

Autoreferat

W 1985 r. skończyłem studia na wydziale Technologii i Inżynierii Chemicznej Politechniki Śląskiej uzyskując tytuł magistra inżyniera w specjalności Inżynieria Chemiczna.

Po ukończeniu studiów w 1985 r. podjąłem pracę w Instytucie Inżynierii Chemicznej Polskiej Akademii Nauk w Gliwicach w zespole Równoczesnej Wymiany Ciepła i Masy, gdzie pracuję do dziś. W 1996 r. obroniłem pracę doktorską pt. „Badania doświadczalne przeciwkierunkowego nieekwimolarnego ruchu masy w nieizotermicznym układzie wieloskładnikowym” w Instytucie Inżynierii Chemicznej PAN w Gliwicach uzyskując stopień naukowy doktora nauk technicznych. Promotorem pracy był prof. dr hab. inż. Roman Krupiczka, a recenzentami byli prof. dr hab. inż. Andrzej Burghardt i prof. dr hab. inż. Roman Zarzycki.

A. Wskazanie osiągnięcia naukowego wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65 poz. 595) stanowi jednotematyczny cykl publikacji pod wspólnym tytułem „Wymiana ciepła i masy w zintegrowanym procesie niskotemperaturowej kondensacji i adsorpcji” składający się z następujących pozycji:

- [H.1] R.Krupiczka, **A.Rotkegel**, 1997, An Experimental Study of Diffusional Cross-Effects in the Multicomponent Mass Transfer, *Chem. Eng. Sci.*, 52, 6, 007-1017
- [H.2] R.Krupiczka, **A.Rotkegel**, 1998, Ruch masy w układzie wieloskładnikowym w obecności składników inertnych. I Opis matematyczny procesu, *Inż. Chem. i Proc.*, 19, 4, 747-759
- [H.3] R. Krupiczka, **A.Rotkegel**, 1998, Ruch masy w układzie wieloskładnikowym w obecności składników inertnych. II Porównanie wyników doświadczeń z obliczeniami numerycznymi, *Inż. Chem. i Proc.*, 19, 4, 761-774
- [H.4] H.Walczyk, **A.Rotkegel**, 1999, Wyznaczanie współczynników wnikania ciepła i oporów przepływu w płytowym wymienniku spiralnym, *Inż. Chem. i Proc.*, 20, 3, 423-436
- [H.5] H.Walczyk, R.Krupiczka, **A.Rotkegel**, 2003, Usuwanie par organicznych z gazu inertnego w procesie kondensacji niskotemperaturowej, *Polska Akademia Nauk, Działalność Naukowa (wybrane zagadnienia)*, 16, 90-91
- [H.6] **A.Rotkegel**, 2006, Oczyszczanie powietrza z par związków organicznych w zintegrowanym procesie niskotemperaturowej kondensacji i adsorpcji, rozdział w monografii pt. Ochrona Powietrza w Teorii i Praktyce pod red. prof. Jana Koniecznyńskiego, tom 1, str. 217-226, *Zabrze*

- [H.7] **A.Rotkegel**, 2008, Experimental study of low temperature condensation coupled with adsorption, *Chem. and Proc. Eng.*, 29 , 639-650
- [H.8] Z. Ziobrowski, **A. Rotkegel**, R. Krupiczka, 2010, Influence of diffusional cross effects on selectivity in an integrated evaporation-condensation process, *Chem. and Proc. Eng.*, 31, 3-14
- [H.9] **A.Rotkegel**, 2010, Usuwanie lotnych związków organicznych z powietrza w zintegrowanym procesie niskotemperaturowej kondensacji i adsorpcji, *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 3, 103-104
- [H.10] **A.Rotkegel**, 2010, Mathematical Modeling of Low Temperature Condensation Coupled with Adsorption, *Chem. and Proc, Eng.*, 31 , 433-449

Tematyką związaną z wymiana ciepła i masy w procesach niskotemperaturowej kondensacji i adsorpcji zacząłem się zajmować od 1994 roku. W latach 1994 – 1997 byłem głównym wykonawcą projektu badawczego pt. „Selektywna kondensacja par lotnych związków organicznych z powietrza, w krzyżowo-prądowym przepływie par i kondensatu, metodą głębokiego chłodzenia”, (Nr projektu badawczego 3 P405 026 07) W ramach projektu przeprowadzone zostały eksperymentalne badania niskotemperaturowej kondensacji LZO (n-propanolu, oraz 2 składnikowej mieszaniny n-propanol – octan etylu) w kondensatorze typu wymiennik spiralny z odprowadzeniem skroplin w poprzez specjalne otwory wykonane w dennicy. Konstrukcja kondensatora była przedmiotem patentu nr 173908 "Sposób selektywnej kondensacji par z gazów i spiralno płytowy kondensator do kondensacji par z gazów" z dnia 1998.05.25, którego byłem współtwórcą. W ramach projektu badawczego opracowano model matematyczny procesu niskotemperaturowej kondensacji par z gazu w wymienniku spiralnym. Analizując wyniki badań doświadczalnych stwierdzono, że ogólna sprawność kondensacji zależy głównie od temperatury, do której prowadzony jest proces schładzania gazów, a w niewielkim stopniu zależy od stężeń LZO. W badaniach uzyskano wysoką sprawność procesu niskotemperaturowej kondensacji (96-99%), która jednakże okupiona była niską temperaturą, do której należało schłodzić oczyszczany gaz.

W pracach [H.1], [H.2] i [H.3] przedstawiono model matematyczny ruchu masy w układzie wieloskładnikowym w obecności składników inertnych oraz przeprowadzono weryfikację eksperymentalną zaproponowanego modelu. Badania doświadczalne prowadzono na stanowisku badawczym, którego integralną częścią była pionowa rura o średnicy 25 mm, do której wprowadzano gaz zawierający LZO w przeciwnym kierunku do spływającej po wewnętrznej stronie rury cieczy. Badania prowadzono w układach izopropanol-woda-powietrze i izopropanol-woda-hel. Na podstawie wyników przeprowadzonych obliczeń numerycznych dla różnych przedstawionych modeli matematycznych ruchu masy w fazie gazowej oraz różnych sposobów obliczania oporów cieplnych i masowych w filmie cieczy stwierdzono, że wszystkie stosowane modele matematyczne uwzględniające efekty krzyżowe dyfuzji w fazie gazowej dają porównywalne wyniki, natomiast pominięcie efektów krzyżowych dyfuzji prowadzi do zmniejszenia dokładności obliczeń. W rozpatrywanym układzie pominięcie oporów cieplnych w filmie cieczy nie prowadziło do istotnego wpływu na dokładność obliczeń, natomiast zaniedbanie oporów dyfuzyjnych w filmie cieczy zwiększało błąd obliczeń, w szczególności błąd w obliczaniu strumienia i-tego składnika, gdy strumień drugiego składnika był znacząco większy. Zaobserwowano, że efekty krzyżowe dyfuzji w fazie gazowej dla i-tego składnika są znaczące, gdy stosunek strumieni dyfundujących składników N_i/N_j jest duży, natomiast zbliżone wartości binarnych współczynników dyfuzji w fazie gazowej powodują zanikanie tych efektów.

W pracy [H.4] przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych wymiany ciepła i oporów przepływu w płytowym wymienniku spiralnym. Opracowano korelacje na współczynnik wnikania ciepła i oporów przepływu gazu w zakresie przejściowym ($2000 < Re < 6000$). Stwierdzono, że w badanym zakresie przepływu wartości współczynników wnikania ciepła są niższe niż to wynika z zależności Hausena, natomiast współczynniki oporu wyższe niż obliczane z zależności literaturowych. W pracy [H.5] przedstawiono wyniki badań oczyszczania powietrza z par LZO w procesie kondensacji niskotemperaturowej, z wykorzystaniem zmodyfikowanego wymiennika spiralnego jako kondensatora. Stwierdzono, że metoda niskotemperaturowej kondensacji par z gazów umożliwiła znaczną redukcję stężenia par LZO w gazach wylotowych, odzysk kondensatu LZO w postaci ciekłej, osiągając efektywność oczyszczania gazów zbliżoną do osiągalnej w procesach katalitycznego spalania. Stwierdzono, że proces powstawania mgły w aparacie może ograniczyć selektywny rozdział składników organicznych mieszaniny.

W latach 2002 do 2005 byłem kierownikiem projektu badawczego pt.: „Usuwanie par związków organicznych z powietrza w zintegrowanym procesie niskotemperaturowej kondensacji i adsorpcji zmiennie-temperaturowej” (Projekt badawczy nr 4 T09C 022 23). W ramach projektu badawczego przebadano możliwości wykorzystania zintegrowanego procesu kondensacji niskotemperaturowej i adsorpcji zmiennie-temperaturowej w procesie usuwania par związków organicznych z gazu inertnego do poziomu uzyskania pożądanego stopnia oczyszczania gazu. Sposób oczyszczania gazu objęty był oddzielnym patentem pt. „Sposób usuwania par związków organicznych z gazów” patent PL 189576 (data udzielenia patentu 31.08.2005 WUP 08/05), którego byłem współtwórcą. Przeprowadzono eksperymentalne badania procesu oczyszczania mieszaniny dwuskładnikowej z lotnego związku organicznego w zintegrowanym układzie kondensacja niskotemperaturowa i adsorpcja zmiennie-temperaturowa. Badania doświadczalne przeprowadzono w układzie składającym się z kondensatora, dwóch adsorberów wypełnionych węglem aktywnym, dmuchawy obiegowej, wymiennika płytowego i armatury oraz aparatury kontrolno-pomiarowej. Lotnym związkiem organicznym w gazowej mieszaninie był propanol-2, a azot gazem inertnym.

Wyniki badań opublikowano w szeregu prac naukowych W pracy [H.7] przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych procesu oczyszczania gazu z lotnych związków organicznych w zintegrowanym procesie kondensacji niskotemperaturowej i adsorpcji. Badania eksperymentalne prowadzono przy natężeniach przepływu gazu w zakresie 11 do 20 Nm^3h^{-1} , stężeniu LZO w zakresie 4.2 do 15.5 g/Nm^3 , a temperaturę medium chłodzącego w zakresie $-65^{\circ}C$ do $-35^{\circ}C$. Analiza wyników badań eksperymentalnych wykazała, że usuwanie par związków organicznych z mieszanin gazowych z inertem w zintegrowanym układzie kondensacja-adsorpcja umożliwia niemal całkowite oczyszczenie z LZO mieszaniny gazowej. Osiągnięcie wysokiego stopnia oczyszczenia mieszaniny gazowej z par propanolu-2 możliwe jest już w warunkach, gdy schładzanie gazowej mieszaniny w kondensatorze prowadzone jest w temperaturach około $-35^{\circ}C$, co w przypadku stosowania tylko procesu niskotemperaturowej kondensacji jest niemożliwe (wymagane schłodzenie do $-100^{\circ}C$ lub niżej). W pracy [H.10] przedstawiono model matematyczny procesu oczyszczania gazu z lotnych związków organicznych w zintegrowanym procesie kondensacji niskotemperaturowej i adsorpcji. Model matematyczny składa się z dwóch odrębnych procesów obliczeniowych: niskotemperaturowej kondensacji par LZO i niskotemperaturowej adsorpcji. Proces kondensacji par LZO w obecności inertu opisano za pomocą układu równań różniczkowych zwyczajnych z warunkami brzegowymi opisujący proces wymiany ciepła i masy dla wymiennika pracującego w przeciwprądzie. Cykliczny proces adsorpcji opisano za pomocą układu równań różniczkowych cząstkowych z warunkami początkowymi i brzegowymi. Ze względu na niskie stężenie składnika organicznego w mieszaninie gazowej przyjęto, że proces adsorpcji jest izotermiczny, co, łącznie z poczynionymi założeniami, pozwoliło na zastosowanie zlinearyzowanego modelu Garga i Ruthvena. W obliczeniach numerycznych procesu

kondensacji współczynniki wnikania ciepła obliczano z korelacji opracowanej w oparciu o własne dane eksperymentalne. Równowagi adsorpcyjne i dynamikę procesu adsorpcji propanolu-2 na węglu aktywnym AP3-60, w warunkach niskich temperatur, określono w oparciu o własne badania eksperymentalne wykonane z wykorzystaniem analizatora grawimetrycznego Hiden. W oparciu o opracowane w pracy modele matematyczne procesów kondensacji niskotemperaturowej i adsorpcji przeprowadzono obliczenia numeryczne, których wyniki wykazały dobrą zgodność z danymi doświadczalnymi. Zbadano wpływ temperatury kondensacji na stopień wykondensowania LZO w kondensatorze. Zazwyczaj obniżaniu temperatury kondensacji towarzyszy obniżenie stężenia LZO w gazach opuszczających kondensator. W badaniach eksperymentalnych stwierdzono, że poniżej -38°C dalsze schładzanie gazów już nieznacznie wpływa na obniżanie stężenia LZO. Efekt ten może być spowodowany tworzeniem się mgły w kondensatorze. Zbadano wpływ temperatury na pojemność sorpcyjną złoża adsorbentu. Zaobserwowano, że pomimo iż pojemność sorpcyjna złoża rośnie z obniżeniem temperatury adsorpcji to z drugiej strony obniżenie temperatury adsorpcji prowadzi do obniżenia wartości dyfuzyjnej stałej czasowej, poszerza się strefa wymiany masy w adsorberze i w końcowym efekcie mniejsze jest wykorzystanie pojemności sorpcyjnej złoża.

W pracy [H.6] i [H.9] przedstawiono wyniki badań doświadczalnych procesu oczyszczania powietrza z par LZO. Przedstawiono model matematyczny procesu i wykazano dobrą zgodność wyników obliczeń z danymi eksperymentalnymi. Stwierdzono, że oczyszczanie mieszanin gazowych w zintegrowanym układzie kondensacja-adsorpcja jest metodą przydatną, gdy stężenie lotnych związków organicznych w mieszaninach gazowych jest stosunkowo duże. W takim przypadku uwydatniają się zalety obu stosowanych procesów: dzięki kondensacji można znacznie zredukować początkowe wysokie stężenie LZO stosunkowo niskim kosztem, ponadto kondensacja jest procesem stosunkowo mało wrażliwym na znaczne wahania początkowego stężenia LZO w mieszaninie gazowej, w którym można osiągnąć stabilne i stosunkowo niskie stężenia LZO w mieszaninie kierowanej do adsorbera, natomiast adsorpcja składnika o niskim stężeniu w mieszaninie z inertem pozwala znacznie ograniczyć nakłady finansowe na budowę adsorberów i wydłużyć czasy przełączania.

W pracy [H.8] przedstawiono wpływ dyfuzyjnych efektów krzyżowych dyfuzji na selektywność procesu rozdziału ciekłej mieszaniny dwuskładnikowej izopropanol-woda, w procesie kondensacji i odparowania. Wykorzystując równania Stephana-Maxwella opisujące stacjonarną dyfuzję molekularną dla układów wieloskładnikowych w warunkach izotermicznych i izobarycznych opracowano dwa modele matematyczne procesu. W modelu (I) uwzględniono opory transportu ciepła i masy w fazie ciekłej, oraz wszystkie elementy odwrotnej macierzy współczynników dyfuzji w fazie gazowej. W modelu (II) pominięto efekty krzyżowe dyfuzji w fazie gazowej (pominięto niediagonalne elementy odwrotnej macierzy współczynników dyfuzji w fazie gazowej). Wyniki obliczeń numerycznych uzyskanych na podstawie obydwu modeli matematycznych dobrze zgadzały się z danymi doświadczalnymi, przy czym nieco lepsze wyniki (temperatury, ilości kondensatu) otrzymano dla modelu (I) uwzględniającego wpływ efektów krzyżowych dyfuzji, szczególnie dla wyższych temperatur odparowania. Obliczenia selektywności procesu prowadzone według obydwu modeli dają zbliżone wartości i dobrze zgadzają się z danymi doświadczalnymi (rozrzut $\pm 10\%$). Oznacza to, że wpływ efektów krzyżowych na selektywność procesu można dla badanego układu pominąć.

W latach 2010 do 2011 byłem kierownikiem projektu badawczego pt. „Modelowanie i optymalizacja zintegrowanego procesu kondensacja niskotemperaturowa – adsorpcja” (2010-2011, nr N N209 345937).

W projekcie przedstawiono wyniki badań procesu oczyszczania gazowej mieszaniny dwuskładnikowej propanol-2 – azot w zintegrowanym układzie kondensacja niskotemperaturowa – adsorpcja. Badania eksperymentalne prowadzono przy przepływie gazu w zakresie od 10 do 20 Nm³/h, stosując jako czynnik chłodzący azot gazowy o temperaturach w zakresie -43 do -80°C. Stężenie LZO w gazie wlotowym zmieniano w zakresie od 10 do 60 g/Nm³. Dla potrzeb procesu optymalizacji opracowano ogólny model obejmujący proces kondensacji niskotemperaturowej i adsorpcji. Przeprowadzono analizę modelu w aspekcie jego zastosowania w obliczeniach optymalizacyjnych zintegrowanego procesu. Jako funkcję celu przyjęto sumę kosztów aparatury, chłodziwa (ciekłego azotu), adsorbentu oraz kosztów jego wymiany. Przeprowadzono obliczenia optymalizacyjne polegające na znalezieniu minimum tak sformułowanej funkcji celu. Wyniki obliczeń wskazują jednoznacznie na występowanie minimum funkcji celu (minimum kosztów). Optymalna różnica temperatur między temperaturą gazów na wlocie do kondensatora, a temperaturą chłodziwa na wylocie z kondensatora maleje wraz ze wzrostem zarówno natężenia przepływu gazu inertnego przez kondensator, jak i stężenia LZO na wlocie do kondensatora zmieniając się w granicach od 2,3 do 12,1°C. Dla weryfikacji opracowanego modelu przeprowadzono porównanie wyników obliczeń z danymi doświadczalnych. Analizując wyniki obliczeń można stwierdzić, że obliczone wartości temperatur są zgodne z wartościami eksperymentalnymi w zakresie ±5°C i ±3°C odpowiednio dla temperatur gazu oczyszczanego i medium chłodzącego opuszczających kondensator. Obliczona na podstawie stężeń sprawność kondensacji w przeważającym zakresie różni się nie więcej niż ±25% od wartości eksperymentalnych. Porównanie eksperymentalnego i obliczonego czasu przebiecia adsorbentu wykazuje różnice nie większe niż ±20%. Optymalny czas przełączania adsorbentu malał wraz ze wzrostem natężenia przepływu i zmieniał się w granicach od 2,0 do 5,4 dni. Zmiana stężenia wlotowego nie miała wpływu na czas przełączania adsorbentu.

B. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

1. Działalność naukowo-badawcza przed doktoratem

W okresie przed uzyskaniem tytułu doktora moje zainteresowania naukowe skupiały się głównie na modelowaniu procesów kondensacji dwu i wieloskładnikowej. Wyniki tych badań zostały opublikowane w dwóch publikacjach.

Równolegle w latach 1986-1990 byłem zaangażowany w prace nad zwiększeniem sprawności procesu sublimacji kondensacji bezwodnika ftalowego (BKF) w obecności inertu, jako współwykonawca celu wdrożeniowego nr 8 pt. „Intensyfikacja wymiany ciepła w specjalnych typach aparatów”. Badania eksperymentalne prowadzone były na przemysłowych kondensatorach pracujących w Zakładach Azotowych w Kędzierzynie-Koźlu. W badaniach tych stwierdzono, że decydujący wpływ na poprawienie sprawności procesu kondensacji sublimacyjnej BKFu ma zwiększenie równomierności przepływu gazu przez kondensator, oraz ograniczenie warunków powstawania mgły. Wyniki badań eksperymentalnych oraz prac obliczeniowych pozwoliły na zaproponowanie zmian konstrukcyjnych w kondensatorach BKFu prowadzących do wzrostu ogólnej sprawności procesu kondensacji sublimacyjnej z 95% do 97%, co przy wielotonazowej produkcji dało zarówno korzyści ekonomiczne jak i efekty w ochronie środowiska. Jednym z wyników prowadzonych badań było uzyskanie patentu nr 163087 pt. „Urządzenie do wydzielania bezwodnika ftalowego z gazów” (współtwórca).

W latach 1990 -1994 w ramach współpracy Instytutu Inżynierii Chemicznej PAN z przemysłem brałem udział w badaniach nad wpływem dodatku amin tłuszczowych, w szczególności Kotaminy – preparatu opracowanego w Instytucie Ciężkiej Syntezy Organicznej „Blachownia” w Kędzierzynie-Koźlu – na wymianę ciepła w procesach wrzenia i

kondensacji pary wodnej. Celem pracy, zleconej przez elektrownię im. T. Kościuszki w Połańcu, było zebranie danych doświadczalnych i dokonanie analizy pracy energetycznych systemów wodno-parowych z dodatkiem Kotaminy zamiast powszechnie stosowanej wówczas w energetyce hydrazyny. Badania doświadczalne przeprowadzono w skali ćwierć-technicznej na instalacji doświadczalnej wybudowanej w Elektrowni w Połańcu. Projekt instalacji doświadczalnej opracowano w Instytucie Inżynierii Chemicznej PAN przez zespół pracowników, w którego skład wchodziłem. Instalacja składała się z dwóch jednakowych zestawów aparatów (parownik i kondensator). W jednym z nich w obiegu zamkniętym krążyła woda z dodatkiem kotaminy, a w drugim woda z dodatkiem hydrazyny. Obydwa układy były zasilane z tego samego źródła zakładowej instalacji pary wodnej. Również wodę chłodzącą doprowadzono do obydwóch kondensatorów z tej samej instalacji wody technologicznej. Takie rozwiązanie pozwalało na zminimalizowanie skutków wahań parametrów (ciśnienia i temperatury) pary grzewczej i wody chłodzącej. W oparciu o badania eksperymentalne wykonane na instalacji w Elektrowni Połaniec stwierdzono, że zastąpienie hydrazyny Kotaminą powoduje wzrost współczynników wnikania ciepła przy wrzeniu o około 10%. Wyniki te zostały potwierdzone w badaniach eksperymentalnych przeprowadzonych na stanowisku badawczym w Instytucie Inżynierii Chemicznej PAN w Gliwicach. Uzyskane wyniki badań opublikowano w czasopiśmie Inżynieria i Aparatura Chemiczna (1995).

2. Działalność naukowo-badawcza po doktoracie

Po obronie pracy doktorskiej moje zainteresowania naukowe skupiły się na trzech głównych kierunkach: badaniach procesów wrzenia i kondensacji w układach wieloskładnikowych, zagadnieniach wymiany ciepła w aparatach zbudowanych z bimetalowych rur żebrowanych oraz oczyszczaniem powietrza z par lotnych związków organicznych (LZO) metodami kondensacyjno-adsorpcyjnymi, które stanowiło podstawę pracy habilitacyjnej i zostało omówione w rozdziale A.

2.1 Badania procesów wrzenia i kondensacji w układach wieloskładnikowych

Od 1997r. zajmowałem się zagadnieniami dotyczącymi procesów wrzenia, oraz wrzenia i kondensacji w układach wieloskładnikowych. W ramach tych prac głównie zajmowałem się modelowaniem matematycznym procesów wrzenia i kondensacji, oraz weryfikacją uzyskiwanych wyników obliczeń z wartościami eksperymentalnymi. W pracach [1], [2] zajmowałem się badaniami procesów wrzenia objętościowego (pool boiling) cieczy wieloskładnikowych. Przedstawiono w nich model matematyczny procesu oparty na wieloskładnikowej teorii ruchu masy, który umożliwia przewidywanie wpływu transportu masy na współczynniki wnikania ciepła w procesie wrzenia. Omówiono sposób wyznaczania rzeczywistego współczynnika wnikania ciepła α w procesie wrzenia mieszaniny wieloskładnikowej opierając się o idealny współczynnik wnikania ciepła α_{id} obliczany, jako średnia ważona – harmoniczna lub arytmetyczna – dla poszczególnych składników mieszaniny. Wykazano dobrą zgodność wyników otrzymanych za pomocą przedstawionego modelu z wartościami eksperymentalnymi. Stwierdzono, że pominięcie oporów dyfuzyjnych w fazie gazowej tylko nieznacznie pogarsza zgodność wyników obliczeń z danymi doświadczalnymi, co może świadczyć, że w procesie wrzenia pęcherzykowego mieszanin wieloskładnikowych główny opór dyfuzyjny leży po stronie ciekłej. Zaobserwowano, że minimum stosunku α/α_{id} dla badanego układu trójskładnikowego metanol-izopropanol-woda jest niższe niż dla odpowiednich układów dwuskładnikowych – co potwierdziło wyniki doświadczeń Grigoriewa dla układu aceton-metanol-woda.

W pracach [3], [5] zajmowałem się problemami wnikania ciepła do odparowującego filmu cieczy wewnątrz rury pionowej. W pracach przedstawiono wyniki doświadczeń nad

odparowaniem filmowym trójskładnikowej cieczy (metanol-izopropanol-woda) spływającej po wewnętrznej ściance rury pionowej. Opracowano nową korelację na liczbę Nusselta w zależności od liczby wrzenia i liczby Kapitzy, dobrze opisującą przejście między konwekcyjnym i pęcherzykowym zakresem odparowania. Potwierdzono doświadczalnie słuszność korelacji Chuna - Sebana dla niskich wartości strumienia cieplnego w przepływie zarówno laminarnym jak i burzliwym. Na podstawie danych eksperymentalnych opracowano korelację określającą wpływ wrzenia pęcherzykowego na współczynnik wnikania ciepła przy spływie grawitacyjnym cieczy.

W pracach [10], [14] opracowano uproszczoną metodę obliczeń współczynnika wnikania ciepła w procesie wrzenia cieczy wieloskładnikowej uwzględniającą wpływ ruchu masy. W przedstawionej metodzie wprowadzono współczynnik R określający stosunek powierzchni wrzącej cieczy do powierzchni grzejnika. Zaproponowano korelację na obliczanie współczynnika R w przypadku wrzenia pęcherzykowego. W przypadku wrzenia filmowego przyjęto, że $R = 1$. Wyniki obliczeń otrzymanych za pomocą przedstawionego modelu porównano z danymi doświadczalnymi dla procesu wrzenia trójskładnikowej mieszaniny metanol-izopropanol-woda, uzyskując dobrą zgodność obliczeń z danymi eksperymentalnymi zarówno dla wrzenia pęcherzykowego jak i wrzenia filmowego.

W pracy [11] przedstawiono wpływ transportu masy na współczynniki wnikania ciepła w procesie wrzenia trójskładnikowej mieszaniny metanol-izopropanol-woda. Opracowano szereg uproszczeń pełnego modelu obliczeń strumieni masowych w fazie ciekłej, opartego na podstawie zlinearyzowanej teorii ruchu masy w zwartej formule macierzowej. Rozpatrywano model pełny (I), oraz modele z następującymi uproszczeniami: pominięto wpływ skończonych strumieni masowych (II), pominięto wpływ efektów krzyżowych dyfuzji (III), założono, że temperatura powierzchni międzyfazowej jest równa temperaturze punktu rosy par o takim składzie jak faza ciekła (IV). Wyniki obliczeń prowadzonych według modeli (I) oraz (II) i (III) były bardzo zbliżone i wykazały dobrą zgodność z danymi doświadczalnymi (błąd średni odpowiednio: 8.12%, 8.14% i 8.26%). Wyniki obliczeń prowadzonych według modelu (IV) znacznie odbiegały od danych doświadczalnych (błąd średni: 40.48%). Analizując wyniki obliczeń stwierdzono, że zaproponowany model bazujący na teorii wieloskładnikowej wymiany masy, jest efektywnym narzędziem do obliczania współczynników wnikania ciepła przy wrzeniu mieszanin wieloskładnikowych. Stwierdzono, że obliczenia prowadzone według modelu pełnego (I) jak i modeli uproszczonych (II) i (III) dają bardzo zbliżone wyniki, natomiast model (IV) może być stosowany jedynie w przypadku wstępowania bardzo dużych strumieni masowych np. w przypadku wrzenia objętościowego, gdy strumienie cieplne są bardzo wysokie (wtedy temperatura powierzchni międzyfazowej jest równa temperaturze punktu rosy par o takim samym składzie jak faza ciekła).

W pracy [12] przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych odparowania filmu wody spływającej po wewnętrznej stronie pionowej rury badawczej do wymuszonego przepływu gazu inertnego. Sformułowano równania bilansowe ruchu ciepła i masy, które oparto na jednowymiarowym modelu przepływu czynników. W wyniku całkowania numerycznego otrzymano profile temperatur, oraz stężenia pary wodnej w fazie gazowej w zależności od długości rury. Wyniki obliczeń numerycznych uzyskane na podstawie przedstawionego modelu dobrze zgadzały się z danymi doświadczalnymi. Stwierdzono, że współczynnik przenikania ciepła odniesiony do różnicy temperatur między ścianką i powierzchnią międzyfazową gaz-ciecz zależy od średniego stężenia gazu inertnego. Zaprezentowano graficzny sposób wyznaczenia współczynnika wymiany ciepła przy wrzeniu, jako funkcje parametrów procesowych (strumienia cieplnego, prędkości przepływu gazu i stężenia inerty w fazie gazowej).

W pracy [13] przedstawiono wyniki badań doświadczalnych odparowania i kondensacji podczas spływu filmowego mieszaniny izopropanol-woda w obecności powietrza, jako gazu

inertnego. Korzystając z równań Stephana-Maxwella opisujących stacjonarną dyfuzję molekularną dla układów wieloskładnikowych i przyjmując różne założenia dotyczące oporów cieplnych i dyfuzyjnych w fazie ciekłej opracowano trzy modele matematyczne procesu odparowania przy spływie filmowym w obecności inertu. W modelu (I) uwzględniono opory transportu ciepła i masy po stronie odparowania i kondensacji. W uproszczonym modelu (II) pominięto opory ciepła i masy po stronie kondensatu, natomiast w modelu (III) dodatkowo opory transportu masy po stronie odparowania. Wyniki obliczeń numerycznych na podstawie przedstawionych modeli dobrze zgadzają się z danymi doświadczalnymi w szerokim zakresie temperatur i stężeń, przy czym dokładność obliczeń uzyskana za pomocą modelu (I) jest nieco lepsza od uzyskanej z modeli (II) i (III), szczególnie dla dużych strumieni masowych. Selektowność procesu zależy stężenia odparowującej mieszaniny izopropanol-woda. Obliczenia prowadzone według modelu (I) dają nieco niższe wartości selektowności w porównaniu z modelami (II) i (III), zwłaszcza dla małych stężeń izopropanolu. Rozrzut między obliczonymi i zmierzonymi wartościami selektowności procesu mieścił się w zakresie $\pm 10\%$ i był nieco mniejszy dla modelu (I) niż dla modeli (II) i (III). Niewielkie różnice w wynikach obliczeń między modelem pełnym (I) i modelem uproszczonym (II) wskazują, że całkowity strumień masy i selektowność procesu w niewielkim stopniu zależą od oporów dyfuzyjnych w fazie ciekłej.

2.2 Badania wymiany ciepła w aparatach z bimetalowych rur żebranych

Z tematyką dotyczącą wymiany ciepła w aparatach wykonanych z rur żebranych zetknąłem się po obronie pracy doktorskiej. W latach 1997 – 2000 brałem udział, jako główny wykonawca, w projekcie celowym pt. „Opracowanie dokumentacji technicznej optymalnych wymienników ciepła z zastosowaniem rur żebranych i uruchomienie produkcji takich wymienników ciepła a zwłaszcza nowoczesnych chłodziw powietrznych” (Nr. 3T09C01397C/3488). Wykonawcą projektu była Fabryka Aparatury i Urządzeń „FAMET” S.A. w Kędzierzynie Koźlu, natomiast realizatorem prac badawczo-rozwojowych był Instytut Inżynierii Chemicznej PAN w Gliwicach. Celem prac badawczych było opracowanie charakterystyk cieplnych, oraz przepływowych wkładów rurowych wykonanych z rur żebranych. Badania prowadzone były na instalacji doświadczalnej zaprojektowanej specjalnie do tego celu i zbudowanej na terenie fabryki „FAMET” w Kędzierzynie-Koźlu. Przebadano szereg wkładów wykonanych z wiązek bimetalowych rur żebranych produkowanych przez „FAMET”: wykonanych metodą walcowania na zimno (typ Extruded i Extruded-Serrated) i wykonanych techniką nawijania taśmą (typy: K, KL i G). Przebadano również wkłady zbudowane z rur nawijanych taśmą produkcji „ARCO-FIN” i „CHEMET”. W sumie przeprowadzono badania eksperymentalne na 15 wkładach wykonanych z rur żebranych różnych typów i w różnej konfiguracji geometrycznej. Otrzymane dane doświadczalne posłużyły do opracowania korelacji na współczynniki wnikania ciepła i oporów przepływu przez wiązki rur żebranych. Opracowane korelacje zostały zaimplementowane do używanego przez Fabrykę Aparatury i Urządzeń „FAMET” S.A. programu komputerowego projektowania i doboru chłodziw powietrznych. Efektem wdrożenia było wprowadzenie do produkcji nowych typów rur żebranych, co w pierwszych dwóch latach po wdrożeniu (2000 i 2001r.) dało przychód ok. 11.6 mln złotych rocznie. (wyprodukowano i sprzedano 950 000 mb rur żebranych).

W latach 2003 i 2004 dwukrotnie wykonywałem ekspertyzy dla Fabryki Aparatury i Urządzeń „FAMET” S.A. p.t. „Opracowanie i wykonanie pomiarów strumienia przepływu powietrza wentylatora chłodziw 63-EA9402 i 63-EA9452” dotyczące pomiarów strumienia przepływu powietrza oraz równomierności jego rozprzysięgu na produkowanych przez „FAMET” przemysłowych chłodziwach zbudowanych z wkładów z rur żebranych. Pomiaru wykonane zostały na instalacji przygotowanej do testów w fili FAMET-u w Kępnie.

Przebadano pojedynczy moduł chłodnicy powietrznej składający się z wiązki rur żebrowanych o wymiarach 480x540 cm i wentylatora.

Wyniki opublikowano w szeregu prac naukowych: w [4] przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych wpływu kierunku ruchu ciepła na współczynniki wnikania ciepła dla przepływu powietrza w prądzie krzyżowym, prostopadłym do wiązki rur o żebrowanych w szerokim zakresie liczb Reynoldsa od 600 do 7000. Stwierdzono, że podobnie jak dla przepływu burzliwego w rurze, wartości współczynników wnikania ciepła od strony powietrza są wyższe w przypadku jego chłodzenia niż w przypadku ogrzewania, oraz przedstawiono korelacje do obliczeń współczynników wnikania ciepła w przypadku ogrzewania i chłodzenia gazu.

W pracy [6] przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych wpływu kierunku ruchu ciepła na opory przepływu w krzyżowo-prądowym przepływie powietrza, prostopadłym do wiązki rur wysoko-żebrowanych w zakresie liczb Reynoldsa od 2000 do 10000. Stwierdzono wpływ kierunku ruchu ciepła na wartość współczynnika oporu, przy czym dla przypadku ogrzewania powietrza (wymiana ciepła od powierzchni rur żebrowanych do powietrza) współczynnik oporowy jest większy, a dla chłodzenia powietrza mniejsze od uzyskanego w warunkach izotermicznego przepływu powietrza przez wiązki rur żebrowanych. Opracowano równanie korelacyjne uwzględniające wpływ kierunku ruchu ciepła na wartość współczynnika oporu przepływu.

W pracy [9] przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań wymiany ciepła i oporów przepływu od strony powietrza przepływającego prostopadle do rur żebrowanych typu extruded - produkcji „FAMET”. Bimetaliczne rury żebrowane typu extruded składają się z rdzenia rury, wykonanego ze stali, oraz żeber wykonanych z metalu bardziej plastycznego – najczęściej glinu wykonanych poprzez wytlaczanie metodą rozwałcowywania na zimno z rury z glinu nałożonej na rurę rdzeniową. Badania doświadczalne wykonano dla wiązek wykonanych z 5 różnych rur typu extruded różniących się średnicą, wysokością żebra, oraz podziałką i grubością żebra. W badaniach wykonanych dla przepływu powietrza przez dwa, cztery i sześć rzędów wiązek rur zakres liczb Reynoldsa zmieniano od 2000 do 10000, a temperaturę medium w rurach od 80 do 310°C. Współczynnik wnikania ciepła od strony powietrza określano przy pomocy metody ε -NTU. Wyniki badań eksperymentalnych rur typu extruded porównano z korelacjami literaturowymi uzyskując wielkości liczby Nusselta wyższe o ok. 20%. Opracowano i przedstawiono korelację do obliczania współczynników wnikania ciepła i oporów przepływu od strony powietrza w wymiennikach ciepła wykonanych z bimetalowych rur typu extruded. Wyniki badań w wysokiej temperaturze medium chłodzonego (310°C) nie wykazały obniżenia się efektywności cieplnej żeber, (która mogła by być spowodowana pogorszeniem się w wysokiej temperaturze kontaktu cieplnego między rurą rdzeniową, a żebrami).

W pracy [7] przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań wymiany ciepła i oporów przepływu od strony powietrza przepływającego prostopadle do wiązki rur o żebrowanych typu extruded-serrated (o żebrowanie wytłaczane metodą walcowania na zimno, z nacięciami wzdłużnymi i nachylonymi końcówkami żeber). Przebadano dwa wkłady rur różniące się podziałką i grubością żeber. Opracowano korelację na współczynniki wnikania ciepła i opory przepływu od strony powietrza. Porównano wartości współczynników wnikania ciepła i oporów przepływu uzyskanych dla rur typu extruded-serrated z analogicznymi wielkościami uzyskanymi dla rur typu extruded. Współczynniki wnikania ciepła dla rur typu extruded-serrated były około 20% większe niż dla rur typu extruded przy tych samych liczbach Reynoldsa, jednakże opory przepływu również były znacząco wyższe. Porównano wartości współczynników wnikania ciepła od oporów przepływu powietrza, a także dokonano analizy rocznych kosztów ruchomych i inwestycyjnych i określono zakres optymalnego zastosowania wiązek rurowych wykonanych zarówno z rur typu extruded jak i extruded-serrated.

W pracy [8] przedstawiono wyniki badań wpływu różnych technologii wykonania bimetalowych rur żebrowanych na sprawność wymiany ciepła od strony powietrza chłodzącego. Badania prowadzono dla 4 typów rur: G – żebra nawijane taśmą w rowku wykonanym w rurze rdzeniowej, L- żebra nawijane taśmą na rurze rdzeniowej, KL- żebra nawijane taśmą na rurze rdzeniowej o powierzchni radełkowej, oraz E – ożebrowanie wytłaczane metodą walcowania na zimno (extruded). Eksperymenty prowadzono dla czterech sześciorzędowych wiązek rur ożebrowanych umieszczonych w układzie szachownicowym. Opracowano korelację na współczynnik wnikania ciepła od strony powietrza dla wszystkich badanych typów rur ożebrowanych. Porównanie otrzymanych wyników prowadzi do wniosku, że dla małych wartości liczb Reynoldsa ($Re < 3000$) wszystkie typy rur wykazują podobne wartości liczb Nusselta i Colburna. Dla dużych liczb Reynoldsa wiązki typu E wykazują większą sprawność cieplną od pozostałych, co można wyjaśnić lepszym w tym przypadku kontaktem rury rdzeniowej z materiałem żebra.

2.3 Prace inne

W latach 2006-2007 brałem udział w ramach współpracy Instytutu Inżynierii Chemicznej PAN w Gliwicach z Zakładami Azotowymi „Kędzierzyn” S.A. w doświadczalnych pracach dotyczących zwiększenia wydajności wytwarzania estrów kwasu ftalowego, poprzez zastosowanie membran do separacji powstającej w wyniku reakcji estryfikacji wody. Zaproponowano rozwiązanie składające się ze zintegrowanego z reaktorem modułu membranowego, do którego pompowana jest mieszanina reakcyjna. W module membranowym następuje oddzielenie wody od pozostałych składników reakcji, które zawracane są do reaktora. W trakcie realizacji umowy zbudowano stanowisko badawcze na instalacji przemysłowej wytwarzania estrów kwasu ftalowego FDB/FDIB w Zakładach Azotowych „Kędzierzyn” składające się z modułu membranowego, podgrzewacza, pompy próżniowej, układu wymrażania permeatu oraz pompy cyrkulacyjnej. Moduł membranowy (zaprojektowany i wykonany w Instytucie Inżynierii Chemicznej PAN w Gliwicach) umożliwił zabudowę płaskich membran polimerowych. Przeprowadzono badania na następujących membranach polimerowych produkcji Sulzer Chemtech GmbH: Pervap 1005, Pervap 2201D oraz Pervap 2510. Uzyskane wyniki doświadczalne pozwoliły na wyselekcjonowanie do dalszych badań długookresowych membrany Pervap 2201D, która cechowała się największą wydajnością i selektywnością, a także wysoką odpornością termiczną (maksymalna temperatura pracy 95-100°C) oraz chemiczną na obecność kwasu siarkowego (do 3% wag.), który stosowany jest jako katalizator.

W latach 2004 – 2007 współpracowałem z Research Institute for Chemical and Process Engineering, University of Pannonia, w ramach współpracy naukowo-technicznej z zagranicą wynikającej z polsko-węgierskich umów międzyrządowych, przy realizacji projektu badawczego dotyczącego określenia optymalnych parametrów enzymatycznej produkcji glicerynianu monostearynowego w procesie estryfikacja-perwaporacja. Glicerynian monostearynowy tradycyjnie produkowany jest poprzez hydrolizę trójglicerydu. Konwencjonalny sposób produkcji prowadzony jest w wysokiej, sięgającej 200°C temperaturze, w której dochodzi do niepożądanych reakcji prowadzących do zanieczyszczeń zapachowych i przebarwień produktu. Badania prowadzono w układzie doświadczalnym estryfikacja-perwaporacja, składającym się z reaktora, pompy obiegowej, modułu membranowego, układu wymrażającego permeat i pompy próżniowej. Badania prowadzono w temperaturze 40°C, dla różnych początkowych stosunków molowych reagentów (kwas stearynowy – glicerol) i różnej początkowej zawartości wody, stosując dioxan jako rozpuszczalnik. Jako membranę zastosowano membranę produkcji Pervatech GmbH Pervap 1005. Wyniki opublikowano w pracy [15], w której zaproponowano prowadzenie obliczeń według modelu dla reakcji enzymatycznych (Random Bi-Bi). Wyniki obliczeń otrzymane

według zaproponowanego modelu wykazały dobrą zgodność z danymi eksperymentalnymi. Przeanalizowano wpływ początkowej zawartości wody na szybkość reakcji uzyskując najwyższą szybkość reakcji przy początkowej zawartości wody w granicach 0.5%, co może świadczyć, że jest to ilość, przy której aktywność enzymu jest optymalna.

W latach 2010-2011 zajmowałem się problemami usuwania ditlenku węgla z wodnych roztworów amin: monoetanolaminy (MEA) i trietanolaminy (TEA) poprzez desorpcję na membranach hydrofobowych PDMS Pervatech (membrana naniesiona na wewnętrznej stronie rurki ze spieku ceramicznego o średnicy 7 mm i długości 250mm) oraz 4060 Sulzer (membrana płaska o średnicy 160 mm). Badania doświadczalne prowadzono na stanowisku wyposażonym w reaktor, pompę obiegową, moduł membranowy, układ wymrażania permeatu i pompę próżniową. Wodne roztwory amin po wcześniejszym nasyceniu ditlenkiem węgla w reaktorze poddawano procesowi desorpcji na badanych membranach. W pracach [16] i [17] zbadano wpływ natężenia przepływu i temperatury i stężenia roztworu amin na wielkość strumienia permeatu i selektywność rozdziału. Stwierdzono, że wielkość strumienia masy ditlenku węgla rośnie z temperaturą procesu, natomiast nie zależy od stężenia aminy w roztworze. W zakresie przepływu burzliwego ($Re > 10000$) nie stwierdzono wpływu prędkości przepływu roztworu nad membrana na wielkość strumienia masy ditlenku węgla w permeacie. Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem stężenia aminy w roztworze maleje selektywność procesu. Przebadane membrany cechowały się podobnymi własnościami separacyjnymi (selektywność procesu, gęstość strumienia permeatu). W badaniach długookresowych (180 dni) jedynie membrany PDMS Pervatech nie wykazały oznak degradacji, co umożliwia ich stosowanie w praktyce. Obliczone według zaproponowanego modelu wielkości strumieni masowych miały dobrą zgodność z wartościami zmierzonymi doświadczalnie.

Łącznie mój dorobek naukowy obejmuje 27 publikacji w czasopismach naukowych w tym 25 publikacji z listy filadelfijskiej, 11 publikacji w materiałach konferencji krajowych i międzynarodowych. Moje publikacje po doktoracie cytowane były (bez samo-cytowań) 41 razy. Według Web of Science indeks Hirsha wynosi 4. Brałem udział w 5 projektach badawczych, w tym w dwóch jako kierownik projektu. Jestem autorem i współautorem 9 niepublikowanych raportów i sprawozdań z prac naukowo-badawczych wykonanych w ramach współpracy z przemysłem i instytucjami badawczymi. Jestem współtwórcą 3 patentów

3. Działalność pozanaukowa.

Od początku pracy w Instytucie zajmuję się tematyką związaną z komputerami i komputeryzacją. Od momentu założenia sieci internetowej w Instytucie i podłączeniu go do Internetu pełnię obowiązki administratora sieci LAN, oraz dbam o bezpieczeństwo w sieci LAN. W latach 1998 do 2003 roku zasiadałem z ramienia Instytutu w Radzie Użytkowników Śląskiej Akademickiej Sieci Komputerowej.

Od 1990 r. zajmuję się koordynacją i zarządzaniem sprawami patentowymi w Instytucie.

Od 2006 r. jestem członkiem Rady Naukowej Instytutu Inżynierii Chemicznej PAN w Gliwicach, jako reprezentant asystentów i adiunktów.

W 2009 r. zostałem mianowany przez Dyrektora Instytutu Administratorem bezpieczeństwa informacji (ABI) z zadaniem nadzorowania przestrzegania stosowania środków technicznych i organizacyjnych zapewniających ochronę przetwarzanych danych osobowych w Instytucie.

W 2011 r. zostałem powołany przez Radę Naukową Instytutu Inżynierii Chemicznej PAN, jako Rzecznik Dyscyplinarny w Instytucie

Byłem współorganizatorem szeregu konferencji naukowych krajowych organizowanych przez Instytut.

Wykaz innych (niewchodzących w skład osiągnięcia wymienionego w pkt. A) opublikowanych prac naukowych

- [1] R.Krupiczka, **A.Rotkegel**, Z.Ziobrowski, 1998, Prediction of the heat transfer coefficients in the boiling of multicomponent mixture, *Inż.Chem. i Proc.*, 19, 4, 703-720
- [2] R.Krupiczka, **A.Rotkegel**, Z.Ziobrowski, 2000, The influence of mass transport on the heat transfer coefficients during the boiling of multicomponent mixtures. *Int.J.Therm.Sci.*, 39, 6678-672
- [3] **A.Rotkegel**, R.Krupiczka, 2001, Badania eksperymentalne wnikania ciepła do odparowującego filmu cieczy wewnątrz rury pionowej. *Inż. Chem. i Proc.* **22**, zeszyt 3E, 1225-1230
- [4] H.Walczyk, **A.Rotkegel**, 2001, Wpływ kierunku ruchu ciepła na wymianę ciepła przy prostym przepływie powietrza do wiązki rur ożebrowanych. *Inż. Chem. i Proc.* **22**, 3E, 1429-1434
- [5] R.Krupiczka, **A.Rotkegel**, Z.Ziobrowski, 2002, Heat Transfer to Evaporating liquid Films within a Vertical Tube, *Chem.Eng and Proc.*, 41, 23-28
- [6] H.Walczyk, **A.Rotkegel**, 2002, Wpływ kierunku ruchu ciepła na opory przepływu powietrza przez wiązki rur ożebrowanych, *Inż. Chem. i Proc.*, **23**, 219-227
- [7] R.Krupiczka, **A.Rotkegel**, H. Walczyk, 2002, Comparison of airside performance of extruded-serrated and extruded finned tubes bundles. *Inż. Chem. i Proc.*, 23, 383-395
- [8] R.Krupiczka, **A.Rotkegel**, H.Walczyk, 2003, On the airside heat transfer performance of finned tube bundles. *Inż. Chem. i Proc.*, 24, 21-32
- [9] R.Krupiczka, **A.Rotkegel**, H.Walczyk, L.S.Dobner, 2003, An experimental study of convective heat transfer from extruded type helical finned tubes, *Chem.Eng. and Proc.* 42, 1, 29-38
- [10] R. Krupiczka, **A.Rotkegel**, Z. Ziobrowski, 2004, A simplified method of calculation of the heat transfer coefficients during boiling of multicomponent mixtures, *Inż. Chem. i Proc.* 25, 189-199

- [11] R.Krupiczka, **A.Rotkegel**, Z.Ziobrowski, 2004, The influence of mass transport on the heat transfer coefficients during the film boiling of multicomponent mixtures, *Chem. Eng. and Proc.* 43, 949-954
- [12] R. Krupiczka, Z. Ziobrowski, **A. Rotkegel**, 2008, Evaporation of water film to forced flow of inert gas inside a vertical tube, *Chem. and Proc. Eng.*, **29** , 541-549
- [13] Z.Ziobrowski, **A.Rotkegel**, R.Krupiczka, 2009, Evaporation of a binary liquid film in the presence of stagnant inert gas, *Chem. and Proc. Eng.*, **30** , 13-24
- [14] R.Krupiczka, **A.Rotkegel**, Z.Ziobrowski, 2009, Mass transport effect on the heat transfer coefficient during boiling of multicomponent mixture, *Heat Mass Transfer*, **45** , 945-950
- [15] Z. Ziobrowski, K. Kiss, **A. Rotkegel**, N. Nemestothy, R. Krupiczka, L. Gubicza, 2009, Pervaporation aided enzymatic production of glycerol monostearate in organic solvents, *Desalination*, 241 , 212-217, (2009)
- [16] Z.Ziobrowski, **A.Rotkegel**, R.Krupiczka, 2011, Carbon dioxide removal from MEA – water solution on PDMS tubular membrane, *Chem. and Proc. Eng.*, 32, 4, 281-290
- [17] Z.Ziobrowski, R.Krupiczka, **A.Rotkegel**, 2012, Usuwanie ditlenku węgla z wodnych roztworów amin poprzez desorpcję na hydrofobowych membranach, *Przemysł Chemiczny*, 91/7, 1449-1451

