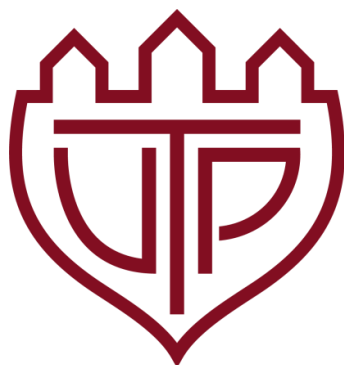


UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNO – PRZYRODNICZY

im. J. J. Śniadeckich w Bydgoszcy

Wydział Inżynierii Mechanicznej



AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Krzysztof Królikowski

**SEPARACJA MIESZANIN TWORZYW POLIMEROWYCH NA
PODSTAWIE RÓŻNICY DWÓCH TWARDOŚCI**

PROMOTOR

DR HAB. INŻ. KAZIMIERZ PISZCZEK, PROF. NADZW. UTP

BYDGOSZCZ, 2018

1. Uzasadnienie wyboru tematu

Istnieje kilka metod postępowania z odpadami tworzywowymi: składowanie, spalanie w celu odzysku energii, ponowne wykorzystanie oraz recykling. Utylizacja tworzyw poprzez składowanie wymaga dużych obszarów oraz znacznych okresów trwania w celu ich degradacji. Produkcja energii poprzez spalanie tworzyw może powodować emisje gazów takich jak tlenki azotu, tlenki siarki, pyły, dioksyne. Obecnie jednym z najważniejszych działań zmniejszenia wpływu tworzyw na środowisko jest recykling, który w ciągu ostatnich dziesięcioleci przyczynił się do ograniczenia zużycia ropy naftowej, emisji zanieczyszczeń. Metody recyklingu dzielą się na recykling mechaniczny (materiałowy) lub chemiczny (surowcowy). Jedną z głównych form zagospodarowania odpadów tworzyw polimerowych w krajach Europy Środkowej jest recykling mechaniczny.

W celu doprowadzenia odpadu do postaci czystego materiału w procesie recyklingu materiałowego niezbędne jest wykonanie szeregu operacji jednostkowych takich jak: oczyszczanie wstępne, sortowanie, rozdrabnianie, mycie, suszenie. Niewątpliwie najbardziej kłopotliwym etapem jest sortowanie (separacja). Sortowanie jest procesem wyodrębniania konkretnych rodzajów tworzyw z ich mieszaniny i jest nierozłącznym etapem recyklingu materiałowego odpadów polimerowych. Konieczność prowadzenia tego procesu wynika z niemieszalności termodynamicznej większości polimerów. Duża różnorodność tworzyw wymusza udoskonalanie obecnych metod oraz poszukiwanie nowych sposobów separacji ponieważ zastosowanie tylko jednej technologii nie pozwala na dokładne rozdzielanie strumienia odpadów.

Procesy separacji odpadów użytkowych można podzielić na makroseparację elementów nierozdrobnionych, wykonywaną dość często ręcznie oraz mikroseparatorcję elementów rozdrobnionych do rozmiarów nie większych niż kilka milimetrów, prowadzoną w zautomatyzowanych urządzeniach. Aby rozdział na poszczególne frakcje był możliwy niezbędna jest identyfikacja składników mieszaniny. Urządzenia do automatycznej mikroseparatorcji wykorzystują różne techniki detekcyjne, takie jak spektroskopia masowa, neutronowa, rentgenowska, bliskiej podczerwieni, fluorescencyjna oraz techniki optyczne i termooptyczne. Inne techniki mikrosortowania zautomatyzowanego wykorzystują różnice właściwości fizycznych mieszaniny takie jak: gęstość, rozpuszczalność, właściwości elektrostatyczne. Jak dotąd nie jest znana metoda wykorzystująca różnicę w twardości.

Mając na uwadze zapotrzebowanie przemysłu recyklingu tworzyw na nowe technologie separacji za celowe uznano opracowanie nowatorskiej metody rozdziału mieszanin tworzyw polimerowych. Brak doniesień literaturowych z zakresu rozdziału tworzyw na podstawie różnicy w twardości oraz pozytywne wyniki badań wstępnych z zakresu rozróżniania tworzyw tą metodą stanowiły podstawę podjętej przeze mnie tematyki rozprawy doktorskiej.

2. Sformułowanie celu rozprawy

Głównymi celami poznawczymi rozprawy są:

- szczegółowa analiza stanu wiedzy z zakresu poznanych metod separacji oraz dokonanie zgłoszenia patentowego nowej metody rozdziału,
- przeprowadzenie badań eksperymentalnych, (rozpoznawczych i zasadniczych),
- opracowanie modeli matematycznych badanych obiektów (mieszanin dwuskładnikowych),
- weryfikacja osiągnięcia założonego celu poprzez sprawdzenie spełnienia kryterium skuteczności.

Cele użytkowe rozprawy obejmują budowę prototypowego stanowiska badawczego – separatora igłowego oraz sprawdzenie poprawności jego działania, a także określenie warunków prowadzenia separacji dzięki którym będzie można przeprowadzić badania eksperymentalne według założonego modelu badań.

Eksperymentalna weryfikacja hipotezy badawczej prowadzona będzie w warunkach eksperymentu laboratoryjnego w wyniku badań zasadniczych - procesów separacji dwuskładnikowych mieszanin PP, PE, PVC, PET, ABS. Badania będą realizowane zgodnie z planem eksperymentu. Jako zmienne wejściowe procesu separacji przyjęto: siłę nacisku igieł, prędkość obrotową układu rozdzielającego, temperaturę rozdzielanej mieszaniny.

3. Hipoteza rozprawy

W wyniku przeprowadzonego studium literaturowego, analizy stanu techniki a także na podstawie zrealizowanych badań własnych sformułowano następującą hipotezę badawczą: *różnicę twardości materiałów można skutecznie wykorzystać do rozdziału zmieszanych tworzyw polimerowych. Przypuszcza się, że skuteczność rozdziału zależy od siły nacisku igieł, prędkości obrotowej układu rozdzielającego oraz temperatury mieszaniny rozdzielanej.*

Wykorzystanie twardości tworzyw polimerowych do ich separacji jest nowatorskim rozwiązaniem zastrzeżonym zgłoszeniem patentowym na sposób oraz urządzenie do separacji mieszanin tworzyw polimerowych. Stwierdzono, że w źródłach literaturowych brak jest informacji o separacji tworzyw polimerowych tą metodą.

4. Przedstawienie zakresu pracy

Rozprawa doktorska składa się z ośmiu zasadniczych rozdziałów.

W **rozdziale pierwszym** przeprowadzono analizę literatury z zakresu metod separacji tworzyw polimerowych oraz rozpoznanie aktualnego stanu techniki związanego z tematyką rozprawy.

W **rozdziale drugim** przedstawiono zgłoszenie patentowe nowego sposobu oraz urządzenia do separacji mieszanin tworzyw polimerowych na podstawie różnicy w twardości, a także budowę prototypowego separatora igłowego.

Przeprowadzone działania dały podstawę do sformułowania hipotezy rozprawy oraz określenia celów i zakresu badań eksperymentalnych co opisano w **rozdziale trzecim**.

Następnie dokonano oceny poprawności funkcjonowania prototypowego separatora igłowego na podstawie serii badań rozpoznawczych procesu dla dwóch rodzajów mieszanin PP/PS oraz PP/ABS. Wyniki separacji posłużyły do wyznaczenia zakresu modernizacji separatora igłowego.

Wyniki pomiaru siły nacisku igieł, prędkości obrotowej, wpływu udziału masowego oraz warunków termicznych na efektywność procesu separacji omówiono w **rozdziale czwartym**.

W toku wykonanych badań rozpoznawczych zdobyto doświadczenie w obsłudze i funkcjonowaniu separatora, a także zauważono elementy wymagające poprawy, które postanowiono wyeliminować w wyniku modernizacji stanowiska. Konstrukcję oraz ocenę poprawności funkcjonowania zmodernizowanego separatora igłowego opisano w **rozdziale piątym**.

Badania zasadnicze separacji dziesięciu dwuskładnikowych mieszanin tworzyw (PVC, PET, PP, ABS, PE) przeprowadzono zgodnie z planem trójwartościowym kompletnym dla trzech zmiennych wejściowych oraz dwóch zmiennych zależnych. Wybór planu eksperymentu opisano w **rozdziale szóstym**.

Następnie opracowano modele matematyczne badanych obiektów przy wykorzystaniu oprogramowania STATISTICA 10 (StatSoft Polska). Szczegółową analizę modeli oraz spełnienie założonego kryterium skuteczności procesu opisano w **rozdziale siódmym**.

W **rozdziale ósmym** rozprawy przedstawiono wnioski poznawcze i użytkarne, wynikające z przeprowadzonych badań.

5. Etapy badań eksperymentalnych

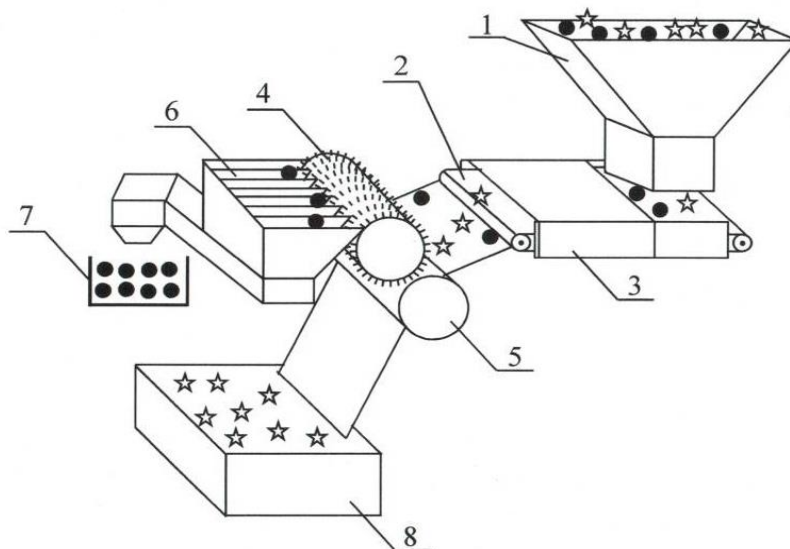
Badania eksperymentalne wykonano dzieląc je na trzy etapy:

- etap pierwszy obejmował ocenę poprawności działania prototypu separatora igłowego na podstawie badań rozpoznawczych procesu separacji. Badania dostarczyły informacji o zakresie modernizacji tego separatora,
- etap drugi obejmował sprawdzenie poprawności działania zmodernizowanego stanowiska badawczego,
- w etapie trzecim, po przygotowaniu planu badań w oparciu o teorię planowania eksperymentu, wykonano badania zasadnicze przy użyciu zmodernizowanego separatora igłowego.

6. Zgłoszenie patentowe

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury z zakresu metod separacji tworzyw polimerowych, a także na podstawie badania stanu techniki wykazano, że brak jest metody separacji tworzyw na podstawie różnicy ich twardości. Po wykonaniu wstępnych prób różnicowania tworzyw w zależności od ich twardości zastrzeżono w Urzędzie Patentowym nowy sposób oraz urządzenie do separacji mieszanin tworzyw polimerowych.

Na rys. 1 przedstawiono schemat urządzenia zastrzeżonego zgłoszeniem patentowym.

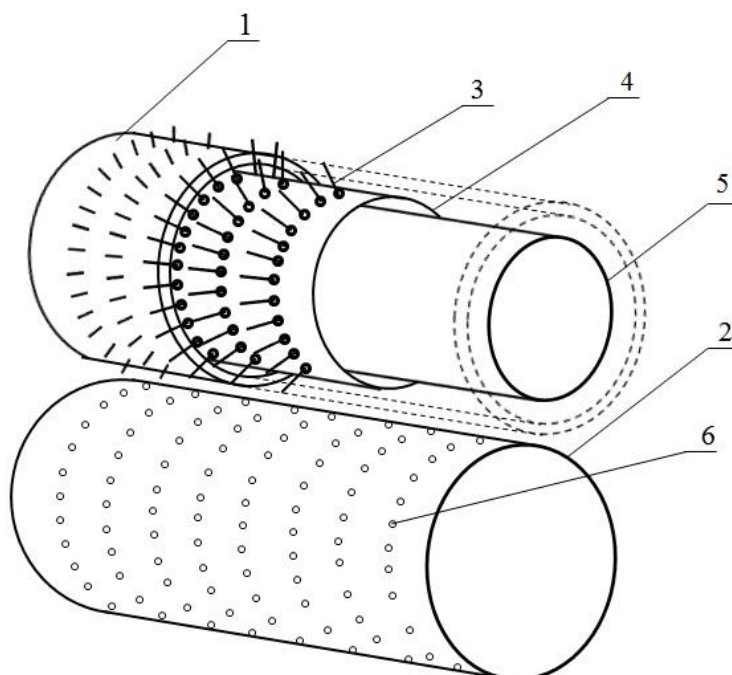


Rys.1. Schemat urządzenia zastrzeżonego zgłoszeniem patentowym: 1 – lej zasypowy, 2 – transporter, 3 – układ grzewczy, 4 – wałek górny układu rozdzielającego, 5 – wałek dolny układu rozdzielającego, 6 – zgarniacz, 7 – pojemnik na tworzywo o mniejszej twardości, 8 – pojemnik na tworzywo o większej twardości, opracowanie własne

Urządzenie wyposażone jest w specjalnie wyprofilowany lej zasypowy (1) rozprowadzający mieszaninę tworzyw na całej szerokości taśmy transportującej (2). Transporter wyposażony jest w układ grzewczy (3). Taśma wprowadza rozdzielaną mieszaninę tworzyw na wałek dolny (5). Igły walca górnego (4) przebijają tworzywo o mniejszej twardości. Walce obracają się w przeciwnych kierunkach z tą samą prędkością obrotową w sposób umożliwiający ciągłe pobieranie cząstek

mieszaniny. Igły na walcu górnym rozmieszczone są w rzędach. Pomędzy rzędami igieł znajdują się elementy układu zgarniającego (6) w postaci płaskowników wygiętych w kształt półkolisty umieszczonych w bliskiej odległości od powierzchni tego walca w sposób umożliwiający zgarnianie cząstek tworzywa zatrzymanych na igłach. Układ zgarniający wyposażony jest dodatkowo w płytę kierującą oddzielone tworzywo do pojemnika (7). Składniki mieszaniny o większej twardości zbierane są w pojemniku (8). W przypadku mieszanin zawierających więcej niż dwie frakcje składników rozdział następuje w kolejnym systemie walców wyposażonym w igły o większej sile nacisku. W miarę potrzeby rozdział można prowadzić w temperaturze otoczenia lub w temperaturze podwyższonej.

Na rys. 2. przedstawiono budowę układu rozdziałającego.



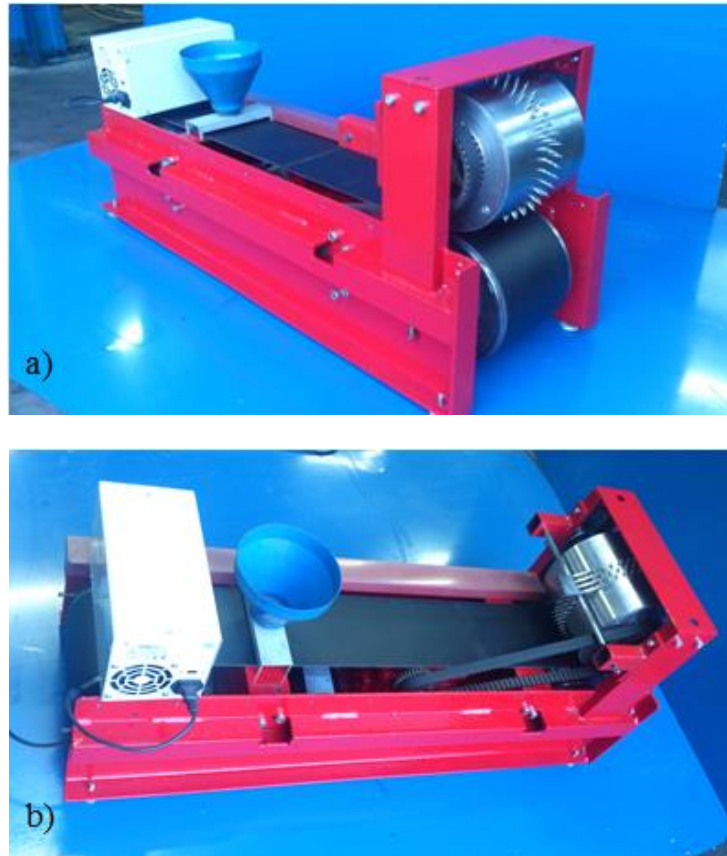
Rys. 2. Układ rozdziałający separatora: 1- walec górny przebijający, 2 – walec dolny transportujący, 3 – igły, 4 – gumowy cylinder, 5 – stalowy cylinder, 6 – otwory odpowiadające punktom styku igieł, opracowanie własne

Walec górny (1) wyposażony jest w igły (3) o odpowiednim profilu umożliwiającym przebicie oraz zaczepienie tworzywa w sposób umożliwiający oderwanie elementów tworzyw przez układ zgarniaczy. Metalowa powierzchnia walca transportującego (2) jest pokryta tworzywem elastomerowym i zawiera otwory (6) odpowiadające punktom styku igieł walca górnego. W metalowych ścianach walca górnego znajdują się otwory do suwliwego umieszczenia igieł przebijających. Takie wykonanie korpusu walca zabezpiecza igły przed wyginaniem podczas przebijania tworzywa. We wnętrzu walca górnego osadzony jest gumowy cylinder (4) otaczający mniejszy stalowy cylinder (5) przymocowany wraz z cylindrem gumowym do ścian bocznych zewnętrznego (2). Igły osadzone są na gumowym cylindrze. Siłę nacisku, z jaką igły mogą oddziaływać na rozdzielaną mieszaninę, można regulować zmieniając ciśnienie gazu wprowadzanego do cylindra gumowego.

7. Badania rozpoznawcze

7.1. Prototypowe stanowisko badawcze – separator igłowy

Badania rozpoznawcze separacji prowadzono na prototypowym stanowisku badawczym „Separator igłowy” przedstawionym na rys. 3a i 3b.



Rys. 3. Prototypowe stanowisko badawcze – Separator igłowy: a) rzut boczny, b) rzut z góry, konstrukcja własna

Szerokość taśmy transportera wynosi 150 mm. Prędkość obrotowa regulowana jest od 2 min^{-1} do 20 min^{-1} . Zakres regulacji siły nacisku igieł wynosi od 10 N/mm^2 do 225 N/mm^2 . W zgłoszeniu patentowym transporter jest osobnym układem który przekazuje tworzywa na walec dolny. W konstrukcji wykorzystanej w badaniach rozpoznawczych taśma transportująca pracuje na walcu dolnym. Takie rozwiązanie przyczynia się do płynniejszej pracy układu rozdzielającego.

Układ rozdzielający separatora tworzą walce o średnicy 192 mm. Walec górny posiada trzy rzędy igieł (po 46 w każdym rzędzie) o średnicy 0,55 mm. Odległość między igłami wynosi 14 mm, odległość między rzędami 12 mm. Igły rozmieszczone są na przemian.

7.2. Cele i zakres badań rozpoznawczych

Podstawowym celem przeprowadzenia badań rozpoznawczych było:

- sprawdzenie poprawności funkcjonowania prototypowego stanowiska badawczego - separatora igłowego,
- zbadanie wpływu zmiennych procesowych takich jak: siła nacisku igieł, prędkość obrotowa pary walców, warunki termiczne, udział masowy mieszaniny na efekty separacji,

- zdobycie praktycznej wiedzy i umiejętności niezbędnych do prawidłowego zaplanowania i wykonania badań zasadniczych,
- uzyskanie wiedzy technicznej w celu określenia zakresu modernizacji separatora igłowego.

Badanie wpływu zmiennych procesowych na efekty separacji przeprowadzono w trzech etapach. Podczas pierwszego etapu badano wpływ siły nacisku igieł oraz prędkości obrotowej pary walców. W etapie drugim badano udział masowy mieszaniny. W etapie trzecim badano wpływ warunków termicznych.

7.3. Rodzaje mieszanin badanych

Materiał badawczy we wszystkich trzech etapach stanowiły dwuskładnikowe mieszaniny tworzyw powstałe z pocięcia płyt grubości 2 mm do postaci prostopadłościanów o podstawie kwadratowej i wymiarach 19 mm x 19 mm. Podczas pierwszego etapu rozdzielano mieszaniny PP/PS o udziale masowym 50/50 % o twardości 68 °Sh D (polipropylen) oraz 85 °Sh D (polistyren). Tę samą mieszaninę wykorzystano w drugim etapie lecz o zmiennych udziałach masowych poszczególnych składników mieszaniny, co przedstawia tab. 1.

Tabela 1. Skład mieszanin, % wag.

Symbol Skład	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
PP	10	20	30	40	50	60	70	80	90
PS	90	80	70	60	50	40	30	20	10

W etapie trzecim separowano mieszaniny polipropylenu (PP) o twardości 68 °Sh D oraz akrylonitrylu-butadien-styren (ABS) o twardości 81 °Sh D o udziale masowym 50/50 %.

7.4. Metodyka badań – ocena efektywności procesu separacji

W celu przeprowadzenia badań pierwszego etapu posłużono się wielkościami stałymi procesu wyznaczonymi na podstawie przeprowadzonych badań własnych. Wpływ siły nacisku igieł na efekty procesu separacji badano przy stałej prędkości obrotowej 12 min⁻¹, natomiast wpływ prędkości obrotowej układu walców przy stałej sile nacisku igieł 150 N/mm². W etapie drugim zastosowano wielkości stałe ustalone w pierwszym etapie. Masa mieszaniny próbek badanych w pierwszym i drugim etapie w wynosiła 600g w etapie trzecim 400g. Proces prowadzono w temperaturze otoczenia 24 °C. Porcje mieszanin wsypywano kolejno do leja zasypowego rozdzielacza i włączano napęd urządzenia. W etapie trzecim mieszaninę ogrzewano do temperatury z przedziału 30 - 90 °C .

Kryteria oceny definiowano jako:

- dokładność separacji składnika XYZ określoną zależnością:

$$D_{XYZ} = \frac{m_{XYZ}}{m_{FXYZ}} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

XYZ – symbol danego składnika mieszaniny,

m_{XYZ} -masa składnika znajdującego się we frakcji z dominującym udziałem tego składnika,

m_{FXYZ} - całkowita masa frakcji z dominującym udziałem składnika XYZ;

- efektywność separacji składnika XYZ określoną zależnością:

$$E_{XYZ} = \frac{m_{XYZ}}{m_{MXYZ}} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:

m_{XYZ} - masa składnika XYZ znajdującego się we frakcji z dominującym udziałem tego składnika,

m_{MXYZ} - masa składnika XYZ znajdującego się w mieszaninie poddawanej separacji.

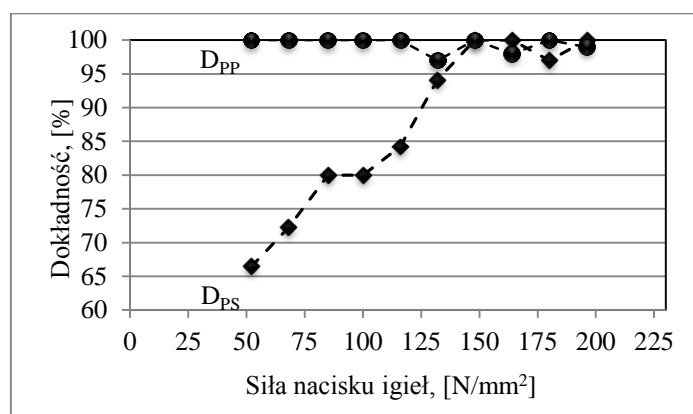
Separację składników mieszanin prowadzono z wykorzystaniem prototypowego separatora igłowego. Rozdział mieszanin na poszczególne strumienie materiałowe następował w układzie dwóch walców roboczych (walca transportującego oraz przebijającego). Płytki mieszaniny o mniejszej twardości w analizowanym rozdzielaczu wychwytywane były przez specjalnie wyprofilowane igły zamontowane na walcu przebijającym. Odseparowane strumienie materiałowe odprowadzane były do dwóch pojemników, jednego dla frakcji z dominującym udziałem polimeru twardszego, drugi z dominującym udziałem polimeru o mniejszej twardości. Po zakończonym teście ważono otrzymane frakcje oraz, po ręcznym wydzieleniu, udział pozostałości PS w PP i pozostałości PP w PS a także ABS w PP i PP w ABS.

Warunkiem koniecznym do uzyskania wyników badań przedstawionych wzorem (1) i (2) było zapewnienie pojedynczej warstwy tworzywa przekazywanej transporterem do układu rozdzielającego separatora.

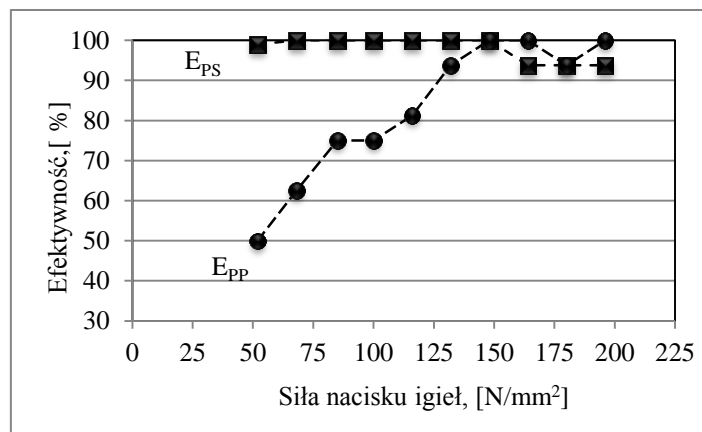
7.5. Wyniki i ich omówienie

7.5.1. Wpływ siły nacisku igieł – etap pierwszy

Wyniki badań wpływu siły nacisku igieł na efekty separacji mieszanin PP/PS przedstawiono na rys. 4.1 oraz 4.2.



Rys. 4.1. Wpływ siły nacisku igieł na dokładność rozdziału PP (D_{PP}) i PS (D_{PS})

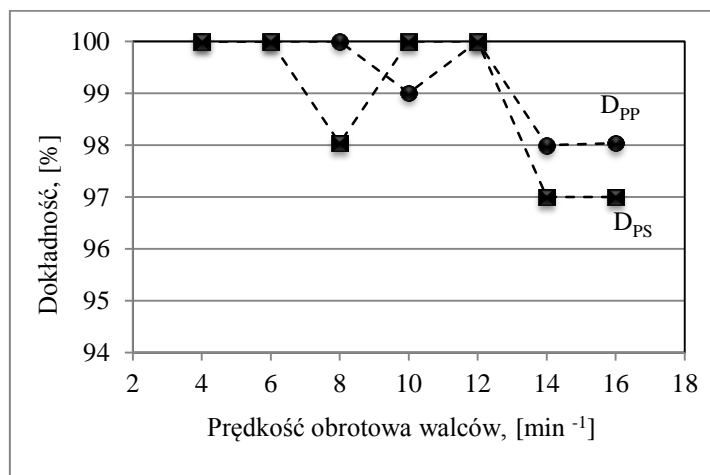


Rys. 4.2. Wpływ siły nacisku igieł na efektywność rozdziału PP (E_{PP}) i PS (E_{PS})

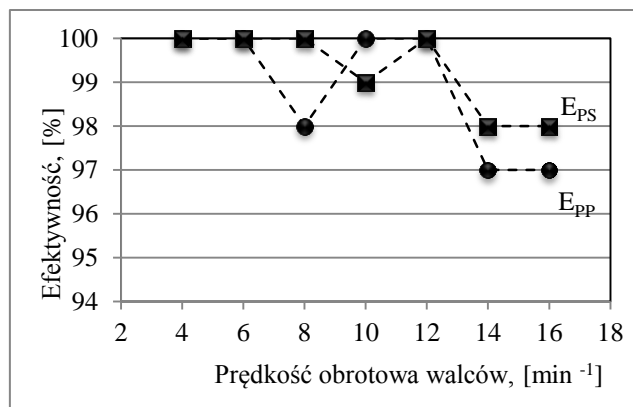
Z przeprowadzonych badań separacji mieszanin PP/PS wynika, że największą efektywność (E_{PP} , E_{PS}) oraz dokładność (D_{PP} , D_{PS}) wynoszącą 100 % w przypadku obydwu składników mieszaniny, uzyskano przy sile nacisku igieł równej 150 N/mm². Dalszy wzrost siły nacisku, powodował nieznaczne zmniejszenie tej wartości. Spowodowane jest to z zaczepianiem twardszych elementów PS na igłach walca rozdzielającego w wyniku czego elementy o większej twardości przenoszone były do pojemnika z miękkimi cząstkami PP. Z powodu niewystarczającej siły wywieranej przez groty igieł na separowanych elementach, przy wartości siły nacisku igieł wynoszącej od 50 – 100 N/mm² zaobserwowano małą dokładność rozdziału w przypadku frakcji PS. W efekcie tego cząstki PP o mniejszej twardości trafiały do pojemnika z PS.

7.5.2. Wpływ prędkości obrotowej – etap pierwszy

Wyniki badań wpływu prędkości obrotowej na efekty separacji mieszanin PP/PS przedstawiono na rys. 4.3 oraz 4.4.



Rys. 4.3. Wpływ prędkości obrotowej na dokładność rozdziału PP (D_{PP}) i PS (D_{PS})

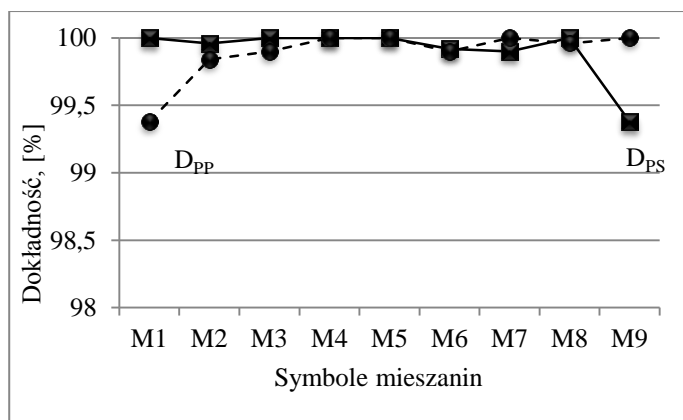


Rys. 4.4. Wpływ prędkości obrotowej na efektywność rozdziału PP (E_{PP}) i PS (E_{PS})

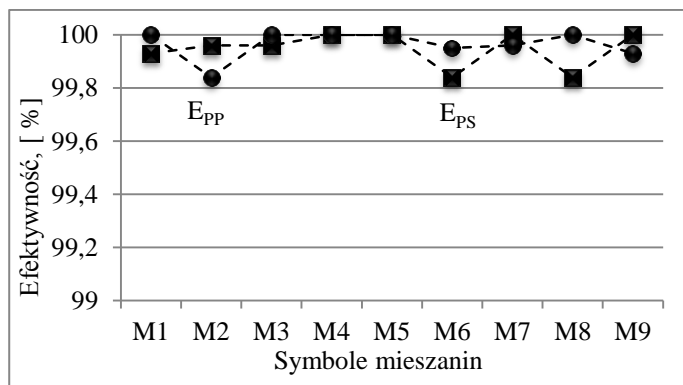
Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że największą dokładność oraz efektywność separacji mieszanin PP/PS uzyskano przy prędkości obrotowej 12 min⁻¹. Dalszy wzrost prędkości powodował zmniejszenie dokładności oraz efektywności separacji. Prawdopodobnie spowodowane było to drganiami powstającymi na taśmie podczas szybkiego przechodzenia igieł po rozdzielanych elementach mieszaniny przez co niektóre elementy mieszaniny nie trafiały na igły rozdzielające. Innym powodem mogło być przemieszczenie elementów PS na PP w wyniku czego miękkie elementy PP zostały zasłonięte twardszymi elementami PS, uniemożliwiając zaczepienie na igłach.

7.5.3. Wpływ udziału masowego – etap drugi

Wyniki badań wpływu składu mieszanin PP/PS na efekty separacji przedstawiono na rys. 4.5 oraz 4.6.



Rys. 4.5. Wpływ składu mieszanin na dokładność rozdziału PP (D_{PP}) i PS (D_{PS})

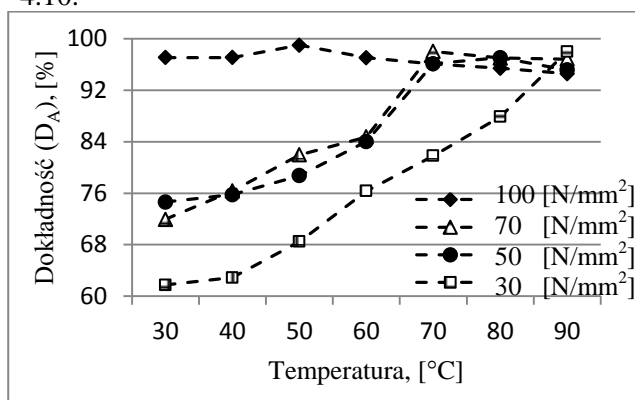


Rys. 4.6. Wpływ składu mieszanin na efektywność rozdziału PP (E_{PP}) i PS (E_{PS})

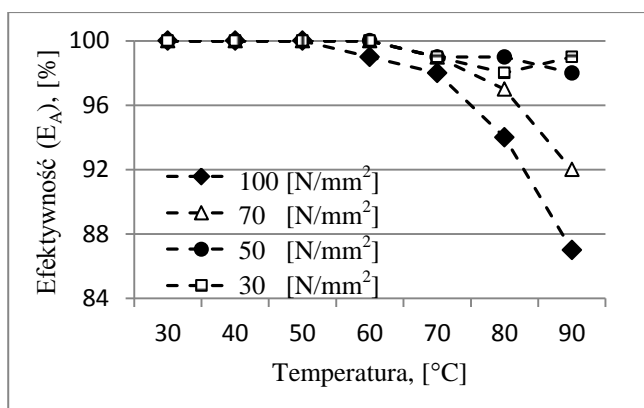
Z uzyskanych wyników separacji mieszanin PP/PS o różnych udziałach masowych nie zauważono wyraźnych zależności wpływu składu ilościowego poszczególnych frakcji na efekty separacji dlatego zależność ta nie będzie badana w kolejnych etapach. Wartości (E_{PP} , E_{PS}) i (D_{PP} , D_{PS}), w zależności od rodzaju mieszaniny, różniły się maksymalnie o 0,7 %.

7.5.4. Wpływ warunków termicznych – etap trzeci. Podsumowanie badań rozpoznawczych

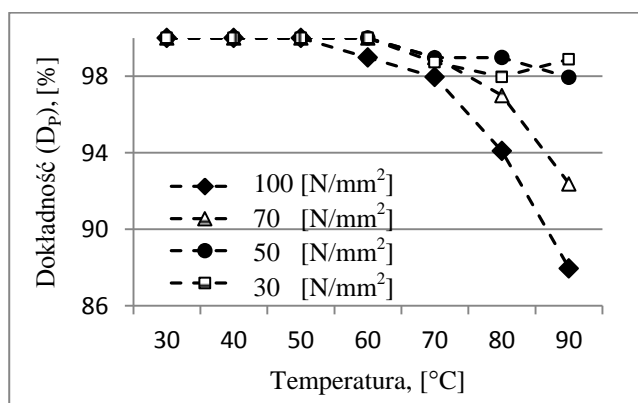
Wyniki badań wpływu temperatury ogrzewania mieszanin PP/ABS na efekty separacji przedstawiono na rys. 4.7 - 4.10.



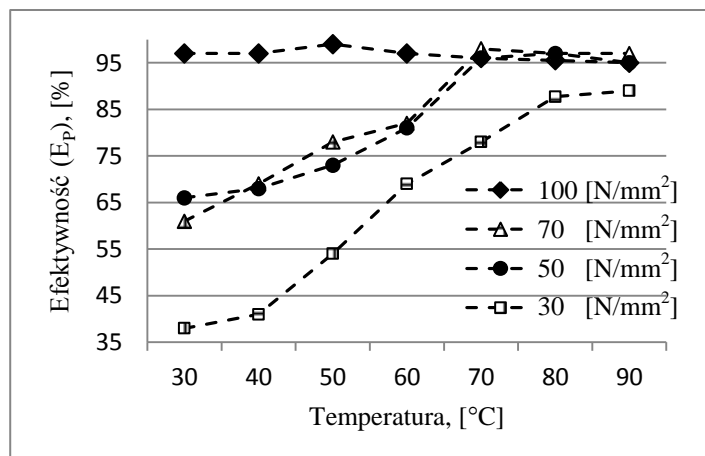
Rys. 4.7. Przebieg zmian dokładności wydzielenia składnika A (ABS) z mieszaniny PP/ABS w funkcji temperatury wsadu przy różnej wartości sił nacisku igieł roboczych



Rys. 4.8. Przebieg zmian efektywności wydzielenia składnika A (ABS) z mieszaniny PP/ABS w funkcji temperatury wsadu przy różnej wartości sił nacisku igieł roboczych



Rys. 4.9. Przebieg zmian dokładności wydzielenia składnika P (PP) z mieszaniny PP/ABS w funkcji temperatury wsadu przy różnej wartości sił nacisku igieł roboczych



Rys. 4.10. Przebieg zmian efektywności wydzielenia składnika P (PP) z mieszaniny PP/ABS w funkcji temperatury wsadu przy różnej wartości sił nacisku igieł roboczych

Trzeci etap badań rozpoznawczych wykazał istotny wpływ temperatury materiału wsadowego mieszaniny zawierającej jednakowe udziały PP i ABS na dokładność oraz efektywność separacji i w związku z tym wielkości te będą uwzględnione podczas planowania badań zasadniczych.

Przedstawione wyniki separacji mieszanin PS/PP oraz PP/ABS dowodzą ogólnej poprawności rozwiązań konstrukcyjnych prototypowego separatora igłowego. Wyniki uzyskane w pierwszym etapie wskazują na istotny wpływ siły nacisku igieł i prędkości obrotowej układu walców na efekty separacji.

Wpływ udziału masowego mieszaniny okazał się nieistotny w związku z tym nie będzie brany pod uwagę podczas planowania badań zasadniczych.

W efekcie wykonanych badań rozpoznawczych zdobyto doświadczenie w obsłudze i funkcjonowaniu separatora. Zauważono następujące elementy wymagające poprawy:

- igły umieszczone na walcu górnym nie trafiały w 100 % przypadków w płytki rozdzielanej mieszaniny,
- umieszczone na powierzchni obwodowej walca igły trafiały na rozdzielaną mieszaninę pod kątem ostrym powodując ich stopniowe wyginanie a w efekcie pękanie,
- zauważono problem z równomiernym ogrzaniem rozdzielanej mieszaniny.

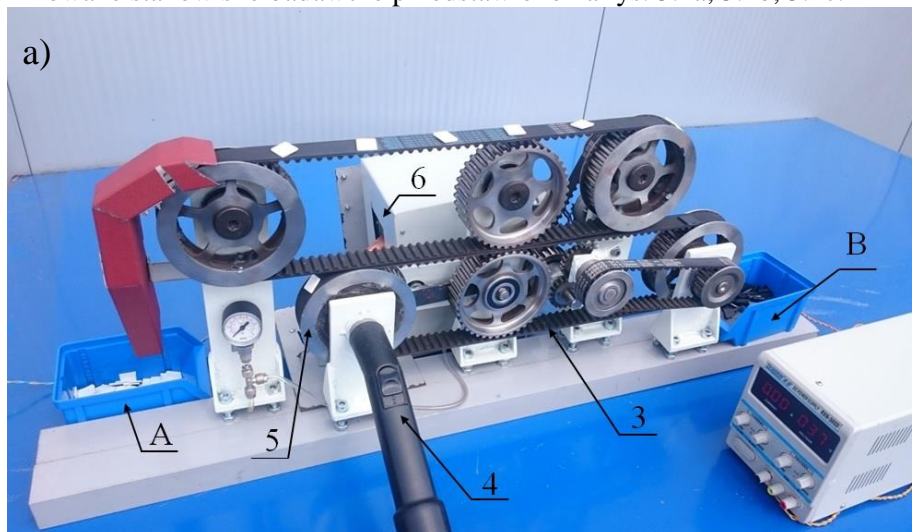
8. Badania zasadnicze

8.1. Modernizacja stanowiska badawczego – konstrukcja separatora

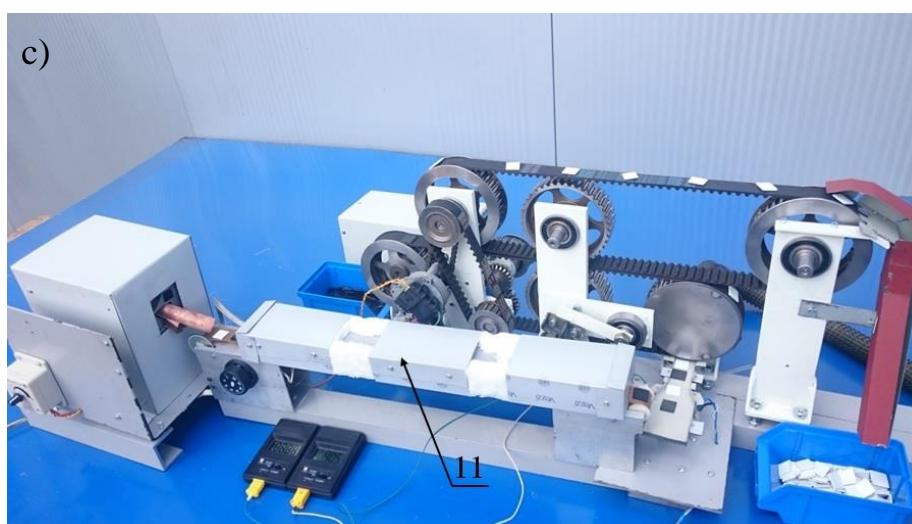
Na podstawie przeprowadzonych badań rozpoznawczych zauważono elementy wymagające poprawy, które wyeliminowano w wyniku modernizacji stanowiska, przez zastosowanie następujących rozwiązań:

- zapewniono 100 % trafianie igieł na elementy mieszaniny dzięki budowie podciśnieniowego systemu podawania elementów tworzywa na igły pasa separującego,
- igły zostały umieszczone na pasie separującym przez co trafiają na rozdzielane elementy mieszaniny pod kątem prostym,
- zapewniono równomierne ogrzewanie rozdzielanej mieszaniny poprzez budowę tunelowego systemu grzewczego.

Zmodernizowane stanowisko badawcze przedstawiono na rys. 5.1a, 5.1b, 5.1c.



Rys. 5.1. Zmodernizowane stanowisko badawcze: a) rzut od strony układu rozdzielającego, b) rzut od strony podajnika, c) stanowisko wyposażone w układ grzewczy, 1 – górny pas separujący, 2 – dolny pas transportowy, 3 – otwory w pasie transportowym, 4 – przewód rurowy, 5 – walec zębaty, 6 – dozownik, 7 – podajnik wibracyjny, 8 - górne koło zębate, 9 – dolne koło zębate, 10 – siłownik pneumatyczny, 11 – tunelowy system grzewczy, konstrukcja własna



Zmodernizowany separator wyposażony został w igły, w kształcie walca o średnicy 0,30 mm umieszczone na górnym pasie separującym (1). Współbieżnie z górnym pasem przemieszcza się dolny pas transportowy (2), w którym rozmieszczone są otwory (3) w tych samych odstępach co igły, lecz przesunięte w taki sposób, aby igły trafiały na powierzchnię pasa przed otworem. Przewodem rurowym (4) doprowadzane jest podciśnienie do walca zębatego (5) wytwarzającego próżnię w perforacji pasa. Z dozownika (6) rozdzielana mieszanina trafia na podajnik wibracyjny (7), podający warstwę tworzyw na dolny pas transportowy (2). Przez otwory (3) elementy mieszaniny są przysysane do pasa transportowego (2), który przenosi je na układ rozdzielający. Układ rozdzielający zbudowany jest z dwóch kół zębatach (8 i 9): górnego (8) oraz zamocowanego wahliwie i oporowanego siłownikiem pneumatycznym dolnego koła (9). Pneumatyczny siłownik (10) ustala siłę nacisku, z jaką igły oddziałują na elementy mieszaniny. Tunelowy system grzewczy (11) zbudowany jest z transportera taśmowego umieszczonego wewnątrz komory grzewczej, zapewniając równomierne ogrzanie elementów mieszaniny. Tworzywa o mniejszej twardości zaczepiane są przez igły oraz przenoszone pasem separującym do pojemnika A. Elementy o większej twardości pozostają na pasie transportowym i spadają do pojemnika B. Igły wykonane zostały ze stali narzędziowej.

Transporter z tunelowym systemem grzewczym (11) zbudowany jest z grzałki ceramicznej o wymiarach 500 mm x 35 mm i mocy 900W/230V umieszczonej nad pasem transportera o szerokości 35 mm i grubości 0,8 mm wykonanym z teflonu. Grzałka wraz z pasem transportowym zabudowane są w ocieplonym warstwą waty szklanej profilu o przekroju prostokątnym. Zakres ogrzewania może być regulowany w przedziale 30 °C – 200 °C z dokładnością do 1 °C. Transporter z tunelowym systemem grzewczym umożliwia płynne i powtarzalne ogrzewanie mieszaniny za pomocą termostatu oraz dzięki regulacji prędkości przesuwu pasa transportera.

Dozownik (6) z regulacją dozowania, umożliwia płynne podawanie mieszaniny tworzyw na transporter (11) z układem grzewczym. Pojemność dozownika w przeliczeniu na masę mieszaniny wynosi od 400 g do 600 g w zależności od gęstości rozdzielanych tworzyw. Maksymalna wydajność dozowania wnosi 140 g/min mieszaniny o średniej gęstości 1,20 g/cm³ elementów mieszaniny w postaci płytek o wymiarach 17 x 17 x 2 mm.

8.2. Mieszanki wykorzystywane w badaniach zasadniczych

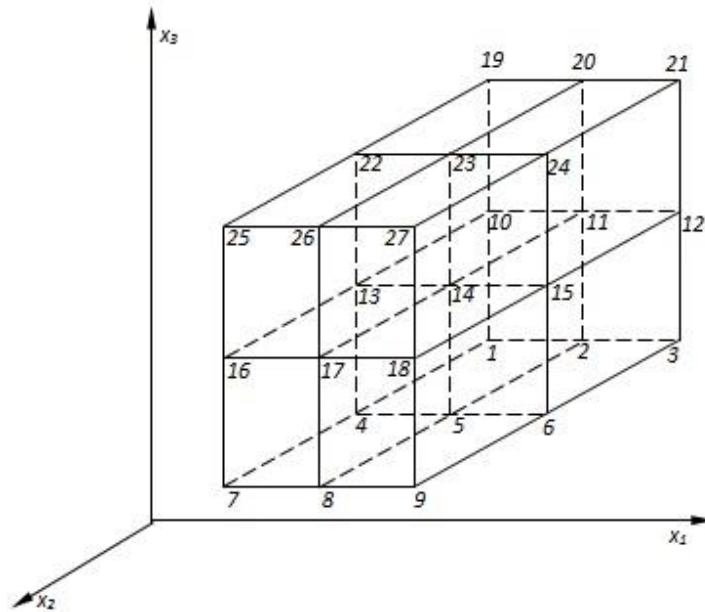
W badaniach wykorzystano następujące materiały:

1. Akrylonitryl-butadien-styren (ABS), o gęstości $d = 1,05 \text{ g/cm}^3$, twardości 80 °Sh D, temp. mięknięcia wg. Vicata 102 °C,
2. Poli(tereftalan) etylenu (PET) o gęstości $1,34 \text{ g/cm}^3$, twardości 78 °Sh D, temp. mięknięcia wg. Vicata 75 °C,
3. Poli(chlorek winylu) (PVC) o gęstości $1,42 \text{ g/cm}^3$, twardości 75 °Sh D, temp. mięknięcia wg. Vicata 75 °C,
4. Polipropylen (PP) o gęstości $0,92 \text{ g/cm}^3$, twardości 70 °Sh D, temp. mięknięcia wg. Vicata 88 °C,
5. Polietylen (PE) o gęstości $0,96 \text{ g/cm}^3$, twardości 62 °Sh D, temp. mięknięcia wg. Vicata 78 °C.

Mieszanki do badań zasadniczych miały postać płytek o wymiarach 17 x 17 x 2 mm.

8.3. Plan doświadczeń

Plan eksperymentu badań zasadniczych prowadzono zgodnie z planem trójpoziomowym kompletnym przedstawionym rys. 6.



Rys. 6. Plan eksperymentu trójpoziomowego dla 3 zmiennych x_1 , x_2 , x_3

Przeprowadzone prace konstrukcyjne, stan wiedzy na temat właściwości tworzyw polimerowych oraz uzyskane wnioski z badań rozpoznawczych przyczyniły się do przyjęcia następujących zakresów wielkości wejściowych charakteryzujących obiekt badań. Zakresy tych wielkości to: a) siła nacisku igieł (x_1): 3 – 17 N, b) prędkość obrotowa układu rozdzielającego (x_2): 15 – 35 min^{-1} , c) temperatura mieszaniny rozdzielanej (x_3): 30 – 70 °C. Wybór zakresu siły nacisku igieł został dostosowany do możliwości technicznych realizacji badań poprzedzony wyborem średnicy igieł. Zakres zmian prędkości obrotowej dobrano w taki sposób aby ograniczyć wpływ siły odśrodkowej na zaczepione elementy mieszaniny. Górny zakres warunków termicznych określono na podstawie najniższych wartości temperatur mięknięcia.

Powyższe przedziały posłużyły do opracowania planu eksperymentu, który zgodnie z matrycą planu trójpoziomowego kompletnego wymaga przeprowadzenia 27 doświadczeń z użyciem każdej z 10 mieszanin. W tabeli 2. zaprezentowano matrycę planu eksperymentu.

Tabela 2. Matryca planu trójpoziomowego kompletnego dla trzech zmiennych wejściowych

Nr próbki	Siła nacisku igieł [N]	Prędkość obrotowa układu rozdzielającego [min ⁻¹]	Temperatura rozdzielanej mieszaniny [°C]
1	3	15	30
2	3	15	50
3	3	15	70
4	3	25	30
5	3	25	50
6	3	25	70
7	3	35	30
8	3	35	50
9	3	35	70
10	10	15	30
11	10	15	50
12	10	15	70
13	10	25	30
14	10	25	50
15	10	25	70
16	10	35	30
17	10	35	50
18	10	35	70
19	17	15	30
20	17	15	50
21	17	15	70
22	17	25	30
23	17	25	50
24	17	25	70
25	17	35	30
26	17	35	50
27	17	35	70

8.4. Cel i zakres badań zasadniczych

Celem badań zasadniczych było określenie warunków, jakie muszą być spełnione, aby efekty procesu separacji mieszanin badanych spełniały przyjęte przez nas kryteria. Celem badań było również opracowanie modeli matematycznych tego procesu.

Badania realizowano dla 10 dwuskładnikowych mieszanin PVC, PET, PE, ABS, PP o udziale masowym 50/50 %. Wielkościami wejściowymi każdego analizowanego obiektu badań (mieszaniny) były: siła (x_1) nacisku igieł, prędkość (x_2) obrotowa układu rozdzielającego, temperatura (x_3) rozdzielanej mieszaniny. Wielkościami wyjściowymi były dokładność (D_{XYZ}) i efektywność (E_{XYZ}) każdego ze składników badanych mieszanin. Zgodnie z powyższym efekty procesu separacji każdej z dziesięciu badanych mieszanin charakteryzowane były przez cztery wielkości wyjściowe.

8.5. Analiza badań zasadniczych

Wyniki badań eksperymentalnych przedstawiające uzyskane efekty separacji dla każdej z dziesięciu mieszanin zestawiono w tabelach. Na potrzeby tego autoreferatu w tab. 3. przedstawiono wyniki separacji mieszaniny ABS/PE.

Tabela. 3. Wyniki badań eksperymentalnych separacji mieszaniny ABS/PE

Nr doświadczenia	Nacisk [N]	Prędkość [min ⁻¹]	Temp [°C]	D _{ABS} , [%]	D _{PE} , [%]	E _{ABS} , [%]	E _{PE} , [%]
1	3	15	30	50,00	0,00	100,00	0,00
2	3	15	50	51,88	100,00	100,00	7,25
3	3	15	70	57,68	100,00	100,00	26,63
4	3	25	30	50,00	0,00	100,00	0,00
5	3	25	50	51,03	100,00	100,00	4,03
6	3	25	70	58,18	100,00	100,00	28,13
7	3	35	30	50,00	0,00	100,00	0,00
8	3	35	50	51,83	100,00	100,00	7,05
9	3	35	70	61,92	100,00	100,00	38,50
10	10	15	30	100,00	100,00	100,00	100,00
11	10	15	50	100,00	100,00	100,00	100,00
12	10	15	70	100,00	93,72	93,30	100,00
13	10	25	30	100,00	100,00	100,00	100,00
14	10	25	50	100,00	100,00	100,00	100,00
15	10	25	70	99,22	93,54	93,15	99,27
16	10	35	30	100,00	100,00	100,00	100,00
17	10	35	50	100,00	100,00	100,00	100,00
18	10	35	70	97,86	91,98	91,45	98,00
19	17	15	30	100,00	100,00	100,00	100,00
20	17	15	50	100,00	72,03	61,17	100,00
21	17	15	70	0,00	50,00	0,00	100,00
22	17	25	30	98,52	100,00	100,00	98,50
23	17	25	50	97,68	72,06	61,80	98,53
24	17	25	70	0,00	49,61	0,00	98,47
25	17	35	30	100,00	98,54	98,52	100,00
26	17	35	50	100,00	72,67	62,40	100,00
27	17	35	70	0,00	49,61	0,00	98,47

Otrzymaną dokładność oraz efektywność separacji danego składnika mieszaniny przyjęto klasyfikować według trzypoziomowej skali skuteczności (S) procesu. Przedziały wartości opisujących spełnienie efektów separacji z danego poziomu skuteczności (SI ÷ SIII) przedstawiono w tabeli 4.

Tabela. 4. Przedziały wartości efektów separacji z danego poziomu skuteczności (S)

Efekty separacji	Wartości poszczególnych poziomów skuteczności S		
	SI	SII	SIII
D_{XYZ} [%]	< 60	60-70	> 80
E_{XYZ} [%]	< 70	70-80	> 90

Dla ułatwienia analizy danych wielkości wyjściowe prezentujące dany poziom skuteczności (S) oznaczono trzema rodzajami kolorów: czerwony dla (SI), niebieski dla (SII), zielony dla (SIII). Przyjęte oznaczenie dotyczy zarówno wielkości charakteryzujących daną parę prezentujących ten sam poziom jak i występujących na różnych poziomach spełniających kryterium (S). Dodatkowo kolorem szarym oznaczono spełnienie kryterium (S) pojedynczej wielkości wyjściowej z danej pary.

W celu dokładniejszej analizy badań eksperymentalnych przeprowadzono ocenę podatności danej mieszaniny na separację, wyrażoną w postaci rankingu punktowego. Podatność określa zdolność do rozdziału mieszaniny na podstawie różnicy w twardości. Ranking sporządzono wykorzystując trzypoziomą skalę skuteczności (S) nadając wagę punktową efektom separacji składnika mieszaniny na danym poziomie (S) zgodnie z tab. 5.

Tabela 5. Kryteria punktacji wielkości wyjściowych

Poziom skuteczności (S)	Liczba punktów dla danej wielkości wyjściowej	
	Dla dwóch składników mieszaniny	Dla jednego składnika mieszaniny
SI	2	1
SII	3	2
SIII	4	3

Zgodnie z powyższą tabelą efekty separacji oceniano według dwóch rodzajów punktacji: a) gdy wyniki doświadczenia opisywane są przez wielkości wyjściowe spełniające kryterium (S) dla obydwu składników mieszaniny, wówczas przydzielana jest liczba punktów w ilości 2, 3 lub 4 w zależności od poziomu skuteczności (S), b) gdy wyniki doświadczeń opisywane są przez wielkości wyjściowe spełniające kryterium (S) dla jednego ze składników mieszaniny przydzielana jest liczba punktów od 1 do 3. Wyższa punktacja w przypadku (a) podyktowana jest jednoczesnym spełnieniem kryterium (S) dla dwóch składników mieszaniny, dzięki czemu otrzymywane są dwa odseparowane strumienie, przez co proces separacji, gdy spełnia założone przez realizatora kryteria, jest zakończony. W przypadku (b) uzyskiwana jest mieszanina rozdzielana w założonym stopniu lecz tylko dla jednego ze strumieni mieszaniny.

W tabeli 6. zestawiono ranking badanych mieszanin.

Tabela 6. Ranking badanych mieszanin

Badane mieszaniny	Liczba punktów			Suma punktów	Różnica w twardości [° Sh D]	Różnica w temp. mięknienia [°C]
	SI	SII	SIII			
ABS/PE	1	6	204	211	18	24
PET/ABS	4	10	154	168	2	27
PVC/ABS	-	6	105	111	5	27
PE/PP	3	-	105	108	8	10
PVC/PE	-	-	96	96	13	3
PET/PE	-	-	96	96	16	3
ABS/PP	3	11	71	85	10	14
PET/PP	4	3	56	63	8	13
PVC/PET	3	9	45	57	3	0
PVC/PP	-	-	-	0	5	13

Przedstawione wyniki potwierdzają możliwość prowadzenia separacji na podstawie różnicy w twardości dla 9 z 10 badanych mieszanin. Najwyższą pozycję w rankingu a jednocześnie najlepszą podatność na separację wykazuje mieszanina ABS/PE, której wielkości wyjściowe dla obydwu składników przyjmują wartości (SIII) aż w 12 doświadczeniach. Następnie klasyfikuje się mieszanina PET/ABS z 9 doświadczeniami na trzecim poziomie spełnienia kryterium (S). Dla czterech mieszanin PVC/ABS, PP/PE, PVC/PE, PET/PE uzyskano efekty separacji na trzecim poziomie w 6 doświadczeniach. Zadowalające rezultaty procesu uzyskano również dla mieszanin ABS/PP, PET/PP, PVC/PET, których efekty procesu jednocześnie dla dwóch wielkości wyjściowych spełniają kryterium skuteczności na trzecim i drugim poziomie. W przypadku mieszaniny PVC/PP uzyskano wyniki niezadowalające, które nie spełniły żadnego z założonych poziomów skuteczności.

Otrzymane wyniki wskazują obszary efektywności metody rozdziału badanych mieszanin na podstawie różnicy w twardości. Na podstawie analizy wyników badań, widoczna jest zależność między różnicą w twardości rozdzielanych materiałów, a efektami procesu. Wzrost różnicy w twardości rozdzielanych tworzyw powoduje wzrost efektywności separacji. Zależność tą bardzo dobrze uwidacznia tabela 6. Mieszanina ABS/PE o największej różnicy w twardości wynoszącej 18 °Sh D zajmuje pierwsze miejsce w rankingu, natomiast mieszaniny PVC/PET oraz PVC/PP o jednych z najmniejszych różnic w twardości zajmują dwa ostatnie miejsca. Odstępstwo od tej reguły wykazują mieszaniny PET/ABS oraz PVC/ABS zajmujące drugie oraz trzecie miejsce w rankingu, dla których różnica w twardości wynosi 2 °Sh D oraz 5 °Sh D. Mieszaniny te osiągały duże wartości efektów separacji podczas prowadzenia procesu w wyższych temperaturach ogrzewania wynoszących 50 °C – 70 °C z powodu dość znacznej różnicy temperatury mięknienia wynoszącej 27 °C. Pozwala to wnioskować, że mieszaniny dla których różnica w twardości jest niewystarczająca, lecz wykazują znaczną różnicę temperatury mięknienia mogą być rozdzielane z dobrymi efektami w wyższej temperaturze ogrzewania. Prawdopodobnie związane jest to ze wzrostem różnicy w twardości między rozdzielanymi tworzywami w wyższych temperaturach.

Mieszanina PET/PE pomimo zadowalających wyników separacji wykazuje ponad dwukrotnie gorszą podatność na separację w porównaniu z mieszaniną ABS/PE o zbliżonej różnicy w twardości.

Podobne różnice widoczne są w przypadku mieszanin PE/PP oraz PET/PP. Może być to spowodowane rozbieżnością w dopasowaniu parametrów procesu separacji dla badanych mieszanin.

Mieszanina PVC/PET pomimo zbliżonej twardości oraz temp. mięknięcia poszczególnych składników wykazuje podatność na separację prowadząc proces z siłą nacisku igieł 3 N w temp. ogrzewania 70 °C. W przypadku takich warunków termicznych prawdopodobnie wzrasta różnica w twardości pomiędzy rozdzielanymi frakcjami dzięki czemu możliwy jest rozdział osiągający kryterium skuteczności na 3 poziomie.

Mieszanina PVC/PP nie uzyskała żadnego z założonych efektów separacji. Powodem może być niewystarczająca siła nacisku igieł, której wartość wykracza poza zakres siły nacisku przyjętej na cele badań zasadniczych.

9. Modele matematyczne procesu separacji

Modele matematyczne obiektu badań w postaci wielomianu drugiego stopnia wygenerowano z wykorzystaniem oprogramowania statystycznego i analitycznego Statistica 10.

W przypadku badanego obiektu z trzema wielkościami wejściowymi ($i = 3$) wielomian aproksymacyjny stopnia drugiego uwzględniający interakcje pierwszego i drugiego rzędu opisywany jest poniższym równaniem :

$$y_n = a_{n0} + b_{n1}x_1 + b_{n2}x_2 + b_{n3}x_3 + b_{n1}x_1^2 + b_{n2}x_2^2 + b_{n3}x_3^2 + \\ b_{n12}x_1x_2 + b_{n13}x_1x_3 + b_{n23}x_2x_3 + b_{n12}x_1x_2^2 + b_{n13}x_1x_3^2 + b_{n23}x_2x_3^2 + \\ b_{n1}x_1^2x_2 + b_{n1}x_1^2x_3 + b_{n2}x_2^2x_3 + b_{n1}x_1^2x_2^2 + b_{n1}x_1^2x_3^2 + \\ b_{n2}x_2^2x_3^2$$

gdzie:

n - jest liczbą naturalną, będącą numerem kolejnego modelu; przy czym w niniejszej rozprawie:

$$1 \leq n \leq 40,$$

$a_{n0}, b_{n1}, \dots, b_{n23}$ – współczynniki równania stopnia drugiego,

x_1, \dots, x_3 – wielkości wejściowe.

Poszczególne składowe modeli dla każdej z dziesięciu mieszanin zestawiono w tabelach. Na potrzeby tego autoreferatu w tab. 7. przedstawiono wyniki dla modelu mieszaniny PVC/PE. Zaprezentowane modele tworzone są tylko przez istotne wielkości wejściowe procesu separacji z pominięciem czynników, których wpływ był nieistotny. Istotność poszczególnych wielkości wejściowych zbadano za pomocą testu t-Studenta, którego wyniki zamieszczono w załączniku rozprawy doktorskiej.

Przed wygenerowaniem modeli za pomocą pakietu Statistica 10 zakodowano wartości czynników wejściowych do postaci tzw. logitów (L) w celu usprawnienia obliczeń. Otrzymane w ten sposób struktury modeli po uzupełnieniu wartościami naturalnymi czynników wejściowych, w celu uzyskania rzeczywistych danych modelu y_n należy odkodować stosując poniższy algorytm.

$$y'_n = \left(\frac{e^{L(y_n)}}{1 + e^{L(y_n)}} \right) \cdot 100$$

Otrzymane wówczas wartości y'_n wyrażone są w jednostkach rzeczywistych tzn. w procentach.

Tabela 7. Parametry modeli procesu separacji mieszaniny PVC/PE

Wielkości wyjściowe (modelowe)	Stała regresji	Wartości poszczególnych współczynników wielkości wejściowych w danym modelu			R ²
		x ₁ ²	x ₃	x ₃ ²	
<i>D_{PVC}</i>	82,41121	0,10406	-3,03950	0,02896	0,68674
		x ₁ x ₃	x ₁ x ₃ ²	x ₁ ² x ₃	
		-0,09698	0,00050	0,00107	
<i>D_{PE}</i>	-34,5265	x ₁ ²	x ₃ ²	x ₁ x ₃	0,41267
		0,3353	0,0106	0,4037	
		x ₁ x ₃ ²	x ₁ ² x ₃	x ₁ ² x ₃ ²	
		-0,0065	-0,0320	0,0004	
<i>E_{PVC}</i>	33,81218	x ₁	x ₁ ²	x ₃	0,88487
		-0,37071	0,39419	-0,33959	
		x ₃ ²	x ₁ x ₃ ²	x ₁ ² x ₃	
		0,00309	-0,00175	-0,01986	
		x ₁ ² x ₃ ²	x ₂ x ₃		
		0,00029	0,00104		
<i>E_{PE}</i>	-43,4955	x ₁	x ₁ ²	x ₂ ²	0,79264
		13,1193	-0,4972	0,0067	
		x ₃ ²	x ₁ x ₂ ²	x ₁ x ₃	
		0,0081	-0,0002	-0,1258	
		x ₁ ² x ₃	x ₂ x ₃		
		0,0047	-0,0070		

Analizę modeli matematycznych procesu separacji przeprowadzono w oparciu o wartości współczynników determinacji (R²) oraz na podstawie tzw. reszt oznaczanych dalej jako (r), otrzymanych z różnic pomiędzy wartościami zmiennych wyjściowych uzyskanych podczas prowadzenia eksperymentu, a wartościami teoretycznymi modeli matematycznych. Wartości poszczególnych reszt zestawiono w załączniku do rozprawy. Zgodność danych pomiarowych z danymi modelowymi przyjęto określać poziomem dokładności (PD) zgodnie z poniższą zależnością.

$$R^2 \geq 0,5 \text{ i } z_1 \leq r \leq z_2$$

Przeprowadzono analizę spełnienia kryterium (PD) na czterech poziomach od PDI do PDIV, ustalanych na podstawie przedziałów wartości reszt. Przedziały reszt spełniających dany poziom kryterium (PD) przedstawiono w (tab. 8.). Poszczególne poziomy przyjęto oceniać zgodnie z przyjętą skalą zgodności : PDI - zgodność bardzo dobra, PDII - zgodność dobra, PDIII - zgodność wystarczająca, PDIV - zgodność niewystarczająca.

Tabela 8. Przedziały wartości stałych z_1 i z_2 na poszczególnych poziomach (PD)

Zakres wartości stałych z_1 i z_2	Poziom dokładności PD			
	PDI	PDII	PDIII	PDIV
z_1 [%]	0	< 2	< 5	< 10
z_2 [%]	2	5	10	100

W przypadku każdego modelu spełniającego zależność $R^2 \geq 0,5$ wyznaczano 27 wartości bezwzględnych reszt. Wartości reszt z danego poziomu (PD) na poszczególnych poziomach oznaczono kolorem: czerwonym (PDI), niebieskim (PDII), zielonym (PDIII) oraz żółtym (PDIV) i zestawiono w załączniku do rozprawy. W tab. 9 przedstawiono liczby reszt przyjmujących wartości poszczególnych poziomów dokładności (PD).

W celu przeprowadzenia analizy dokładności danych modelowych i pomiarowych, dokonano klasyfikacji modeli. Klasyfikację sporządzono na podstawie sumy liczby punktów poszczególnych reszt. Punkty przydzielono zgodnie z przyjętą oceną reszt w zależności od osiągniętego poziomu dokładności: a) 4 pkt. dla reszt z poziomu (PDI), b) 3 pkt. dla reszt z poziomu (PDII), c) 2 pkt. dla reszt z poziomu (PDIII), d) 1 pkt. dla reszt z poziomu (PDIV). Modele klasyfikowano począwszy od najwyższej liczby punktów będącej sumą iloczynów reszt. Zestawienie przedstawia tab. 10. Dodatkowo w kolumnie oznaczonej R_{sr} przedstawiono wartości średnich arytmetycznych reszt. Waga wartości średnich R_{sr} jest odwrotnie proporcjonalna do wartości punktowych modeli. W sytuacji gdy dwa lub więcej modeli osiągnęło identyczną liczbę punktów, wyższą pozycję zajmował model o niższej wartości R_{sr} .

Analizie poddano 37 modeli spełniających zależność $R^2 \geq 0,5$. W przypadku trzech modeli: D_{PE} mieszaniny PVC/PE, D_{PVC} mieszaniny PVC/PET oraz D_{PE} mieszaniny ABS/PE powyższa zależność nie była osiągnięta.

Analizę zgodności danych modelowych z danymi pomiarowymi przeprowadzono z wykorzystaniem 999 reszt. Prawie połowa wszystkich reszt, bo aż 48,65 % (486 reszt) przyjmowała wartości na pierwszym poziomie PDI. Kolejne pod względem liczebności były reszty przyjmujące wartości na drugim poziomie dokładności PDII w liczbie 273 co stanowi 27,33 %. Na trzecim poziomie PDIII sklasyfikowanych zostało 200 reszt, co stanowi 20 %. Najmniejszą liczbę stanowiły reszty czwartego poziomu PDIV w ilości 40 stanowiących 4 % wszystkich reszt.

Celem analizy modeli matematycznych było sprawdzenie zgodności danych modelowych z wynikami badań eksperymentalnych, natomiast celem analizy wyników badań eksperymentalnych było ustalenie dla jakich zakresów wartości wielkości wejściowych efekty separacji spełniały kryterium skuteczności tego procesu. Są to odmienne analizy i nie należy ich porównywać.

W tabelach 9 oraz 10 przedstawiono poziomy dokładności reszt analizowanych modeli.

Tabela 9. Ilości reszt na poszczególnych poziomach dokładności PD

Model	Rodzaj mieszaniny	R ²	Liczba reszt na poszczególnych poziomach dokładności			
			PDI	PDII	PDIII	PDIV
D _{ABS}	ABS/PE	0,872	17	5	3	2
E _{ABS}		0,951	18	8	1	0
E _{PE}		0,785	6	6	13	2
D _{PET}	PET/ABS	0,901	8	10	9	0
E _{PET}		0,908	3	17	6	1
D _{ABS}		0,999	27	0	0	0
E _{ABS}		0,951	18	8	1	0
D _{PVC}	PVC/ABS	0,561	1	3	15	8
E _{PVC}		0,887	1	14	12	0
D _{ABS}		0,999	27	0	0	0
E _{ABS}		0,947	18	6	2	1
D _{PP}	PP/PE	0,883	3	17	6	1
E _{PP}		0,979	24	3	0	0
D _{PE}		0,999	27	0	0	0
E _{PE}		0,827	6	11	10	0
D _{PVC}	PVC/PE	0,687	6	5	7	9
E _{PVC}		0,885	1	14	12	0
E _{PE}		0,793	6	7	12	2
D _{PET}	PET/PE	0,884	6	14	5	2
E _{PET}		0,952	15	9	3	0
D _{PE}		0,999	27	0	0	0
E _{PE}		0,762	5	12	8	2
D _{ABS}	ABS/PP	0,922	21	0	6	0
E _{ABS}		0,950	18	6	3	0
D _{PP}		0,722	3	9	12	3
E _{PP}		0,977	24	2	1	0
D _{PET}	PET/PP	0,999	27	0	0	0
E _{PET}		0,907	4	16	6	1
D _{PP}		0,932	24	0	2	1
E _{PP}		0,979	24	2	1	0
E _{PVC}	PVC/PET	0,888	1	14	12	0
D _{PET}		0,911	18	6	2	1
E _{PET}		0,952	15	9	3	0
D _{PVC}	PVC/PP	0,512	6	9	10	2
E _{PVC}		0,884	1	15	10	1
D _{PP}		0,720	6	14	6	1
E _{PP}		0,979	24	2	1	0

Tabela 10. Ranking modeli matematycznych

Nr	Model	Rodzaje mieszanin	Liczba punktów na danym poziomie dokładności				Suma pkt.	R _{sr}
			PDI	PDI _{II}	PDI _{III}	PDI _{IV}		
1	D _{ABS}	PVC/ABS	108	0	0	0	108	0,010
2	D _{ABS}	PET/ABS	108	0	0	0	108	0,040
3	D _{PE}	PP/PE	108	0	0	0	108	0,051
4	D _{PE}	PET/PE	108	0	0	0	108	0,066
5	D _{PET}	PET/PP	108	0	0	0	108	0,127
6	E _{PP}	PP/PE	96	9	0	0	105	0,774
7	E _{PP}	PET/PP	96	6	2	0	104	0,771
8	E _{PP}	PVC/PP	96	6	2	0	104	0,773
9	E _{PP}	ABS/PP	96	6	2	0	104	0,812
10	D _{PP}	PET/PP	96	0	4	1	101	0,990
11	E _{ABS}	ABS/PE	72	24	2	0	98	1,986
12	E _{ABS}	PET/ABS	72	24	2	0	98	2,031
13	E _{ABS}	ABS/PP	72	18	6	0	96	1,803
14	D _{ABS}	ABS/PP	84	0	12	0	96	2,222
15	E _{ABS}	PVC/ABS	72	18	4	1	95	2,011
16	D _{PET}	PVC/PET	72	18	4	1	95	2,229
17	E _{PET}	PVC/PET	60	33	0	1	94	2,586
18	E _{PET}	PET/PE	60	27	6	0	93	2,586
19	D _{ABS}	ABS/PE	68	15	6	2	91	2,880
20	D _{PET}	PET/ABS	32	30	18	0	80	3,771
21	D _{PP}	PVC/PP	24	42	12	1	79	4,216
22	D _{PET}	PET/PE	24	42	10	2	78	3,768
23	E _{PET}	PET/PP	16	48	12	1	77	3,800
24	E _{PE}	PP/PE	24	33	20	0	77	4,398
25	E _{PET}	PET/ABS	12	51	12	1	76	3,793
26	D _{PP}	PP/PE	12	51	12	1	76	4,150
27	E _{PE}	PET/PE	20	36	16	2	74	5,083
28	E _{PVC}	PVC/PP	4	45	20	4	73	4,902
29	E _{PVC}	PVC/PET	4	42	24	0	70	4,837
30	E _{PVC}	PVC/ABS	4	42	24	0	70	4,853
31	E _{PVC}	PVC/PE	4	42	24	0	70	4,890
32	D _{PVC}	PVC/PP	18	27	20	2	67	5,128
33	D _{PP}	ABS/PP	12	27	24	3	66	5,887
34	E _{PE}	PVC/PE	18	21	24	2	65	4,753
35	E _{PE}	ABS/PE	18	18	26	2	64	4,854
36	D _{PVC}	PVC/PE	24	15	14	9	62	6,271
37	D _{PVC}	PVC/ABS	4	9	30	8	51	8,368

Dodatkowo na podstawie wygenerowanych modeli określono istotność poszczególnych wielkości wejściowych na efekty procesu.

Poszczególne krotności występowania wielkości wejściowych oraz interakcji tych wielkości w danych grupach modeli D_{XYZ} i E_{XYZ} przedstawiono w tab. 11.

Tabela 11. Krotność występowania reszt w danych grupach modeli

Wielkości wejściowe wraz z interakcjami		Krotność występowania wielkości wejściowej		Suma
		D _{XYZ}	E _{XYZ}	
Siła nacisku igieł (x ₁)	x ₁	12	20	68
	x ₁ ²	16	20	
	Suma	28	40	
Prędkość obrotowa (x ₂)	x ₂	2	1	7
	x ₂ ²	1	3	
	Suma	3	4	
Temperatura ogrzewania (x ₃)	x ₃	15	15	65
	x ₃ ²	17	18	
	Suma	32	33	
Interakcje (x ₁ i x ₂)	x ₁ x ₂	1	0	7
	x ₁ x ₂ ²	1	4	
	x ₁ ² x ₂	1	0	
	x ₁ ² x ₂ ²	0	0	
	Suma	3	4	
Interakcje (x ₁ i x ₃)	x ₁ x ₃	16	11	113
	x ₁ x ₃ ²	17	9	
	x ₁ ² x ₃	16	15	
	x ₁ ² x ₃ ²	13	16	
	Suma	62	51	
Interakcje (x ₂ i x ₃)	x ₂ x ₃	1	6	8
	x ₂ x ₃ ²	1	0	
	x ₂ ² x ₃	0	0	
	x ₂ ² x ₃ ²	0	0	
	Suma	2	6	

W obliczeniach uwzględniono 37 modeli spełniających warunek $R^2 \geq 0,5$. Istotność szacowano na podstawie krotności występowania danej wielkości wejściowej (x₁, x₂, x₃, x₁², x₂², x₃², x₁ x₂, x₁ x₃, x₂ x₃, x₁ x₂², x₁ x₃², x₂ x₃², x₁² x₂, x₁² x₃, x₂² x₃, x₁² x₂², x₁² x₃², x₂² x₃²) wśród grup modeli określających efektywność oraz dokładność.

Analiza danych z tab. 11 uwidacznia, że najbardziej istotną wielkością wejściową jest interakcja zmiennych x₁ i x₃ czyli siły nacisku igieł oraz temperatury ogrzewania mieszaniny. Interakcja ta występuje 113 razy co stanowi 42,2 % wszystkich wielkości występujących w modelach. Siła nacisku (x₁) znajduje się na drugiej pozycji pod względem istotności z krotnością występowania 68 razy co stanowi 25,4 % wszystkich wielkości charakteryzujących analizowane modele. Trzecią najistotniejszą wielkością jest temperatura ogrzewania mieszaniny x₃ z krotnością 65 razy (24,3 %).

Wielkości x₂, x₁x₂, x₂x₃ okazały się mało istotne.

10. Wnioski i perspektywy dalszych prac

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski poznawcze:

1. Przedstawione w rozprawie wyniki badań separacji mieszanin tworzyw polimerowych dowodzą skuteczności procesu rozdziału na podstawie różnicy w twardości. Wyniki badań rozpoznawczych oraz zasadniczych jednoznacznie potwierdzają przyjętą hipotezę zakładającą istotność siły nacisku igieł, prędkości obrotowej układu rozdzielającego oraz warunków termicznych na rezultaty procesu separacji.
2. Przeprowadzone badania zasadnicze separacji dziesięciu mieszanin wykazały, że spełnione jest kryterium skuteczności S na najwyższym trzecim poziomie w przypadku dziewięciu

z nich. Świadczy to o poprawnym określeniu matrycy planu eksperymentu, a także zakresu wartości wielkości wejściowych. Tylko w przypadku mieszaniny PVC/PP kryterium (S) nie zostało spełnione na żadnym poziomie.

3. W przeprowadzonych zgodnie z przyjętymi zakresami wielkości wejściowych procesach separacji, najwyższą pozycję w rankingu spełnienia kryterium (S) zajmuje mieszanina ABS/PE, której wielkości wyjściowe dla obydwu składników przyjmują wartości (SIII) aż w 12 doświadczeniach. Następnie klasyfikuje się mieszanina PET/ABS z 9 doświadczeniami na trzecim poziomie spełnienia kryterium (S). Dla czterech mieszanin PVC/ABS, PP/PE, PVC/PE, PET/PE uzyskano efekty separacji na trzecim poziomie w 6 doświadczeniach. Zadawalające rezultaty procesu uzyskano również dla mieszanin ABS/PP, PET/PP, PVC/PET, których efekty procesu jednocześnie dla dwóch wielkości wyjściowych spełniały kryterium skuteczności na trzecim i drugim poziomie.
4. Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz uzyskanych wyników, wskazane zostały obszary efektywności badanej metody rozdziału dla dziewięciu z dziesięciu badanych mieszanin. Analiza wyników badań zasadniczych uwidacznia zależność twardości od efektów separacji. Wraz ze wzrostem różnicy twardości tworzyw, efekty procesu osiągają większe wartości.
5. Uzyskane w badaniach zasadniczych wyniki separacji mieszanin PVC/ABS oraz PET/ABS, wykazujących małe różnice twardości w temperaturze pokojowej, lecz znaczne różnice w wartościach temperatury mięknięcia, wskazują na możliwość uzyskania dużych wartości efektów separacji dla tego typu mieszanin, podczas prowadzenia procesu przy większych wartościach temperatury ogrzewania. Może być to spowodowane zwiększeniem różnicy twardości w takich warunkach procesu.
6. Wygenerowane modele matematyczne procesu separacji poprawnie charakteryzują jego efekty w odniesieniu do większości badanych mieszanin.
7. Na podstawie oceny istotności wielkości wejściowych ustalono, że efekty separacji w największym stopniu zależą od siły nacisku igieł i temperatury oraz od interakcji pomiędzy tymi wielkościami. Najmniej istotna okazała się prędkość obrotowa układu rozdzielającego co znajduje odzwierciedlenie w wynikach badań efektów separacji.

Wyniki stanowiły podstawę do sformułowania następujących wniosków o charakterze utylitarnym:

1. Separator igłowy którego układ rozdzielający zbudowany jest z górnego koła oraz dolnego koła oporowanego siłownikiem pneumatycznym pomiędzy którymi przechodzi pas separujący oraz pas transportowy, może być wykorzystany do separacji mieszanin tworzyw polimerowych.
2. Dobór odpowiednio mniejszej średnicy igieł umożliwia stosowanie mniejszych sił nacisku ustawianych na urządzeniu, co zmniejsza odkształcenia konstrukcji, a tym samym przekłada się na wydłużenie okresu eksploatacji separatora.
3. Opracowana konstrukcja separatora igłowego a także wyniki badań doświadczalnych mogą być pomocne przy projektowaniu urządzenia w skali przemysłowej.
4. Proces separacji z użyciem opracowanej metody można z powodzeniem zastosować do rozdziału 9 z 10 badanych mieszanin. Nie można go zastosować do rozdziału mieszaniny PVC/PP w warunkach prowadzenia eksperymentu, gdyż wymagana siła nacisku igieł wykracza poza zakres ustalony na potrzeby realizacji badań zasadniczych.

Proces separacji mieszanin tworzyw polimerowych na podstawie różnicy w twardości nie był wcześniej opisywany w żadnych pozycjach literaturowych i może być uznany za innowacyjny. Rozprawa rozszerza wiedzę z dziedziny recyklingu tworzyw polimerowych o nową metodę separacji.

Praktycznym osiągnięciem niniejszej rozprawy jest zaprojektowanie oraz wykonanie stanowiska badawczego pozwalającego na przeprowadzenie badań separacji na podstawie różnicy w twardości rozdzielanych tworzyw. Stanowisko umożliwi prowadzenie dalszych prac badawczych w zakresie wpływu cech geometrycznych rozdzielanych elementów mieszaniny. Dalsze prace rozwojowe powinny być skupione na opracowaniu konstrukcji urządzenia do zastosowań przemysłowych.

Przedstawione wyniki badań oraz wnioski w zestawieniu z hipotezą badawczą i celem rozprawy pozwalają stwierdzić, że hipoteza badawcza została zweryfikowana, a cel rozprawy został osiągnięty.