{aligned} \frac{N_i \cdot C_i \cdot dT_i}{dt} = & \dot{N}_{i-1}^L \cdot C_{i-1} \cdot T_{i-1} + \dot{N}_{i+1}^V \cdot (C_{i+1} \cdot T_{i+1} + B_{i+1}) - \dot{N}_i^L \cdot C_i \cdot T_i + \\ & - \dot{N}_i^V \cdot (C_i \cdot T_i + B_i) - U_{ij} \cdot (T_i - T_j) \cdot dA_{i,j} \end{aligned} \quad (5.23)$$

$$\begin{aligned} \frac{N_j \cdot C_j \cdot dT_j}{dt} = & \dot{N}_{j-1}^L \cdot C_{j-1} \cdot T_{j-1} + \dot{N}_{j+1}^V \cdot (C_{j+1} \cdot T_{j+1} + B_{j+1}) - \dot{N}_j^L \cdot C_j \cdot T_j + \\ & - \dot{N}_j^V \cdot (C_j \cdot T_j + B_j) + U_{ij} \cdot (T_i - T_j) \cdot dA_{i,j} \end{aligned} \quad (5.24)$$

Podstawiając równania (5.15 ÷ 5.18) do równań (5.23 ÷ 5.24) otrzymano:

$$\begin{aligned} \frac{N_i \cdot C_i \cdot dT_i}{dt} = & \dot{N}_{i-1}^L \cdot C_{i-1} \cdot T_{i-1} + \dot{N}_{i+1}^V \cdot (C_{i+1} \cdot T_{i+1} + B_{i+1}) - (\dot{N}_{i-1}^L + \\ & + \frac{U_{ij} \cdot (T_i - T_j) \cdot dA_{i,j}}{B_i}) \cdot (C_i \cdot T_i) - (\dot{N}_{i+1}^V - \frac{U_{ij} \cdot (T_i - T_j) \cdot dA_{i,j}}{B_i}) \cdot (C_i \cdot T_i + B_i) + \\ & - U_{ij} \cdot (T_i - T_j) \cdot dA_{i,j} \end{aligned} \quad (5.25)$$

$$\begin{aligned} \frac{N_j \cdot C_j \cdot dT_j}{dt} = & \dot{N}_{j-1}^L \cdot C_{j-1} \cdot T_{j-1} + \dot{N}_{j+1}^V \cdot (C_{j+1} \cdot T_{j+1} + B_{j+1}) - (\dot{N}_{j-1}^L + \\ & - \frac{U_{ij} \cdot (T_i - T_j) \cdot dA_{i,j}}{B_j}) \cdot (C_j \cdot T_j) - (\dot{N}_{j+1}^V + \frac{U_{ij} \cdot (T_i - T_j) \cdot dA_{i,j}}{B_j}) \cdot (C_j \cdot T_j + B_j) + \\ & + U_{ij} \cdot (T_i - T_j) \cdot dA_{i,j} \end{aligned} \quad (5.26)$$

Ostatecznie równania 5.25 oraz 5.26 uprościły się do następujących postaci:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{N_i \cdot C_i \cdot dT_i}{dt} = \dot{N}_{i-1}^L \cdot C_{i-1} \cdot T_{i-1} + \dot{N}_{i+1}^V \cdot C_{i+1} \cdot T_{i+1} + \dot{N}_{i+1}^V \cdot B_{i+1} + \\ - \dot{N}_{i-1}^L \cdot C_i \cdot T_i - \dot{N}_{i+1}^V \cdot C_i \cdot T_i - \dot{N}_{i+1}^V \cdot B_i, \end{array} \right. \quad (5.27.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{N_j \cdot C_j \cdot dT_j}{dt} = \dot{N}_{j-1}^L \cdot C_{j-1} \cdot T_{j-1} + \dot{N}_{j+1}^V \cdot C_{j+1} \cdot T_{j+1} + \dot{N}_{j+1}^V \cdot B_{j+1} + \\ - \dot{N}_{j-1}^L \cdot C_j \cdot T_j - \dot{N}_{j+1}^V \cdot C_j \cdot T_j - \dot{N}_{j+1}^V \cdot B_j. \end{array} \right. \quad (5.27.2)$$

Równanie 5.27.1 odpowiada za kanał części wzmacniającej, natomiast równanie 5.27.2 odnosi się do części odpędowej aparatu.

Podobnie postąpiono w przypadku równań 5.4 oraz 5.6, które uprościły się do następującego układu:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_i \cdot C_i \cdot \frac{dT_i}{dt} = \dot{N}_{i-1}^L \cdot C_{i-1} \cdot T_{i-1} + \dot{N}_{i+1}^V \cdot C_{i+1} \cdot T_{i+1} + \dot{N}_{i+1}^V \cdot B_{i+1} - N_{i-1}^L \cdot C_i \cdot T_i + \\ - \dot{N}_{i+1}^V \cdot C_i \cdot T_i - \dot{N}_{i+1}^V \cdot B_i + \frac{\alpha_i \cdot \alpha_j \cdot (T_i - T_j) \cdot dA_{i,j}}{(\alpha_i \cdot \alpha_j \cdot (Rf_i + Rf_j) + \alpha_i + \alpha_j)} - \alpha_{iz} \cdot (T_i - T_{ijm}) \cdot dA_{i,j} \end{array} \right. \quad (5.28.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} N_j \cdot C_j \cdot \frac{dT_j}{dt} = \dot{N}_{j-1}^L \cdot C_{j-1} \cdot T_{j-1} + \dot{N}_{j+1}^V \cdot C_{j+1} \cdot T_{j+1} + \dot{N}_{j+1}^V \cdot B_{j+1} - N_{j-1}^L \cdot C_j \cdot T_j + \\ - \dot{N}_{j+1}^V \cdot C_j \cdot T_j - \dot{N}_{j+1}^V \cdot B_j + \frac{\alpha_i \cdot \alpha_j \cdot (T_i - T_j) \cdot dA_{i,j}}{(\alpha_i \cdot \alpha_j \cdot (Rf_i + Rf_j) + \alpha_i + \alpha_j)} - \alpha_{jz} \cdot (T_{ijm} - T_j) \cdot dA_{i,j} \end{array} \right. \quad (5.28.2)$$

Analogicznie jak w przypadku układu równań 5.27, równanie 5.28.1 odpowiada za kanał części wzmacniającej, natomiast równanie 5.28.2 odnosi się do części odpędowej aparatu.

5.3. Uwzględnienie wpływu ciśnienie na funkcjonowanie aparatu

Podejście do analizy charakterystyk dynamicznych zmian parametrów procesowych od wartości ustalonych musi uwzględniać również dynamiczne zmiany ciśnienia [44]. W przeciwnym wypadku model będzie niekompletny, a sama predykcja dynamiki aparatu będzie niepełna.

Wpływ ciśnienia na pracę aparatu wyprowadzono z bilansu energii dla sekcji wzmacniającej i odpędowej. Ponieważ spadkowi ciśnienia w dowolnej sekcji aparatu towarzyszy schłodzenie zalegającej sekcję cieczy oraz częściowe jej odparowanie – jako efekt jej schłodzenia. W modelu wykorzystano równowagę między ilością ciepła, powstałego w wyniku schłodzenia cieczy w danej sekcji, a ilością ciepła potrzebną do częściowego odparowania schładzanej cieczy. Należy dodać, że w przypadku wzrostu ciśnienia w sekcji występuje proces odwrotny. Mianowicie, ciecz ulega podgrzaniu w wyniku częściowego skraplania oparów.

Przyjmując, że odparowanie cieczy (skraplanie oparów) ma charakter impulsowy i odbywa się w czasie τ , opisane powyżej zjawisko odparowania cieczy (skraplania oparów), w wyniku zmiany ciśnienia w dowolnej sekcji, można opisać następującą zależnością:

$$\begin{cases} N_i \cdot c_{pi} \cdot \Delta T_i = \dot{N}_i^V \cdot r_i \cdot \tau \\ N_j \cdot c_{pj} \cdot \Delta T_j = \dot{N}_j^V \cdot r_j \cdot \tau \end{cases} \quad (5.29.1)$$

Podobne podejście modelowania wpływu ciśnienia na dynamikę aparatu zaprezentował Ho i in. [44], gdzie zaimplementowany został moduł ciśnienia oddziałujący na wszystkie sekcje aparatu jednocześnie, gdzie założono odparowanie cieczy (skraplanie oparów) w czasie $\tau=6$ s. Na tej podstawie w opisywanym przykładzie założono czas odparowania cieczy (skraplania oparów) $\tau=6$ s.

Zakładając równowagę termodynamiczną między cieczą i oparami, wielkości ΔT_i oraz ΔT_j można przybliżyć następującymi zależnościami:

$$\begin{cases} \Delta T_i = \frac{\Delta T_i}{\Delta P_i} \cdot \Delta P_i \\ \Delta T_j = \frac{\Delta T_j}{\Delta P_j} \cdot \Delta P_j \end{cases} \quad (5.29.2)$$

Wstawiając równania 5.30 do równań 5.29 otrzymano:

$$\begin{cases} N_i \cdot c_{pi} \cdot \frac{\Delta T_i}{\Delta P_i} \cdot \Delta P_i = \dot{N}_i^V \cdot r_i \cdot \tau \\ N_j \cdot c_{pj} \cdot \frac{\Delta T_j}{\Delta P_j} \cdot \Delta P_j = \dot{N}_j^V \cdot r_j \cdot \tau \end{cases} \quad (5.30)$$

5.4. Wyznaczanie transmitancji operatorowych

Na podstawie rozwiązania układu równań, wynikających z przyjętego modelu matematycznego, można uzyskać związki (z wykorzystaniem transmitancji operatorowych) zachodzące między zakłóceniami na wlocie do danej sekcji zintegrowanego aparatu oraz zmianami temperatury i strumieni masowych na wylocie z danej sekcji aparatu.

Układ równań 5.27 należy zlinearyzować, poddając go transformacji Laplace'a w celu uzyskania transmitancji operatorowych $G_1(s)$ do $G_4(s)$ oraz $G_9(s)$ do $G_{12}(s)$, następnie trzeba poddać linearyzacji układ równań 5.29 do uzyskania kolejnych transmitancji operatorowych $G_5(s)$ do $G_8(s)$ oraz $G_{13}(s)$ do $G_{16}(s)$, dla poszczególnych sekcji aparatu H&MPE:

$$\begin{aligned} G_1(s) &= \frac{\bar{T}_i(s)}{\bar{N}_{i-1}^L(s)}; & G_2(s) &= \frac{\bar{T}_i(s)}{\bar{T}_{i-1}(s)}; & G_3(s) &= \frac{\bar{T}_i(s)}{\bar{N}_{i+1}^V(s)}; & G_4(s) &= \frac{\bar{T}_i(s)}{\bar{T}_{i+1}(s)}; \\ G_5(s) &= \frac{\bar{T}_i(s)}{\bar{N}_{j-1}^L(s)}; & G_6(s) &= \frac{\bar{T}_i(s)}{\bar{T}_{j-1}(s)}; & G_7(s) &= \frac{\bar{T}_i(s)}{\bar{N}_{j+1}^V(s)}; & G_8(s) &= \frac{\bar{T}_i(s)}{\bar{T}_{j+1}(s)}; \\ G_9(s) &= \frac{\bar{T}_j(s)}{\bar{N}_{j-1}^L(s)}; & G_{10}(s) &= \frac{\bar{T}_j(s)}{\bar{T}_{j-1}(s)}; & G_{11}(s) &= \frac{\bar{T}_j(s)}{\bar{N}_{j+1}^V(s)}; & G_{12}(s) &= \frac{\bar{T}_j(s)}{\bar{T}_{j+1}(s)}; \\ G_{13}(s) &= \frac{\bar{T}_j(s)}{\bar{N}_{i-1}^L(s)}; & G_{14}(s) &= \frac{\bar{T}_j(s)}{\bar{T}_{i-1}(s)}; & G_{15}(s) &= \frac{\bar{T}_j(s)}{\bar{N}_{i+1}^V(s)}; & G_{16}(s) &= \frac{\bar{T}_j(s)}{\bar{T}_{i+1}(s)}; \end{aligned}$$

Sposób wyznaczania transmitancji operatorowych przedstawiono poniżej, na przykładzie transmitancji $G_1(s)$, wyznaczonej dla układu równań 5.27. Przy ich wyznaczaniu należało zwrócić uwagę na fakt, że w równaniu 5.27.1 występuje iloczyn dwóch zmiennych: strumienia molowego i temperatury w sekcji „i”. Analogicznie sytuacja wygląda dla równania 5.27.2 dla sekcji „j”, co powoduje, że równania są nieliniowe. Aby usunąć tę nieliniowość, dokonano na równaniach 5.27 zabiegu linearyzacji poprzez ich rozwinięcie w szereg Taylora w otoczeniu średnich wartości zmiennych.

Rozwinięcie równania (5.27.1) w szereg Taylora:

$$\begin{aligned}
f(\dot{N}_{i-1}^L, T_{i-1}, \dot{N}_{i+1}^V, T_{i+1}, T_i) &\cong f(\dot{N}_{i-1,s}^L, T_{i-1,s}, \dot{N}_{i+1,s}^V, T_{i+1,s}, T_{i,s}) + \\
&+ \frac{\partial f(\dot{N}_{i-1,s}^L, T_{i-1,s}, \dot{N}_{i+1,s}^V, T_{i+1,s}, T_{i,s})}{\partial \dot{N}_{i-1}^L} \cdot (\dot{N}_{i-1}^L - \dot{N}_{i-1,s}^L) + \\
&+ \frac{\partial f(\dot{N}_{i-1,s}^L, T_{i-1,s}, \dot{N}_{i+1,s}^V, T_{i+1,s}, T_{i,s})}{\partial T_{i-1}} \cdot (T_{i-1} - T_{i-1,s}) + \\
&+ \frac{\partial f(\dot{N}_{i-1,s}^L, T_{i-1,s}, \dot{N}_{i+1,s}^V, T_{i+1,s}, T_{i,s})}{\partial \dot{N}_{i+1}^V} \cdot (\dot{N}_{i+1}^V - \dot{N}_{i+1,s}^V) + \\
&+ \frac{\partial f(\dot{N}_{i-1,s}^L, T_{i-1,s}, \dot{N}_{i+1,s}^V, T_{i+1,s}, T_{i,s})}{\partial T_{i+1}} \cdot (T_{i+1} - T_{i+1,s}) + \\
&+ \frac{\partial f(\dot{N}_{i-1,s}^L, T_{i-1,s}, \dot{N}_{i+1,s}^V, T_{i+1,s}, T_{i,s})}{\partial T_i} \cdot (T_i - T_{i,s}) \quad (5.31)
\end{aligned}$$

gdzie:

$$\begin{aligned}
f(\dot{N}_{i-1,s}^L, T_{i-1,s}, \dot{N}_{i+1,s}^V, T_{i+1,s}, T_{i,s}) &= \dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_{i-1} \cdot T_{i-1,s} + \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_{i+1} \cdot T_{i+1,s} + \\
&+ \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot B_{i+1} - \dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_i \cdot T_{i,s} - \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_i \cdot T_{i,s} - \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot B_i
\end{aligned}$$

$$\frac{\partial f(\dot{N}_{i-1,s}^L, T_{i-1,s}, \dot{N}_{i+1,s}^V, T_{i+1,s}, T_{i,s})}{\partial \dot{N}_{i-1}^L} = C_{i-1} \cdot T_{i-1,s} - C_i \cdot T_{i,s}$$

$$\frac{\partial f(\dot{N}_{i-1,s}^L, T_{i-1,s}, \dot{N}_{i+1,s}^V, T_{i+1,s}, T_{i,s})}{\partial T_{i-1}} = \dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_{i-1}$$

$$\frac{\partial f(\dot{N}_{i-1,s}^L, T_{i-1,s}, \dot{N}_{i+1,s}^V, T_{i+1,s}, T_{i,s})}{\partial \dot{N}_{i+1}^V} = C_{i+1} \cdot T_{i+1,s} + B_{i+1} - C_i \cdot T_{i,s} - B_i$$

$$\frac{\partial f(\dot{N}_{i-1,s}^L, T_{i-1,s}, \dot{N}_{i+1,s}^V, T_{i+1,s}, T_{i,s})}{\partial T_{i+1}} = \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_{i+1}$$

$$\frac{\partial f(\dot{N}_{i-1,s}^L, T_{i-1,s}, \dot{N}_{i+1,s}^V, T_{i+1,s}, T_{i,s})}{\partial T_i} = -\dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_i - \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_i$$

Zatem można zapisać:

$$\begin{aligned}
f(\dot{N}_{i-1}^L, T_{i-1}, \dot{N}_{i+1}^V, T_{i+1}, T_i) &= \dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_{i-1} \cdot T_{i-1,s} + \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_{i+1} \cdot T_{i+1,s} + \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot B_{i+1} + \\
&- \dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_i \cdot T_{i,s} - \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_i \cdot T_{i,s} - \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot B_i + (C_{i-1} \cdot T_{i-1,s} - C_i \cdot T_{i,s}) \cdot (\dot{N}_{i-1}^L - \\
&\dot{N}_{i-1,s}^L) + (\dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_{i-1}) \cdot (T_{i-1} - T_{i-1,s}) + (C_{i+1} \cdot T_{i+1,s} + B_{i+1} - C_i \cdot T_{i,s} - B_i) \cdot \\
&(\dot{N}_{i+1}^V - \dot{N}_{i+1,s}^V) + (\dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_{i+1}) \cdot (T_{i+1} - T_{i+1,s}) - (\dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_i + \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_i) \cdot (T_i - \\
&T_{i,s}) = \frac{N_i \cdot C_i \cdot dT_i}{dt} \quad (5.32)
\end{aligned}$$

Wprowadzono nowe zmienne wyrażone jako odchyłki od wartości w stanie ustalonym:

$$\bar{T}_{i-1} = T_{i-1} - T_{i-1,s};$$

$$\bar{T}_{i+1} = T_{i+1} - T_{i+1,s};$$

$$\bar{\dot{N}}_{i-1}^L = \dot{N}_{i-1}^L - \dot{N}_{i-1,s}^L;$$

$$\bar{\dot{N}}_{i+1}^V = \dot{N}_{i+1}^V - \dot{N}_{i+1,s}^V;$$

$$\bar{T}_i = T_i - T_{i,s};$$

Różniczkując obustronnie ostatnie równanie otrzymano:

$$d\bar{T}_i = dT_i;$$

Przyjmując powyższe zależności otrzymano:

$$\begin{aligned} \frac{N_i \cdot C_i \cdot d\bar{T}_i}{dt} = & \dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_{i-1} \cdot T_{i-1,s} + \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_{i+1} \cdot T_{i+1,s} + \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot B_{i+1} + \\ & - \dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_i \cdot T_{i,s} - \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_i \cdot T_{i,s} - \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot B_i + (C_{i-1} \cdot T_{i-1,s} - C_i \cdot T_{i,s}) \cdot \bar{\dot{N}}_{i-1}^L \\ & + (\dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_{i-1}) \cdot \bar{T}_{i-1} + (C_{i+1} \cdot T_{i+1,s} + B_{i+1} - C_i \cdot T_{i,s} - B_i) \cdot \bar{\dot{N}}_{i+1}^V + \\ & + (\dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_{i+1}) \cdot \bar{T}_{i+1} - (\dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_i + \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_i) \cdot \bar{T}_i \end{aligned} \quad (5.33)$$

Następnie rozwinięto równania (5.27.2) w szereg Taylora:

$$\begin{aligned} f(\dot{N}_{j-1}^L, T_{j-1}, \dot{N}_{j+1}^V, T_{j+1}, T_j) \cong & f(\dot{N}_{j-1,s}^L, T_{j-1,s}, \dot{N}_{j+1,s}^V, T_{j+1,s}, T_{j,s}) + \\ & + \frac{\partial f(\dot{N}_{j-1,s}^L, T_{j-1,s}, \dot{N}_{j+1,s}^V, T_{j+1,s}, T_{j,s})}{\partial \dot{N}_{j-1}^L} \cdot (\dot{N}_{j-1}^L - \dot{N}_{j-1,s}^L) + \\ & + \frac{\partial f(\dot{N}_{j-1,s}^L, T_{j-1,s}, \dot{N}_{j+1,s}^V, T_{j+1,s}, T_{j,s})}{\partial T_{j-1}} \cdot (T_{j-1} - T_{j-1,s}) + \\ & + \frac{\partial f(\dot{N}_{j-1,s}^L, T_{j-1,s}, \dot{N}_{j+1,s}^V, T_{j+1,s}, T_{j,s})}{\partial \dot{N}_{j+1}^V} \cdot (\dot{N}_{j+1}^V - \dot{N}_{j+1,s}^V) + \\ & + \frac{\partial f(\dot{N}_{j-1,s}^L, T_{j-1,s}, \dot{N}_{j+1,s}^V, T_{j+1,s}, T_{j,s})}{\partial T_{j+1}} \cdot (T_{j+1} - T_{j+1,s}) + \\ & + \frac{\partial f(\dot{N}_{j-1,s}^L, T_{j-1,s}, \dot{N}_{j+1,s}^V, T_{j+1,s}, T_{j,s})}{\partial T_j} \cdot (T_j - T_{j,s}) \end{aligned} \quad (5.34)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} f(\dot{N}_{j-1,s}^L, T_{j-1,s}, \dot{N}_{j+1,s}^V, T_{j+1,s}, T_{j,s}) = & \dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_{j-1} \cdot T_{j-1,s} + \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_{j+1} \cdot T_{j+1,s} + \\ & + \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot B_{j+1} - \dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_j \cdot T_{j,s} - \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_j \cdot T_{j,s} - \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot B_j \end{aligned}$$

$$\frac{\partial f(\dot{N}_{j-1,s}^L, T_{j-1,s}, \dot{N}_{j+1,s}^V, T_{j+1,s}, T_{j,s})}{\partial \dot{N}_{j-1}^L} = C_{j-1} \cdot T_{j-1,s} - C_j \cdot T_{j,s}$$

$$\frac{\partial f(\dot{N}_{j-1,s}^L, T_{j-1,s}, \dot{N}_{j+1,s}^V, T_{j+1,s}, T_{j,s})}{\partial T_{j-1}} = \dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_{j-1}$$

$$\frac{\partial f(\dot{N}_{j-1,s}^L, T_{j-1,s}, \dot{N}_{j+1,s}^V, T_{j+1,s}, T_{j,s})}{\partial \dot{N}_{j+1}^V} = C_{j+1} \cdot T_{j+1,s} + B_{j+1} - C_j \cdot T_{j,s} - B_j$$

$$\frac{\partial f(\dot{N}_{j-1,s}^L, T_{j-1,s}, \dot{N}_{j+1,s}^V, T_{j+1,s}, T_{j,s})}{\partial T_{j+1}} = \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_{j+1}$$

$$\frac{\partial f(\dot{N}_{j-1,s}^L, T_{j-1,s}, \dot{N}_{j+1,s}^V, T_{j+1,s}, T_{j,s})}{\partial T_j} = -\dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_j - \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_j$$

Zatem można zapisać:

$$\begin{aligned} f(\dot{N}_{j-1}^L, T_{j-1}, \dot{N}_{j+1}^V, T_{j+1}, T_j) &= \dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_{j-1} \cdot T_{j-1,s} + \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_{j+1} \cdot T_{j+1,s} + \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot B_{j+1} + \\ &- \dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_j \cdot T_{j,s} - \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_j \cdot T_{j,s} - \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot B_j + (C_{j-1} \cdot T_{j-1,s} - C_j \cdot T_{j,s}) \cdot (\dot{N}_{j-1}^L - \\ &\dot{N}_{j-1,s}^L) + (\dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_{j-1}) \cdot (T_{j-1} - T_{j-1,s}) + (C_{j+1} \cdot T_{j+1,s} + B_{j+1} - C_j \cdot T_{j,s} - B_j) \cdot \\ &(\dot{N}_{j+1}^V - \dot{N}_{j+1,s}^V) + (\dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_{j+1}) \cdot (T_{j+1} - T_{j+1,s}) - (\dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_j + \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_j) \cdot (T_j - \\ &T_{j,s}) = \frac{N_j \cdot C_j \cdot dT_j}{dt} \end{aligned} \quad (5.35)$$

Wprowadzono nowe zmienne wyrażone jako odchyłki od wartości w stanie ustalonym:

$$\bar{T}_{j-1} = T_{j-1} - T_{j-1,s}$$

$$\bar{T}_{j+1} = T_{j+1} - T_{j+1,s}$$

$$\bar{\dot{N}}_{j-1}^L = \dot{N}_{j-1}^L - \dot{N}_{j-1,s}^L$$

$$\bar{\dot{N}}_{j+1}^V = \dot{N}_{j+1}^V - \dot{N}_{j+1,s}^V$$

$$\bar{T}_j = T_j - T_{j,s}$$

Różniczkując obustronnie ostatnie równanie otrzymano:

$$d\bar{T}_j = dT_j;$$

Uwzględniając powyższe zależności:

$$\begin{aligned} \frac{N_j \cdot C_j \cdot d\bar{T}_j}{dt} &= \dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_{j-1} \cdot T_{j-1,s} + \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_{j+1} \cdot T_{j+1,s} + \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot B_{j+1} - \dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_j \cdot T_{j,s} + \\ &- \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_j \cdot T_{j,s} - \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot B_j + (C_{j-1} \cdot T_{j-1,s} - C_j \cdot T_{j,s}) \cdot \bar{\dot{N}}_{j-1}^L + (\dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_{j-1}) \cdot \bar{T}_{j-1} + \\ &+ (C_{j+1} \cdot T_{j+1,s} + B_{j+1} - C_j \cdot T_{j,s} - B_j) \cdot \bar{\dot{N}}_{j+1}^V + (\dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_{j+1}) \cdot \bar{T}_{j+1} - (\dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_j + \\ &+ \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_j) \cdot \bar{T}_j; \end{aligned} \quad (5.36)$$

Zakładając dla równań 5.33 oraz 5.36, że w stanie ustalonym:

dla $t = 0$

$$\left. \frac{N_i \cdot C_i \cdot d\bar{T}_i}{dt} \right|_{t=0} = 0; \quad \dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_{i-1} \cdot T_{i-1,s} + \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_{i+1} \cdot T_{i+1,s} + \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot B_{i+1} - \dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_i \cdot T_{i,s} - \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_i \cdot T_{i,s} - \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot B_i = 0;$$

$$\left. \frac{N_j \cdot C_j \cdot d\bar{T}_j}{dt} \right|_{t=0} = 0; \quad \dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_{j-1} \cdot T_{j-1,s} + \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_{j+1} \cdot T_{j+1,s} + \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot B_{j+1} - \dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_j \cdot T_{j,s} - \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_j \cdot T_{j,s} - \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot B_j = 0;$$

Można wykluczyć wyrażenia zapisane powyżej z równań 5.33 oraz 5.36 uzyskując poniższy układ równań:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{N_i \cdot C_i \cdot d\bar{T}_i}{dt} = (C_{i-1} \cdot T_{i-1,s} - C_i \cdot T_{i,s}) \cdot \bar{N}_{i-1}^L + (\dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_{i-1}) \cdot \bar{T}_{i-1} + \\ (C_{i+1} \cdot T_{i+1,s} + B_{i+1} - C_i \cdot T_{i,s} - B_i) \cdot \bar{N}_{i+1}^V + (\dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_{i+1}) \cdot \bar{T}_{i+1} - \\ (\dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_i + \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_i) \cdot \bar{T}_i; \\ \frac{N_j \cdot C_j \cdot d\bar{T}_j}{dt} = (C_{j-1} \cdot T_{j-1,s} - C_j \cdot T_{j,s}) \cdot \bar{N}_{j-1}^L + (\dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_{j-1}) \cdot \bar{T}_{j-1} + \\ (C_{j+1} \cdot T_{j+1,s} + B_{j+1} - C_j \cdot T_{j,s} - B_j) \cdot \bar{N}_{j+1}^V + (\dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_{j+1}) \cdot \bar{T}_{j+1} - \\ (\dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_j + \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_j) \cdot \bar{T}_j; \end{array} \right. \quad (5.37)$$

W identyczny sposób potraktowano układ równań 5.28, gdzie również w wyniku rozwinięcia ich w szereg Taylora otrzymano poniższy układ równań:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_i \cdot C_i \cdot \frac{dT_i}{dt} = (C_{i-1} \cdot T_{i-1,s} - C_i \cdot T_{i,s}) \cdot \bar{N}_{i-1}^L + (\dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_{i-1}) \cdot \bar{T}_{i-1} + \\ + (C_{i+1} \cdot T_{i+1,s} + B_{i+1} - C_i \cdot T_{i,s} - B_i) \cdot \bar{N}_{i+1}^V + (\dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_{i+1}) \cdot \bar{T}_{i+1} + \\ - \left(\dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_i + \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_i - \frac{\alpha_i \cdot \alpha_j \cdot dA_{ij}}{\alpha_i \cdot \alpha_j \cdot (Rf_i + Rf_j) + \alpha_i + \alpha_j} + \alpha_{iz} \cdot dA_{ij} \right) \cdot \bar{T}_i + \\ - \left(\frac{\alpha_i \cdot \alpha_j \cdot dA_{ij}}{\alpha_i \cdot \alpha_j \cdot (Rf_i + Rf_j) + \alpha_i + \alpha_j} \right) \cdot \bar{T}_j + (\alpha_{iz} \cdot dA_{ij}) \cdot \bar{T}_{ijm} \\ \rho_m \cdot V_m \cdot C_{pm} \cdot \frac{dT_m}{dt} = -(\alpha_{jz} \cdot dA_{ij} + \alpha_{iz} \cdot dA_{ij}) \cdot \bar{T}_m + (\alpha_{jz} \cdot dA_{ij}) \cdot \bar{T}_j + (\alpha_{iz} \cdot dA_{ij}) \cdot \bar{T}_i \\ N_j \cdot C_j \cdot \frac{dT_j}{dt} = (C_{j-1} \cdot T_{j-1,s} - C_j \cdot T_{j,s}) \cdot \bar{N}_{j-1}^L + (\dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_{j-1}) \cdot \bar{T}_{j-1} + \\ + (C_{j+1} \cdot T_{j+1,s} + B_{j+1} - C_j \cdot T_{j,s} - B_j) \cdot \bar{N}_{j+1}^V + (\dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_{j+1}) \cdot \bar{T}_{j+1} + \\ - \left(\dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_j + \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_j - \frac{\alpha_i \cdot \alpha_j \cdot dA_{ij}}{\alpha_i \cdot \alpha_j \cdot (Rf_i + Rf_j) + \alpha_i + \alpha_j} + \alpha_{jz} \cdot dA_{ij} \right) \cdot \bar{T}_j + \\ - \left(\frac{\alpha_i \cdot \alpha_j \cdot dA_{ij}}{\alpha_i \cdot \alpha_j \cdot (Rf_i + Rf_j) + \alpha_i + \alpha_j} \right) \cdot \bar{T}_i + (\alpha_{jz} \cdot dA_{ij}) \cdot \bar{T}_{ijm} \end{array} \right. \quad (5.38)$$

Ostatecznie dla równań z układów 5.37, a także 5.38 zastosowano przekształcania Laplace'a. W układzie równań 5.38, wyznaczono temperaturę T_{ijm} dzięki czemu finalnie udało się powiązać wymianę strumienia ciepła między sekcją wzmacniającą i odpędową.

$$\left\{ \begin{array}{l} N_i \cdot C_i \cdot d\bar{T}_i \cdot s = (C_{i-1} \cdot T_{i-1,s} - C_i \cdot T_{i,s}) \cdot \bar{N}_{i-1}^L + \\ \quad + (\dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_{i-1}) \cdot \bar{T}_{i-1} + (C_{i+1} \cdot T_{i+1,s} + B_{i+1} - C_i \cdot T_{i,s} - B_i) \cdot \bar{N}_{i+1}^V + \\ \quad + (\dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_{i+1}) \cdot \bar{T}_{i+1} - (\dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_i + \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_i) \cdot \bar{T}_i \\ \\ N_j \cdot C_j \cdot d\bar{T}_j \cdot s = (C_{j-1} \cdot T_{j-1,s} - C_j \cdot T_{j,s}) \cdot \bar{N}_{j-1}^L + \\ \quad + (\dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_{j-1}) \cdot \bar{T}_{j-1} + (C_{j+1} \cdot T_{j+1,s} + B_{j+1} - C_j \cdot T_{j,s} - B_j) \cdot \bar{N}_{j+1}^V + \\ \quad + (\dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_{j+1}) \cdot \bar{T}_{j+1} - (\dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_j + \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_j) \cdot \bar{T}_j \end{array} \right. \quad (5.39)$$

Przedstawiony układ równań (5.39) został wykorzystany do wyznaczenia transmitancji od $G_1(s)$ do $G_4(s)$ oraz od $G_9(s)$ do $G_{12}(s)$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_i(s) \cdot (N_i \cdot C_i \cdot s + \dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_i + \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_i - U_{ij} \cdot dA_{ij} + \alpha_{iz} \cdot dA_{ij} + \\ - \frac{\alpha_{iz} \cdot dA_{ij} \cdot a1}{s+a1+a2} - \frac{\alpha_{iz} \cdot \alpha_{jz} \cdot a2 \cdot a1 \cdot dA_{ij}^2}{(s+a1+a2)^2 \cdot (a3)} + \frac{\alpha_{iz} \cdot a2 \cdot U_{ij} \cdot (s+a1+a2) \cdot dA_{ij}^2}{(s+a1+a2)^2 \cdot (a3)} + \frac{\alpha_{jz} \cdot a1 \cdot U_{ij} \cdot (s+a1+a2) \cdot dA_{ij}^2}{(s+a1+a2)^2 \cdot (a3)} + \\ - \frac{U_{ij}^2 \cdot (s+a1+a2)^2 \cdot dA_{ij}^2}{(s+a1+a2)^2 \cdot (a3)}) = (C_{i-1} \cdot T_{i-1,s} - C_i \cdot T_{i,s}) \cdot \bar{N}_{i-1}^L(s) + (\dot{N}_{i-1}^L \cdot C_{i-1}) \cdot \bar{T}_{i-1}(s) + \\ + (C_{i+1} \cdot T_{i+1,s} + B_{i+1} - C_i \cdot T_{i,s} - B_i) \cdot \bar{N}_{i+1}^V(s) + (\dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_{i+1}) \cdot \bar{T}_{i+1}(s) + \\ + \left(\frac{\alpha_{iz} \cdot dA_{ij} \cdot a2 - U_{ij} \cdot dA_{ij} \cdot (s+a1+a2)}{s+a1+a2} \right) \cdot \left(\frac{(C_{j-1} \cdot T_{j-1,s} - C_j \cdot T_{j,s})}{(a3)} \cdot \bar{N}_{j-1}^L(s) + \frac{(\dot{N}_{j-1}^L(s) \cdot C_{j-1})}{(a3)} \cdot \bar{T}_{j-1}(s) + \right. \\ \left. + \frac{(C_{j+1} \cdot T_{j+1,s} + B_{j+1} - C_j \cdot T_{j,s} - B_j)}{(a3)} \cdot \bar{N}_{j+1}^V(s) + \frac{(\dot{N}_{j+1}^V(s) \cdot C_{j+1})}{(a3)} \cdot \bar{T}_{j+1}(s) \right) \quad (5.40) \\ \\ \bar{T}_j(s) \cdot \left(N_j \cdot C_j \cdot s + \dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_j + \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_j - U_{ij} \cdot dA_{ij} + \alpha_{jz} \cdot dA_{ij} - \frac{\alpha_{jz} \cdot dA_{ij} \cdot a2}{s+a1+a2} - \right. \\ \left. \frac{\alpha_{jz} \cdot \alpha_{iz} \cdot a2 \cdot a1 \cdot dA_{ij}^2}{(s+a1+a2)^2 \cdot (a4)} + \frac{\alpha_{iz} \cdot a2 \cdot U_{ij} \cdot (s+a1+a2) \cdot dA_{ij}^2}{(s+a1+a2)^2 \cdot (a4)} + \frac{\alpha_{jz} \cdot a1 \cdot U_{ij} \cdot dA_{ij}^2 \cdot (s+a1+a2)}{(s+a1+a2)^2 \cdot (a4)} - \frac{U_{ij}^2 \cdot dA_{ij}^2 \cdot (s+a1+a2)^2}{(s+a1+a2)^2 \cdot (a4)} \right) = \\ (C_{j-1} \cdot T_{j-1,s} - C_j \cdot T_{j,s}) \cdot \bar{N}_{j-1}^L(s) + (\bar{N}_{j-1}^L(s) \cdot C_{j-1}) \cdot \bar{T}_{j-1}(s) + (C_{j+1} \cdot T_{j+1,s} + B_{j+1} - C_j \cdot \\ T_{j,s} - B_j) \cdot \bar{N}_{j+1}^V + (\bar{N}_{j+1}^V \cdot C_{j+1}) \cdot \bar{T}_{j+1}(s) + \frac{\alpha_{jz} \cdot dA_{ij} \cdot a1 - U_{ij} \cdot dA_{ij} \cdot (s+a1+a2)}{s+a1+a2} \cdot \\ \left(\frac{(C_{i-1} \cdot T_{i-1,s} - C_i \cdot T_{i,s}) \cdot \bar{N}_{i-1}^L(s)}{(a4)} + \frac{(\bar{N}_{i-1}^L(s) \cdot C_{i-1}) \cdot \bar{T}_{i-1}(s)}{(a4)} + \frac{(C_{i+1} \cdot T_{i+1,s} + B_{i+1} - C_i \cdot T_{i,s} - B_i) \cdot \bar{N}_{i+1}^V}{(a4)} + \right. \\ \left. \frac{(\bar{N}_{i+1}^V \cdot C_{i+1}) \cdot \bar{T}_{i+1}(s)}{(a4)} \right); \end{array} \right.$$

gdzie:

$$a1 = \frac{\alpha_{iz} \cdot dA_{ij}}{\rho_m \cdot V_m \cdot C_{pm} + \alpha_{jz} \cdot dA_{ij} + \alpha_{iz} \cdot dA_{ij}};$$

$$a2 = \frac{\alpha_{jz} \cdot dA_{ij}}{\rho_m \cdot V_m \cdot C_{pm} + \alpha_{jz} \cdot dA_{ij} + \alpha_{iz} \cdot dA_{ij}};$$

$$a3 = \left(N_j \cdot C_j \cdot s + \dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_j + \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_j - U_{ij} \cdot dA_{ij} + \alpha_{jz} \cdot dA_{ij} - \frac{\alpha_{jz} \cdot dA_{ij} \cdot a2}{s+a1+a2} \right);$$

$$a4 = \left(C_i \cdot N_i \cdot s + \bar{N}_{i-1}^L \cdot C_i + \bar{N}_{i+1}^V \cdot C_i - U_{ij} \cdot dA_{ij} + \alpha_{iz} \cdot dA_{ij} - \frac{(\alpha_{iz} \cdot dA_{ij} \cdot a1)}{s+a1+a2} \right);$$

Przedstawiony układ równań (5.40) wykorzystano do wyznaczenia transmitancji od $G_5(s)$ do $G_8(s)$ oraz od $G_{13}(s)$ do $G_{16}(s)$

Na podstawie równania dla części wzmacniającej, zawartego w układzie równań 5.39, wyznaczono ostatecznie transmitancję operatorową:

$$G_1(s) = \frac{\bar{T}_i(s)}{\bar{N}_{i-1}^L(s)};$$

Mianowicie:

$$N_i \cdot C_i \cdot s \cdot T_i(s) = (C_{i-1} \cdot T_{i-1,s} - C_i \cdot T_{i,s}) \cdot \bar{N}_{i-1}^L(s) - (\dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_i + \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_i) \cdot \bar{T}_i(s)$$

$$[N_i \cdot C_i \cdot s + \dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_i + \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_i] \cdot T_i(s) = (C_{i-1} \cdot T_{i-1,s} - C_i \cdot T_{i,s}) \cdot \bar{N}_{i-1}^L(s)$$

Skąd:

$$G_1(s) = \frac{C_{i-1} \cdot T_{i-1,s} - C_i \cdot T_{i,s}}{N_i \cdot C_i \cdot s + \dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_i + \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_i}; \quad (5.41)$$

Analogicznie wyznaczono pozostałe transmitancje:

$$G_2(s) = \frac{\dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_{i-1}}{N_i \cdot C_i \cdot s + \dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_i + \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_i}; \quad (5.42)$$

$$G_3(s) = \frac{C_{i+1} \cdot T_{i+1,s} + B_{i+1} - C_i \cdot T_{i,s} - B_i}{N_i \cdot C_i \cdot s + \dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_i + \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_i}; \quad (5.43)$$

$$G_3(s) = \frac{C_{i+1} \cdot T_{i+1,s} + B_{i+1} - C_i \cdot T_{i,s} - B_i}{N_i \cdot C_i \cdot s + \dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_i + \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_i}; \quad (5.44)$$

$$G_4(s) = \frac{\dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_{i+1}}{N_i \cdot C_i \cdot s + \dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_i + \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_i}; \quad (5.45)$$

$$a5 = \left(\left(\left(\left((N_i \cdot C_i \cdot s + \dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_i + \dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_i - U_{ij} \cdot dA_{ij} + \alpha_{iz} \cdot dA_{ij}) \cdot (s + a1 + a2) \right) - \alpha_{iz} \cdot dA_{ij} \cdot a1 \right) \cdot (s + a1 + a2) \cdot (*1) \right) + \right. \\ \left. - \alpha_{iz} \cdot \alpha_{jz} \cdot a2 \cdot a1 \cdot dA_{ij}^2 + \alpha_{iz} \cdot a2 \cdot U_{ij} \cdot (s + a1 + a2) \cdot dA_{ij}^2 + \alpha_{jz} \cdot a1 \cdot U_{ij} \cdot (s + a1 + a2) \cdot dA_{ij}^2 + \right. \\ \left. - U_{ij}^2 \cdot (s + a1 + a2)^2 \cdot dA_{ij}^2 \right)$$

$$G_5(s) = \frac{\bar{T}_i(s)}{\bar{N}_{i-1}^L(s)} = \frac{(C_{j-1} \cdot T_{j-1,s} - C_i \cdot T_{i,s}) \cdot (s+a1+a2) \cdot (\alpha_{iz} \cdot dA_{ij} \cdot a2 - U_{ij} \cdot dA_{ij} \cdot (s+a1+a2))}{a5}; \quad (5.46)$$

$$G_6(s) = \frac{\bar{T}_i(s)}{\bar{T}_{j-1}(s)} = \frac{(\bar{N}_{j-1}^L(s) \cdot C_{j-1}) \cdot (s+a1+a2) \cdot (\alpha_{iz} \cdot dA_{ij} \cdot a2 - U_{ij} \cdot dA_{ij} \cdot (s+a1+a2))}{a5}; \quad (5.47)$$

$$G_7(s) = \frac{\bar{T}_i(s)}{\bar{N}_{j+1}^V(s)} = \frac{(C_{j+1} \cdot T_{j+1,s} + B_{j+1} - C_j \cdot T_{j,s} - B_j) \cdot (s+a1+a2) \cdot (\alpha_{iz} \cdot dA_{ij} \cdot a2 - U_{ij} \cdot dA_{ij} \cdot (s+a1+a2))}{a5}; \quad (5.48)$$

$$G_8(s) = \frac{\bar{T}_i(s)}{\bar{T}_{j+1}(s)} = \frac{(\bar{N}_{j+1}^V(s) \cdot C_{j+1}) \cdot (s+a1+a2) \cdot (\alpha_{iz} \cdot dA_{ij} \cdot a2 - U_{ij} \cdot dA_{ij} \cdot (s+a1+a2))}{a5}; \quad (5.49)$$

$$G_9(s) = \frac{C_{j-1} \cdot T_{j-1,s} - C_j \cdot T_{j,s}}{N_j \cdot C_j \cdot s + \dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_j + \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_j}; \quad (5.50)$$

$$G_{10}(s) = \frac{\dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_{j-1}}{N_j \cdot C_j \cdot s + \dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_j + \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_j}; \quad (5.51)$$

$$G_{11}(s) = \frac{C_{j+1} \cdot T_{j+1,s} + B_{j+1} - C_j \cdot T_{j,s} - B_j}{N_j \cdot C_j \cdot s + \dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_j + \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_j}; \quad (5.52)$$

$$G_{12}(s) = \frac{\dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_{j+1}}{N_j \cdot C_j \cdot s + \dot{N}_{j-1,s}^L \cdot C_j + \dot{N}_{j+1,s}^V \cdot C_j}; \quad (5.53)$$

$$G_{13}(s) = \frac{\bar{T}_j(s)}{\bar{N}_{i-1}^L(s)} = \frac{((C_{i-1} \cdot T_{i-1,s} - C_i \cdot T_{i,s}) \cdot (\alpha_{jz} \cdot dA_{ij} \cdot a1 - U_{ij} \cdot dA_{ij} \cdot (s+a1+a2)) \cdot (s+a1+a2))}{a5}; \quad (5.54)$$

$$G_{14}(s) = \frac{\bar{T}_j(s)}{\bar{T}_{i-1}(s)} = \frac{((\dot{N}_{i-1,s}^L \cdot C_{i-1}) \cdot (\alpha_{jz} \cdot dA_{ij} \cdot a1 - U_{ij} \cdot dA_{ij} \cdot (s+a1+a2)) \cdot (s+a1+a2))}{a5}; \quad (5.55)$$

$$G_{15}(s) = \frac{\bar{T}_j(s)}{\bar{N}_{i+1}^V(s)} = \frac{((C_{i+1} \cdot T_{i+1,s} + B_{i+1} - C_i \cdot T_{i,s} - B_i) \cdot (\alpha_{jz} \cdot dA_{ij} \cdot a1 - U_{ij} \cdot dA_{ij} \cdot (s+a1+a2)) \cdot (s+a1+a2))}{a5}; \quad (5.56)$$

$$G_{16}(s) = \frac{\bar{T}_j(s)}{\bar{T}_{i+1}(s)} = \frac{((\dot{N}_{i+1,s}^V \cdot C_{i+1}) \cdot (\alpha_{jz} \cdot dA_{ij} \cdot a1 - U_{ij} \cdot dA_{ij} \cdot (s+a1+a2)) \cdot (s+a1+a2))}{a5}; \quad (5.57)$$

W przypadku zależności opisujących transmitancje operatorowe $G_{17}(s) \div G_{32}(s)$, nie występuję operator Laplace'a „s”. W związku z tym są to zwykłe mnożniki, które mają liniowy wpływ na sygnały.

$$\begin{aligned}
 G_{17}(s) &= \frac{\bar{N}_i^L(s)}{\bar{N}_{i-1}^L(s)}; & G_{18}(s) &= \frac{\bar{N}_i^L(s)}{\bar{T}_i(s)}; & G_{19}(s) &= \frac{\bar{N}_i^L(s)}{\bar{T}_j(s)}; & G_{20}(s) &= \frac{\bar{N}_i^V(s)}{\bar{N}_{i+1}^V(s)}; \\
 G_{21}(s) &= \frac{\bar{N}_i^V(s)}{\bar{T}_i(s)}; & G_{22}(s) &= \frac{\bar{N}_i^V(s)}{\bar{T}_j(s)}; & G_{23}(s) &= \frac{\bar{N}_j^L(s)}{\bar{N}_{j-1}^L(s)}; & G_{24}(s) &= \frac{\bar{N}_j^V(s)}{\bar{T}_i(s)}; \\
 G_{25}(s) &= \frac{\bar{N}_j^L(s)}{\bar{T}_j(s)}; & G_{26}(s) &= \frac{\bar{N}_j^V(s)}{\bar{N}_{j+1}^L(s)}; & G_{27}(s) &= \frac{\bar{N}_j^V(s)}{\bar{T}_i(s)}; & G_{28}(s) &= \frac{\bar{N}_j^V(s)}{\bar{T}_j(s)}; \\
 G_{29}(s) &= \frac{\bar{N}_i^L(s)}{\bar{P}_i(s)}; & G_{30}(s) &= \frac{\bar{T}_i(s)}{\bar{P}_i(s)}; & G_{31}(s) &= \frac{\bar{N}_i^L(s)}{\bar{P}_j(s)}; & G_{32}(s) &= \frac{\bar{T}_j(s)}{\bar{P}_j(s)};
 \end{aligned}$$

Przedstawione powyżej mnożniki od $G_{17}(s)$ do $G_{32}(s)$ uzyskano z układu równań (5.15 ÷ 5.18), który opisuje bilans masy.

$$G_{17}(s) = 1;$$

$$G_{18}(s) = \frac{U_{ij} \cdot dA_{i,j}}{B_i};$$

$$G_{19}(s) = \frac{-U_{ij} \cdot dA_{i,j}}{B_i};$$

$$G_{20}(s) = 1;$$

$$G_{21}(s) = \frac{-U_{ij} \cdot dA_{i,j}}{B_i};$$

$$G_{22}(s) = \frac{U_{ij} \cdot dA_{i,j}}{B_i};$$

$$G_{23}(s) = 1;$$

$$G_{24}(s) = \frac{-U_{ij} \cdot dA_{i,j}}{B_j};$$

$$G_{25}(s) = \frac{U_{ij} \cdot dA_{i,j}}{B_j};$$

$$G_{26}(s) = 1;$$

$$G_{27}(s) = \frac{U_{ij} \cdot dA_{i,j}}{B_j};$$

$$G_{28}(s) = \frac{-U_{ij} \cdot dA_{i,j}}{B_j};$$

Zależności wyrażające transmitancje operatorowe $G_{29}(s) \div G_{32}(s)$ powstały na podstawie układu równań 5.30:

$$G_{29}(s) = \frac{N_i \cdot C_i \cdot D_i}{B_i \cdot \tau};$$

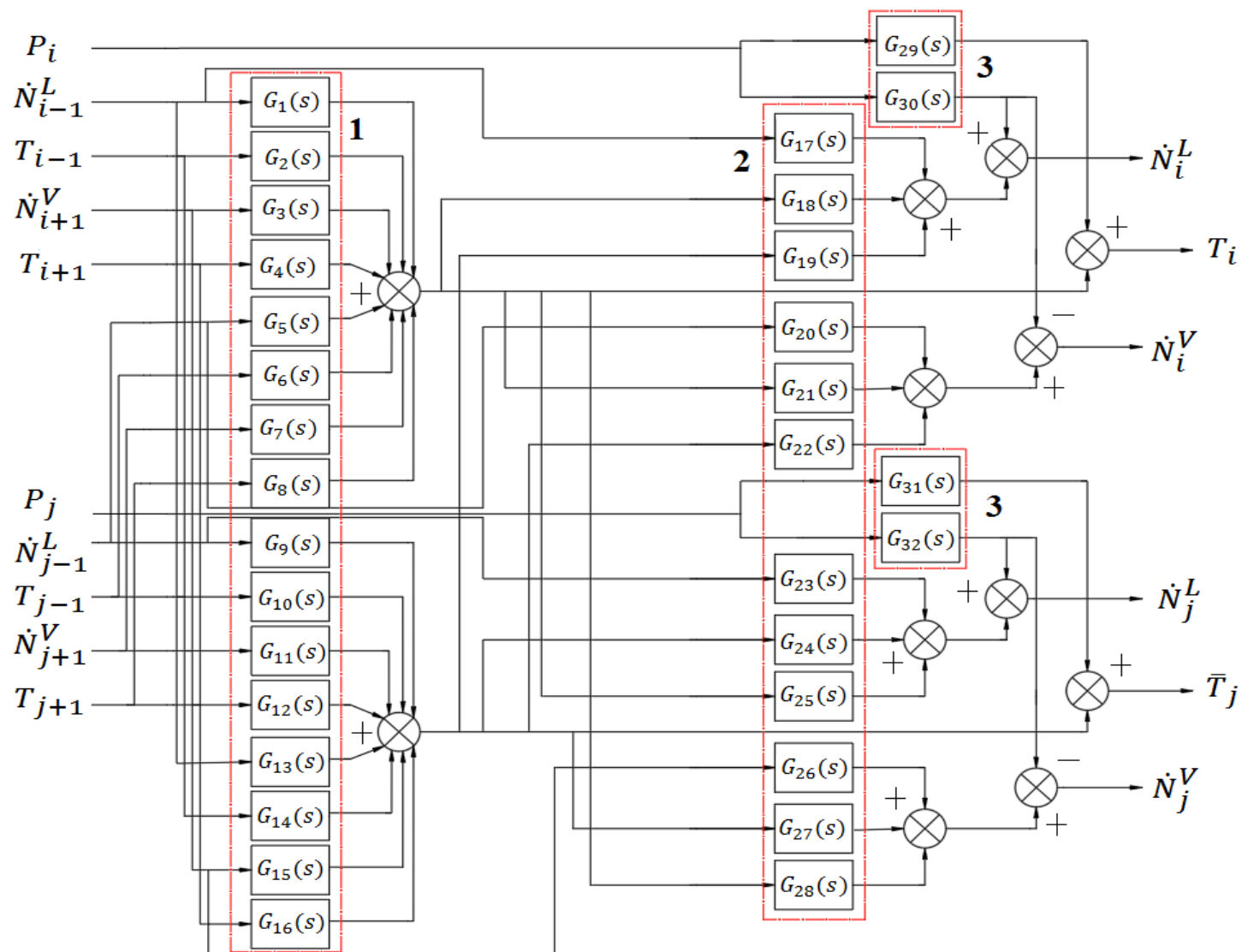
$$G_{30}(s) = D_i;$$

$$G_{31}(s) = \frac{N_j \cdot C_j \cdot D_j}{B_j \cdot \tau};$$

$$G_{32}(s) = D_j;$$

5.5. Schemat blokowy wymiennika H&MPE

Model dynamiki wymiennika H&MPE zbudowany został w oparciu o wyodrębnione sygnały wartości wpływających i wypływających z aparatu. Model dwóch sąsiednich sekcji „i” oraz „j” przedstawiony został na rys. 5.3. Jako pierwsze określono oddziaływania związane z wymianą energii (blok nr 1 na rys 5.3), które reprezentują transmitancje od G1 do G16. Wymianę masy reprezentują transmitancje od G17 do G28 (blok nr 2 na rys 5.3). Ostatecznie uwzględniono wpływ ciśnienia na dynamikę aparatu - transmitancje od G29 do G32 (blok nr 3 na rys 5.3). Sygnały wychodzące z danej sekcji, stają się sygnałami wejściowymi do kolejnych sekcji.

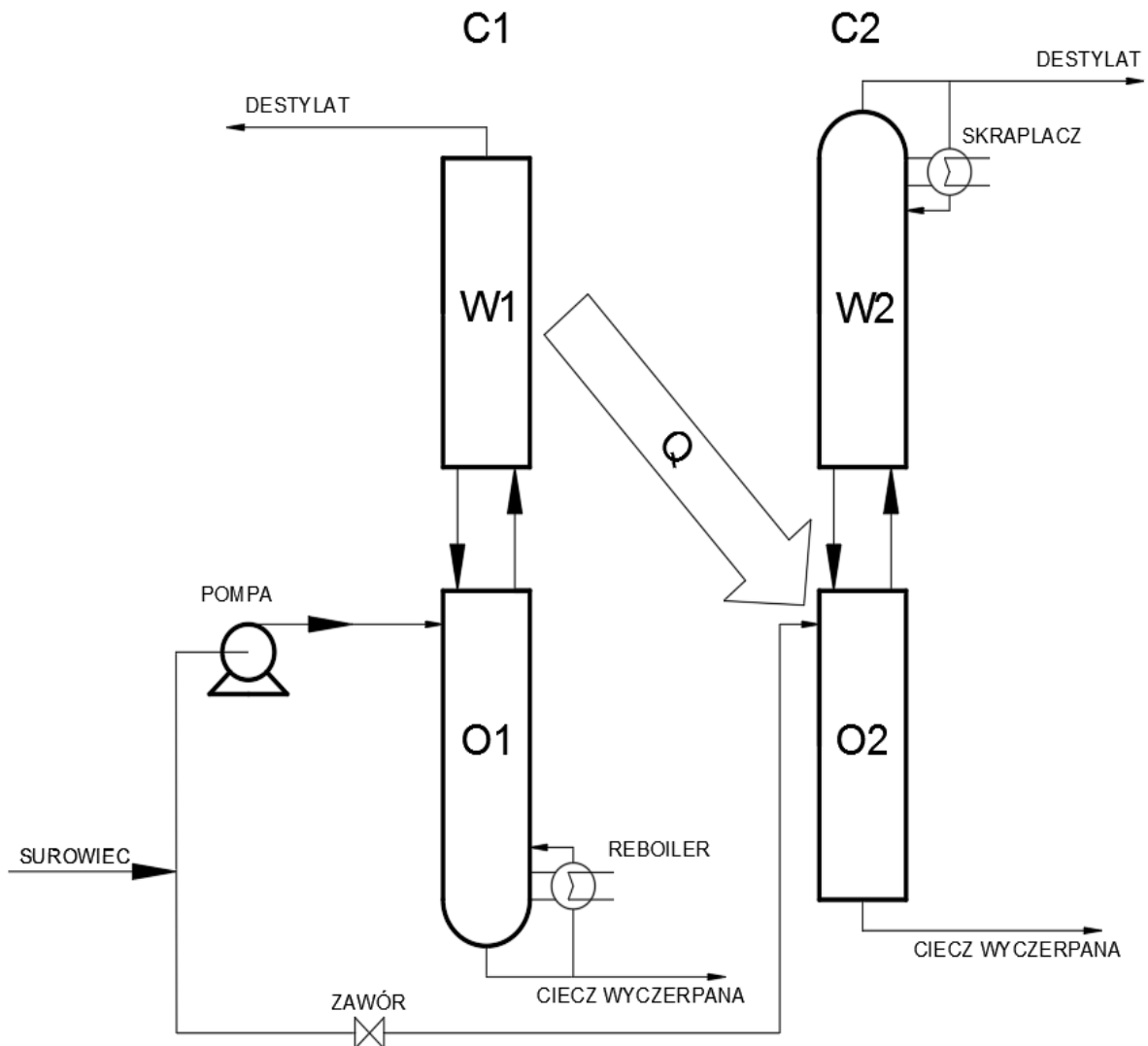


Rys. 5.3. Schemat blokowy dla sąsiednich sekcji „i” oraz „j” wymiennika H&MPE

6. Dynamika wymiennika H&MPE na przykładzie rozdziału termicznego mieszaniny propan-butan

6.1. Określanie bazy danych parametrów termodynamicznych, właściwości fizykochemicznych substancji oraz geometrii aparatu w stanie ustalonym

Poprzez odrębne podejście do części wzmacniającej i odpędowej w obrębie kolumn C1 i C2, przewiduje się budowę części wzmacniającej W1 i odpędowej O2 wg nowej technologii. Dalej zakłada się sprzężenie cieplne wymienionych części do postaci aparatu o konstrukcji kanałowej w celu przekazania strumienia ciepła Q .



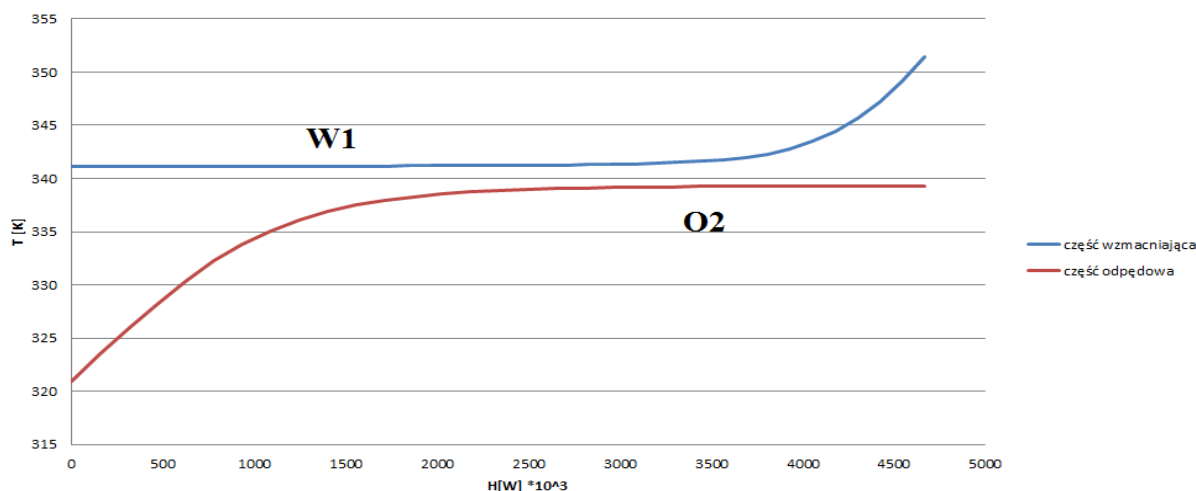
Rys. 6.1. Rozbudowany schemat nowej technologii do termicznego rozdzielania substancji [77]

Dla rozważanego przykładu wybrano rozdział mieszaniny dwuskładnikowej propan – butan o następujących parametrach wejściowych:

- strumień molowy: 1000 kmol/h,
- ułamek molowy składników w surowcu: 0.45 propan, 0.55 butan,
- ułamek molowy składników w destylacie: propan 0.99, butan 0.01,
- ułamek molowy składników w cieczy wyczerpanej: propan 0.01, butan 0.99,
- surowiec wpływa do układu w fazie ciekłej, w stanie nasycenia,
- temperatura otoczenia 25°C,
- temperatura wody chłodzącej wlot/wylot: 25/35°C,
- ciśnienie w kolumnie C1 – 2500 kPa,
- ciśnienie w kolumnie C2 – 1000 kPa,
- w obliczeniach związanych z przepływem wymianą ciepła przyjęto, że minimalna różnica temperatur pomiędzy czynnikami wynosi 3K.
- założono czas odparowania cieczy (skraplania oparów) $\tau = 6$ s [44].

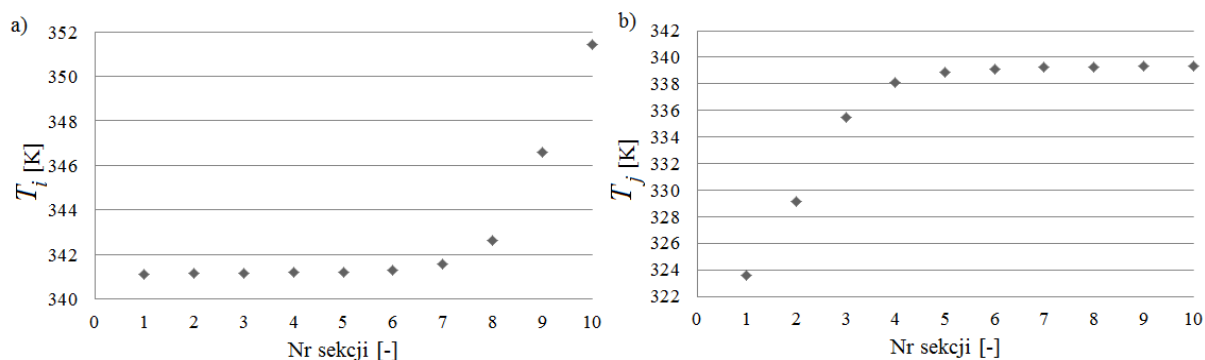
6.2. Akwizycja danych dla parametrów procesowych

W wyniku rozwiązania układu równań 4.1 ÷ 4.5, dla danych obliczeniowych z rozdziału 6.1, otrzymano rzeczywiste profile części wzmacniającej i odpędowej (rys. 6.1) oraz wartości poszczególnych parametrów intensywnych i ekstensywnych (rys. 6.3 ÷ 6.18) w poszczególnych stopniach kontaktu.



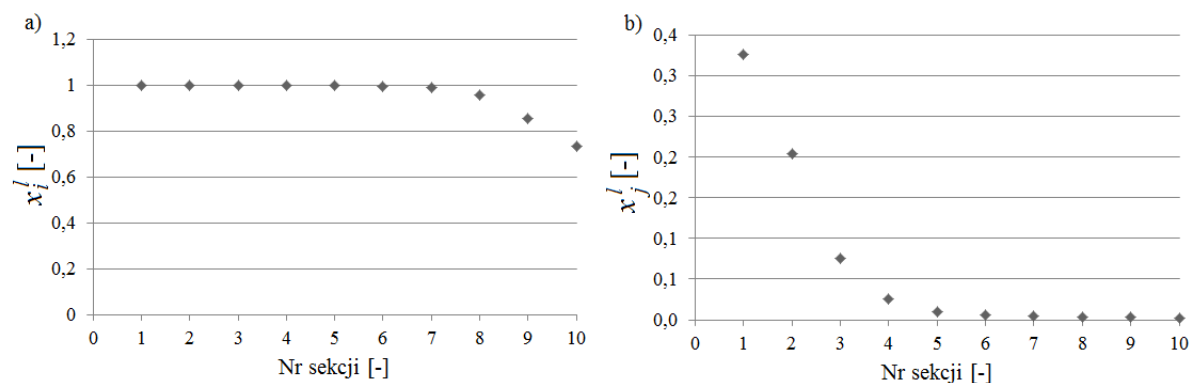
Rys. 6.2. Profile kolumny dla wzmacniającej i odpędowej na wykresie T – H

Temperatura cieczy i oparów



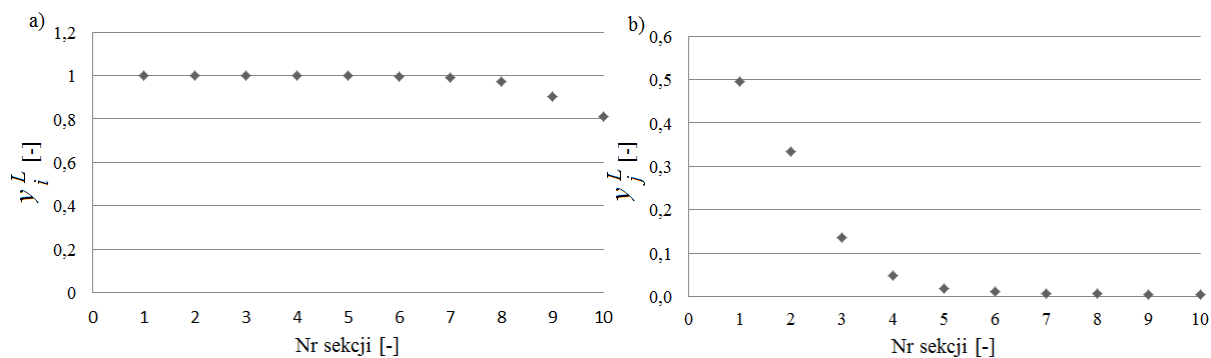
Rys. 6.3. Temperatura cieczy i oparów w zależności od sekcji kanału (rys. 5.2): a) dla części wzmacniającej, b) dla części odpędowej

Ułamek molowy lżejszego składnika w cieczy



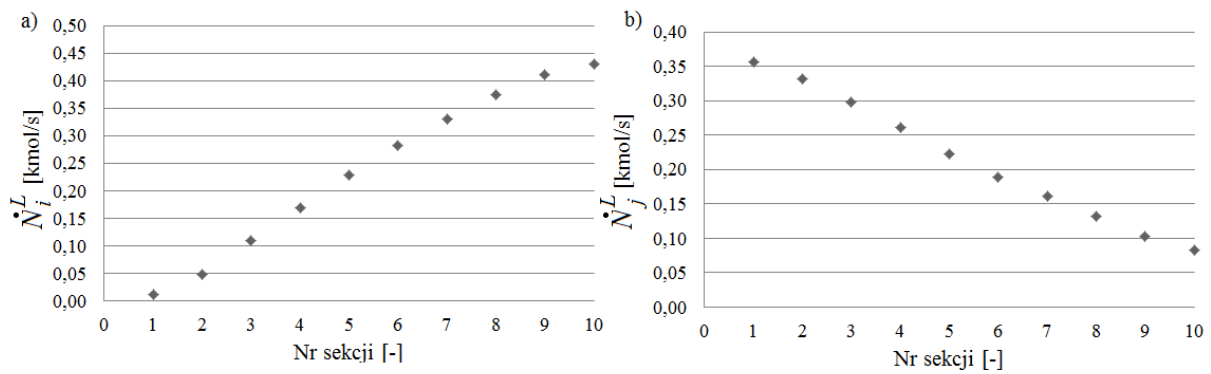
Rys. 6.4. Ułamek molowy lżejszego składnika w cieczy w zależności od sekcji kanału (rys. 5.2): a) dla części wzmacniającej, b) dla części odpędowej

Ułamek molowy lżejszego składnika w oparach



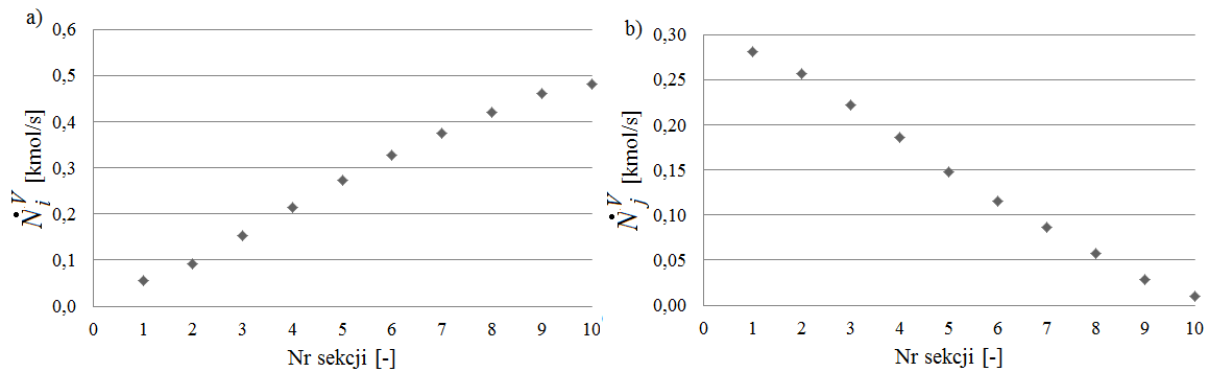
Rys. 6.5. Ułamek molowy lżejszego składnika w oparach w zależności od sekcji kanału (rys. 5.2): a) dla części wzmacniającej, b) dla części odpędowej

Strumień molowy cieczy



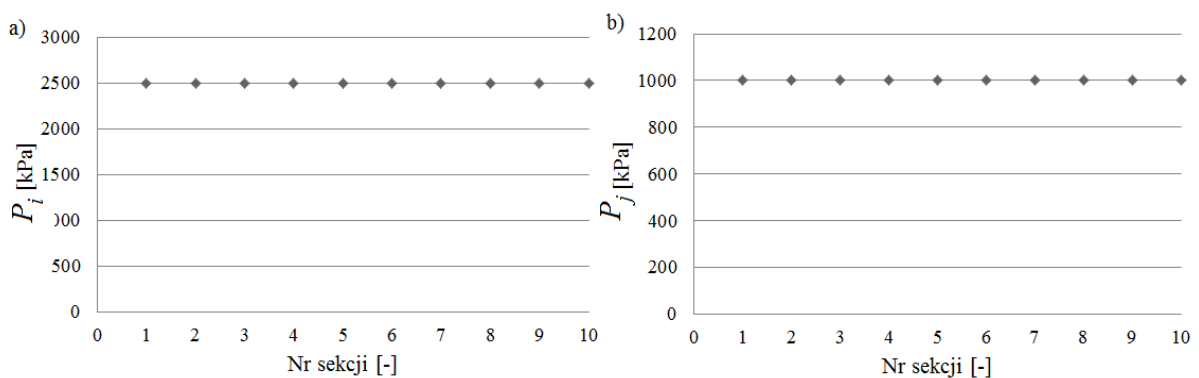
Rys. 6.6. Strumień molowy cieczy w zależności od sekcji kanału (rys. 5.2): a) dla części wzmacniającej, b) dla części odpędowej

Strumień molowy oparów



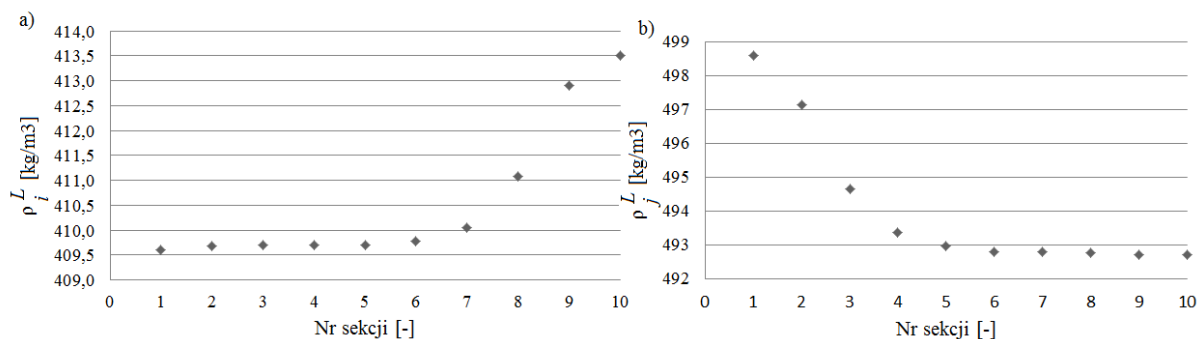
Rys. 6.7. Strumień molowy oparów w zależności od sekcji kanału (rys. 5.2): a) dla części wzmacniającej, b) dla części odpędowej

Rozkład ciśnienia

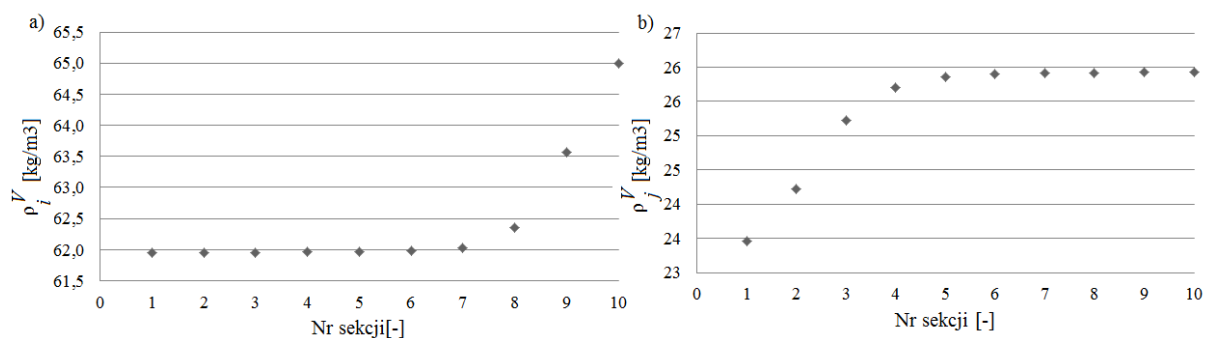


Rys. 6.8. Rozkład ciśnienia w zależności od sekcji kanału (rys. 5.2): a) dla części wzmacniającej, b) dla części odpędowej

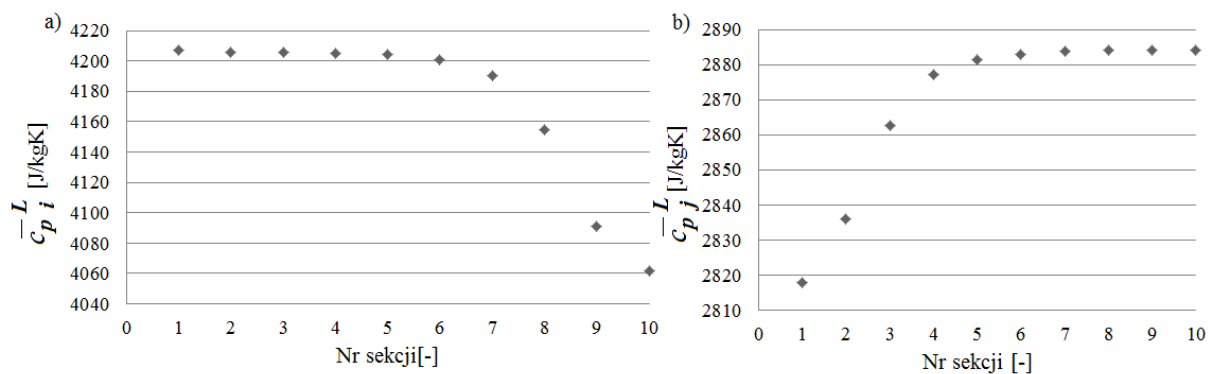
Na podstawie składu cieczy i oparów, temperatury i ciśnienia w poszczególnych stopniach mieszania - określono właściwości substancji. Wyniki zaprezentowane zostały na wykresach poniżej [rys. 6.9 ÷ 6.18].



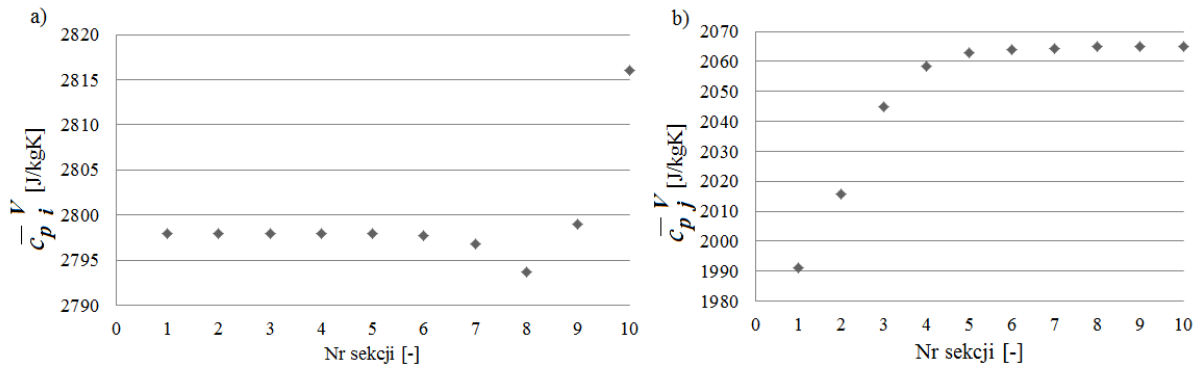
Rys. 6.9. Rozkład gęstości cieczy w zależności od sekcji kanału (rys. 5.2): a) dla części wzmacniającej, b) dla części odpędowej



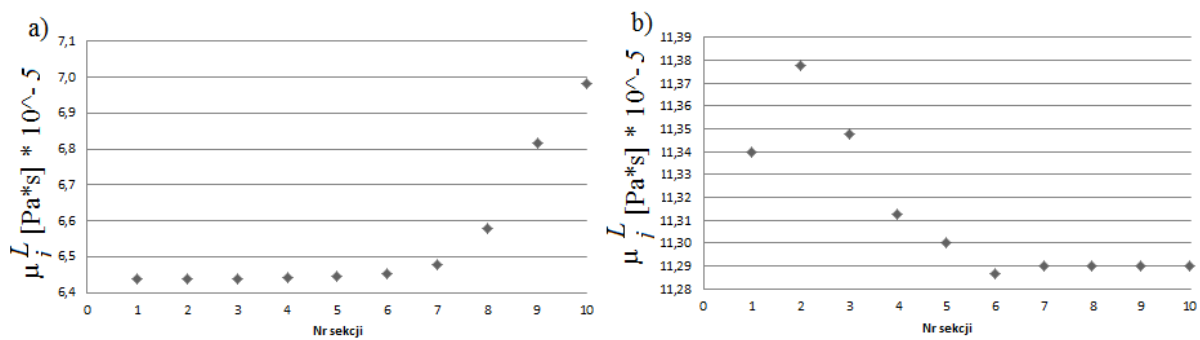
Rys. 6.10. Rozkład gęstości oparów w zależności od sekcji kanału (rys. 5.2): a) dla części wzmacniającej, b) dla części odpędowej



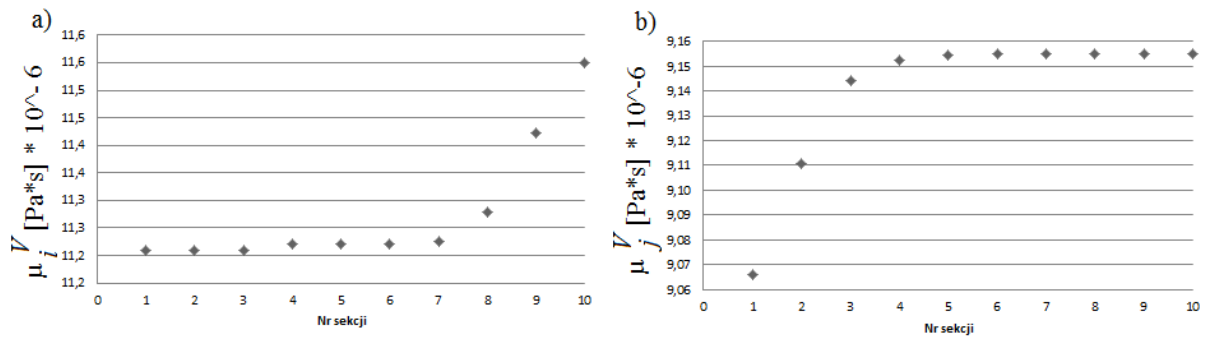
Rys. 6.11. Ciepło właściwe cieczy w zależności od sekcji kanału (rys. 5.2): a) dla części wzmacniającej, b) dla części odpędowej



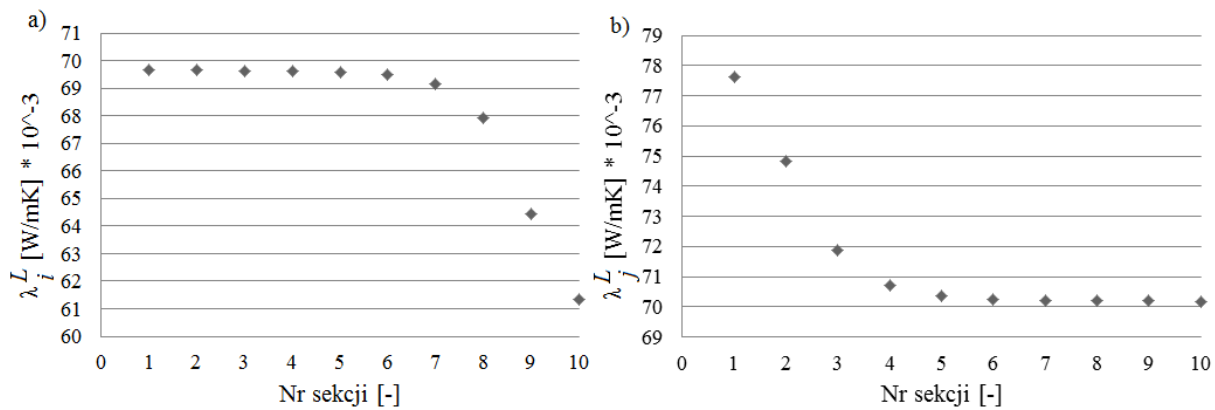
Rys. 6.12. Ciepło właściwe oparów w zależności od sekcji kanału (rys. 5.2): a) dla części wzmacniającej, b) dla części odpędowej



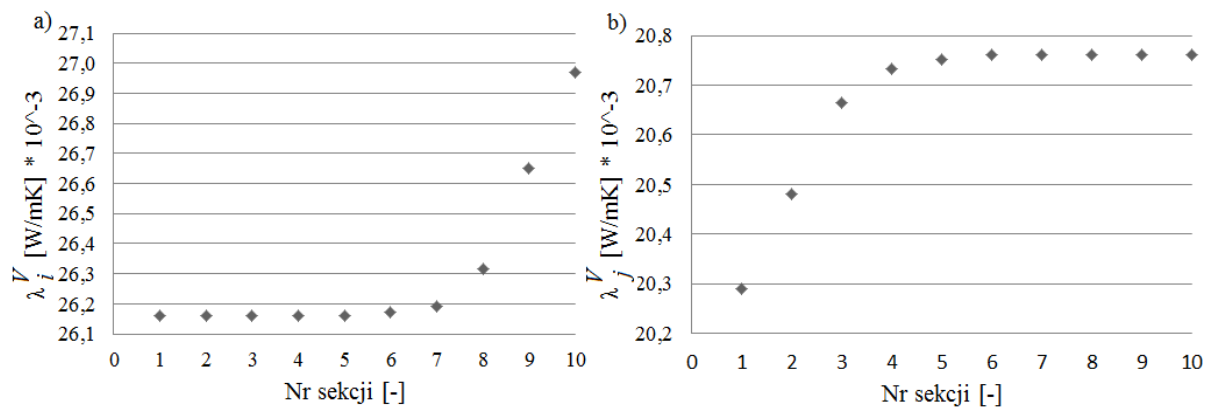
Rys. 6.13. Lepkość cieczy w zależności od sekcji kanału (rys. 5.2): a) dla części wzmacniającej, b) dla części odpędowej



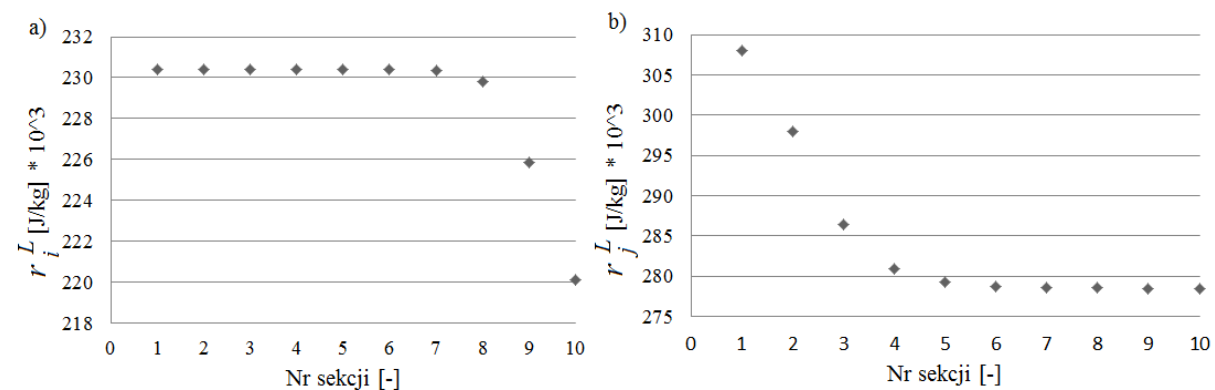
Rys. 6.14. Lepkość oparów w zależności od sekcji kanału (rys. 5.2): a) dla części wzmacniającej, b) dla części odpędowej



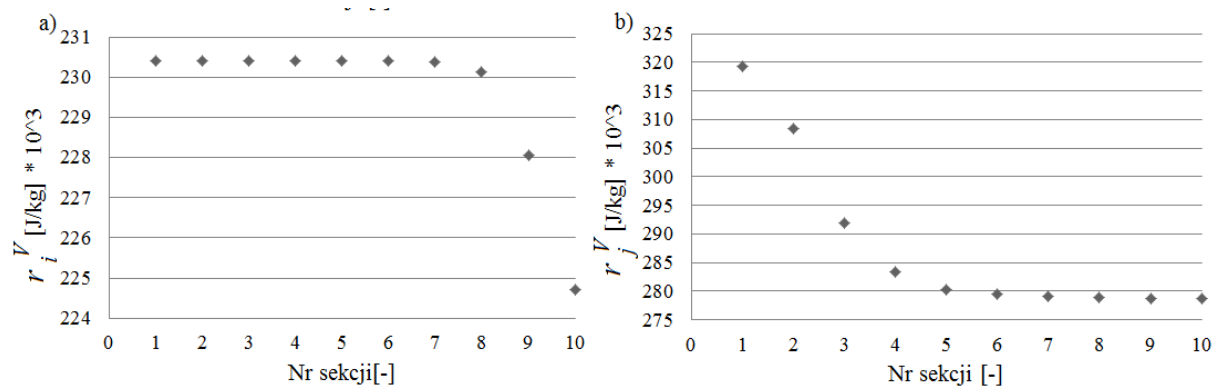
Rys. 6.15. Przewodność cieplna dla cieczy w zależności od sekcji kanału (rys. 5.2): a) dla części wzmacniającej, b) dla części odpędowej



Rys. 6.16. Przewodność cieplna dla oparów w zależności od sekcji kanału (rys. 5.2): a) dla części wzmacniającej, b) dla części odpędowej



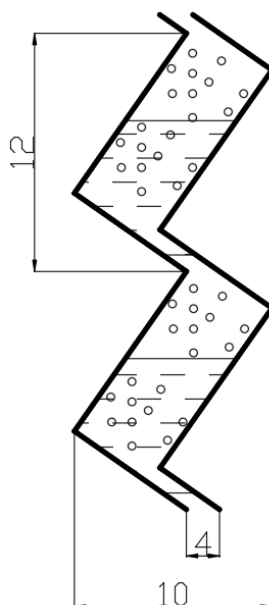
Rys. 6.17. Ciepło parowania dla cieczy w zależności od sekcji kanału (rys. 5.2): a) dla części wzmacniającej, b) dla części odpędowej



Rys. 6.18. Ciepło skraplania dla oparów w zależności od sekcji kanału (rys. 5.2): a) dla części wzmacniającej, b) dla części odpędowej

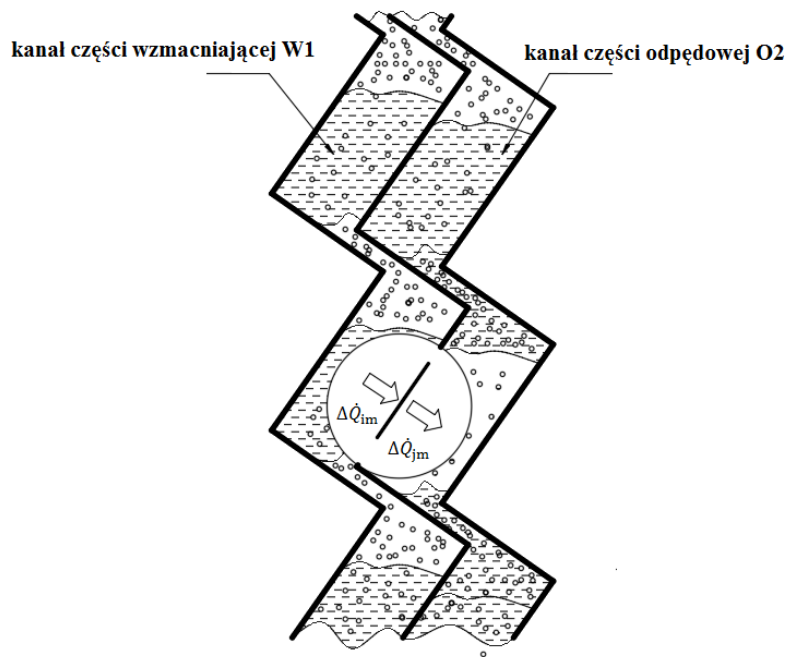
6.3. Określenie parametrów geometrycznych wymiennika H&MPE

Przyjęte w pracy parametry geometryczne kanału przedstawiono na rys. 6.19. Założona geometria kanału dotyczy części odpędowej oraz wzmacniającej (rys. 6.20).



Rys. 6.19 Geometria kanału wymiennika H&MPE

Analogicznie jak w kolumnie CDiC, w poszczególnych kanałach dochodzi do przeciwprądowej wymiany ciepła i masy pomiędzy cieczą i oparami (rys. 6.19).



Rys. 6.20 Schemat kanałów wymiennika H&MPE

Powierzchnię wymiany ciepła wymiennika H&MPE wyznaczono na podstawie równania 4.4. Występująca w równaniu różnica temperatury pomiędzy częścią wzmacniającą a odpędową wymiennika H&MPE została wyznaczona z wykorzystaniem profili kolumny z rys. 6.2. Przyjęto następujące korelacje opisujące współczynniki przejmowania ciepła [45]:

- W przypadku wrzenia cieczy:

$$\alpha_j = \alpha_c \left[\left(\frac{Pr_c + 1}{2} \right) (\phi_c^2) \right]^{2 \left(\frac{\rho_p}{\rho_c} \right)^{0,25}} \quad (5.1)$$

- W przypadku skraplania oparów:

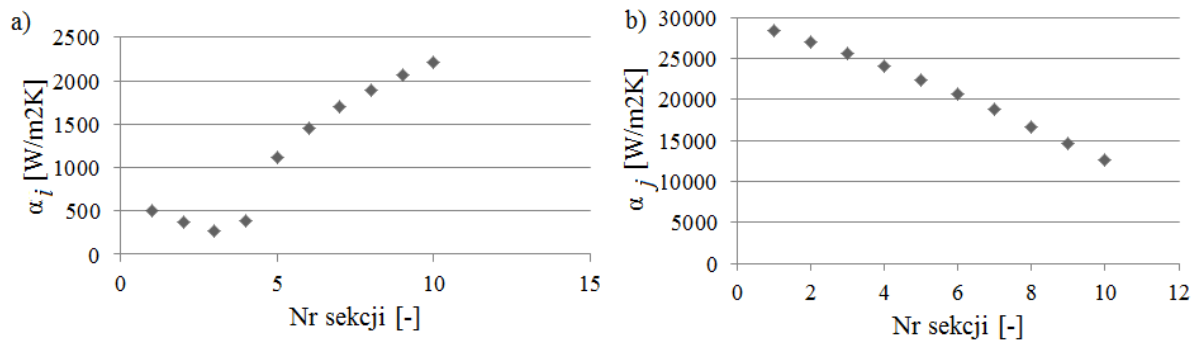
$$\alpha_i = a \cdot \lambda_c \cdot \left[\frac{\rho_c(\rho_c - \rho_p)g}{\mu_c^2} \right]^b \cdot Re_c^c \cdot Pr_c^d \quad (5.2)$$

Uwzględniając charakter przepływu:

- laminarny: $a = 1$; $b = 0.27$; $c = -0.33$; $d = 0$;
- turbulentny: $a = 0.02$; $b = 0.33$; $c = 0.35$; $d = 0.33$;

Wykorzystując równania (5.1 ÷ 5.2) wyznaczono współczynniki przejmowania ciepła dla przyjętej geometrii kanału z rys. 6.19.

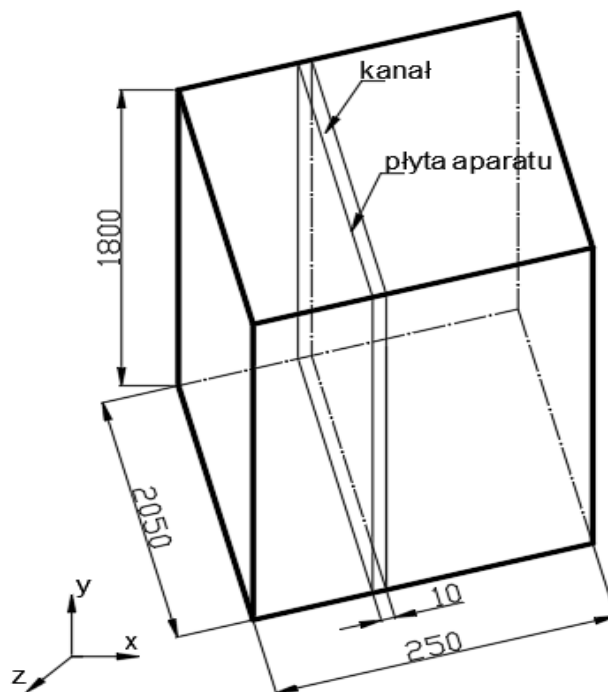
Współczynnik przejmowania ciepła



Rys. 6.21. Współczynnik przejmowania ciepła w zależności od sekcji kanału (rys. 5.2): a) dla części wzmacniającej, b) dla części odpędowej

Parametry wymiennika H&MPE:

- 1273,1 m² – całkowita powierzchnia wymiany ciepła;
- 1,8 m x 2,05 m – wymiary pojedynczej płyty aparatu;
- 248 – liczba płyt.
- 150 stopni kontaktu – liczba stopni intensywnego mieszania oparów i cieczy.



Rys. 6.22. Wymiary wymiennika H&MPE; wymiennik przedstawiono w sposób uproszczony w postaci prostopadłościanu, a płytę aparatu jako figurę płaską – rzeczywistą geometrię płyty przedstawia rys. 6.19

Rozwiązując układ równań (4.1 ÷ 4.3) wyznaczono liczbę stopni kontaktu cieczy i oparów, niezbędną do rozdziału mieszaniny propan – butan, która wynosi 33. Natomiast dla wyznaczonej geometrii płyty wymiennika H&MPE, rzeczywista liczba stopni kontaktu cieczy i oparów wynosi 150. Oznacza to, że zdolność rozdzielcza aparatu jest spełniona, pod kątem rozdziału substancji o założonej czystości zakładając, że sprawność ogólna aparatu jest nie mniejsza niż $\frac{33}{150} \cdot 100 = 22 \%$.

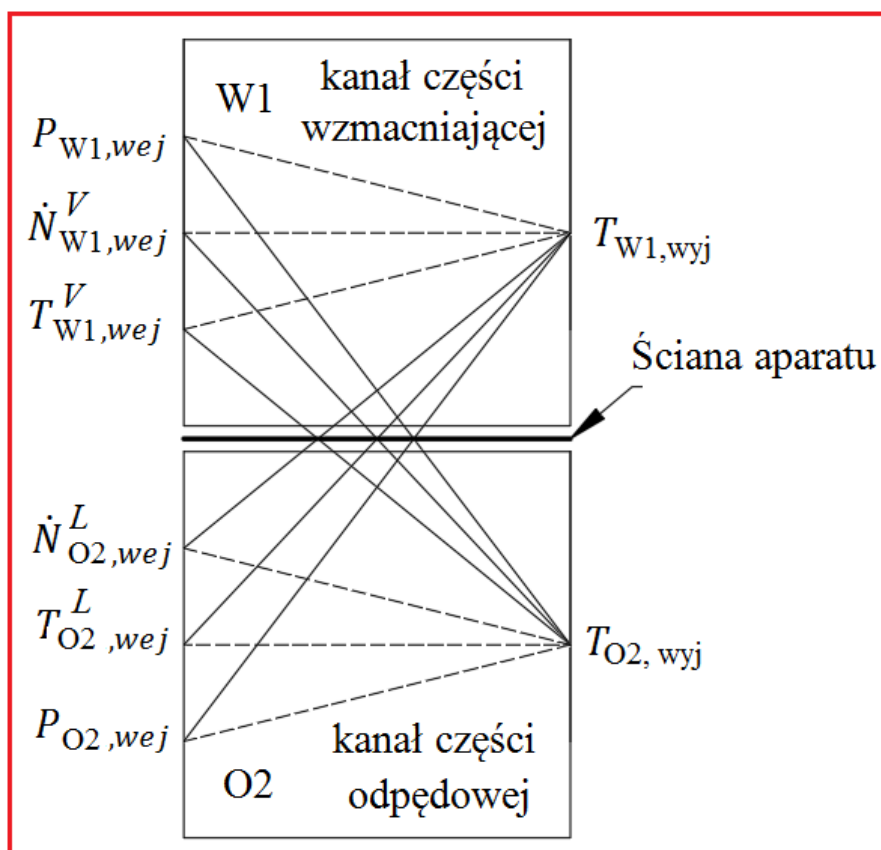
7. Wykorzystanie modelu matematycznego wymiennika H&MPE do analizy jego pracy w warunkach nieustalonych

Analiza literatury przedmiotu, dowodzi, że jednym ze sposobów identyfikacji własności dynamicznych obiektów jest przedstawienie charakterystyk, tzn. krzywych, które przedstawiają trajektorie sygnału wyjściowego będącego odpowiedzią na zadaną zmianę skokową sygnału wejściowego. Wykorzystując opracowany model dynamiki (schemat blokowy - rys. 5.4) w niniejszym rozdziale przeprowadzono szereg symulacji. Wyodrębniono następujące sygnały wejściowe do wymiennika H&MPE:

- strumień molowy oparów wpływających z części odpędowej O1 do wzmacniającej W1 (rys. 5.2): $\dot{N}_{W1; wej}^V$
- temperatura oparów wpływających z części odpędowej O1 do wzmacniającej W1 $\dot{T}_{W1; wej}^V$,
- strumień molowy cieczy wpływającej z części wzmacniającej W2 do odpędowej O2 (rys. 5.2): $\dot{N}_{O2; wej}^L$,
- temperatura cieczy wpływającej z części wzmacniającej W2 do odpędowej O2 $\dot{T}_{O2; wej}^L$,
- ciśnienie w części odpędowej: $P_{O2; wej}$
- ciśnienie w część wzmacniającej: $P_{W1; wej}$.

Przyjęte sygnały wyjściowe z wymiennika H&MPE:

- temperatura czynnika na wylocie z części wzmacniającej W1: $T_{W1; wyj}$,
- temperatura czynnika na wylocie z części odpędowej O2: $T_{O2; wyj}$.



Rys. 7.1. Schemat blokowy objaśniający powiązania między sygnałami wejściowymi i wyjściowymi dla części wzmacniającej W1 oraz odpędowej O2 (rys. 4.4) dla aparatu H&MPE

W pracy przedstawiono analizę wpływu wybranych parametrów procesowych na zachowanie wymiennika H&MPE w stanie dynamicznym. Jednym z nich jest parametr (β), określający procentową zawartość cieczy w danej sekcji.

W rozdziale 7.1 przedstawiono charakterystyki dynamiczne dla kilku wybranych wartości parametru β :

- 5%,
- 10%,
- 20%,
- 30%.

Kolejny założony w pracy parametr to opór cieplny osadów narastających na powierzchni wymiany ciepła.

Symulacje dynamiczne wykonano w ograniczonym zakresie, wokół punktu pracy aparatu (wyznaczonego przez parametry termodynamiczne układu w stanie ustalonym –

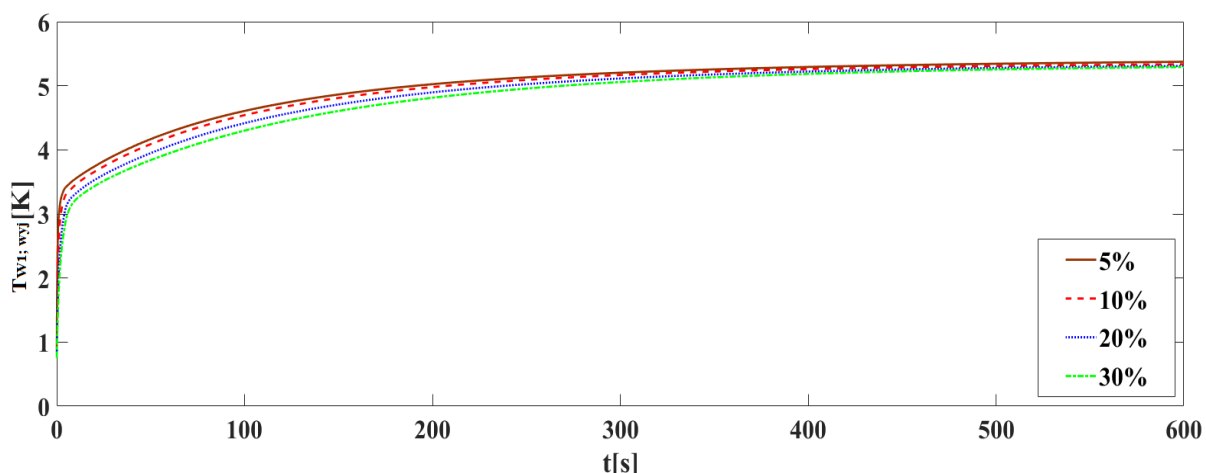
parametry termodynamiczne wyznaczono w rozdziale 6), przy zmianie skokowej sygnału wejściowego o 1, 5 lub 10% jego wartości w stanie ustalonym.

7.1. Analiza wrażliwości aparatu na stopień wypełnienia cieczą

W poniższym rozdziale zaprezentowano analizę ilościową i jakościową wybranych charakterystyk dynamicznych odpowiedzi aparatu na zakłócenia w zależności od parametru β .

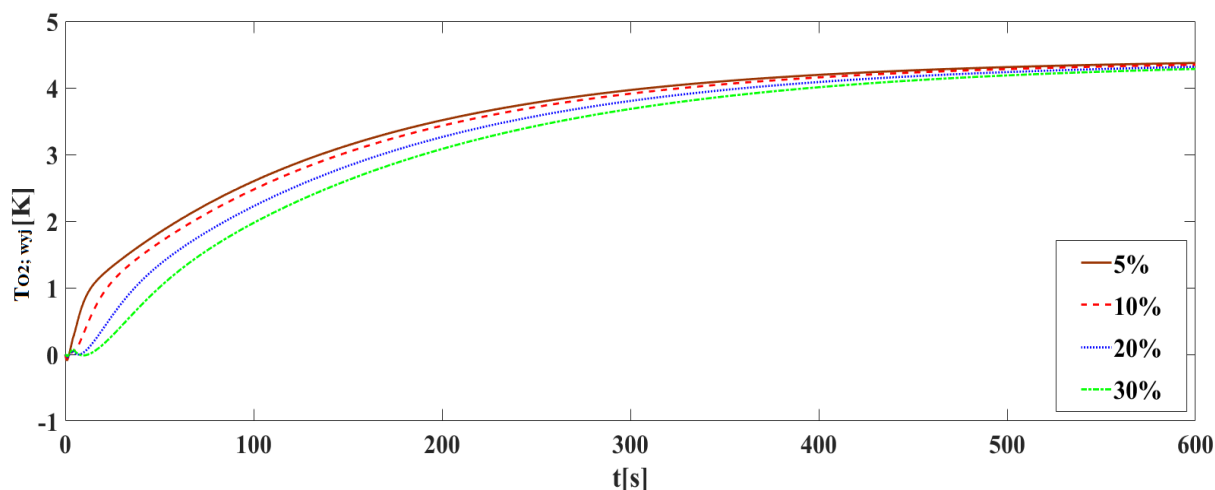
Zakłócenie w postaci zmiany ciśnienia w części wzmacniającej aparatu

W celu przeprowadzenia symulacji zmienione zostało ciśnienie panujące w kanale części wzmacniającej. Zmiana ma charakter skoku wartość sygnału $T_{W1,wyj}$ o 1% od wartości stanu ustalonego. Na rys. 7.2 został przedstawiony przebieg odpowiedzi sygnału $T_{W1,wyj}$. Przebieg zmiany obserwowany jest dla 4 wartości parametru β .



Rys. 7.2. Symulacja przebiegu odpowiedzi sygnału $T_{W1,wyj}$ na 1% zmianę ciśnienia $P_{W1,wej}$ (rys. 7.1) w zależności od parametru β

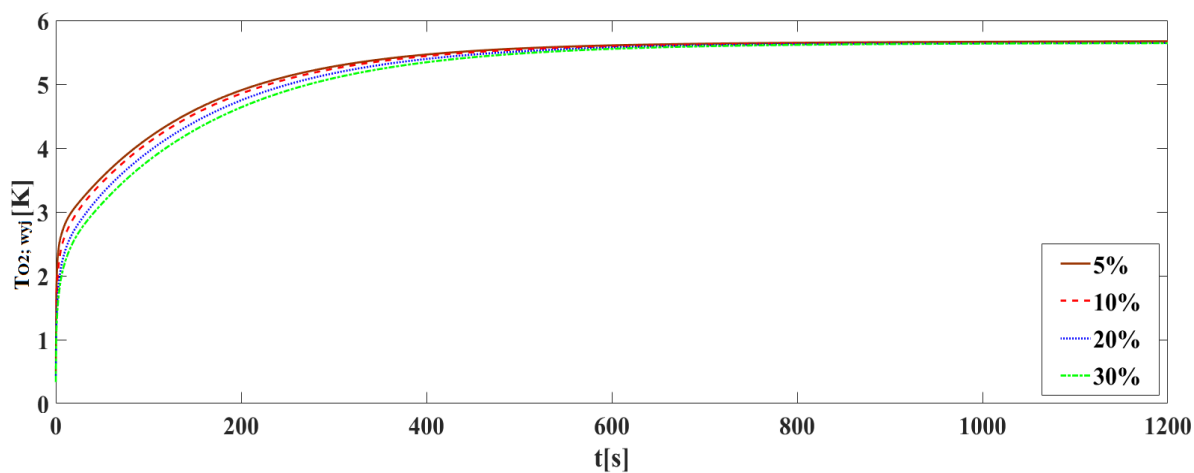
Aby przeprowadzić symulację zmienione zostało ciśnienie panujące w kanale części wzmacniającej. Zmiana ma charakter skoku wartość sygnału $P_{W1,wej}$ o 1% od wartości stanu ustalonego. Na rys. 7.3 został przedstawiony przebieg odpowiedzi sygnału $T_{O2,wyj}$. Przebieg zmiany obserwowany jest dla 4 wartości parametru β .



Rys. 7.3. Symulacja przebiegu odpowiedzi sygnału $T_{O_2;wyj}$ na 1% zmianę sygnału $P_{W1;wej}$ (rys. 7.1) w zależności od parametru β

Zakłócenie w postaci zmiany ciśnienia w części odpędowej aparatu

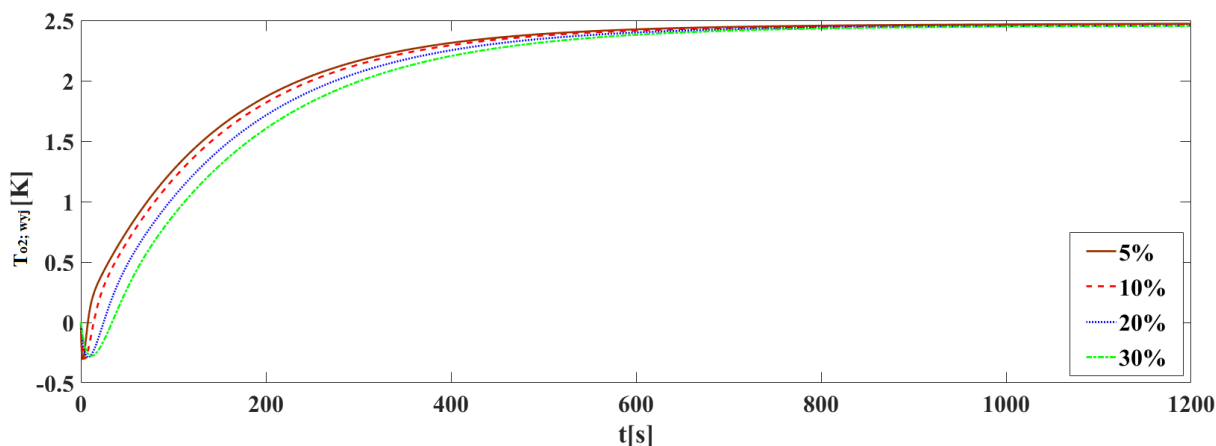
W celu przeprowadzenia symulacji zmienione zostało ciśnienie panujące w kanale części odpędowej. Zmiana ma charakter skoku wartość sygnału $P_{O_2;wej}$ o 1% od wartości stanu ustalonego. Na rys. 7.4 został przedstawiony przebieg odpowiedzi sygnału $T_{O_2;wyj}$. Przebieg zmiany obserwowany jest dla 4 wartości parametru β .



Rys. 7.4. Symulacja przebiegu odpowiedzi sygnału $T_{O_2;wyj}$ na 1% zmianę sygnału $P_{O_2;wej}$ (rys. 7.1) w zależności od parametru β

Zakłócenie w postaci zmiany strumienia masowego oparów wpływających do części wzmacnianej

Dla przeprowadzonej symulacji wprowadzone zostało zakłócenie w postaci zmiany wartości sygnału $\dot{N}_{W1; wej}^V$ o 10% w stosunku do wartości dla stanu ustalonego pracy aparatu. Na rys. 7.5 został przedstawiony przebieg odpowiedzi sygnału $T_{O2; wyj}$. Przebieg zmiany obserwowany jest dla 4 wartości parametru β .



Rys. 7.5. Symulacja przebiegu odpowiedzi sygnału $T_{O2; wyj}$ na 10% zmianę sygnału $\dot{N}_{W1; wej}^V$ (rys. 7.1) w zależności od parametru β

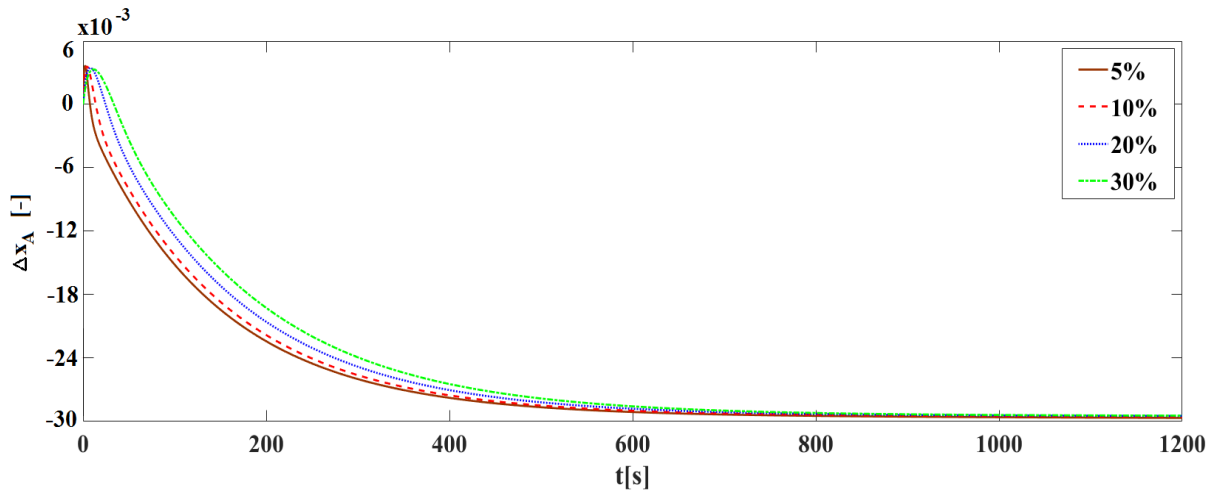
W jaki sposób z poszczególnych charakterystyk (rys. 7.5 ÷ 7.8) zostały wyciągnięte wskaźniki jakości dynamicznej, zaprezentowany został w rozdziale 2.3.3.

Tabela 7.1 prezentuje wskaźniki oceny charakterystyk dynamicznych przedstawionych na rys. 7.5.

Tab. 7.1. Tabela oceny jakościowej charakterystyk dynamicznych z rys. 7.5

Wypełnienie cieczą sekcji - β [%]	Współczynnik wzmacniania – K [Ks/kmol]	Stała czasowa – T [s]	Czas opóźnienia - t_{oz} [s]
5%	12666	48.3	2.2
10%	12615	78.25	4.25
20%	12564	146.5	6
30%	12564	179.3	10.2

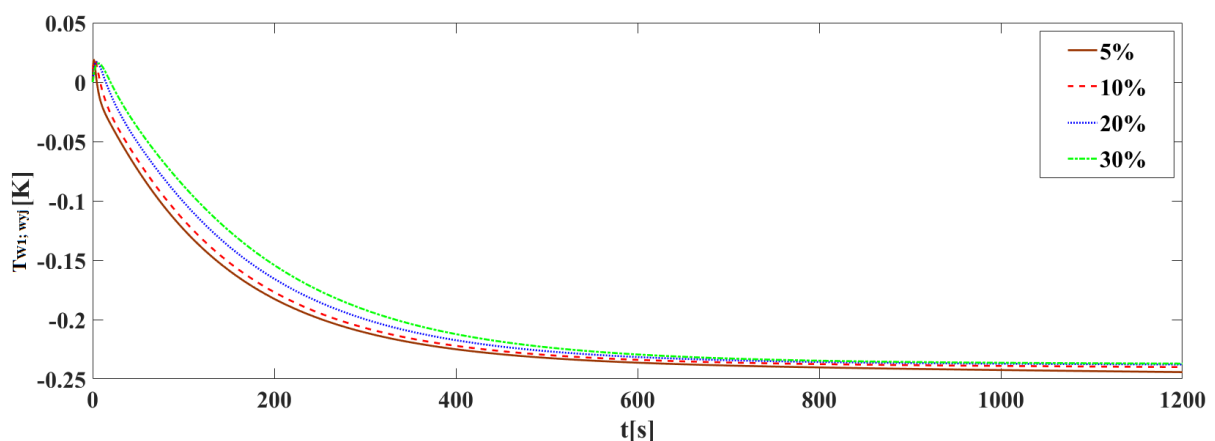
Wykres 7.6 przedstawia zmianę zawartości propanu w cieczy wyczerpanej w odpowiedzi na 10% zmianę wartości sygnału $\dot{N}_{W1; wej}^V$ (rys. 7.1) w zależności od 4 wartości parametru β .



Rys. 7.6. Zmiana zawartości propanu w cieczy wyczerpanej w odpowiedzi na 10% zmianę sygnału $\dot{N}_{W1; wej}^V$ (rys. 7.1) w zależności od parametru β

Zakłócenie w postaci zmiany strumienia masowego cieczy wpływającej do części odpędowej

Dla przeprowadzonej symulacji wprowadzone zostało zakłócenie w postaci zmiany wartości sygnału $\dot{N}_{O2; wej}^L$ o 5% w stosunku do wartości dla stanu ustalonego pracy aparatu. Na rys. 7.7 został przedstawiony przebieg odpowiedzi sygnału $T_{W1; wyj}$. Przebieg zmiany obserwowany jest dla 4 wartości parametru β .



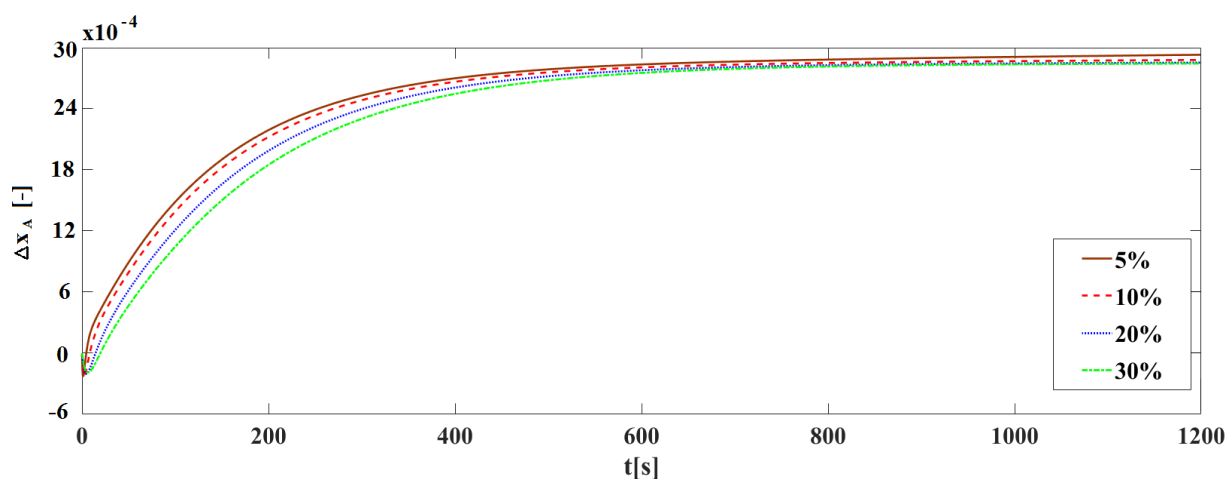
Rys. 7.7. Symulacja przebiegu odpowiedzi sygnału $T_{W1; wyj}$ na 5% zmianę sygnału (rys. 7.1) $\dot{N}_{O2; wej}^L$ w zależności od parametru β

Tabela 7.2 prezentuje wskaźniki oceny charakterystyk dynamicznych przedstawionych na rys. 7.5.

Tab. 7.2. Tabela oceny jakościowej charakterystyk dynamicznych z rys. 7.7

Wypełnienie cieczą sekcji - β [%]	Współczynnik wzmacniania – K [Ks/kmol]	Stała czasowa – T [s]	Czas opóźnienia - t_{oz} [s]
5%	-5727	100.75	4.25
10%	-5633	112	8.4
20%	-5563	143	14
30%	-5563	182.5	17.5

Wykres 7.8 przedstawia zmianę zawartości propanu w destylacie w odpowiedzi na 5% zmianę wartości sygnału $\dot{N}_{O_2;wej}^L$ (rys. 7.1) w zależności wartości parametru β .



Rys. 7.8. Zmiana zawartości propanu w destylacie w odpowiedzi na 5% zmianę sygnału $\dot{N}_{O_2;wej}^L$ (rys. 7.1) w zależności od parametru β

7.2. Analiza wrażliwości aparatu na stopień zanieczyszczenia osadami

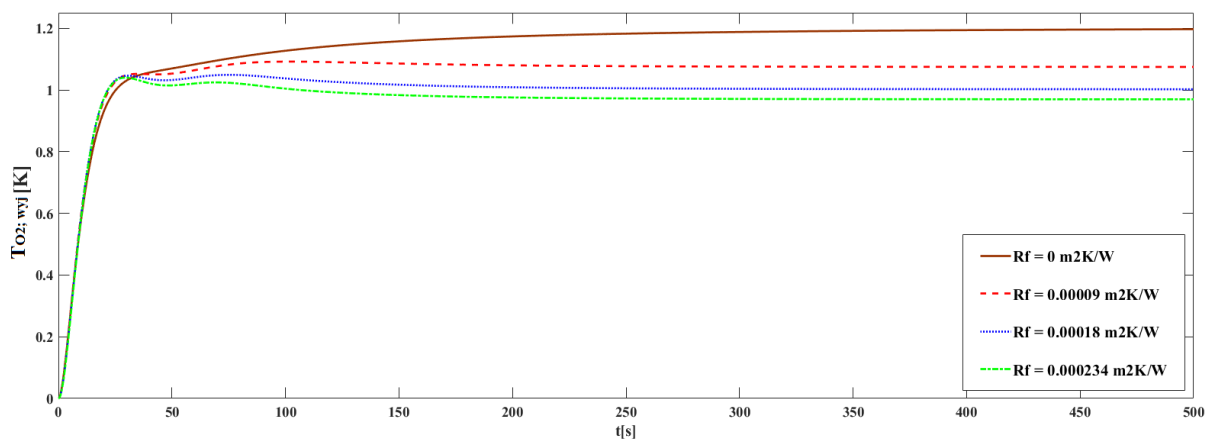
W rozdziale zaprezentowana zostanie analiza ilościowa i jakościowa wybranych charakterystyk dynamicznych odpowiedzi parametrów procesowych aparatu na zakłócenia sygnałów wejściowych. Analiza zakłada zbadanie wrażliwości aparatu na wartość współczynnika oporu cieplnego osadów, które zanieczyszczają powierzchnię wymiany ciepła. Wartość R_f odczytana została z tablic TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association). Przedstawione w rozdziale charakterystyki uwzględniają wartość oporu cieplnego osadów po stronie części wzmacniającej i odpędowej:

- $R_f = 0$ (czysty wymiennik),
- $R_f = 0.00009$,
- $R_f = 0.00018$;
- $R_f = 0.000234$.

Informacje w jaki sposób osady wpływają na parametry pracy wymiennika ciepła w stanie ustalonym, przedstawiony został w rozdziale 2.4.

W modelu wartość współczynnika oporu cieplnego osadów, zawarta jest we współczynniku wymiany ciepła U_{ij} (rozdział 2.4).

Aby przeprowadzić symulację poniżej (rys. 7.9) zmieniona została wartość sygnału $\dot{N}_{W1; wej}^V$. Zmiana ma charakter skoku wartości sygnału o 5% od wartości stanu ustalonego. Na rys. 7.9 został przedstawiony przebieg odpowiedzi sygnału $T_{O2; wyj}$. Przebieg zmiany obserwowany jest dla 4 wartości parametru R_f .



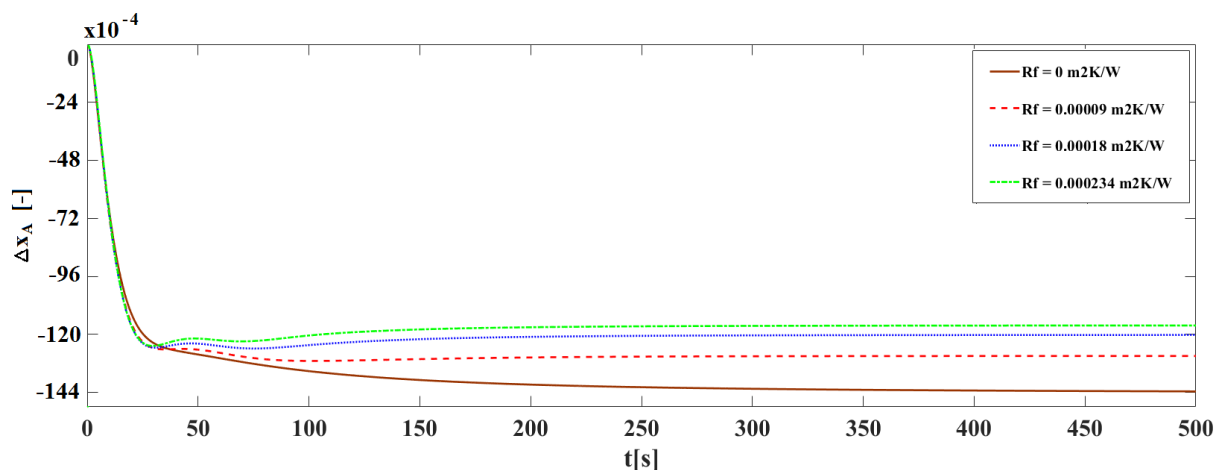
Rys. 7.9. Symulacja przebiegu odpowiedzi sygnału $T_{O2; wyj}$ na 5% zmianę sygnału (rys. 7.1) $\dot{N}_{W1; wej}^V$ w zależności od współczynnika oporu cieplnego osadów R_f

Tabela 7.3 przedstawia wpływ zanieczyszczenia osadami na wskaźniki oceny jakościowej charakterystyk dynamicznych zaprezentowanych na wykresie 7.9.

Tab. 7.3. Tabela przedstawiająca wpływ zanieczyszczenia osadami na wskaźniki oceny jakościowej charakterystyk dynamicznych z rys. 7.9

Stan zanieczyszczenia aparatu – R_f [W/m ² K]	Współczynnika wzmacniania – K [Ks/kmol]	Stała czasowa – T [s]	Czas opóźnienia - t_{oz} [s]
0	12287	21.6	-
0.0009	10955	19.9	-
0.00018	10240	19.9	-
0.000234	9932	19.9	-

Wykres 7.10 przedstawia zmianę zawartości propanu w cieczy wyczerpanej w odpowiedzi na 5% zmianę sygnału $\dot{N}_{W1;wej}^V$ (rys. 7.1) w zależności od wartości współczynnika oporu cieplnego osadów R_f .



Rys. 7.10. Zmiana zawartości propanu w cieczy wyczerpanej w odpowiedzi na 5% zmianę sygnału $\dot{N}_{W1;wej}^V$ (rys. 7.1) w zależności od współczynnika oporu cieplnego osadów R_f

8. Kontynuacja prac nad modelem dynamiki wymiennika H&MPE

Dla układu aparatów przedstawionego na rys. 5.2 zaproponowany został układ sterowania opracowany na podstawie reguły faz Gibbsa [3]:

$$s = J - f + 2 \quad (8.1)$$

Dla zintegrowanych części W1 i O2 (wymiennik H&MPE) a także części wzmacniającej W2 oraz odpędowej O1 mamy:

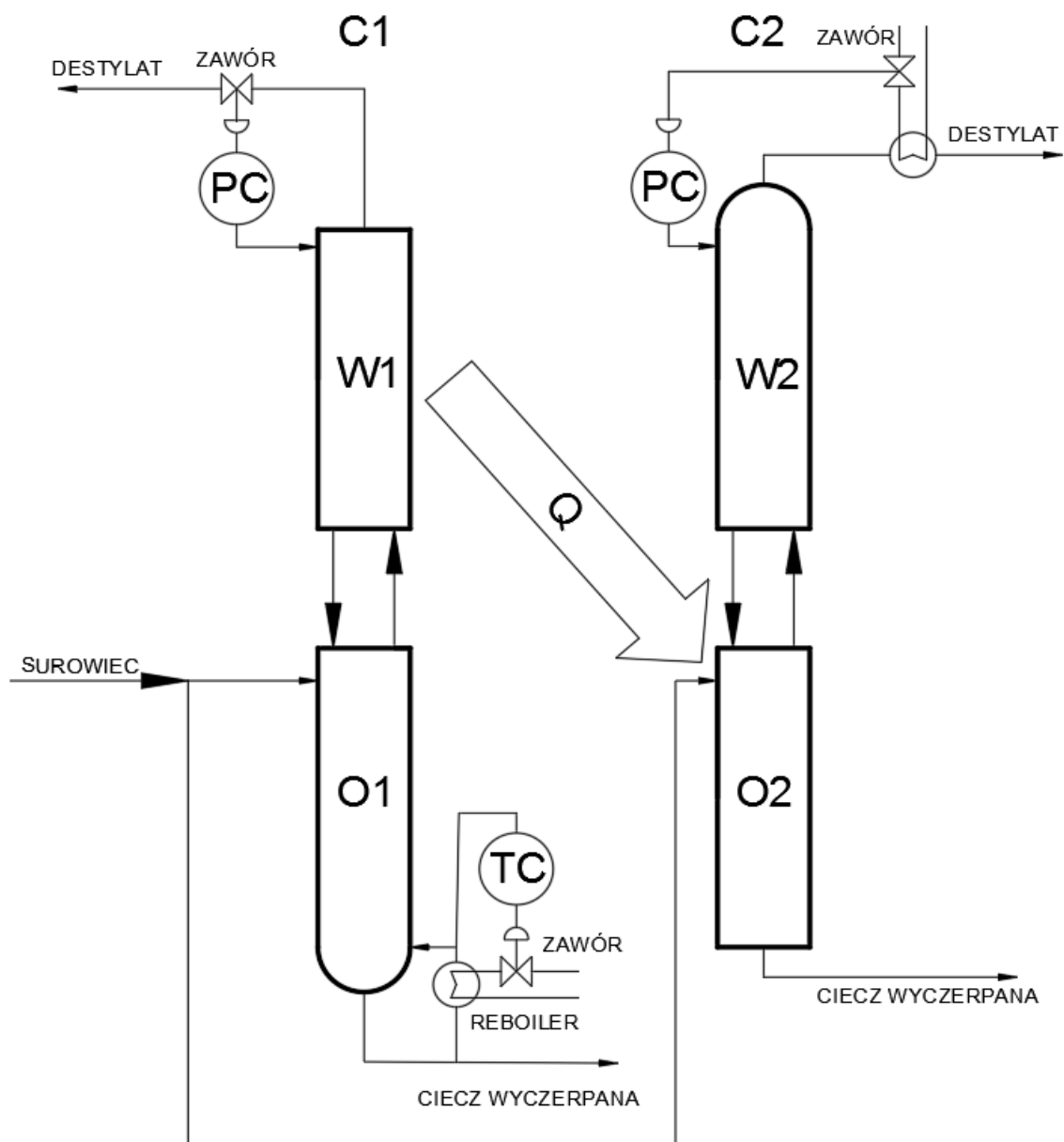
$J = 2$ (dwa składniki: propan i butan),

$F = 2$ (dwie fazy: ciekła i gazowa),

Zatem ze wzoru 8.1 uzyskujemy:

$$s = 2;$$

Uzyskana liczba stopni swobody równa 2, oznacza że dla danego układu W1 + O2 (lub W2+O1) trzeba kontrolować dwa parametry aby go wysterować i żeby układ był jednoznacznie określony. Całość układu przedstawionego na rys. 5.2 musi być kontrolowana przez 4 parametry. W przypadku układu W2+O1 kontrolowane będzie ciśnienie w skraplaczu części wzmacniającej oraz temperatura na jednej z pierwszych półek części odpędowej. Oryginalnym pomysłem autora jest podejście do wysterowania układu W1+O2. W części wzmacniającej będzie regulowane ciśnienie w skraplaczu, jednak układ odpędowy regulowany będzie poprzez powierzchnię wymiany ciepła między nimi (częścią W1+O2). W ten sposób zapewnione zostaną dwa parametry kontrolujące układ.



Rys. 8.1. Koncepcyjny układ regulacji zbioru aparatów z wymiennikiem ciepła i masy wg nowej technologii

Wskaźniki oceny charakterystyk dynamicznych przedstawione w tab. od 7.1 ÷ 7.3, posłużą do wyznaczenia wartości parametrów powszechnie stosowanego w przemyśle regulatora PID.

9. Wnioski

- A. Głównym celem pracy zawartym w hipotezie badawczej było opracowanie modelu matematycznego dynamiki wymiennika H&MPE. Zgodnie z przyjętą hipotezą, potwierdzono że zaproponowany w pracy model można wykorzystać do oceny funkcjonowania aparatu w warunkach rzeczywistej pracy w eksploatacji przemysłowej, gdzie parametry pracy mogą odbiegać od wartości dla stanu ustalonego aparatu (pkt B oraz C – rozdział 9).
- B. Jak zostało przedstawione na rys. 7.2 – 7.8 odpowiedź sygnału wyjściowego, wywołana określoną zmianą sygnału wejściowego, po pewnym czasie osiąga wartość asymptotyczną. Jest to cechą stałą interakcji zobrazowanych na rys. 7.1. Dlatego można stwierdzić że opisywany w pracy wymiennik H&MPE jest dynamicznie stabilny. Charakterystyki niezależnie od zmienianego sygnału wejściowego w podobnym czasie uzyskują wartość asymptotyczną, również dla różnych wartości zatrzymania cieczy w poszczególnych stopniach kontaktu.
- C. Na rys. 7.9 zaprezentowano wpływ narastania osadów na funkcjonowanie wymiennika H&MPE. Przebieg charakterystyk wykazuje niewielkie zmiany ich kształtu między sobą. Fakt ten dowodzi odporności wymiennika H&MPE na narastanie osadów na powierzchni płyt aparatu. Zostało to również potwierdzone przez wskaźniki dynamiczne (tab. 7.3), uzyskane dla omawianego wykresu. Wartości wskaźników ulegają tylko w niewielkim stopniu zmianom wywołanym przez narastanie osadów, co dowodzi możliwości wykorzystania wymiennika H&MPE w długookresowej eksploatacji w warunkach przemysłowych.
- D. Wnioski przedstawione w podpunktach B oraz C, pozwalają stwierdzić że możliwe jest zastosowanie powszechnie wykorzystywanych w przemyśle regulatorów PID - podobnie jak dla już stosowanych w przemyśle regulatorów płytowych wymienników ciepła oraz kolumn destylacyjnych.
- E. Zgodnie z przyjętą w pracy hipotezą zostało potwierdzone że opracowany model sekcyjny o parametrach skupionych, jest modelem uniwersalnym i może być wykorzystany do budowy analogicznych proponowanych wymienników H&MPE. Przedstawiony model matematyczny pozwala na szereg zmian związanych z geometrią aparatu, implementacją danych stanu ustalonego dla innych czynników.
- F. Implementacja wpływu osadów do modelu dynamiki umożliwia ocenę ich niepożądanego oddziaływania na wymianę ciepła między kanałami poszczególnych

części (wzmacniającej i odpędowej). Zabieg ten umożliwia analizę wpływu osadów na funkcjonowanie aparatu tj. wartości parametrów termodynamicznych strumieni wyjściowych cieczy i oparów. Do oceny własności dynamicznych obiektu wprowadzono wartości osadów z tablic TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association), gdyż są powszechnie wykorzystywane przez inżynierów w projektowaniu.

- G. Na podstawie analizy ilościowej i jakościowej charakterystyk otrzymanych w wyniku przeprowadzonych symulacji, można dojść do konkluzji potwierdzających że procesy związane z wymianą ciepła są procesami dynamicznymi wolnozmiennymi w porównaniu z procesami wymiany masy. W związku z czym będą one miały decydujący wpływ na wskaźniki jakościowe w przypadku sterowania aparatem w pętli zamkniętej.
- H. Zweryfikowano symulacyjnie, że możliwa jest hybrydowe połączenie procesów wymiany ciepła w aparatach przeponowych, a także wymiany masy w kolumnach rektyfikacyjnych, w aparacie do równoczesnej wymiany ciepła i masy.
- I. Bardzo ważnym aspektem pracy jest fakt że niniejsza dysertacja stanowi dalszy rozwój badań nad zaproponowanym przez Zakład Aparatury Przemysłowej w Płocku, wymiennikiem H&MPE. Kolejne badania nad nową technologią aparatu poszerzają zakres wiedzy o aparacie skonstruowanym wg nowej technologii, co może przyczynić się do szybszego wprowadzenia prototypu do badań lub gotowego aparatu w instalacji pilotowej.
- J. Ocena jakościowa charakterystyk dynamicznych, uzależnionych od wartości parametru β , potwierdza zaobserwowany niewielki wpływ parametru na wartość odpowiedzi na zmianę skokową sygnału wejściowego.

10. BIBLIOGRAFIA

- [1] Agrawal, R., Fidkowski, Z. T.: *Are Thermally Coupled Distillation Columns always Thermodynamically More Efficient for Ternary Distillation?* Ind. Eng. Chem. Res. 37, 3444–3454, 1998.
- [2] Al-Daverly S. K., Alrahavi A. M., Al_Zobai K. M.: *Dynamic modeling and control of plate heat exchanger*, International Journal of Heat and Mass Transfer 55, 6873–6880, 2012.
- [3] Amborski K., Marusak A.: *Teoria sterowania w ćwiczeniach*, PWN, Warszawa 1978.
- [4] Aso K.; Takamatsu, T., Nakaiwa M.: *Heat-Integrated Distillation Column*, U.S. Patent 5,873,047, 1998.
- [5] Asprion, N., Kaibel G., *Dividing Wall Columns: Fundamentals and Recent Advances*, Chem. Eng. Process, 49 (2), 139–146, 2010.
- [6] Brodowicz K.: *Wymienniki ciepła i masy*, WPW, Warszawa, 1977.
- [7] Brodowicz K., Głowacka M., Poniewski. M., Seget M., Szopa P.: *Modele o parametrach skupionych dynamiki wymienników ciepła z rurami koncentrycznymi*, Biul. Inf. ITC – PW, nr. 44 s. 3-23, 1972.
- [8] Brodowicz K., Poniewski M.: *Investigation of the Dynamic Properties of the Field - Type Heat Exchangers*, Archiwum Termodynamiki i spalania, vol. 9, s. 549-566, (1978).
- [9] Brodowicz K., Głowacka M., Poniewski. M.: *Modele o parametrach rozłożonych dynamiki wymienników ciepła z rurami koncentrycznymi*, Biul. Inf. ITC – PW, nr. 44 s. 25-55, 1972.
- [10] Brodowicz K., Markowski M.: *Metoda projektowania wymienników ciepła o małej wrażliwości na opory cieplne osadów*, IX Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy, Augustów, tom I, s. 177-186, 1995.
- [11] Brodowicz K., Markowski M.: *Efekty cieplne osadów w sieciach regeneracyjnych wymienników ciepła w petrochemii*, Konferencja: Problemy Badawcze Energetyki Ciepłej, Warszawa, 1997.
- [12] Brodowicz K., Markowski M.: *Calculation of heat exchanger networks for limiting fouling effects in the petrochemical industry*, Applied Thermal Engineering, Vol. 23 pp. 2241-2253, 2003.

- [13] Brugma, A. J.: *Fractional Distillation of Liquid Mixtures*, Especially Petroleum, Dutch Patent No. 41.850, 1937.
- [14] Brugma, A. J.: *Process and Device for Fractional Distillation of Liquid Mixtures*, More Particularly Petroleum. US Patent 2,295,256, 1942.
- [15] Carranza-Abaid A., Gonzalez-Garcia R.: *A Petlyuk distillation column dynamic analysis: Hysteresis and bifurcations*, Chem. Eng. and Proc. - Process Intensification, Vol. 149, 107843, 2020.
- [16] Choe Y. S., Luyben, W. L.: *Rigorous Dynamic Models of Distillation Columns*, Ind. Eng. Chem. Res., 26, 2158, 1987.
- [17] Cong H., Murphy J. D., Li X., Li X., Gao X.: *Feasibility Evaluation of a Novel Middle Vapor Recompression Distillation Column*, Ind. Eng. Chem. Res., 57, 6317–6329, 2018.
- [18] Cong H., Li X., Li H., Murphy J. P., Gao X.: Performance analysis and structural optimization of multi-tube type heat integrated distillation column (HIDiC), Separation and Purification Technology, Vol. 188, (2017), s. 303-315
- [19] Daza O. S., Perez-Cisneros E. S., Bek-Pedersen E., Gani R.: *Graphical and Stage-to-Stage Methods for Reactive Distillation Column Design*, AIChE J. 49, 2822, 2003.
- [20] Dejanovic I., Matijasevic L., Olujić Z.: *Dividing Wall Column A Breakthrough towards Sustainable Distilling*, Chem. Eng. Process., 49 (6), 559–580, 2010.
- [21] Douglas J. M.: *Dynamika i sterowanie procesów*, WNT, Warszawa, 1976.
- [22] Elgue S. Prat L., Cabassud M., Le Lann J. M., Cezarac J.: *Dynamic models for start-up operations of batch distillation columns with experimental validation. Computers & Chemical Engineering Volume 28, Issue 12, 15 November 2004, Pages 2735-2747*
- [23] Engelen H. K., Skogestad S.: *Selecting appropriate control variables for a Heat integrated distillation system with prefractionator*. Comput Chem Eng, 28:683–91, 2004.
- [24] Fang J., Cheng X., Li Z., Li H., Li Ch.: *A review of internally heat integrated distillation column*, Chinese J. of Chem. Eng., Vol. 27 s. 1272-1281, 2019.
- [25] Farag I. H., Karri, S. B. R.: *Computer-Aided Graphics in Distillation Columns Design*, Computers Educ. 13, 305, 1989.
- [26] Ferre J. A., Castells F., Flores J.: *Optimization of a Distillation Column with a Direct Vapor Recompression Heat Pump*.

- [27] Fitzmorris R. E., Mah, R. S. H.: *Improving Distillation Column Design using Thermodynamic Availability Analysis*, AIChE J., 26, 265, 1980.
- [28] Friedly J. C.: *Analiza dynamiki procesów*, WNT, Warszawa, 1975.
- [29] Fo Y., Liu X.: *Nonlinear dynamic behaviors and control based on simulation of high-purity heat integrated air separation column*, ISA Transactions 55 145–153, 2015.
- [30] Fonyo Z., Kurrat R., Rippin D.W.T., Meszaros I.: *Comparative analysis of various heat pump schemes applied to C4 splitters*, Comput Chem Eng 19:S1–6, 1995.
- [31] Fonyo Z. Thermodynamic analysis of rectification I. Reversible model of rectification. Int Chem Eng 1974;14:18–27.
- [32] Fonyo Z. Thermodynamic analysis of rectification II. Finite cascade models. Int Chem Eng 1974;14:203–10.
- [33] Franks R. G. E.: *Modeling and Simulation in Chemical Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., 1972.
- [34] Freshwater D. C.: *The Heat Pump in Multicomponent Distillation*, Brit. Chem. Eng., 6, 388, 1961.
- [35] Freshwater D. C.K: *Thermal Economy in Distillation*, Trans. Inst. Chem. Eng., 29, 149, 1951.
- [36] Gadalla M., Jiménez L., Olujic Z., Jansens P. J.: A thermo-hydraulic approach to conceptual design of an internally heat-integrated distillation column (i-HIDiC), Comput. Chem. Eng. 31 (2007) 1346–1354
- [37] Gao T., Sammakia B., Geer J.: *Dynamic response and control analysis of cross flow heat exchangers under variable temperature and flow rate conditions*, International Journal of Heat and Mass Transfer 81, 542–553, 2015.
- [38] Glenchur T, Govind R. Study on a continuous heat integrated distillation column. Sep Sci Technol 1987;22:2323–38.
- [39] Govind R., *Analytical Form of the Ponchon–Savarit Method for Systems with Straight Enthalpy-Composition Phase Lines*, Ind. Eng. Chem. Process Des., 21, 532, 1982.
- [40] Govind R., *Distillation Column and Process*, U.S. Patent 4,615,770, 1986.
- [41] Govind R., *Dual Distillation Columns*, U.S. Patent 4,681,661, 1987.
- [42] Harwardt A., Marquardt W.: *Heat-Integrated Column: Vapor Recompression or Internal Heat Integration*, AIChE Journal, Vol. 58, pp. 3740-3750, 2012.
- [43] Haselden G. G.: *Distillation Processes and Apparatus*, U.S. Patent 4,025,398, 1977.

- [44] Ho T-J., Huang CH-T., Lin J-M., Lee L-S.: *Dynamic simulation for internally heat-integrated distillation columns (HIDiC) for propylene–propane system*, Comp. and Chem. Eng. 33, 1187–1201, 2009.
- [45] Hobler T.: *Ruch ciepła i wymienniki*, WNT, Warszawa, 1986.
- [46] Hobler T.: *Ruch ciepła i wymienniki*, WNT, Warszawa, 1979.
- [47] Hovd M., Lundstrom P., Skogestad S.: *Controllability analysis using frequency – dependent measures for interactions and disturbances*, AIChE, 11-16, 1990.
- [48] Huang K., Shan L., Zhu Q., Qian J.: *Design and control of an ideal heat-integrated distillation column (ideal HIDiC) system separating a close-boiling ternary mixture*, Energy 32pp. 2148-2156, 2007.
- [49] Huang K., Wang S. J., Iwakabe K., Shan L., Zhu Q.: *Temperature control of an ideal heat-integrated distillation column (HIDiC)*, Chemical Engineering Science, pp. 6486-6491, 2007.
- [50] Huang K., Matsuda K., Iwakabe K., Takamatsu T., Nakaiwa M.: *Graphical Synthesis of an Internally Heat-Integrated Distillation Column*, J. Chem. Eng. Japan, 39, 703, 2006.
- [51] Huang K., Nakaiwa M., Akiya T., Aso K., Takamasu T.: *A Numerical Consideration on Dynamic Modeling and Control of Ideal Heat-Integrated Distillation Columns*, J. Chem. Eng. Japan, 29, 344, 1996.
- [52] Huang K., Matsuda K., Takamatsu T., Nakaiwa M.: *The Influences of Pressure Distribution on an Ideal Heat-Integrated Distillation Column (HIDiC)*, J. Chem. Eng. Japan, 39, 652, 2006.
- [53] Hugill J., Van Dorst E.: *Design of a heat-integrated distillation column based on a plate-fin heat exchanger*, Proceedings of Sustainable (Bio-) chemical Process Technology, incorporating the 6th International Conference on Process intensification. Delft, the Netherlands, 2005, s. 27–29.
- [54] Humphrey JL., Siebert AF.: *Separation technologies: an opportunity for energy savings*. Chem Eng Prog (March):92, 1992.
- [55] Iwakabe K., Nakaiwa M., Huang K., Nakanishi T., Ohmori T., Endo A., Yamamoto T.: *Performances of an Internally Heat-Integrated Distillation Column (HIDiC) in Separation of Ternary Mixtures*, J. Chem. Eng. Japan, 39, 417, 2006.
- [56] Iwakabe K, Nakaiwa M, Nakanishi T, Huang K, Zhu Y, Røsjorde A. *Analysis of the energy savings by HIDiC for the multicomponent separation*. APPChE, 0259, Kitakyushu, Japan; 2004.

- [57] Jana A. K.: *Advances in heat pump assisted distillation column: A review*. Energy Conversion and Management 77, 287–297, 2014.
- [58] Jana A. K.: *Heat Integrated distillation operation*, Appl. En. 87, s 1477–1494, 2010.
- [59] Jun S., Puri V. M.: *A 2D dynamic model for fouling performance of plate heat exchangers*, Journal of Food Engineering 75, 364–374, 2006.
- [60] Kaibel G.: *Distillation Columns with Vertical Partition*, Chem. Eng. Tech., 10, 92–98, 1987.
- [61] Korzybski P., Markowski M., Trafczyński M.: *Model dynamiki sieci wymienników ciepła płaszczowo – rurowych na przykładzie instalacji destylacji rurowo – wieżowej*, V Konferencja „Computer Methods and Systems” Krakow, tom 2 s. 167 – 172, 2005.
- [62] Knudsen J. G.: *Fouling in the Heat Exchangers, Heat Exchanger Design Handbook*, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, 1983.
- [63] Kumar V., Kiran B., Jana A. K., Samanta A. N.: *A Novel Multistage Vapor Recompression Reactive Distillation System with Intermediate Reboilers*, AIChE Journal March Vol. 59, No. 3, 2013.
- [64] Le Goff P, Cachot T, Rivero R.: *Exergy analysis of distillation processes*. Chem. Eng. Tech. 1996;19:478–85.
- [65] Ledanols J. M., Ollvera-Fuentes C.: *Modified Ponchon–Savarit and McCabe–Thiele Methods for Distillation of Two-Phase Feeds*, Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 23, 1, 1984.
- [66] Lee J. W., Huan, S., Westerberg A. W.: *Graphical Methods for Reaction Distribution in Reactive Distillation Column*, AIChE J., 46, 1218, 2000.
- [67] Ludwicki M., *Sterowanie procesami w przemyśle spożywczym*, PTTŻ, ŁÓDŹ, 2002.
- [68] Luo X., Guan X., Li M., Roetzel W.: *Dynamic behaviour of one-dimensional flow multistream heat exchangers and their networks*, International Journal of Heat and Mass Transfer 46 705–715, 2003.
- [69] Luyben W. L.: *Improved plantwide control structure for extractive divided-wall columns with vapor recompression*, ChERD, 152–164, 2017,
- [70] Luyben W. L.: *High-pressure versus low-pressure auxiliary condensers in distillation vapor recompression*. Computers and Chemical Engineering 125, 427–433, 2019.
- [71] Luyben W. L.: *Design and control of a pressure-swing distillation process with*

- vapor recompression*, Chemical Engineering & Processing: Process Intensification 123, 174–184, 2018.
- [72] Luyben W. L., Wenzel L. A.: *Chemical Process Analysis: Mass and Energy Balances*; Prentice-Hall, Inc., 1988.
- [73] Luyben W. L.: *Modelowanie, symulacja i sterowanie procesów przemysłu chemicznego*, WNT, Warszawa, 1976.
- [74] Mah R. S., Nicholas J. J., Wodnik, R. B.: *Distillation with Secondary Reflux and Vaporization, a Comparative Evaluation*, AIChE J. 23 651, 1977.
- [75] Mah RSH. Performance evaluation of distillation systems. Proc Found Com. Aided Chem. Process Des. (1980) s. 171–202.
- [76] Marcilla A., Gomez A., Reyes J. A., Olaya, M. M.: *New Methods for Quaternary Systems Liquid–Liquid Extraction Tray to Tray Design*, Ind. Eng. Chem. Res. 38, 3083, 1999.
- [77] Markowski M., Alabrudziński S., Storczyk S.: *Heat and mass exchanger model for hybrid heat integrated distillation systems (HHIDiS)*, Applied Thermal Engineering 174 (2020) 115249
- [78] Markowski M., Trafczyński M.: *Dynamika sieci wymienników ciepła na przykładzie instalacji destylacji rurowo-wieżowej, Rozdział w monografii „Wybrane zagadnienia przepływu płynów i wymiany ciepła”* (red. Suchecki W.). Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa, s. 203-225, 2008.
- [79] Markowski M., Trafczyński M., Korzybski P.: *Weryfikacja modelu dynamiki wymiennika ciepła płaszczowo-rurowego na przykładzie instalacji destylacji rurowo-wieżowej*, XIII Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy, Koszalin – Darłówko, tom 2, s. 593-599, 2007.
- [80] Markowski M., Trafczyński M., Korzybski P.: *Model dynamiki sieci wymienników ciepła płaszczowo-rurowych na przykładzie instalacji destylacji rurowo-wieżowej*, Proceedings of V Conference CMS'05, Computer Methods and Systems, Vol 2, 167-172
- [81] Markowski M., Trafczyński M., Urbaniec K.: *Validation of the method for determination of the thermal resistance of fouling in shell and tube heat exchangers*, Energy Conversion and Management 76, 307–313, 2013.
- [82] Matsuda L., Iwakabe K., Nakaiawa M.: *Recent advances in internally heat integrated distillation columns (HIDiC) for sustainable development*, J Chem Eng. Japan, 45, s. 363-372, 2012.

- [83] Meili A.: *Heat Pumps for distillation columns*, Chem. Eng. Prog., 6, s. 60-65, 1990.
- [84] Meyer M., Mizzi B., Ronzineau D., Yala.: *Heat Integrated distillation column (HIDiC): Experimental Study on a New Concentric Column Technology*, CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS VOL. 69, 2018,
- [85] Muhrer C. A.: *Control of Vapor Recompression Distillation Columns*, Air Product and Chemicals, Inc. 468 – 491 No. 23.
- [86] Mutalib M. I. A., ZEGLAM A. O., SMITH R.: *OPERATION AND CONTROL OF DIVIDING WALL DISTILLATION COLUMNS Part 2: Simulation and Pilot Plant Studies Using Temperature Control*, Chemical Engineering Research and Design Volume 76, Pages 319-334, 1998.
- [87] Nakaiwa, M., Huang K., Endo A., Naito K., Owa M. Akiya T., Nakane T.: *Evaluating Control Structures for a General Heat Integrated Distillation Column (General HIDiC)*, Computers and Chemical Supplement, pp. 851-854, 1999.
- [88] Nakaiwa M., Huang K., Naito K., Endo A., Owe M., Akiya T., Nakane T., Takamatsu T.: *A New Configuration of Ideal Heat-Integrated Distillation Columns (HIDiC)*, Comp. & Chem. Eng. 24, 239, 2000.
- [89] Nakaiwa M., Huang K., Endo A., Ohmori T., Akiya T., Takamatsu T.: *Internally Heat-Integrated Distillation Columns: A Review*. Chem. Eng. Res. Des, 81, 162, 2003.
- [90] Nizielski M., Urbaniec K.: *Aparatura przemysłowa*, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa, 2010.
- [91] Null H. R.: *Heat Pump in Distillation*, Chem. Eng. Progress, 78, 58, 1976.
- [92] O'Donnell B. R., Barna B. A., Gosling C. D.: *Optimize Heat Exchanger Cleaning Schedules*, Chemical Engineering Progress, No. 6, pp. 56 – 60, 2001.
- [93] Olujć, Z., Jödecke, M., Shilkin, A., Schuch, G., Kaibel, B.: *Equipment improvement trends in distillation*, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2009, 48(6), pp. 1089–1104
- [94] Olujć., Fakhri F., Rijke A.D., De Graauw J. D., Jansens P. J.: *Internal heat – integration – the key to an energy conserving distillation column*, J. Chem. Technol. Biotechnol., 78, s. 241-248, 2003.
- [95] Petlyuk F. B., Platanov V. M., Slavinskii D. M.: *Thermodynamically Optimal Method for Separating Multicomponent Mixtures*, Intl. Chem. Eng. 5, 555, 1965.
- [96] Piekarski M., Poniewski M.: *Dynamika i sterowanie procesami wymiany ciepła i masy*, WNT, Warszawa, 1994.

- [97] Poniewski M.: *Teoretyczne i eksperymentalne wyznaczanie charakterystyk dynamicznych wymiennika ciepła Fielda*, Praca doktorska, wydz. MEIL – PW, Warszawa, 1975.
- [98] Reyes J. A., Gomez A., Marcilla A.: *Graphical Concepts to Orient the Minimum Reflux Ratio Calculation on Ternary Mixtures Distillation*, Ind. Eng. Chem. Res. 39, 3912, 2000.
- [99] Rivero R. L'analyse d'exergie: application a la distillation et aux pompes a chaleur a absorption. PhD Thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France; 1993.
- [100] Rodera H., Westphalen D. L., Shethna H. K.: *A Methodology for Improving Heat Exchanger Network Operation*, Applied Thermal Engineering, Vol. 23, pp. 1729-174, 2003.
- [101] Sahoo A., Radhakrishnan T.K., Sankar Rao C.: *Modeling and control of a real time shell and tube heat exchanger*, Resource-Efficient Technologies 3, 124–132, 2017.
- [102] Saleh Z., Sheikholeslami R., Watkinson A. P.: *Heat exchanger fouling by a light Australian crude oil*, Heat Exchanger Fouling and Cleaning Fundamentals and Applications, Santa Fe, 2003.
- [103] Salem A. B. S. H., Fekri, M.: *Rigorous Computation of Binary Distillation Systems*, Sep. Sci. Technol. 29, 1789, 1994.
- [104] Sanaye S., Niroomand B.: *Simulation of heat exchanger network (HEN) and planning the optimum cleaning schedule*, Energy Conversion and Management, Vol. 48, pp. 1450-1461, 2007.
- [105] Schmal J. P., Van der Kooi H. J., Rijke A. D. Oluijc Z., Jansens P. J.: *Internal versus external heat integration: operational and economic analisys*, Chem. Eng. Res. Des., 84, s. 374-380, 2006.
- [106] Schultz M.A., Stewart D.G., Harris J.M., Rosenblum S.P., Shakur M.S., O'Brien D.E.: *Reduce costs with dividing-wall columns*, Chem. Eng. Prog. 98, 64–71, 2002.
- [107] Schultz M. A., Stewart D. G., Harris J. M., Rosenblum S. P., Shakur M. S., O'Brien D. E.: *Reduce Costs with Dividing Wall Columns*, Chem. Eng. Progress, 98, 64, 2002.
- [108] Seader J. D.: *Continuous Distillation Apparatus and Method*, U.S. Patent 4,234,391, 1980.
- [109] Shah P. B.: *Squeeze more out of Complex Columns*, Chem. Eng. Progress, 98,46, 2002.

- [110] Sharma S., Dipesh S. Patle D. S., Gadhamsetti A. P., Pandit S., Manca D. , Nirmala G. S.: *Intensification and performance assessment of the formic acid production process through a dividing wall reactive distillation column with vapor recompression*, Chemical Engineering & Processing: Process Intensification 123, (2018), 204–213,
- [111] Shimizu K., Mah, R. S. H.: *Dynamic Characteristic of Binary SRV Distillation Systems*, Comp. & Chem. Eng. 7, 105, 1983.
- [112] Shin Y., Smith R., Hwang S.: *Development of model predictive control system using an artificial neural network: A case study with a distillation column*, Journal of Cleaner Production Vol. 277, 124124, 2020.
- [113] Sivieri F. M., Teixeira E. P.: *Identification of the Dynamic Model of a Distillation Column*, IJAERS, Vol 6, 2456-1908, 2019.
- [114] Skogestad S.: *DYNAMICS AND CONTROL OF DISTILLATION COLUMNS, A tutorial introduction*, Chemical Engineering, Norwegian University of Science and Technology (NTNU) N-7034 Trondheim, Norway
- [115] Skogestad S., Morari M.: *Understanding the Dynamic Behavior of Distillation Columns*, Ind. Eng. Chem. Res. 1988, 27, 1848-1862.
- [116] Smith, B. D.: *Design of Equilibrium Stage Processes*, McGraw-Hill Book Co, 1963.
- [117] Smith R., *Chemical Process Design and Integration*, 2nd ed.; John Wiley & Sons Ltd: England, 341, 2005.
- [118] Soave G.: *Equilibrium Constants from a Modified Redlich-Kwong Equation of State*, Chem. Eng. Sci. 27, 1197, 1972.
- [119] Spalding D. B., Taborek J.: *Heat exchanger theory*, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1983.
- [120] Staniszewski S.: *Wymiana ciepła, podstawy teoretyczne*, PWN, Warszawa, 1980.
- [121] Storczyk S.: *Metoda obliczania aparatu do przeponowej wymiany ciepła z równoczesną rektyfikacją substancji*, Praca doktorska, wydz. BMiP – PW, Płock, 2010.
- [122] Szargut J., Ziębik A.: *Podstawy energetyki cieplnej*, PWN, Warszawa, 1998.
- [123] Szopa P.: *Badania własności dynamicznych spiralnego wymiennika ciepła, praca doktorska*, wydz. MEiL – PW, Warszawa, 1976.
- [124] Takamatsu T, Nakaiwa M, Nananishi T. The concept of an ideal heat integrated distillation column (HIDiC) and its fundamental properties. Kagaku Kogaku Ronbun 1996;22:985–90.

- [125] Taqvi S. A., Tufa L. D., Zabiri H., Shah Maulud A., Uddin F.: *Fault detection in distillation column using NARX neural network*, Neural Comput & Applic 32, 3503–3519, 2020.
- [126] TEMA, *Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association*, 8th ed., New York, 1999.
- [127] Trafczynski M., Kisielewski P., Markowski M., Urbaniec K.: *A modeling framework to investigate the influence of fouling on the dynamic characteristics of PID-controlled heat exchangers and their networks*, Applied Sciences 9 (5), 824, 2019.
- [128] Trafczynski M., Markowski M., Urbaniec K.: *Energy saving potential of a simple control strategy for heat exchanger network operation under fouling conditions*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 111, 355-364, 2019.
- [129] Trafczynski M., Markowski M., Urbaniec K., Trzcinski P., Alabrudzinski S.: *Estimation of thermal effects of fouling growth for application in the scheduling of heat exchangers cleaning*, Applied Thermal Engineering 182, 116103, 2020.
- [130] Trafczyński M.: *Metoda diagnozowania wpływu osadów na regenerację ciepła w sieci wymienników*, Praca doktorska, wyd. BMiP – PW, Płock, 2010.
- [131] Trafczynski M., Markowski M., Alabrudzinski S., Urbaniec K.: *The influence of fouling on the dynamic behavior of PID-controlled heat exchangers*, Applied Thermal Engineering 109, 727–738, 2016.
- [132] Tsung-Jen H., Chi-Tsung H., Jhih-Ming L., Liang-Sun L.: *Dynamic simulation for internally heat –integrated distillation columns (HIDiC) for propylene-propane system*, Computers and Chemical Supplement, pp. 1187-1201, 2009.
- [133] Tsung-Jen H.: *Design and modeling studies of internally Heat Integrated Distillation Columns*, Praca doktorska, Department of Chemical and Material Engineering - National Central University, Tajwan, 2010.
- [134] Tung H-H, Davis JF, Mah RSH. Fractionating condensation and evaporation in plate-fin devices. AIChE J 1986;32:1116–24.
- [135] Varbanov P. S., Klemeš J. J., Friedler F.: *Cell-based dynamic heat exchanger models—Direct determination of the cell number and size*, Computers and Chemical Engineering 35, 943–948, 2011.
- [136] Warych J.: *Aparatura chemiczna i procesowa*, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa, 2004.
- [137] Wolff, E. A. & Skogestad, S.: *Operation of Integrated Three Product (Petlyuk) Columns*, Ind. Eng. Chem. Res. 34, 2094, 1995.

- [138] Wright, R.O. U.S. Patent 2,471,134, 1949.
- [139] Xu L.,*, Li M., Yin X, Yuan X.: *New Intensified Heat Integration of Vapor Recompression Assisted Dividing Wall Column*, Ind. Eng. Chem. Res. 56, 2188–2196, 2017.
- [140] Yeap B. L., Wilson D. I., Polley G. T., Pugh S. J.: *Simulating the fouling behaviour in shell-and-tube heat exchangers*, PUBLICO, Essen, pp. 275-282, 2002.
- [141] Yildirim, O., Kiss, A. A., Kenig, E. Y.: *Dividing Wall Columns in Chemical Process Industry: A Review on Current Activities*, Sep. Purif. Technol. 80 (3), 403–417, 2011.
- [142] Zalewski Z.: *Opracowanie modelu dynamicznego wybranej kolumny rektyfikacyjnej instalacji Olefiny II w PKN ORLEN S.A*, Praca magisterska, wydz. BMiP – PW, Płock, 2010.
- [143] Ziółkowski Z.: *Destylacja i rektyfikacja w przemyśle chemicznym*, WNT, Warszawa, 1980.