



Przetwórstwo tworzyw polimerowych Aspekty technologiczne i nowe trendy

Część 1

*redakcja
Emil Sasimowski*

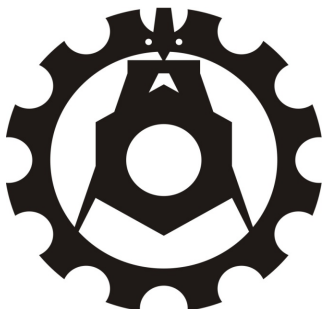
MONOGRAFIE

Przetwórstwo tworzyw polimerowych

Aspekty technologiczne i nowe trendy

Część 1

Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 LUBLIN

Przetwórstwo tworzyw polimerowych

Aspekty technologiczne i nowe trendy

Część 1

redakcja
Emil Sasimowski



Politechnika Lubelska
Lublin 2015

Recenzent:

Prof. Ing. František Greškovič, CSc., Technická Univerzita v Košiciach

Autorzy:

Ludmila Dulebova

Tomasz Jachowicz

Bogusław Królikowski

Paweł Palutkiewicz

Emil Sasimowski

Aneta Świderska

Viera Zatkáliková

Tomasz Garbacz

Anna Kliszkowska

Volodymyr Moravskyi

Karol Pepliński

Janusz Wojciech Sikora

Aneta Tor-Świątek

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2015

ISBN: 978-83-7947-169-0

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatop.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 100 egz. Ogółem 11,7 ark. wyd. W tym w poszczególnych rozdziałach:

R 01 – 1,04 R 02 – 1,14 R 03 – 1,51 R 04 – 0,91 R 05 – 2,20 R 06 – 2,32 R 07 – 1,14 R 08 – 1,32

Spis treści

Wstęp.....	6
1. Aspekty technologiczne wytłaczania z rozdmuchiwaniem swobodnym <i>Tomasz Garbacz, Ludmila Dulebova</i>	8
2. Wytłaczanie mikroporujące – specjalna metoda przetwórstwa <i>Aneta Tor-Świątek, Viera Zatkalíková</i>	23
3. Wpływ rozwiązania konstrukcyjnego ślimaków w wytłaczarce dwuślimakowej współbieżnej na wybrane właściwości otrzymywanych mieszanin polimerowych <i>Bogusław Królikowski</i>	42
4. Technologiczne aspekty otrzymywania kompozytów polimerowych z proszkiem szklanym <i>Anna Kliszowska, Janusz W. Sikora, Volodymyr Moravskyi</i>	65
5. Wpływ warunków przetwórstwa na właściwości wyprasek porowatych <i>Paweł Palutkiewicz</i>	81
6. Metodyka doboru tworzywa przeznaczonego do wtryskiwania wyprasek medycznych na podstawie analizy wyników symulacji procesu wtryskiwania <i>Tomasz Jachowicz, Aneta Świdorska</i>	117
7. Technologiczne aspekty kształtowania folii z polistyrenu <i>Emil Sasimowski</i>	155
8. Wprowadzenie do administrowania zasobami energetycznymi w przetwórstwie wtryskowym i rozdmuchowym tworzyw <i>Karol Pepliński</i>	173

Wstęp

Tworzywa polimerowe są stosowane powszechnie w przemyśle, budownictwie, transporcie, rolnictwie, medycynie, sporcie oraz w życiu codziennym. Wytwory z materiałów polimerowych są otrzymywane w procesach ich przetwórstwa, których celem jest ich wytworzenie w sposób najbardziej racjonalny, ekonomiczny i ekologiczny. Podczas procesów przetwórstwa zachodzą w tworzywie przetwarzanym złożone zjawiska fizyczne i chemiczne oraz zmiany geometryczne, które są prowadzone świadomie celem uzyskania gotowych wytworów o żądanej jakości. Dlatego poznanie jaki jest wpływ warunków przetwórstwa na przebieg tych zjawisk, a w konsekwencji na właściwości otrzymywanych wytworów ma istotne znaczenie dla przetwórców tworzyw. Będące rezultatem badań naukowych informacje o tych zależnościach, mogą być przydatne do zastosowania w dalszych pracach nad doskonaleniem poszczególnych metod przetwórczych, jak również mogą być pomocne przy doborze warunków przetwórstwa.

Monografia zawiera zbiór informacji dotyczących aspektów technologicznych wybranych metod przetwórstwa, oryginalne rezultaty badań naukowych i ich dyskusje, oraz odniesienie do aktualnego stanu wiedzy w tym obszarze.

Problematyka przedstawiona w monografii dotyczy w głównej mierze przetwórstwa fizyczno-chemicznego drugiego rodzaju, w którym wiodącą rolę spełniają zjawiska i procesy fizyczne, zwłaszcza cieplne i reologiczne, a znaczenie zjawisk i procesów chemicznych jest mniej istotne. Należą do niego takie metody przetwórstwa jak wytłaczanie i wtryskiwanie, które są najszerzej stosowane, biorąc pod uwagę zarówno ilość przetwarzanych za ich pomocą tworzyw na świecie jak i liczbę stosowanych maszyn przetwórczych.

W kolejnych rozdziały opracowania przedstawiono następujące zagadnienia: Specyfikę procesu wytłaczania z rozdmuchiowaniem swobodnym. Scharakteryzowano poszczególne odmiany wytłaczania swobodnego z uwzględnieniem otrzymywanych w procesie wytworów o żądanej charakterystyce, a następnie wyniki badań wpływu warunków przetwórstwa na wybrane właściwości użytkowe otrzymywanej folii. Scharakteryzowano również jedno i dwuślimakowe układy uplastyczniające wytłaczarek służące do konstytuowania mieszanin polimerowych. Przedstawiono wyniki badań wpływu rozwiązania konstrukcyjnego ślimaków wytłaczarki dwuślimakowej współbieżnej na konstytuowanie mieszanin binarnych z nie kompatybilizowanych termoplastycznych wtórnych tworzyw polimerowych przeznaczonych do otrzymywania wytworów użytkowych. Wytłaczanie jednoślimakowe stosowane do otrzymywania wytworów dwufazowych tworzywo – gaz o porowatym rdzeniu i litej warstwie zewnętrznej w procesie mikroporowania. Wyniki badań wpływu zawartości dodawanego poroforu na strukturę fizyczną otrzymywanej wytłoczyny. Proces wytłaczania kompozytu polimerowego z napełniaczem w postaci proszku szklanego, który następnie posłużył do przeprowadzenia badań wpływu warunków wtryskiwania na wła-

ściwości wytrzymałościowych otrzymywanych z niego wyprasek wtryskowych. Proces wtryskiwania był również przedmiotem obszernych badań wpływu zarówno zawartości dodawanego do przetwarzanego tworzywa poroforu jak i warunków wtryskiwania na strukturę i właściwości otrzymywanych wyprasek. Przedstawiono także symulację komputerową procesu wtryskiwania na przykładzie wyprasek medycznych oraz scharakteryzowano metodykę doboru tworzywa na podstawie analizy jej wyników.

Ponadto opisano proces kształtowania folii i płyt z tworzyw polimerowych. Przedstawiono wyniki badań wpływu zmian wybranych warunków kształtowania folii z polistyrenu metodą rozciągania stemplowego podciśnieniowego, na nierównomierność grubości ścianki otrzymywanych kształtek.

Zaprezentowano nowy trend występujący w przemyśle przetwórczym tworzyw polimerowych jakim jest administrowanie zasobami energetycznymi. Zaprezentowano kryteria oraz podstawy administrowania zasobami energetycznymi na przykładzie przetwórstwa tworzyw metodą wytłaczania z rozdmuchiwanem nieswobodnym oraz wtryskiwania.

Emil Sasimowski

1. Aspekty technologiczne wytłaczania z rozdmuchiwaniem swobodnym

Charakterystyka procesu wytłaczania z rozdmuchiwaniem swobodnym

Folie polimerowe najczęściej otrzymuje się w procesie wytłaczania z rozdmuchiwaniem swobodnym. Proces ten na wytłoczeniu folii rurowej natychmiastowym jej rozdmuchaniu za pomocą powietrza o nieznacznym ciśnieniu i wyciągnięciu za pomocą urządzenia odbierającego. Podstawowymi warunkami prowadzenia procesu wytłaczania jest rozkład temperatury i ciśnienia tworzywa wzdłuż długości układu uplastyczniającego i głowicy wytłaczarskiej. Tworzywami najczęściej stosowanymi w procesie wytłaczania folii są: polietylen (PE-HD, PE-LD), poli(chlorek winylu), poliwęglan, poliamid, polistyren, octan celulozy [1–3].



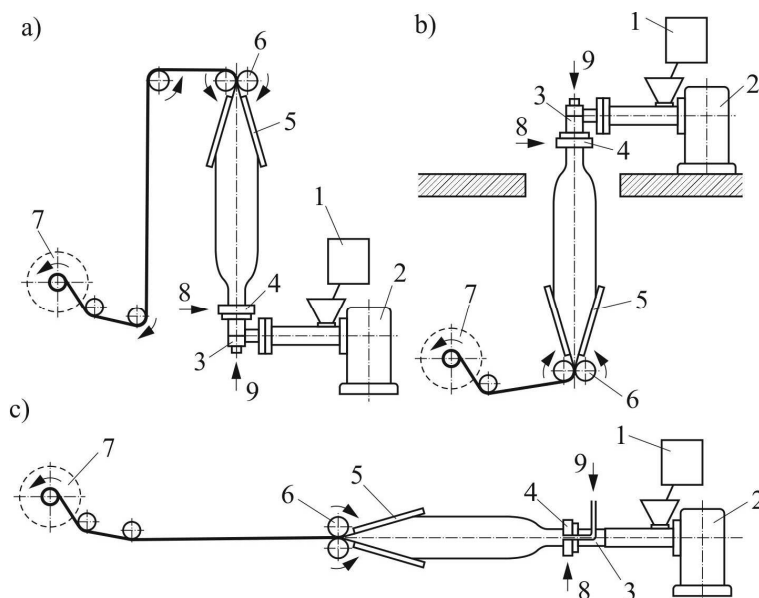
Rys. 1. Przykłady folii w postaci rękawa wytworzonych metodą wytłaczania z rozdmuchiwaniem [www.multipino.pl, www.dir.indiamart.com]

W czasie rozdmuchiwania zachodzi przede wszystkim rozciąganie w kierunku poprzecznym, natomiast podczas wyciągania następuje rozciąganie w kierunku wzdłużnym. Żeby lepiej sterować procesami rozciągania, wytłaczana folia rurowa jest ochładzana bezpośrednio za dyszą głowicy wytłaczarskiej w strumieniu powietrza z urządzenia nadmuchującego [3–5]. W ten sposób otrzymana folia, uznawana jest za nieorientowaną. Natomiast ze względu na kurczenie się pod wpływem ciepła, w zależności od warunków procesu za folie zwykłą lub termokurczliwą. Foliai powstającymi w procesie wytłaczania z rozdmuchiwaniem są bardzo często folie opakowaniowe, które powinny być cienkie, mocne i sztywne. Mocne folie opakowaniowe produkuje się głównie z PE-HD, który

ma dużą lepkość i jest mało rozciągliwy. Cienkie folie, czyli o grubości poniżej $30\mu\text{m}$ wytwarza się przede wszystkim z PE-LD o małej lepkości [6, 7].

Wyróżnia się trzy główne metody wytłaczania z rozdmuchiwaniem swobodnym: pionowo w górę, pionowo w dół oraz poziomo (rys. 2) oraz współwytłaczanie z rozdmuchiwaniem [2–4].

W każdym z tych przypadków linia technologiczna wytłaczania z rozdmuchiwaniem swobodnym składa się z wytłaczarki z głowicą z dyszą szczelinową pierścieniową, urządzenia nadmuchiującego, urządzenia spłaszczającego folię rurową, urządzenia odbierającego i urządzenia nawijającego. W rezultacie otrzymuje się folie w postaci rękawa z tworzyw termoplastycznych.



Rys. 2. Podstawowe możliwości wytłaczania z rozdmuchiwaniem swobodnym: a) pionowo w górę, b) pionowo w dół, c) poziomo; 1 – zbiornik tworzywa, 2 – wytłaczarka, 3 – głowica wytłaczarska, 4 – pierścień nadmuchiujący chłodzący, 5 – urządzenie spłaszczające, 6 – urządzenie odbierające, 7 – urządzenie nawijające, 8 – dopływ powietrza chłodzącego, 9 – dopływ powietrza rozdmuchującego [3]

Sprawność energetyczna wytłaczania z rozdmuchiwaniem swobodnym jest oceniana, jako stosunkowo mała. Właściwości folii – mechaniczne i optyczne zależą głównie od: temperatury folii w chwili opuszczania dyszy głowicy, stopnia rozciągania, stopnia rozdmuchania, grubości folii [3, 4, 8, 9].

Metodą najczęściej stosowaną jest wytłaczanie z rozdmuchiwaniem swobodnym pionowo w górę.

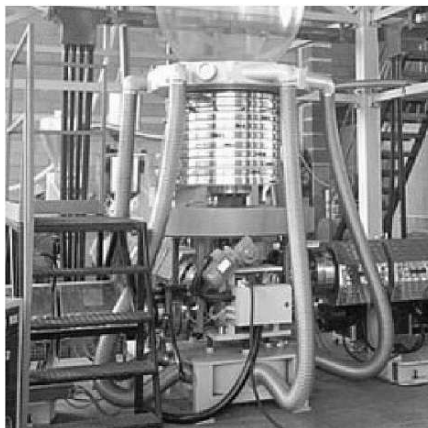
W metodzie tej, przedstawionej schematycznie na rys. 2a, wytłaczarka znajduje się bezpośrednio na podłożu, zaś urządzenia spłaszczające i odbierające usytuowane są w sztywnej konstrukcji ramowej w położeniu pionowym. Wytła-

czana folia w postaci rękawa jest ochładzana bezpośrednio za dyszą głowicy poprzecznej w strumieniu powietrza nadmuchiwanego ze szczelin pierścieni chłodzących przymocowanych do głowicy i do konstrukcji nośnej. Do pierścieni tych doprowadza się powietrze z dmuchawy lub sprężarki. Powietrze wprowadza się do wnętrza folii poprzez głowicę, dlatego, że rękaw wytwarzanej folii z jednej strony jest ograniczony urządzeniem spłaszczającym i odbierającym. Po ochłodzeniu zasadniczym folia jest spłaszczona za pomocą urządzenia spłaszczającego. Urządzenie odbierające stanowią dwa walce, które wyciągają wytłaczaną folię, dlatego też przez to urządzenie przechodzi spłaszczony rękaw folii, który powinien być wolny od zmarszczeń i fałd. [2, 6, 7]. Urządzenie odbierające stanowią natomiast dwa walce dociskane do siebie, za pomocą sprężyny, z których jeden jest napędzany za pomocą silnika elektrycznego z bezstopniową regulacją prędkości obrotowej. Na skutek siły tarcia występującej pomiędzy folią a walcami następuje wyciąganie spłaszczonej folii rurowej. Ochłodzona folia jest nawijana na walce urządzenia nawijającego.



Rys. 3. Przykład linii technologicznych produkcji folii metodą wytłaczania z rozdmuchiwaniem pionowo w górę [www.chinajinda.en, www.cacoplastics.com]

W metodzie tej ze względu na wzajemne usytuowanie poszczególnych urządzeń można w sposób dokładny kontrolować proces rozciągania poprzecznego i wzdłużnego. Powoduje to, że metodą tą produkowane są folie o różnych rozmiarach oraz grubości. Poczynając od folii na małe woreczki opakowaniowe, grubości np. 0,02 mm i szerokości 100 mm, do folii ogrodniczych o grubości 0,3 mm i szerokości 4000 mm. Stosując duże instalacje nie są potrzebne specjalne pomosty robocze, które umożliwiałyby ustawianie głowicy, napędu i wytłaczarki.



Rys. 4. Wygląd fragmentu linii technologicznej wytłaczania pionowo w górę: a) głowica wytłaczarska oraz pierścień chłodzący, b) urządzenie nawijające [www.chinfach.com.tw]



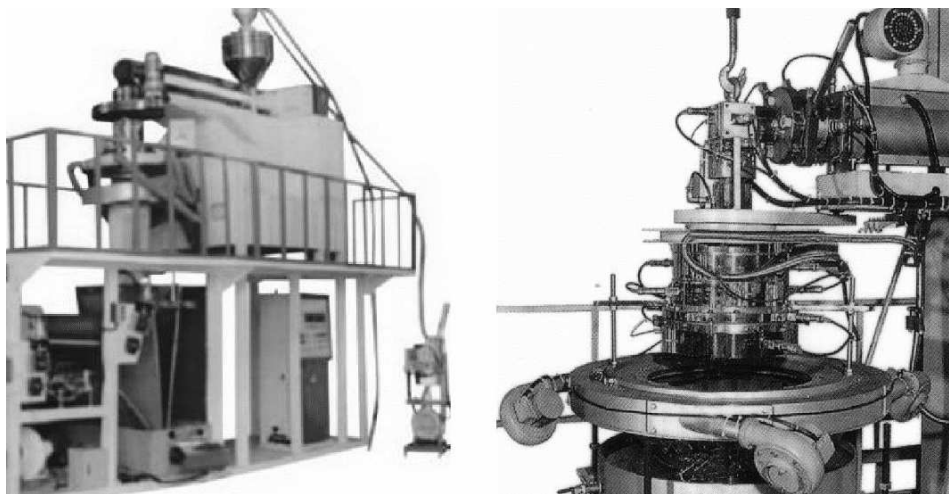
Rys. 5. Przykład linii technologicznej metodą wytłaczania z rozdmuchiwaniem pionowo w górę SJ-55/FM600, przy zastosowaniu podwójnego układu głowic oraz urządzeń pomocniczych: a - wygląd linii technologicznej, b – wygląd układu głowic (double-head) [www.ybmachine.com]

W przypadku grubościennych, trudnych rękawów foliowych ciężar wytwarzanego rękawa, który jeszcze musi być ukształtowany, przenoszony jest przez już zakrzepniętą folię [9].

Ta metoda wytłaczania ma zarówno swoje zalety jak i wady. Zaletą takiego rozwiązania jest to, że w przypadku dużych, o wysokości 5–6 metrów linii technologicznych niepotrzebne są specjalne pomosty robocze do ustawienia wytłaczarki, głowicy i napędu. W przypadku grubościennych, trudnych rękawów foliowych ciężar folii, który jeszcze musi być ukształtowany, przenoszony jest

przez już ochłodzoną folię [9–11]. Natomiast największą i znaczącą wadą tej metody jest pracochłonny rozruch linii technologicznej. Materiał, który przy rozruchu wydostaje się ze szczeliny dyszy głowicy może ulec rozlaniu na czole głowicy i spowodować zatkanie szczeliny, dlatego aby zapobiegać takiemu zjawisku należy bardzo szybko uchwycić i skierować do góry wydostający się jeszcze plastyczny materiał. Rozruch w przypadku tworzyw o małej lepkości jest szczególnie kłopotliwy, ponieważ nadzwyczaj trudno jest wtedy uniknąć małych cząstek tworzywa, które pozostają na krawędziach dyszy głowicy. Cząstki te mogą obniżać jakość folii poprzez zaczepianie, które doprowadza do rozdarcia lub przyklejania się drobinek do niej. Znad grzejników cylindra wytłaczarki unoszą się prądy gorącego powietrza, które powodują nierównomierne chłodzenie rękawa co działa na niekorzyść działania układu [1, 4, 5].

Metoda wytłaczania z rozdmuchiwanym swobodnym pionowo w dół została przedstawiona schematycznie na rys. 2b, zaś wygląd rzeczywisty linii technologicznej pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Przykładowa linia technologiczna oraz wygląd głowicy wytłaczarskiej przy produkcji folii metodą wytłaczania z rozdmuchiwanym swobodnym pionowo w dół [www.ybmachine.com, www.rommel.de]

W układzie tym urządzenia odbierające oraz nawijające ustawione są na poziomie dolnym (podłożu), natomiast wytłaczarka na wyższym poziomie. Ustawienie wytłaczarki narzuca konieczność budowania sztywnej konstrukcji stalowej w przypadku braku odpowiedniego dwupoziomowego pomieszczenia. Grzejniki cylindra i głowicy nagrzewają powietrze, które mimo wszystko nie przyczynia się do zakłócania przy chłodzeniu folii. Jednak ruchy zimnego powietrza występujące w pomieszczeniu gdzie odbywa się wytłaczanie mogą prowadzić do zakłóceń. Zaletą tego układu jest łatwy rozruch urządzenia, nie wy-

stępują tutaj żadne trudności jak w przypadku wytłaczania pionowo w górę. Główną wadą tego układu jest fakt, iż pod wpływem własnego ciężaru, przy dyszy głowicy wytłaczarskiej, występuje możliwość deformowania się gorącej folii. Dzieje się tak szczególnie w przypadku wytłaczania małych rękawów z dużymi szybkościami, co sprawia że zostaje ograniczona odległość między urządzeniem odbierającym a ustnikami. Bardzo niekorzystnie wpływa przesadne zmniejszenie tej odległości ze względu na zbyt krótki okres chłodzenia rękawa, który w sytuacji niewystarczającego ochłodzenia ma skłonność do sklejania się po zwinięciu w rolkę.

W praktyce poprzez podtrzymujące działanie płyt prowadzących lub wałków łągodzony jest wpływ ciężaru rękawa. Właśnie z tego powodu odległość pomiędzy wałkami zaciskającymi a ustnikiem wynosi 2,5 - 5 m. Ta odległość pozwala zazwyczaj na równomierne spłaszczenie rękawa (bez załamań i fałd) oraz na całkowite ochłodzenie. Budowanie mocnej konstrukcji nośnej, na której odbywa się praca wytłaczarki jest konieczne. Można jednak uniknąć tej trudności stosując odpowiednie ustawienie. Wytłaczarkę należy ustawić na jednej kondygnacji budynku, zaś na kondygnacji niższej urządzenia odbierające.

Wytłaczanie z rozdmuchiwaniami poziomym zostało pokazane w schemacie na rys. 2c zaś wygląd rzeczywisty linii technologicznych przedstawiono na rys. 7 oraz 8. Wytłaczarka, głowica wytłaczarska oraz pozostałe elementy pomocnicze linii technologicznej usytuowane są w poziomi, tak jak w klasycznej linii wytłaczania, na przykład profili. Wytłaczarki ze ślimakiem pracującym w układzie pionowym nie wymagają zmiany kierunku wypływu stopu tworzywa.



Rys. 7. Wygląd linii do wytłaczania folii porowatej firmy IMG-Plastec [www.imgplastech.com]

W przypadku usytuowania linii technologicznej w pomieszczeniach niskich pewną zaletą jest fakt iż wytłaczarka oraz urządzenie odbierające umieszczone są na tym samym poziomie.



Rys. 8. Wygląd linii do wytłaczania folii firmy Plastmate [www.opakowania.com.pl]

Wytłaczanie poziome można prowadzić przy pomocy dwóch rodzajów głowicy: głowicy kątowej lub głowicy prostej. W pierwszym wypadku oś cylindra ustawiona jest pod pewnym kątem do biegu wytłaczania, natomiast w drugim wypadku bieg wytłaczania pokrywa się z osią cylindra wytłaczarki. Rodzaj głowicy, który zostanie wybrany tak naprawdę zależy wyłącznie od warunków lokalowych. Mimo dużego ułatwienia w układzie poziomego wytłaczania jakim jest bezproblemowy dostęp do wszystkich elementów urządzenia posiada on kilka wad. Zwisanie rękawa folii pod wpływem sił ciężkości to jedna z największych wad tego układu. W szczególności przy większych średnicach rękawów występujące zwisy są dosyć duże. Sprawia to, że rozciąganie rękawa odbywa się nierównomiernie, przez co nawija się na rolkę nierówno, tworząc załamania i zmarszczki. Oprócz tego grubość takich folii nie jest taka sama na całym obwodzie. Kolejną wadę tej odmiany wytwarzania folii, która jest niezmiernie szkodliwa to występujące nierównomierne chłodzenie wytłaczanego rękawa, które jest spowodowane oddziaływaniem ciepłego powietrza na jego górną część. Zazwyczaj układ poziomy stosuje się przeważnie podczas wytłaczania rękawów o małych średnicach. Zwarta budowa ułatwia instalowanie wytłaczarek w układzie poziomym na obrotowych stołach. Dzięki temu zbędne są inne obracające się elementy instalacji, stosowane dla prawidłowego nawijania się folii. Małe gabaryty wytłaczarek i wynikająca z tego ograniczona wydajność produkcyjna powoduje, ograniczone natężenie przepływu tworzywa i możliwość wytwarzania folii o dużych średnicach, ponad 1–2 metra [1, 2, 5].

Współwytłaczanie z rodmuchiwanym swobodnym jest procesem technologicznym służącym do wytwarzania folii wielowarstwowej. W procesie współwytłaczania można wytwarzać folię mającą od dwóch (rys. 9) do najczęściej siedmiu różnych warstw tworzywa.



Rys. 9. Przykład linii technologicznej do wytwarzania folii dwuwarstwowej oraz wygląd otrzymywanej folii dwuwarstwowej (dwukolorowej) [www.herowu.com]

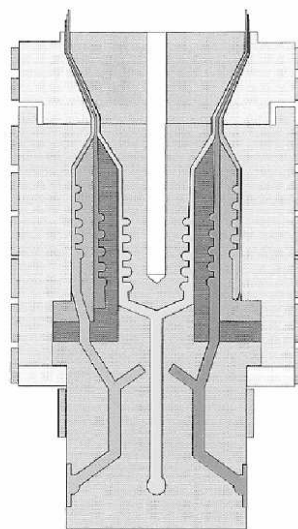
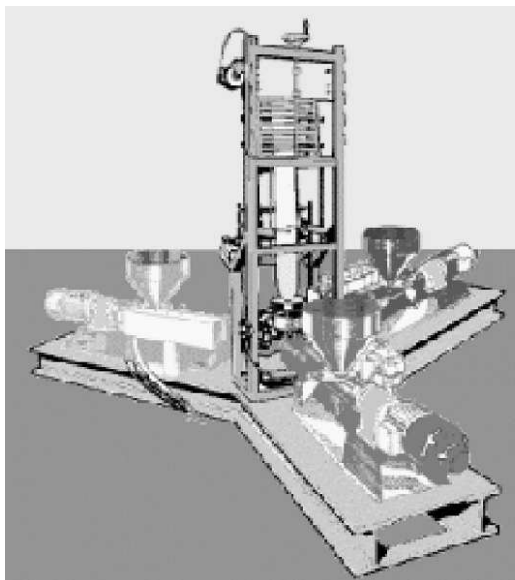
Poszczególne warstwy mogą mieć różną grubość, być wykonane z tworzywa o innej barwie, rodzajów tworzyw różniących się właściwościami fizykochemicznymi, właściwościami wizualnymi. Linia technologiczna współwytłaczania z rozdmuchiwaniami posiada dwie, trzy (rys.10) lub więcej wytłaczarek w zależności od ilości warstw w wytwarzanej folii. Każda wytłaczarka ma oddzielne urządzenia przygotowawcze.

W urządzeniu nadmuchiującym chłodzącym odbywa się zasadnicze ochładzanie folii. Urządzenie to stanowią pierścienie z otworami od strony folii. Główny pierścień przymocowany jest do głowicy, natomiast pomocnicze pierścienie przymocowane są do konstrukcji nośnej linii. Pierścienie na ogół mają różne ścianki kierujące powietrze oraz różny przekrój poprzeczny. Doprowadza się do tych pierścieni oczyszczone w filtrach powietrze ze sprężarki lub bezpośrednio z dmuchawy. Wpływ na proces rozciągania i przez to między innymi na skurcz folii w kierunku poprzecznym i wzdłużnym ma intensywność oraz sposób chłodzenia.

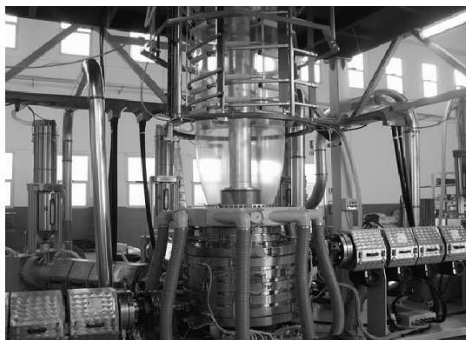
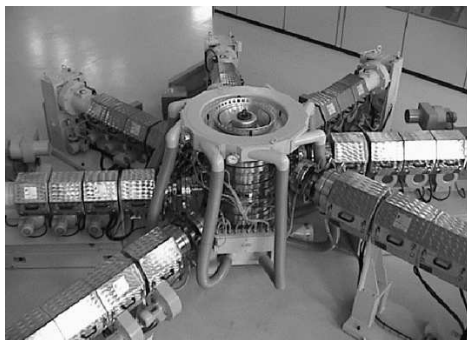
Zastosowanie metody współwytłaczania z rozdmuchiwaniami pozwala na:

- ułatwienie pracy maszyny pakującej (ze względu na zwiększenie sztywności produkowanej folii),
- polepszenie właściwości przetwórczych folii,

- polepszenie właściwości użytkowych (na przykład zwiększenie współczynnika tarcia, przejrzystości, odporności cieplnej),
- obniżenie kosztów wytwarzania folii, poprzez zmniejszenie kosztów tworzywa na warstwy specjalne oraz całkowitej grubości folii bez zmiany właściwości mechanicznych.



Rys. 10. Zasada podłączenia wylączarek przy wytwarzaniu folii trójwarstwowej oraz schemat poglądowy kanałów przepływowych w głowicy do współwylączania folii trójwarstwowej [www.axonmachinery.se]



Rys. 11. Wygląd fragmentu linii technologicznej współwylączania folii 7-warstwowej; a – wylączarki wraz z głowicą do współwylączania, b – wygląd linii technologicznej podczas wytwarzania folii [www.zocchigiovanni.it]

Charakterystyka prowadzonych badań

Celem badań przedstawionych w pracy było określenie charakterystyki folii jednowarstwowej otrzymanej metodą wytłaczania z rozdmuchiwanym pionowo w górę.

W skład stanowiska badawczego wchodzi linia technologiczna do wytłaczania z rozdmuchiwanym folii W 25/25 przedsiębiorstwa "Metalchem" Toruń (rys. 13) oraz stanowisko do pomiaru grubości folii.

Linia technologiczna składa się z: wytłaczarki, głowicy wytłaczarskiej, urządzenia nadmuchiującego chłodzącego i doprowadzającego powietrze rozdmuchujące, urządzenia spłaszczającego, urządzenia odbierającego, urządzenia nawijającego.

Wytłaczarka laboratoryjna, stanowiąca integralną część linii technologicznej wytłaczania z rozdmuchiwanym jest zbudowana z następujących układów i zespołów:

- Układ uplastyczniający, składający się ze ślimaka o średnicy 25 mm i długości roboczej $L = 25 D$. W tylnej części cylindra jest wykonany otwór zasypowy, na którym jest przymocowany zasobnik grawitacyjny tworzywa wejściowego.
- Zespół grzejny układu uplastyczniającego, w którego skład wchodzi osiem grzejników o średnicy 51 mm, mocy 300 W i napięciu 220 V podzielonych na trzy strefy, w które są wbudowane trzy czujniki temperatury.

Układ narzędziowy stanowi głowica wytłaczarska krzyżowa (pierścieniowa) (rys. 12). Głowica krzyżowa charakteryzuje się, dyszą szczelinową o średnicy 90 mm i szerokością szczeliny pierścieniowej otworu wylotowego 0,8 mm. Głowica posiada układ trzech grzejników o mocy 600 W, podzielonych na dwie strefy z wbudowanymi dwoma czujnikami temperatury w układzie uplastyczniającym oraz pierścienia chłodzącego folie.



Rys. 12. Wygląd głowicy krzyżowej pierścieniowej wraz z urządzeniem nadmuchiującym chłodzącym



Rys.13. Wygląd stanowiska technologicznego W 25/25 wytłaczania z rodmuchiowaniem folii

Urządzenie nadmuchujące chłodzące na stanowisku badawczym składa się z silnika prądu przemiennego o mocy 0,55 kW, zasilanego prądem o napięciu 380 V, połączonego z wentylatorem, z którego powietrze jest tłoczone poprzez przewód rurowy i przepustnicę z regulacją do zbiornika wyrównawczego, skąd jest rozprowadzane przewodami rurowymi o mniejszej średnicy do pierścienia chłodzącego usytuowanego w głowicy wytłaczarskiej.

Urządzenie spłaszczające składa się z listw spłaszczających oraz pary wałków spłaszczających, które są zamocowane w górnej części ramy odciągowej. Listwy te składają się z dwóch podzespołów: nieruchomego oraz rozruchowego. Wałki spłaszczające dociskane są do siebie sprężynowo.

Na urządzenie odbierające składają się dwa walce, które wykonane są z rolek metalowych pokrytych na powierzchni walcowej warstwą gumy. Jeden z walców napędzany jest z silnika elektrycznego o mocy 0,25 kW, prędkości obrotowej do 46 s^{-1} , przez przekładnię redukcyjną łańcuchową. Wskutek docisku walców za pomocą sprężyny powstaje siła tarcia niezbędna do wprowadzania w ruch drugiego walca i przemieszczania pomiędzy nimi spłaszczonej folii.

Urządzenie nawijające składa się z dwóch walców, jeden z nich napędzany jest bezpośrednio z silnika urządzenia odbierającego, a tym samym prędkość nawijania jest zależna od prędkości rozciągania folii. Szerokość maksymalna nawijanej folii wynosi 400 mm, natomiast średnica wewnętrzna rulonu waha się w granicach od 74 do 84 mm.

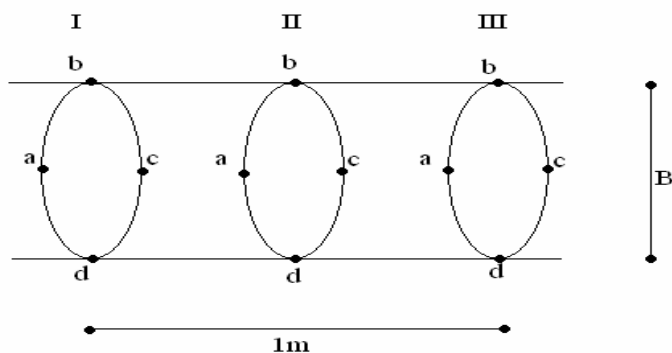
W badaniach zastosowano polietylen małej gęstości zawierający przeciwutleniające oraz dodatki antyblokingowe i poślizgowe, zapobiegające sklejeniu się folii mającego zastosowanie do wytwarzania folii opakowaniowych. Był to polietylen LDPE o nazwie handlowej MALEN E, FABS 23-DO22, gęstości 925 kg/m^3 , MFR w zakresie 1,6-2,5 g/10 min (190°C , 2,16 kg), granicy plastyczności przy rozciąganiu 12 MPa.

W prowadzonych badaniach ustalono temperaturę tworzywa w układzie uplastyczniającym odpowiednio: strefa zasilania 150°C , strefa przemiany 180°C , strefa dozowania 190°C , temperatura głowicy 165°C .

W programie badań przyjęto jako czynniki badane bezpośrednio przyjęto: grubość otrzymanej folii g_1 oraz szerokość spłaszczonej folii, B, mm. Czynniki wynikowymi są: stopień rozciągania w kierunku poprzecznym, R_p oraz stopień rozciągania w kierunku wzdłużnym, R_w . Czynnikiem zmiennym jest prędkość obrotowa walców urządzenia rozciągającego n , s^{-1} , w zakresie od 15 do 80 obr/min.

Wyniki badań i podsumowanie

Pomiar grubości otrzymanych folii został wykonany w 12 punktach, po 4 pomiary na różnych długościach odcinka folii w postaci rękawa. Schemat pomiarów został przedstawiony poniżej na rysunku 14.

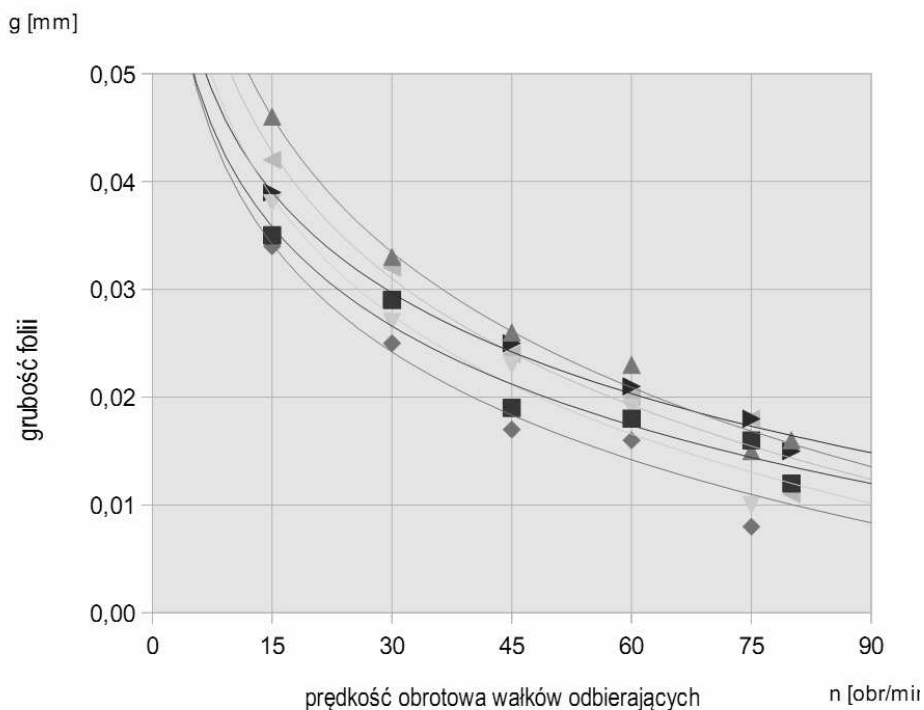


Rys. 14. Schemat rękawa foliowego: a, b, c, d, punkty, w których został dokonany pomiar grubości folii, oraz płaszczyzny pomiarów: I, II, III, B - szerokość płaskiego rękawa folii.

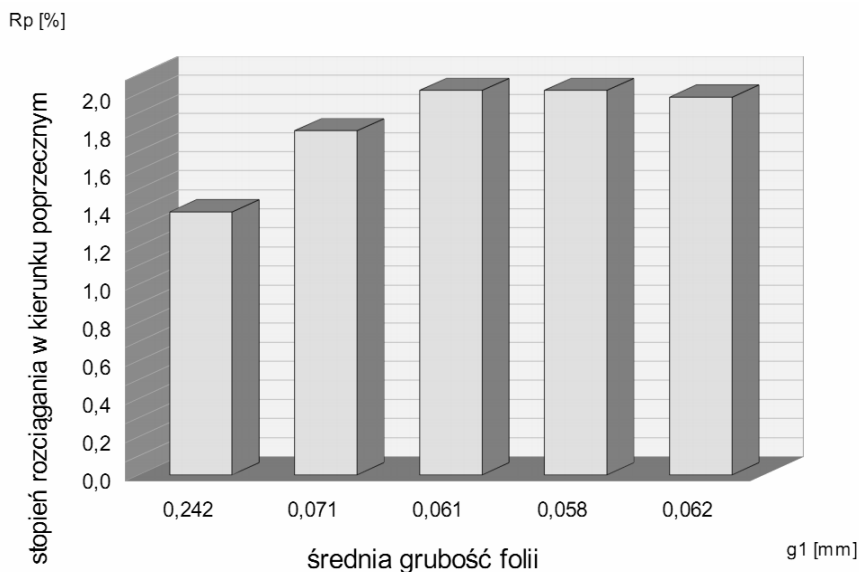
Wyniki pomiarów grubości folii w zależności od zmiany parametrów procesu przedstawiono w tabeli 1, zaś wyniki badań w postaci graficznej pokazano na rys. 15–17.

Tabela 1. Wyniki pomiarów grubości folii mierzonej w punktach charakterystycznych

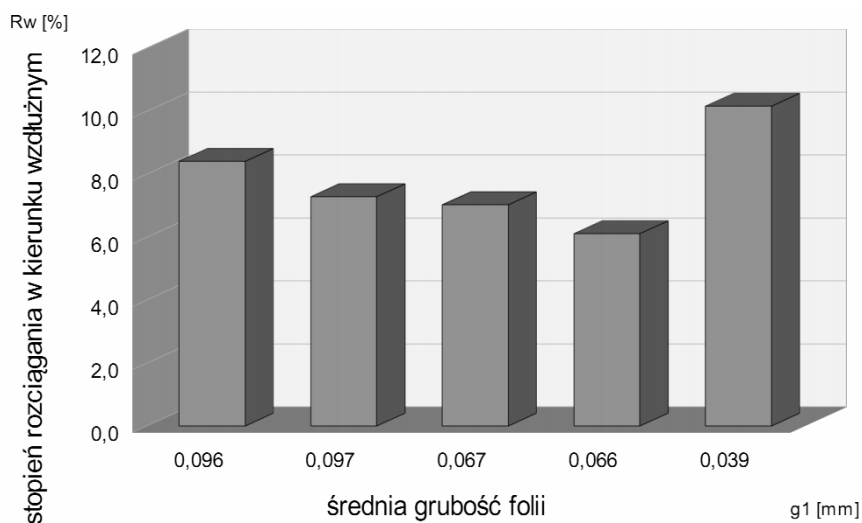
Prędkość obrotowa walców n [obr/min]	Grubość folii [mm]				Średnia grubość folii g_1 [mm]
	a	b	d	d	
15	0,237	0,238	0,243	0,247	0,242
15	0,066	0,068	0,066	0,081	0,071
15	0,060	0,054	0,061	0,064	0,061
15	0,057	0,052	0,055	0,063	0,058
15	0,065	0,055	0,057	0,072	0,062
30	0,032	0,031	0,028	0,040	0,034
45	0,020	0,020	0,020	0,021	0,022
60	0,022	0,016	0,015	0,013	0,016
75	0,013	0,012	0,014	0,016	0,014
80	0,012	0,010	0,012	0,010	0,010



Rys.15. Zależność średniej grubości folii w punktach charakterystycznych od prędkości walców odbierających



Rys. 16. Wykres zależności stopnia rozciągania folii w kierunku poprzecznym od średniej grubości folii



Rys.17. Wykres zależności stopnia rozciągania folii w kierunku wzdłużnym od średniej grubości folii

Przeprowadzone badania, charakterystyki procesu wytłaczania z rozdmuchiwaniem folii pozwalają na przedstawienie następujących wniosków. Zastosowanie podczas prób wytłaczania tworzywa Polietylen Malen-E FABS 23D022 oraz warunki przetwórstwa takie jak: temperatura w układzie uplastyczniającym

wyłaczarki oraz temperatura w głowicy wyłaczarskiej, zostały dobrane prawidłowo, co przyczyniło się do otrzymania folii w postaci rękawa nie mającej wizualnych błędów i anomalii. Zmiana prędkości obrotowej walców odbierających w zakresie od 15 do 80 obr/min, spowodowała, że grubości folii uległa zmniejszeniu o ponad 2300%. Różnice w grubości folii otrzymanej w tych samych warunkach technologicznych są wynikiem zmiennego masowego natężenia przepływu tworzywa oraz ilością i ciśnieniem powietrza rozdmuchującego, co w efekcie determinuje grubość folii w różnych miejscach rękawa oraz średnicę wytłaczanej folii. Stopień rozciągania folii w kierunku wzdłużnym zależy jest od warunków procesu technologicznego i w przypadku zmiany prędkości obrotowej wzrasta wraz ze wzrostem prędkości od 8% przy 15obr/min do ponad 20% przy 80 obr/min. Zmiana stopnia rozciągania folii w kierunku poprzecznym zależy w mniejszym stopniu od zmiany prędkości walców urządzenia odbierającego i przy zmianie od 15 do 80 obr/min wynosi tylko od 1,5 do 1,70%, w zależności od rodzaju próbek folii.

Literatura

- [1] Zawistowski H., *Zasady wytłaczania folii rozdmuchiowanych*. Plastech Wydawnictwo Poradników i Książek technicznych, Warszawa 1999, 131–151.
- [2] Stasiek J., *Współczesne technologie i urządzenia do wytłaczania folii metoda wytłaczania z rozdmuchiowaniem*. „Polimery” 2005, 3, s. 170–175,
- [3] Sikora R., *Przetwórstwo Tworzyw Polimerowych. Podstawy logiczne, formalne i terminologiczne*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006, 428–431.
- [4] Lutomirski S., *Metody stabilizacji grubości folii w procesie jej wytwarzania metodą wytłaczania ze swobodnym rozdmuchiowaniem*. „Przetwórstwo Tworzyw” 2005, 2, s. 50–52.
- [5] Michaeli W., Schmitz T., *Folienextrusion: PET-Extrusion ohne Vortrocknung?* „Kunststoffe” 2004, 8, s. 114–119.
- [6] Sikora R., Garbacz T., *Ocena jakości wytworów otrzymywanych metodą wytłaczania z rozdmuchiowaniem*. „Polimery” 2000, 6, s. 540–545.
- [7] Sikora R., Jachowicz T., *Wpływ czasu ochładzania na skurcz przetworczy wytworów otrzymywanych metodą wytłaczania z rozdmuchiowaniem*. „Polimery” 2000, 11, s. 713–716.
- [8] Stasiek J., *Kierunek rozwoju linii do wytłaczania z rozdmuchiowaniem folii, w tym z rozdmuchiowaniem dwustopniowym*. „Przetwórstwo tworzyw” 2005, 4, s. 15–17.
- [9] <http://www.imgplastec.com>.
- [10] <http://www.bbmachinery.com>.
- [11] <http://www.chinfach.com.tw>.

2. Wytłaczanie mikroporujące – specjalna metoda przetwórstwa

Wstęp

Modyfikacja struktury tworzyw polimerowych obecnie stała się koniecznością ze względu na ciągły rozwój nowych kierunków zastosowań, rosnące wymagania stawiane wytworom oraz skutek potrzeby zmiany lub udoskonalenia właściwości użytkowych i technologicznych tworzyw. W procesie wytłaczania modyfikację wytworów można osiągnąć poprzez zmianę parametrów technologicznych procesu, cech konstrukcyjnych układu uplastyczniającego i narzędzi przetwórczych, jak również przez dodanie środków pomocniczych – modyfikatorów przetwarzania czy właściwości [7, 9, 25, 26].

Środki pomocnicze, które zmieniają strukturę fizyczną wytworów z jednofazowej litej na dwufazową tworzywo – gaz nazywane są środkami porującymi i mikroporującymi, lub też poroforami. Modyfikacja oparta na ich dodaniu polega na wprowadzeniu tych materiałów podczas przetwarzania tworzywa lub bezpośrednio przy jego produkcji. Środki te rozkładając się podczas przetwórstwa tworzą mieszaninę substancji gazowej i polimeru. Środki mikroporujące wykorzystywane w przetwórstwie tworzyw polimerowych mogą mieć postać gazu, proszku, granulatu, cieczy oraz mikrosfer [11, 21, 25].

Dzięki wydzieleniu się struktury porowatej wytwory uzyskują nowe właściwości użytkowe i technologiczne jak:

- zmniejszenie masy wytworu,
- zmniejszenie zużycia tworzywa,
- polepszenie właściwości tłumiących i izolacyjnych,
- zmniejszenie skurczu przetwórczego,
- podwyższenie sztywności,
- zmniejszenie palności oraz chłonności wody
- zwiększenie wydajności procesu wytwarzania,
- zmniejszenie zużycia energii przez linię technologiczną.

Wzrost zainteresowania wytworami o strukturze dwufazowej, sprzyja powstawaniu nowych metod przetwórstwa jakimi są np. wytłaczanie porujące i mikroporujące. Procesy te w zależności od charakterystyki rozkładu środka mikroporującego mogą być prowadzone w konwencjonalnych liniach technologicznych, lecz muszą zostać uwzględnione odpowiednie warunki przetwarzania. Istotną rolę odgrywa temperatura poszczególnych stref układu uplastyczniającego. Jej wartość powinna być tak dobrana, aby porofor uległ rozkładowi w odpowiedniej strefie układu uplastyczniającego maszyny przetwórczej. Duże znacze-

nie ma efektywność homogenizacji, co determinuje odpowiednia konstrukcja ślimaka i cylindra. Ze względu na zmienne warunki (wysoka temperatura, duże ciśnienie, znaczne naprężenia ścinające), które oddziałują na tworzywo w układzie uplastyczniającym procesy wytłaczania mikroporującego są trudne do prowadzenia [13, 19, 23].

Nieustanny rozwój przetwórstwa tworzyw porowatych i mikroporowatych w zakresie procesu oraz konstrukcji maszyn, narzędzi i urządzeń wchodzących w skład linii technologicznych determinuje rozwój obszarów zastosowania tych tworzyw. Ważnym czynnikiem powodującym stosowanie środków mikroporujących jest znaczące obniżanie masy wytworów nawet o 50%. W większości przypadków uzyskuje się zmniejszenie kosztów wytwarzania oraz ich eksploatacji. Ze względu na swoje właściwości izolacyjne materiały mikroporowate znajdują zastosowanie w budownictwie i chłodnictwie. Są dobrymi środkami wygłuszającymi, mogą również służyć do tłumienia drgań maszyn [6, 10, 15].

Charakterystyka procesu wytłaczania mikroporującego

Proces wytłaczania mikroporującego jest obecnie jedną z szybciej rozwijających się metod przetwórstwa tworzyw polimerowych, w ostatnich latach coraz częściej stosowaną. Istotnym czynnikiem przemawiającym za tą metodą jest zmniejszenie gęstości wycieczyn przy jednoczesnym zachowaniu zbliżonych właściwości do wytworów wytłaczanych metodą konwencjonalną. Kształtowniki, rury, powłoki wykonane tą metodą są pozbawione zapadnięć na powierzchni zewnętrznej i wykazują minimalny skurcz przetwórczy [18, 25].

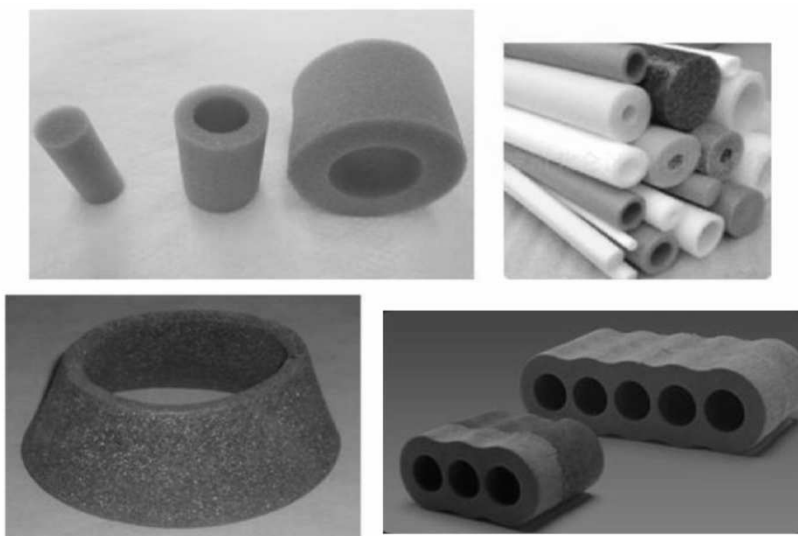
Proces wytłaczania mikroporującego bazuje na dodaniu do tworzywa wejściowego środka mikroporującego zawierającego gaz, który przy odpowiednich warunkach procesu ulega rozprężeniu i ekspansji, a mikrosfery zwiększają swoje rozmiary kilkakrotnie. Wynikiem takiego działania jest wytwór, który ma strukturę dwufazową – tworzywo-gaz. Struktura wycieczyny zmienia się z litej na mikroporowatą. Powstała struktura fizyczna może być mikroporowata w całym przekroju wytworu lub mieć litą warstwę zewnętrzną i mikroporowaty rdzeń. W przypadku powłok mikroporowatych nowa struktura może być wielowarstwowa. Rozkład mikroporów w przekroju wytworu uzależniony jest przede wszystkim od zastosowanego dozownika, konstrukcji ślimaka i szybkości obrotowej ślimaka [10, 20, 22].

Środki mikroporujące wprowadzane do tworzywa wejściowego mogą mieć różną postać: gazu obojętnego, cieczy niskowrzącej lub ciała stałego – które w określonych warunkach procesu wytłaczania przechodzi w gaz. Ciecze i ciała stałe mieszane są z tworzywem przed doprowadzeniem do zasobnika wytłaczarki lub też mogą być dostarczane do tworzywa w trakcie trwania procesu. Natomiast gazy obojętne i ciecze niskowrzące wprowadzane są pod ciśnieniem bezpośrednio do strefy zasilania układu uplastyczniającego wytłaczarki za pomocą

specjalnych urządzeń dozujących. Przy odpowiedniej temperaturze gaz rozpuszcza się w otaczającym tworzywie powodując powstawanie mikroporów. Dobór środka mikroporującego warunkuje również powstające mikropory, które mogą być wypełniane powietrzem lub innymi gazami, np. CO₂, czy N₂. Są one, w wyniku dyfuzji, zastępowane przez powietrze [5, 12, 26].

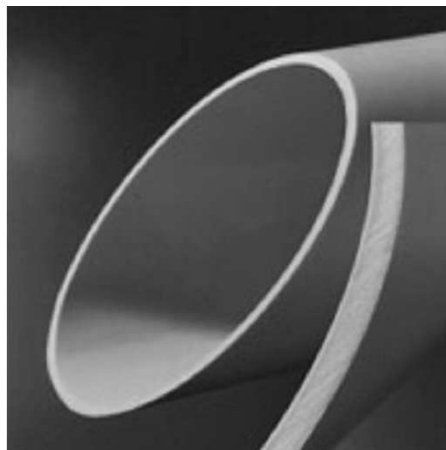
Warunkiem właściwego rozkładu środka mikroporującego jest właściwe dobranie warunków procesu wytłaczania, a przede wszystkim temperatur w kolejnych strefach układu uplastyczniającego oraz głowicy wytłaczarskiej. Jest to szczególnie ważne, gdyż porofor musi ulec rozkładowi w ostatniej strefie układu uplastyczniającego wytłaczarki. Ważnym aspektem prowadzenia procesu jest także ustalenie niższej wartości temperatury głowicy wytłaczarskiej w porównaniu do ostatniej strefy układu uplastyczniającego. Zwiększa to lepkość tworzywa, co w następstwie nie dopuszcza do rozprężania się gazu znajdującego się w tworzywie [22, 24, 26].

Oczekiwaną postacią jest struktura o małych porach, którą uzyskuje się poprzez jak najszybsze ochłodzenie wytłoczyny i jej zestalenie. Wytłoczyna może mieć strukturę fizyczną mikroporowatą w całej masie (rys. 1) lub może posiadać mikroporowatą rdzeń przy litej warstwie wierzchniej (rys. 2).



Rys. 1 Przykładowe wytwory porowate w całym przekroju [30]

Znaczący wpływ na kształtowanie się struktury mikroporowatej wytłoczyny ma intensywność ochładzania wytłoczyny. Dzięki zmianom temperatury ochładzania można uzyskać różny stopień sporowacenia struktury wytłoczyny [36]. Szybkie i intensywne chłodzenie można uzyskać poprzez zastosowanie urządzeń kalibrujących, których zastosowana odmiana jest uzależniona od metody porowania.



Rys. 2 Przykład wytłoczyny mikroporowej posiadającej litą warstwę wierzchnią [25]

Proces wytłaczania mikroporującego jest trudny do prowadzenia, ale przy odpowiednim dobraniu tworzywa wejściowego, środka mikroporującego, warunków procesu oraz cech konstrukcyjnych narzędzi można otrzymywać wytwory o zmienionej strukturze i właściwościach sterowanych w żądanym kierunku [23, 34].

Metody wytłaczania mikroporującego

Ze względu na strukturę otrzymanego wytworu wyodrębnia się następujące rodzaje wytłaczania porującego [6, 25]:

- porowanie swobodne,
- porowanie do wewnątrz,
- porowanie częściowe,
- współwytłaczanie.

Metoda porowania swobodnego opatentowała w 1970 roku przez firmę Société Armosing. Podczas wytłaczania t   metod   powstaje wytwór o strukturze mikroporowej w całym przekroju poprzecznym. Rozrost struktury ograniczony jest przez och  dzanie wyt  lczyny, która ma regularną g  sto   w zewn  trzniej warstwie, a ma   w pobli  zu rdzenia. Dysza g  wicy wyt  lczarskiej musi mieć mniejszy przekrój poprzeczny, w stosunku do przekroju poprzecznego kanału kalibratora. Wyt  lczanie metod   porowania swobodnego stosowane jest do wytwarzania prostych porowatych kształtowników o niewielkich grubościach ścianek ($2 \div 6$ mm) [20, 25].

Odrębnym sposobem przeprowadzenia wyt  lczania porującego jest metoda porowania do wewnątrz, która nazywana jest również metod   Celluka. Produktem finalnym tego procesu jest wyt  lczyna mikroporowata z litą warstwą zewnętrzną. G  wica wyt  lczarska wykorzystywana w tej metodzie jest wyposa-

zona w trzpień, który służy do kształtowania wewnętrznego pustego odcinka w tworzywie. Kalibrator nadający ostateczne wymiary i kształt wytłoczninie, ma wymiary przekroju poprzecznego odpowiadające powierzchni przekroju dyszy głowicy wytłaczarskiej. Tworzywo po opuszczeniu dyszy głowicy ulega intensywnemu chłodzeniu na całej długości kalibratora. Dzięki wydłużeniu kalibrowania rozrost poroforu zostaje zahamowany, a warstwa zewnętrzna kształtownika pozostaje lita. Grubość litej zewnętrznej warstwy można zmieniać poprzez sterowanie intensywnością chłodzenia. Jest to istotna różnica w stosunku do porowania swobodnego, gdzie czas rozrostu porów jest wydłużony przez zwiększenie odległości między głowicą wytłaczarską a kalibratorem. Kształtowniki wytwarzane tą metodą cechuje bardzo dobra jakość powierzchni zewnętrznej, z odpowiednią gładkością [25].

Porowanie częściowe jest połączeniem metod porowania swobodnego i Celluka. Wytłoczyny mikroporowate otrzymane tą metodą, charakteryzują się częściowo litą warstwą zewnętrzną. Proces ten opiera się na intensywnym chłodzeniu wytworu, tylko w określonym miejscu. Pozostała jego część jest porowana w sposób swobodny [11, 17].

Otrzymywanie porowatych wytworów jest możliwe również dzięki metodzie współwytłaczania mikroporującego. W przypadku tej metody otrzymuje się wytwory lekkie, tanie, o dużej sztywności, które spełniają specyficzne wymagania dotyczące właściwości warstwy zewnętrznej. Za pomocą współwytłaczania można uzyskać wytłoczyny składające się z kilku warstw, które mogą różnić się np. strukturą lub kolorem. Proces przebiega przy wykorzystaniu co najmniej dwóch wytłaczarek, transportujących określone tworzywo ze stałym natężeniem przepływu do wspólnej głowicy wytłaczarskiej. Koszt wykonania głowicy do współwytłaczania jest dosyć wysoki, co stanowi zasadniczą wadę tego procesu [20].

Wymagania technologiczne dotyczące wytłaczania mikroporującego kształtowników i powłok wymuszają specyficzny sposób konstruowania głowic wytłaczarskich. Głowice do wytwarzania wytłocznin mikroporowatych i głowice do wyrobów litych różnią się budową. Zasadniczą różnicą jest pomniejszenie przekroju dyszy głowicy wytłaczarskiej w porównaniu do przekroju poprzecznego wytłoczyny porowatej. Spowodowane jest to tym iż, przekrój kształtowany w głowicy pozostaje lity aż do chwili opuszczenia dyszy – w tym momencie następuje zwiększenie przekroju w wyniku porowania swobodnego oraz nałożenia się efektu Barusa [6, 11, 16, 26].

Uwzględniając powyższe założenia, przekroje poprzeczne kanałów głowicy wytłaczarskiej muszą być na tyle duże, aby nie występował w nich duży spadek ciśnienia tworzywa. Opór płynięcia strumienia tworzywa musi być jak najmniejszy, a dysza stosunkowo krótka. Jest to więc konstrukcja odmienna od budowy głowic do wytworów litych, gdzie stosowane są dysze z kanałem o stałym przekroju. Budowa głowicy i dyszy musi uwzględniać uwarunkowania dotyczące metody otrzymywania wytłoczyny mikroporowatej. Na przykład w przypadku porowania swobodnego, konstrukcja głowicy ma zapewnić warunki aby przedwczesne porowanie nie było możliwe, gdyż spowoduje to powstanie nierównej struktury wytłoczyny [6, 17].

Porofory

Współczesne technologie porowania umożliwiają otrzymywanie struktur porowatych i mikroporowatych, w większości powszechnych procesów przetwórstwa tworzyw polimerowych (wtryskiwaniu, wytłaczaniu itd.). Odpowiedni dobór środka porującego decyduje o właściwym przeprowadzeniu procesu przetwórstwa [3, 6, 7, 14].

Środek mikroporujący jest to związek organiczny bądź nieorganiczny. Podczas procesu przetwórstwa rozkłada się on wraz z wydzieleniem gazu, na skutek reakcji chemicznych. Pozostałości rozkładu powstałe w takiej reakcji są aktywnymi środkami, które wspomagają zarodkowanie (powstawanie jąder komórkowych). Doprowadzają one również do otrzymania drobniejszej struktury komórkowej oraz zwiększają rozpuszczalność gazów w tworzywie. Nieorganiczne porofory podczas termicznego rozkładu wydzielają gazy takie jak: dwutlenek węgla, amoniak, wodór. Zastosowanie ich do procesów przetwórstwa tworzyw mikroporowatych jest małe. To porofory organiczne stanowią najważniejszą grupę, ze względu na zakres temperatur oraz ilość wydzielonego gazu. Organiczne środki porujące stosowane są do spieniania: polipropyleny, polistyreny, PVC, poliamidów oraz żywic fenolowych i epoksydowych. Podczas rozkładu tych poroforów najczęściej wydzielą się azot [3, 9, 25].

Środki porujące dobiera się na podstawie przetwarzanego tworzywa, warunków procesu oraz temperatury jego rozkładu. Ważnym kryterium jest uzyskanie wyższej temperatury rozkładu poroforu, niż temperatura topnienia tworzywa, lecz niższej od temperatury wtryskiwania bądź wytłaczania. Wydzielanie się gazu musi nastąpić możliwie szybko, w odpowiedniej strefie układu uplastyczniającego [1, 2, 24].

Porofory podczas uplastyczniania w układzie uplastyczniającym podlegają takim samym procesom jak tworzywo przetwarzane czyli nagrzewaniu, sprężaniu, mieszaniu i transportowaniu, jeszcze przed rozkładem. Gazy obojętne i ciecze niskowrzące mogą rozpuszczać się w uplastycznym tworzywie. Szybkość rozpuszczania poroforu rośnie proporcjonalnie wraz ze wzrostem ciśnienia gazu i intensywności mieszania. Warunki procesu przetwórstwa dobierane są najczęściej empirycznie [4, 7, 8].

Środki porujące ze względu na sposób wydzielania się gazu można podzielić, choć niezbyt dokładnie na:

- fizyczne środki mikroporujące,
- chemiczne środki mikroporujące.

Czynnikiem determinującym wybór metody porowania jest bariera osiągalnego stopnia redukcji gęstości. W zależności od wyboru środka porującego zakres redukcji gęstości tworzywa ulega zmianie.

Fizyczne środki mikroporujące w trakcie porowania zmieniają jedynie stan skupienia, ich struktura chemiczna nie ulega zmianie. Są to ciecze, ciała stałe lub gazy rozpuszczone w tworzywie uplastycznym pod ciśnieniem, które w wa-

runkach podwyższonej temperatury i obniżanego ciśnienia odparowują lub wydzielają się jako mikrobanieczki. Tworzywo w tej chwili powinno być odpowiednio uplastycznione, aby powstające pęcherzyki zostały zatrzymane w tworzywie oraz mogły uzyskać właściwy rozmiar. Dozowanie oraz rodzaj poroforu determinuje wybór sposobu porowania, wpływa to także na gęstość tworzywa porowatego [11].

Fizyczne porofory wykorzystywane są w celu otrzymania wysokiego stopnia sporowacenia. Główną zaletą tych związków jest szybkie odparowywanie w trakcie przetwórstwa. Substancje te muszą spełniać określone wymagania: nie mogą korodować, nie mogą wpływać na właściwości tworzywa, muszą być nieszkodliwe dla zdrowia. Wadą stosowania tych poroforów jest konieczność posiadania odpowiedniego układu dozowania i co najważniejsze dodatkowej instalacji podającej gaz [11, 25].

Do tej grupy środków porujących zalicza się: węglowodory alifatyczne, woda azot, dwutlenek węgla. Są to łatwo lotne związki organiczne, które mają niską temperaturę wrzenia. Azot i dwutlenek węgla są najczęściej stosowanymi poroforami tej grupy z powodu większej tolerancji ze strony środowiska naturalnego [6].

Proces przetwórstwa z wykorzystaniem fizycznych środków mikroporujących jest trudny do prowadzenia. Lepkość polimeru musi osiągać odpowiednią wartość, zbyt duża zatrzymuje rozrost pęcherzyków gazu, natomiast za mała wartość lepkości jest przyczyną pęknięcia komórek [2, 21].

Chemiczne porofory pod względem zasady działania nie odbiegają od fizycznych poroforów, aczkolwiek gaz powodujący porowanie powstaje z ich rozkładu w tworzywie. Porowanie chemiczne można prowadzić na konwencjonalnych liniach technologicznych do przetwórstwa tworzyw. Porofory te dodawane są do tworzywa wejściowego w postaci substancji stałych (proszków, koncentratów, granulek) i następnie przetwarzane w układzie uplastyczniającym oraz kształtowane w tradycyjnym narzędziu. W wyniku doprowadzenia ciepła w układzie uplastyczniającym rozpoczyna się termiczna reakcja rozkładu środka porującego z jednoczesnym wydzielaniem się produktów ubocznych. Produktem końcowym jest gaz rozpuszczony w tworzywie, podobnie jak w przypadku fizycznych środków porujących [11].

Chemiczne środki mikroporujące można podzielić na organiczne i nieorganiczne. Nieorganiczne porofory to w dużej mierze węglany i wodorowęglany, które zazwyczaj stosuje się do porowania żywic fenolowo – formaldehydowych. Podczas ich termicznego rozkładu wydzielają się zazwyczaj CO_2 i NH_3 . Porofory organiczne tworzą najważniejszą grupę chemicznych środków mikroporujących. Porofory te cechuje głównie nieodwracalność reakcji [36]. Ich budowa chemiczna jest zróżnicowana, co przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wybrane chemiczne środki porujące i ich charakterystyka [7]

Nazwa chemiczna (skrót)	Formuła strukturalna	Zakres temperatury rozkładu °C	Wydzielane gazy
Wodorowęglan sodowy (Bicarb)	NaHCO_3	130 – 150	CO_2 , H_2O
4,4' – oksydi (benzenosulfonylhydrazid) (OBSh)	$\text{H}_2\text{N}-\text{NH}-\text{SO}_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{SO}_2-\text{NH}-\text{NH}_2$	140 -165	N_2 , H_2O
Azodikarbonamid (ADC)	$\text{H}_2\text{N}-\text{CO}-\text{N}=\text{N}-\text{CO}-\text{NH}_2$	200 – 220	N_2 , CO , CO_2 , NH_3
Pochodne kwasu cytrynowego	$\text{ROOC}-\text{CH}_2-\text{C}(\text{OH})(\text{COOR})-\text{CH}_2-\text{COOR}$	200 – 220	CO_2 , H_2O

Chemiczne środki wykorzystywane w procesach porowania mogą cechować się egzotermiczną lub endotermiczną charakterystyką rozkładu. Reakcja rozkładu na drodze egzotermicznej zachodzi samoczynnie, nawet gdy dopływ energii zostanie odcięty. Z tego powodu wytwory porowane w ten sposób muszą być ochładzane. Pomaga to zachować odpowiednią strukturę porowatą i hamuje odkształcenia. W przypadku środków porujących o endotermicznej charakterystyce rozkładu wydzielanie się gazu kończy się wraz z zakończeniem doprowadzenia energii. Wykorzystanie takich poroforów w znaczący sposób skraca proces ochładzania wytworu [11].

W ciągu ostatnich lat w wyniku dynamicznego rozwoju tworzyw porowatych wprowadzono na rynek środki mikroporujące zwany mikrosferami. Są to kapsułki o sferycznym kształcie. Składają się one z polimerowej powłoki wypełnionej gazem z bloku węglowodorów, takich jak izobutan, izopentan, izooktan. Mikrosfery na drodze endotermicznego rozkładu pod wpływem ciepła uplastyczniają powłokę polimerową, a węglowódor zmienia stan skupienia na lotny. W wyniku działania podwyższonej temperatury mikrosfery powiększają swoją objętość kilkadziesiąt razy, tworząc mikroporowatą strukturę. Powstała struktura porowata składa się z jednolitych pod względem rozmiarów, zamkniętych pęcherzyków. Dzięki zachowaniu barierowych właściwości, kapsułki w trakcie rozrostu nie mogą połączyć się ze sobą. Zastosowanie mikrosfer pomaga zredukować masę wytworów, jak i również modyfikować inne właściwości. Pozwalają uzyskać korzystne właściwości termo- i elektroizolacyjne, pochłanianie drgań czy zdolność do odzyskiwania pierwotnego kształtu wytworu. Mikrosfery są środkami, które są w fazie wdrażania do powszechnych procesów przetwórstwa.

Część doświadczalna

Badania procesu wytłaczania mikroporującego wraz z pomiarami wybranych właściwości fizycznych i struktury fizycznej otrzymanej wytłaczyny mikroporowatej zostały wykonane w linii technologicznej wytłaczania mikroporującego. Linia technologiczna wyposażona była w wytłaczarkę jednoślیمakową T-32-25 przystosowaną do wytłaczania tworzyw termoplastycznych w formie granulatu, głowicę wytłaczarską oraz standardowe urządzenia pomocnicze: urządzenie chłodzące w postaci wanny chłodzącej oraz urządzenie odbierające. W procesie zastosowany został klasyczny ślimak, który jest przystosowany do przetwórstwa poli (chlorku winylu). Wykonany on został ze stali narzędziowej, był azotowany i polerowany do wysokiej gładkości. Cylinder układu uplastyczniającego wytłaczarki wykonano ze stali narzędziowej, wyposażony jest w komorę stanowiącą wstępną strefę chłodzenia wodą lub powietrzem. Takie rozwiązanie zapobiega przedostawaniu się ciepła z cylindra do zasobnika tworzywa.

Układ termoregulacji automatycznie utrzymuje żadaną temperaturę cylindra i przetwarzanego tworzywa. W układzie uplastyczniającym wytłaczarki T-32-25 występują cztery strefy grzejne wraz z czujnikami pomiaru temperatury połączonymi z odpowiednimi termoregulatorami w szafie sterowniczej. W czasie prowadzenia procesu wytłaczania może nastąpić przegrzewanie poszczególnych stref cylindra. Aby zapobiegać tym niepożądanym zjawiskom, zastosowane jest chłodzenie powietrzem nadmuchiwany przez wentylatory.

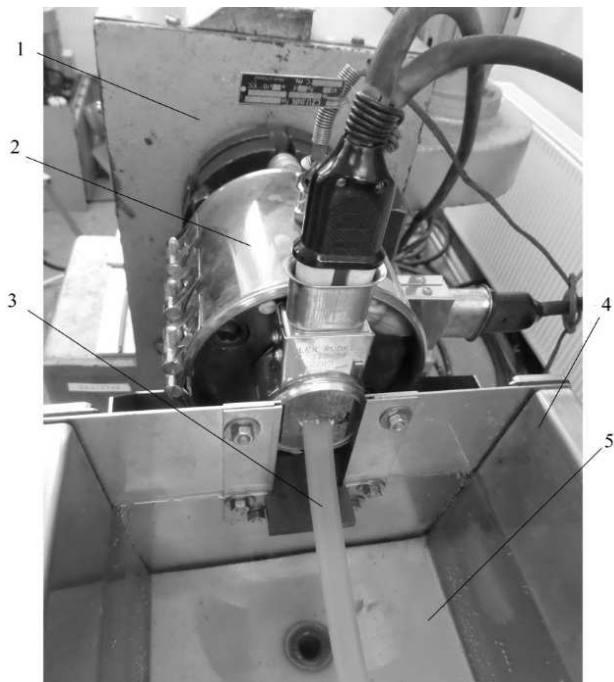
Do procesu wytłaczania mikroporującego wykorzystano głowicę wytłaczarską do wytłaczania taśmy. Głowica posiada jedną strefę grzejną wyposażoną w pierścieniowy elektryczny grzejnik, oraz czujnik pomiaru ciśnienia i temperatury tworzywa przetwarzanego. Zastosowana głowica ma wymienną, szczelinową płaską dyszę wytłaczarską. Na rys. 3 przedstawiono wygląd fragmentu linii technologicznej wytłaczania porującego zawierający głowicę wytłaczarską do taśm, zaś wygląd otrzymanych mikroporowatych wytłoczyn przedstawiono na rys. 4.

W programie badań doświadczalnych przyjęto jako czynnik zmienny dozowanie środka mikroporującego w wytłoczynie, które wynosiło odpowiednio 0,25%, 0,5%, 1%.

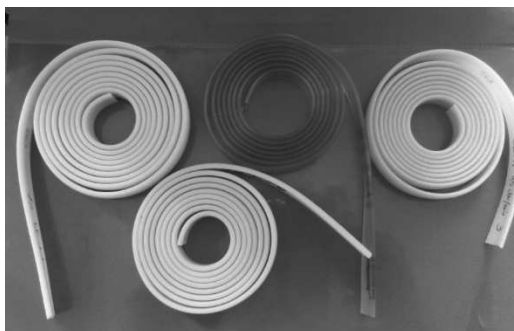
Podczas wytłaczania mikroporującego określono badawcze czynniki stałe:

- szybkość obrotowa ślimaka: 45 obr/min,
- temperatury kolejnych stref układu uplastyczniającego: I – 110°C, II – 120°C, III – 130°C, IV – 140°C,
- temperatura głowicy: 150°C,
- tworzywo badane: PVC Alfavinył GFM/4 – 31 – TR,
- gęstość tworzywa przetwarzanego: 1230 kg/m³,
- sposób dozowania i rodzaj środka mikroporującego: Expancel 951 MB 120,

- elementy konstrukcyjne wylączarki, głowicy wylączarskiej, urządzeń uzupełniających,
- rodzaj i temperatura czynnika chłodzącego.



Rys. 3. Wygląd fragmentu linii technologicznej wytłaczania porującego: 1 – układ uplastyczniający wylączarki, 2 – głowica wylączarska, 3 – wytłaczana taśma z porowatego PVC, 4 – wanna chłodząca, 5 – woda chłodząca



Rys. 4. Wygląd otrzymanych wytłoczyn porowatych

W czasie wytłaczania mikroporującego mogły pojawić się czynniki zakłócające, to znaczy zmieniające się: napięcia prądu elektrycznego, temperatura otoczenia, wilgotność tworzywa badanego, wilgotność środka mikroporującego. Stwierdzono że wpływ czynników zakłócających na wyniki badań jest pomijalnie mały.

W programie badań określono poniższe czynniki wynikowe:

- liczba, kształt i rozmiar mikroporów,
- średnica mikroporów,
- udział powierzchniowy mikroporów w przekroju poprzecznym próbek pomiarowych.

Tworzywem wejściowym zastosowanym w procesie wytłaczania mikroporującego był transparentny, plastyfikowany PVC w postaci granulatu. Tworzywo wyprodukowała firma Alfa Sp. z o.o. a jego nazwa handlowa to Alfavinyl GFM/4 – 31 – TR. Poli(chlorek winylu) jest szeroko stosowany w przetwórstwie metodą wytłaczania. Alfavinyl GFM/4 – 31 –TR jest stosowany głównie w medycynie do produkcji m.in. pojemników

i drenów do krwi, sond, pomp infuzyjnych czy masek do oddychania. Wybrane właściwości poli(chlorku winylu) zostały przedstawione w tabeli 2.

Tabela 2. Wybrane właściwości PVC Alfavinyl GFM/4 -31 – TR zastosowanego do wytłaczania

Właściwość	Wartość
Gęstość	1230 kg/m ³
Wytrzymałość na rozciąganie	21 MPa
Wydłużenie przy zerwaniu	300 %
Twardość Shore'a (A)	80°Sh A
Stabilność (w 200°C) min	18 min
Współczynnik sprężystości	2600 MPa

Badania zostały przeprowadzone z użyciem środka porującego w postaci mikrosfer o nazwie handlowej Expancel 951 MB 120, który został wyprodukowany przez firmę AkzoNobel. Mikrosfery Expancel występują w postaci kulistych termoplastycznych kapsułek polimerowych zawierających gaz z grupy węglowodorów. Pod wpływem działania ciepła kapsułka mięknie i rozszerzający gaz powoduje zwiększanie jej objętości, bez uszkodzenia bardzo cienkiej powłoki kapsułki. Jest to środek o endotermicznym charakterze rozkładu. Sfery nie mogą się łączyć ze sobą, ponieważ kapsułki zachowują swoje właściwości barierowe, co również skutecznie zapobiega uwalnianiu się zamkniętego gazu. Expancel 951 MB 120 jest mieszaniną, która zawiera 65% mikrosfer w kopolimerze etylen/octan winylu (EVA). Środki mikroporujące w postaci mikrosfer są dopiero wprowadzane do przetwórstwa w szerszej skali. Spowodowane jest to brakiem

odpowiednich informacji, w jaki sposób dokonać korekty warunków procesu przetwórstwa przy ich zastosowaniu [39, 41].

W tabeli 3 zestawiono wybrane właściwości mikrosfer Expancel 951 MB 120 oraz warunki jego przetwarzania.

Tabela 3. Wybrane właściwości mikrosfer Expancel 951 MB 120

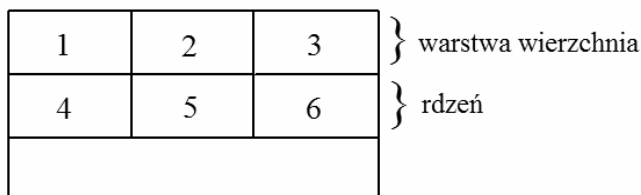
Właściwość	Wartość
Rozmiar	28 ÷ 38 μm
Gęstość przy T_{max}	< 12 kg/m^3
Temperatura początkowa ekspansji T_{start}	138 ÷ 148 $^{\circ}\text{C}$
Temperatura w której mikrosfery osiągają największą objętość T_{max}	195 ÷ 210 $^{\circ}\text{C}$
Temperatura przetwórstwa	140 ÷ 200 $^{\circ}\text{C}$

Badania struktury fizycznej wytlóczyn mikroporowatych zawierały następujące etapy:

- przygotowanie i wybór próbek,
- wykonanie zdjęć mikroskopowych,
- komputerowa analiza obrazu,
- interpretacja wyników, wnioski i ustalenia.

Pomiary przeprowadzono w przekroju poprzecznym wytlóczyn mikroporowatych. Po wstępnej obserwacji obrazu struktur wytlóczyny stwierdzono, że rozkład struktury mikroporowatej jest symetryczny oraz przyjęto sześć miejsc pomiarowych badanych próbek (rys. 5). Obszary pomiarowe zostały wyznaczone zaczynając od warstwy wierzchniej wytlóczyny i następnie przesuwając obszar pomiarowy w kierunku rdzenia próbek.

Zastosowana metoda komputerowej analizy zdjęć mikroskopowych pozwoliła określić cechy geometryczne powstałych porów oraz ich rozkład w przekroju poprzecznym wytlóczyny mikroporowatej. Badania zostały przeprowadzone za pomocą oprogramowania Nikon NIS- Elements, w które zostało wyposażone stanowisko badawcze. W celu dokładnego scharakteryzowania próbek, należało uzyskać zdjęcia dobrej jakości.



Rys. 5. Schemat próbki pomiarowej ze wskazanymi obszarami pomiarowymi

Wyniki badań

W wyniku przeprowadzonej komputerowej analizy próbek pomiarowych otrzymanych za pomocą wytłaczania określono wartości charakteryzujące strukturę fizyczną wytłoczyn mikroporowatych. Wyniki badań struktury fizycznej wytłoczyn mikroporowatych przedstawiono w tabelach 4, 5, 6.

Na podstawie otrzymanych wyników obliczono wartości średnie badanych wielkości i przedstawiono je w odniesieniu do warstwy wierzchniej i rdzenia próbki pomiarowej w tabelach 7, 8, 9.

Tabela 4. Wyniki badań struktury fizycznej wytłoczyny mikroporowatej przy dozowaniu 0,25% środka mikroporującego

Szybkość obrotowa ślimaka [obr/min]	Obszar pomiarowy	Liczba mikroporów	Średnica mikroporów [μm]	Powierzchnia jednostkowa mikroporów [μm^2]	Udział powierzchniowy [%]
45	1	22	109,40	10195,51	22,33
	2	24	100,19	8513,74	18,03
	3	21	113,78	11447,38	23,93
	4	31	111,22	11072,46	20,677
	5	36	105,15	9670,22	20,971
	6	32	112,18	10877,35	20,968

Tabela 5. Wyniki badań struktury fizycznej wytłoczyny mikroporowatej przy dozowaniu 0,5% środka mikroporującego

Szybkość obrotowa ślimaka [obr/min]	Obszar pomiarowy	Liczba mikroporów	Średnica mikroporów [μm]	Powierzchnia jednostkowa mikroporów [μm^2]	Udział powierzchniowy [%]
45	1	27	90,48	6899,87	19,03
	2	32	97,26	8028,73	21,66
	3	33	99,54	8523,75	23,44
	4	64	92,13	7535,88	21,22
	5	50	87,76	6578,98	15,80
	6	54	87,75	6721,57	16,24

Tabela 6. Wyniki badań struktury fizycznej wyłoczyny mikroporowatej przy dozowaniu 1,0% środka mikroporującego

Szybkość obrotowa ślimaka [obr/min]	Obszar pomiarowy	Liczba mikroporów	Średnica mikroporów [μm]	Powierzchnia jednostkowa mikroporów [μm^2]	Udział powierzchniowy [%]
45	1	66	86,62	6723,85	38,64
	2	50	89,53	7087,26	31,92
	3	71	82,39	5953,93	36,57
	4	117	82,34	6016,65	31,71
	5	124	84,75	6301,38	35,06
	6	110	84,69	7159,59	35,61

Tabela 7. Wyniki badań struktury fizycznej wyłoczyny mikroporowatej przy dozowaniu 0,25% poroforu w odniesieniu do warstwy wierzchniej i rdzenia próbki

Szybkość obrotowa ślimaka [obr/min]	Obszar pomiarowy	Liczba mikroporów	Średnica mikroporów [μm]	Powierzchnia jednostkowa mikroporów [μm^2]	Udział powierzchniowy [%]
45	Warstwa wierzchnia	22	107,79	10052,21	21,43
	Rdzeń próbki	33	109,51	10540,01	20,872

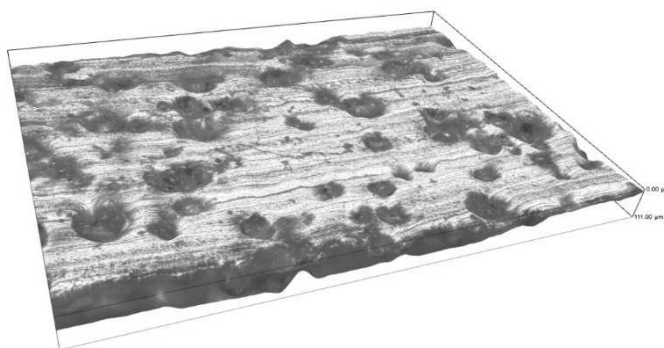
Tabela 8. Wyniki badań struktury fizycznej wyłoczyny mikroporowatej przy dozowaniu 0,5% poroforu w odniesieniu do warstwy wierzchniej i rdzenia próbki

Szybkość obrotowa ślimaka [obr/min]	Obszar pomiarowy	Liczba mikroporów	Średnica mikroporów [μm]	Powierzchnia jednostkowa mikroporów [μm^2]	Udział powierzchniowy [%]
45	Warstwa wierzchnia	31	95,76	7817,45	21,37
	Rdzeń próbki	56	89,21	6945,47	17,75

Tabela 9. Wyniki badań struktury fizycznej wyłoczyny mikroporowatej przy dozowaniu 1,0 % poroforu w odniesieniu do warstwy wierzchniej i rdzenia próbki

Szybkość obrotowa ślimaka [obr/min]	Obszar pomiarowy	Liczba mikroporów	Średnica mikroporów [μm]	Powierzchnia jednostkowa mikroporów [μm^2]	Udział powierzchniowy [%]
45	Warstwa wierzchnia	62	86,18	6591,34	35,71
	Rdzeń próbki	117	83,92	6492,54	34,12

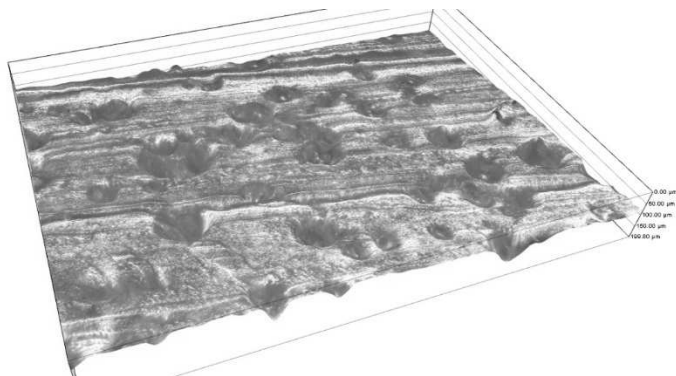
Po wstępnej analizie wyników badań stwierdzono, że zmiana dozowania środka mikroporującego ma wpływ na badane wielkości struktury fizycznej. Podczas obserwacji zdjęć mikroskopowych zauważono, że powstała struktura mikroporowata nie jest jednorodna w całym przekroju wyłoczyny. Na rys. 6–8 przedstawiono wygląd struktury fizycznej wyłoczyn mikroporowatych przy różnym dozowaniu poroforu.



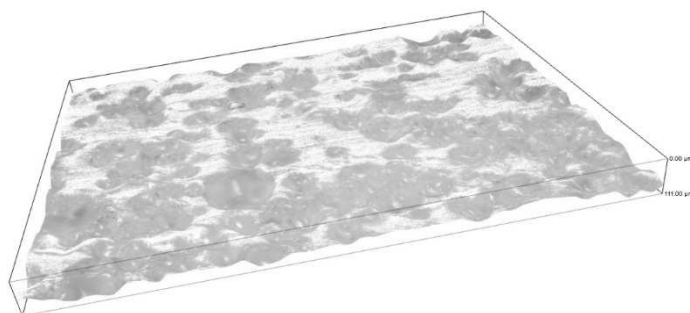
Rys. 6. Widok 3d powierzchni próbki pomiarowej wyłoczyny mikroporowatej z zawartością 0,25% środka mikroporującego

Zaobserwowano znaczący wpływ zmiany dozowania środka mikroporującego na powstałą strukturę fizyczną wyłoczyny. Wraz ze zwiększaniem zawartości środka mikroporującego średnice powstałych mikroporów ulegały zmniejszeniu. Największą wartość średnicy zanotowano przy dozowaniu 0,25% i wyniosła ona 113,78 μm , natomiast najmniejszą przy zawartości poroforu 1%, która wyniosła 82,34 μm . Efekt zmniejszania się średnicy, mógł być skutkiem zwiększania się liczby mikroporów w wyłoczynie, co prawdopodobnie hamowało większy rozrost mikroporów. Można stwierdzić również, że wartości średnicy mikroporów nie są zależne od miejsca pomiaru w przypadku wytłaczania

płaskich elementów. Wartości średnic zarówno w warstwie wierzchniej jak i w rdzeniu próbki osiągały porównywalne wyniki.



Rys. 7. Widok 3d powierzchni próbki pomiarowej wytłoczyny mikroporowatej z zawartością 0,5% środka mikroporującego



Rys. 8. Widok 3d powierzchni próbki pomiarowej wytłoczyny mikroporowatej z zawartością 1,0% środka mikroporującego

Udział powierzchniowy mikroporów w wytłoczynie mikroporowatej nie zmienił istotnie swojej wartości przy zwiększeniu dozowania od 0,25% do 0,5%. Dopiero po zwiększeniu zawartości poroforu do 1% wartość udziału powierzchniowego znacząco wzrosła i wyniosła odpowiednio 35,71% w warstwie wierzchniej i 34,12% w rdzeniu próbki.

Z przeprowadzonych badań wynika, że miejsce pomiaru nie ma wpływu na procentowy udział powierzchniowy, wartości osiągnęte w warstwie wierzchniej oraz w rdzeniu badanej wytłoczyny nie różnią się znacząco.

Liczba powstałych mikroporów rosła wraz ze zwiększaniem dozowania środka mikroporującego zarówno w rdzeniu jak i w warstwie wierzchniej wytłoczyny porowatej. Zdecydowanie więcej mikroporów występuje w rdzeniu próbki

pomiarowej. Mniejsza liczba porów w warstwie zewnętrznej mogła być spowodowana większą intensywnością schładzania wytłoczyny. Warstwa zewnętrzna wytłoczyny ma szybszy kontakt z wodą chłodzącą co blokuje powstawanie mikrosfer w tej strefie.

Podsumowanie

Dynamicznie rozwijający się sektor przetwórstwa tworzyw polimerowych, kreowanie nowych kierunków zastosowań oraz rosnące wymagania stawiane wytworom powodują powstawanie innowacyjnych technologii a także udoskonalanie stosowanych w przetwórstwie środków pomocniczych.

Dzięki wytłaczaniu mikroporującemu możliwe jest otrzymywanie rur, folii, kształtek, powłok, płyt mikroporowatych o mniejszej gęstości z jednoczesnym zachowaniem właściwości wytworów, które nie odbiegają od wytłoczyn otrzymywanych klasycznymi metodami. Efekt zmniejszenia masy wyrobu automatycznie przekłada się na obniżenie kosztów produkcji. Na prawidłowy przebieg procesu wpływa między innymi rozwiązanie konstrukcyjne głowicy wytłaczarskiej oraz układu uplastyczniającego wytłaczarki, który ma zapewnić dobrą efektywność mieszania. Po zrealizowaniu procesu, a także uwzględnieniu przedstawionych w literaturze czynników stwierdzono, że proces wytłaczania mikroporującego jest trudny do prowadzenia, ze względu na zmienne warunki panujące w układzie uplastyczniającym po dodaniu poroforu.

Literatura

- [1] Abina A., Puc U., Jeglič A., Zidanšek A., *Structural analysis of insulating polymer foams with terahertz spectroscopy and imaging*, „Polymer Testing” 2013, 32, s. 739–747.
- [2] Antunes M., Velasco J. I., Realinho V., Solórzano E., *Study of the cellular structure heterogeneity and anisotropy of polypropylene and polypropylene nanocomposite foams*, „Polymer Engineering and Science” 2009, 49, s. 2400–2413.
- [3] Bajer K., Stasiek A., *Charakterystyka mieszanin PE–LD, i PE–LD/EVA porowanych chemicznie*, „Przetwórstwo Tworzyw” 2010, 6, s. 302–307.
- [4] Balach J., Miguel F., Soldera F., Acevado D. F., Mücklich F., Barbero C. A., *A direct and quantitative image of the internal nanostructure of nonordered porous monolithic carbon using FIB nanotomograph*, „Journal of Microscopy” 2012, 246, s. 274–278.
- [5] Basińska T., Ktergoat L., Mangeney C., Chehimi M. M., Słomkowski S., *Poly(styrene- α -tert-butoxy- ω -vinylbenzyl-polyglycidol) microspheres for the preparation of novel photonic crystals*, „E-polymers” 2007, 87, s. 1–6.

- [6] Bieliński M., *Techniki porowania tworzyw termoplastycznych*, Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno – Rolniczej w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2004.
- [7] Błędzki A. K., Faruk O., Kirschling H., Kühn J., Jaszkievicz A., *Microcellular polymer and composites , Part I. Types of foaming agents and technologies of microcellular processing*, „Polimery” 2006, 51, s. 697–703.
- [8] Błędzki A. K., Faruk O., Kirschling H., Kühn J., Jaszkievicz A., *Microcellular polymer and composites , Part II. Properties of different types of microcellular materials*, „Polimery” 2007, 52, s. 3–12.
- [9] Choi S. W., Yeom J. Y., Park T. J., Lee J. Y., Kim J. H., *Fabrication of porous poly (acrylamide) bead with macro and micropores*, „Polymer Engineering and Science” 2012, 52, s. 385–389.
- [10] Garbacz T., Samujło B., *Wybrane właściwości geometrycznej struktury powierzchni wytworów porowatych otrzymanych z polietylenu*, „Polimery” 2008, 53, s. 471–476.
- [11] Garbacz T., Tor A., *Wpływ zawartości środka porującego na właściwości użytkowe zewnętrznych powłok kabli wytwarzanych metodą wytłaczania porującego*, „Polimery” 2007, 52, s. 286–293.
- [12] Garbacz T., *Właściwości trójwarstwowych powłok z PVC wytworzonych w procesie współwytłaczania mikroporującego*, „Polimery” 2011, 56, s. 129–134.
- [13] Klepka T., Nabiałek J., *Analysis of forming geometrical macrostructure in walls of extrusion products manufactured from polypropylene composite filled with CaCO₃*, „Composites” 2011, 3, s. 273–277.
- [14] Li Q., Matuana L. M., *Foam extrusion of high density polyethylene / wood – flour composites using chemical foaming agents*, „Journal of Applied Polymer Science” 2003, 88, s. 3139–3150.
- [15] Nitkiewicz Z., Chmielowiec P., Stokłosa H., Mierzwa M., *Porównanie właściwości litego i porowatego PVC stosowanego do wyrobu rur*, „Composites” 2004, 4, s. 421–425.
- [16] Rachtanapun P., Selke S. E. M., Matuana L. M., *Effect of the high density polyethylene melt index on the microcellular foaming of high density polyethylene/polypropylene blend*, „Journal of Applied Polymer Science” 2004, 93, s. 364–371.
- [17] Sikora J. W., *Budowa głowic wytłaczarskich do wytworów porowatych*, „Przetwórstwo Tworzyw” 2009, 5, s. 200–203.
- [18] Sikora J. W., *Review: increasing the efficiency of extrusion process*, „Polymer Engineering and Science” 2008, 48, s. 1678–1682.
- [19] Sikora J. W., Samujło B., Kowalska B., *Otrzymywanie wytworów z polistyrenu porowatego strukturalnie*, „Przetwórstwo Tworzyw” 2006, 1, s. 4–11.
- [20] Sikora R., *Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych*, Wydawnictwo Edukacyjne Żak, Warszawa 1993.

- [21] Tor – Świątek A., Sikora J. W., *Analiza wpływu modyfikacji poli (chloru winylu) mikrosferami na strukturę geometryczną wytłoczyny*, „Przemyśl Chemiczny” 2013, 4, s. 538–541.
- [22] Tor – Świątek A., *Characteristics of physical structure of poly(vinyl chloride) extrudate modified with microspheres*, „Polimery” 2012, 57, s. 577–580.
- [23] Tor – Świątek A., *Ocena efektywności procesu wytłaczania mikroporującego polietylenu małej gęstości*, „Eksploatacja i Niezawodność” 2013, 3, s. 225–229.
- [24] Tor–Świątek A., Samujło B., *Wykorzystanie badań termowizyjnych do analizy stabilności procesu wytłaczania mikroporującego poli(chloru winylu)*, „Eksploatacja i Niezawodność” 2013, 1, s. 58–61.
- [25] Tor–Świątek A., Sikora R., *Efektywność procesu wytłaczania mikroporującego poli (chloru winylu)*, Politechnika Lubelska, Lublin 2011.
- [26] Tor–Świątek A., Sikora R., *Modyfikacja poli (chloru winylu) mikrosferami w procesie wytłaczania mikroporującego*, „Przetwórstwo Tworzyw” 2011, 4, s. 248–251.
- [27] Wojnar L., Kurzydłowski K. J., Szala J., *Praktyka analizy obrazu*, Polskie Towarzystwo Stereologiczne, Kraków 2002.
- [28] www.akzonobel.com
- [29] www.expancel.com
- [30] www.tworzywa.info

3. Wpływ rozwiązania konstrukcyjnego ślimaków w wylączarce dwuślimakowej współbieżnej na wybrane właściwości otrzymywanych mieszanin polimerowych

Układy uplastyczniające ślimakowe do konstytuowania mieszanin polimerowych

Istnieje wiele metod przygotowywania mieszanin polimerowych, w skład których wchodzi różne tworzywa polimerowe termoplastyczne. Głównym problemem jest uzyskanie jak najlepszego kontaktu fizycznego obu składowych faz. Osiągnąć można to w najróżniejszy sposób, zarówno w skali laboratoryjnej jak i technicznej [1].

Do celów badawczych można stosować rozpuszczalniki wspólne dla obu faz i wylewać zmieszane roztwory na płaskie powierzchnie celem odparowania rozpuszczalników. Takie działanie zapewnia odpowiednią dyspersję. Powstająca struktura ma dobrze rozwiniętą warstwę pośrednią, która stabilizuje strukturę fazową mieszaniny [2, 3].

Inne metody w większej skali polegają na intensywnym mieszaniu i ścinaniu uplastycznionych polimerów w sposób ciągły w wylączarkach jednoślimakowych (SSE) lub dwuślimakowych (TSE) albo w sposób periodyczny w mieszalnikach typu Banbury lub gniotownikach. W chwili obecnej wylączanie jako operacja ciągłego, a więc efektywniejszego przetwarzania tworzyw jest dominująca w technologii wytwarzania mieszanin polimerowych. Zachodzące podczas tej operacji poważne zmiany w strukturze składników, a więc i całej mieszaniny, wymagają bardziej dokładnej kontroli nastaw wartości parametrów przetwórczych, jak np. temperatura, czas i rodzaj wywoływanych naprężeń, aby uzyskać powtarzalność operacji w większej skali [4–6].

Jednym z głównych zadań mieszania jest uzyskanie równomiernej dyspersji i dystrybucji składników, które istotnie wpływają na przetwarzalność mieszanin polimerowych [2, 3], a dalej na właściwości użytkowe wytworów. Odbywa się to w układzie uplastyczniającym maszyny przetwórczej, zapewniającym przepływ intensywny (rozdrabnianie) i ekstensywny (mieszanie) uplastycznionej mieszaniny tworzyw. Najkorzystniejszymi urządzeniami zapewniającymi uzyskanie obu rodzajów przepływu w stopniu zadowalającym są maszyny przetwórcze o działaniu ciągłym, zwłaszcza wylączarki, tj. wylączarki jednoślimakowe (SSE), dwuślimakowe (TSE), a w szczególności wylączarki dwuślimakowe współbieżne (typu TSE-W2W), wykazujące właściwości miesząco-ścinające [1–3]. Przyczyną tego stanu rzeczy są bardzo korzystne możliwości przetwórcze takiego typu wylączarek, polegające na łączeniu funkcji dyspersyjno-dystrybucyjnej, tzn. rozdrabniająco-mieszącej i transportującej układu

uplastyczniającego. Dodatkowym elementem jest zjawisko ścinania uplastycznionych tworzyw między pracującymi segmentami ślimaków oraz ślimakami a ścianą cylindra.

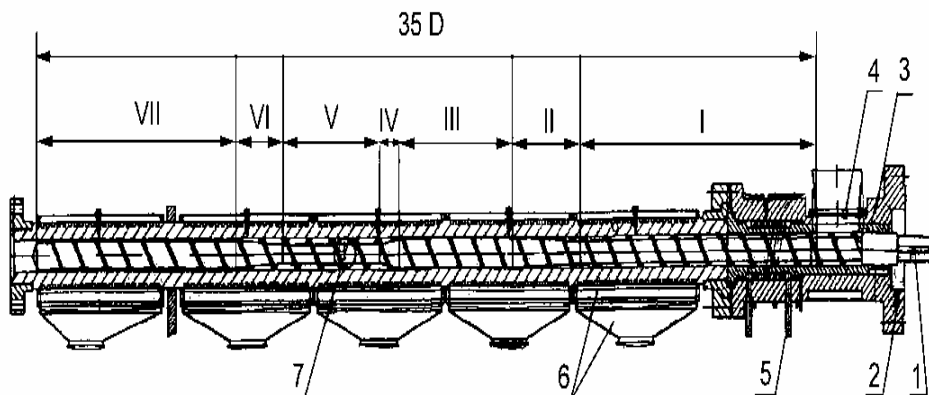
Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie układ uplastyczniający (ślimak i cylinder) wylączarki typu SSE (jednoślimakowej) [7]. Wylączanie jednoślimakowe charakteryzuje się występowaniem różnych zjawisk, które zachodzą podczas tego procesu [8]. Są to:

- mieszanie wzdłużne jako następstwo czasu przebywania uplastycznionego tworzywa w kanale ślimaka,
- rozdrobnienie (dyspersja) cząstek uplastycznionego tworzywa jako następstwo rozkładu naprężeń ścinających w kanale ślimaka,
- laminarne mieszanie ścinające (rozprowadzenie cząstek w masie tworzywa) jako następstwo laminarnego przepływu warstwowego uplastycznionego tworzywa w kanale ślimaka.

O tym, które ze zjawisk wystąpi w stopniu mniejszym lub większym, decyduje konstrukcja stref ślimaka, który podobnie jak w przypadku wylączarek dwuślimakowych może mieć budowę modułową (segmentową) [8].

Na rysunku 2 zaprezentowano natomiast układ uplastyczniający (ślimaki i cylinder) wylączarki typu TSE (dwuślimakowej).

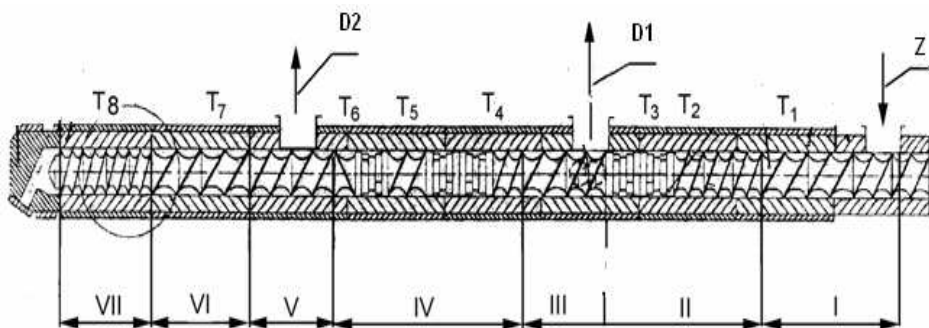
Dominacja jednej z funkcji zależna jest od konfiguracji układu uplastyczniającego, tzn. układu segmentów ślimaków wzdłuż osi wylączarki.



Rys.1. Schemat układu uplastyczniającego jednoślimakowego z odgazowaniem [7]: 1 – ślimak, 2 – czoł ślimaka, 3 – część zasypowa, 4 – otwór zasypowy, 5 – układ wodnego chłodzenia, 6 – cylinder z elementami nagrzewająco-ochładzającymi oraz czujnikami temperatury, 7 – otwór odgazowania cylindra, strefy ślimaka: I – zasilania, II – sprężania (pierwotnego), III – uplastyczniania (mieszania intensywnego), IV – rozprężania, V – odgazowania, VI – sprężania wtórnego, VII – dozowania

Zatem obie funkcje, w zależności od potrzeb, można w dużej mierze z góry zaprogramować. Wymaga to jednakże badań doświadczalnych celem zoptymalizacji

zowania konfiguracji dla każdego przypadku mieszaniny polimerowej, szczególnie w przypadku konkretnego zadania, jakie dana mieszanina ma spełnić. Urządzenia tego typu stosowane są, m. in. do modyfikowania fizycznego tworzyw polimerowych, w którym stosuje się – obok materiałów pochodzenia mineralnego lub organicznego – także materiały polimerowe.

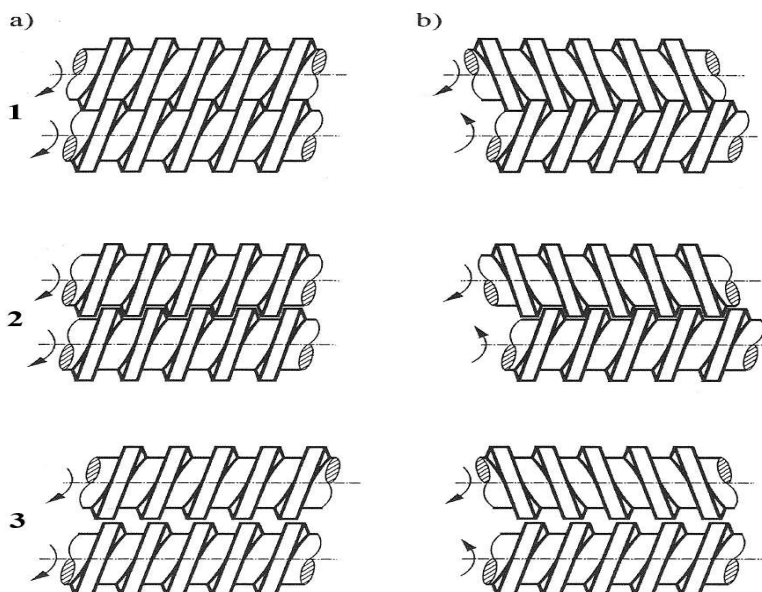


Rys. 2. Schemat układu uplastyczniającego współbieżnego wylączarki dwuślimakowej typu TSE-W2W [7, 9]: Z – lej zasypowy wylączarki, D1 – odgazowanie swobodne, D2 – odgazowanie próżniowe, T1 do T8 – strefy grzewczo-chłodzące cylindra; strefy ślimaka: I – zasilania, II – uplastyczniania, III – odgazowania swobodnego, IV – mieszania intensywnego, V – odgazowania próżniowego, VI – dozowania, VII – badawczo-pomiarowa.

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono kolejno: schematy rozwiązań konstrukcyjnych różnego typu ślimaków wylączarek dwuślimakowych, oraz schemat działania ślimaków wylączarek typu TSE. Na rys. 5 przedstawiono wylączarkę dwuślimakową współbieżną zastosowaną do badań; jej układ uplastyczniający. Elementy składowe zaprezentowano szczegółowo na rys. 8a–8d.

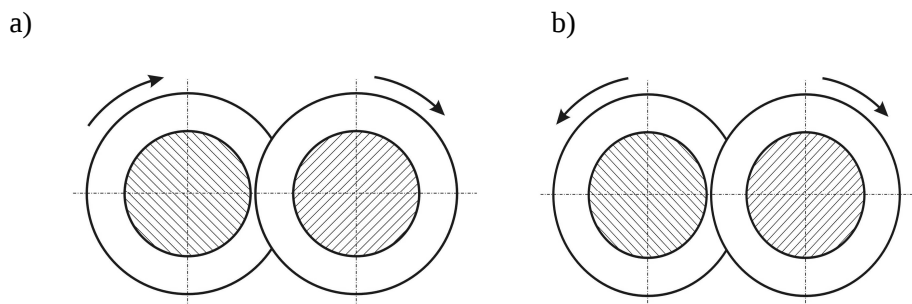
Wylączarki dwuślimakowe (TSE) charakteryzują się lepszymi właściwościami mieszającymi niż wylączarki jednoślimakowe (SSE). W wylączarkach typu TSE, podobnie jak w SSE, można zdecydowanie wyróżnić strefy uplastyczniania tworzywa, odgazowania, kompatybilizacji reaktywnej, mieszania i dozowania. Problemem jest jednak ich wysoka cena, jak również występowanie wysokich sił ścinających.

Każde z przedstawionych na rys. 3 rozwiązań konstrukcji ślimaków wylączarek typu TSE przeznaczone jest do przetwarzania różnych tworzyw lub ich mieszanin, charakteryzujących się oporami, jakie występują podczas przetwarzania. Zastosowana do badań wylączarka TSE-W2W zalicza się do układów z częściowo zazębiającymi się zwojami ślimaków (rys. 3, poz. a)2).



Rys. 3. Schematy konstrukcyjne ślimaków wylączarek dwuślimakowych typu TSE [7, 9]: a) przekrój wzdłużny ślimaków współbieżnych, b) przekrój wzdłużny ślimaków przeciwbieżnych, 1 – z całkowicie zazębiającymi się zwojami, 2 – z częściowo zazębiającymi się zwojami, 3 – z niezazębiającymi się zwojami ślimaków;

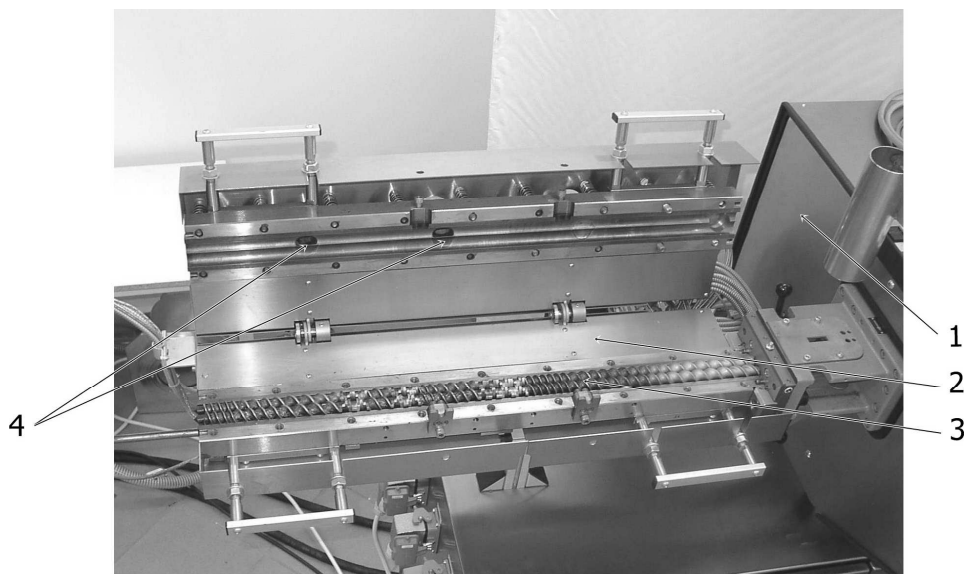
Na rysunkach 4a i 4b przedstawiono schematycznie zasadę działania ślimaków wylączarek dwuślimakowych (TSE) zarówno współbieżnych, jak i przeciwbieżnych. W przypadku wylączarki dwuślimakowej współbieżnej (rys. 4a) przepływające tworzywo zakreśla kształt ósemki, a więc czas jego przebywania w maszynie jest dłuższy. Uplastycznione tworzywo poddawane jest również wzmoczonej funkcji ścinająco-mieszającej (częściowo zazębiające się zwoje ślimaków) w momencie przejścia z jednego ślimaka na drugi.



Rys. 4. Schemat działania ślimaków wylączarek dwuślimakowych typu TSE [9]: a) wylączarka współbieżna, b) wylączarka przeciwbieżna

Rozwój technik mieszania polimerów w ostatnich latach doprowadził do opracowania metody wydłużeniowego przepływu mieszającego (Elongational Flow Mixing) i zaprojektowania urządzenia przewidzianego do tego celu, którego konstrukcja oparta jest na wylączarce jednoślímakowej (SSE) [10]. Zmodyfikowany układ uplastyczniający poddaje mieszaninę polimerową w sposób powtarzalny raz przepływowi rozciągającemu, a następnie przepływowi uspokojonemu. W pewnych przypadkach zmodernizowana technologia EFM osiąga podobną efektywność w dyspergowaniu mieszanin, w których stosunek lepkości FR do lepkości OP osiąga wartość > 4 (parametr λ) [13] oraz we wprowadzaniu dodatków (elastomerów) poprawiających udarność do tworzyw konstrukcyjnych jak wylączanie dwuślímakowe TSE.

Na rys. 5 przedstawiono widok ogólny wylączarki dwuślímakowej współbieżnej o budowie segmentowej (modułowej). Poszczególne funkcje segmentów opisane zostaną w dalszej części pracy.



Rys. 5. Widok wylączarki dwuślímakowej współbieżnej z otwartym układem uplastyczniającym typ BTSK-20: 1 – napęd, 2 – cylinder wylączarki rozkładany wzdłużnie, 3 – ślímaki segmentowe wylączarki, 4 – punkty odgazowania

Możliwość stosowania segmentowej budowy układów uplastyczniających wylączarek dwuślímakowych współbieżnych TSE-W2W rozszerza możliwości maszyn przetwórczych, również o technologię EFM w znacznie większym zakresie niż dotychczas. Rozwój wylączania dwuślímakowego, a szczególnie współbieżnego, jak również nowe konstrukcje wylączarek dwuślímakowych współbieżnych (TSE-W2W) powodują, że są one urządzeniami zapewniającymi dobre mieszanie składników mieszanin polimerowych, a dzięki modułowej budowie układu uplastyczniającego (ślímaki segmentowe) także w systemie EFM

[10]. Bardzo duże siły ścinające powodują zmiany mechanochemiczne w strukturze przetwarzanych tworzyw, jak również przetwarzanych mieszanin polimerowych. Problem ten opisano bliżej przy omawianiu sposobów kompatybilizacji składników mieszanin w pracach [17, 18].

Morfologia układów wielofazowych jest ściśle uzależniona od sił mieszania i ścinania, które oddziałują na stop polimerów podczas przetwarzania. Ostateczna struktura fazowa mieszaniny zależy istotnie od naprężeń i odkształceń w przestrzeni roboczej wylączarki (zespół: cylinder–ślimak), wytrzymałości warstwy międzyfazowej i lepkości obu faz [4, 13].

Cel główny i cele szczegółowe

Zasadniczym (głównym) celem pracy było ustalenie możliwości konstytuowania mieszanin binarnych z nie kompatybilizowanych termoplastycznych wtórnych tworzyw polimerowych metodą wytłaczania dwuślimakowego współbieżnego (TSE-W2W), z udziałem wybranych konfiguracji elementów składowych układu uplastyczniającego, z przeznaczeniem na otrzymywanie wyrobów użytkowych z takich mieszanin. Wynika to z faktu, że takie mieszaniny najczęściej spotyka się w masie odpadów poużytkowych tworzyw.

Na cel główny pracy składały się cele szczegółowe, których osiągnięcie wyjaśnić miało następujące problemy:

- jak zmieniają się wartości właściwości mechanicznych tworzyw pierwotnych przetwarzanych za pomocą dwu typów maszyn przetwórczych,
- jak zmieniają się wartości właściwości mechanicznych mieszanin tworzywowych opisanych wcześniej, przetwarzanych za pomocą różnych typów układów uplastyczniających maszyn przetwórczych.

Z powodów opisanych wcześniej wybrane tworzywa, jak i pary tworzyw przetwarzano w stanie uplastycznionym, bez środków kompatybilizujących, o określonym udziale fazy rozproszonej (FR) w osnowie polimerowej (OP) a pary polimerów przygotowywano o określonym zwiększającym się stężeniu. Zakłada się, że wszystkie zastosowane polimery do badań są niemieszalne ze sobą [5].

Po to, aby osiągnąć wyżej wymienione cele pracy ustalono następujące kierunki działania:

a) na podstawie wcześniejszych badań prowadzonych w Instytucie Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwników ustalono dwie konstrukcje ślimaków laboratoryjnej wylączarki dwuślimakowej współbieżnej BTSK-20 do konstytuowania mieszanin polimerowych, różniące się właściwościami dyspersyjno-dystrybutywnymi,

b) w tym celu wykorzystano odpowiednie segmenty składowe ślimaków wylączarki tworząc z nich dwie konfiguracje, tj.: K2 i K5A, które opisano w dalszej części zachowując ich pierwotne oznaczenie (rys. 7a, 7b),

c) przeprowadzono wytłaczanie tworzyw pierwotnych i mieszanin polimerowych z użyciem dwu konfiguracji segmentów ślimaków w ustalonych warunkach celem otrzymania próbek w postaci regranulatu do wykonania prób wtryskiwania i dalszych badań fizykochemicznych,

d) przeprowadzono badania porównawcze wytwarzania mieszanin polimerowych (o składach podobnych, które badano na BTSK-20) w wytłaczarce jednoślimakowej o klasycznej konstrukcji W-19 Brabender w postaci regranulatów do wstępnych badań mechanicznych.

Materiały do badań

Do badań zastosowano standardowe typy tworzyw pierwotnych, produkowanych i wykorzystywanych powszechnie przez przemysł krajowy:

- Polietylen (PE) – LDPE FGAN, 18-D003 (Basell Orlen Polyolefins – Płock),
- Polipropylen (PP) – Moplen HP 456J (Basell Orlen Polyolefins – Płock),
- Polistyren (PS) – Owispol 525 (Firma Chemiczna Dwory S.A. – Oświęcim),
- Poli(tereftalan etylenu) (PET) – Elpet, typ butelkowy (Boryszew S.A., Oddział Elana w Toruniu),
- Poli(chlorek winylu) (PVC) – EWI-1N, 21% zmiękczenia (Zakłady Chemiczne Anwil S.A. – Włocławek).

Tworzywo PVC jest produktem doświadczalnym firmy Anwil S.A., opartym na PVC suspensyjnym, przewidzianym dla przemysłu kablowego. Tworzywo to charakteryzuje się twardością 90-92 °Sh w skali A, masą właściwą ok. 1,50 Mg·m⁻³ i wytrzymałością termiczną > 80 min w temperaturze 200°C. Zakres temperatur stosowania zawiera się w granicach od -55 do +105°C. Należy przypuszczać, że zastosowano prawdopodobnie zmiękczac polimeryczny.

Ustalono także skład ilościowo-jakościowy mieszanin wykonywanych z tychże tworzyw. Skład mieszanin dobierano tak, aby zapewnić najkorzystniejsze właściwości użytkowe badanych mieszanin. Podstawą doboru była analiza prowadzonych wcześniej prac, dotycząca zarówno zależności jakościowych [11–12] jak i ilościowych [14–15] proponowanych mieszanin. Na podstawie powyższych rozważań do badań zastosowano pary tworzyw w następujących kombinacjach: PE/PP, PE/PS, PE/PET, PE/PVC. Składy mieszanin przygotowywano wg schematu podanego w tabeli 1.

Tabela 1. Skład jakościowo-ilościowy mieszanin polimerowych przygotowanych do badań

Skład jakościowy mieszanin	Skład ilościowy mieszanin, % mas.
PE/PS, PE/PP, PE/PET, PE/PVC	100/0, 95/5, 90/10, 85/15, 15/85, 10/90, 5/95, 0/100

Mieszaniny granulatów pierwotnych poddano dwukrotnemu regranulowaniu na wylączarce dwu-ślimakowej współbieżnej (TSE-W2W) z użyciem wybranych konfiguracji ślimaków, co ma symulować rzeczywiste przetwórstwo tworzywa wtórnego, wg następującego schematu:

granulat (0R) $\Delta \rightarrow$ wyrób gotowy $\rightarrow$ rozdrabnianie $\Delta \rightarrow$ regranulat
użytkowy (2R) $\Delta \rightarrow$ ponowne przetwórstwo na wyrób użytkowy

i oznaczano wartości odpowiednich parametrów mechanicznych, gdzie:
 Δ – oznacza kolejne przetwórstwo z udziałem wylączarki.

Przykład oznaczenia kompozycji polimerowej badanej w pracy:
PE/PS-15 – oznacza 15 % mas. PS w osnowie PE,
PET/PE-5 – oznacza 5 % mas. PE w osnowie PET.

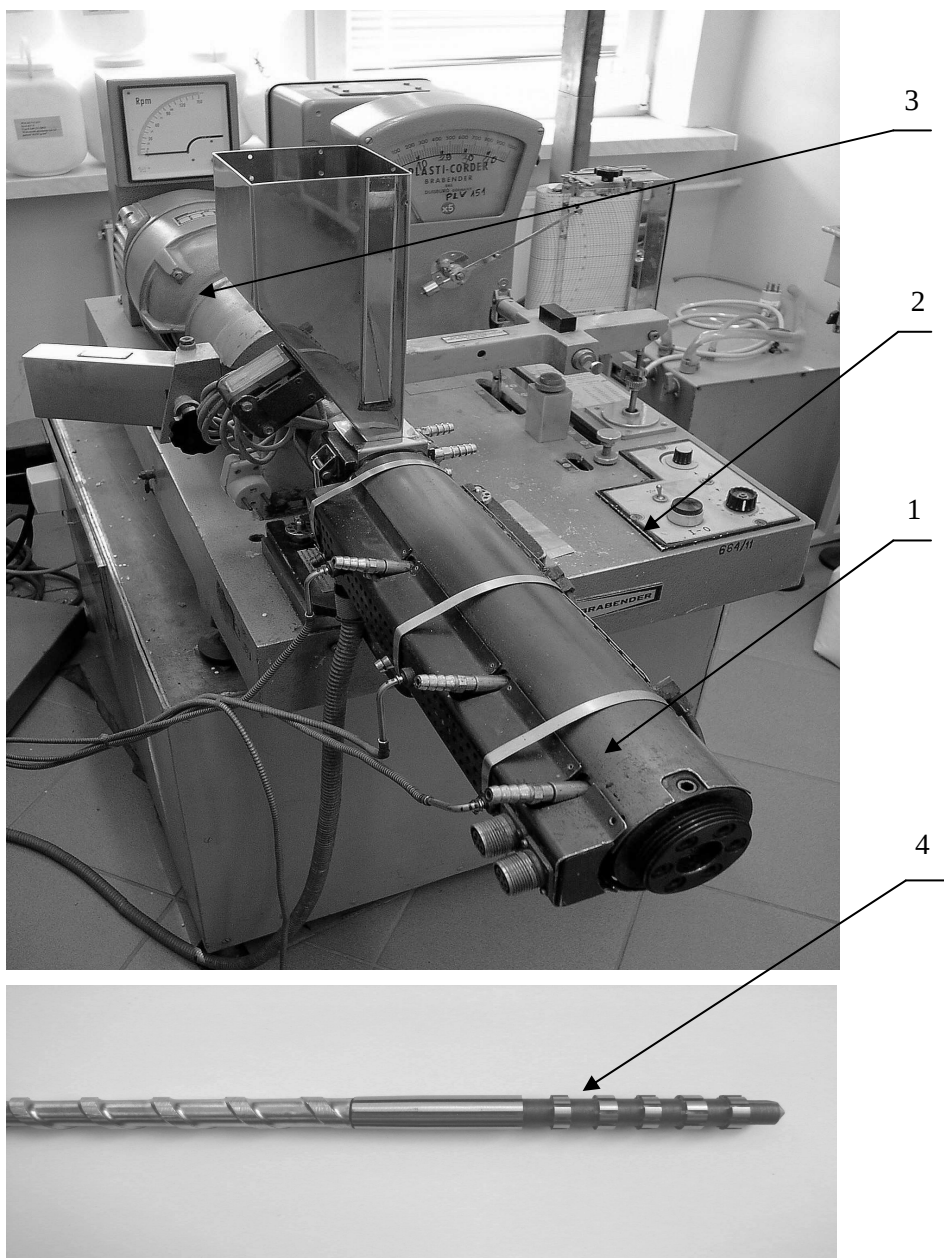
Stanowiska badawcze

Do konstituowania mieszanin polimerowych wykorzystano opisane poniżej dwa typy wylączarek, tj. jednoślimakową i dwuślimakową, natomiast do przygotowywania próbek do badań mechanicznych wykorzystano wtryskarkę Battefeld PLUS 35.

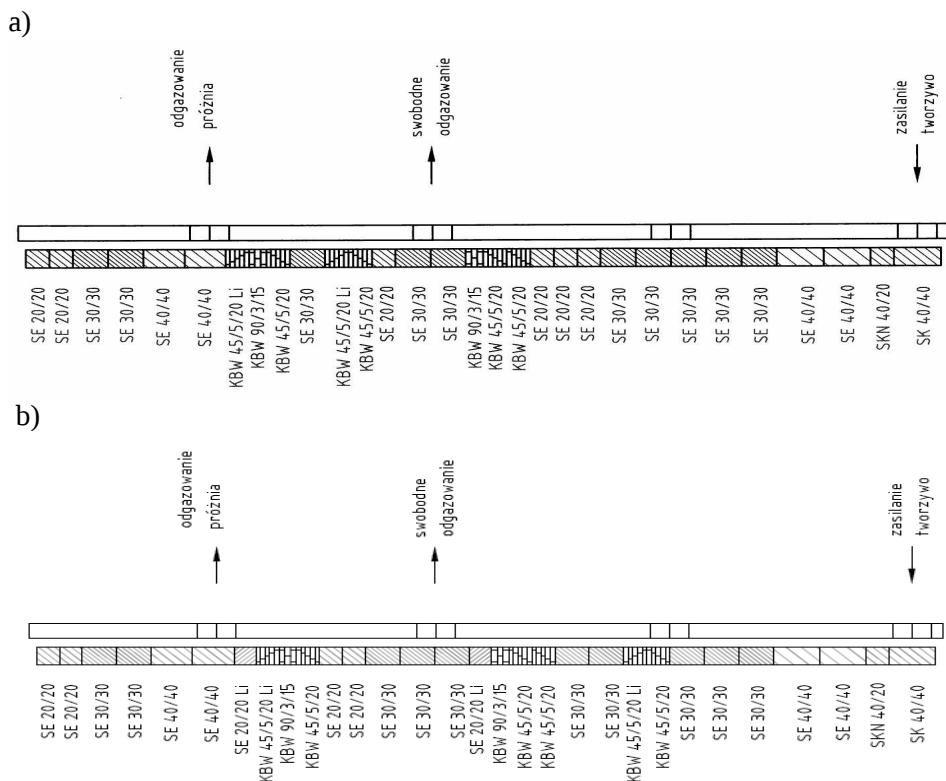
Wylączarka W-19

Na rys. 6 przedstawiono ogólny widok wylączarki W-19 Brabender, za pomocą której prowadzono badania wstępnego przetwarzania tworzyw. Na wylączarce tej przeprowadzono porównawcze badania wylączania tworzyw pierwotnych i mieszanin polimerowych. Miały one charakter poglądowy i orientacyjny, gdyż funkcje przetwórcze, prezentowane przez techniki wylączania dwuślimakowego współbieżnego i ww. jednoślimakowego w rozprawie są różne. Starano się ustalić efektywność układu uplastyczniającego wylączarki W-19, wyposażonej w ślimak z końcówką mieszającą, często stosowany w praktyce, w stosunku do zastosowanych układów typu TSE-W2W na podstawie porównania wyników badań właściwości mechanicznych, które uznać można za najbardziej reprezentatywne dla wstępnej oceny tworzyw. Tworzywa pierwotne jak i ich mieszaniny przetwarzane z udziałem wylączarki W-19 przetwarzane będą tylko raz, co będzie platformą odnośną dla oceny zmian, jakie wywołuje przetwarzanie dwuślimakowe współbieżne, w stosunku do tworzyw pierwotnych. Wyniki badań mechanicznych mieszanin uzyskanych z udziałem wylączarki W-19 przedstawiono w tabeli 3 i na rys. 10–10b.

Na stanowisku badawczym uzyskiwano regranulaty tworzyw pierwotnych i mieszanin polimerowych, poddawane dalszej procedurze badawczej. Wylączarka wyposażona jest w ślimak o średnicy $D = 19$ mm i długości roboczej 25D z końcówką mieszającą, ułatwiającą osiągnięcie stabilizacji termodynamicznej przetwarzanej mieszaniny.



Rys. 6. Widok ogólny wylączarki PLV 151 Brabender typ W-19: 1 – cylinder ze ślimakiem $L/D = 25$, 2 – moduł sterujący, 3 – moduł napędowy, 4 – końcówka mieszającościnająca ślimaka $L/D = 25$



Rys. 7. Schemat konstrukcji ślimaków wylączarki współbieżnej firmy Bühler typ BTSK-20: a) konfiguracja segmentów K2, b) konfiguracja segmentów K5A

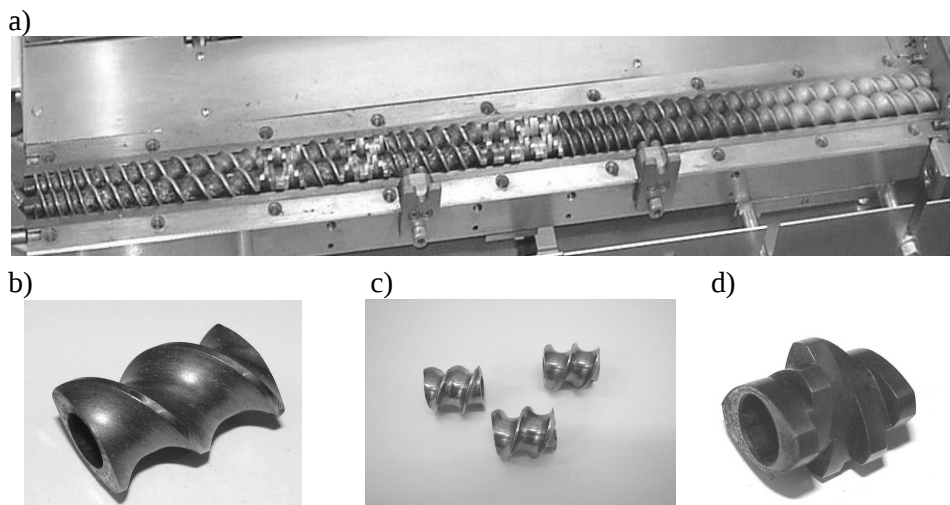
SEGMENTY ŚLIMAKÓW – oznaczenia symboli: SK – segment jednozwojowy, SE – segment dwuzwojowy transportujący; SKN – segment (przejściowy) jedno – i dwuzwojowy; liczby: pierwsza – skok uzwojenia, druga – długość segmentu; KBW – segmenty ugniatające, liczby: pierwsza – kąt między osiami symetrii krzywek, druga – liczba elementów krzywkowych, trzecia – długość segmentu, litery – kierunek pochylenia pozornej linii śrubowej elementów krzywkowych i ślimakowych, (kierunek lewy – litery Li, kierunek prawy – brak liter)

Wylączarka BTSK-20

Ogólny widok układu uplastyczniającego wylączarki BTSK-20 firmy Bühler przedstawiono na rys. 8a. Jest ona wyposażona w układ częściowo zazębiających się ślimaków współbieżnych, o średnicy $D = 20$ mm i długości roboczej 40D.

Konstrukcje ślimaków do badań dobrano doświadczalnie na podstawie analizy wyników wcześniejszych prac, związanych z wytwarzaniem kompozycji polimerowych. Wybrano konstrukcje, które okazały się być najbardziej efektywne w mieszaniu składników kompozycji PP z talkiem przy zastosowaniu ww. maszyny

ny przetwórczej. Miernikiem jakości wymieszania była ocena prawidłowości rozprzowania cząstek talku w osnowie PP i wielkości cząstek talku [16].



Rys. 8. Widok ogólny przykładowej konfiguracji segmentów ślimaka wylączarki dwuślimakowej współbieżnej (TSE – W2W) firmy Bühler typ BTSK-20: a) komplet ślimaków segmentowych, b) segment transportujący dwuzwojowy prawoskrętny, c) segment cofający dwuzwojowy lewoskrętny, d) segment ugniatający

Oba schematy konfiguracji segmentów ślimaków, oznaczone K2 i K5A przedstawiono na rys. 7a i 7b. Konfiguracja segmentów ślimaków K2 odznacza się lepszymi właściwościami transportującymi, natomiast zastosowana w badaniach konfiguracja segmentów ślimaków K5A charakteryzuje się, w porównaniu z konfiguracją K2, znacznie większą intensywnością mieszania rozdrabniającego (dyspersyjnego) i rozprzadzającego (dystrybutywnego) cząstek mieszanin polimerowych dwuskładnikowych.. Wynika to z zastosowania odpowiednich segmentów o lewym kierunku pochylenia linii śrubowej (przeciwny kierunek transportowania – zawracania tworzywa), oznaczanych SE 20/20 Li (K5A) zamiast segmentów o prawym kierunku pochylenia linii śrubowej (K2). Powoduje to spiętrzenie tworzywa przed strefami odgazowania swobodnego i wymuszonego, wydłuża czas przebywania mieszaniny w strefach intensywnego mieszania rozdrabniająco-rozprzadzającego, w których zamontowane są segmenty ugniatające KBW 90/3/15 (odpowiedzialne za mieszanie rozdrabniające) i KBW 45/5/20 (odpowiedzialne za mieszanie rozprzadzające) [17, 18].

Konstrukcje niektórych segmentów wspomagających działanie dystrybutywne składników mieszaniny tworzyw (prawo i lewoskrętnych) pokazano na rys. 8b–8d. Ze względu na fakt, że ww. konfiguracje segmentów ślimaków są podstawą do rozwoju dalszego szeregu konstrukcji przewidzianych do innych zadań, postanowiono zachować w pracy wcześniej stosowane oznaczenia, tj. K2 i K5A.

Na stanowisku tym uzyskiwano granulaty tworzyw pierwotnych i mieszanin polimerowych, które były poddawane dalszej procedurze badawczej.

Warunki przetwarzania tworzyw i ich mieszanin

Bliższe dane dotyczące niektórych parametrów technicznych opisanych wyżej maszyn przetwórczych oraz parametrów technologicznych procesów przetwarzania z ich udziałem tworzyw zebrano w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry procesu przetwarzania tworzyw w maszynach zastosowanych w pracy

Parametry techniczno-technologiczne wylaczarki typ Brabender W-19					
Konfiguracja ukladu jednošlimakowego		25D z koñcówkà mieszajàcà			
Temp. tworzywa w głowicy, °C		190 (PE, PP, PVC), 200 (PS), 260 (PET)			
Cišnienie tworzywa w głowicy, bar		Zmienne			
Prędkość obrotowa šlimaków, min ⁻¹		120			
Nastawy temperatur w strefach °C					
I 195	II 200	III 200	IV 195	Gł. zmienne, jw.	Chłodzenie: Powietrzne

Parametry techniczno-technologiczne wylaczarki typ Bühler BTKS-20					
Konfiguracja šlimaków W2W		K2, K5A			
Moment obrotowy, %		48			
Pobór mocy, kW		0,63			
Temp. tworzywa w głowicy, °C		190 (PE, PP, PVC), 200 (PS), 260 (PET)			
Cišnienie tworzywa w głowicy, bar		Zmienne			
Prędkość obrotowa šlimaków, min ⁻¹		250			
Nastawy temperatur w strefach °C					
I 195	II 200	III 200	IV 195	Gł. Zmienne	Chłodzenie: Powietrzne

Parametry techniczno-technologiczne wtryskarki typ Battenfeld PLUS 35	
Objętość wtrysku, cm ³	38
Temperatura wtryskiwania, °C	190 (PE, PP, PVC), 200 (PS), 260 (PET)
Czas cyklu, s	25

Przebieg badań mechanicznych

Badania właściwości mechanicznych dotyczyły oznaczania wytrzymałości na rozciąganie, które prowadzono wg wymagań Polskich Norm.

W przypadku prób wytrzymałościowych na rozciąganie wg PN-EN-ISO 527 rejestrowano wartości następujących wielkości fizycznych:

- wytrzymałość na rozciąganie,
- wydłużenie względne próbki przy rozciąganiu,
- współczynnik (moduł) sprężystości wzdłużnej.

Próby rozciągania prowadzono na stanowisku do badań wytrzymałościowych na aparacie typ Ti-ratest 27025 (Niemcy). Sterowanie procesem zrywania próbki

było możliwe za pomocą specjalnego programu bądź bezpośrednio na maszynie. Wyniki oznaczeń były zapisywane na dysku komputera. Przed przystąpieniem do zrywania próbki należało zadać w programie wartości przekroju poprzecznego próbki oraz ścieżkę zapisywania wyników. Zrywanie odbywało się z dwoma prędkościami, pierwsza z nich wynosiła $V1 = 1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ w czasie pierwszej minuty zrywania, oraz $V2 = 50,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ do momentu zerwania próbki. Prędkość $V1$ służyła do wyznaczania modułu sprężystości wzdłużnej E badanych próbek w zakresie prawa Hooke'a. Do badań rozciągania poszczególnych serii używano kształtek – wiosełek wtryskiwanych typu 1A wg zaleceń normy PN-EN-ISO 527-3, otrzymywanych metodą wtryskiwania z udziałem wtryskarki.

Parametry kształtki typ 1A do prób rozciągania były następujące:

l_0 – 80 mm – długość kształtki,
 a – 10 mm – szerokość kształtki,
 b – 2 mm – grubość kształtki.

Parametry zrywarki typ Tiratest 27025 były następujące:

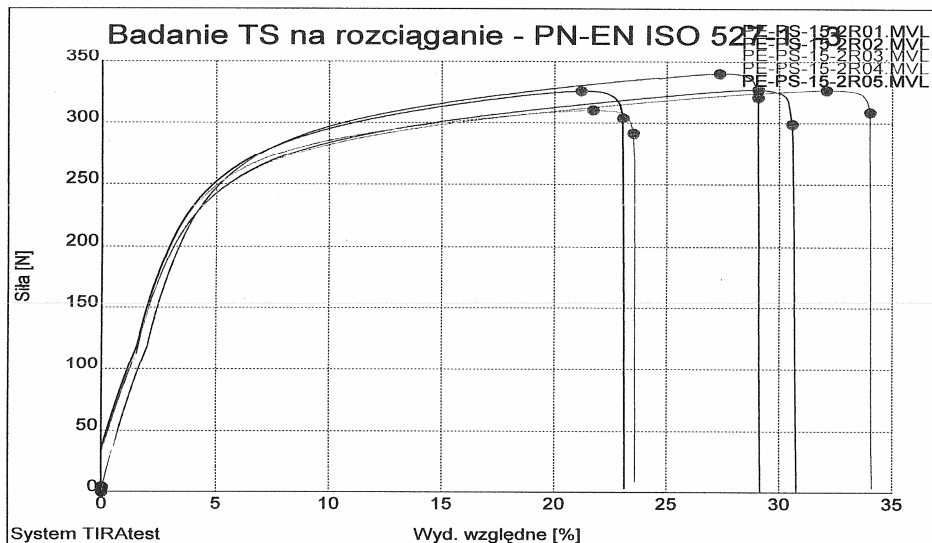
głowica pomiarowa, zakres siły, kN – 3
 prędkość przesuwu trawersy, $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ – $V0 = 1,0$
 – $V1 = 1,0$
 – $V2 = 50,0$.

Badania mechaniczne są najczęściej stosowanymi badaniami technicznymi, kwalifikującymi dany materiał do dalszych zastosowań. Zastosowanie poniższych metod do oceny przygotowanych mieszanek da odpowiedź na wcześniej postawione pytania, jak najważniejsze parametry użytkowe zmieniają się w zależności od sposobu przetwórstwa, składu mieszanin a także jak przetwórstwo różnymi sposobami zmienia właściwości mechaniczne tworzyw pierwotnych.

Rys. 9 przedstawia przykładowo przebieg i rejestrację pomiarów wytrzymałości na rozciąganie próbki mieszaniny polimerowej, jej wydłużenia względnego oraz modułu sprężystości.

Parametry badania

Badanie: Badanie TS na rozciąganie - PN-EN ISO 527-1, -3
 Typ maszyny: TIRAtest 27025
 Głowica siły: 3 kN
 Wymiary próbki: a = 10.00 mm; b = 2.00 mm
 Prędkości badania: V0 = 1.0 mm/min; V1 = 1.0 mm/min; V2 = 50.0 mm/min



Wyniki badania

	Data	FM N	RM MPa	FB N	RB MPa	AM %	AB %	Et MPa
1	29.04.08	340.13	17.01	320.53	16.03	27.36	29.06	400.04
2	29.04.08	327.13	16.36	298.65	14.93	29.07	30.57	373.79
3	29.04.08	310.13	15.51	291.25	14.56	21.71	23.50	384.42
4	29.04.08	326.53	16.33	308.46	15.42	32.08	34.00	373.38
5	29.04.08	325.66	16.28	303.59	15.18	21.19	23.05	384.42

Statystyka n = 5

	FM N	RM MPa	FB N	RB MPa	AM %	AB %	Et MPa
Wartość średnia	325.92	16.30	304.49	15.22	26.28	28.04	383.21
Odchylenie stand.	10.65	0.53	10.99	0.55	4.73	4.70	10.86
Współczynnik warian.	3.27	3.27	3.61	3.61	17.98	16.77	2.83

Rys. 9. Przykładowy przebieg i rejestracja pomiarów wytrzymałości na rozciąganie próbki mieszaniny polimerowej PE/PS-5 przetwarzanej z udziałem konfiguracji segmentów ślimaków K2

Wyniki badań

Wyniki badań mechanicznych badanych tworzyw i ich mieszanin przedstawiono w tabeli 3 i na rys. 10–12b.

Tabela 3 zawiera zestawienie wyników badań mechanicznych próbek tworzyw wyjściowych, otrzymanych podczas regranulowania z użyciem ślimaków K2 i K5A (poz. nr 6–10 i 11–15 tabeli) w porównaniu do wyników badań mechanicznych tworzyw pierwotnych (poz. 1–5 tabeli). Dla celów porównawczych w te samej tabeli zamieszczono również wyniki badań właściwości mechanicznych

polimerów wyjściowych, przetwarzanych w wylączarce jednoślindakowej W-19 (poz. P-1 – P-5 tabeli), przede wszystkim dla porównania wartości parametrów mechanicznych tworzyw indywidualnie przetwarzanych otrzymywanych w dwu różnych typach maszyn przetwórczych.

Takie polimery jak PE, PP i PVC po przetwórstwie, podczas którego występują wysokie siły ścinająco-mieszające wykazują niewielki spadek modułu sprężystości a podwyższenie wydłużenia względnego przy rozciąganiu, co oznacza „zmiękczenie” wywołane depolimeryzacją tworzywa. Przetwarzanie w maszynie jednoślindakowej W-19, o innych funkcjach ścinająco – mieszających (tabela 3, poz. P-1 – P-5) działa bardziej zachowawczo i wartości właściwości wytrzymałościowych są w przybliżeniu takie same jak dla tworzyw pierwotnych. Nieco inaczej zachowują się PS i PET. Dla tych dwu tworzyw zauważa się wzrost modułu sprężystości, co oznacza usztywnienie struktury.

Tworzywa pierwotne przetwarzane indywidualnie z udziałem dwu typów maszyn (tab. 3) wykazują różne wartości właściwości mechanicznych. Generalnie zauważa się zmiany idące w dwu kierunkach:

- spadek wytrzymałości na zrywanie ww. tworzyw oraz wzrost wydłużenia względnego,
- wzrost wytrzymałości na zrywanie oraz spadek wydłużenia względnego.

Za pierwsze ze zjawisk odpowiedzialne jest rozerwanie łańcucha polimerowego i obniżenie masy cząsteczkowej tworzywa, co wywołuje efekt „zmiękczenia” tworzyw [2, 3]. Za drugie ze zjawisk odpowiedzialny jest proces rozerwania łańcucha z jednoczesną rekombinacją rodnikową, co może prowadzić do tworzenia się struktur rozgałęzionych tworzyw oraz podwyższenia masy cząsteczkowej. Zauważa się także wzrost wartości modułu sprężystości wskazującego na usztywnienie struktury [4].

Na rysunkach 10 – 12b zaprezentowano graficznie wyniki badań właściwości mechanicznych mieszanin przetwarzanych w wylączarce typ W-19 i w wylączarce typ BTSK-20 z udziałem konfiguracji ślimaków K2 i K5A.

Obecność fazy rozproszonej w osnowie polimerowej wpływa w różny sposób na właściwości całej kompozycji.

Porównanie wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości wzdłużnej próbek kompozytów otrzymywanych z udziałem obu typów wylączarek (W-19, K2 i K5A), przedstawionych na rys. 10, 10b, 11, 11b oraz 12 i 12b wskazuje na względną niezależność tych parametrów od metody otrzymywania regranulatu. Natomiast w przypadku wydłużenia względnego przy rozciąganiu należy zwrócić uwagę na korzystne wartości tego parametru w przypadku mieszanin PE/PP i PE/PET, otrzymywanych za pomocą konfiguracji K2 i K5A (rys. 11a, 12a), gdzie osnową polimerową jest PE.

Zastosowanie ślimaków K5A do granulowania kompozycji, w stosunku do ślimaków K2, powoduje nieznaczne zmniejszenie wartości właściwości wytrzymałościowych oprócz wartości wydłużenia względnego przy rozciąganiu jak

opisano wyżej. Może to wskazywać na zdecydowanie zmiękczący charakter obecności PE w badanych kompozycjach.

Porównanie wartości właściwości wytrzymałościowych próbek polimerów pierwotnych przetwarzanych na wylączarce BTSK-20 z zastosowaniem dwu różnych ślimaków K2 i K5A, w przypadku mieszanin, w których PE jest osnową polimerową, wskazuje na wyraźny wzrost wartości wydłużenia względnego oraz obniżenie się wartości modułu sprężystości wzdłużnej, co oznacza zmiękczenie struktury mieszanin. Natomiast w przypadku, kiedy PE jest fazą rozproszoną w strukturze mieszanin, wartości wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości wzrastają, co oznacza przewagę wartości właściwości osnowy polimerowej.

Tabela 3. Porównanie wyników badań właściwości mechanicznych polimerów pierwotnych, przetwarzanych w wylączarce jednoślismakowej W-19 i dwuślismakowej BTSK-20, z użyciem ślimaków K2 i K5A

Lp	Próbka	Wytrzymałość na rozciąganie, σ_R , MPa	Wydłużenie względne przy rozciąganiu ϵ_R , %	Moduł sprężystości wzdłużnej, E, MPa,
1.	PE 0R	18,93	47,71	283
2.	PP 0R	40,31	10,59	1531
3.	PS 0R	54,25	3,87	2046
4.	PET 0R	55,41	5,84	1599
5.	PVC 0R	15,50	93,37	130
P-1	PE	20,77	49,72	259
P-2	PP	36,51	8,85	1342
P-3	PS	46,48	2,97	2120
P-4	PET	42,51	2,54	1977
P-5	PVC	16,7	83,78	110
6.	PE 2R-I	18,11	63,58	273
7.	PP 2R-I	38,66	11,54	1355
8.	PS 2R-I	58,11	4,28	2028
9.	PET 2R-I	59,78	5,83	1725
10.	PVC 2R-I	15,40	85,78	137
11.	PE 2R-II	16,27	56,53	201
12.	PP 2R-II	36,12	10,37	1306
13.	PS 2R-II	49,31	2,81	2245
14.	PET 2R-II	58,86	4,82	1767
15.	PVC 2R-II	16,27	99,93	103

Z przedstawionych diagramów wynika, że niektóre mieszaniny odznaczają się interesującymi właściwościami parametrów mechanicznych, powodującymi, że mogą mieć one charakter użytkowy jak np.: PE/PP-5, PE/PP-10, PE/PP-15 i PE/PET-5, PE/PET-10, PE/PET-15 otrzymywane na K2 (np. do wytwarzania folii metodą rozdmuchiwania rękawa) lub PS/PE-15, PS/PE-10, PS/PE-5 otrzymywane na K5A (do wtryskiwania elementów użytkowych) [18].

Wnioski

Przeprowadzona w pracy seria badań dowodzi, że odpowiednio dobrana konfiguracja układu uplastyczniającego pozwala na uzyskanie ciekawych wyników właściwości mechanicznych binarnych kompozycji polimerowych przygotowywanych metodą wytłaczania dwuślimakowego współbieżnego bez kompatybilizacji. Warunkiem jest dobre rozdrobnienie frakcji rozproszonej i równe rozpróśczenie jej cząstek polimerów w osnowie polimerowej. Wielkości cząstek fazy rozproszonej osiągają rozmiary ok. 1 μm [17]. Zapewnia to niewątpliwie dwukrotne przetworzenie badanych kompozycji tak, jak w symulowanych procesie recyklingu tworzyw, pokazanym na wstępie pracy. Wpływa to także na stabilizację struktury mieszanin [17, 18].

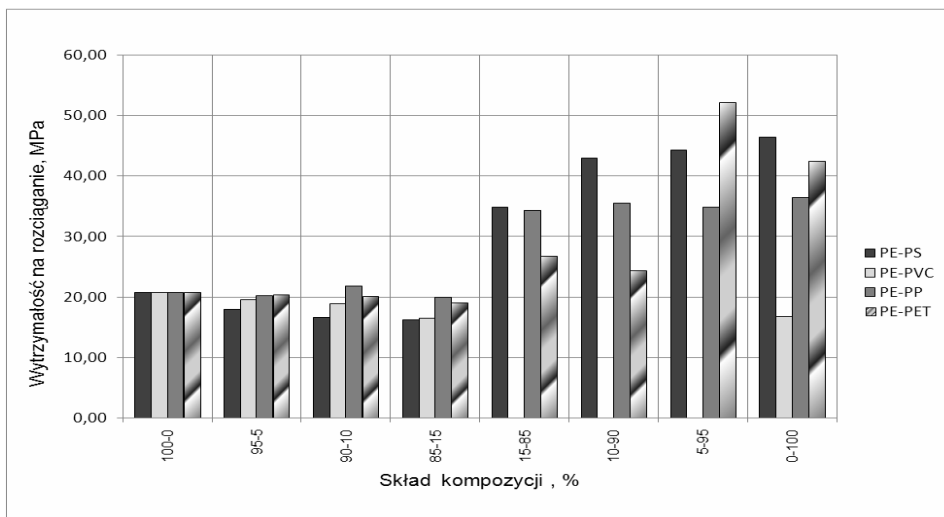
Wyniki badań potwierdzają osiągnięcie zasadniczego celu prac. Wartości parametrów tworzyw pierwotnych przetwarzanych w warunkach opisanych w pracy ulegają znacznym zmianom. Podczas ich przetwarzania występują zarówno zjawiska związane z rozerwaniem łańcucha węglowego powodującym obniżenie masy cząsteczkowej polimeru (podwyższenie wydłużenia względnego i obniżenie wytrzymałości na rozciąganie) jak i rekombinacją rodników, powodującą zmianę aranżacji łańcucha w postaci zwiększonej ilości rozgałęzień, które mogą wpływać na podwyższenie sztywności polimeru (zwiększenie modułu sprężystości wzdłużnej).

Generalnie wypadkowe wartości parametrów dla badanych kompozycji zawierają się w granicach pomiędzy wartościami dla obu stosowanych tworzyw w danej kompozycji. W przypadku recyklingu tworzyw takie przetwórstwo pozwala na sporządzenie kompozycji do zawartości 15% mas. wtórnego tworzywa rozproszonego w osnowie polimerowej przy zachowaniu interesujących wartości właściwości mechanicznych. Dalsze zwiększanie zawartości jest niezalecane, gdyż może prowadzić do koalescencji cząstek fazy rozproszonej, co mogłoby zakłócić obraz kompozycji [3, 6, 8, 10].

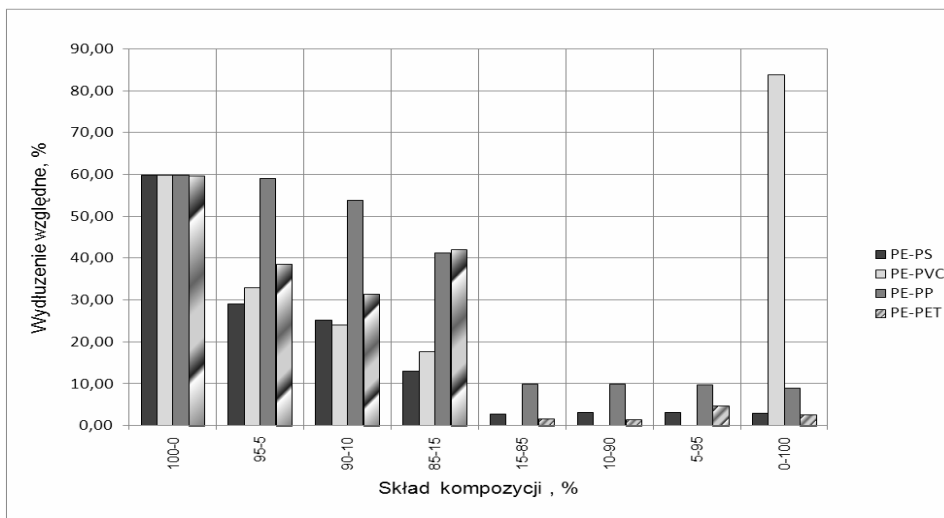
Niniejsza praca miała za zadanie uzyskanie informacji odnośnie możliwości zagospodarowania tworzyw wtórnych jak i ich mieszanin, z przeznaczeniem do wytwarzania wyrobów użytkowych. Wybrane do doświadczeń tworzywa są najpopularniejszymi tworzywami w kraju i badane lub podobne kombinacje tworzyw znajdują się bardzo często w strumieniu tworzyw odzyskiwanych w systemie recyklingu materiałowego. Z praktycznego punktu widzenia jednakże, zaleca się segregowanie tworzyw i sporządzanie mieszanin w sposób kontrolowany.

Problem związany z mieszaniem polimerów bez stosowania kompatybilizatorów jest na tyle ciekawy, że będą dalsze prace w kierunku ustalenia zmian termicznych, reologicznych i strukturalnych.

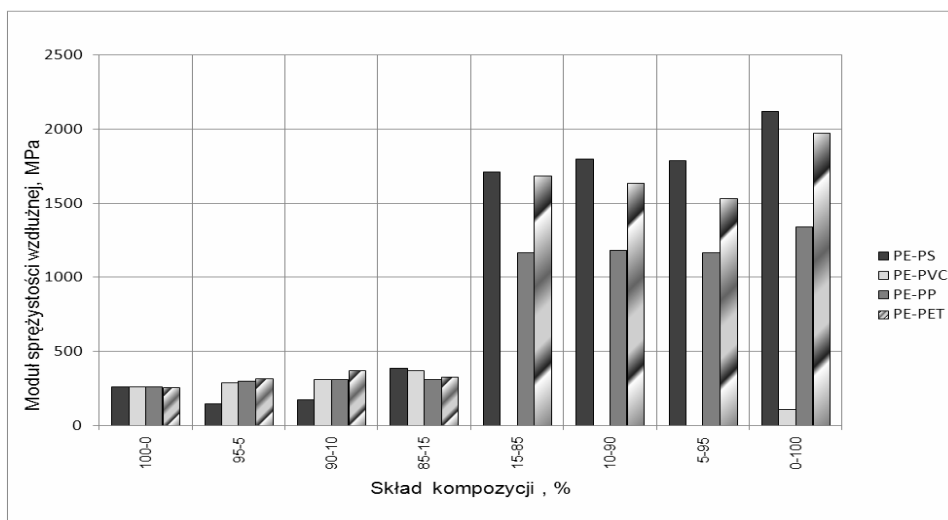
Wytłaczarka W-19 ze ślimakiem $L/D = 25$ z końcówką mieszającą



Rys. 10. Wytrzymałość na rozciąganie w funkcji składu mieszaniny

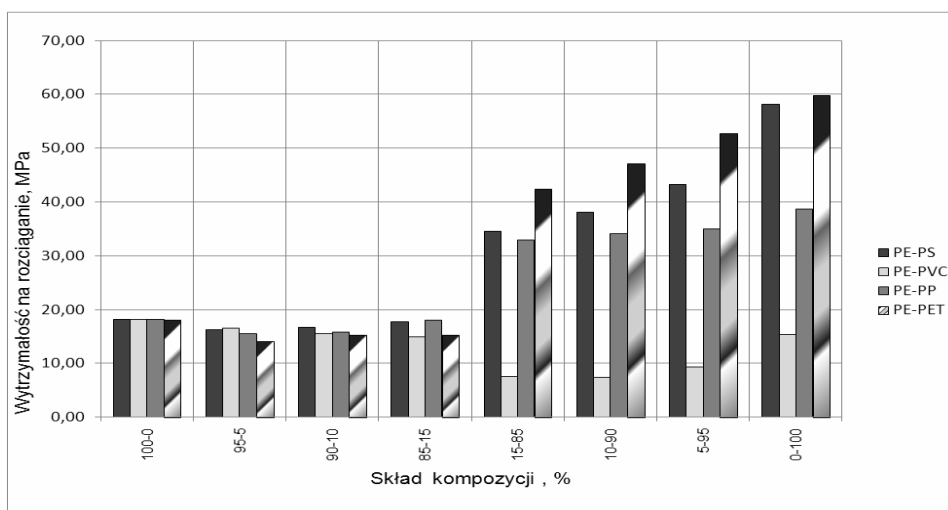


Rys. 10a. Wydłużenie względne w funkcji składu mieszaniny

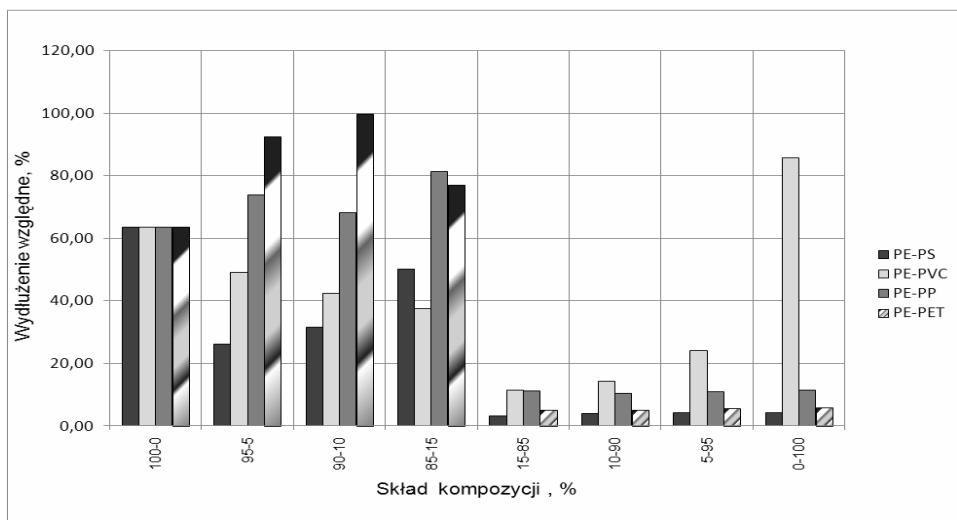


Rys. 10b. Moduł sprężystości wzdłużnej w funkcji składu mieszaniny

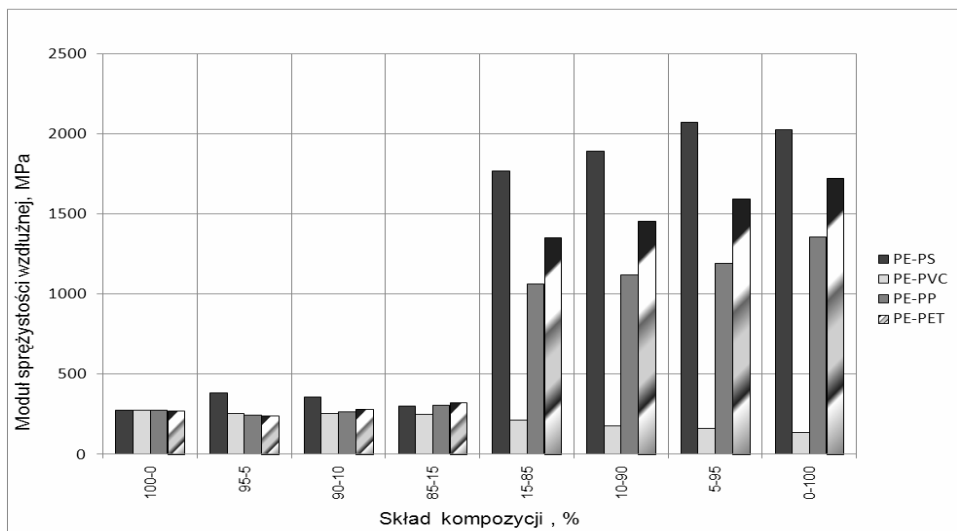
Wyłączarka BTSK-20, konfiguracja segmentów ślimaków K2



Rys. 11. Wytrzymałość na rozciąganie w funkcji składu mieszaniny

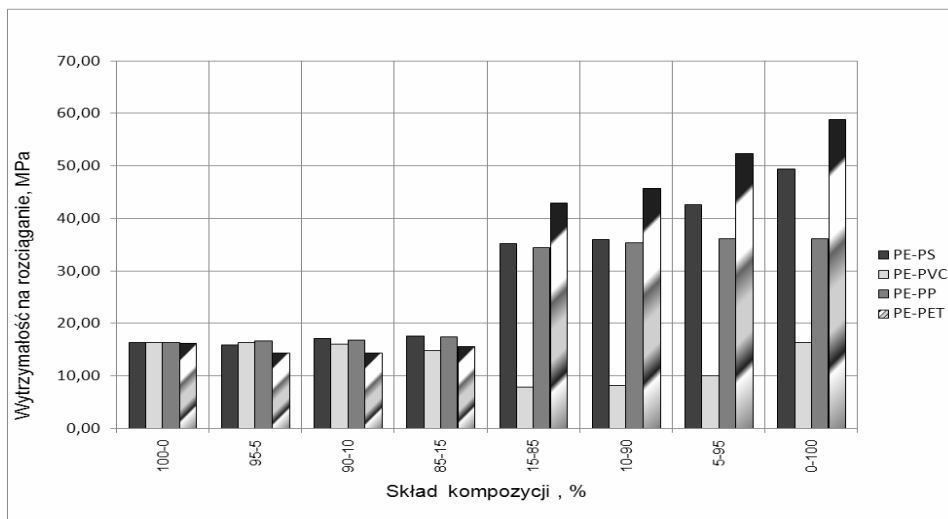


Rys. 11a. Wydluzenie wzgledne w funkcji składu mieszaniny

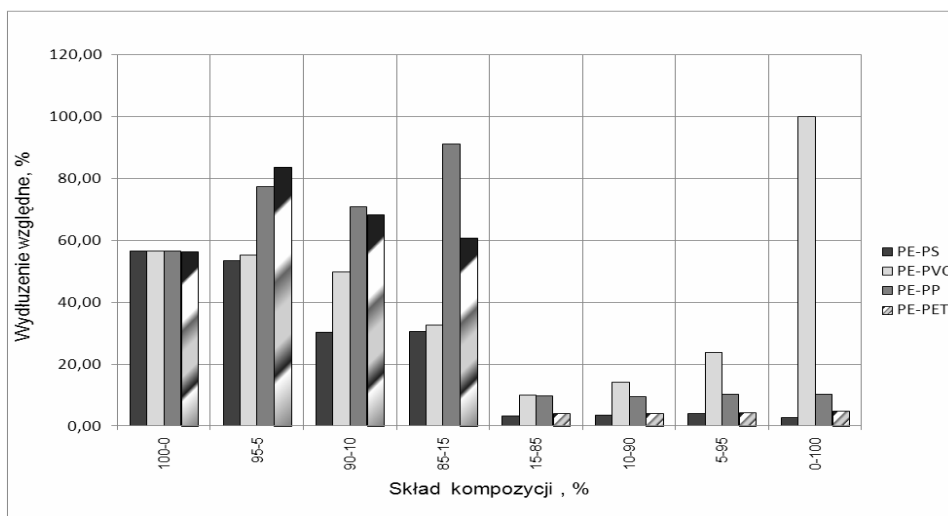


Rys. 11b. Moduł sprężystości wzdłużnej w funkcji składu mieszaniny

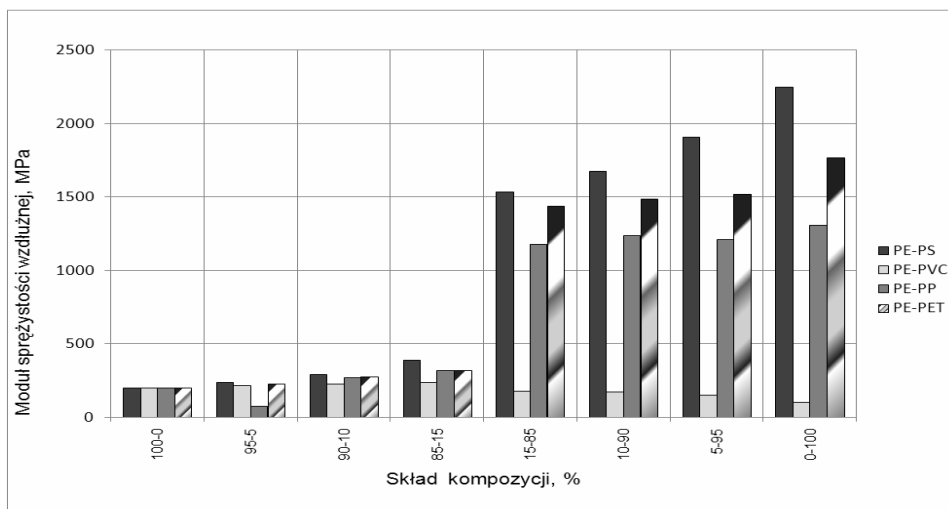
Wyłączarka BTSK-20, konfiguracja segmentów ślimaków K5A



Rys. 12. Wytrzymałość na rozciąganie w funkcji składu mieszaniny



Rys. 12a. Wydłużenie względne w funkcji składu mieszaniny



Rys. 12b. Moduł sprężystości wzdłużnej w funkcji składu mieszaniny

Skróty literowe stosowane w pracy

- 0R – granulaty tworzyw pierwotnych
- P-1 – P-5 – jednorazowe granulowanie tworzyw pierwotnych (oraz ich mieszanin) z udziałem wylaczarki jednošlimakowej W-19
- 2RI – podwójne granulowanie tworzyw pierwotnych (oraz ich mieszanin) z udziałem šlimaków K2
- 2RII – podwójne granulowanie tworzyw pierwotnych (oraz ich mieszanin) z udziałem šlimaków K5A
- EFM – wydłużeniowy przepływ mieszający (elongational flow mixing)
- FR – faza rozproszona
- OP – osnowa polimerowa
- SSE – wylaczarka jednošlimakowa (single screw extruder)
- TSE – wylaczarka dwušlimakowa (twin-screw extruder)
- TSE-W2W – wylaczarka dwušlimakowa współbieżna (co-rotating twin-screw extruder)

Literatura

- [1] Utracki L.A. (red.) *Polymer Alloys and Blends*, Carl Hanser Verlag, München, Niemcy 1989.
- [2] Utracki L.A. (red.). *Commercial Polymer Blends*. Chapman&Hall, London, Wielka Brytania 1998.
- [3] Utracki L.A. (red.). *Polymer Blends. Review Reports*, 11, 3, 3, Rapra Wielka Brytania 2000.

- [4] Cho J.W., White J.L., *Melting and Blending in a Modular Co-rotating/Counter-rotating Twin-Screw Extruder*. „International Polymer Processing”, 1996, 11, 1, s. 21–28.
- [5] Dedecker K., Groeninckx G., *Reactive Compatibilization of the PA-6/PPO Blend by Means of Styrene-Maleic Anhydride Copolymer*. „Journal of Applied Polymer Science”, 1999, 73, 6, s. 889–898.
- [6] Papanathanasou T.D., Higgins J.S., Soontaranum W., *Experimental Study of Polymer Blend in Twin-Screw Extruders*. „Polymers&Polymer Composites”, 1998, 6, 4, s. 223–227.
- [7] Stasiak J., 2007. *Wytłaczanie tworzyw polimerowych. Zagadnienia wybrane*. Wydaw. Uczelniane UTP w Bydgoszczy, 12, 156.
- [8] Potente H., Bastian M., Flecke J., Schramm D., *Melting of Polymer Blends in Co-rotating Twin Screw Extruders*. „International Polymer Processing”, 2001, 16, s. 131–142.
- [9] Sikora J. W., *Selected Problems of Polymer Extrusion*. Wydawnictwo Naukowe WNGB, Lublin 2008, 15.
- [10] Luciani A., Utracki L.A., *Extensional Flow Mixer, EFM*. „International Polymer Processing”, 1996, 11, 4, s. 299–309.
- [11] Sterzyński T., Jakubowska P., Królikowski B., *The Properties of Polyolefins Modified with PET Powder*. „Journal of Applied Polymer Science”, 2008, 109, s. 1993–1999.
- [12] Królikowski B., *Wytłaczanie dwuślimakowe współbieżne binarnych kompozycji polimerowych*. „Inżynieria i Aparatura Chemiczna”, 2005, 44, 3, s. 43–46.
- [13] Królikowski B., Frąszczak Z., *Próba oceny mieszalności tworzyw polimerowych przetwarzanych różnymi metodami za pomocą współczynnika λ* . „Przetwórstwo tworzyw”, 2013, 5(155)/19, s. 502–506.
- [14] Królikowski B., *Selected Physical – Chemical Properties of Selected Polymer Blends*. 8th International Conference – APT-09, materiały konferencyjne, Katowice 2009, s. 34.
- [15] Królikowski B., *Właściwości wybranych kompozytów polimerowych przetwarzanych w warunkach symulowanego recyklingu*. Referat w opracowaniu zwanym: Recykling i odzysk materiałów polimerowych: Materiały–Technologie–Utylizacja. Wydaw. ZUT Szczecin 2010.
- [16] Stasiak J., Gołbiewski J., *Wpływ warunków procesu wytłaczania dwuślimakowego współbieżnego układów na właściwości polipropylenu modyfikowanego napelniającami nieorganicznymi*. „Przemysł Chemiczny”, 2003, 8/9, s. 962–965.
- [17] Królikowski B., *Badania nowych kompozycji polimerowych z tworzyw termoplastycznych otrzymanych w wytłaczarkach dwuślimakowych współbieżnych*. Monografia, Wydaw. Instytut Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwników, Toruń 2011.
- [18] Królikowski B., *Wytłaczarki dwuślimakowe współbieżne w konstytuowaniu mieszanin z tworzyw polimerowych wtórnych*. Rozprawy nr 160, praca habilitacyjna, Wydaw. Uczelniane UTP, Bydgoszcz 2012.

Anna Kliszowska
Janusz W. Sikora
Politechnika Lubelska
Volodymyr Moravskiy
Lviv Polytechnic National University

4. Technologiczne aspekty otrzymywania kompozytów polimerowych z proszkiem szklanym

Wprowadzenie

Kompozyty polimerowe są materiałami składającymi się z połączonych wzajemnie komponentów o różnych właściwościach. Przy czym jeden z komponentów jest osnową – polimerem, natomiast drugi jest wzmocnieniem – napełniaczem. Takie połączenie materiałów ma na celu uzyskanie nowego materiału o korzystniejszych właściwościach eksploatacyjnych w stosunku do komponentów użytych oddzielnie lub wynikających z prostego sumowania ich właściwości. Kompozyty można podzielić na kompozyty naturalne oraz syntetyczne, a także ze względu na rodzaj napełniacza, na kompozyty włókniste, warstwowe i ziarniste.

Większość kompozytów włóknistych projektowana jest w celu uzyskania materiałów o wysokiej wytrzymałości, sztywności, odporności na zmęczenie, a przy tym wysokiej wytrzymałości właściwej. Efekt ten otrzymuje się poprzez wprowadzenie do plastycznej, polimerowej osnowy sztywnych włókien charakteryzujących się wysoką wytrzymałością i kruchością. Włókna mogą być cięte lub nie i mogą być wykonane z najróżniejszych materiałów np. włókna szklane, węglowe, metalowe, polimerowe, ceramiczne itd. O właściwościach tej grupy kompozytów decydują właściwości osnowy oraz właściwości włókien, a także jakość połączenia osnowy z włóknami, średnica i długość włókien, ich orientacja i liczba.

Kompozyty warstwowe składają się z co najmniej dwóch warstw jednego materiału złączonych ze sobą za pomocą spoiwa polimerowego. Napełniaczem w tego rodzaju kompozytach są przede wszystkim arkusze, maty, tkaniny i matotkaniny różnych materiałów połączonych w rezultacie adhezji najczęściej żywicą fenolową, aminową, mocznikową lub inną. Właściwości takich kompozytów kształtuje się poprzez odpowiednie ukierunkowanie elementów makrostruktury napełniacza względem siebie, poprzez ułożenie jego w odpowiednich kierunkach. Ze względu na bardzo dobre właściwości mechaniczne stosowane są przede wszystkim w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnych a nawet kosmicznym.

W kompozytach ziarnistych osnowa jest polimerowa, natomiast napełniacz ma postać cząstek różnych rozmiarów, od bardzo małych – proszku, poprzez większe – mikrogranulki do największych – granulki. Zadaniem ich jest nie tylko podwyższenie wytrzymałości materiału stanowiącego osnowę, co nadanie

mu odpowiedniej kombinacji właściwości. Napełniacze te dodawane są do kompozytu najczęściej w celu zmniejszenia udziału drogiego polimeru, podwyższają sztywność i twardość, zwiększają odporność na pękanie, jednak obniżają wytrzymałość i plastyczność otrzymanego kompozytu.

W pracy przedstawiono przykładową technologię otrzymywania kompozytów ziarnistych, których osnowę stanowi polietylen dużej gęstości Hostalen GD 7255 a napełniaczem jest stosunkowo nowy materiał – mączka szklana o nazwie Mikrover. Z kompozytów tych wytworzono próbki badawcze i określono ich podstawowe właściwości mechaniczne.

Stanowiska badawcze

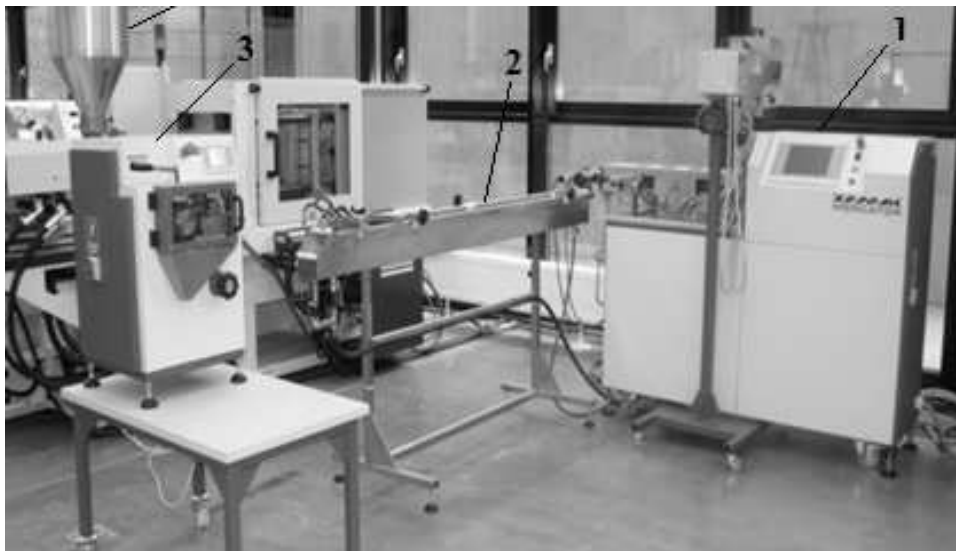
Badania obejmowały wykonanie granulatu, otrzymanie próbek oraz badania twardości, udarności a także wytrzymałości na rozciąganie.

Wytłaczanie z granulowaniem na zimno wykonano przy wykorzystaniu stanowiska badawczego składającego się z: wytłaczarki dwuślimakowej EHP 2x20 Sline z dozownikami wolumetrycznymi, wanny chłodzącej WCH-2000 i granulatora G16/32 III. Próbki do badań wykonano w procesie wtryskiwania otrzymanego granulatu w zmiennych warunkach czasu ochładzania i objętościowego natężenia wpływu tworzywa przez dyszę wtryskową. Proces wtryskiwania przeprowadzono z wykorzystaniem wtryskarki CS 88/63. Ostatni etap stanowiły badania właściwości otrzymanych wyprasek: twardości, udarności oraz wytrzymałości na rozciąganie.

Wytłaczarka EHP 2x20 Sline jest współbieżną wytłaczarką dwuślimakową o średnicy ślimaków 20 mm. Ślimaki składają się z krótkich segmentów a ich prędkość obrotowa jest zmieniana bezstopniowo i wynosi do 1000 obr/min. Ślimaki napędzane są przez motoreduktor o mocy 11 kW. Układ grzewczy cylindra wytłaczarki składa się z 9 stref grzejnych. Układ dozowników wolumetrycznych przeznaczony jest do podawania granulatu oraz napełniacza do strefy zasypu wytłaczarki w odpowiednich proporcjach. Niezależne sterowanie dozownikami umożliwia uzyskanie różnorodnej mieszanki tworzywowej. Charakterystykę techniczną wytłaczarki EHP 2x20 Sline przedstawiono w tabeli 1, a ogólny wygląd stanowiska do granulowania na zimno pokazano na rysunku 1.

Tabela 1. Charakterystyka techniczna wytłaczarki EHP 2x20 Sline

Lp.	Wielkość charakterystyczna	Jednostka	Wartość
1	Średnica ślimaka (D)	mm	20
2	Długość ślimaka (L/D)	mm	640
3	Maksymalna prędkość obrotowa ślimaka	obr/min	1000
4	Moc silnika napędowego	kW	7,5
5	Maksymalna temperatura pracy	°C	400
6	Długość x szerokość x wysokość	mm	1800 x 700 x 1750



Rys. 1. Stanowisko wytłaczania z granulowaniem na zimno: 1 – wytłaczarka EHP 2x20 Sline, 2 – wanna chłodząca WCH-2000, 3 – granulator G 16/32 III

Wanna chłodząca WCH - 2000 zbudowana jest z następujących elementów:

- koryta wanny – zbudowane jest ono z odpowiednio wyprofilowanej blachy nierdzewnej,
- ramy nośnej – wykonana jest jako konstrukcja spawana z profili stalowych,
- rolek prowadzących tworzywo – mocowanych bezpośrednio do koryta wanny, posiadających możliwość regulacji pozycji zarówno w poziomie, jak i w pionie.

Długość wanny wynosi 2000 mm, wysokość 1200 mm a szerokość 130 mm.

Granulator G 16/32 III zbudowany jest z kołowego freza nożowego, układu rolek dociskowych, prowadnicy żyłek tworzywa, leja zsypowego oraz zamykanych drzwi. Całość znajduje się na podwyższonej ramowej konstrukcji nośnej. Granulator rozdrabnia tworzywo polimerowe, które podawane jest z wytłaczarki w postaci żyłki. Żyłka tworzywa wprowadzana jest do granulatora przez prowadnicę, a następnie dostaje się pomiędzy dwie rolki dociskowe, z których jedna jest napędzana. Układ rolek dociskowych umożliwia posuw tworzywa w kierunku obracającego się kołowego freza nożowego z ostrzami tnącymi. Frez nożowy napędzany jest silnikiem elektrycznym synchronicznym o momencie obrotowym 10Nm.

W skład układu rolek dociskowych wchodzi prowadnica, która pozwala na wprowadzenie pomiędzy rolki od 1 do 4 żyłek tworzywa jednocześnie. Rolka podająca układ rolek dociskowych napędzana jest silnikiem napędzającym frez nożowy poprzez przekładnie pasowe. Drugą rolką w układzie rolek docisko-

wych jest rolka pokryta gumą. Rolka gumowa dociska żyłki tworzywa do rolki podającej, dzięki czemu przesuwają się one w kierunku freza nożowego. Lej zsypany jest wykonany z blach ze stali nierdzewnej, pozwala on na przesypywanie się granulek wprost do pojemnika. Drzwi osłaniają pracujący frez. Konstrukcja drzwi zapewnia łatwy dostęp do zespołów freza i rolek. Charakterystykę techniczną granulatora G 16/32 III przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Charakterystyka techniczna granulatora G 16/32 III

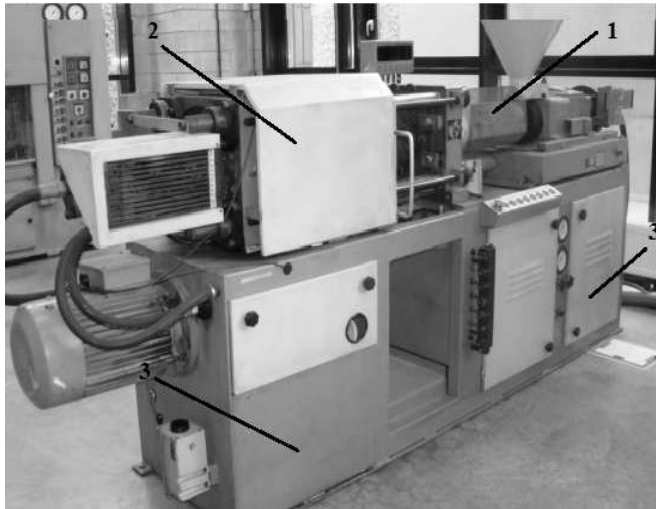
Lp.	Wielkość charakterystyczna	Jednostka	Wartość
1	Średnica noża tnącego	mm	125
2	Liczba ostrzy tnących	sztuk	18
3	Moc silnika	kW	1,6
4	Średnica żyłki tworzywa	mm	1,5–3
5	Maksymalna ilość żyłek	sztuk	4
6	Długość granulki	mm	2–5
7	Długość	mm	470
8	Wysokość	mm	740
9	Szerokość	mm	480

Stanowisko badawcze wtryskiwania składa się z wtryskarki ślimakowej CS-88/63 z formą wtryskową (rys. 2).

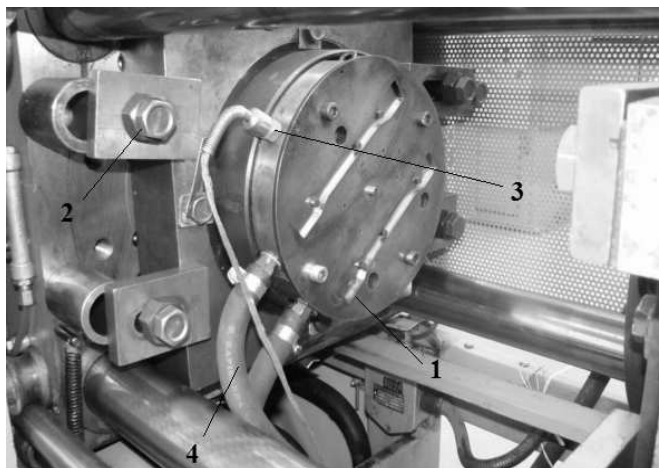
Układy uplastyczniający, narzędziowy oraz napędowy są podłączone do aparatury nastawczej i pomiarowo-kontrolnej, znajduje się w szafie sterowniczej. Głównymi elementami układu uplastyczniającego jest cylinder zamocowany w obudowie układu uplastyczniającego oraz ślimak o średnicy 36 mm i długości części roboczej równej 20 D, wykonany ze stali stopowej konstrukcyjnej. Na cylindrze są zamontowane w czterech grupach grzejniki pierścieniowe o łącznej mocy w poszczególnych strefach grzejnych wynoszącej: w strefie pierwszej 350W, drugiej 525 W, trzeciej 525 W, czwartej 800 W oraz cztery czujniki temperatury o zakresie pomiarowym od 0 do 400°C. W tylnej części cylindra jest wykonany otwór zasypowy, nad którym jest przymocowany zasobnik grawitacyjny tworzywa wejściowego. Przednia część cylindra ma gwint wewnętrzny, co umożliwi połączenie z obsadą dyszy wtryskowej.

Układ narzędziowy wtryskarki składa się z zespołu narzędzia, obejmującego formę wtryskową i oba stoły wtryskarki, stół nieruchomy i ruchomy, o wymiarach w przekroju poprzecznym 455 x 430 mm oraz z zespołu zamykająco – otwierającego, obejmującego płytę oporową, prowadnice, dźwignie łącznikowe i siłownik hydrauliczny. Stół nieruchomy jest połączony czterema prowadnicami z płytą oporową. Na prowadnicach jest zamocowany stół ruchomy połączony z dźwigniami łącznikowymi oraz siłownikiem hydraulicznym.

Do stołu ruchomego jest przymocowany podzespół ruchomy formy wtryskowej (rys. 3), w którym usytuowane są dwa gniazda formujące. Wymiary gniazd formujących są następujące: długość 150 mm, szerokość od 10 do 20 mm, głębokość 4 mm.

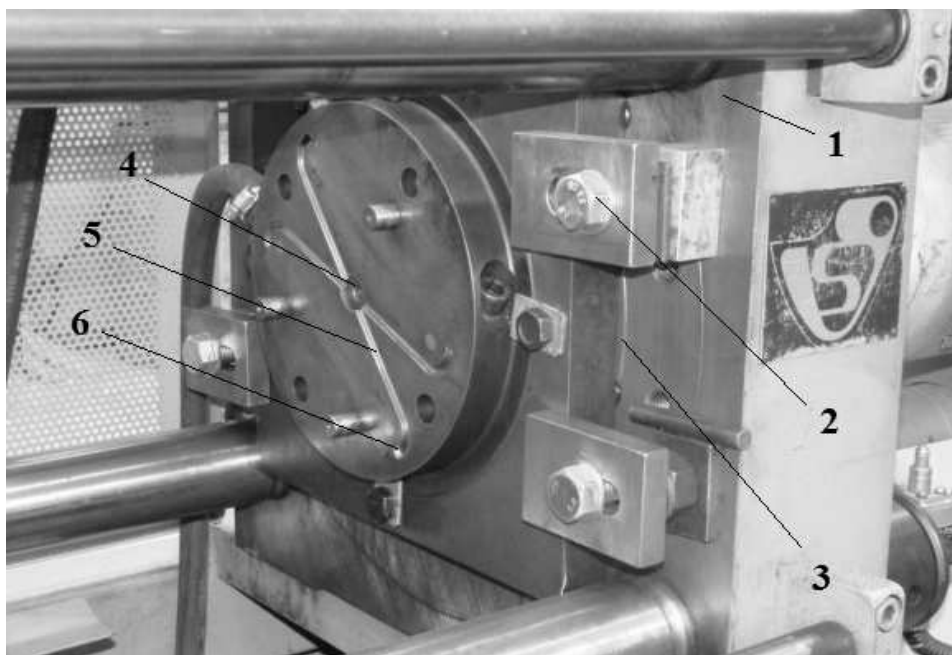


Rys. 2. Wtryskarka CS 88/63: 1 – układ uplastyczniający, 2 – układ narzędziowy, 3 – układ napędowy



Rys. 3. Budowa podzespołu ruchomego formy wtryskowej: 1 – część formy mocowana do stołu ruchomego, 2 – śruby mocujące formę do stołu wtryskarki, 3 – czujnik temperatury, 4 – węże układu chłodzącego formy

Druga część formy mocowana jest do stołu nieruchomego wtryskarki tworząc podzespół nieruchomej formy wtryskowej (rys. 4).



Rys. 4. Budowa podzespołu nieruchomego formy wtryskowej: 1 – stół nieruchomy wtryskarki, 2 – śruby mocujące podzespół formy do stołu, 3 – płyta mocująca, 4 – kanał centralny, 5 – kanał doprowadzający, 6 – przewężka

W podzespole nieruchomym formy znajdują się kanały układu przepływowego doprowadzające tworzywo do gniazd formujących. Układ przepływowy składa się kanału centralnego stożkowego o długości 25 mm, średnicy minimalnej 4,7 mm i średnicy maksymalnej 7,2 mm, dwóch kanałów przepływowych oraz przewęzek. Kanał przepływowy o przekroju poprzecznym półkolistym ma długość 205 mm i zakończony jest przewężkami punktowymi o przekroju poprzecznym trapezowym zaokrąglonym i długości 1,5 mm.

Układ napędowy wtryskarki CS 88/63 składa się z silnika elektrycznego WF-200 prądu przemiennego o mocy 15 kW, napędzającego pompę zamontowaną w zbiorniku oleju.

Charakterystykę techniczną wtryskarki CS-88/63 przedstawiono w tabeli 3.

Do wykonania udarowości metodą Charpy zastosowano młot Charpy'ego o symbolu 639F. Pomiar twardości metodą Shore'a przeprowadzono przy użyciu cyfrowego twardościomierza Shore'a Affri System, a oznaczenie cech wytrzymałościowych próbek przy statycznym rozciąganiu przeprowadzono wykorzystując maszynę wytrzymałościową Zwick/Roell Z010.

Tabela 3. Charakterystyka techniczna wtryskarki CS-88/63

Lp.	Wielkość charakterystyczna	Jednostka	Wartość
1	Średnica ślimaka	mm	36
2	Długość części roboczej ślimaka	mm	720
3	Całkowita długość ślimaka	mm	880
4	Maksymalna masa wtrysku	kg	0,088
5	Maksymalna pojemność wtrysku	m ³	73,5 x 10 ⁻⁶
6	Maksymalne ciśnienie wtryskiwania	MPa	120
7	Maksymalna siła zamykania formy	kN	630
8	Maksymalna wysokość formy	mm	250
9	Moc silnika pompy hydraulicznej	kW	15
10	Moc silnika ślimaka	kW	0,75
11	Moc grzejników elektrycznych	kW	3,6

Materialy

Do sporządzenia granulatu badanej kompozycji wykorzystano polietylen o nazwie handlowej Hostalen i symbolu GD 7255 produkcji Basell Orlen Polyolefins oraz mączkę szklaną o nazwie handlowej Mikrover firmy Dennert Poraver GmbH.

Hostalen GD 7255 jest polietylenem dużej gęstości (PE-HD), który używany jest do zastosowań wtryskowych. Jest to polimer cechujący się dużą gęstością, dobrą płynnością i przetwarzalnością, wysoką sztywnością oraz udarnością. Wybrane właściwości polietylenu Hostalen GD 72555 przedstawiono w tabeli 5.

Mączkę szklaną Mikrover firmy Dennert Poraver jest otrzymywana z nieorganicznych, pirolitycznych termicznie granulek ze szkła odpadowego. Skład i właściwości mączki szklanej przedstawiono w tabelach 6 oraz 7.

Charakterystyka badań

W programie badań przyjęto jako czynniki badane:

bezpośrednio

- udarność badana metodą Charpy,
- twardość badana metodą Shore'a,

pośrednio

- wytrzymałość na rozciąganie σ_m (MPa),

- odkształcenia przy maksymalnej sile ϵ_m (%),
- odkształcenia przy zerwaniu ϵ_{ib} (%),
- naprężenia przy zerwaniu σ_b (MPa).

Jako czynniki zmienne przyjęto:

- czas chłodzenia (15 s, 20 s, 25 s, 30 s, 35 s).

Czynniki zakłócające, mogące mieć niekorzystny wpływ na wyniki badań, są to przede wszystkim niestabilności:

- temperatury otoczenia; zmiany od 22 do 24°C,
- wilgotności względnej powietrza; zmiany od 55 do 65 %,
- prądu elektrycznego od 220 do 240 V.

Tabela 5. Wybrane właściwości polietylenu Hostalen GD 7255

Właściwości	Jednostka	Wartość
Fizyczne		
Gęstość	kg/m ³	955
Wskaźnik szybkości płynięcia (MFR)		
(190°C/ 2,16 kg)	g/10 min	4
(190°C/ 5,0 kg)	g/10 min	11
Mechaniczne		
Moduł elastyczności przy rozciąganiu	MPa	1180
Naprężenie na granicy plastyczności	MPa	27
Wydłużenie na granicy plastyczności	%	8
Udarność wg Charpy'ego z karbem		
(23°C, Typ 1, karb A)	kJ/m ²	10
(-30°C, Typ 1, karb A)	kJ/m ²	5
Twardość		
Twardość Shore'a (Shore D)	°ShD	60
Twardość kulkowa (H 132/30)	MPa	52
Termiczne		
Temperatura mięknięcia wg Vicata B50(50°C/h 50N)	°C	70

Tabela 6. Skład mączki szklanej Mikrover [43]

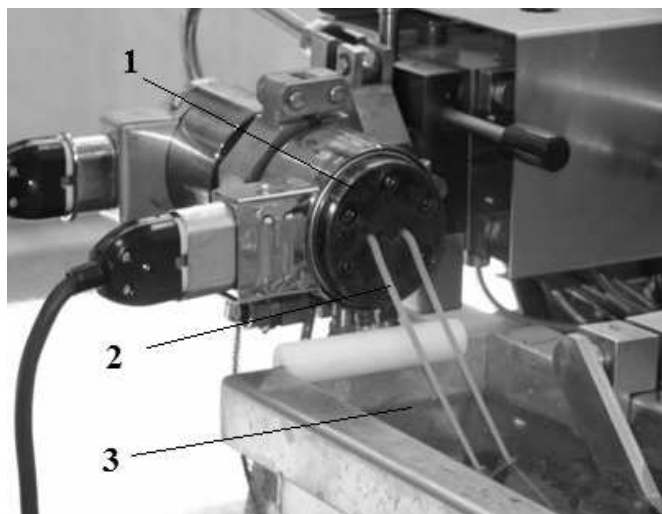
Lp.	Składnik	Wzór chemiczny	Udział masowy %
1	Krzemionka	SiO	71
2	Sód	N ₂ O	14
3	Tlenek wapnia	CaO	9
4	Tlenek glinu	Al ₂ O ₃	3
5	Magnezja	MgO	2
6	Potas	K ₂ O	1

Tabela 7. Właściwości mączki szklanej Mikrover [43]

Lp.	Właściwość	
1	Postać	Granulat
2	Kolor	Kremowe
3	Zapach	Bezwonny
4	Temperatura topnienia	około 900°C
5	Temperatura pięknienia	około 700°C
6	Gęstość nasypowa	110 – 600 kg
7	Rozpuszczalność	nierozpuszczalne w wodzie
8	Wartość pH	około 8 – 11 (20°C/ 100 g/ l)
9	Stabilność chemiczna	stabilny w normalnych warunkach temperatury i ciśnienia

Przed przystąpieniem do wytłaczania przygotowano mieszaninę sporządzoną według zasady: 1 kg polietylenu Hostalen GD 7255 oraz 100 g mączki szklanej Mikrover. Następnie nastawiono parametry z jakimi procesu wytłaczania z granulowaniem na zimno. Parametry te przedstawiono w tabeli 8.

Po ustabilizowaniu cieplnym wytłaczarki dwuślimakowej wsypano mieszanekę polietylenu i mączki szklanej do zasobnika tworzywa. Po uplastycznieniu mieszanki kompozytowej w układzie uplastyczniającym wytłaczarki dwuślimakowej, tworzywo odbierano z dwóch kołowych dysz i w postaci żyłki wprowadzano (rys. 8) do wanny chłodzącej napełnionej wodą, w której były ochładzane i zestalały się.

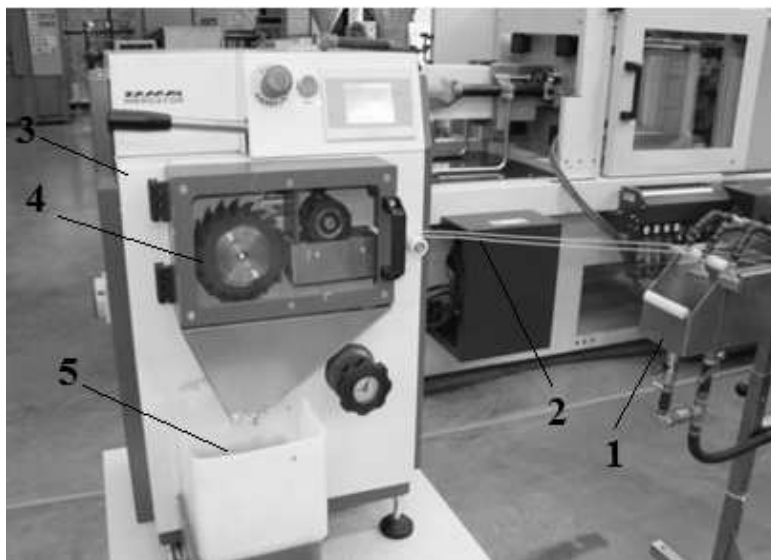


Rys. 8. Wypływ tworzywa z dyszy głowicy wytłaczarskiej; 1 – głowica wytłaczarska, 2 – wytłoczone tworzywo, 3 – woda chłodząca

Tabela 8. Parametry procesu wytłaczania z granulowaniem na zimno

Parametr	Jednostka	Wartość
Parametry napędu		
Moment obrotowy	Nm	171
Ciśnienie	Bar	25
Prędkość obrotowa ślimaków	obr/min	50
Prędkość obrotowa dozowników		
dwuślimakowego	obr/min	10
jednoślimakowego	obr/min	35
Temperatura stref grzejnych		
9 strefa	°C	140
8 strefa	°C	145
7 strefa	°C	150
6 strefa	°C	150
5 strefa	°C	155
4 strefa	°C	155
3 strefa	°C	160
2 strefa	°C	160
1 strefa	°C	160
Głowica	°C	160
Temperatura zasypu	°C	58
Prędkość obwodowa noża granulatora	m/min	4,0

Wytłoczone żyłki, po ochłodzeniu w wannie podawane były do granulatora gdzie następowała jego granulacja (rys. 9).



Rys. 9. Granulator: 1 – wanna chłodząca, 2 – wytłoczone tworzywo, 3 – obudowa granulatora, 4 – frez nożowy, 5 – granulat

Następnie, otrzymany granulat wtryskiwano do standardowej dwugniazdowej formy wtryskowej z gniazdami w kształcie próbek do badań wytrzymałości na rozciąganie. Najpierw wtryskiwano polietylen GD 7255 bez zawartości mączki szklanej, a następnie polietylen z 10% zawartością mączki szklanej. Parametrem zmiennym był czas chłodzenia wyprasek w formie, pozostałe parametry nie zmieniały się. Wybrane parametry wtryskiwania polietylenu i kompozytu na jego bazie przedstawiono w tabeli 9.

Badania twardości metodą Shore’a wykonano zgodnie z normą ISO 868:2003. Badania udarności metodą Charpy przeprowadzono zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie ISO 179 – 1:2010. Próbkę statycznego rozciągania oraz oznaczenie wybranych właściwości wytrzymałościowych zrobiono zgodnie z normą ISO 527 – 1. Prędkość z jaką wykonano badania statycznego rozciągania wynosiła 100 mm/min. Próbki do badań wytrzymałościowych otrzymano bezpośrednio w procesie wtryskiwania, natomiast do badań udarności poprzez pozyskanie ich z próbek wytrzymałościowych. Badania twardości przeprowadzona wykorzystując próbki wytrzymałościowe.

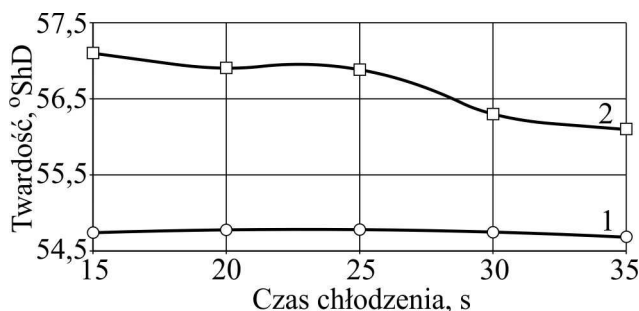
Po wykonaniu badań sporządzono wykresy zależności wybranych właściwości wyprasek wtryskowych od zmiennego parametru procesu wtryskiwania. Określono twardość, naprężenia przy zerwaniu, wytrzymałość przy rozciąganiu, odkształcenia przy zerwaniu oraz odkształcenia przy maksymalnej sile od czasu chłodzenia wypraski w formie. Otrzymane zależności zinterpretowano graficznie. W badaniach udarności stwierdzono brak złamania próbek.

Tabela 9. Parametry wtryskiwania

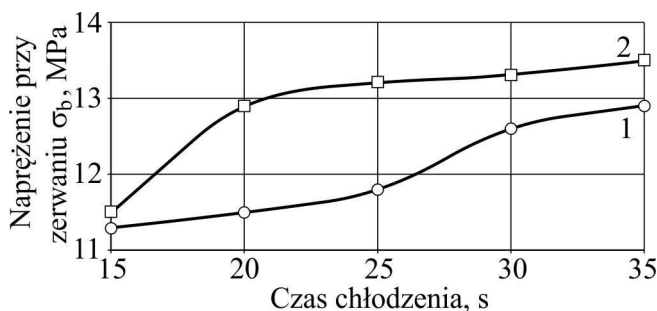
Parametr	Jednostka	Wartość
Parametry stałe		
Objętościowe natężenie wypływu kompozycji polimerowej do gniazda formy wtryskowej	cm ³ /s	5
Prędkość wtryskiwania	m/min	25
Objętość dozowania	cm ³	37
Ciśnienie wtryskiwania	bar	1050
Parametry zmienne		
Czas chłodzenia	s	15
		20
		25
		30
		35
Czas całego procesu	s	34,4
		39,4
		44,4
		49,4
		54,4

Zależność twardości od czasu chłodzenia wyprasek wykonanych z polietyle-
nu GD 7255 nienapełnionego oraz napełnionego mączką szklaną w ilości 10%
cz. w. przedstawiono na rysunku 10. Twardość wyprasek z napełniaczem w po-
staci mączki szklanej jest większa od wyprasek bez tego napełniacza. Wartości
twardości wyprasek bez napełniacza uzyskanych przy czasie chłodzenia w for-
mie w zakresie od 15 do 35 s różnią się o około 0,2%. Można więc uznać, że
w badanym zakresie wzrost czasu chłodzenia nie wpływa na zmianę twardości
badanych próbek. Wartości twardości wyprasek z 10% zawartością proszku
szklanego, uzyskane przy tych samych czasach chłodzenia różnią się o około
2%. Można więc również stwierdzić, że w badanym zakresie wzrost czasu chłó-
dzenia nie wpływa na zmianę twardości badanych próbek, choć rozrzut wyni-
ków jest większy niż w przypadku wyprasek z samego polietylenu.

Kolejną wyznaczoną zależnością jest zależność naprężenia przy zerwaniu od
czasu chłodzenia otrzymanych wyprasek, którą przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 10. Zależność twardości od czasu chłodzenia wyprasek wykonanych z polietylenu GD 7255: 1 – nienapełnionego, 2 – napełnionego mączką szklaną (10%)

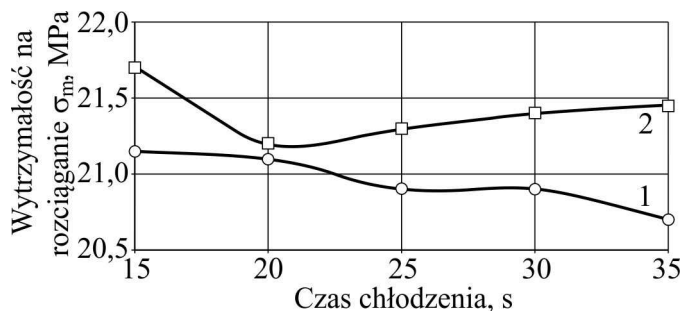


Rys. 11. Naprężenie przy zerwaniu od czasu chłodzenia otrzymanych wyprasek: 1 – nienapełnionych, 2 – napełnionych mączką szklaną

Czas chłodzenia wpływa na zmianę wartości naprężenia przy zerwaniu. Ogólnie, wraz ze wzrostem czasu chłodzenia wzrasta wartość naprężenia przy zerwaniu. Dla czasu chłodzenia wyprasek nienapełnionych od 15 do 25 s naprężenia wzrastają o około 0,5 MPa. Natomiast, przy dalszym wzroście czasu chłodzenia do 30 s naprężenia przy zerwaniu wzrastają o prawie 0,8 MPa, a dla 35 s wzrastają o dalsze 0,3 MPa. Całkowity wzrost naprężenia przy zerwaniu wynosi niecałe 15%. Natomiast, dla wyprasek napełnionych 10% cz. w. mączki szklanej, wzrost czasu chłodzenia od 15 do 25 s powoduje bardziej gwałtowny wzrost naprężenia przy zerwaniu, wynosi on około 1,4 MPa, czyli 12% ich wartości oznaczonej przy czasie chłodzenia 15 s. W zakresie czasu chłodzenia od 25 do 35 s naprężenia przy zerwaniu wzrastają już mniej intensywnie, tylko o około 0,3 MPa, co stanowi 0,2% ich wartości oznaczonej przy czasie chłodzenia 25 s.

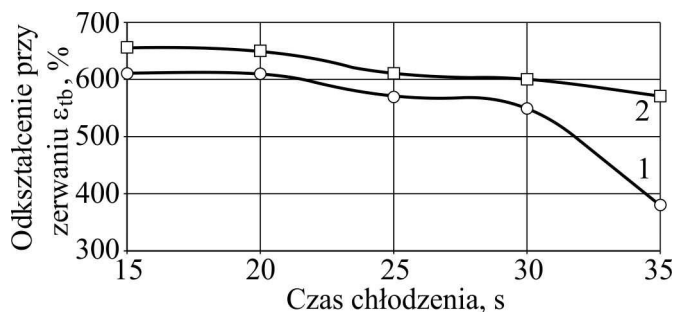
Na rysunku 12 przedstawiono zależność wytrzymałości na rozciąganie od czasu chłodzenia wyprasek otrzymanych z polietylenu GD 7255 bez udziału napełniacza w postaci mączki szklanej i z 10% udziałem wagowym mączki szklanej. Wartości wytrzymałości na rozciąganie wyprasek, które uzyskano dla

czasów chłodzenia w zakresie od 15 do 35 s różnią się pomiędzy sobą o około 2%, zarówno dla wyprasek polietylenowych bez napełniacza, jak i z napełniaczem w postaci mączki szklanej w ilości 10% cz. w. W badanym zakresie wzrost czasu chłodzenia nie wpływa więc na zmianę wytrzymałości na rozciąganie.



Rys. 12. Zależność wytrzymałości na rozciąganie od czasu chłodzenia wyprasek wykonanych z polietylenu GD 7255:
1 – nienapełnionej, 2 – napełnionej mączką szklaną (10%)

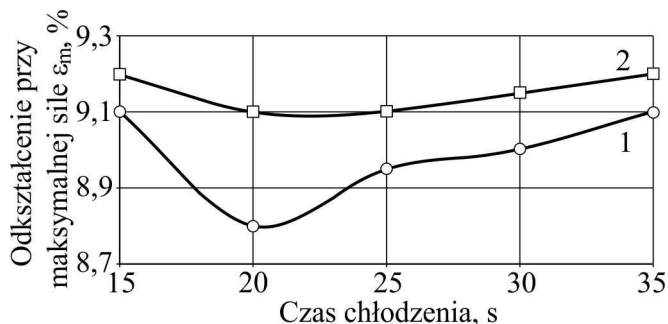
Zależność odkształcenia przy zerwaniu od czasu chłodzenia otrzymanych wyprasek wtryskowych przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 13. Odkształcenie przy zerwaniu od czasu chłodzenia wyprasek wykonanych z polietylenu GD 7255:
1 – nienapełnionej, 2 – napełnionej mączką szklaną (10%)

Wzrost czasu chłodzenia wyprasek w formie wpływa na zmianę wartości odkształcenia przy zerwaniu, powodując ich spadek, przy czym odkształcenia przy zerwaniu oznaczone dla wyprasek napełnionych mączką szklaną w badanej ilości są większe od odpowiadających im odkształceń wyznaczonych dla wyprasek nienapełnionych. Dla wyprasek napełnionych całkowity spadek odkształcenia przy zerwaniu wynosi 12%, co odpowiada wartości 80 MPa, natomiast całkowity spadek tego odkształcenia dla wyprasek nienapełnionych jest większy i wynosi 230 MPa, co stanowi prawie 38% wartości początkowej.

Natomiast na rysunku 14 przedstawiono zależność odkształcenia przy maksymalnej sile od czasu chłodzenia wyprasek wykonanych z polietylenu GD 7255 bez napelniacza i z badaną ilością napelniacza.



Rys. 14. Zależność odkształcenia przy maksymalnej sile od czasu chłodzenia dla wyprasek wykonanych z polietylenu GD 7255:
1 – nienapełnionego, 2 – napełnionego mączką szklaną

Wartości odkształcenia przy maksymalnej sile, które uzyskano dla czasów chłodzenia w zakresie od 15 do 35 s różni się o około 1% w przypadku wyprasek nienapełnionych i o około 2% w przypadku wyprasek napełnionych mączką szklaną. Można więc stwierdzić, że w obu przypadkach wzrost czasu chłodzenia od 15 do 35 s, badanych próbek nie wpływa na zmianę odkształcenia przy maksymalnej sile.

Wnioski

Na podstawie badań można stwierdzić, że czas chłodzenia wpływa na naprężenia przy zerwaniu oraz na odkształcenia przy zerwaniu. Wraz ze wzrostem czasu chłodzenia wzrastały naprężenia przy zerwaniu. W przypadku odkształcenia przy zerwaniu wzrost czasu chłodzenia powodował ich spadek. Czas chłodzenia w badanym zakresie (od 15 do 35 s) nie wpływał na twardość, wytrzymałość na rozciąganie oraz na odkształcenia przy maksymalnej sile, zarówno dla wyprasek nienapełnionych, jak i napełnionych mączką szklaną w ilości 10% części wagowych.

Wypraski, które w swoim składzie nie zawierają mączki szklanej mają większą jednorodność od wyprasek, które były napełnione mączką szklaną. Świadczy o tym mniejszy rozrzut wyników badań twardości. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że mączka szklana nie wykazuje właściwości wzmacniających.

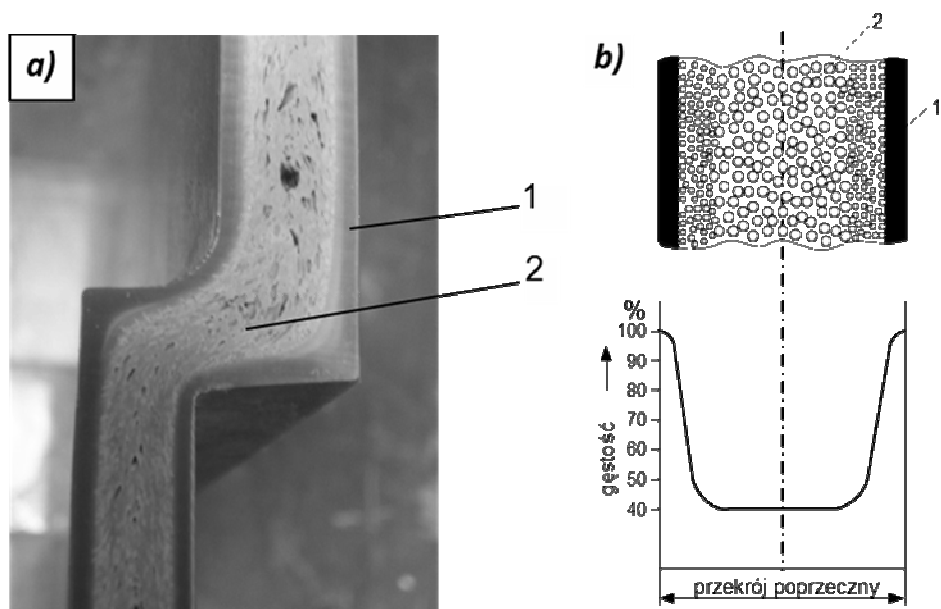
Literatura

- [1] Sikora R., *Tworzywa wielkocząsteczkowe. Rodzaje właściwości i struktura*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej. Lublin 1991.
- [2] Kaczmar J. W., Bielański A., *Kompozyty na osnowie polipropylenu wzmacniane mikrokulkami szklanymi*. Teka kom. Bud. Ekspł. Masz. Elektrotech. Bud. – OL PAN 2008, s. 63–68.
- [3] Liang J. Z., Li R. K. Y., Tjong S. C., *Effect of glass bead size and content on the viscoelasticity of filled polypropylene composites*. *Polymer Testing* 2000, 19, s. 213–220.
- [4] Ku H., Wong P., *Contrast on Tensile and Flexural Properties of glass powder reinforced epoxy composites: Pilot Study*. *Journal of Applied Polymer Science* 2012, 123, 1, s. 152–161.
- [5] Kuciel S., Liber A., *Ocena skuteczności wzmacniania polietylenów mączką drzewną*. *Polimery* 2005, 50, 6, s. 436–440.
- [6] Valášek P., Müller M., *Polymeric composite based on glass powder – usage possibilities in agrocomplex*. *Scientia Agriculturae Bohemica*, 2013, 44, 2, s. 107–112.
- [7] Ku H., Trada M., Cecil T., Wong P., *Tensile Tests of Phenol Formaldehyde Glass-Powder-Reinforced Composites: Pilot Study*. „*Journal of Applied Polymer Science*” 2010, 116, 1, s. 10–17.
- [8] Aruniit A., Kers J., Tall K., Majak J., Krumme A., *Influence of hollow glass microspheres on the mechanical and physical properties and cost of particle reinforced polymer composites*. „*Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*” 2012, 61, 3, s. 160–165.
- [9] Liang J. Z., Li R. K. Y., Tjong S. C., *Tensile properties and morphology of PP/EPDM/glass bead ternary composites*. „*Polymer Composites*” 1999, 20, 3, s. 413–422.
- [10] Liang J. Z., Wu C. B., *Effects of the Glass Bead Content and the Surface Treatment on the Mechanical Properties of Polypropylene Composites*. „*Journal of Applied Polymer Science*” 2012, 123, 5, s. 3054–3063.
- [11] Balkan O., Demirer H., *Mechanical properties of glass bead- and wollastonite-filled isotactic-polypropylene composites modified with thermoplastic elastomers*. „*Polymer Composites*” 2010, 31, 7, s. 1285–1308.

5. Wpływ warunków przetwórstwa na właściwości wyprasek porowatych

Wprowadzenie

Strukturę porowatą wyprasek uzyskuje się poprzez dodanie chemicznego środka porującego (poroforu chemicznego) lub wprowadzenie gazu obojętnego (poroforu fizycznego) do tworzywa uplastycznionego w układzie uplastyczniającym wtryskarki bądź bezpośrednio do gniazda formującego [1]. Przykładowy wygląd struktury wypraski porowatej oraz rozkład gęstości porów w przekroju poprzecznym przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny wypraski o strukturze porowatej: a) wygląd przykładowej wypraski porowatej, b) rozkład gęstości wypraski w przekroju poprzecznym: 1 – lity naskórek, 2 – porowaty rdzeń [1÷6]

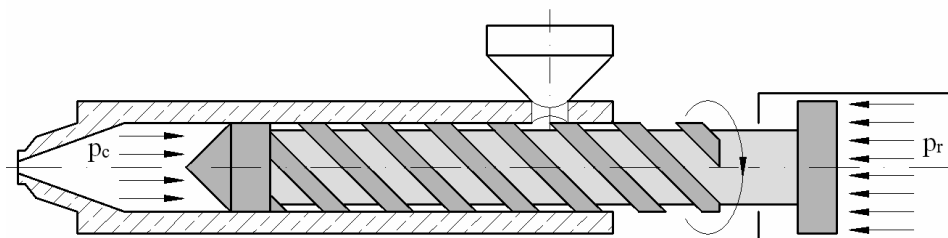
Powstawanie struktury porowatej w wypraskach wtryskowych jest procesem złożonym, zależnym od rodzaju polimeru, poroforu oraz od warunków wtryskiwania oraz budowy kanałów przepływowych i gniazd formy wtryskowej. Rozmiary oraz rozłożenie porów w tworzywie mają wpływ na właściwości wyprasek [1÷11]. W niniejszej pracy dokonano oceny wpływu warunków uplastyczniania i wtryskiwania na wybrane właściwości i strukturę wyprasek z PE-HD z poroforem chemicznym.

W pracy [12] zbadano wpływ procentowej zawartości poroforu (dodawanego w ilościach 0,4÷1,6% masy tworzywa), temperatury formy (40÷85°C), temperatury wtryskiwania (160÷190°C), ciśnienia wtryskiwania (70÷142 MPa) i ciśnienia uplastyczniania (0÷45 MPa) na strukturę wyprasek wtryskowych z PE-LD z poroforem egzotermicznym (Celogen 754-A). Celem badań było ustalenie optymalnych warunków wtryskiwania do wytwarzania wyprasek o cienkim litym naskórku i małych, gęsto i równomiernie rozłożonych porach. Wykazano, że procentowa zawartość poroforu i ciśnienie wtryskiwania mają największy wpływ na jakość struktury porowatej. Natomiast temperatura formy oddziałuje znacząco na grubość litego naskórka. Zależność pomiędzy temperaturą formy a wielkością i gęstością porów była nieistotna. Ciśnienie uplastyczniania decydowało o grubości naskórka, wielkości porów i gęstości uzyskanej struktury porowatej. Temperatura wtryskiwania miała niewielki wpływ na gęstość wyprasek. Autorzy pracy zasugerowali następujące optymalne parametry wytwarzania wyprasek z PE-LD z poroforem: procentowa zawartość poroforu 1,2%, temperatura formy 85°C, temperatura wtryskiwania 180°C, ciśnienie wtryskiwania 142 MPa, ciśnienie uplastyczniania 0 MPa.

W pracy [13] badano wpływ prędkości wtryskiwania, temperatury wtryskiwania, temperatury formy i ciśnienia uplastyczniania na masę, wytrzymałość na rozciąganie i wytrzymałość na zginanie wyprasek z polipropylenu z poroforem. Badano również wypraski uzyskiwane metodą wtryskiwania dwuskładnikowego, z wtryskiwaniem oddzielnie tworzywa stanowiącego lity naskórek i porowaty rdzeń. Zbadano ponadto wpływ grubości ścianki wypraski i zawartości poroforu na uzyskiwaną strukturę porowatą. Wykazano, że dodanie poroforu do tworzywa przetwarzanego przyczynia się do zmniejszenia masy wyprasek cienkościennych o grubości ścianki 0,5 mm o 4÷9% w stosunku do wyprasek litych, oraz o około 43÷50% w przypadku wyprasek grubościennych, o grubości ścianki 15 mm. Stwierdzono, że grubość ścianki wypraski jest dominującym czynnikiem wpływającym na jakość otrzymywanej struktury porowatej. Masa wyprasek porowatych oraz ich wytrzymałość na rozciąganie i zginanie maleje wraz ze wzrostem temperatury wtryskiwania, temperatury formy i prędkości wtryskiwania, zwiększa się natomiast wraz ze wzrostem ciśnienia uplastyczniania. Dodanie poroforu do tworzywa przetwarzanego wpływa na zmniejszenie masy wyprasek oraz pogorszenie właściwości mechanicznych. Ze zwiększeniem zawartości poroforu z 0,8 do 1,6%, znacząco pogarszają się właściwości mechaniczne wyprasek. W procesie wtryskiwania dwuskładnikowego uzyskano wypraski o korzystniejszych właściwościach mechanicznych i lepszej jakości powierzchni niż w przypadku wtryskiwania porującego jednoskładnikowego.

Wpływ warunków uplastyczniania na właściwości wyprasek porowatych

W fazie uplastyczniania zhomogenizowane tworzywo przemieszczane jest w kierunku dyszy wtryskowej przy jednoczesnym ruchu wstecznym i obrotowym ślimaka. Ograniczenie prostoliniowego ruchu wstecznego ślimaka polepsza homogenizację i zwiększa upakowanie tworzywa na czole ślimaka. Ciśnienie uplastyczniania p_c (ang. backpressure) jest wytwarzane za pomocą siłownika hydraulicznego i zapobiega wycofaniu się ślimaka wtryskowego w fazie uplastyczniania (rys. 2) [14]. Ciśnienie uplastyczniania poprawia proces ujednordnienia tworzywa jednak może powodować przegrzewanie się tworzywa w wyniku tarcia. Ciśnienie uplastyczniania jest również nazywane w literaturze przeciwcisnieniem uplastyczniania, ciśnieniem spiętrzania oraz ciśnieniem zwrotnym [15,16].

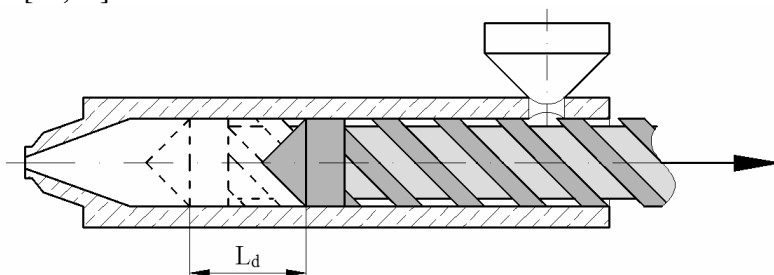


Rys. 2. Zasada wytworzenia ciśnienia uplastyczniania: p_r – ciśnienie nastawcze wywoływane w siłowniku hydraulicznym (wielkość nastawna), p_c – ciśnienie uplastyczniania tworzywa wywołane w przedniej części cylindra podczas pobierania tworzywa przez obracający się ślimak (wielkość rzeczywista). Jego wartość jest regulowana przez wytworzenie w siłowniku hydraulicznym ciśnienia (p_r). Ciśnienie uplastyczniania jest zatem ciśnieniem wypadkowym oporów toczenia ślimaka, wartości nastawczej w siłowniku hydraulicznym p_r , itp., jest ponadto zależne od lepkości tworzywa [11]

Duża wartość ciśnienia uplastyczniania przyczynia się do wzrostu stopnia wymieszania barwników tworzywie, lecz (niekorzystnie) zwiększa czas cyklu uplastyczniania tworzywa a tym samym czas całego procesu wtryskiwania, a ponadto przyczynia się do skrócenia długości włókien napelnaczy oraz zwiększenia naprężeń w układzie uplastyczniającym wtryskarki [16,17]. W przypadku wtryskiwania porującego, większa wartość ciśnienia uplastyczniania zapobiega porowaniu tworzywa w układzie uplastyczniającym wtryskarki (w prawidłowo prowadzonym procesie wtryskiwania porującego rozrost struktury porowatej powinien przebiegać na skutek spadku ciśnienia w kanałach formy wtryskowej) [6]. Podczas przetwórstwa tworzywa z poroforem ciśnienie uplastyczniania powinno zostać zatem zwiększone [19].

Jakość wyprasek wtryskowych zależy także od zastosowania dekompresji (ang. suck-back) polegającej na niewielkim wycofaniu ślimaka (bez obrotów) powodującym spadek ciśnienia tworzywa na czole ślimaka lub tłoka wtrysko-

wego (rys. 3). Dekompresja może być stosowana przed lub po uplastycznianiu w zależności od konstrukcji formy i dyszy. W przypadku form zimnokanałowych i otwartych dysz stosuje się dekompresję po uplastycznianiu, natomiast w przypadku gorących kanałów stosuje się dekompresję przed uplastycznianiem oraz po uplastycznianiu. Dekompresja po dozowaniu zapobiega wyciekaniu tworzywa z otwartej dyszy podczas odsuwania układu uplastyczniającego od formy lub z gorących kanałów podczas otwierania formy [16,20]. Wielkość dekompresji jest zależna od stosowanego tworzywa i stosowanych dodatków np. poroforów. Zbyt duża wartość dekompresji może skutkować wprowadzeniem powietrza z otoczenia do uplastycznionego tworzywa w układzie uplastyczniającym wtryskarki, a tym samym może to spowodować wady w wypraskach wtryskowych [17,21].



Rys. 3. Wycofanie ślimaka w fazie dekompresji po dozowaniu L_d [11]

Badania eksperymentalne

Celem pierwszej części badań była ocena wpływu warunków uplastyczniania: ciśnienia uplastyczniania i dekompresji po dozowaniu na masę, grubość, właściwości mechaniczne, stan powierzchni i strukturę wyprasek wtryskowych z polietylenu dużej gęstości z dodatkiem poroforu chemicznego. W celu uzyskania poprawnie wykonanych wyprasek, bez zapadnięć i o dobrej jakości powierzchni, konieczna była również zmiana pozostałych parametrów wtryskiwania: ciśnienia docisku, czasu docisku i prędkości wtryskiwania.

W badaniach stosowano polietylen PE-HD o nazwie handlowej Hostalen GC 7260 firmy Basell Polyolefins, o temperaturze mięknięcia wg Vicata równej 154°C i masowym wskaźniku szybkości płynięcia (MFR) wynoszącym 8 g/10min (wyznaczonym w temperaturze 190°C i przy obciążeniu 2,16 kg). Strukturę porowatą wyprasek uzyskano przez dodanie do polietylenu 3% środka porującego Hostatron P 1941 w postaci granulatu (50% substancji czynnej, 50% nośnika PE-LD), o endotermicznym przebiegu rozkładu. Temperatura początku rozkładu tego środka porującego wynosi około 150°C . Polietylen został zmieszany ze środkiem porującym przed procesem wtryskiwania.

Próbki w postaci wiosełek do statycznej próby rozciągania o grubości 4 mm, zgodne z normą PN-EN ISO 527-2:1998, wytwarzano przy użyciu wtryskarki firmy Krauss-Maffei KM65-160 C4. Próbki wykonano przy zastosowaniu formy dwugniazdowej. Stałe warunki wtryskiwania były następujące:

- temperatura wtryskiwania 220°C
- czas chłodzenia 36 s
- temperatura formy 20°C

Pozostałe zmienne parametry procesu zostały przedstawione w tabeli 1.

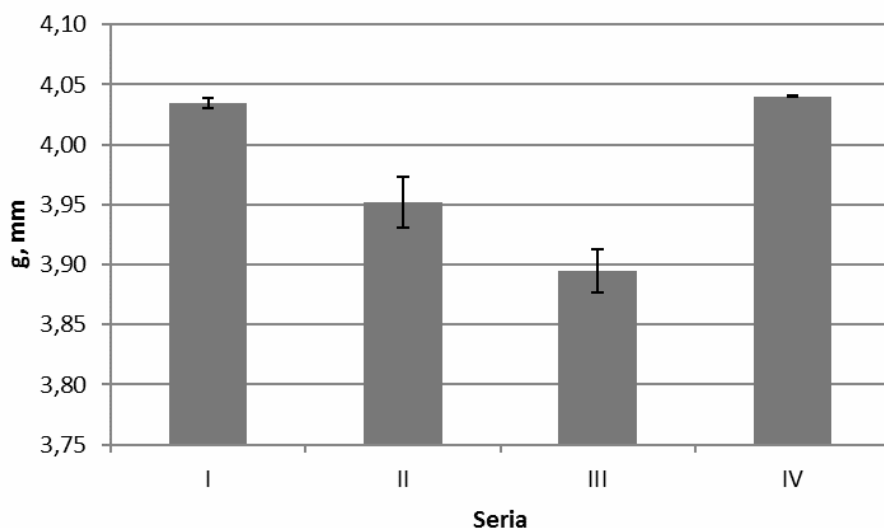
Tab. 1. Zmienne parametry procesu wtryskiwania

Parametr zmienny	Numer cyklu			
	I	II	III	IV
ciśnienie docisku, MPa	20	60	60	20
czas docisku, s	1	5	5	1
prędkość wtryskiwania, mm/s	92	113	113	92
czas wtrysku, s	0,85	1	1	0,85
Ciśnienie uplastyczniania, MPa	36	36	10	10
Dekompresja po dozowaniu, cm ³	0	42	42	0

Pomiar grubości wyprasek

Grubość została zmierzona w środkowej części wyprasek za pomocą mikrometru cyfrowego, z dokładnością $\pm 0,01$ mm. Wyniki pomiaru grubości wyprasek przedstawiono na rysunku 4. Wysokość gniazda formującego wynosiła 4,1 mm.

Grubość wyprasek z PE-HD uzyskiwanych przy braku dekompresji po dozowaniu (cykle I i IV) jest największa i nie zależy od wartości ciśnienia uplastyczniania. Natomiast wypraski wytworzone przy zastosowaniu dekompresji (42 cm³) po dozowaniu (cykle II i III) charakteryzuje się grubością mniejszą o około 4 % w porównaniu do wyprasek z innych cykli. Świadczyć to może o występowaniu niekorzystnego zjawiska porowania w układzie uplastyczniającym podczas dużej dekompresji po dozowaniu oraz o częściowej degradacji poroforu na skutek długiego przebywania tworzywa z poroforem po dozowaniu w układzie uplastyczniającym, jak również o ograniczeniu porowania w gnieździe formy na skutek zwiększonego ciśnienia i czasu docisku.



Rys. 4. Grubość wyprasek z PE-HD uzyskanych w różnych warunkach wtryskiwania

Pomiar masy wyprasek

Określono masę wyprasek z obydwu gniazd formy, a uzyskane wyniki uśredniono stosując średnią arytmetyczną. Średnią masę wyprasek z poszczególnych cykli badań przedstawiono na rysunku 5. Masę wyprasek wyznaczano z dokładnością $\pm 0,1$ mg przy użyciu wagi laboratoryjnej typu CP225 firmy Sartorius, z zamkniętą przestrzenią pomiarową.

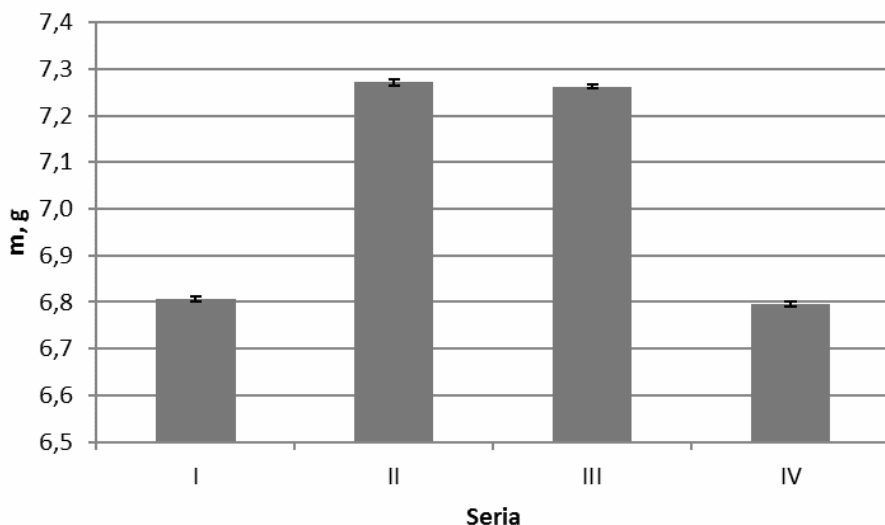
Z rysunku 5 można wywnioskować, że w seriach bez dekompresji po dozowaniu i zmniejszonym ciśnieniu i czasie docisku (seria I i IV) wypraski wykazują zmniejszoną masę w porównaniu do serii II oraz III. Może to świadczyć, iż wypraski te (seria I i IV) charakteryzują się większym udziałem struktury porowatej w masie tworzywa niż wypraski z serii II i III. Jednocześnie zauważyć można iż ciśnienie uplastyczniania ma znikomy wpływ na masę tworzywa.

Właściwości wytrzymałościowe

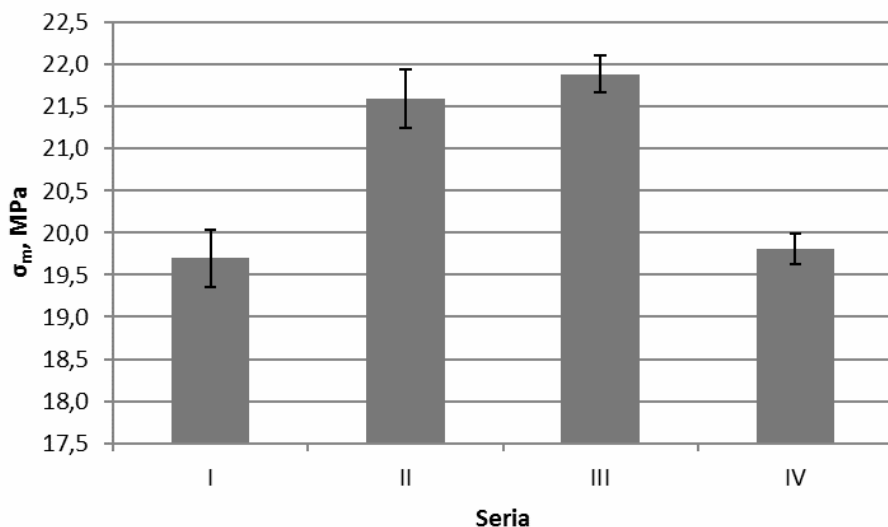
W statycznej próbie jednoosiowego rozciągania określono wytrzymałość na rozciąganie (σ_m) i wydłużenie przy sile maksymalnej (ϵ_m). Badania przeprowadzono przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Inspekt Desk 20 firmy Hegewald & Peschke. Prędkość rozciągania wynosiła 50 mm/min. Wyniki pomiarów zostały przedstawione na rysunkach 6 i 7.

Z rysunku 6 widać, iż wypraski wykonane przy parametrach z serii II i III wykazują większą o około 2 MPa wytrzymałość na rozciąganie w porównaniu z pozostałymi wypraskami (seria I oraz IV). Może to być spowodowane mniejszym udziałem struktury porowatej na skutek występowania niekorzystnego

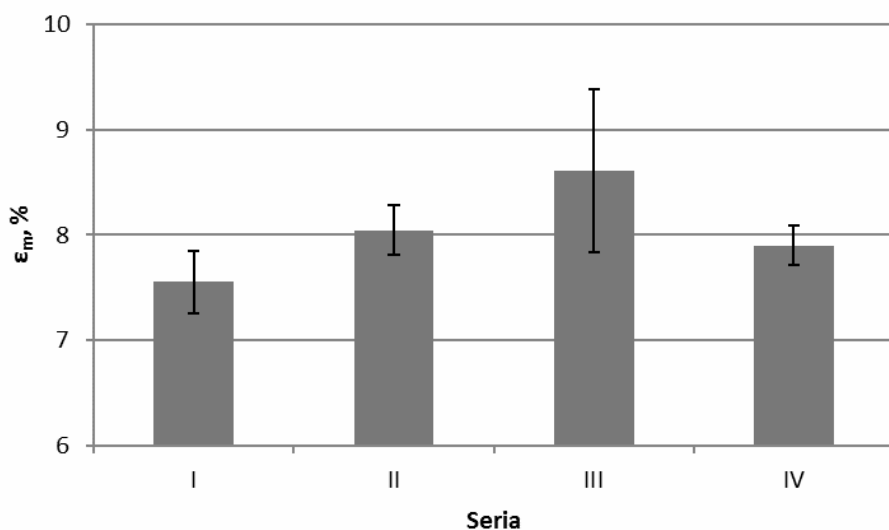
zjawiska porowania w układzie uplastyczniającym wtryskarki, w wyniku zwiększonej dekompresji po dozowaniu. Większe wartości wytrzymałości na rozciąganie tych wyprasek są związane również ze zwiększonym ciśnieniem i czasem docisku. Można jednocześnie zauważyć iż w przypadku zwiększonej wartości ciśnienia uplastyczniania wypraski charakteryzują się mniejszą wytrzymałością na rozciąganie.



Rys. 5. Masa wyprasek z PE-HD uzyskanych w różnych warunkach wtryskiwania



Rys. 6. Wytrzymałość na rozciąganie wyprasek z PE-HD uzyskanych w różnych warunkach wtryskiwania



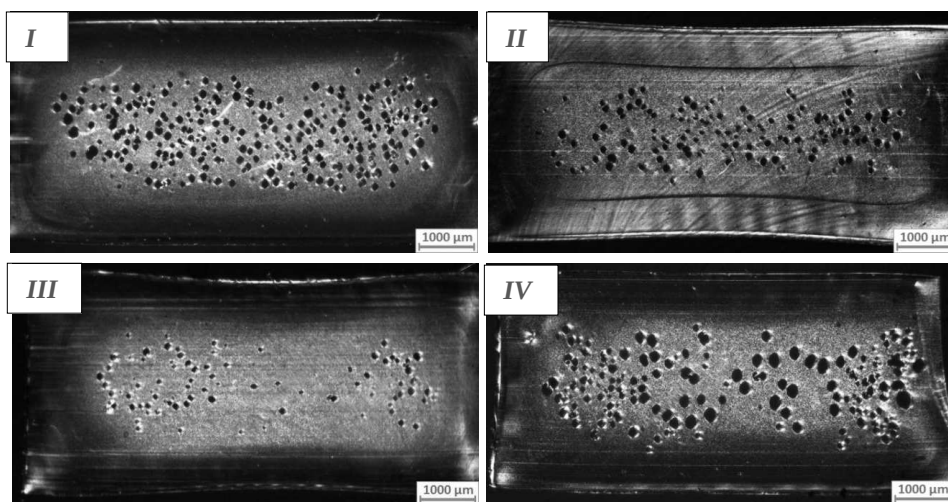
Rys. 7. Wydłużenie przy sile maksymalnej wyprasek z PE-HD uzyskanych w różnych warunkach wtryskiwania

Z rysunku 7 widać, że zmiana parametrów takich jak dekompresja po dozowaniu i ciśnienie uplastyczniania ma niewielki wpływ na wydłużenie wyprasek przy sile maksymalnej, której średnie wartości zmieniają się w zakresie od 7,5 do 8,5%.

Badania strukturalne

Badania strukturalne przeprowadzono w świetle przechodzącym spolaryzowanym przy użyciu mikroskopu optycznego Nikon Eclipse E200. Preparaty stosowane do obserwacji miały postać ścinków o grubości 25 μm wycinanych z środkowej części próbek do statycznej próby rozciągania, prostopadle do kierunku przepływu tworzywa. Wyniki obserwacji mikroskopowych przedstawiono na rysunku 8.

W wypraskach z PE-HD z dodatkiem 3% poroforu uzyskiwanych bez dekompresji po dozowaniu i niskich wartościach ciśnienia docisku i czasu docisku (cykle I i IV), pory są bardziej liczne, mają większe rozmiary i nieregularny kształt, co wskazuje na bardziej intensywne porowanie i możliwe łączenie się porów ze sobą, szczególnie w przypadku zastosowania niskiego ciśnienia uplastyczniania (cykl IV). W przypadku wyprasek uzyskiwanych w cyklu IV pory występują bliżej naskórka niż w wypraskach wytwarzanych w pozostałych cyklach. Świadczyć to może o intensywnym porowaniu tworzywa w warunkach niskiego ciśnienia uplastyczniania tworzywa, oraz intensywnym rozrostem porów w gnieździe formy.



Rys. 8. Morfologia wyprasek z PE-HD uzyskiwanych przy różnych parametrach wtryskiwania

W wypraskach uzyskiwanych przy zastosowaniu dekompresji po dozowaniu i wyższych wartości ciśnienia i czasu docisku (cykle II i III) pory są mniejsze i nieliczne o bardziej regularnym kulistym kształcie niż w przypadku wyprasek z cykli I i IV. Może to wskazywać na występowanie niekorzystnego zjawiska porowania tworzywa już w układzie uplastyczniającym w wyniku dekompresji po dozowaniu oraz o mniej intensywnym porowaniu w formie na skutek zwiększonego ciśnienia docisku i czasu docisku. Jednocześnie wypraski te charakteryzują się grubym litym naskórkiem.

Przy niższej wartości ciśnienia uplastyczniania (cykl III) uzyskuje się nieliczne, małe pory o regularnym kształcie, rozłożone nierównomiernie w rdzeniu wypraski. Taki rozkład porów w wypraskach świadczyć może o występowaniu zjawiska porowania już w cylindrze układu uplastyczniającego czemu sprzyja niska wartość ciśnienia uplastyczniania.

Wnioski

Wykonanie poprawnych wyprasek przy zastosowaniu dekompresji po dozowaniu wymaga zwiększonego ciśnienia i czasu docisku. Dekompresja może spowodować rozkład poroforu i rozpoczęcie procesu porowania już w układzie uplastyczniającym, co wpływa niekorzystnie na strukturę i właściwości wyprasek porowatych.

Udział struktury porowatej w wypraskach jest odwrotnie proporcjonalny do wartości dekompresji po dozowaniu oraz ciśnienia i czasu docisku.

Ciśnienie uplastyczniania ma niewielki wpływ na grubość, masę, wytrzymałość na rozciąganie i wydłużenie przy rozciąganiu, wpływa jednak na strukturę wyprasek. Pory w wypraskach z cykli I i II, w których zastosowano wysokie

ciśnienie uplastyczniania, charakteryzują się równomiernie rozłożonymi porami w rdzeniu. W przypadku niskiego ciśnienia uplastyczniania (cykle III i IV) pory są mniejsze, mniej liczne i rozłożone nierównomiernie w przekroju poprzecznym wypraski.

Wpływ prędkości wtryskiwania, temperatury formy, temperatury wtryskiwania oraz zawartości poroforu na właściwości wyprasek

Zakres badań

W dalszej części badań podjęto się próby określenia wpływu wybranych warunków wtryskiwania (prędkości wtryskiwania, temperatury formy i temperatury wtryskiwania) na właściwości mechaniczne i stan powierzchni wyprasek wtryskowych z niewielką zawartością poroforu chemicznego. Badania prowadzono według planu badań opracowanego za pomocą oprogramowania Statistica 8.0 firmy StatSoft [22,23].

W badaniach stosowano również polietylen dużej gęstości o nazwie handlowej PE-HD Hostalen GC 7260 firmy Basell Polyolefins. Strukturę porowatą wyprasek uzyskano przez dodanie do granulatu środka porującego o endotermicznym przebiegu rozkładu Hostatron P 1941 firmy Clariant, w postaci granulatu.

Próbki wykonywano w trzech cyklach: A, B i C. W cyklu A wytwarzano próbki bez poroforu, zgodnie z 16 punktami planu badań, w cyklu B z 2% zawartością poroforu (0,8% substancji czynnej) i w cyklu C z 4% zawartością poroforu (1,6% substancji czynnej). Polimer w postaci granulatu został zmieszany ze środkiem porującym przed procesem uplastyczniania.

Podobnie jak w poprzednim rozdziale pracy wykonano plan badań za pomocą oprogramowania Statistica 8.0. Wykorzystane w planie progowe wartości zmiennych niezależnych (warunki wtryskiwania) przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości zmiennych niezależnych wykorzystane w planie badań

Wielkość	Symbol	Jednostka	Wartości		
			1	2	3
Prędkość wtryskiwania	v_w	mm/s	20	70	120
Temperatura formy	T_f	°C	20	45	70
Temperatura wtryskiwania	T_w	°C	200	230	260

Pozostałe warunki wtryskiwania badaniach były następujące:

- ciśnienie docisku 20 [MPa]
- czas wtrysku $0,4 \div 3,5$ [s] (zależnie od prędkości wtryskiwania)
- czas docisku 31 [s] dla cyklu A, 24 [s] dla cyklu B, 16 [s] dla cyklu C
- czas chłodzenia 15 [s] dla cyklu A, 10 [s] dla cyklu B, 5 [s] dla cyklu C

Czas docisku i czas chłodzenia skracano wraz ze wzrostem zawartości poroforu.

Za pomocą modułu planowania doświadczeń DOE programu Statistica wykonano plan badań o układzie centralnym, kompozycyjnym, zawierający 16 układów (tabela 3). Wartości skrajne planu stanowiły punkty gwiazdne.

Tabela 3. Plan badań

Punkt planu badań	Prędkość wtryskiwania	Temperatura formy	Temperatura wtryskiwania
	v_w , mm/s	T_f , °C	T_w , °C
1	20	20	200
2	20	20	260
3	20	70	200
4	20	70	260
5	120	20	200
6	120	20	260
7	120	70	200
8	120	70	260
9	20	45	230
10	120	45	230
11	70	20	230
12	70	70	230
13	70	45	200
14	70	45	260
15 (C)	70	45	230
16 (C)	70	45	230

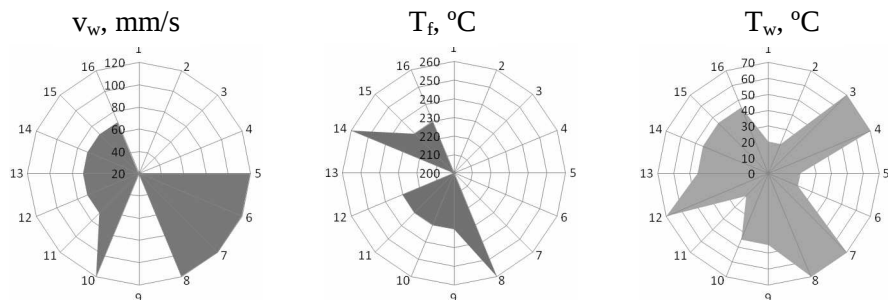
(C) – punkt centralny planu badań

Podobnie jak w przypadku poprzednich badań, w celu zobrazowania zmian poszczególnych zmiennych niezależnych w zależności od punktu planu, wykonano wykresy radarowe przedstawione na rys. 9.

Równanie modelowe, przedstawiające zależność pomiędzy badaną wielkością (zmienną zależną x) oraz wielkościami wyjściowymi (zmiennymi niezależnymi v_w , T_f i T_w) miało postać:

$$x = \beta_0 + \beta_1 v_w + \beta_2 T_f + \beta_3 T_w + \beta_{11} v_w^2 + \beta_{22} T_f^2 + \beta_{33} T_w^2 + \beta_{12} v_w T_f + \beta_{13} v_w T_w + \beta_{23} T_f T_w \quad (1)$$

Współczynniki równania modelowego i ich jednostki przedstawiono w tabeli 4.



Rys. 9. Zmiana poszczególnych zmiennych niezależnych w zależności od punktu planu

Tabela 4. Współczynniki równania modelowego i ich jednostki

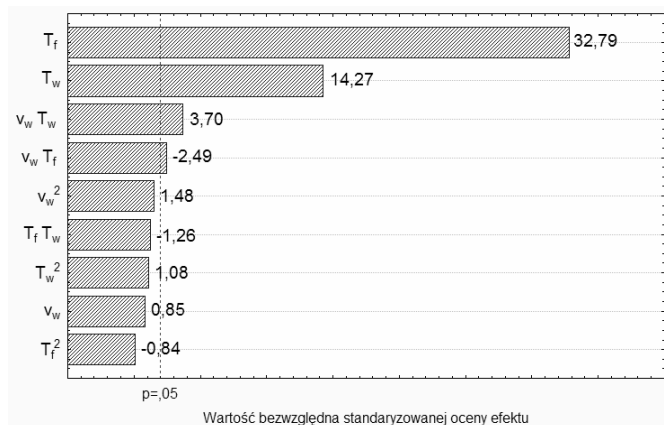
Człony równania		Współczynniki równania	Jednostka
		β_0	%
Linowe	v_w	β_1	$\frac{\% \cdot s}{mm}$
	T_f	β_2	$\frac{\%}{^{\circ}C}$
	T_w	β_3	$\frac{\%}{^{\circ}C}$
Kwadratowe	v_w^2	β_{11}	$\frac{\% \cdot s^2}{mm^2}$
	T_f^2	β_{22}	$\frac{\%}{(^{\circ}C)^2}$
	T_w^2	β_{33}	$\frac{\%}{(^{\circ}C)^2}$
Interakcje	$v_w T_f$	β_{12}	$\frac{\% \cdot s}{^{\circ}C \cdot mm}$
	$v_w T_w$	β_{13}	$\frac{\% \cdot s}{^{\circ}C \cdot mm}$
	$T_f T_w$	β_{23}	$\frac{\%}{(^{\circ}C)^2}$

Wyniki badań wybranych właściwości wyprasek

Masa wyprasek

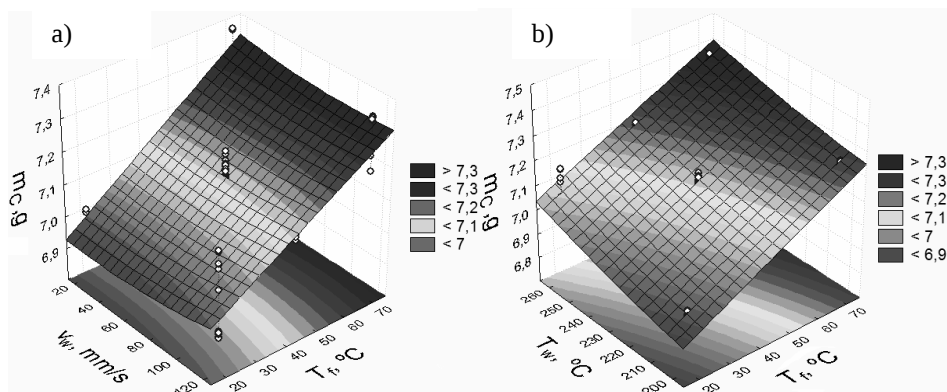
Próbki badawcze miały postać wiosełek do statycznej próby rozciągania, o grubości 4 mm. Określono masę wyprasek z obydwu gniazd formy, a uzyskane wyniki uśredniono stosując średnią arytmetyczną. Średnią masę wyprasek z poszczególnych cykli badań oznaczono odpowiednio mA, mB, mC. Zbadano wpływ wielkości wejściowych (prędkości wtryskiwania, temperatury formy i temperatury wtryskiwania) na wartość masy wyprasek uzyskiwanych w cyklach A, B i C.

W badaniach wykazano, że największy wpływ na masę wyprasek litych i porowatych ma temperatura formy. Na rysunku 10 przedstawiono przykładowy wykres Pareto dla wyprasek z PE-HD z 4% zawartością poroforu. Ukazuje on, że wraz ze wzrostem temperatury formy masa wyprasek zwiększa się.



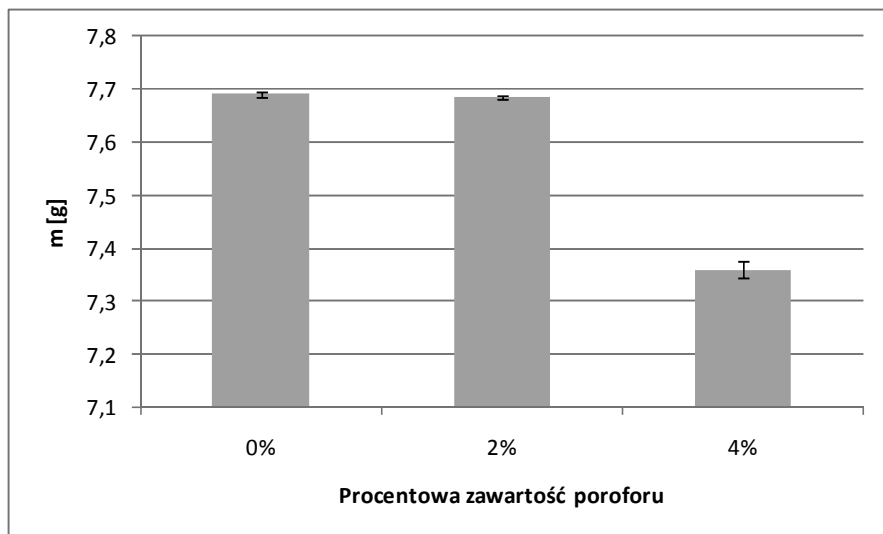
Rys. 10. Wyniki analizy Pareto w odniesieniu do masy wyprasek z PE-HD z 4% poroforu

Na rysunku 11 przedstawiono zmianę masy wyprasek w zależności od prędkości wtryskiwania, temperatury formy i temperatury wtryskiwania na przykładzie wyprasek uzyskanych w cyklu C. Widać, że zmniejszenie masy wyprasek mC wystąpiło szczególnie w zakresach niższej temperatury formy i temperatury wtryskiwania. Niższa temperatura formy sprzyja powstawaniu drobnych, licznych porów w wypraskach, co wykazano w poprzednim rozdziale.



Rys. 11. Zmiana masy m_C wyprasek z PE-HD z 4% zawartością poroforu w funkcjach: a) prędkości wtryskiwania v_w i temperatury formy T_f ($T_w = 230\text{ °C}$); b) temperatury formy T_f i temperatury wtryskiwania T_w ($v_w = 45\text{ mm/s}$)

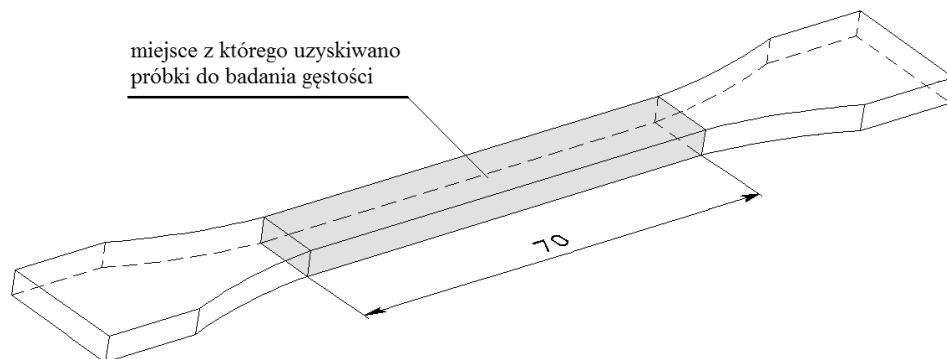
Na rysunku 12 przedstawiono przykładowo średnie wartości masy wyprasek z PE-HD uzyskanych w układach planu badań 15 i 16 dla cykli A, B i C. Wiadać, że w przypadku wyprasek litych i z tworzywa z 2% zawartością poroforu nie występują istotne zmiany masy pomiędzy wypraskami litymi a porowatymi. Zmniejszenie masy, wynoszące 4%, uzyskano przy największej zawartości poroforu, wynoszącej 4%.



Rys. 12. Średnia masa wyprasek z PE-HD uzyskanych w warunkach wtryskiwania określonych w układach planu badań 15 i 16 dla cykli A, B i C

Gęstość wyprasek

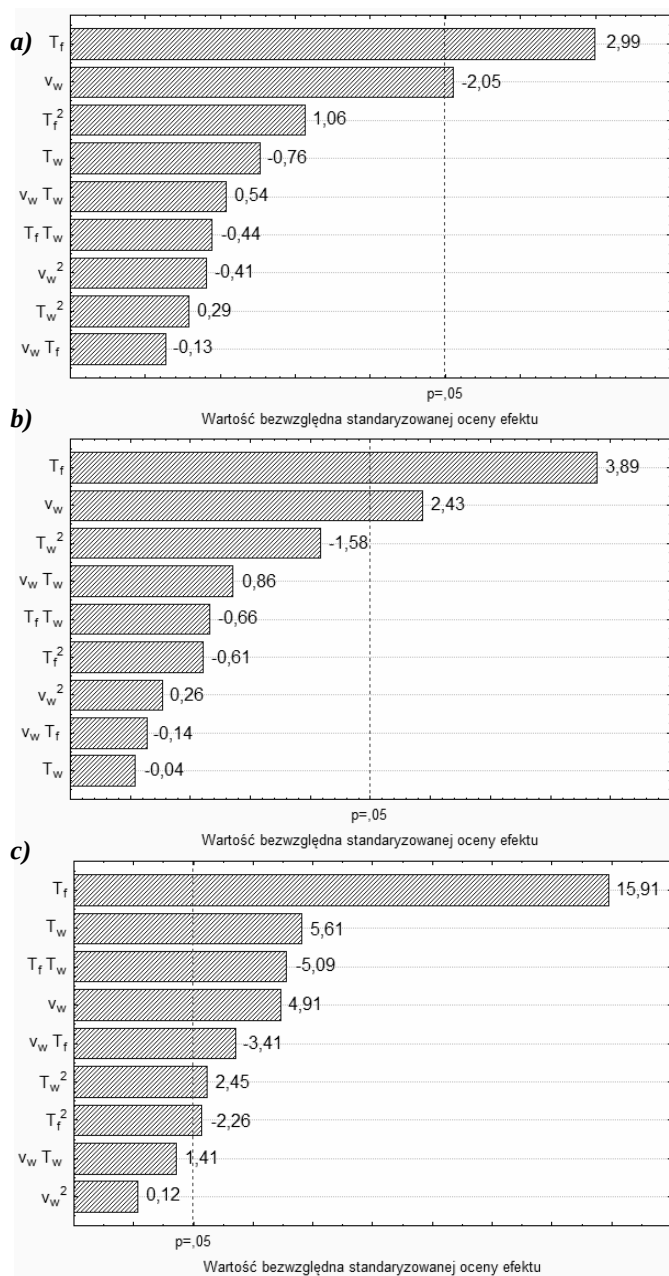
Próbki badawcze do pomiarów gęstości zostały wycięte ze środka próbek (wiosełek do statycznej próby rozciągania) użytych w pomiarach masy (rys. 13).



Rys. 13. Wypraska z zaznaczonym obszarem z którego wycięto próbki do badań gęstości

Wykresy Pareto (rys. 14) ukazują, że największy wpływ na gęstość wyprasek uzyskiwanych w cyklach A, B i C ma temperatura formy. Wraz ze wzrostem temperatury formy gęstość wyprasek zwiększa się.

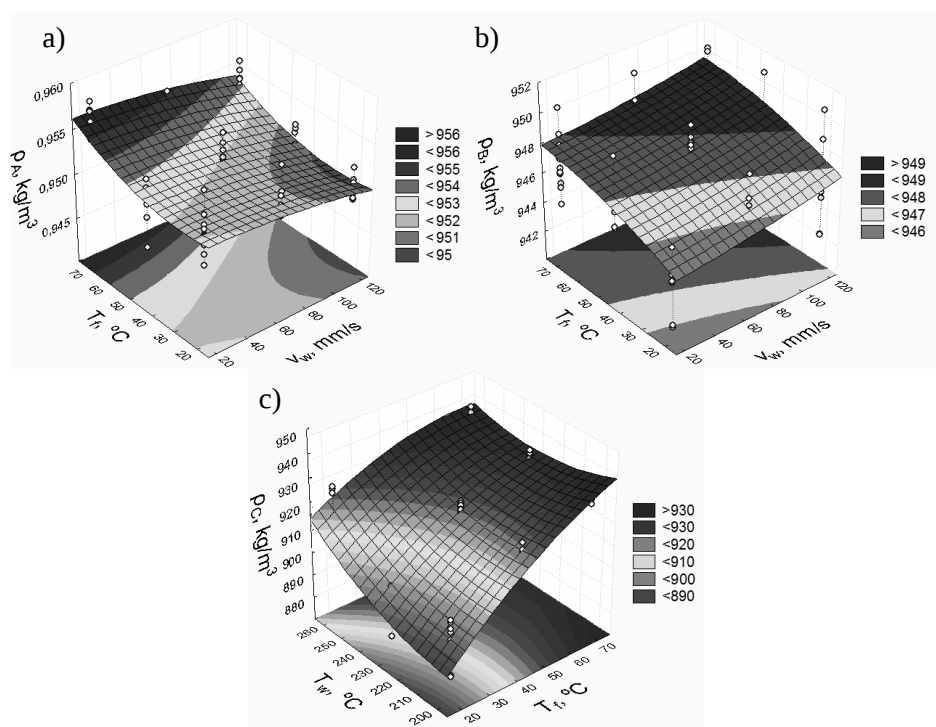
Na rys. 15 przedstawiono zależność gęstości wyprasek uzyskiwanych we wszystkich cyklach w funkcjach najbardziej istotnych dla danego tworzywa zmiennych parametrów wtryskiwania. Widać, że największą gęstość mają wypraski uzyskane przy wyższej temperaturze formy. W wypraskach z cyklu A różnice spowodowane odmiennymi warunkami wtryskiwania (prędkością wtryskiwania i temperaturą formy) były niewielkie i wynosiły ok. 0,3%. W przypadku PE-HD z 2% zawartością poroforu gęstość wszystkich wyprasek zmniejszyła się o ok. 1% w stosunku do wyprasek z tworzywa litego. Różnice gęstości spowodowane odmiennymi warunkami wtryskiwania (prędkością wtryskiwania i temperaturą formy) były niewielkie i wynosiły ok. 0,6%. Można więc ogólnie stwierdzić, że wpływ warunków wtryskiwania na gęstość wyprasek jest mało istotny.



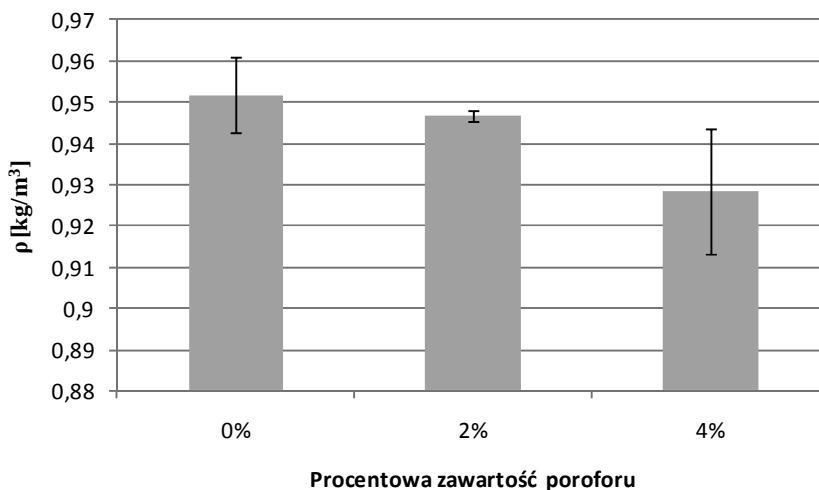
Rys. 14. Wyniki analizy Pareto w odniesieniu do gęstości wyprasek: a) cykl A: PE-HD bez poroforu, b) cykl B: PE-HD + 2% poroforu, c) cykl C: PE-HD + 4% poroforu

Z rysunku 16, przedstawiającego zmiany gęstości wyprasek w zależności od zawartości poroforu wynika, że w przypadku wyprasek z tworzywa zawierającego 4% poroforu następuje znaczna redukcja gęstości w porównaniu z wypraskami litymi i z tworzywa z mniejszą zawartością poroforu.

Zjawisko wzrostu gęstości wyprasek porowatych wraz ze zwiększaniem temperatury formy można tłumaczyć, podobnie jak w poprzednich badaniach, tendencją do tworzenia nielicznych, dużych porów w strukturze wyprasek. Ponadto wyższa temperatura formy ułatwia wypełnianie gniazd formy tworzywem i pozwala na dłuższe zestalanie się tworzywa będącego pod wpływem ciśnienia docisku. Sprzyja to upakowaniu tworzywa w gnieździe. Wyższa temperatura formy sprzyja wzrostowi udziału fazy krystalicznej, na skutek czego, wraz ze wzrostem stopnia krystaliczności, zwiększa się gęstość.



Rys. 15. Zmiana gęstości wyprasek z PE-HD: a) bez poroforu w funkcji prędkości wtryskiwania v_w i temperatury formy T_f ($T_w = 230^{\circ}\text{C}$), b) z 2% zawartością poroforu w funkcji prędkości wtryskiwania v_w i temperatury formy T_f ($T_w = 230^{\circ}\text{C}$), c) z 4% zawartością poroforu w funkcji temperatury formy T_f i temperatury wtryskiwania T_w ($v_w = 45 \text{ mm/s}$)

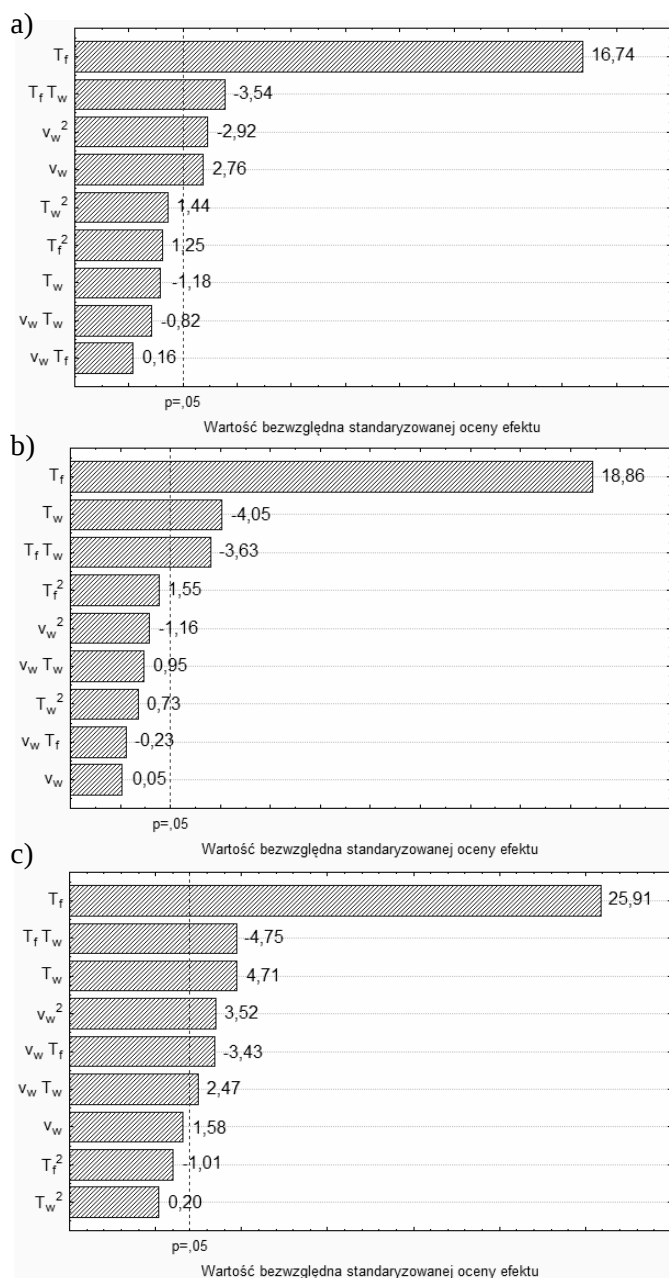


Rys. 16. Gęstość wyprasek z PE-HD uzyskanych w warunkach wtryskiwania określonych w układach planu badań 15 i 16 dla cykli A, B i C

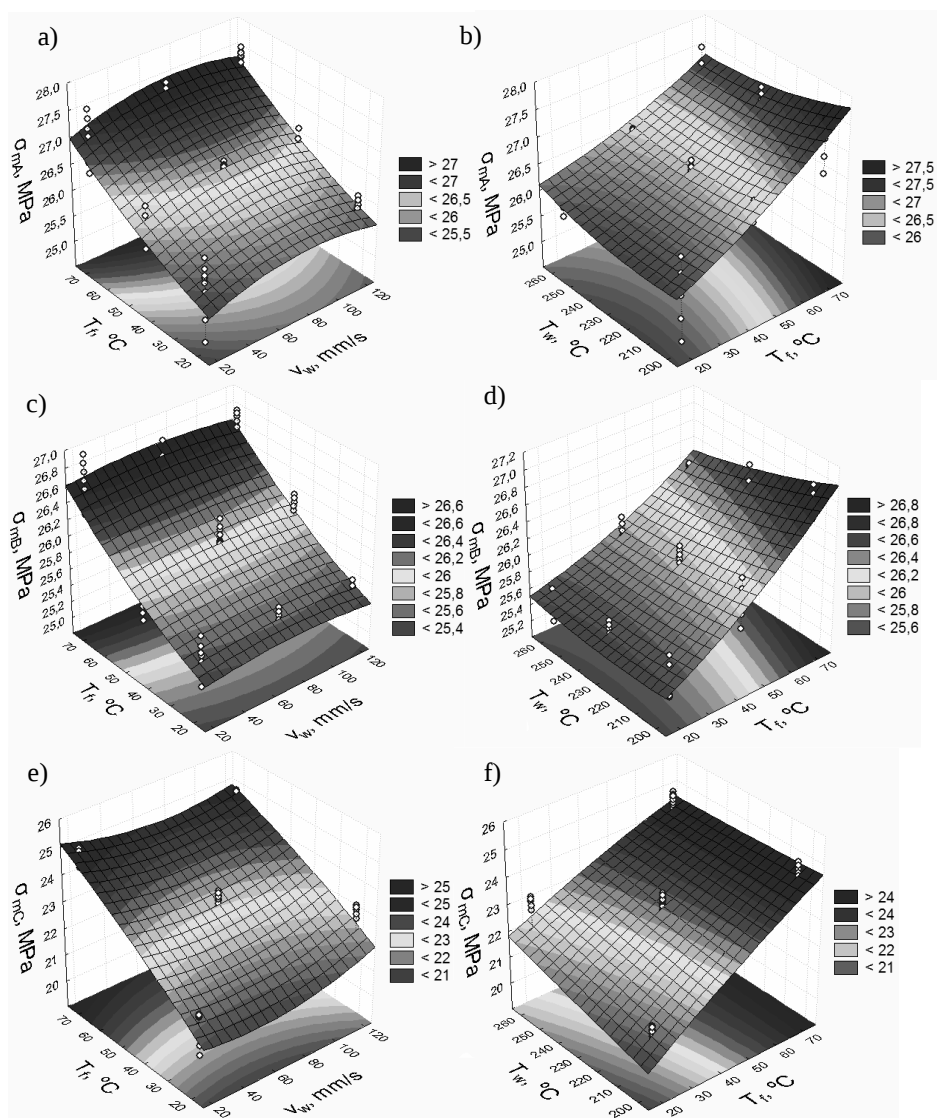
Właściwości wytrzymałościowe

W statycznej próbie jednoosiowego rozciągania określono wytrzymałość na rozciąganie (σ_m) i wydłużenie przy sile maksymalnej (ϵ_m). Wyniki analizy Pareto wpływu poszczególnych wielkości wejściowych na wartość σ_m zostały przedstawione na rys. 17. Największy wpływ na wytrzymałość na rozciąganie wyprasek uzyskiwanych we wszystkich cyklach ma temperatura formy. Wraz z jej wzrostem zwiększa się wytrzymałość na rozciąganie. Potwierdzają to zależności pokazane na rysunku 18.

Możliwą przyczyną zwiększenia wytrzymałości na rozciąganie wyprasek litych i porowatych wraz ze wzrostem temperatury formy, jest większa ilość fazy krystalicznej w wypraskach wytwarzanych przy wyższej wartości tej temperatury. Dodatek poroforu wpłynął nieznacznie na obniżenie wytrzymałości na rozciąganie.

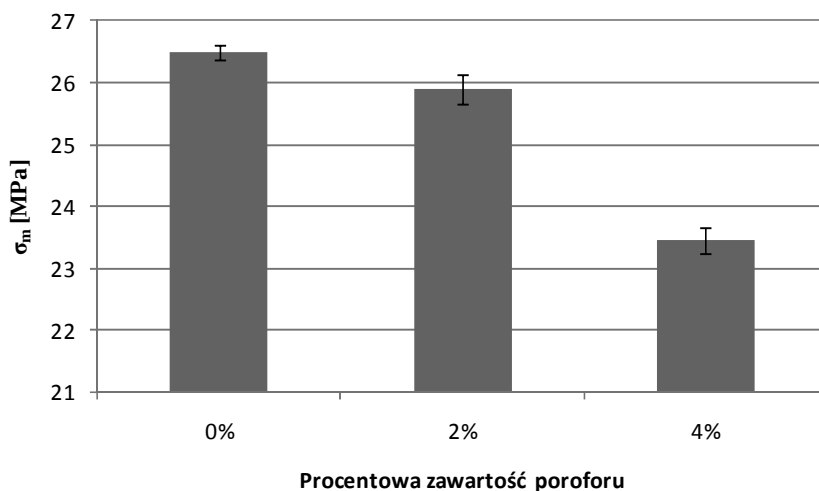


Rys. 17. Wyniki analizy Pareto w odniesieniu do wytrzymałości na rozciąganie wyprasek z PE-HD: a) cykl A: bez poroforu, b) cykl B: 2% poroforu, c) cykl C: 4% poroforu

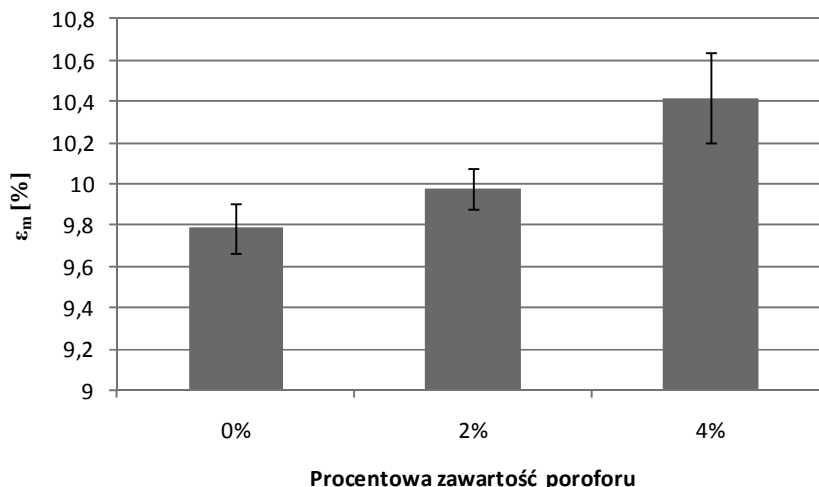


Rys. 18. Zmiana wytrzymałości na rozciąganie wyprasek z PE-HD: a) bez poroforu w funkcji prędkości wtryskiwania v_w i temperatury formy T_f ($T_w = 230^\circ\text{C}$); b) bez poroforu w funkcji temperatury formy T_f i temperatury wtryskiwania T_w ($v_w = 45$ mm/s); c) z 2% zawartością poroforu w funkcji prędkości wtryskiwania v_w i temperatury formy T_f ($T_w = 230^\circ\text{C}$); d) z 2% zawartością poroforu w funkcji temperatury formy T_f i temperatury wtryskiwania T_w ($v_w = 45$ mm/s); e) z 4% zawartością poroforu w funkcji prędkości wtryskiwania v_w i temperatury formy T_f ($T_w = 230^\circ\text{C}$); f) z 4% zawartością poroforu w funkcji temperatury formy T_f i temperatury wtryskiwania T_w ($v_w = 45$ mm/s)

Zmiany wytrzymałości na rozciąganie i średniego wydłużenia przy sile maksymalnej wyprasek z PE-HD uzyskanych w takich samych warunkach wtryskiwania, określonych w układach planu badań 15 i 16, dla cykli A, B i C przedstawiono na rys. 19 i 20. Dodanie poroforu ma istotny wpływ na właściwości wytrzymałościowe wyprasek; powoduje zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie i zwiększenie wydłużenia przy sile maksymalnej. W przypadku wyprasek z 4% zawartością poroforu nastąpiło zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie o około 11% (rys. 19) oraz wzrost wydłużenia przy sile maksymalnej o około 6% (rys. 20), w porównaniu z wynikami uzyskanymi dla wyprasek litych.



Rys. 19. Średnia wytrzymałość na rozciąganie wyprasek z PE-HD uzyskanych w warunkach wtryskiwania określonych w układach planu badań 15 i 16 dla cykli A, B i C



Rys. 20. Średnie wydłużenie przy sile maksymalnej wyprasek z PE-HD uzyskanych w warunkach wtryskiwania określonych w układach planu badań 15 i 16 dla cykli A, B i C

Połysk powierzchni i kolor wyprasek

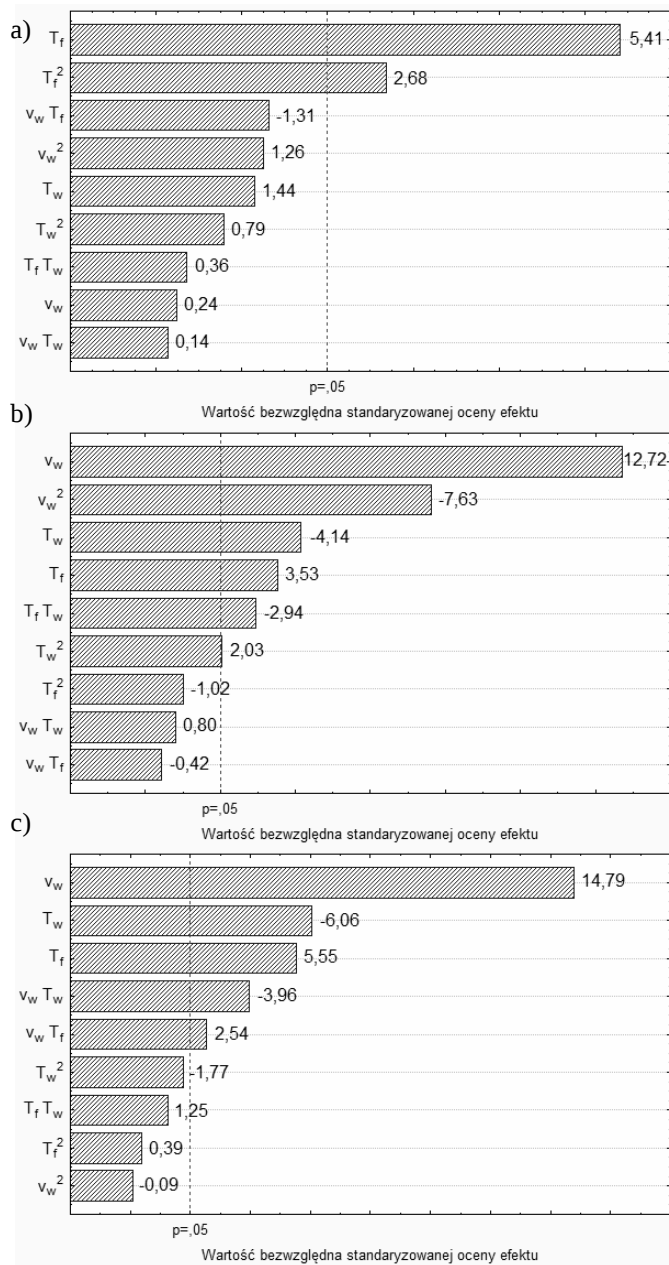
Połysk powierzchni wyprasek

Pomiar połysku został przeprowadzony połyskomierzem 406L firmy Elcometer. Badanie polega na zmierzeniu intensywności odbitego i rozproszonego światła w wąskim zakresie kąta odbicia. Intensywność światła odbitego zależy od materiału i kąta padania światła. Wyniki pomiarów połysku wyrażane są w jednostkach połysku GU (ang. Gloss Units). Wysoki połysk charakteryzuje duża wartość GU (do 100), natomiast mała wartość GU wskazuje na matowość powierzchni (brak połysku).

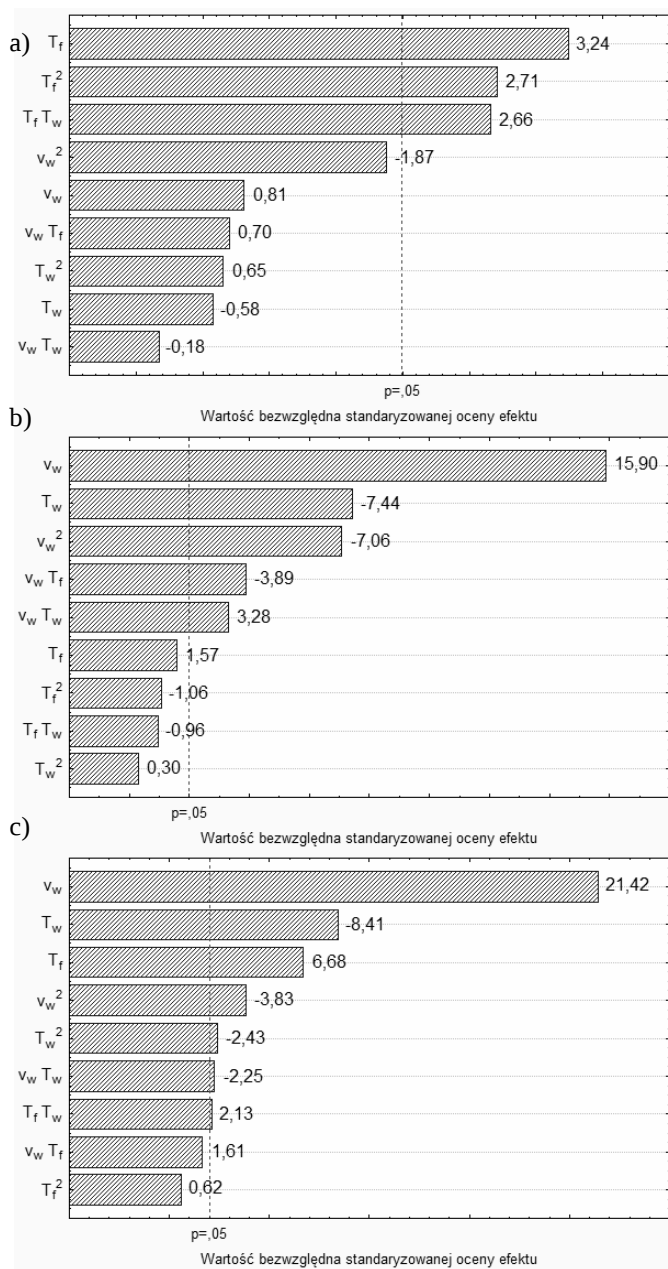
Badanie połysku przeprowadzono stosując dwa kąty padania światła 20° i 60° . Na rys. 21 przedstawiono wykresy Pareto, które umożliwiły określenie wpływu poszczególnych wielkości wejściowych na wartość α_{20° , charakteryzującą połysk wyprasek. W przypadku wyprasek z tworzywa bez poroforu (rys. 21a), największy wpływ na połysk wyprasek ma temperatura formy. Z jej wzrostem zwiększa się wartość α_{20° , a więc polepsza się połysk. Dla wyprasek z tworzywa z dodatkiem poroforu (rys. 21 b i c) największy wpływ na wartość α_{20° ma prędkość wtryskiwania. Większa prędkość wtryskiwania umożliwia uzyskiwanie wyprasek porowatych o większym połysku. Drugim istotnym parametrem dla wyprasek z poroforem jest temperatura wtryskiwania, przy czym z jej wzrostem połysk maleje.

Z rysunku 22, przedstawiającego wyniki uzyskane przy kącie padania światła 60° widać, że w przypadku wyprasek litych największy wpływ na wartość α_{60° ma (podobnie jak przy pomiarze przy kącie 20°) temperatura formy. Z jej wzrostem zwiększa się połysk wyprasek. Duży połysk wyprasek z litego tworzywa przy zastosowaniu wyższej temperatury formy może być tłumaczony łatwiejszym wypełnianiem gniazda formującego, sprzyjającemu lepszemu odwzorowaniu jego powierzchni.

Połysk wyprasek z tworzywa z poroforem zależy głównie od prędkości wtryskiwania, oraz w mniejszym stopniu od temperatury wtryskiwania. Wraz ze zwiększeniem prędkości wtryskiwania zwiększa się wartość α_{60° . Duża prędkość wtryskiwania powoduje silną orientację tworzywa w fazie wypełniania gniazda, oraz wzrost temperatury tworzywa wskutek intensywnego tarcia, co ułatwia wypełnianie gniazda i umożliwia uzyskanie wyprasek dobrze odwzorowujących jego powierzchnię. Przy mniejszej prędkości wtryskiwania następuje bardziej intensywne chłodzenie wolno płynącego tworzywa w gnieździe, szybsze zestalanie warstwy wierzchniej, co może prowadzić do hamowania przepływu i powstawania na powierzchni wad w postaci widocznych linii płynięcia, pogarszających połysk wyprasek.

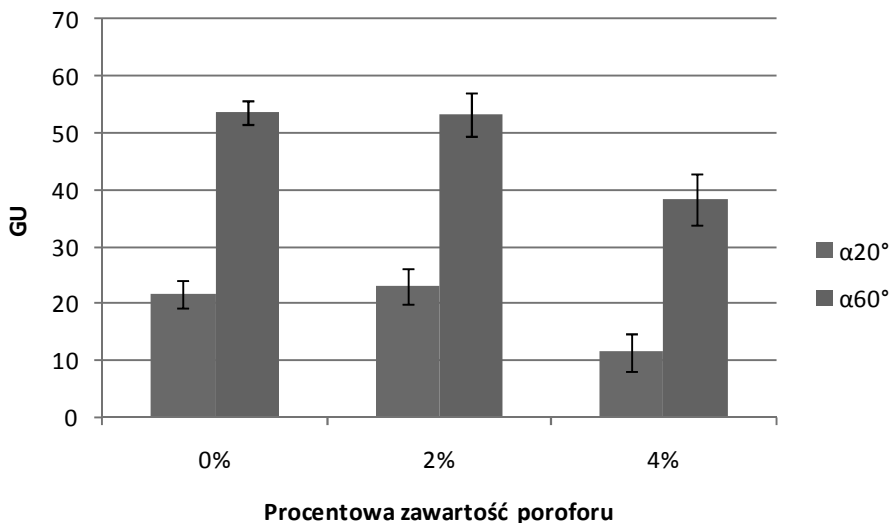


Rys. 21. Wyniki analizy Pareto w odniesieniu do połysku wyprasek z PE-HD dla kąta padania światła 20°: a) cykl A: bez poroforu, b) cykl B: 2% poroforu, c) cykl C: 4% poroforu



Rys. 22. Wyniki analizy Pareto w odniesieniu do polysku wyprasek dla kąta padania światła 60°: a) cykl A: PE-HD bez poroforu, b) cykl B: PE-HD + 2% poroforu, c) cykl C: PE-HD + 4% poroforu

Na rysunku 23. przedstawiono zmianę wartości α w zależności od zawartości poroforu i kąta padania światła dla wyprasek z PE-HD uzyskanych w układach planu badań 15 i 16 dla cykli A, B i C. Widać, że wypraski lite i z tworzywa zawierającego 2% poroforu charakteryzują się prawie takim samym połyskiem. Natomiast w przypadku wyprasek z PE-HD z 4% zawartością poroforu nastąpiło zmniejszenie wartości α o około 30%.

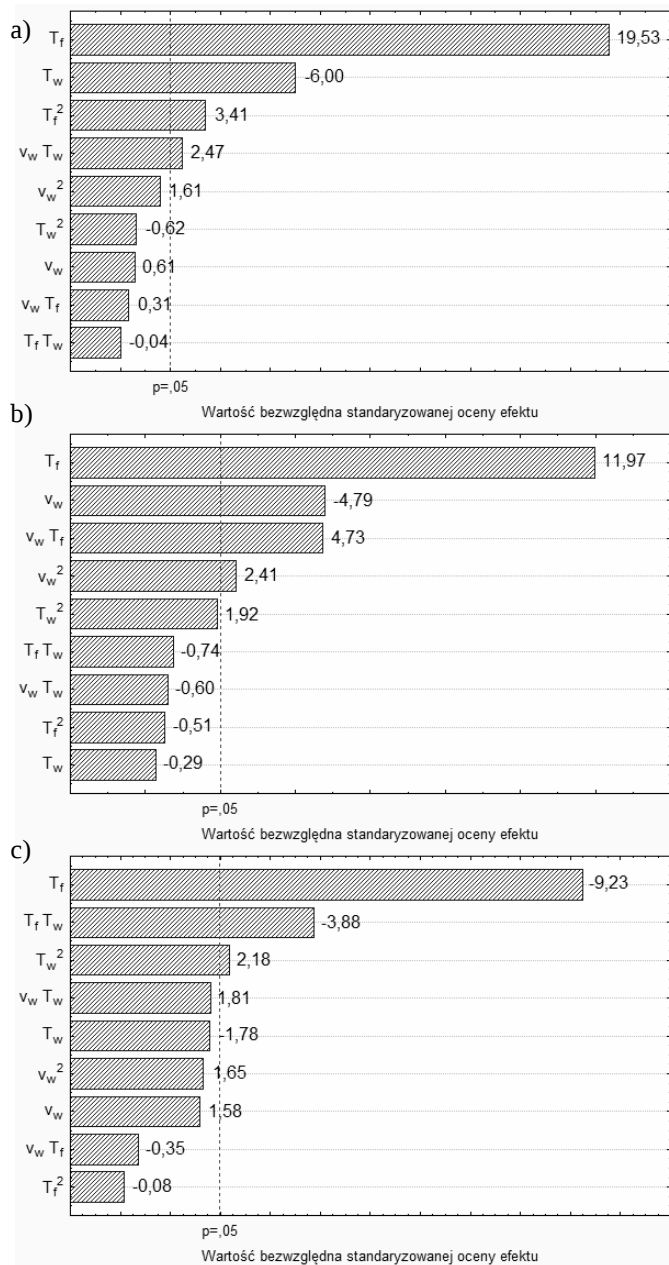


Rys. 23. Zmiana wartości α w zależności od zawartości poroforu i kąta padania światła dla wyprasek z PE-HD uzyskanych w układach planu badań 15 i 16 dla cykli A, B i C

Kolor wyprasek

Badanie koloru wyprasek zostało przeprowadzone przy pomocy kolorymetru SP60 firmy X-rite, w oparciu o przestrzeń barw CIELab, która obejmuje w przybliżeniu zakres barw postrzegalnych przez oko ludzkie. Wyniki badań otrzymane tą metodą przedstawione są w postaci współrzędnych a, b oraz L. Wartość „a” określa zmianę koloru od zielonego (wartość ujemna) do czerwonego (wartość dodatnia) natomiast „b” od niebieskiego (wartość ujemna) do żółtego (wartość dodatnia). L oznacza luminancję wyrażaną w cd/m². Dla zerowych wartości „a” i „b”, parametr L określa zmianę koloru od czarnego (dla L = 0) do białego (dla L = 100).

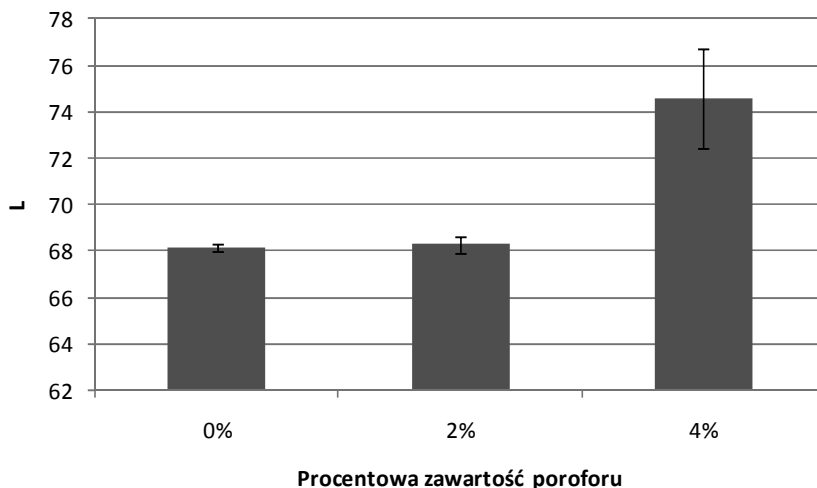
Wykresy Pareto, w odniesieniu do wartości współrzędnej L, charakteryzującej zmianę koloru białego do czarnego, w wypraskach wytwarzanych w różnych warunkach wtryskiwania, przedstawiono na rys. 24.



Rys. 24. Wyniki analizy Pareto w odniesieniu do współrzędnej L:
a) cykl A: PE-HD bez poroforu, b) cykl B: PE-HD + 2% poroforu,
c) cykl C: PE-HD + 4% poroforu

Rys. 24 a i b ukazują, że dla wyprasek z PE-HD litego jak i z 2% zawartością poroforu, wartość luminancji L zwiększa się wraz ze wzrostem temperatury formy i nieznacznie maleje ze wzrostem temperatury wtryskiwania. Zależność ta nie występuje jednak w przypadku wyprasek z 4% zawartością poroforu, dla których wyższa temperatura formy powoduje spadek wartości L (rys. 24c).

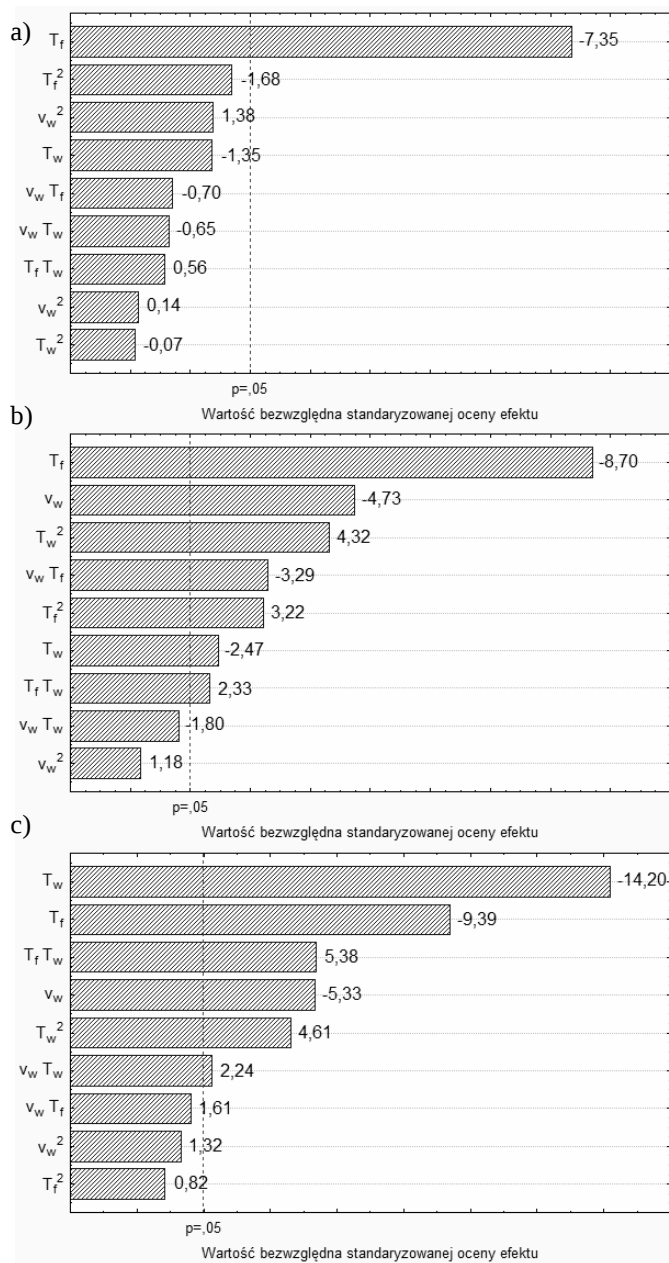
Na rysunku 25 przedstawiono zmianę luminancji L w wypraskach z PE-HD uzyskanych w układach planu badań 15 i 16, dla cykli A, B i C, w zależności od zawartości poroforu. Wartość L uległa zmianie jedynie w przypadku zastosowania tworzywa z 4% poroforu. Wypraski te stały się bielsze.



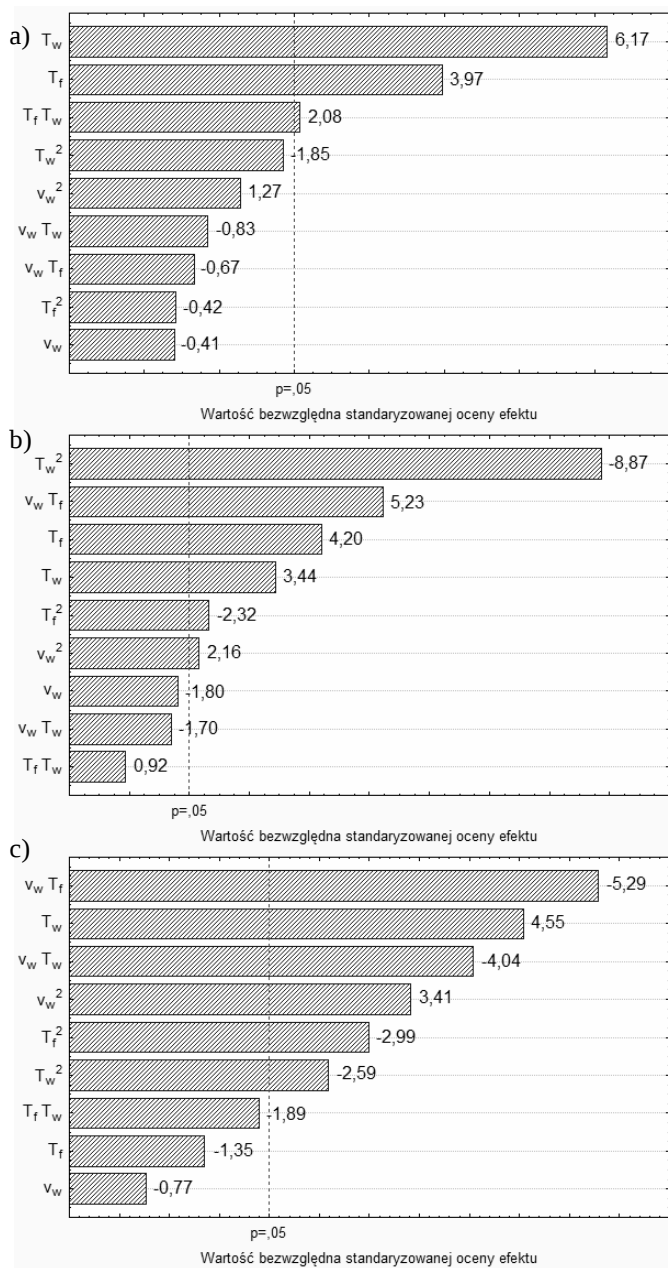
Rys. 25. Zmiana luminancji L w zależności od zawartości poroforu dla wyprasek z PE-HD uzyskanych w układach planu badań 15 i 16 dla cykli A, B i C

Z rysunku 26, ilustrującego wyniki analizy Pareto w odniesieniu do współrzędnej „a” widać, że w przypadku wyprasek litych jak i porowatych, współrzędna „a” maleje wraz ze wzrostem temperatury formy. W cyklu C najistotniejszy wpływ ma temperatura wtryskiwania. Przy zastosowaniu wyższej temperatury wtryskiwania uzyskuje się wypraski bardziej zielone.

Wyniki analizy Pareto w odniesieniu do współrzędnej „b” w wypraskach z poszczególnych cykli pokazano na rys. 27. Dla wyprasek z PE-HD bez poroforu na wartość współrzędnej „b” wpływa w sposób najistotniejszy temperatura wtryskiwania i formy; z ich wzrostem wartość „b” zwiększa się, wypraski stają się bardziej żółte (rys. 27a). W przypadku wyprasek z 2% zawartością poroforu, najbardziej istotne oddziaływanie na wartość „b” ma również temperatura wtryskiwania, jednak w tym przypadku, zmiana wartości „b” nie następuje w sposób liniowy. Istotna jest ponadto interakcja międzyzmiennikowa prędkości wtryskiwania i temperatury formy. Interakcja ta ma również znaczny wpływ na wartość b w przypadku wyprasek z 4% zawartością poroforu.

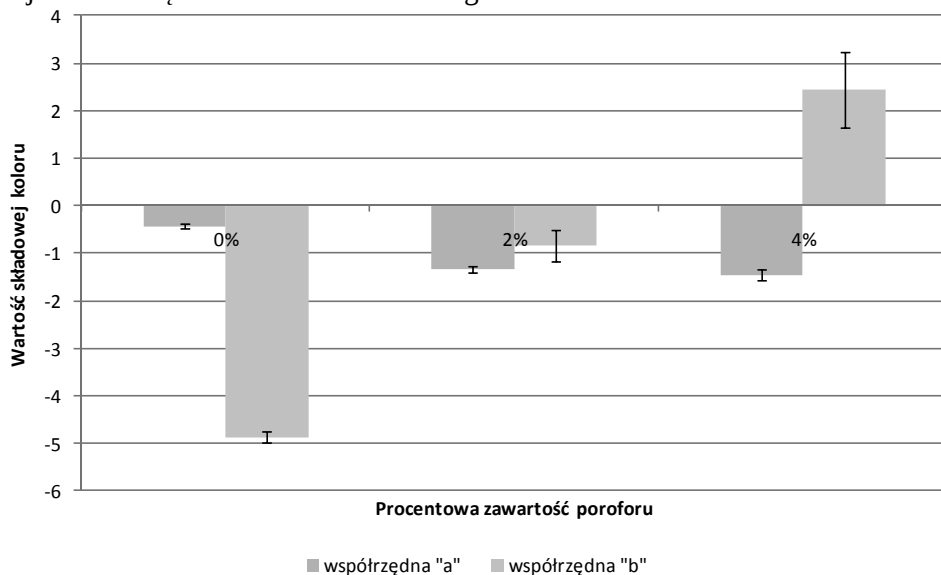


Rys. 26. Wyniki analizy Pareto w odniesieniu do współrzędnej „a” wyprasek z PE-HD: a) bez poroforu (cykl A), b) 2% poroforu (cykl B), c) 4% poroforu (cykl C)



Rys. 27. Wyniki analizy Pareto w odniesieniu do współrzędnej b wyprasek z PE-HD: a) bez poroforu (cykl A), b) 2% poroforu (cykl B), c) 4% poroforu (cykl C)

Zmianę współrzędnych „a” oraz „b” dla wyprasek z PE-HD uzyskanych w układach planu badań 15 i 16 dla cykli A, B i C pokazano na rys. 28. Widać, że wraz ze wzrostem zawartości poroforu wartość „a” nieznacznie maleje, co oznacza zmianę koloru wyprasek w kierunku koloru zielonego, natomiast wartość „b” znacznie wzrosła, co wskazuje na zmianę w kierunku koloru żółtego.



Rys. 28. Zmiana współrzędnych a i b w zależności od zawartości poroforu dla wyprasek z PE-HD uzyskanych w układach planu badań 15 i 16 dla cykli A, B i C

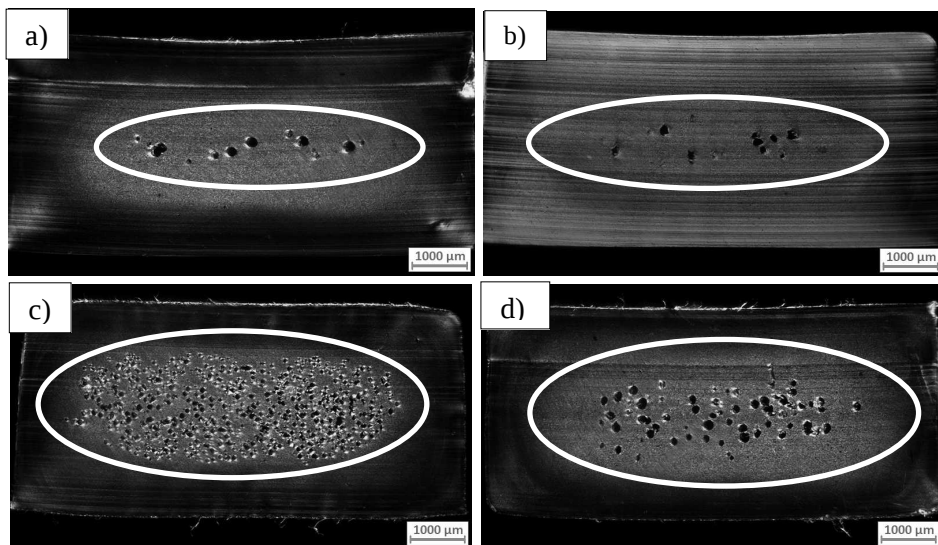
Badania strukturalne

Badania strukturalne w przekroju prostopadłym do kierunku przepływu tworzywa

Badania strukturalne wyprasek w przekroju prostopadłym do kierunku przepływu tworzywa przeprowadzono przy użyciu mikroskopu optycznego w świetle przechodzącym spolaryzowanym. Rysunek 29 przedstawia wyniki obserwacji mikroskopowych, dla wyprasek uzyskiwanych z PE-HD z 2 i 4% zawartością poroforu, przy skrajnych wartościach temperatury formy.

Z rysunku 29 a i b widać, że w przypadku wyprasek z 2% zawartością poroforu, uzyskano strukturę o nielicznych, dużych porach, której wielkość nie jest zależna od temperatury formy, natomiast w wypraskach z 4% zawartością poroforu (rys. 29 c i d), struktura porowata jest w istotnym stopniu zależna od temperatury formy. Przy zastosowaniu niższej temperatury formy uzyskano strukturę o drobnych, gęsto rozłożonych porach, natomiast przy wyższej strukturę o mniej licznych, dużych porach. Można to tłumaczyć tym, że w przypadku zastosowa-

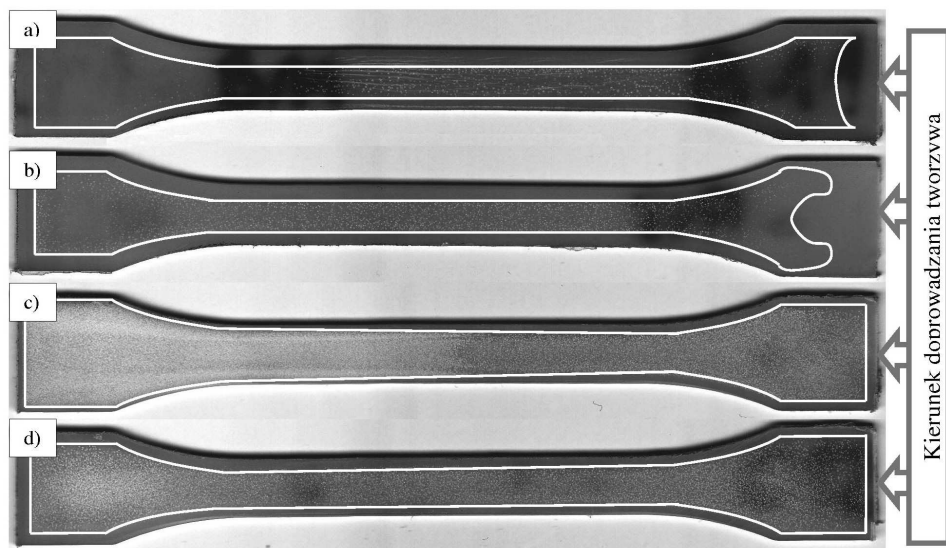
nia wyższej temperatury formy czas zestalania tworzywa jest długi i pęcherze gazowe łączą się ze sobą w ciekłym tworzywie, natomiast w niższej temperaturze tworzywo zestala się szybciej ograniczając rozrost pęcherzy gazowych.



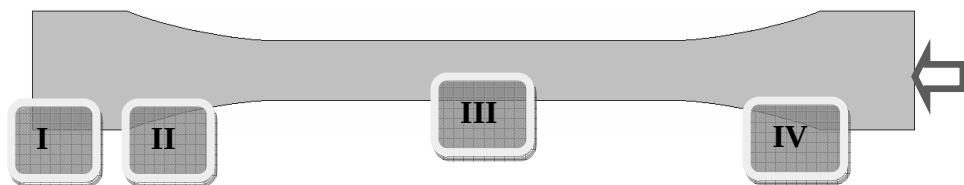
Rys. 29. Morfologia wyprasek z PE-HD uzyskiwanych przy skrajnych wartościach temperatury formy z: a) 2% poroforu ($T_f = 20^\circ\text{C}$, układ B11), b) 2% poroforu ($T_f = 70^\circ\text{C}$, układ B12), c) 4% poroforu ($T_f = 20^\circ\text{C}$, układ C11), d) 4% poroforu ($T_f = 70^\circ\text{C}$, układ C12)

Badania strukturalne w przekroju równoległym do kierunku przepływu tworzywa

Badania strukturalne w przekroju równoległym do kierunku przepływu tworzywa w gnieździe formującym przeprowadzono w świetle przechodzącym przy użyciu skanera Canon MP140 oraz mikroskopu inspekcyjnego stereoskopowego Nikon SMZ800. Preparaty stosowane do obserwacji miały postać zgładów o grubości 2 mm, uzyskanych z próbek do statycznej próby rozciągania poprzez ich obróbkę skrawaniem. Wyniki badań strukturalnych uzyskanych za pomocą skanera przedstawiono na rysunku 30. W przypadku badań z wykorzystaniem mikroskopu inspekcyjnego, konieczne było wyznaczenie obszarów, w których dokonano obserwacji przy większym powiększeniu. Oznaczenia tych obszarów przedstawiono na rys. 31, natomiast na rys. 32 zamieszczono wyniki obserwacji mikroskopowych w poszczególnych obszarach.

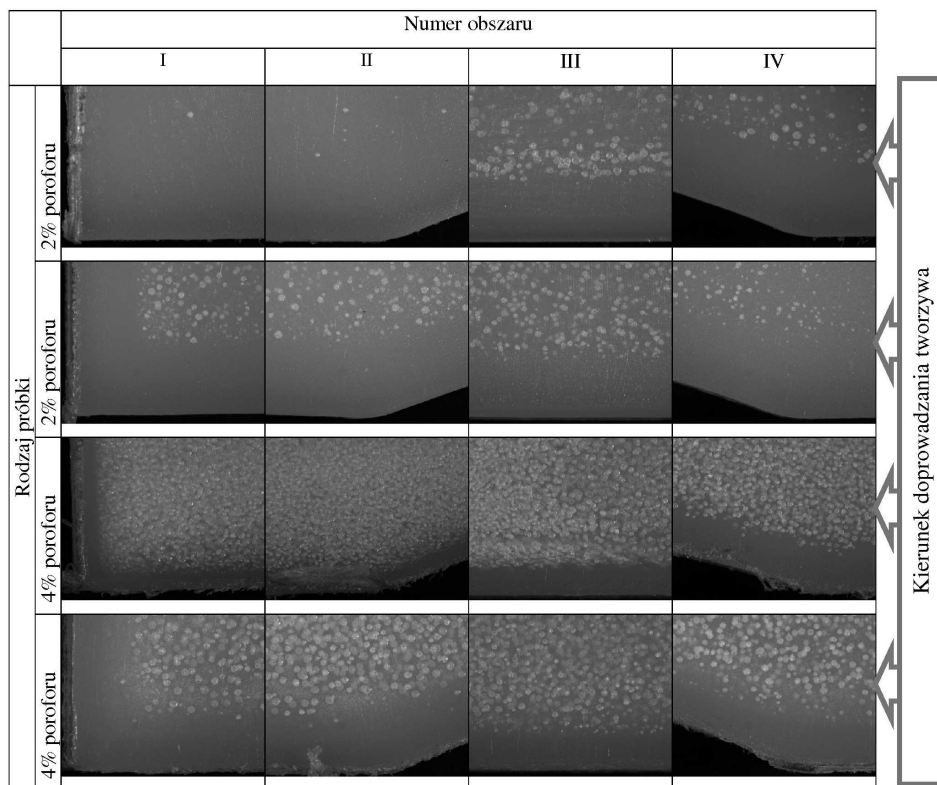


Rys. 30. Morfologia wyprasek z PE-HD z różną zawartością poroforu uzyskiwanych przy zmiennych wartościach temperatury formy: a) 2% poroforu, $T_f = 20^\circ\text{C}$, b) 2% poroforu, $T_f = 70^\circ\text{C}$, c) 4% poroforu, $T_f = 20^\circ\text{C}$, d) 4% poroforu, $T_f = 70^\circ\text{C}$, obrazy uzyskane z wykorzystaniem skanera; linią białą zaznaczono obszary występowania porów



Rys. 31. Oznaczenia obszarów wyprasek poddanych badaniu z wykorzystaniem mikroskopu inspekcyjnego stereoskopowego

W przypadku wyprasek z polietylenu z 2% zawartością poroforu uzyskano strukturę o nielicznych porach i grubym litym naskórku, zarówno przy niskiej jak i wysokiej temperaturze formy. Rozłożenie porów w tych wypraskach jest niesymetryczne, większa ich liczba występuje w obszarze oddalonym od miejsca doprowadzania tworzywa, natomiast mniejsza liczba porów znajduje się w obszarze bezpośrednio za przewężką szczelinową (rys. 30 a i b). W wypraskach z tworzywa zawierającego 4% poroforu (rys. 30 c i d), lity naskórek ma mniejszą grubość. Ponadto w wypraskach uzyskiwanych przy niższej wartości temperatury formy, ma on zróżnicowaną grubość, większą w obszarze bliższym doprowadzania tworzywa. We wszystkich wypraskach z tworzywa z 4% zawartością poroforu występują gęsto rozłożone pory w całym ich rdzeniu. Podobnie jak w przypadku wyprasek z polietylenu z 2% zawartością poroforu, większa liczba porów występuje w obszarach znajdujących się dalej od miejsca doprowadzania tworzywa.



Rys. 31. Morfologia wyprasek z PE-HD z różną zawartością poroforu uzyskiwanych przy zmiennych wartościach temperatury formy: a) 2% poroforu, $T_f = 20^\circ\text{C}$, b) 2% poroforu, $T_f = 70^\circ\text{C}$, c) 4% poroforu, $T_f = 20^\circ\text{C}$, d) 4% poroforu, $T_f = 70^\circ\text{C}$; obrazy uzyskane z wykorzystaniem mikroskopu inspekcyjnego

Na przykładzie wypraski z polietylenu zawierającego 4% poroforu, wytworzonej przy niskiej temperaturze formy (20°C) można zaobserwować ponadto, że pory w obszarze IV (bezpośrednio za przewężką) mają większe rozmiary niż położone w pozostałych obszarach, a zwłaszcza tych, które znajdują się na końcu drogi przepływu tworzywa w gnieździe formującym (I i II).

Opisywaną budowę strukturalną wyprasek porowatych można tłumaczyć niejednorodną temperaturą tworzywa wypełniającego gniazdo formujące. Tworzywo na końcu drogi przepływu w gnieździe ma niższą temperaturę niż w obszarze za przewężką, co potwierdzają wyniki symulacji numerycznych [25]. Wyższa temperatura za przewężką sprzyja rozrostowi porów i przy dostatecznie dużych rozmiarach porów, i jednocześnie dużym ciśnieniu tworzywa w gnieździe, może dochodzić do ich kontaktu i łączenia się. Natomiast niższa temperatura na czole strumienia tworzywa, na końcu drogi przepływu w gnieździe formującym, skutkuje mniej intensywnym rozrostem porów i w efekcie uzyskuje się w tym obszarze strukturę o mniejszych rozmiarach porów, ale są one liczniejsze.

Mniejsza liczba porów w wypraskach z tworzywa z 2% zawartością poroforu może być skutkiem dłuższego czasu fazy docisku, co jest jednak niezbędne do wytwarzania pozbawionych zapadnięć, dobrych jakościowo wyprasek.

Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań wynika, że na właściwości i jakość powierzchni wyprasek z PE-HD litych i porowatych największy wpływ ma temperatura formy. Wraz ze wzrostem temperatury formy zwiększa się masa, gęstość, właściwości wytrzymałościowe i połysk wyprasek. W przypadku wyprasek porowatych jest to związane z ich budową strukturalną, ilością i wielkością porów.

Porofor dodany do tworzywa w ilości 2% wywołuje niewielki spadek masy, gęstości, nieznaczne pogorszenie wytrzymałości na rozciąganie oraz połysku wyprasek. Dodanie tej ilości poroforu powoduje jednak zmianę koloru wyprasek. Istotne zmiany zachodzą dopiero

w przypadku wyprasek z tworzywa z 4% zawartością poroforu. Wypraski te charakteryzują się mniejszą masą i gęstością, jednak pogorszeniu ulega ich wytrzymałość na rozciąganie. Zwiększa się natomiast wydłużenie przy sile maksymalnej. Dodanie tej ilości poroforu wywołuje również znaczny spadek połysku i zmianę koloru wyprasek.

Można stwierdzić, że dodanie 2% poroforu do PE-HD jest wystarczające w celu otrzymywania wyprasek o dobrej jakości powierzchni i jednocześnie o właściwościach

i wytrzymałości zbliżonych do właściwości wyprasek litych. Korzyścią przemawiającą za zastosowaniem tej ilości poroforu jest możliwość zmniejszenia czasu docisku z 24 s

w przypadku wyprasek litych do 16 s w przypadku wyprasek porowatych, bez znacznego wpływu na ich właściwości.

Literatura

- [1] Bociąga E., *Specjalne metody wtryskiwania tworzyw sztucznych*. WNT, Warszawa 2008,
- [2] Bociąga E., Palutkiewicz P., *Wpływ zawartości poroforu i warunków wtryskiwania na wybrane właściwości i stan powierzchni wyprasek z polipropylenu*, „Polimery” 2012, nr 1,
- [3] Bociąga E., Palutkiewicz P., *The influence of injection moulding conditions on surface quality of moulded parts from PP with blowing agent*. PPS 2009 (Polymer Processing Society Europe/Africa Regional Meeting), Cypr-Larnaca, s. 60,
- [4] Bociąga E., Palutkiewicz P., *Wpływ warunków wtryskiwania na jakość powierzchni wyprasek wtryskowych z polipropylenu z dodatkiem poroforu*. Praca zbiorowa pt. Przetwórstwo materiałów polimerowych. CWA Regina Poloniae, Częstochowa 2010, s. 31–40,

- [5] Błędzki A. K., Faruk O., *Effects of the Chemical Foaming Agents, Injection Parameters, and Melt-Flow Index on the Microstructure and Mechanical Properties of Microcellular Injection-Molded Wood-Fiber/Polypropylene Composites*. Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com), DOI 10.1002/app.21685,
- [6] Błędzki A. K., Faruk O., *Influence of Processing Temperature on Microcellular Injection-Moulded Wood-Polypropylene Composites*. „Macromolecular Materials and Engineering”, Volume 291 Issue 10, s. 1226–1232,
- [7] Błędzki A. K., Faruk O. *Microcellular Injection Molded Wood Fiber-PP Composites: Part I - Effect of Chemical Foaming Agent Content on Cell Morphology and Physico-mechanical Properties*. „Journal of Cellular Plastics”, Jan 2006; vol. 42, s. 63–76,
- [8] Błędzki A. K., Faruk O. *Microcellular Injection Molded Wood Fiber-PP Composites: Part II - Effect of Wood Fiber Length and Content on Cell Morphology and Physico-mechanical Properties*. „Journal of Cellular Plastics”, Jan 2006; vol. 42, s. 77–88,
- [9] Błędzki A. K., Faruk O., Kirschling H., Kühn J., Jaskiewicz A., *Mikroporowate polimery i kompozyty. Cz. II. Właściwości różnych typów tworzyw mikroporowatych (Microcellular polymers and composites. Part II. Properties of different types of microcellular materials)*, „Polimery” 2007 nr 1,
- [10] Hornsby P. R., Head I. R., Russell D. A. M., *The Effects of Moulding Geometry on the Structure and Mechanical Properties of Fibre-reinforced Polypropylene Structural Foam Mouldings*. „Journal of Materials Science” 1986, 21, s. 3279–3286,
- [11] Palutkiewicz P., Wawrzyniak J., *Wpływ warunków uplastyczniania na właściwości i strukturę wyprasek z PE-HD z poroforem*. „Przetwórstwo Tworzyw” 2012, nr 5, 149 s. 489–494,
- [12] Reza Barzegari M., Rodrigue D., *The effect of injection molding conditions on the morphology of polymer structural foams*. „Polymer Engineering and Science”, May 01, 2009,
- [13] Chien R. D., Chen S. C., Lee P. H., Huang J. S., *Study on the Molding Characteristics and Mechanical Properties of Injection-molded Foaming Polypropylene Parts*. „Journal of Reinforced Plastics and Composites”, nr 4, vol. 23, s. 429–444,
- [14] Kamal M. R., Isayev A. I., Liu S. J., *Injection Molding: Technology and Fundamentals*. Hanser Verlag, Munich 2009,
- [15] Praca zbiorowa pod redakcją Roberta Sikory, *Przetwórstwo tworzyw polimerowych. Podstawy logiczne, formalne i technologiczne*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006,

- [16] *Zasady prowadzenia plastyfikacji i stosowania dekompresji*. <http://docs8.chomikuj.pl/2459481060,PL,0,0,Zasady-prowadzenia-plastyfikacji-i-stosowania-dekompresji.doc> (26.09.2015),
- [17] Tony Whelan, *Polymer Technology Dictionary*. Chapman & Hall London 1994,
- [18] *Use of solid blowing agents in Injection Molding*. <http://congdonplasticsconsulting.com/ts/injection/Use%20of%20solid%20blowing%20agents%20in%20Injection%20Molding%20PP.pdf> (04.06.2012),
- [19] *Plastronfoam*. <http://www.plastron-sarl.com/pdf/english/Blowing%20agents,%20an%20introduction-1-08E.pdf> (04.06.2012)
- [20] *Injection Molding Glossary*, <http://www.npd-solutions.com/inject-moldglos.html> (04.06.2012),
- [21] *Glossary of Plastic Injection Molding Terms*. http://www.apisolution.com/images/glossary_plastic_injection_molding_engineering_manufacturing.pdf (04.06.2012).
- [22] Palutkiewicz P., *Badanie zjawisk w procesie wytwarzania wyprasek wtryskowych z tworzyw termoplastycznych z poroforem*. Rozprawa doktorska, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2011.
- [23] Bociąga E., Palutkiewicz P., *The influence of injection moulding parameters and blowing agent addition on selected properties, surface state and structure of HDPE parts*. „Polymer Engineering and Science”, Volume 53, Issue 4, s. 780–791, April 2013. DOI: 10.1002/pen.23316.
- [24] Bociąga E., Palutkiewicz P., *The Impact of Mould Temperature and Blowing Agent Content on Structure and Properties of Injection Moulded Parts*. „Cellular Polymers”, Vol. 32, No. 5, 2013, s. 257–278, ISSN (electronic copy): 1478–2421.
- [25] Palutkiewicz P., *Symulacje komputerowe procesu wtryskiwania porującego*. „Polimery” 2015 T60. nr. 2, s.132–143.

6. Metodyka doboru tworzywa przeznaczonego do wtryskiwania wyprasek medycznych na podstawie analizy wyników symulacji procesu wtryskiwania

Wstęp

Wtryskiwanie jest aktualnie podstawową metodą przetwórstwa tworzyw polimerowych, z uwagi na stopień skomplikowania konstrukcji i dużej dokładności otrzymywanych wyprasek oraz zakres wykorzystywanych tworzyw. Cechą charakterystyczną wtryskiwania jest jego cykliczność. W cyklu wtryskiwania wyróżnia się następujące fazy: zamykania formy, wtrysku, docisku, uplastyczniania, otwierania formy oraz przerwy. Do wtryskiwania są stosowane przede wszystkim tworzywa termoplastyczne, ale wykorzystuje się również tworzywa utwardzalne, elastomery oraz kompozyty [1].

Jako rezultat wtryskiwania otrzymuje się części z tworzyw o skomplikowanych kształtach, zróżnicowanej grubości ścianek oraz dużej rozpiętości masy. Podczas konstruowania wypraski wtryskowej podstawowe znaczenie ma wiele czynników, wśród których jako najważniejsze należy wymienić: grubość ścianek, pochylenie powierzchni, promień zaokrąglenia krawędzi, kształt i wymiary przekrojów poprzecznych, otworów, podcięć, żeber wzmacniających, które powinny być dobierane według odpowiednich zaleceń, zapewniających prawidłowe wypełnianie gniazda formy tworzywem, właściwe warunki ochładzania wypraski i pożądaną dokładność geometryczną. Zalecenia te ograniczają swobodę projektowania wypraski na etapie określania jej kształtu funkcjonalnego i wiążą się z pojęciem technologiczności wypraski, rozumianej jako zgodność konstrukcji projektowanego wyrobu z uwarunkowaniami określonego procesu jego wytwarzania, którym w tym przypadku jest wtryskiwanie [2, 3].

Uzyskanie wypraski o wysokich walorach użytkowych wymaga prawidłowego doboru parametrów procesu, rodzaju tworzywa, narzędzia o odpowiedniej konstrukcji i maszyny przetwórczej o określonych możliwościach technologicznych. Prawidłowo zaprojektowana wypraska jest źródłem informacji, na podstawie których dobiera się rodzaj tworzywa, konstruuje formę wtryskową i określa warunki technologiczne procesu [4, 5, 6]. Końcowe ustalenie parametrów technologicznych wtryskiwania stanowi kompromis między oczekiwaną jak największą wydajnością wtryskiwania, a akceptowalnym poziomem jakości wykonania wypraski i jej cech użytkowych. Z uwagi na bardzo wysokie koszty wytwarzania form wtryskowych niezbędne jest zmniejszenie do minimum ryzyka wystąpienia błędów na każdym z etapów przygotowywania procesu produk-

cyjnego [7]. Dzięki symulacji komputerowej i analizie otrzymanych wyników już na etapie projektowania można wyeliminować wiele błędów konstrukcyjnych i technologicznych, dzięki temu znacząco obniżając koszty oraz skracając czas przygotowania produkcji [8, 9].

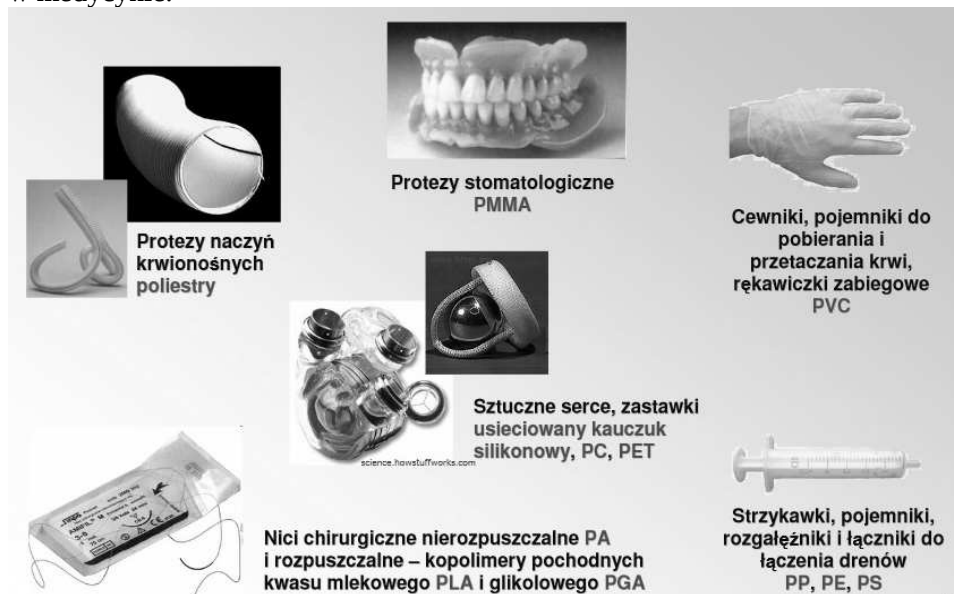
Tworzywa stosowane na wypraski medyczne

Nieustający postęp w dziedzinach wytwarzania i przetwórstwa tworzyw polimerowych spowodował, że znalazły one bardzo szerokie zastosowanie w branży medycznej. Obecnie tworzywa stosowane są w medycynie na dużą skalę, między innymi w chirurgii, transplantologii, stomatologii oraz okulistyce. Z tworzyw wykonuje się zarówno elementy urządzeń i aparatury medycznej oraz narzędzi i przyrządów używanych do badań, akcesoria jednorazowego użytku, jak również opakowania na leki i środki medyczne, powłoki kapsułek i tabletek, a także przedmioty mające bezpośredni kontakt z tkanką, takie jak soczewki kontaktowe, protezy, implanty, cewniki, nici chirurgiczne czy stenty [10, 11].

Jednym z podziałów tworzyw w medycynie jest podział na polimery naturalne i syntetyczne. Pierwsze z nich są wytwarzane w żywych organizmach jako składniki strukturalne tkanek. Zaliczamy do nich: białka (kolagen, fibrynogen, jedwab, wszczepy tkankowe) i wielocukry (celuloza, chityna). Polimery syntetyczne są wytwarzane z monomerów pochodzenia naturalnego lub sztucznego za pomocą różnych metod polimeryzacji. Do grupy tej są zaliczane m.in. silikon (chirurgia plastyczna i rekonstrukcyjna), politetrafluoroetylen (nici chirurgiczne, protezy naczyniowe), poliuretany (protezy naczyń i elementy sztucznego serca), polietylen (cewniki, panewki protez stawowych), politereftalan etylu (naczynia, siatki, nici chirurgiczne), polipropylen i poliamidy (siatki, nici chirurgiczne), polimetakrylan metylu (soczewki wewnątrzgałkowe, protezy) [10]. Innym podziałem tworzyw stosowanych w medycynie jest ich zastosowanie polimerów w medycynie, w związku z czym wyróżnia się podział na pięć grup [11]:

- *I grupa* – stosowane jako środki farmakologiczne oraz krwiozastępcze;
- *II grupa* – stosowane do budowy części wszczepianych do organizmu, np. protezy stawów, nici chirurgiczne, do klejenia tkanek, zastawki serca, naczynia krwionośne, rogówki, stawy;
- *III grupa* – stosowane jako elementy budowy urządzeń, narzędzi i aparatury, np. dreny, rurki, przewody, części aparatury do hemodializy i hemoperfuzji;
- *IV grupa* – stosowane, gdy zewnętrzne części organizmu stykają się przez krótki czas z materiałem polimerowym, np. podczas rehabilitacji lub stawiania diagnozy – strzykawki, łopatki;
- *V grupa* – stosowane, gdy zewnętrzne części organizmu stykają się przez dłuższy czas z materiałem polimerowym, np. protezy: dentystyczne, kończyn, twarzy oraz soczewki kontaktowe.

Na rysunku 1 są przedstawione przykładowe zastosowania tworzyw w medycynie.



Rys. 1. Zastosowanie polimerów w medycynie [12]

W związku z kontaktem tworzyw z tkanką organiczną lub związkami chemicznymi o charakterze biologicznym, polimerom przeznaczonym do wytwarzania produktów stosowanych w medycynie stawiane są odpowiednio wysokie wymagania oraz konieczność spełniania cech specyficznych dla branży medycznej. Dla części z tworzyw niezbędna jest łatwość utrzymania ich w czystości, możliwość wyjaławiania, muszą być odporne na działanie wysokiej temperatury, środków myjących, chemicznych, odkażających, czynników fizjologicznych, a nawet promieniowania rentgenowskiego. Tworzywa polimerowe nie mogą powodować alergii, reakcji mutagennych oraz immunologicznych, stanów zapalnych oraz reakcji z krwią i układem kostnym [10, 11].

W celu uzyskania wyprasek medycznych często stosuje się takie odmiany wtryskiwania jak wtryskiwanie dokładnościowe lub precyzyjne. Otrzymane w ten sposób wypraski charakteryzują się bardzo dużą dokładnością wymiarową, brakiem wypływek, zdolnością do przenoszenia wysokich obciążeń, odpornością na ścierania i zużycie, bardzo dobrym stanem powierzchni oraz wysoce powtarzalną dokładnością. Stosuje się także metodę wtryskiwania z doprasowywaniem, polegającą na zastosowaniu dodatkowego ściskania tworzywa w gnieździe formującym poprzez ruch podzespołu formy. Metoda ta służy między innymi do wytwarzania soczewek optycznych o dużej przejrzystości [1, 2].



Rys. 2. Stanowisko wtryskowe firmy Arburg w technologii „clear room” [13]

W procesie wytwarzania wyprasek wtryskowych przeznaczonych do zastosowania w medycynie jest ważne zachowanie wysokich standardów czystości, co otrzymuje się między innymi za pomocą technologii „clean room” (rys. 2), czego przykładem może być zachowanie właściwej sterylności przy wtryskiwaniu strzykawk lekarskich jednorazowego użytku. Wiąże się to z doбором odpowiedniej wtryskarki, gdzie w ostatnich latach bardzo szerokie zastosowanie znalazły wtryskarki z napędem elektrycznym, charakteryzujące się bardzo wysoką jakością otrzymywanych wyprasek wtryskowych. Ponadto całkowite wyeliminowanie narażonego na przecieki układu hydraulicznego pozwoliło wtryskarkom z napędem elektrycznym na osiągnięcie bardzo wysokiej klasy czystości, jednocześnie wskazując na ekologiczne aspekty konstrukcji tych maszyn przetwórczych: chłodzenie wodą, brak zanieczyszczenia olejem przestrzeni roboczej wtryskarki, niska emisja ciepła do atmosfery oraz nieporównywalnie niższe zapotrzebowanie na energię [14].

Podstawy modelowania numerycznego wtryskiwania

Wtryskiwanie tworzyw polimerowych, z uwagi na złożoność zjawisk zachodzących podczas realizacji tej metody przetwórstwa, jest obiektem wszechstronnej analizy przy wykorzystaniu specjalistycznego oprogramowania inżynierskiego CAD/CAM/CAE [15, 16]. Modelowanie numeryczne zjawisk zachodzących w formie wtryskowej zachodzi przy założeniu, że przepływ tworzywa od-

bywa się w dwóch wymiarach, przy pominięciu wymiaru grubości. Założenie to uzasadnia się konstrukcją wyprasek, które zazwyczaj są elementami cienkościennymi, w związku z czym można pominąć przepływ tworzywa w kierunku grubości wypraski [15]. W efekcie równanie zachowania masy, ruchu i energii redukuje się do zagadnienia lokalnie dwuwymiarowego i upraszcza się do opisu fazy wtrysku oraz fazy docisku. W programie Cadmould 3D-F stosowane są dwa modele reologiczne: model Carreau oraz model potęgowy. Zależność lepkości tworzywa od temperatury jest opisana równaniem Williamsa–Landela–Ferry’ego (WLF), a zależność objętości właściwej tworzywa v od temperatury T oraz ciśnienia p jest określana na podstawie charakterystyki p - v - T [15].

Oprogramowanie CAE przeznaczone do modelowania numerycznego wtryskiwania umożliwia symulację zjawisk zachodzących podczas wypełniania gniazda formującego formy wtryskowej tworzywem i uzupełniania tworzywa w fazie docisku, jak również służy do wykonania późniejszej analizy ochładzania wypraski, skurczu przetwórczego, wypaczenia i deformacji gotowego wyrobu. Przygotowanie symulacji zjawisk zachodzących podczas wtryskiwania wymaga wprowadzenia ogólnych charakterystyk dotyczących kształtu i wymiarów wypraski, właściwości tworzywa przetwarzanego i warunków procesu [15–17].

Symulacja płynięcia tworzywa i wypełniania gniazda formującego oraz wynikający z niej opis numeryczny procesu wtryskiwania ułatwia optymalizację konstrukcji formy, ustalenie parametrów procesu i dobór wtryskarki o odpowiednich możliwościach technologicznych w celu uzyskania wypraski o odpowiedniej jakości. Analizie poddawane są czynniki wpływające na zachowanie się tworzywa w trakcie procesu, między innymi ciśnienie wtryskiwania, ciśnienie docisku, grubość ścianek wypraski, temperatura tworzywa i temperatura gniazda formującego formy wtryskowej [17–19].

Symulacja ochładzania wypraski wtryskowej ma na celu optymalizację konstrukcji formy, w której układ chłodzenia projektuje się w taki sposób, aby osiągnąć możliwie najbardziej równomierną intensywność ochładzania przy jednoczesnym zachowaniu jak najkrótszego czasu cyklu procesu wtryskiwania. Wyniki analizy ochładzania wypraski pozwalają na skrócenie czasu cyklu wtryskiwania i obniżenie kosztów wytwarzania bez straty jakości wytworu. Uzyskanie możliwie równomiernego stopnia odprowadzenia ciepła z gniazda formującego skutkuje wyraźnym zmniejszeniem wartości skurczu przetwórczego wypraski wtryskowej oraz poprawia jakość jej powierzchni, pozwalając w konsekwencji na otrzymanie produktu o wymaganych walorach użytkowych. Unika się przez to wysokich strat z powodu powstawania wyprasek wadliwych oraz konieczności występowania kosztowych dodatkowych operacji technologicznych, jakim musiałaby być poddawana gotowa wypraska już po zakończeniu procesu wtryskiwania [18, 19].

Możliwość przeanalizowania skurczu przetwórczego oraz deformacji wypraski przy symulowanych różnych parametrach procesu wtryskiwania oraz modelowanie zróżnicowanych konstrukcyjnie układów chłodzenia formy umożliwia

określenie położenia stref największego skurczu oraz deformacji. Dzięki temu w fazie projektowania można przeprowadzić optymalizację konstrukcji formy, dobierając zarówno rodzaj materiału wkładek formujących jak i korygując odpowiednie wielkości geometryczne w celu zminimalizowania negatywnego wpływu skurczu przetwórczego i wypaczenia wypraski [15, 20, 21]. W oparciu o wyniki symulacji można spełnić wymagania o charakterze jakościowym i ekonomicznym, związane z otrzymaniem wypraski o wysokiej stabilności wymiarowej, dobrych właściwościach optycznych powierzchni oraz żądanej dokładności pasowania z innymi współpracującymi z nią częściami.

Symulacja komputerowa wykonania strzykawki medycznej za pomocą procesu wtryskiwania

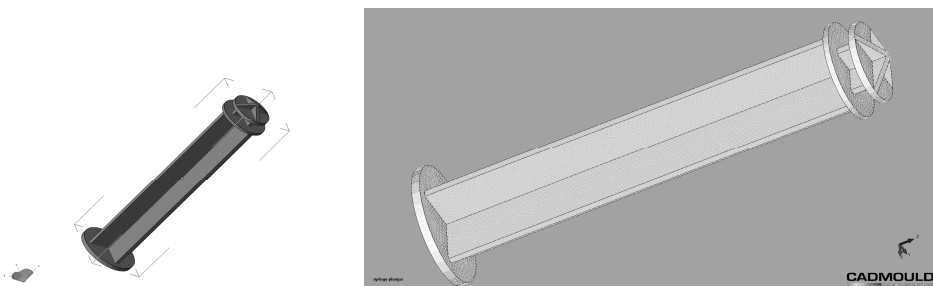
Cel symulacji komputerowej

Celem symulacji komputerowej oraz modelowania numerycznego procesu wtryskiwania jest ocena przydatności wybranych tworzyw termoplastycznych do wykonania strzykawki medycznej. Dla wybranych pięciu tworzyw termoplastycznych (z których trzy to odmiany polipropylenu, natomiast pozostałe dwa to poliwęglan i poliamid), dedykowanych przez producentów do zastosowań w medycynie wykonano symulacje numeryczne fazy wtrysku, fazy docisku i chłodzenia wyprasek odpowiadających tłoczkowi i korpusowi strzykawki medycznej o pojemności 60 cm³. Porównaniu poddano wybrane parametry procesu wtryskiwania, takie jak czas fazy wtrysku, czas fazy docisku i czas chłodzenia, wpływające na długość cyklu wtryskiwania, a tym samym na wydajność procesu, a także wskazany zakres temperatur przetwórstwa, wymagane ciśnienie wtrysku oraz siły działające na formę wtryskową. Oceniono także dokładność wymiarową otrzymanych wyprasek, za pomocą analizy skurczu i zniekształcenia poszczególnych części strzykawki. Na podstawie otrzymanych wyników zostało wybrane tworzywo, które zostało ocenione pod trzema względami: ekonomicznym, technologicznym i jakościowym.

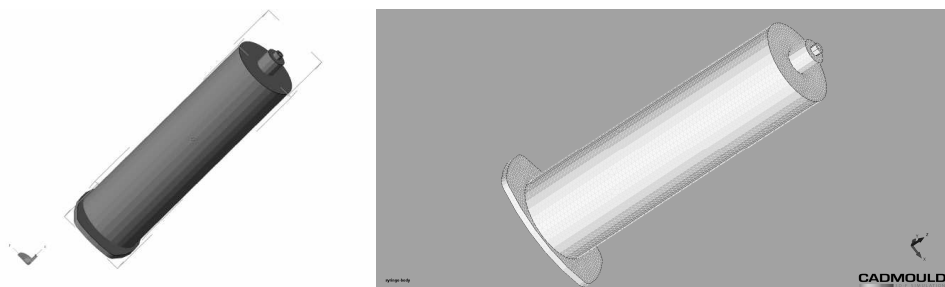
Przedmiot badań - model bryłowy wypraski

Przed rozpoczęciem symulacji procesu wtryskiwania za pomocą programu Cadmould 3D-F jest konieczne zaimportowanie modelu bryłowego przedstawiającego gniazdo formujące formy wtryskowej. Najczęściej projekt wykonany jest w programie do modelowania bryłowego typu CAD [22], a następnie przekonwertowany do formatu STL, który jest dedykowany dla przeprowadzenia symulacji w programie Cadmould 3D-F. Modele bryłowe obu części strzykawki – tłoczka i korpusu, które zostały wykorzystane do przeprowadzenia symulacji procesu wtryskiwania zostały zapisane w formacie STL, możliwym do przetwarzania przez program Cadmould 3D-F.

Wygląd modelu tłoczka strzykawki został zamieszczony na rys. 3, natomiast na rys. 4 pokazano model korpusu strzykawki. W tabeli 1 zamieszczono podstawowe wielkości geometryczne, charakteryzujące modele wypraski tłoczka i korpusu strzykawki wykorzystane do przeprowadzenia symulacji komputerowej.



Rys. 3. Wygląd modelu tłoczka strzykawki: po lewej – w wersji oryginalnej, po prawej – z naniesioną siatką MES w programie Cadmould



Rys. 4. Wygląd modelu korpusu strzykawki: po lewej – w wersji oryginalnej, po prawej – z naniesioną siatką MES w programie Cadmould

Tabela 1. Zestawienie charakterystyki geometrycznej elementów strzykawki

Wielkość geometryczna	Tłoczek	Korpus
Pole powierzchni [mm^2]	17928	24370
Objętość [mm^3]	17435	21309
Położenie centroidu [mm]	X = -0,000, Y = 0,001, Z = 64,019	X = 0,000, Y = 0,000, Z = 56,149

W tabeli 2 zostały zamieszczone wielkości charakteryzujące modele MES elementów wchodzących w skład strzykawki. W modelu MES tłoczka występowały tylko elementy czworościenne, natomiast w modelu korpusu występowały elementy czworościenne oraz elementy walcowe.

Tabela 2. Zestawienie charakterystyk modeli MES poszczególnych części strzykawki

	Tłoczek	Korpus
Całkowita objętość elementów tworzących siatkę MES [mm ³]	16598,8	21581.5
Gęstość względna siatki MES [%]	0,849	1,072
Całkowita objętość wypraski [mm ³]	17435	21309
Całkowita objętość układu wlewowego [mm ³]	81	345
Łączna objętość wszystkich elementów [mm ³]	17516	21654
Współczynnik dopasowania siatki MES	0,9476	0,9966

Program analizy numerycznej

Czynnikami stałymi podczas wykonywanych symulacji komputerowych były kształt i wymiary geometryczne modelu tłoczka i modelu korpusu strzykawki oraz kształt i wymiary układu doprowadzenia tworzywa. Zastosowano jednopunktowy układ doprowadzenia tworzywa, uproszczony dla jednego gniazda formującego. Z uwagi na przyjęty cel realizowanych symulacji komputerowych nie budowano pełnego układu wlewowego dla całej, wielogniazdowej formy wtryskowej, a także nie analizowano konstrukcji ewentualnego układu chłodzenia formy wtryskowej (gdyby taki miałby być wymagany). Przyjęto jednakowy materiał na formę wtryskową – stal o współczynniku przewodzenia ciepła równym 1000 W/mK, temperaturę otoczenia 20°C oraz współczynnik przewodzenia ciepła otoczenia wynoszący 8 W/mK.

Jako czynnik zmienny należy traktować typ tworzywa użytego do przeprowadzenia symulacji komputerowej oraz odpowiadające poszczególnym tworzywom wielkości fizyczne charakteryzujące ich właściwości przetwórcze, na przykład takie jak zakres temperatury przetwórstwa czy temperaturę usunięcia wypraski. Symulacja została wykonana dla pięciu rodzajów tworzyw, z których trzy to odmiany polipropylenu, natomiast pozostałe dwa to poliwęglan i poliamid. Tworzywa te zostały dokładniej scharakteryzowane w dalszej części niniejszego opracowania.

Czynnikami analizowanymi po wykonaniu symulacji, które można potraktować jako czynniki badane, które ulegały zmianie z powodu odmiennych właściwości tworzyw zastosowanych wirtualnie jako materiał do wytworzenia części strzykawki były: czas fazy wtrysku, czas fazy docisku, czas chłodzenia wypraski w formie, maksymalne ciśnienie w formie, natężenie przepływu tworzywa, siła zamykania formy, skurcz i wypaczenie w poszczególnych osiach oraz skurcz średni.

Część czynników, których dotyczyła analiza wyników stanowiły dane, które były obliczane przez program komputerowy Cadmould 3D-F na początku jako dane wstępne – były nimi na przykład czasy fazy wtrysku, fazy docisku i czasu chłodzenia, które zostały wyznaczone na podstawie modeli matematycznych uwzględniających właściwości przetwórcze konkretnego tworzywa oraz właści-

wości modelu wypraski. Teoretycznie można te wstępne dane dotyczące parametrów technologicznych procesu wtryskiwania modyfikować (na przykład wydłużyć czas docisku albo skrócić czas chłodzenia) przez rozpoczęciem właściwej symulacji wypełniania gniazda formującego tworzywem, fazy docisku i chłodzenia wypraski, dążąc do uzyskania satysfakcjonujących wyników końcowych (na przykład zminimalizowania skurczu wtryskowego), natomiast na potrzeby zrealizowania celu pracy dyplomowej przyjęto, że parametry procesu wtryskiwania otrzymane na podstawie obliczeń wstępnych przy domyślnych ustawieniach programu Cadmould w module obliczeniowym „Process Parameters” również będą traktowane jako wyniki, na podstawie których dokona się wyboru tworzywa najbardziej przydatnego do wykonania analizowanej strzykawki medycznej.

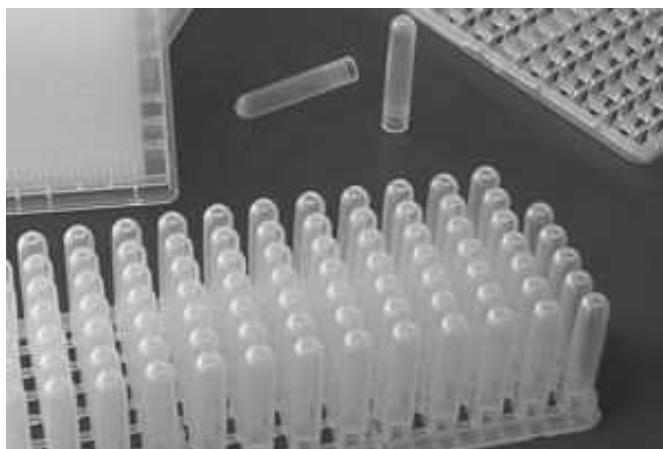
Tworzywa zastosowane w symulacji komputerowej

Symulacja została wykonana dla dwóch części strzykawki oraz dla pięciu rodzajów tworzyw, z których trzy to odmiany polipropylenu, natomiast pozostałe dwa to poliwęglan i poliamid. Wykorzystano następujące tworzywa: polipropylen PP1013H1 firmy ExxonMobil™, polipropylen BORMED RF830MO firmy Borealis, poliwęglan CALIBRE 303 22 firmy Styron EUR, polipropylen PURELL HP 570 R firmy Lyondell Basell oraz poliamid RILSAN BMN O TLD firmy Arkema. Wszystkie z wybranych tworzyw mają zastosowanie w medycynie lub farmacji, ponadto właściwości mechaniczne, cieplne i przetwórcze każdego z nich były zdefiniowane w bazie danych Cadmould Material Data Base programu Cadmould 3D-F, dzięki czemu możliwe było wykonanie symulacji komputerowej. Wybrane właściwości poszczególnych tworzyw zostały przedstawione w tabelach od 3 do 7 oraz na wykresach wyeksportowanych z programu Cadmould 3D-F, znajdujących się na rysunkach od 6 do 15.

Odmiana homopolimerowa polipropylenu [5] ExxonMobil™ PP1013H1 została opracowana specjalnie na potrzeby rynku farmaceutycznego i jest używana najczęściej do produkcji materiałów medycznych, takich jak strzykawki, inhalatory i pompy, do produkcji opakowań, np. pudełek, zamknięć i dozowników. Dodatkowo znajduje zastosowanie w sektorze badań laboratoryjnych i diagnostycznych. Zgodnie ze specjalnymi wysokimi wymaganiami dotyczącymi higieny odmiana ta nadaje się do sterylizacji z użyciem pary lub tlenu etyleny.

Rodzinę tworzyw Bormed™ [5], w skład której wchodzi specjalistyczne tworzywa poliolefinowe (polipropylen) do zastosowań medycznych, wytwarzane i kontrolowane w warunkach ściśle spełniających odpowiednie wymogi i przeznaczone do produkcji formowanych wtryskowo i rodmuchowo elementów sprzętu medycznego oraz opakowań farmaceutycznych. Tworzywa te mogą być stosowane np. do produkcji strzykawek jednorazowego użytku, piast igieł, cewników, butelek do roztworów do żywienia pozajelitowego, a także torebek

i ampulek do sterylnych płynów infuzyjnych. Poliolefiny Bormed posiadają wszystkie właściwości wymagane przez rynek medyczny, od odporności na promieniowanie przez przezroczystość i obojętność chemiczną, po wynoszącą 121°C temperaturę sterylizacji i wysoką odporność na korozję naprężeniową.



Rys. 5. Przykłady wyrobów dla branży medycznej wykonanych z PP Purell HP570M

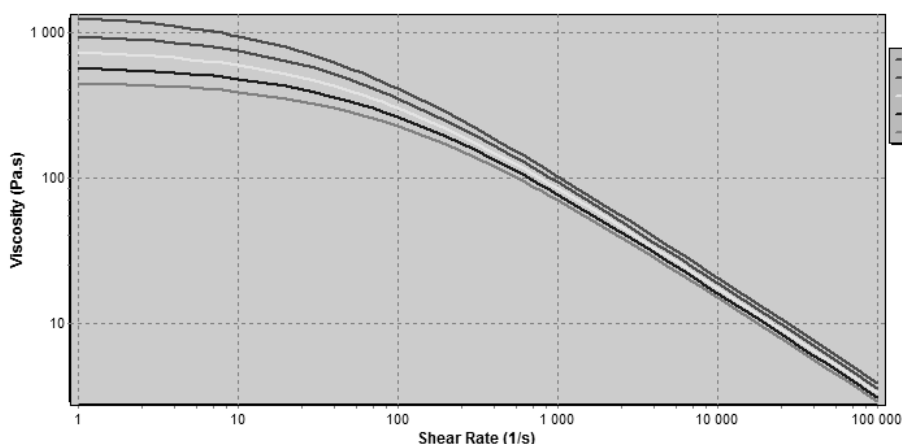
Tabela 3. Wybrane właściwości tworzywa PP 1031 H1 z bazy danych programu Cadmould 3D-F [23]

Typ tworzywa	Polipropylen	
Nazwa tworzywa	PP 1031 H1	
Dostawca	EXXON MOBIL CHEMICAL	
Gęstość w temp. pokojowej	910	kg/m ³
Gęstość w temp. przetwórstwa	735	kg/m ³
Moduł Younga	1340	MPa
Ciepło właściwe	2789	J/kg°C
Przewodność cieplna	0,16	W/(m·K)
Efektywna dyfuzyjność termiczna	0,07805	mm ² /s
Temperatura degradacji cieplnej	290	°C
Temperatura zaniku płynięcia	140	°C
Zalecane parametry cieplne dla procesu wtryskiwania		
Zakres temperatury wtrysku	204-238	W/(m·K)
Zakres temperatury formy	15-49	mm ² /s
Temperatura usunięcia wypraski	106	°C

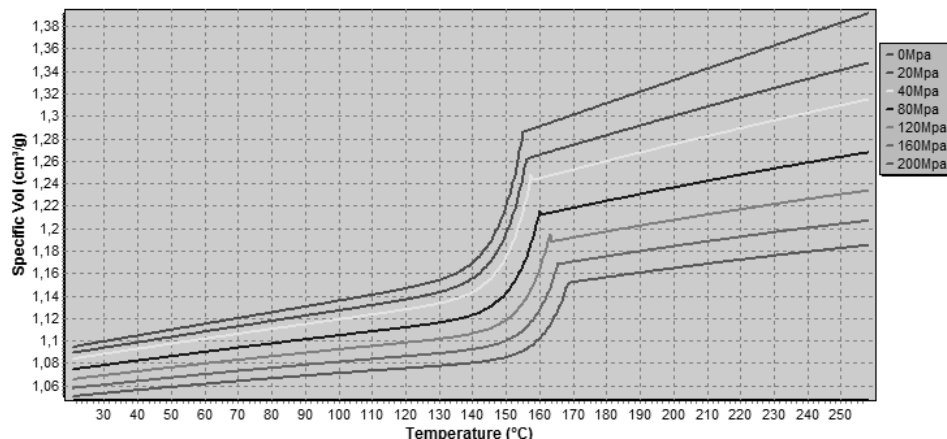
Poliwęglan Calibre 303-22 charakteryzuje się bardzo dobrymi właściwościami wtryskowymi oraz dużą wytrzymałością mechaniczną oraz cieplną, zawierając dodatkowo stabilizator UV.

Polipropyleny z rodziny Purell [5] stosowane w medycynie i farmacji – Purell HP570M jest stosowany do szerokiego zakresu wyrobów medycznych, takich jak urządzenia medyczne, pojemniki, zamknięcia i wyposażenie diagnostyczne, natomiast Purell HP570R jest wszechstronnym materiałem, stosowanym na trzyczęściowe strzykawki, wyroby diagnostyczne, pojemniki i systemy dystrybucji leków.

Poliamid RILSAN BMN O TLD należy do grupy poliamidów PA11, z uwagi na dobre właściwości reologiczne przeznaczonym do wtryskiwania. Poliamidy Rilsan® PA 11 charakteryzują się specjalną jakością i spełniają wiele warunków biokompatybilności, są odpowiednie do zastosowań w elementach urządzeń medycznych [5].



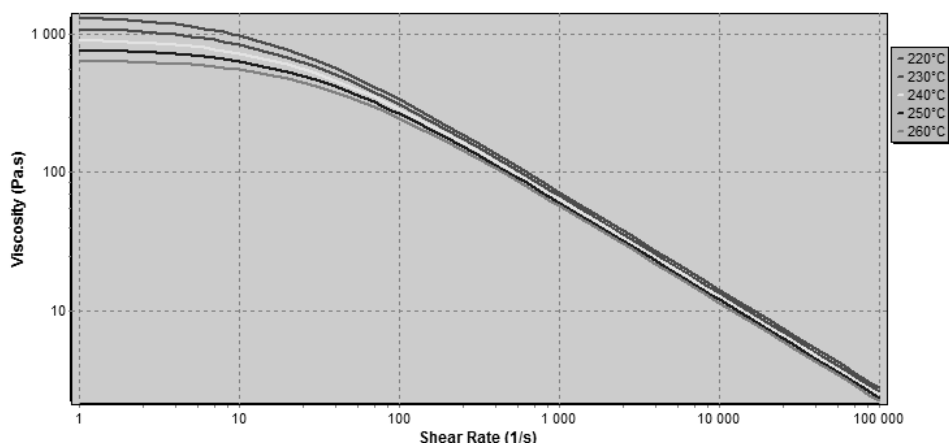
Rys.6. Wykres zależności lepkości tworzywa PP 1031 H1 od szybkości ścinania [23]



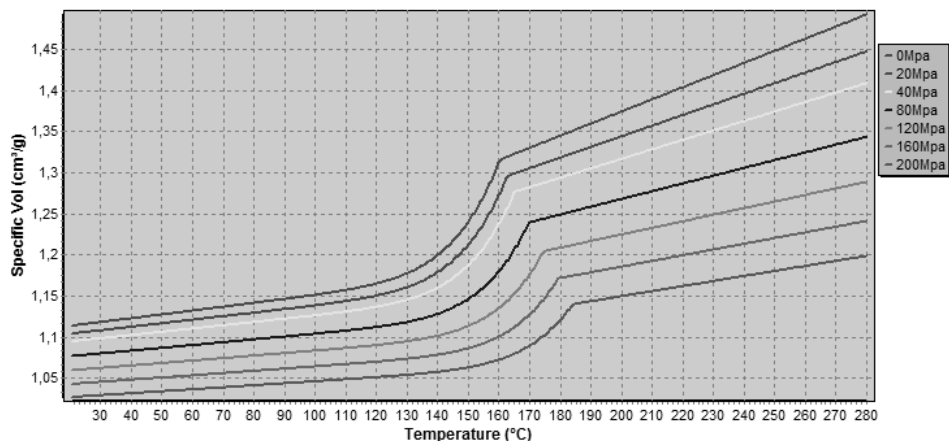
Rys. 7. Wykres zależności objętości właściwej tworzywa PP 1031 H1 od temperatury tworzywa i ciśnienia [23]

Tabela 4. Wybrane właściwości tworzywa BORMED RF830MO, baza danych Cadmould 3D-F [23]

Typ tworzywa	Polipropylen	
Nazwa tworzywa	BORMED RF830MO	
Dostawca	BOREALIS	
Gęstość w temp. pokojowej	905	kg/m ³
Gęstość w temp. przetwórstwa	739	kg/m ³
Moduł Younga	1150	MPa
Ciepło właściwe	2459	J/kg°C
Przewodność cieplna	0,159	W/(m·K)
Efektywna dyfuzyjność termiczna	0,08749	mm ² /s
Temperatura degradacji cieplnej	-	°C
Temperatura zaniku płynięcia	153	°C
Zalecane parametry cieplne dla procesu wtryskiwania		
Zakres temperatury wtrysku	220-250	W/(m·K)
Zakres temperatury formy	30-40	mm ² /s
Temperatura usunięcia wypraski	110	°C



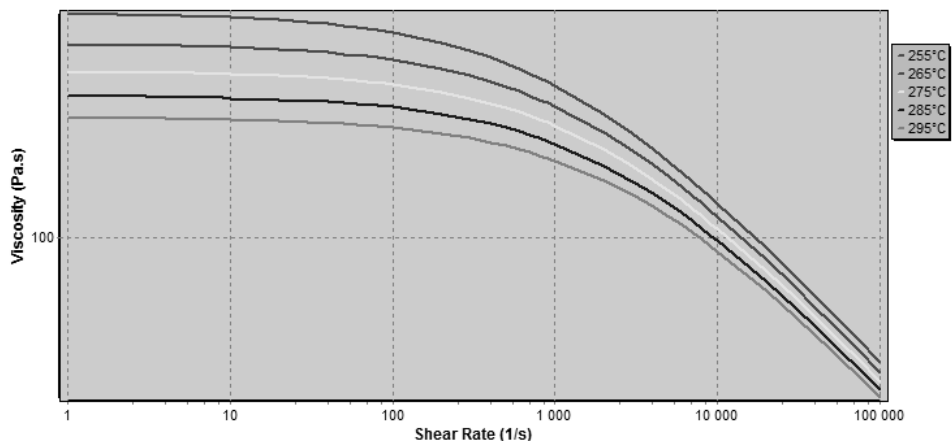
Rys. 8. Wykres zależności lepkości tworzywa BORMED RF830MO od szybkości ścinania [23]



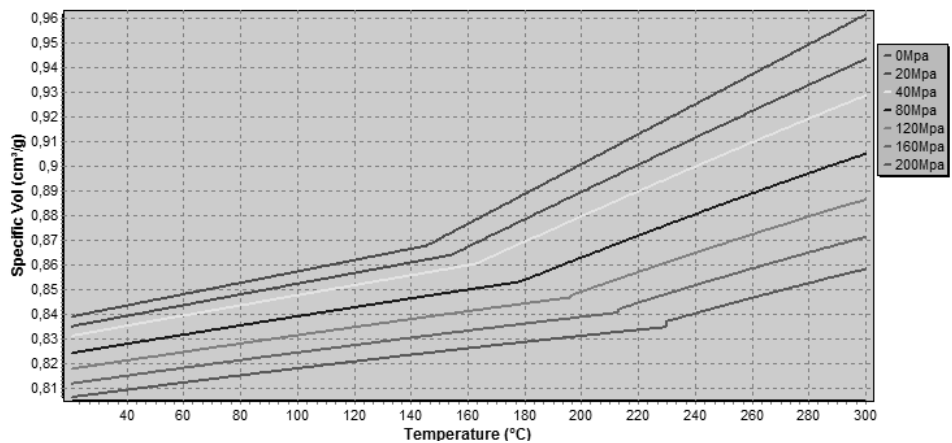
Rys. 9. Wykres zależności objętości właściwej tworzywa BORMED RF830MO od temperatury tworzywa i ciśnienia [23]

Tabela 5. Wybrane właściwości tworzywa CALIBRE 303 22, baza danych Cadmould 3D-F [23]

Typ tworzywa	Poliwęglan	
Nazwa tworzywa	CALIBRE 303 22	
Dostawca	STYRON EUR	
Gęstość w temp. pokojowej	1200	kg/m ³
Gęstość w temp. przetwórstwa	1056,7	kg/m ³
Moduł Younga	2692	MPa
Ciepło właściwe	2181	J/kg°C
Przewodność cieplna	0,2659	W/(m·K)
Efektywna dyfuzyjność termiczna	0,11537	mm ² /s
Temperatura degradacji cieplnej	-	°C
Temperatura zaniku płynięcia	150	°C
Zalecane parametry cieplne dla procesu wtryskiwania		
Zakres temperatury wtrysku	265-280	W/(m·K)
Zakres temperatury formy	70-100	mm ² /s
Temperatura usunięcia wypraski	137	°C



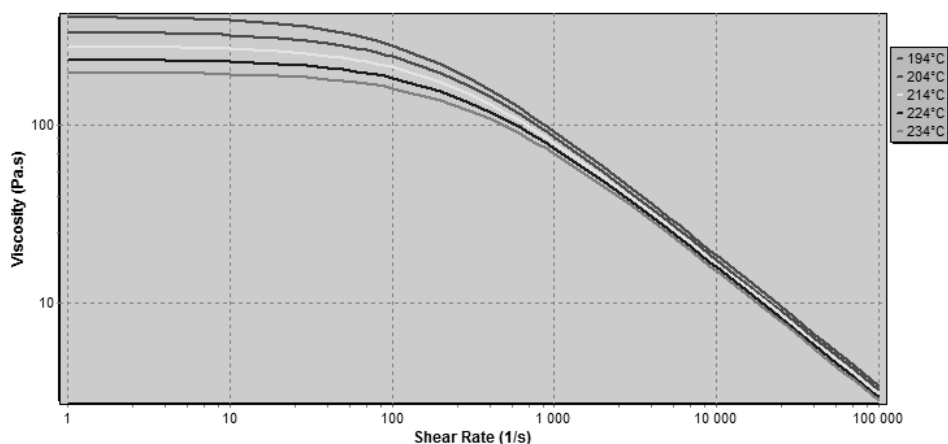
Rys. 10. Wykres zależności lepkości tworzywa CALIBRE 303 22 od szybkości ścinania [23]



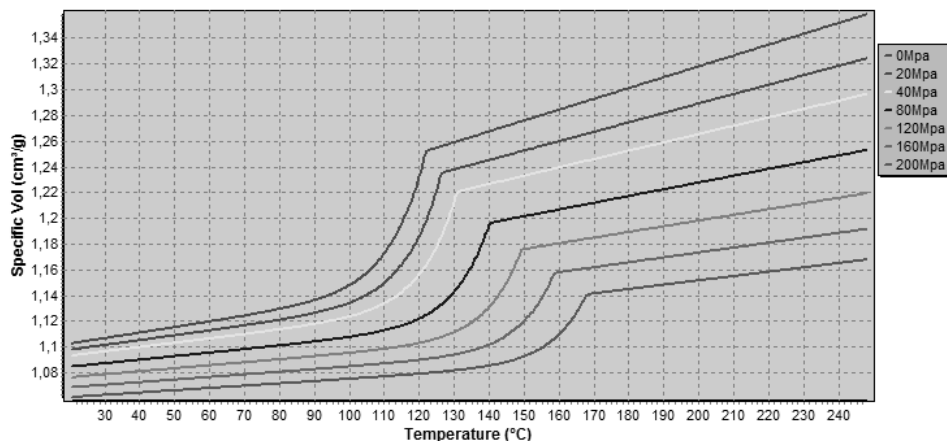
Rys. 11. Wykres zależności objętości właściwej tworzywa CALIBRE 303 22 od temperatury tworzywa i ciśnienia [23]

Tabela 6. Wybrane właściwości tworzywa PURELL HP 570 R, baza danych Cadmould 3D-F [23]

Typ tworzywa	Polipropylen	
Nazwa tworzywa	PURELL HP 570 R	
Dostawca	LYONDELLBASELL	
Gęstość w temp. pokojowej	900	kg/m ³
Gęstość w temp. przetwórstwa	736	kg/m ³
Moduł Younga	1500	MPa
Ciepło właściwe	2758	J/kg°C
Przewodność cieplna	0,162	W/(m·K)
Efektywna dyfuzyjność termiczna	0,07980	mm ² /s
Temperatura degradacji cieplnej	-	°C
Temperatura zaniku płynięcia	122	°C
Zalecane parametry cieplne dla procesu wtryskiwania		
Zakres temperatury wtrysku	200-228	W/(m·K)
Zakres temperatury formy	30-50	mm ² /s
Temperatura usunięcia wypraski	100	°C



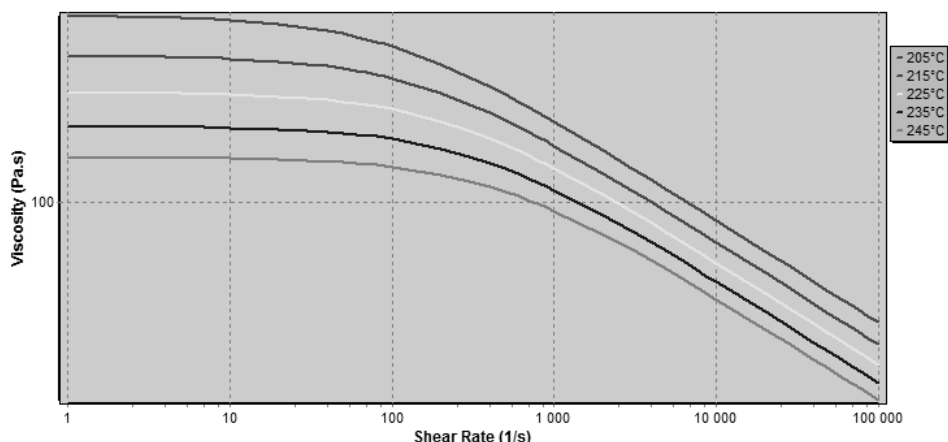
Rys. 12. Wykres zależności lepkości tworzywa PURELL HP 570 od szybkości ścinania [23]



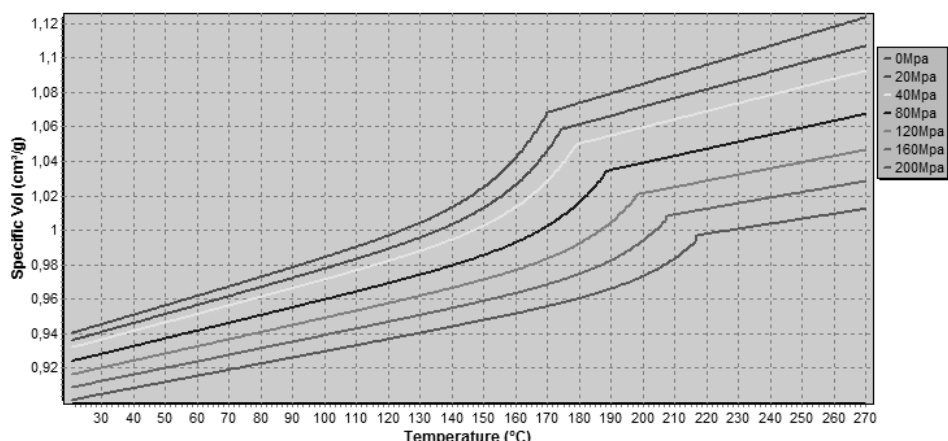
Rys. 13. Wykres zależności objętości właściwej tworzywa PURELL HP 570 od temperatury tworzywa i ciśnienia [23]

Tabela 7. Wybrane właściwości tworzywa RILSAN BMN O TLD baza danych Cadmould 3D-F [23]

Typ tworzywa	Poliamid	
Nazwa tworzywa	RILSAN BMN O TLD	
Dostawca	ARKEMA	
Gęstość w temp. pokojowej	1060	kg/m ³
Gęstość w temp. przetwórstwa	909,82	kg/m ³
Moduł Younga	1490	MPa
Ciepło właściwe	2730	J/kg°C
Przewodność cieplna	0,2535	W/(m·K)
Efektywna dyfuzyjność termiczna	0,1021	mm ² /s
Temperatura degradacji cieplnej	-	°C
Temperatura zaniku płynięcia	165	°C
Zalecane parametry cieplne dla procesu wtryskiwania		
Zakres temperatury wtrysku	200-250	W/(m·K)
Zakres temperatury formy	40-80	mm ² /s
Temperatura usunięcia wypraski	145	°C



Rys. 14. Wykres zależności lepkości tworzywa RILSAN BMN O TLD od szybkości ścinania [23]



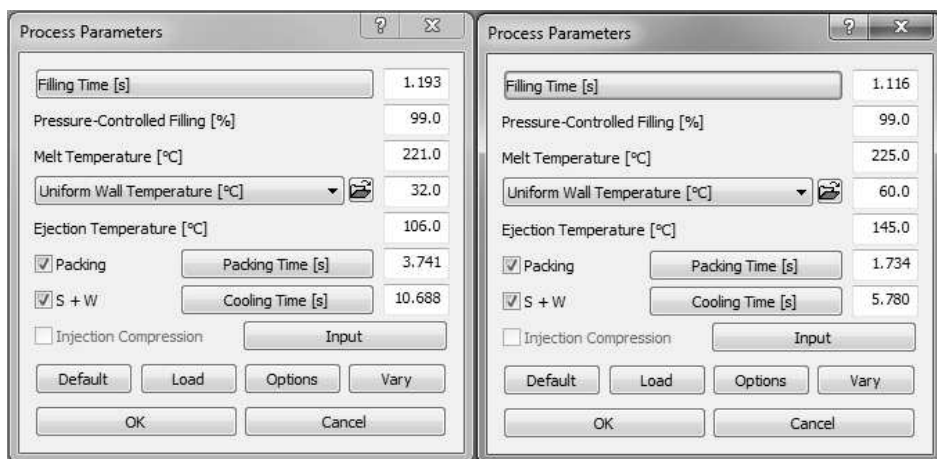
Rys. 15. Wykres zależności objętości właściwej tworzywa RILSAN BMN O TLD od temperatury tworzywa i ciśnienia [23]

Wyniki symulacji komputerowej

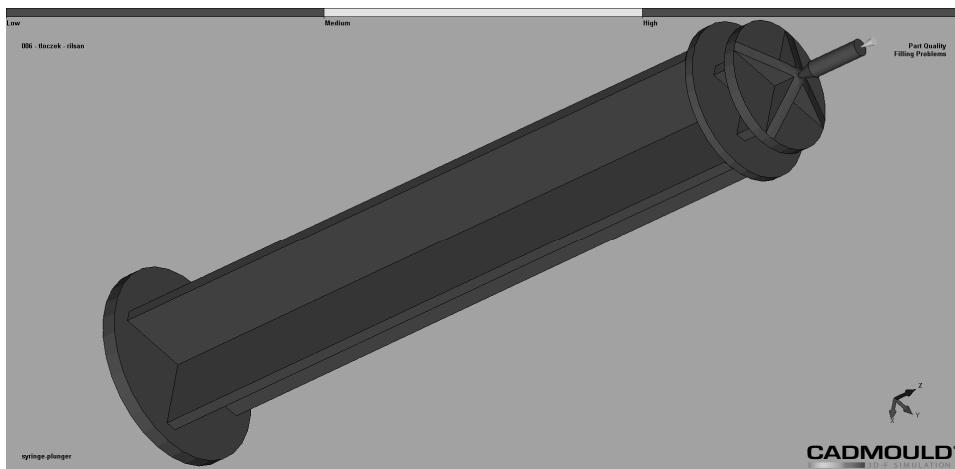
Oprogramowanie Cadmould 3D-F przedstawia rezultaty symulacji w postaci graficznej oraz w plikach tekstowych. Zapis wyników w postaci graficznej najczęściej jest pokazany jako mapa kolorów naniesiona na powierzchnię wypraski. Do każdego koloru przypisana jest poszczególna wartość, przy czym kolor niebieski w skali reprezentuje najczęściej wartość najmniejszą, a kolor czerwony największą. Skala wartości kolorów przedstawiona jest zawsze w górze obszaru roboczego okna Cadmould 3D-F, wraz z opisem pokazanej wartości fizycznej oraz jej jednostką miary. Niektóre wyniki w formie graficznej są przedstawione jako wykresy, które można przywołać klikając w polecenie „Diagrams”. Poza mapami kolorów i wykresami, które można zapisać korzystając z odpowiednich

opcji programu Cadmould, program ten generuje dodatkowo szereg plików tekstowych, które można odczytać bezpośrednio w systemie Windows bądź wykorzystać zawarte w nich dane na przykład w arkuszu kalkulacyjnym.

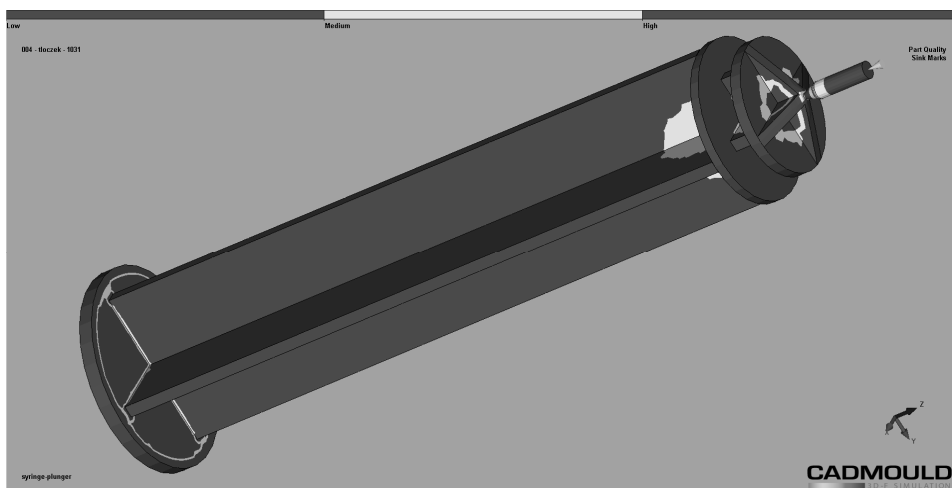
W niniejszym artykule zamieszczono tylko wybrane przykłady ilustrujące niektóre wyniki przeprowadzonych symulacji, w celu przedstawienia informacji stanowiących podstawę do oceny przydatności poszczególnych tworzyw do wykonania obu części strzykawki. Przedstawienie wszystkich wyników dla poszczególnych tworzyw, odniesionych do korpusu i tłoczka byłoby zbyt obszerne, bowiem łączna ilość danych opisujących wszystkie wykonane symulacje sięga 1GB.



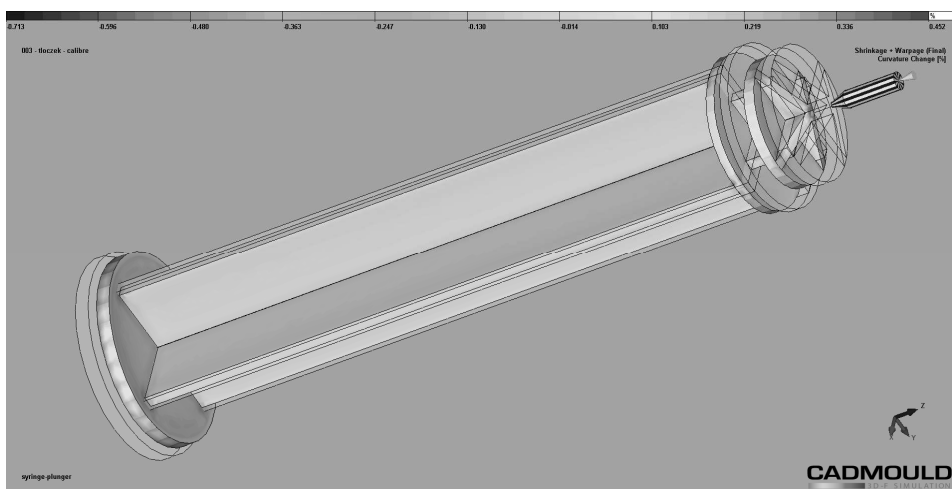
Rys. 16. Wygląd okna modułu „Process Parameters” i przykładowe wyniki: po lewej dla tworzywa PP 1031 H1, po prawej dla tworzywa RILSAN BMN O TLD



Rys. 17. Graficzne przedstawienie wyniku modelowania problemów z wypełnianiem gniazda formującego - tworzywo RILSAN BMN O TLD



Rys. 18. Graficzne przedstawienie wyniku modelowania obszarów, gdzie mogą wystąpić zapadnięcia powierzchni wypraski w postaci tłoczka – tworzywo PP 1031 H1

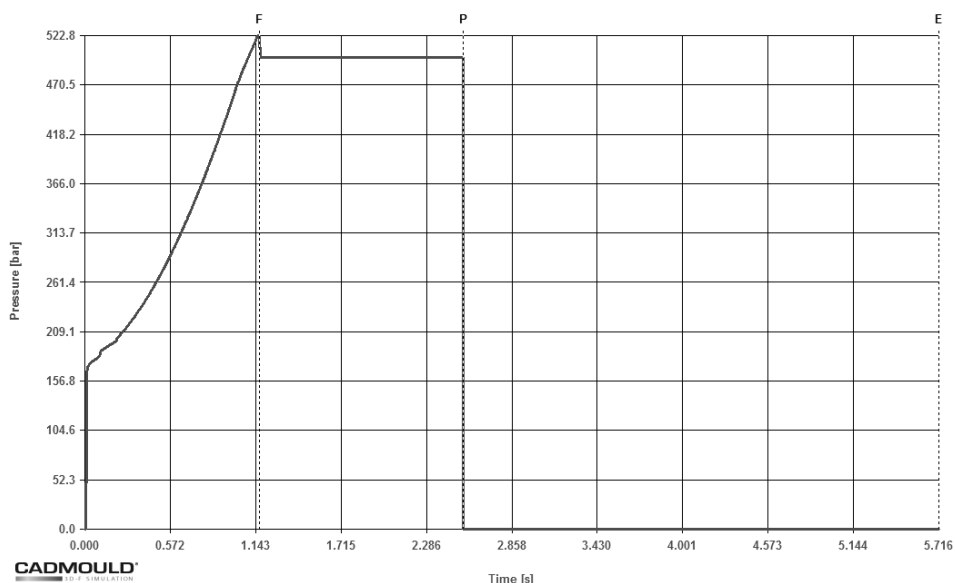


Rys. 19. Graficzna interpretacja analizy stopnia zniekształcenia wypraski w stosunku do gniazda formującego – tworzywo CALIBRE 303 22

Na rys. 17 oraz rys. 18 zostały przedstawione graficznie miejsca, w których mogły wystąpić problemy z wypełnieniem gniazda formy (moduł *Filing Problems*) oraz miejsca, gdzie można spodziewać się obszarów zapadnięć powierzchni (moduł *Sink Marks*) w przypadku tłoczka strzykawki. Prawdopodobieństwo powstania tych wad wypraski zostało podzielone na trzy grupy – na zielono zaznaczono obszar, gdzie ryzyko powstania zapadnięcia powierzchni wypraski lub niewypełnienia gniazda formy jest znikome, kolorem żółtym oznaczono obszary wypraski, gdzie prawdopodobieństwo wystąpienia wymienionych

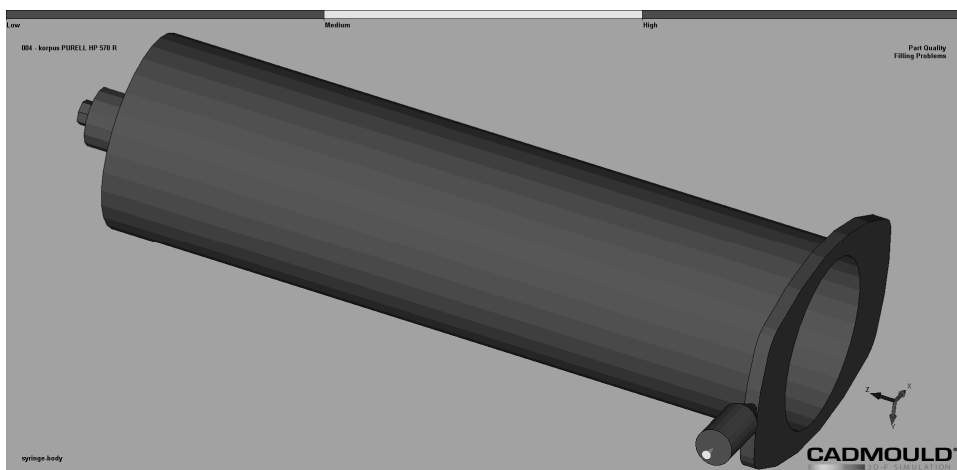
wcześniej wad jest średnie, natomiast na czerwono są zaznaczone obszary, gdzie ryzyko powstania tych wad jest bardzo duże.

Na rys. 19 przedstawiono graficzną interpretację analizy stopnia zniekształcenia wypraski w stosunku do gniazda formującego (moduł *Curvature Change*). Widoczna na rysunku różnica między obrysem gniazda formującego a zdeformowanym kształtem wypraski jest specjalnie powiększona w celu lepszej wizualizacji kształtu i kierunków zniekształcenia, w rzeczywistości stopień zniekształcenia waha się w przedziale od -0,712% do 0,452% i w skali rzeczywistej byłby trudny do pokazania.

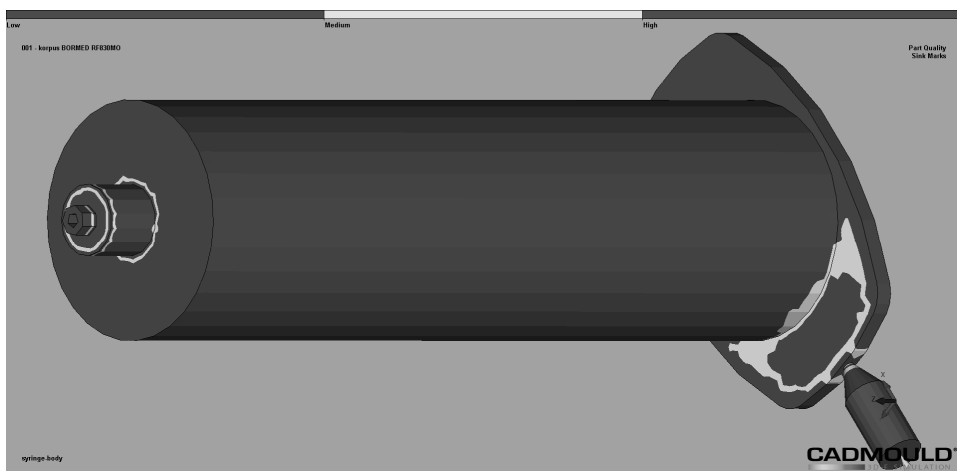


Rys. 20. Wykres przedstawiający zmianę ciśnienia wtryskiwania w funkcji czasu podczas wykonywania tłoczka – tworzywo RILSAN BMN O TLD

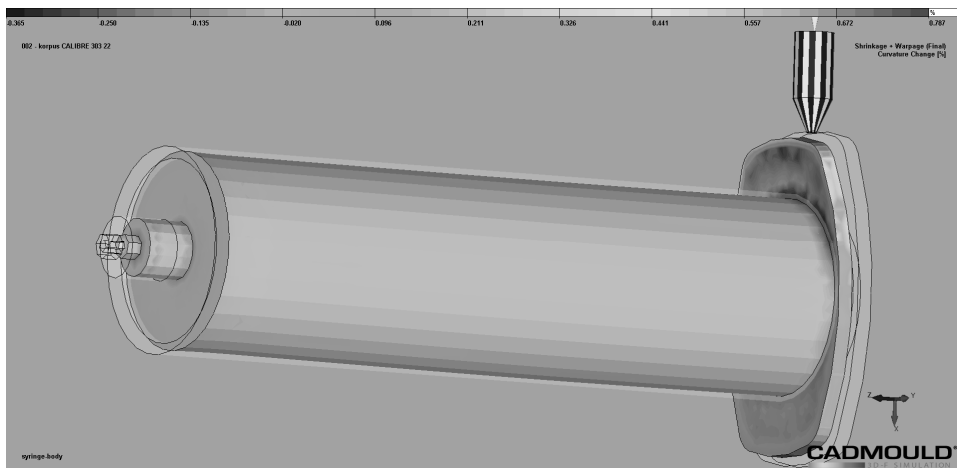
Na rys. 20 na wykresie linia F oznacza koniec fazy wtrysku (*Filling*), linia P oznacza koniec fazy docisku (*Packing*), natomiast linia E oznacza usunięcie wypraski z formy (*Ejection*).



Rys. 21. Graficzne przedstawienie wyniku modelowania problemów z wypełnianiem gniazda formującego - tworzywo PURELL HP 570 R

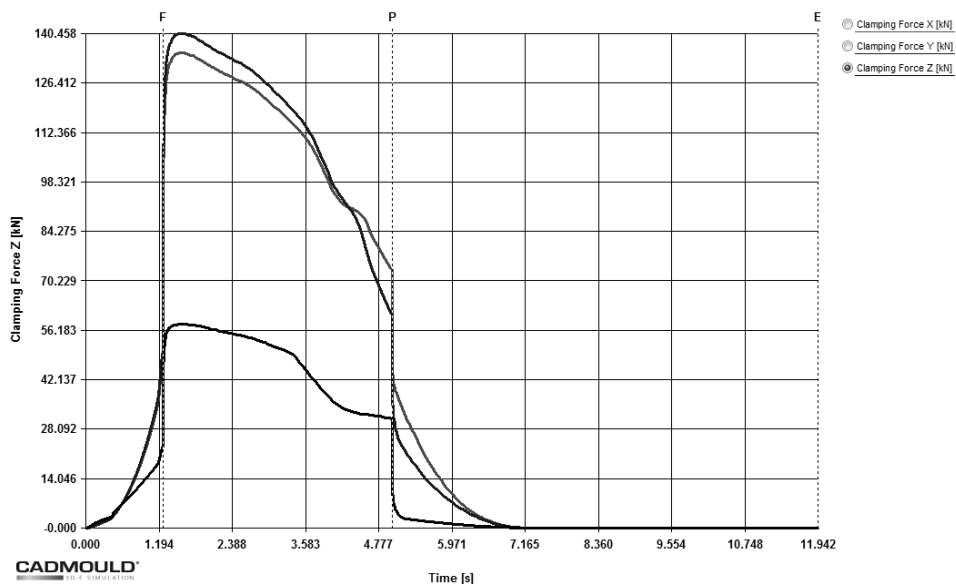


Rys. 22. Graficzne przedstawienie wyniku modelowania obszarów, gdzie mogą wystąpić zapadnięcia powierzchni wypraski w postaci korpusu – tworzywo BORMED RF830MO



Rys. 23. Graficzna interpretacja analizy stopnia zniekształcenia wypraski w stosunku do gniazda formującego – tworzywo CALIBRE 303 22

Na rys. 21, rys. 22 i rys. 23 pokazano dla porównania wyniki symulacji z modułów *Filing Problems*, *Sink Marks* oraz *Curvature Change* odnoszące się dla korpusu strzykawki.



Rys. 24. Wykres przedstawiający zmianę siły zamykania formy w trzech osiach w funkcji czasu podczas wykonywania korpusu strzykawki – tworzywo PP 1031 H1

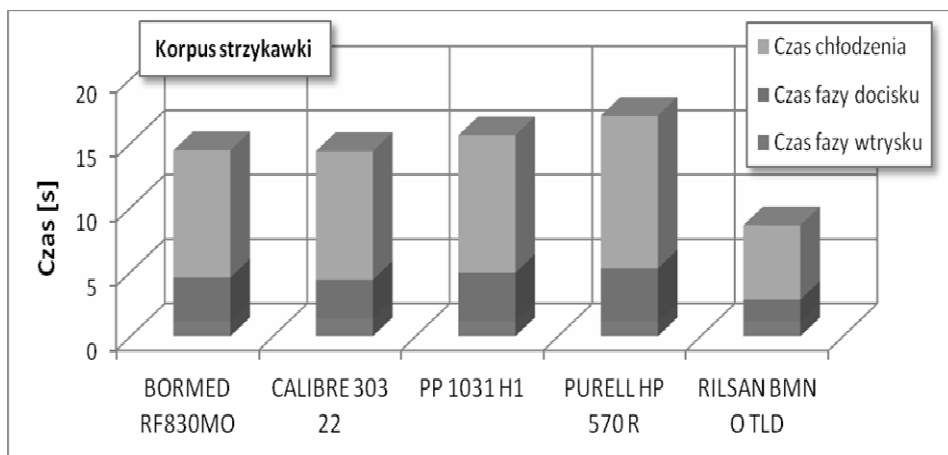
Na rys. 24 na wykresie linia F oznacza koniec fazy wtrysku (*Filling*), linia P oznacza koniec fazy docisku (*Packing*), natomiast linia E oznacza usunięcie wypraski z formy (*Ejection*).

Wyniki symulacji, na podstawie których oceniano, które z tworzyw użytych podczas modelowania numerycznego pozwolą na otrzymanie strzykawki o najlepszych właściwościach użytkowych, przy zachowaniu właściwej wydajności procesu wytwarzania zostały zebrane w tabelach o numerach od 8 do 11. Zestawiono w nich czynniki charakteryzujące parametry procesu: czas fazy wtrysku, czas fazy docisku oraz czas chłodzenia (tabela 8), czynniki związane z przebiegiem procesu: natężenie przepływu tworzywa, maksymalne ciśnienie wtrysku, maksymalną prędkość ścinania i maksymalną temperaturę tworzywa (tabela 9), czynniki charakteryzujące maszynę: siłę zamykania w poszczególnych osiach wtryskarki (tabela 10) oraz czynniki charakteryzujące geometrię wypraski: maksymalne wartości skurczu całkowitego, wartości deformacji, zniekształcenia i zmiany krzywizny (tabela 11). Poszczególnym analizowanym na podstawie wyników symulacji wielkościom opisującym proces wtrysku lub właściwości wypraski przypisano odpowiednie wagi, co pozwoliło ocenić, które z wybranych do symulacji tworzyw przeznaczonych do zastosowania w branży medycznej będzie nadawało się najlepiej do wykonania strzykawki.

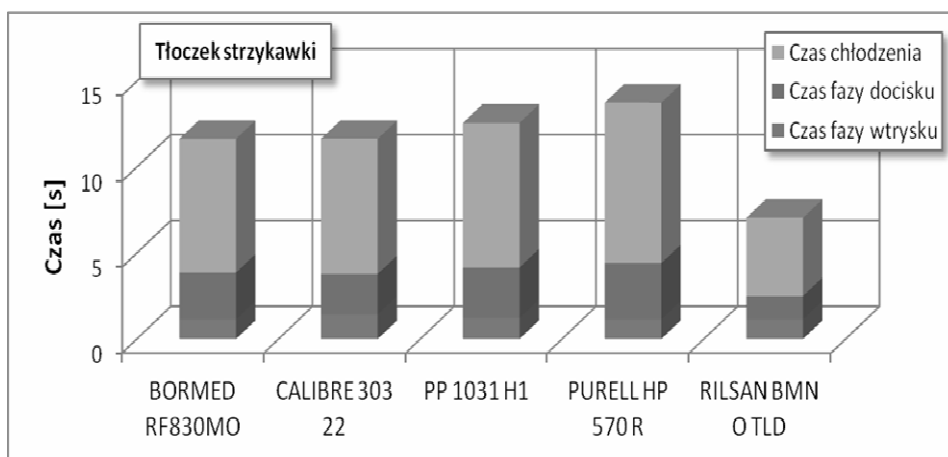
Tabela 8. Wartości wybranych czynników charakteryzujących parametry procesu wtryskiwania dla obu elementów strzykawki – korpusu i tłoczka

Rodzaj tworzywa		BORMED RF830MO	CALIBRE 303 22	PP 1031 H1	PURELL HP 570 R	RILSAN BMN O TLD
Korpus strzykawki	Czas fazy wtrysku [s]	1,109	1,398	1,193	1,116	1,116
	Czas fazy docisku [s]	3,461	2,998	3,741	4,154	1,734
	Czas chłodzenia [s]	9,888	9,992	10,688	11,869	5,780
Tłoczek strzykawki	Czas fazy wtrysku [s]	1,138	1,426	1,217	1,138	1,138
	Czas fazy docisku [s]	2,723	2,359	2,943	3,269	1,364
	Czas chłodzenia [s]	7,781	7,862	8,41	9,339	4,548

Na rysunkach 25 i 26 przedstawiono w postaci graficznej wyniki z tabeli 8 – łączny czas, jaki zajmują faza wtrysku, faza docisku oraz chłodzenie wypraski w formie, w odniesieniu do poszczególnych tworzyw użytych w symulacji.



Rys. 25. Porównanie zsumowanych czasów: fazy wtrysku, fazy docisku oraz chłodzenia dla poszczególnych tworzyw – symulacja wykonania korpusu strzykawki

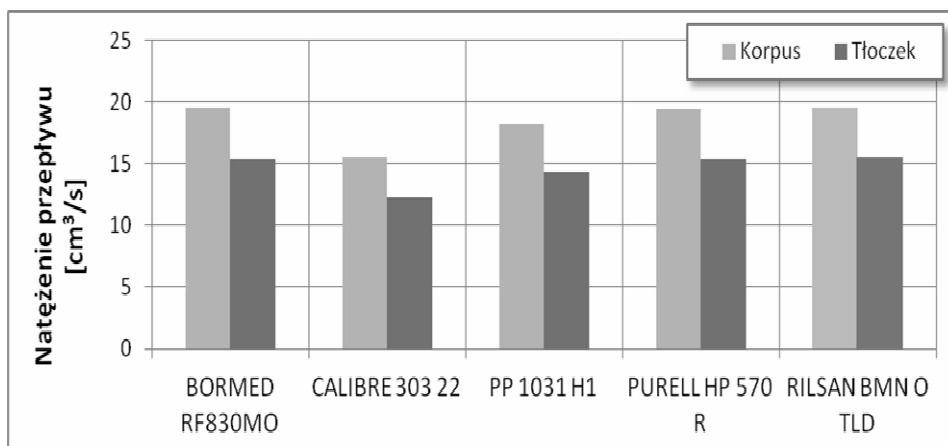


Rys. 26. Porównanie zsumowanych czasów: fazy wtrysku, fazy docisku oraz chłodzenia dla poszczególnych tworzyw – symulacja wykonania tłoczka strzykawki

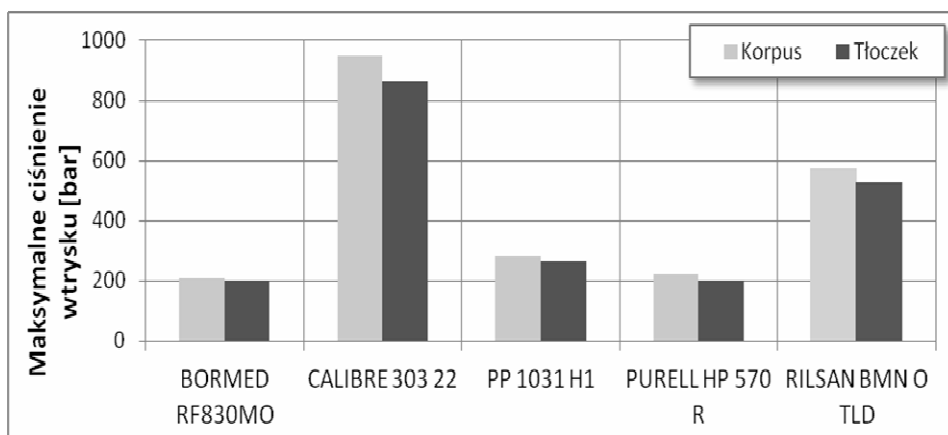
Tabela 9. Wartości wybranych czynników związanych z przebiegiem procesu wtryskiwania dla obu elementów strzykawki – korpusu i tłoczka

Rodzaj tworzywa		BORMED RF830MO	CALIBRE 303 22	PP 1031 H1	PURELL HP 570 R	RILSAN BMN O TLD
Korpus strzykawki	Natężenie przepływu [cm ³ /s]	19,525	15,489	18,151	19,403	19,403
	Maksymalne ciśnienie wtrysku [bar]	209,5	946,9	283,0	221,3	572,0
	Maksymalna prędkość ścinania [1/s]	44012	35122	40890	43776	43896
	Maksymalna temperatura w fazie wtrysku [°C]	242,3	299,7	225,1	217,2	238,7
Tłoczek strzykawki	Natężenie przepływu [cm ³ /s]	15,392	12,283	14,393	15,392	15,392
	Maksymalne ciśnienie wtrysku [bar]	198,6	865,5	265,1	200,1	522,8
	Maksymalna prędkość ścinania [1/s]	112253	91004	105016	112388	113032
	Maksymalna temperatura w fazie wtrysku [°C]	244,1	303,1	227,4	219,3	246,9

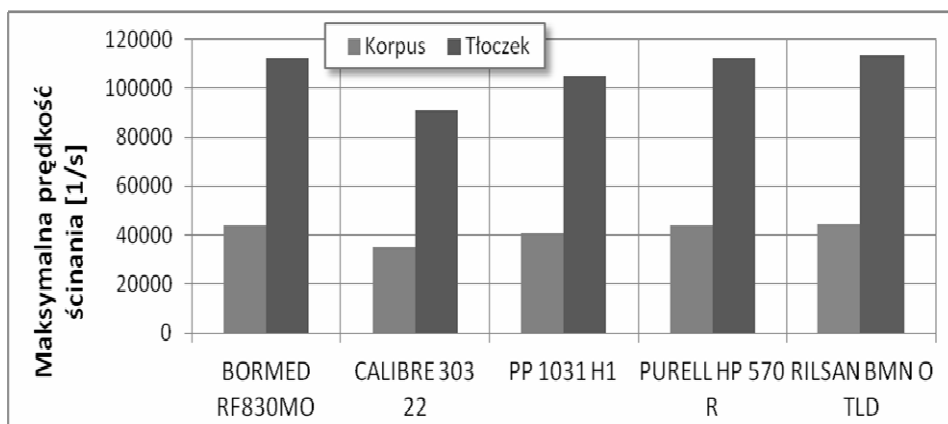
Na rysunkach od 27 do 30 przedstawiono w postaci graficznej wyniki z tabeli 9 – maksymalne natężenie przepływu, maksymalne ciśnienie wtrysku, maksymalną prędkość ścinania oraz maksymalną temperaturę w fazie wtrysku, w odniesieniu do poszczególnych tworzyw użytych w symulacji.



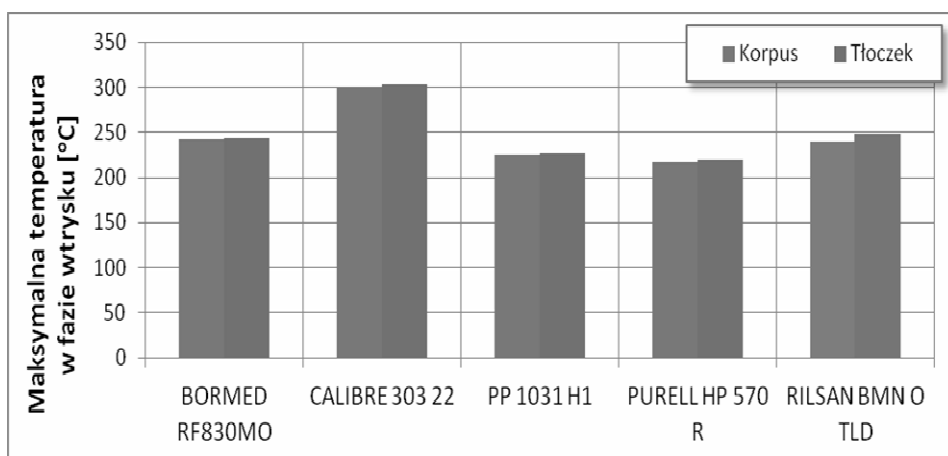
Rys. 27. Porównanie natężenia przepływu dla poszczególnych tworzyw podczas wypełniania gniazda formy wtryskowej – dla korpusu i tłoczka strzykawki



Rys.28. Porównanie maksymalnego ciśnienia wtrysku dla poszczególnych tworzyw podczas wypełniania gniazda formy wtryskowej – dla korpusu i tłoczka strzykawki



Rys. 29. Porównanie maksymalnej prędkości ścinania dla poszczególnych tworzyw podczas wypełniania gniazda formy wtryskowej – dla korpusu i tłoczka strzykawki

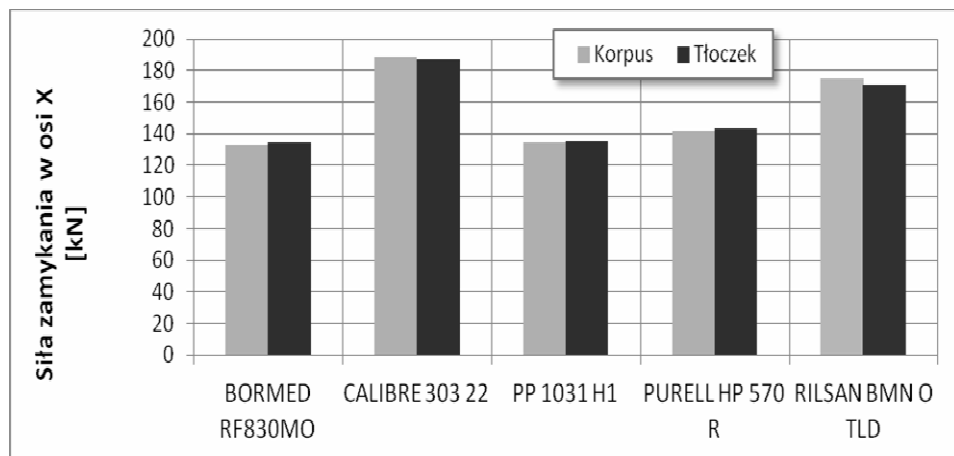


Rys. 30. Porównanie maksymalnej temperatury tworzywa w fazie wtrysku dla poszczególnych tworzyw podczas wypełniania gniazda formy wtryskowej – dla korpusu i tłoczka strzykawki

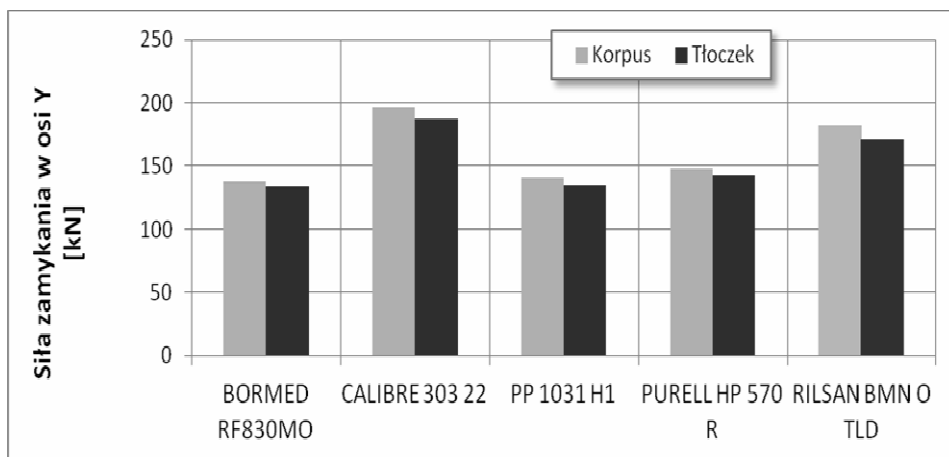
Tabela 10. Wartości wybranych czynników charakteryzujących maszynę związanych z przebiegiem procesu wtryskiwania dla obu elementów strzykawki – korpusu i tłoczka

Rodzaj tworzywa		BORMED RF830MO	CALIBRE 303 22	PP 1031 H1	PURELL HP 570 R	RILSAN BMN O TLD
Korpus strzykawki	Siła zamykania w osi X [kN]	132,7	188,5	134,9	141,8	174,3
	Siła zamykania w osi Y [kN]	138,1	196,3	140,5	147,6	181,6
	Siła zamykania w osi Z [kN]	57,1	80,5	57,9	60,2	74,3
Tłoczek strzykawki	Siła zamykania w osi X [kN]	134,2	187,5	135,6	143,2	170,5
	Siła zamykania w osi Y [kN]	133,7	187,0	135,1	142,8	169,9
	Siła zamykania w osi Z [kN]	33,4	45,6	33,5	34,6	42,7

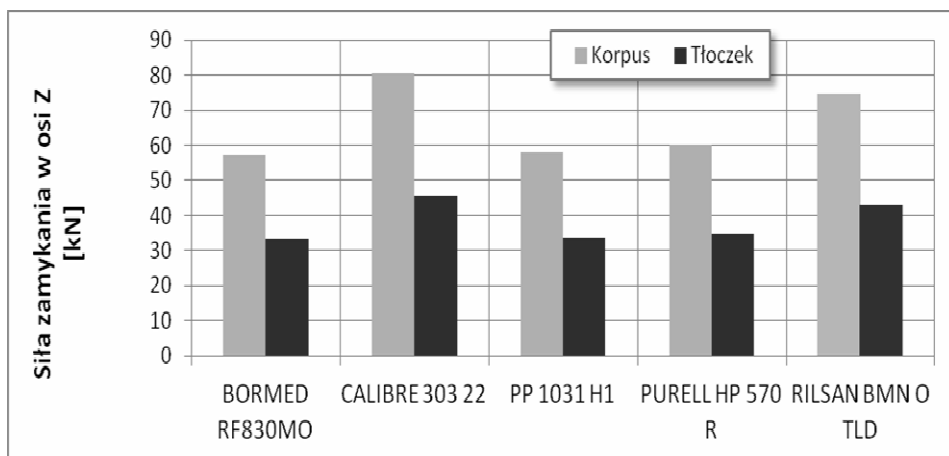
Na rysunkach od 31 do 33 przedstawiono w postaci graficznej wyniki z tabeli 10 – siły działające na formę wtryskową w osiach X, Y oraz Z, w odniesieniu do poszczególnych tworzyw użytych podczas wykonywanych symulacji.



Rys. 31. Porównanie maksymalnej siły w osi X układu współrzędnych formy wtryskowej dla poszczególnych tworzyw – dla korpusu i tłoczka strzykawki



Rys. 32. Porównanie maksymalnej siły w osi Y układu współrzędnych formy wtryskowej dla poszczególnych tworzyw – dla korpusu i tłoczka strzykawki

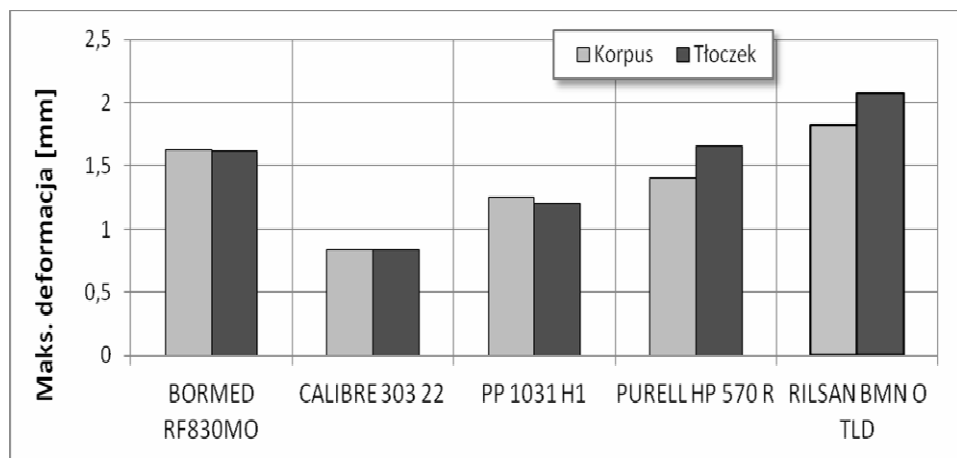


Rys. 33. Porównanie maksymalnej siły w osi Z układu współrzędnych formy wtryskowej dla poszczególnych tworzyw – dla korpusu i tłoczka strzykawki

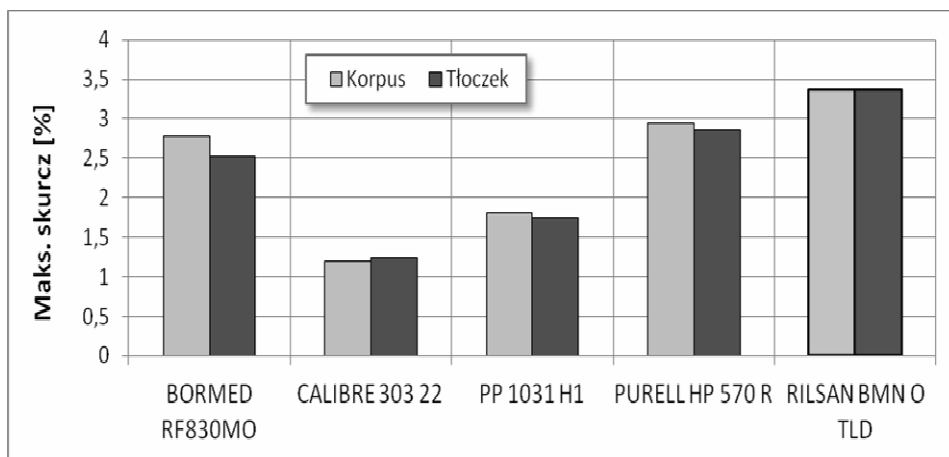
Tabela 11. Wartości wybranych czynników charakteryzujących geometrię wypraski dla obu elementów strzykawki – korpusu i tłoczka

Rodzaj tworzywa		BORMED RF830MO	CALIBRE 303 22	PP 1031 H1	PURELL HP 570 R	RILSAN BMN O TLD
Korpus strzykawki	Maks, deformacja [mm]	1,628	0,841	1,250	1,404	1,809
	Maks, skurcz [%]	2,774	1,197	1,809	2,944	3,354
	Maks, zniekształcenie [mm]	0,823	0,255	0,699	0,551	0,389
	Zmiana krzywizny [%]	-1,525 2,311	-0,365 0,787	-1,293 2,126	-1,121 1,280	-0,379 0,542
Tłoczek strzykawki	Maks, deformacja [mm]	1,618	0,840	1,198	1,655	2,070
	Maks, skurcz [%]	2,519	1,239	1,748	2,866	3,349
	Maks, zniekształcenie [mm]	0,456	0,123	0,375	0,292	0,112
	Zmiana krzywizny [%]	-1,920 1,820	-0,713 0,452	-1,637 1,673	-1,714 1,221	-1,337 0,655

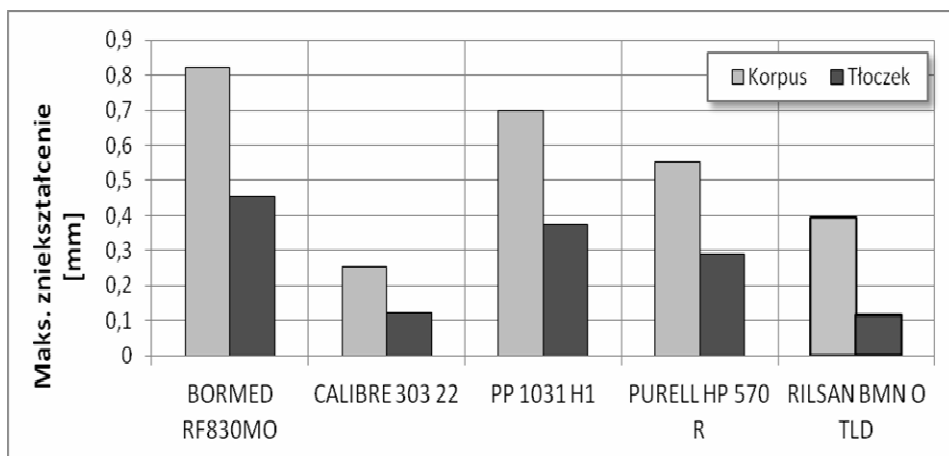
Na rysunkach od 34 do 38 przedstawiono w postaci graficznej wyniki z tabeli 6.11 – maksymalną deformację, maksymalny skurcz, maksymalną deformację oraz procentową zmianę krzywizny w odniesieniu do poszczególnych tworzyw użytych podczas wykonywanych symulacji.



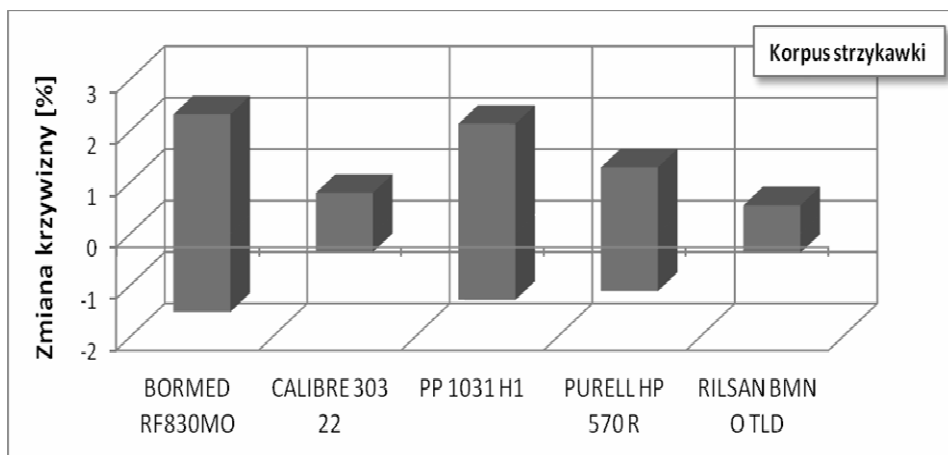
Rys. 34. Porównanie maksymalnej deformacji dla poszczególnych tworzyw – w odniesieniu do korpusu i tłoczka strzykawki



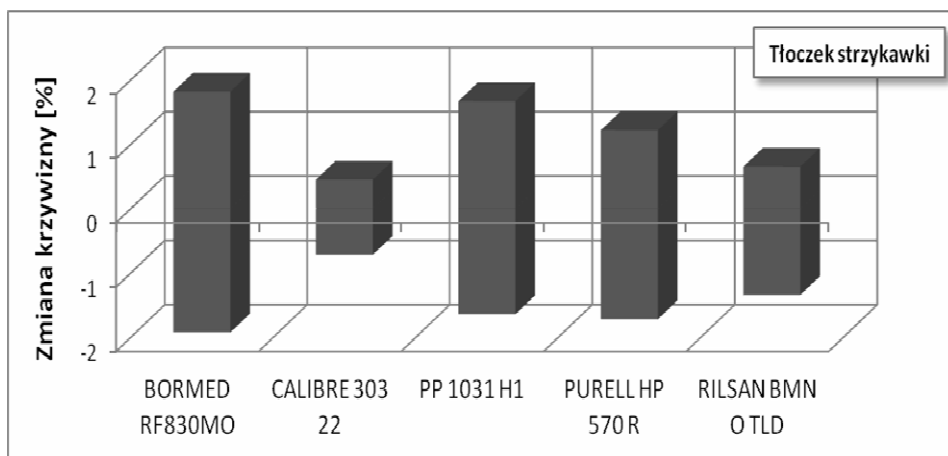
Rys. 35. Porównanie maksymalnego skurczu dla poszczególnych tworzyw – w odniesieniu do korpusu i tłoczka strzykawki



Rys. 36. Porównanie maksymalnego zniekształcenia dla poszczególnych tworzyw – w odniesieniu do korpusu i tłoczka strzykawki



Rys. 37. Porównanie zmiany krzywizny dla poszczególnych tworzyw – w odniesieniu do korpusu strzykawki (wartość dodatnia oznacza wypukłość, a wartość ujemna wklęsłość)



Rys. 38. Porównanie zmiany krzywizny dla poszczególnych tworzyw – w odniesieniu do tłoczka strzykawki (wartość dodatnia oznacza wypukłość, a wartość ujemna wklęsłość)

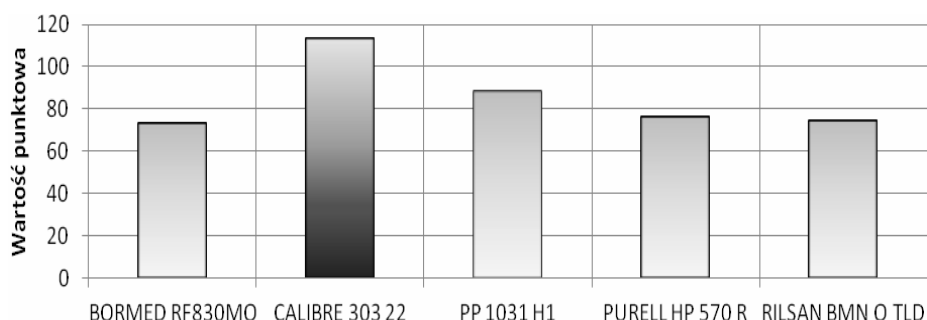
W tabeli 12 zestawiono poszczególne czynniki analizowane w przeprowadzonych symulacjach komputerowych, które zostały przedstawione na wykresach zamieszczonych od rys. 25 do rys. 38.

Tabela 12. Wartości ocen przydzielonych poszczególnym czynnikom analizowanym w symulacji komputerowej dla obu elementów strzykawki – korpusu i tłoczka

Rodzaj tworzywa		BORMED RF830M0	CALIBRE 303 22	PP 1031 H1	PURELL HP 570 R	RILSAN BMN O TLD
Suma czasów: fazy wtrysku, fazy docisku i chłodzenia	korpus	2	3	1	0	4
	tłoczek	2	3	1	0	4
Czynnik ekonomiczny – waga podwójna		8	12	4	0	16
Natężenie przepływu	korpus	4	0	1	3	3
	tłoczek	4	0	1	4	4
Maksymalne ciśnienie wtrysku	korpus	4	0	2	3	1
	tłoczek	4	0	2	3	1
Maksymalna prędkość ścinania	korpus	0	4	3	2	1
	tłoczek	1	4	3	2	0
Maksymalna temperatura w fazie wtrysku	korpus	1	0	3	4	2
	tłoczek	2	0	3	4	1
Czynnik technologiczny – waga pojedyncza		20	8	18	25	13
Siła zamykania w osi X	korpus	4	0	3	2	1
	tłoczek	4	0	3	2	1
Siła zamykania w osi Y	korpus	4	0	3	2	1
	tłoczek	4	0	3	2	1
Siła zamykania w osi Z	korpus	4	0	3	2	1
	tłoczek	4	0	3	2	1
Czynnik technologiczny – waga pojedyncza		24	0	18	12	6
Maks. deformacja	korpus	1	4	3	2	0
	tłoczek	2	4	3	1	0
Maks. skurcz	korpus	2	4	3	1	0
	tłoczek	2	4	3	1	0
Maks. zniekształcenie	korpus	0	4	1	2	3
	tłoczek	0	4	1	2	3
Zmiana krzywizny	korpus	0	3	1	2	4
	tłoczek	0	4	1	2	3
Czynnik jakościowy – waga potrójna		21	93	48	39	39
Razem:		73	113	88	76	74

Poszczególnym wartościom poszczególnych czynników przyporządkowywano wartości punktowe od 4 do 0. Wartość 4 oznaczała najkorzystniejszy wpływ, natomiast wartość 0 – najmniej korzystny. Dla wyjaśnienia w tabeli wskazano, jaki wpływ ma dany czynnik – na przykład dla sumy czasów poszczególnych faz procesu wartość najniższa jest najkorzystniejsza, dlatego wartości najmniejszej przyporządkowano ocenę 4. Z kolei dla natężenia przepływu tworzywa wartość największa jest najlepsza, więc wówczas jej przydzielano ocenę 4. Poszczególne czynniki analizowane na podstawie wyników symulacji komputerowej wtryskiwania tłoczka i korpusu strzykawki medycznej podzielono na trzy grupy: ekonomiczne, technologiczne i jakościowe. Czynnikiem technologicznym przydzielono wagę pojedynczą (w związku z czym nie modyfikowano ich wartości), czynnikiem ekonomicznym wagę podwójną (z tego powodu oceny tych czynników podwajano), a czynnikiem jakościowym przydzielono wagę potrójną (przez co oceny mnożono trzy razy). Za najlepsze tworzywo do wykonania strzykawki metodą wtryskiwania miało zostać uznane to tworzywo, które uzyskało sumarycznie najwyższą wartość punktową.

Na rys. 39 przedstawiono wykres pokazujący, jakie wartości punktowe otrzymały poszczególne tworzywa zastosowane w symulacji komputerowej.



Rys. 39. Zestawienie wartości punktowych, jakie osiągnęły poszczególne tworzywa wykorzystane do symulacji komputerowej

Zgodnie z przyjętymi kryteriami oceny poszczególnych czynników analizowanych na podstawie wyników symulacji komputerowej za najkorzystniejsze tworzywo do wytworzenia elementów strzykawki – korpusu i tłoczka – został wskazany poliwęglan Calibre 303 22 z firmy Styron EUR, osiągając ocenę 113 pkt. Drugim pod względem przydatności okazał się polipropylen PP1013H1 firmy ExxonMobil™, z oceną 88 pkt. Pozostałe trzy tworzywa: polipropylen BORMED RF830MO firmy Borealis, polipropylen PURELL HP 570 R firmy Lyondell Basell oraz poliamid RILSAN BMN O TLD firmy Arkema zostały uznane za najmniej odpowiednie do wykonania strzykawki, osiągając prawie taką samą ocenę punktową, odpowiednio 73 pkt, 76 pkt oraz 74 pkt.

Podsumowanie

Tworzywa polimerowe są materiałami znanymi już od ponad 150 lat i w tym okresie sukcesywnie i skutecznie zastępowały materiały konstrukcyjne pochodzenia naturalnego, w bardzo wielu przypadkach wypierając je całkowicie. Zastępują stopy metali nieżelaznych, włókna naturalne, szkło, drewno, papier, materiały mineralne. Znalazły również bardzo szerokie zastosowanie w branży medycznej, zarówno jako materiały do wytwarzania elementów aparatury medycznej, jak również materiałów, które częściowo lub całkowicie są w stanie zastąpić tkankę biologiczną. Obecnie tworzywa sztuczne są stosowane w technologii medycznej na dużą skalę, między innymi w chirurgii, transplantologii, stomatologii, ortopedii, okulistyce oraz farmaceutyce, a zakres ich stosowania wciąż się poszerza.

Proces wtryskiwania, jako metody wytwarzania części z tworzyw sztucznych o skomplikowanych kształtach i bardzo dużej dokładności wymiarowej, w dzisiejszych czasach staje się coraz bardziej popularnym i wiodącym procesem - nie tylko w grupie metod przetwórstwa tworzyw sztucznych, ale również na tle innych technologii wytwarzania. Jego podstawową zaletą jest możliwość uzyskania wyrobów o skomplikowanych kształtach w bardzo krótkim czasie, w jednej operacji technologicznej, na jednej maszynie przy użyciu jednego narzędzia, przy jednoczesnym zachowaniu bardzo dużej dokładności wykonania i powtarzalności jakości wyrobu. Jednostkowy koszt wykonania części z tworzywa sztucznego, wynikający z kosztu materiału, narzędzia oraz maszyny przetwórczej w przypadku produkcji wielkoseryjnej i masowej w przypadku wtryskiwania jest wielokrotnie niższy niż koszt wykonania takiego samego wyrobu połączonymi metodami obróbki ubytkowej, plastycznej lub innymi. To spowodowało wypieranie części metalowych częściami tworzywowymi wszędzie tam, gdzie część z tworzywa sztucznego sprostą oczekiwanom wytrzymałościowym.

Głównym zadaniem każdego oprogramowania typu CAD/CAM/CAE jest wspomaganie oraz skracanie czasu prac związanych z konstruowaniem wyrobu, ułatwienie przeprowadzenia analiz pod kątem poprawności wykonania, upraszczanie tworzenia dokumentacji technicznej oraz procesu wytwórczego. Programy do symulacji procesu wtryskiwania należą do rodziny programów CAE. Ich kluczową rolę jest wspomaganie prac inżynierów podczas analizy poprawności konstrukcji wypraski oraz pod kątem analizy przebiegu procesu wtryskiwania, głównie wypełniania gniazda formującego w fazie wtrysku, uzupełniania tworzyw w fazie docisku oraz chłodzenia wypraski w formie wtryskowej. Pominięcie symulacji komputerowej skutkuje tym, iż odpowiednie tolerancje kształtu i wymiaru gniazda formującego są dobierane na podstawie uproszczonych algorytmów, doświadczenia praktycznego a niekiedy nawet metodą prób i błędów. Bardzo często efektem takiego sposobu postępowania jest późniejsza ingerencja w ostateczny kształt powierzchni formujących stempla i matrycy formy wtryskowej, co znacznie wydłuża czas przygotowania produkcji, podnosi koszty,

a w najgorszym wypadku może doprowadzić do potrzeby wymiany ich na nowe. Programy do symulacji wtryskiwania nawet jeśli nie wykryją wszystkich błędów, jakie mogą pojawić się podczas realizacji procesu wytwórczego, to na pewno znacząco obniżają ryzyko ich wystąpienia oraz pomagają wybrać właściwy kierunek działań już na etapie projektowania, a nie dopiero na etapie wytwarzania.

Program Cadmould 3D-F umożliwia przeanalizowanie konstrukcji formy wtryskowej przed zleceniem jej wykonania oraz pozwala oszacować najbardziej optymalne parametry procesu. Oprogramowanie to w wyniku przeprowadzanych symulacji umożliwia ocenę geometrii gniazda formującego, oszacowanie czasu fazy wtrysku, czasu fazy docisku oraz chłodzenia wypraski, a także określenie najbardziej optymalnych warunków procesu pod kątem spełnienia kryteriów jakościowych dla danej wypraski. Inne możliwości programu Cadmould 3D-F to zdolność przeanalizowania sposobu rozmieszczenia gniazd formujących (w przypadku formy wielogniazdowej) oraz sposobu poprowadzenia kanałów chłodzących w celu zoptymalizowania odprowadzania ciepła. Dzięki symulacjom można zobrazować skłonność wypraski do wypaczania się, zjawisko skurczu oraz ocenić wady jakościowe wypraski w zależności od zastosowanego tworzywa sztucznego, parametrów procesu, materiału, z jakiego została wykonana forma wtryskowa oraz właściwości zastosowanej cieczy termostatuującej, a także obliczyć siłę potrzebną do zamknięcia formy wtryskowej.

Na podstawie wykonanych symulacji komputerowych przeanalizowano proces wtryskiwania dwóch części z tworzywa, wchodzących w skład strzykawki medycznej. Do symulacji wybrano pięć tworzyw sztucznych, przeznaczonych – jak to wynikało z informacji podawanych przez producentów – do zastosowania w branży medycznej. Otrzymane wyniki symulacji przeanalizowano pod kątem czynników ekonomicznych, technologicznych i jakościowych. Określono wartości czynników charakteryzujących parametry procesu: czas fazy wtrysku, czas fazy docisku oraz czas chłodzenia, czynników związanych z przebiegiem procesu: natężenie przepływu tworzywa, maksymalne ciśnienie wtrysku, maksymalną prędkość ścinania i maksymalną temperaturę tworzywa, czynników charakteryzujących maszynę: siłę zamykania w poszczególnych osiach wtryskarki oraz czynników charakteryzujących geometrię wypraski: maksymalne wartości skurczu całkowitego, wartości deformacji, zniekształcenia i zmiany krzywizny. Poszczególnym czynnikom przydzielono oceny w punktach od 0 do 4, a w zależności od grupy (ekonomiczny, technologiczny, jakościowy) zastosowano dodatkowy modyfikator w postaci wagi, zwielokrotniającej odpowiednio punkty z oceny. W oparciu o zastosowany sposób oceny za tworzywo najlepiej nadające się do wykonania strzykawki medycznej uznano poliwęglan Calibre 303 22, który charakteryzował się lepszymi cechami, niż polipropyleny: PP1013H1, BORMED RF830MO i PURELL HP 570 R oraz poliamid RILSAN BMN O TLD.

W niniejszym opracowaniu skupiono się jedynie na czynnikach, których wyniki uzyskano z symulacji komputerowej procesu wtryskiwania, nie uwzględniono między innymi podstawowego czynnika związanego z kosztami wytwarzania, jakim jest cena tworzywa sztucznego. Na etapie określania celu i zakresu części badawczej (realizowanej jako symulacja komputerowa) uznano, że badania procesu wtryskiwania będą dotyczyć tylko możliwych do wykonania symulacji numerycznych, bez odwoływania się do analiz stricte ekonomicznych.

Na podstawie otrzymanych wyników zostały wyciągnięte wnioski o charakterze analitycznym oraz użytecznym, wskazujące, że za pomocą symulacji numerycznej procesu wtryskiwania można dokonywać właściwego wyboru tworzywa do wykonania konkretnej wypraski wtryskowej, która będzie spełniać odpowiednie kryteria jakości wykonania. Stosując programy do symulacji procesu wtryskiwania należy pamiętać, iż wyniki ich symulacji są próbą odzwierciedlenia tego, co zachodzi w trakcie procesu wtryskiwania wewnątrz formy wtryskowej. Do otrzymanych wyników należy podejść kierując się zasadami krytycznego myślenia i zdrowego rozsądku. Obecnie coraz dokładniej można przewidzieć efekt pracy wtryskarki za pomocą programów do symulacji, a nieustający rozwój tego typu oprogramowania powoduje, że wyniki symulacji często są porównywalne z doświadczalnymi.

Literatura

- [1] Rosato D. V., Rosato D. V., Rosato M. G., *Injection Molding Handbook*. Kluwer Academic Publisher, Norwell 2000.
- [2] Beaumont J. P., Sherman R., Nagel R. F., *Successful Injection Molding: Process, Design, and Simulation*. Carl Hanser Verlag, Munich 2002.
- [3] Kazmer D. O., *Injection Mold Design Engineering*. Carl Hanser Verlag, Munich 2007.
- [4] Bociąga E., *Procesy determinujące przepływ tworzyw w formie wtryskowej i jego efektywność*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2001.
- [5] Chen Z., Turng L. S., *A review of current developments in process and quality control for injection molding*. „Advances in Polymer Technology” 2005, 24, 3, s. 165–182.
- [6] Zhou H., *Computer Modeling for Injection Molding: Simulation, Optimization, and Control*. John Wiley & Sons Inc., Hoboken 2013.
- [7] Zawistowski H., Frenkler D., *Konstrukcja form wtryskowych do tworzyw termoplastycznych*. Wydawnictwo Poradników i Książek Technicznych Plastech, Warszawa 2003.
- [8] Heneczkowski M., *Przykłady zastosowania symulacji wtryskiwania do korygowania konstrukcji wyprasek*. „Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie”, 2010, 4, s. 14–20.

- [9] Jachowicz T., Duleba B., Krasinskiy V., *Ocena technologiczności wyprasek wtryskowych na podstawie numerycznej symulacji wtryskiwania termoplastycznych tworzyw polimerowych*. „Przetwórstwo tworzyw” 2014, 3, s. 233–246.
- [10] Olędzka E., Sobczak M., Kołodziejcki W.L., *Polimery w medycynie – przegląd dotychczasowych osiągnięć*, „Polimery” 2007, 52, 11–12, s. 795–803.
- [11] Świczko-Żurek B., Zieliński A., Ossowska A., Sobieszczyk S., *Biomateriały*. Skrypt Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2011. Wersja elektroniczna dostępna ze strony Wydziału Mechanicznego PG – mech.pg.edu.pl.
- [12] Gawdzik B., *Polimery - czyli wszystko, co nas otacza*. Zakład Chemii Polimerów, Wydział Chemii UMCS w Lublinie. Prezentacja w wersji cyfrowej dostępna na stronie – www.polimery.umcs.lublin.pl.
- [13] Strona internetowa firmy Arburg (www.arburg.com)
- [14] Jachowicz T., *Wtryskarki elektryczne: All-electric injection molding machines*. „Polimery” 2007, 52, 2, s. 99–105.
- [15] Cadmould 3D-F. Instrukcja użytkownika, wersja 5. Simcon 2012 (wersja elektroniczna).
- [16] Modi D., Šimáček P., Advani S., *Influence of injection gate definition on the flow-front approximation in numerical simulations of mold-filling processes*. „International Journal for Numerical Methods in Fluids” 2003, 42, 11, s. 1237–1248.
- [17] El Otmani R., Zinet M., Boutaous M., Benhadid H., *Numerical simulation and thermal analysis of the filling stage in the injection molding process: Role of the mold-polymer interface*. „Journal of Applied Polymer Science” 2011, 121, 3, s. 1579–1592.
- [18] Gajdoš I., Jachowicz T., Slota J., Krasinskiy V., *Interpretation of warpage simulation results in ASMI*. „Applied Computer Science” 2015, 11, 2, 5–16.
- [19] Yu L., Koh C. G., Lee L. J., Koelling K. W., Madou M. J., *Experimental investigation and numerical simulation of injection molding with micro-features*. „Polymer Engineering & Science” 2002, 42, 5, s. 871–888.
- [20] Ambroziak M., *Analiza systemu chłodzenia w programie Cadmould*. „TS Raport” 2012, 64.
- [21] Fen Liu F., Zeng S., Zhou H., Li J., *A study on the distinguishing responses of shrinkage and warpage to processing conditions in injection molding*. „Journal of Applied Polymer Science” 2012, 125, 1, s. 731–744.
- [22] Szymczak P., *Solid Edge. Synchronous Technology*. Wydawnictwo CAMdivision, Wrocław 2012.
- [23] Cadmould Material Database (CMDDB), baza danych materiałowych wchodzących w skład programu Cadmould 3D-F, w wersji 7.1.

7. Technologiczne aspekty kształtowania folii z polistyrenu

Wprowadzenie

Kształtowanie tworzyw polimerowych jest zaliczane do metod obróbki plastycznej nie powodujących naruszenia spójności obrabianego tworzywa. Kształtowanie polega na wywołaniu w tworzywie dwuosiowego stanu naprężeń, prowadzącego do odkształcenia plastycznego przedmiotu i nadającego mu powierzchnię nierozwijalną. Kształtowaniu poddaje się folie i płyty z tworzyw termoplastycznych. Dobrą podatnością na kształtowanie charakteryzują się tworzywa o wyraźnie zaznaczonym rozwoju odkształceń wysokoelastycznych [2, 3]. W przypadku, gdy oba naprężenia w ściankach kształtowanego wytworu, obwodowe, oraz wzdłużne - skierowane wzdłuż osi pionowej wytworu są rozciągające, to proces kształtowania nosi nazwę rozciągania. Zasada rozciągania polega na uplastycznieniu płyty lub folii z tworzywa znajdującej się w formie do kształtowania, wywołaniu naprężeń rozciągających prowadzących do jej odkształcenia i przylegania do gniazda formy a następnie ochłodzeniu i wyjęciu przedmiotu kształtowanego.

Ze względu na czynnik wywołujący rozciąganie dzieli się ono na: rozciąganie powietrzem o ciśnieniu obniżonym – podciśnieniowe, oraz o ciśnieniu podwyższonym – nadciśnieniowe i rozciąganie stemplem. Natomiast w zależności od tego w której z dwóch zasadniczych części formy do rozciągania przebiega ten proces rozróżnia się: rozciąganie matrycowe oraz rozciąganie stemplowe.

Odształkające się tworzywo ulega zróżnicowanym naprężeniom i odkształceniom w poszczególnych częściach, szczególnie obszarze dna oraz ścianek otrzymywanych kształtek. Efektem tego jest nierównomierność grubości ścianek, która należy do najważniejszych problemów procesu rozciągania. Jest ona charakteryzowana współczynnikiem głębokości rozciągania k , będącym stosunkiem wysokości kształtki H do najmniejszego wymiaru powierzchni jej dna L_{min} . Nierównomierność grubości ścianki kształtki jest większa im większą wartość ma ten współczynnik pełniący funkcję podstawowego wskaźnika kształtowalności.

W przypadku gdy stawiane są wysokie wymagania odnośnie jednakowej grubości ścianek kształtki, stosuje się zazwyczaj połączenie kilku metod rozciągania w jednym procesie przetwórczym. Często stosowane jest wówczas rozciąganie stemplem, polegające na wciskaniu stempla o temperaturze pokojowej lub podwyższonej w płytę lub folię zamocowaną w formie. Dno kształtki odpowiada tej części stempla, która oddziałuje bezpośrednio na tworzywo natomiast boki ulegają w znacznej mierze rozciąganiu swobodnemu.

Proces rozciągania folii i płyt nazywany także termoformowaniem jest stosowany głównie do wytwarzania opakowań jednorazowych (pojemników, kubków, tacek) ale również elementów konstrukcyjnych urządzeń (ścianek wewnętrznych lodówek, obudów, desek rozdzielczych). Charakteryzuje się wieloma zaletami względem innych metod przetwórstwa tworzyw, m.in. stosunkowo niską temperaturą przetwarzania, oraz ciśnieniem wywołującym rozciąganie jak również niewielkimi kosztami stosowanych narzędzi i urządzeń. Wydajność urządzeń przetwórczych jest bardzo duża, (sięga kilkudziesięciu tysięcy szt./h) a koszty jednostkowe wytwarzanych przedmiotów są znacznie niższe w porównaniu z innymi metodami wytwarzania [1].

Dlatego proces ten pomimo tego, że jego początki sięgają lat siedemdziesiątych XIX wieku i został już dość dobrze poznany od strony praktycznej, wciąż stanowi przedmiot licznych badań naukowych [4-6,13] oraz opracowań skierowanych do przetwórców [7-12].

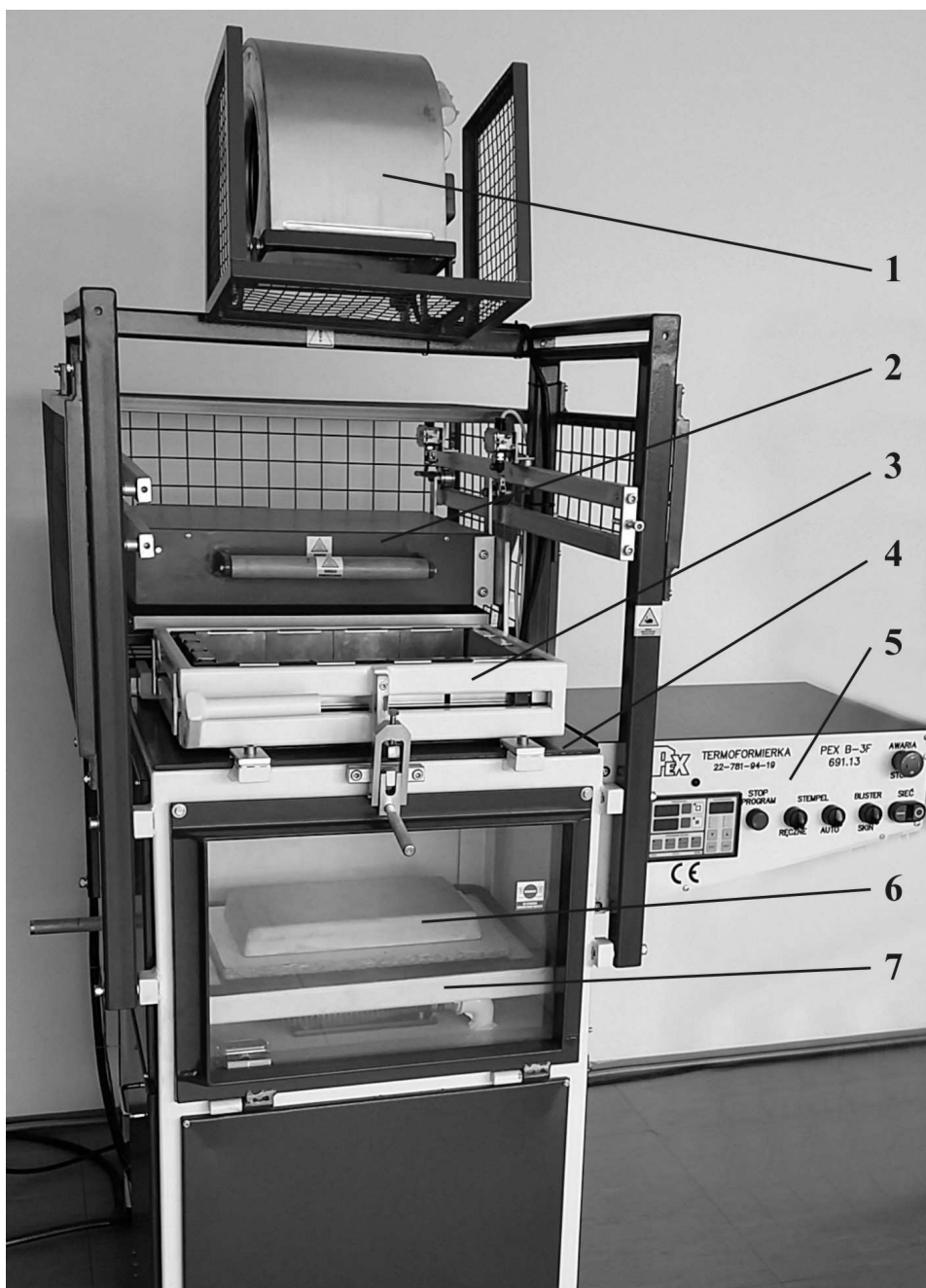
W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań wpływu zmian wybranych warunków kształtowania folii z polistyrenu metodą rozciągania stemplowego podciśnieniowego, na rozkład temperatury kształtowanej folii i nierównomierność grubości ścianki otrzymywanych kształtek.

Stanowisko badawcze

Badania obejmowały wykonanie kształtek z folii polistyrenowej metodą rozciągania stemplowego podciśnieniowego ze stemplem ruchomym za pomocą stanowiska do rozciągania typu: PEX B-3 F produkcji firmy PEX sp. z o.o. Wygląd stanowiska na rysunku 1 natomiast jego charakterystykę techniczną w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyka techniczna stanowiska do rozciągania stemplowego podciśnieniowego PEX B-3 F [14]

Lp.	Wielkość charakterystyczna	Jednostka	Wartość
1	Wymiary obszaru kształtowania folii	mm	320 x 460
2	Skok stołu	mm	300
3	Moc grzewcza promiennikowego urządzenia nagrzewającego	kW	3,6
4	Moc pompy próżniowej	kW	0,75
5	Ciśnienie wytwarzane przez pompę próżniową	hPa	2
6	Maksymalna grubość kształtowanego materiału	mm	4

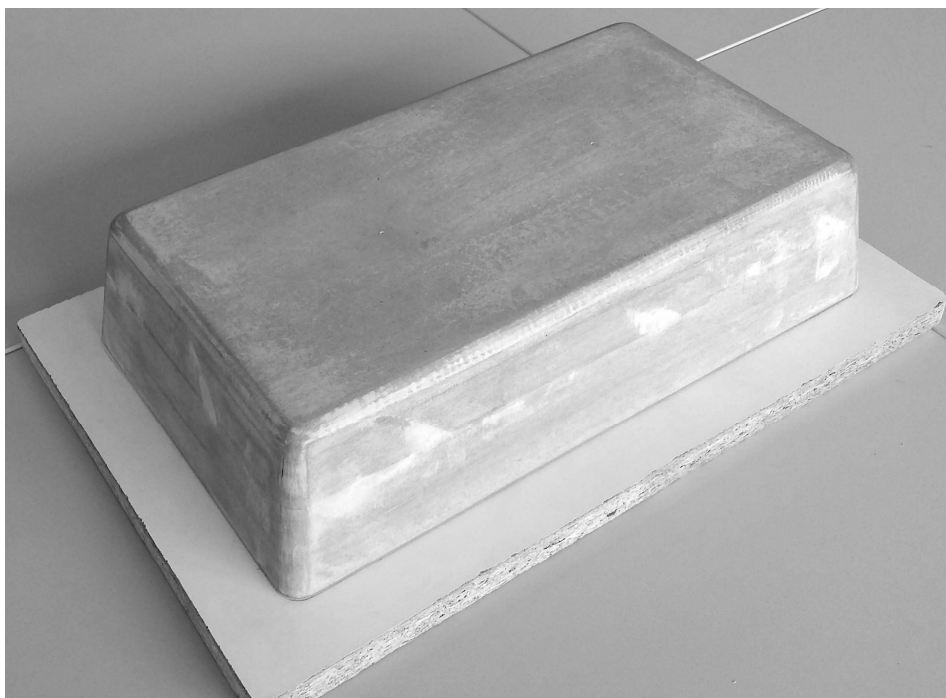


Rys. 1. Stanowisko do rozciągania stemplowego podciśnieniowego PEX B-3 F: 1 – wentylator chłodzący 2 – urządzenie nagrzewające, 3 – rama dociskająca folię, 4 – stół nieruchomy 5 – układ sterowania 6 - stempel 7 - ruchomy stół

Układ sterowania stanowiska do rozciągania umożliwia nastawianie następujących warunków tego procesu:

- czas nagrzewania folii,
- temperatura w strefie grzejnej zewnętrznej-obwodowej urządzenia nagrzewającego,
- temperatura w strefie grzejnej wewnętrznej-środkowej urządzenia nagrzewającego,
- czas działania próżni,
- czas chłodzenia,
- czas trwania i częstotliwość impulsów powietrza wprowadzanego pomiędzy kształtkę a stempel.

W badaniach do wykonywania kształtek stosowano stempel wykonany z MDF w kształcie ostrosłupa ściętego o podstawie prostokątnej i wysokości 80 mm, którego podstawa ma wymiary 340x190 mm natomiast wierzchołek 300x150 mm. Współczynnik głębokości rozciągania tego stempla wynosi $k = 0,53$. Wygląd zastosowanego stempla przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Stempel wykonany z MDF

Działanie stanowiska do rozciągania (rys. 1) polega na umieszczeniu arkusza folii przeznaczonej do kształtowania na stole (4) i dociśnięciu go za pomocą ramy (3). Następnie nasuwane jest nad zamocowaną folię urządzenie nagrzewa-

jące (2). Po upływie nastawionego za pomocą układu sterowania (5) czasu nagrzewania, który sygnalizowany jest dźwiękowo, urządzenie nagrzewające jest odsuwane do pozycji wyjściowej i następuje podniesienie do góry stołu ruchomego (7) z zamocowanym do niego stemplem (6). Po rozciągnięciu mechanicznym folii za pomocą stempla, pomiędzy stemplem a folią wytwarzane jest podciśnienie powodujące głównie rozciąganie folii w obszarze boków kształtki. Chłodzenie kształtki następuje przez nadmuch powietrza z wentylatora (1). W celu ułatwienia oddzielenia kształtki od stempla pomiędzy ich powierzchnie wprowadzane jest impulsowo sprężone powietrze. Stół ruchomy opuszczany jest do dolnej pozycji wyjściowej, otwierana jest rama i wyjmowana jest gotowa kształtka.

Do pomiaru rozkładu temperatury folii bezpośrednio po jej nagrzaniu i odsunięciu urządzenia nagrzewającego wykorzystano metodę termowizyjną. Termowizja to metoda bezstykowego pomiaru temperatury polegająca na pomiarze promieniowania emitowanego w paśmie zwanym podczerwienią przez każde ciało o temperaturze wyższej niż zero bezwzględne. Natężenie tego promieniowania jest wprost proporcjonalne do temperatury ciała emitującego fale. Efektem pomiaru termowizyjnego jest termogram, czyli wizualizacja pola temperatury powierzchni badanego ciała. Wykorzystywana jest między innymi w zastosowaniach naukowych, medycznych, policyjnych, wojskowych, przy diagnostyce urządzeń mechanicznych, obwodów elektrycznych i budynków [16]. Metoda ta znajduje zastosowanie zwłaszcza przy pomiarze temperatury na powierzchni wytworów oraz elementów maszyn i narzędzi przetwórczych będących w ruchu [17]. W przetwórstwie tworzyw jest stosowana najczęściej do pomiaru temperatury otrzymywanych wytworów oraz narzędzi przetwórczych [15, 18–21]. Działanie zastosowanej w omawianych pomiarach kamery termowizyjnej jest następujące. Emitowane przez obiekt promieniowanie podczerwone dociera do układu skanującego kamery, a następnie do układu optycznego, który skupia wiązkę promieniowania na powierzchni fotoczułej detektora. Detektor przetwarza promieniowanie na impuls prądu elektrycznego, którego parametry, po zamianie na postać cyfrową, są porównywalne z zapisanymi w tablicy kalibracji oraz odpowiadającymi temperaturze odniesienia wbudowanego ciała wzorcowego. W efekcie pomiaru trzymywany jest termogramu barwny.

W badaniach zastosowano kamerę termowizyjną V-20 II ER005-10 firmy VIGO System S.A. wraz z oprogramowaniem Therm V-20. Kamera ta posiada detektor typu HgCdTe, chłodzony termoelektrycznie. Do pozycjonowania kamery służy wbudowany wskaźnik laserowy wskazujący punkt leżący w osi optycznej kamery oraz skrajne punkty narożne wskazujące obszar pola pomiarowego. Charakterystykę techniczną zastosowanej kamery termowizyjnej przedstawiono w tabeli 2. Stanowisko badawcze z kamerą termowizyjną zostało przedstawione na rysunku 3. W badaniach termowizyjnych na podstawie literatury oraz pomiarów wstępnych przyjęto wartość współczynnika emisyjności 0,84.

Tabela 2. Charakterystyka techniczna kamery termowizyjnej V-20 II ER005-10 firmy VIGO System S.A. [22]

Lp.	Wielkość charakterystyczna	Jednostka	Wartość
1	Zakres mierzonej temperatury	°C	Podzakresy: I: 15 – 60 II: 15 – 350 III: 350 - 800
2	Rozdzielczość termiczna NEDT dla temperatury obiektu 30°C	°C	Podzakresy: I: 0,05; II: 2 III: do 12
3	Minimalna odległość od obiektu	cm	40
4	Rozdzielczość obrazu (Ilość linii x ilość punktów w linii)	piksele	240 x 240
5	Czas skanowania pojedynczej linii	ms	7,2
6	Czas tworzenia obrazu przy maksymalnej dostępnej rozdzielczości obrazu	s	10

Charakterystyka badań

Do badań zastosowano folię płaską z polistyrenu przeznaczoną do rozciągania o grubości 0,5 mm wyprodukowaną przez P.P.H.U Petroplast Sp. z o.o.

Czynnikami zmiennymi w prowadzonych badaniach były:

- temperatura w strefie grzejnej wewnętrznej-środkowej urządzenia nagrzewającego wynosząca 400 lub 420°C
- czas nagrzewania folii: 14; 18; 22; 26 oraz 30 s.

Na taki dobór zakresu pomiarowego czynników zmiennych wskazały przeprowadzone pomiary rozpoznawcze.

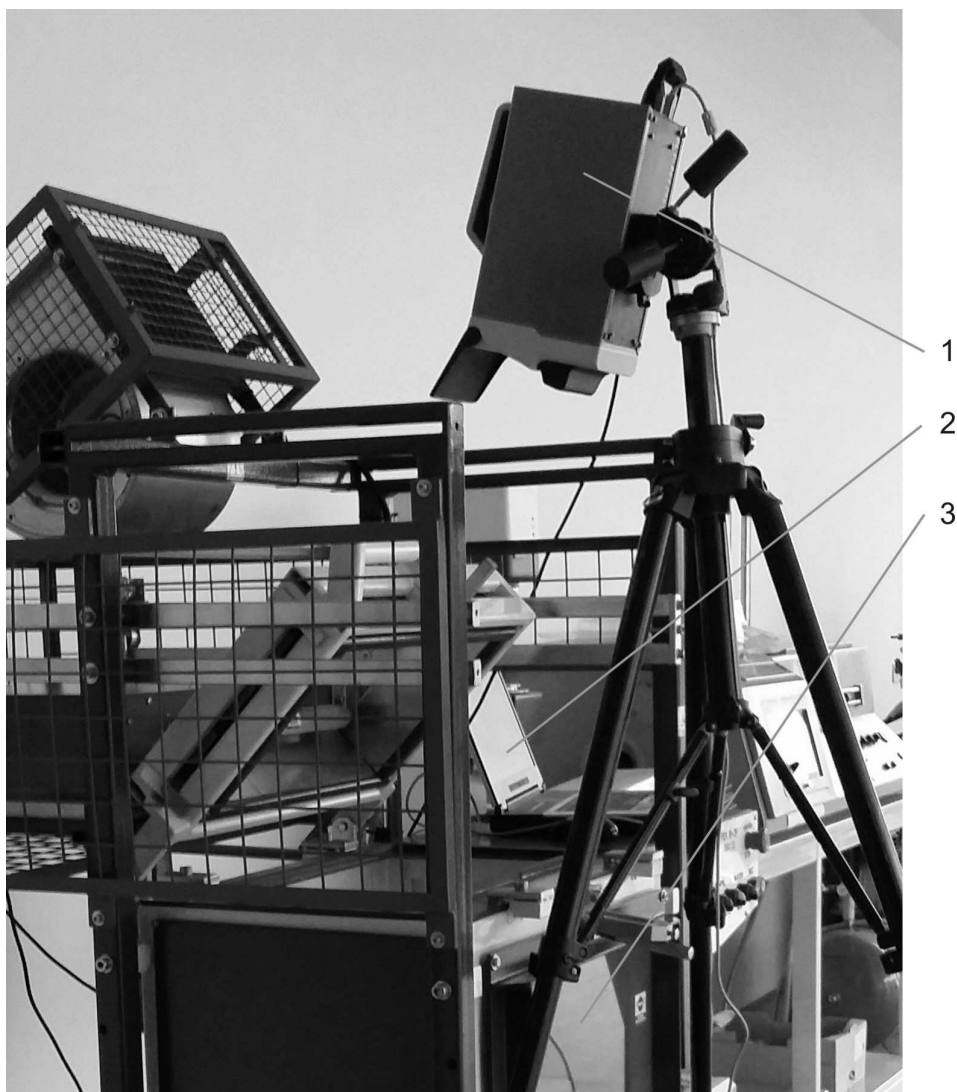
Czynniki stałe:

- temperatura w strefie grzejnej zewnętrznej-obwodowej urządzenia nagrzewającego 400°C ,
- czas działania próżni 5s,
- czas chłodzenia 5s,
- czas trwania i częstotliwość impulsów powietrza wprowadzanego pomiędzy kształtkę a stempel 1s, 60 s⁻¹.

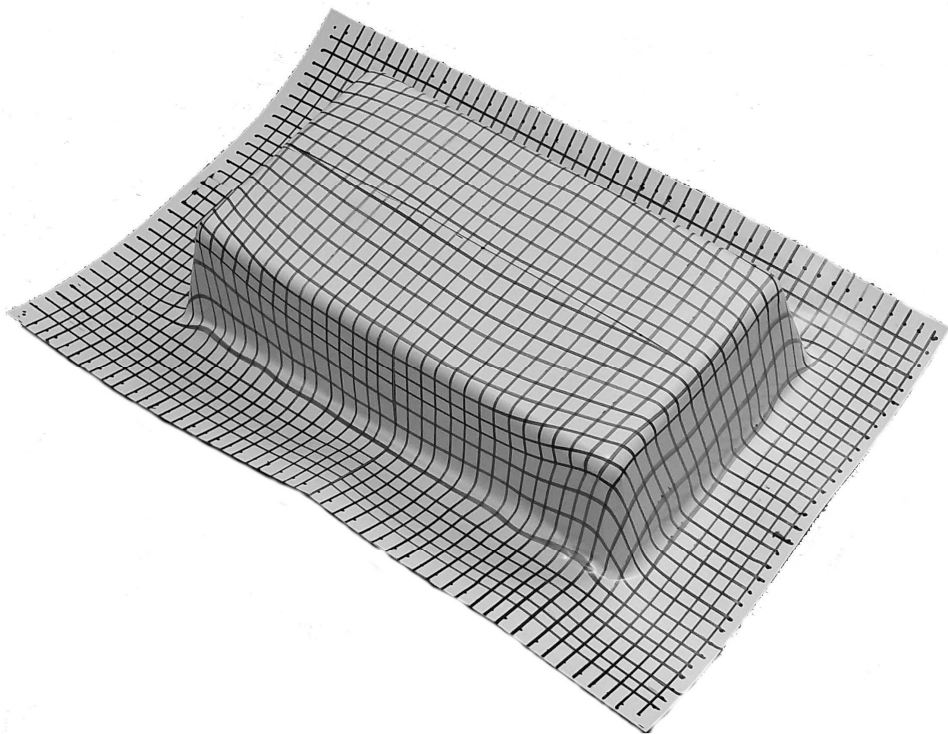
Przyjęto że wpływ czynników zakłócających takich jak niestabilność: temperatury otoczenia, wilgotności względnej powietrza, napięcia prądu elektrycznego, jest pomijalnie mały na otrzymane wyniki pomiarów.

Na arkusze folii przed poddaniem ich kształtowaniu w badanych warunkach została naniesiona siatka prostopadłych linii odstępach co 10 mm. Dzięki niej

możliwa była obserwacja odkształceń folii w poszczególnych obszarach otrzymanej kształtki (rys.4).



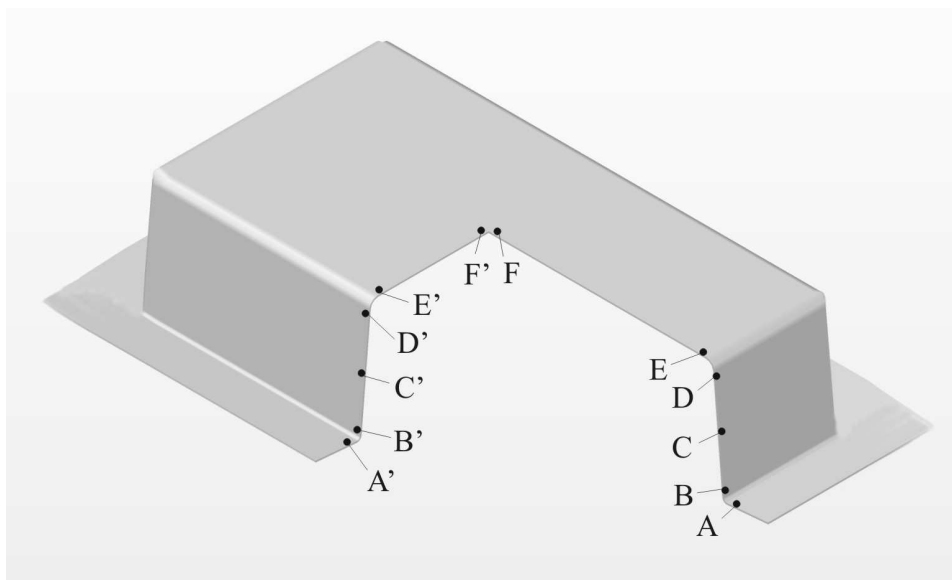
Rys. 3. Stanowisko badawcze z kamerą termowizyjną: 1 – kamera termowizyjna 2 – komputer z oprogramowaniem do akwizycji danych pomiarowych, 3 – stanowisko do rozciągania stemplowego podciśnieniowego



Rys. 4. Wygląd kształtki z naniesioną siatką prostokątnych linii, która uległa odkształceniu w wyniku rozciągania po nagrzewaniu folii przez 14 s przez urządzenie nagrzewające o temp. 420 °C w strefie środkowej oraz 400 °C w strefie obwodowej

Przebieg pomiarów polegał na nastawieniu w układzie sterowania stanowiska wybranych warunków procesu. Po ustabilizowaniu się temperatury urządzenia nagrzewającego w obydwu strefach grzejnych, umieszczano zakreskowany arkusz folii na stole i mocowano go za pomocą ramy a następnie poddawano nagrzewaniu przez czas przyjęty w programie badań. Po upływie czasu nagrzewania, niezwłocznie po odsunięciu z nad nagrzanej folii urządzenia nagrzewające mierzono rozkład jej temperatury za pomocą kamery termowizyjnej. Ze względu na zbyt długi czas rejestracji temperatury całego pola powierzchni arkusza folii wynoszący 10s, obszar pomiarowy ograniczono do wąskiego pasa przebiegającego przez środek arkusza folii i całą jego szerokość podlegającą rozciąganiu, ograniczoną przez ramę dociskającą.

Po zakończeniu przebiegającego dalej zgodnie z przyjętymi warunkami procesu rozciągania folii otrzymywano gotowe kształtki. Kształtki te poddano następnie pomiarom grubości ścianki za pomocą mikrometru elektronicznego z dokładnością do 0,001 mm w punktach charakterystycznych oznaczonych na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat kształtki z zaznaczonymi punktami pomiaru grubości ścianki w przekroju wzdłużnym A – F oraz przekroju poprzecznym A' – F'

Przeprowadzono również analizę odkształcenia folii w poszczególnych obszarach kształtki. Zmierzono za pomocą liniału z dokładnością 0,5 mm odległości pomiędzy siatką linii naniesionych na folię, która uległa zwiększeniu w obszarach rozciągania. Pomiaru przeprowadzono wzdłuż linii pokrywających się z punktami pomiaru grubości folii zarówno w kierunku wzdłużnym jak i poprzecznym kształtki (rys. 5).

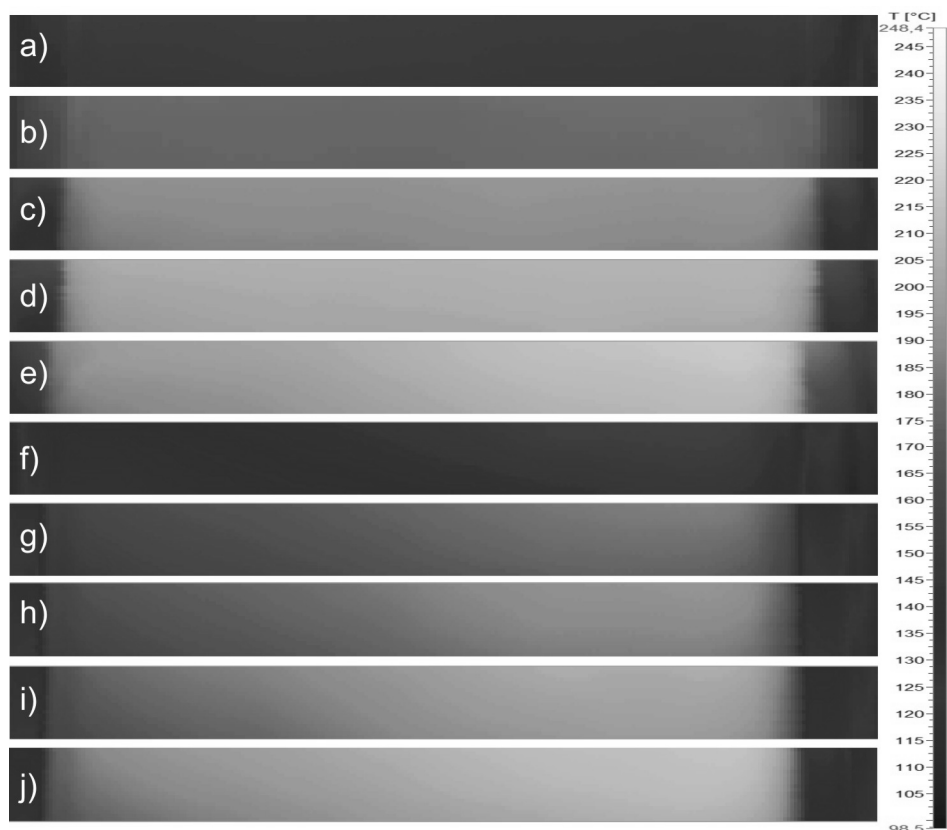
Po wykonaniu pomiarów sporządzono wykresy i termogramy zależności wybranych właściwości kształtowanej folii i otrzymanych z niej kształtek.

Wyniki pomiarów

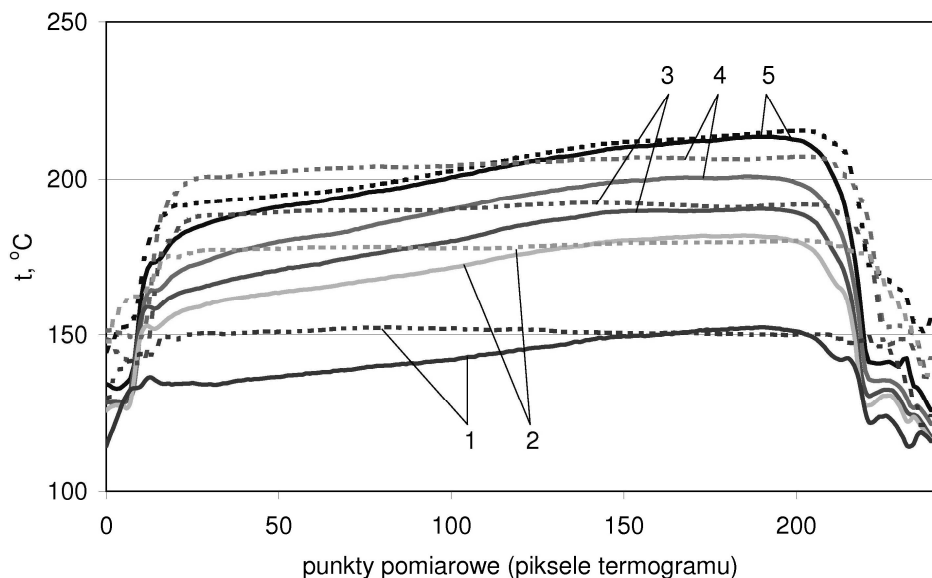
Otrzymane w czasie pomiarów termogramy przy zmiennym czasie nagrzewania folii oraz temperaturze środkowej strefy urządzenia nagrzewającego przedstawiono na rysunku 6. Przedstawione termogramy są efektem uśrednienia z trzech powtórzeń pomiaru termograficznego dla poszczególnych badanych warunków nagrzewania folii. Zmienność rozkładu temperatury folii po nagraniu w badanych warunkach przedstawiono również na rysunku 7, na którym poszczególne krzywe odpowiadają zmianom temperatury wzdłuż linii pomiarowej przebiegającej wzdłużnie przez środek nagrzanego arkusza folii.

Pomiary te wykazały, że wraz ze wzrostem czasu nagrzewania sukcesywnie zwiększa się temperatura nagrzewanej folii. Wówczas, gdy zadana temperatura w strefie obwodowej oraz wewnętrznej urządzenia nagrzewającego wynosiła 400 °C, temperatura nagrzewanej folii utrzymywała się na znacznej powierzchni

arkusza na stałym poziomie. Wynosiła ona w części środkowej arkusza folii odpowiednio 150°C, 178°C, 191°C oraz 205°C, przy czasie nagrzewania 14, 18, 22, 26 s. Wyjątkiem jest najdłuższy czas nagrzewania 30 s., przy którym zaobserwowano asymetryczność rozkładu temperatury, różnica pomiędzy lewą i prawą stroną arkusza wyniosła 24°C (pomijając obszar przy ramie dociskowej). Natomiast gdy temperatura w strefie wewnętrznej urządzenia nagrzewającego wynosiła 420°C rozkład temperatury nagrzewanej folii był zawsze nierównomierny i wbrew oczekiwaniom również asymetryczny. Znacznie wyższe wartości rejestrowano po prawej stronie arkusza folii w porównaniu z jego lewą stroną. Różnice w wartościach temperatury folii, pomijając obszar bezpośredni sąsiadujący z ramą dociskową, pomiędzy prawą i lewą stroną arkusza wynosiły 18, 24, 29, 29 oraz 30°C odpowiednio przy czasie nagrzewania 14, 18, 22, 26, oraz 30 s.



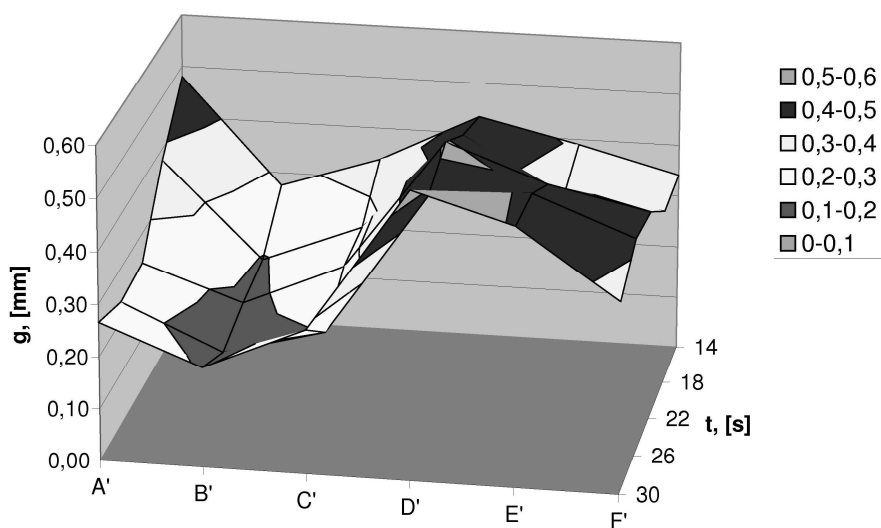
Rys. 6. Termogramy rozkładu temperatury folii po nagrzaniu przez urządzenie nagrzewające o temperaturze strefy obwodowej i środkowej 400 °C w czasie: a) 14 s, b) 18 s, c) 22 s, d) 26 s, e) 30 s, oraz o temperaturze strefy obwodowej 400 °C i środkowej 420 °C w czasie: f) 14 s, g) 18 s, h) 22 s, i) 26 s, j) 30 s



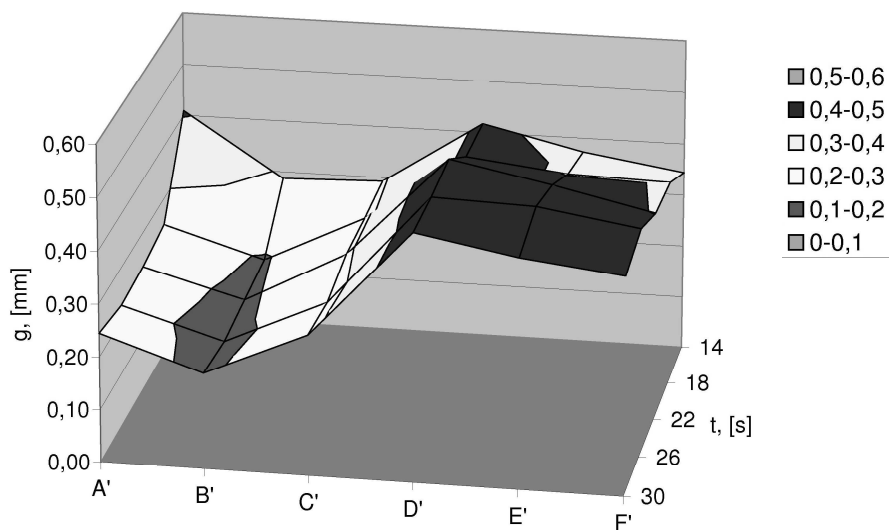
Rys. 7. Rozkład temperatury wzdłuż linii pomiarowej przebiegającej przez środek arkusza folii po nagrzewaniu w czasie: 1 – 14s, 2 – 18s, 3 – 22s, 4 – 26s, 5 – 30s, przy temperaturze w strefie środkowej urządzenia nagrzewającego 420°C – linie ciągłe, 400°C – linie przerywane

Zaobserwowane różnice w rozkładzie temperatury folii w zależności od przyjętych warunków nagrzewania wpływają bezpośrednio na jej uplastycznianie i odkształcalność a przez to na zmianę grubości ścianek otrzymywanych kształtek. Wykazały to zarówno wyniki pomiarów grubości ścianki kształtki w punktach charakterystycznych jej przekroju poprzecznego rys. 8 i 9 oraz przekroju wzdłużnego rys. 10, 11, jak również odkształcenia względnego siatki linii naniesionych na folię, w kierunku poprzecznym oraz wzdłużnym kształtki rys. 12–15.

Większym zróżnicowaniem grubości ścianki charakteryzowały się kształtki otrzymane przy jednakowej temperaturze w obydwu strefach urządzenia nagrzewającego w porównaniu z otrzymanymi przy wyższej temperaturze urządzenia nagrzewającego w strefie środkowej. Najmniejsze różnice w grubości ścianki w przekroju poprzecznym wystąpiły przy najkrótszym czasie nagrzewania 14s i wynosiły 0,21 mm, przy jednakowej temperaturze obydwu stref urządzenia nagrzewającego oraz 0,13mm, gdy jego strefa środkowa miała temperaturę wyższą (rys. 8, 9). Zróżnicowanie grubości ścianki w przekroju poprzecznym wzrasta wraz z wydłużeniem czasu nagrzewania do 0,36 mm oraz 0,29 mm odpowiednio przy jednakowej oraz wyższej temperaturze w strefie środkowej urządzenia nagrzewającego.

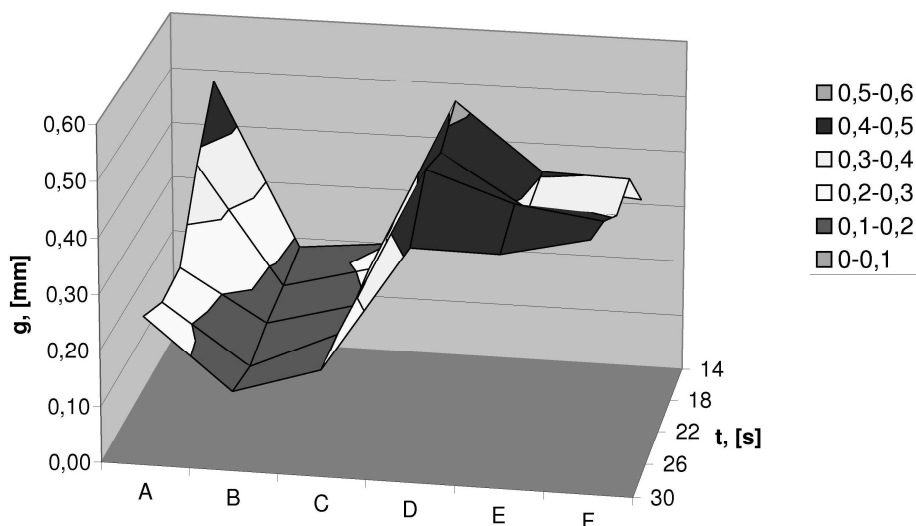


Rys. 8. Zależność grubości ścianki kształtki w punktach charakterystycznych jej przekroju poprzecznego od czasu nagrzewania folii przy temperaturze w strefie środkowej urządzenia nagrzewającego 400°C



Rys. 9. Zależność grubości ścianki kształtki w punktach charakterystycznych jej przekroju poprzecznego od czasu nagrzewania folii przy temperaturze w strefie środkowej urządzenia nagrzewającego 420°C

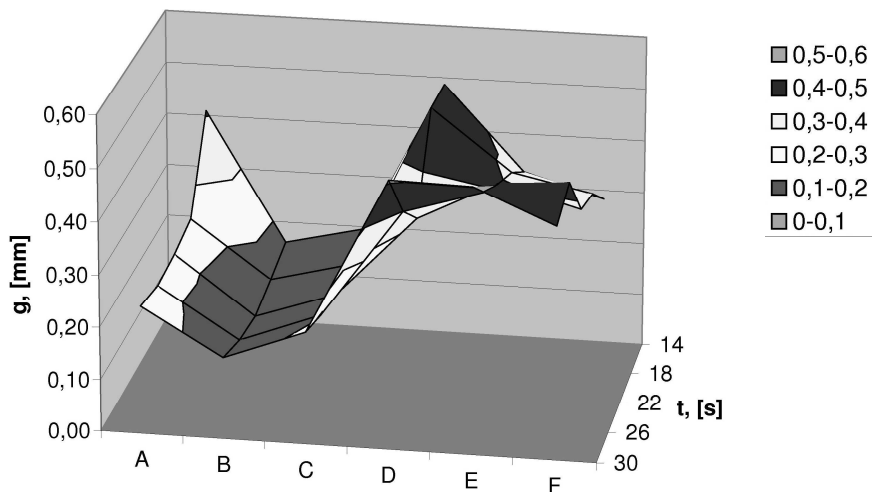
W przekroju wzdłużnym (rys. 10, 11) zróżnicowanie grubości ścianki kształtki było większe. Również w tym przypadku mniejsze różnice występowały przy wyższej temperaturze urządzenia nagrzewającego w strefie środkowej. Najmniejsze różnice w grubości ścianki wynosiły 0,30 mm przy jednakowej temperaturze obydwu stref urządzenia nagrzewającego i czasie nagrzewania 14s oraz 0,28 mm, gdy strefa środkowa urządzenia nagrzewającego miała temperaturę wyższą a czas nagrzewania wynosił 22s. Największe różnice w grubości ścianki w przekroju wzdłużnym wyniosły odpowiednio 0,37 mm oraz 0,35 mm przy jednakowej oraz wyższej temperaturze w strefie środkowej urządzenia nagrzewającego.



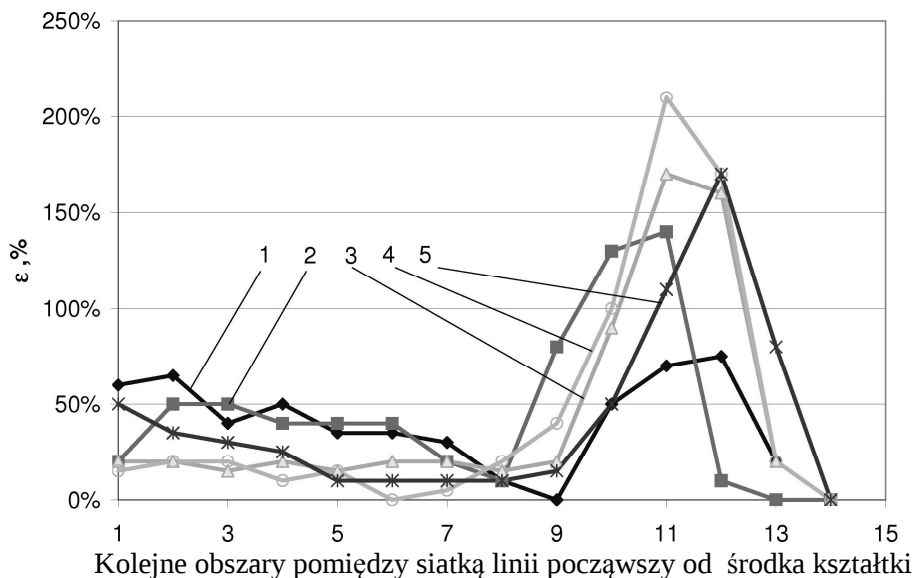
Rys. 10. Zależność grubości ścianki kształtki w punktach charakterystycznych jej przekroju wzdłużnego od czasu nagrzewania folii przy temperaturze w strefie środkowej urządzenia nagrzewającego 400 °C

Zaobserwowane zróżnicowanie grubości ścianki kształtki jest następstwem nierównomiernego odkształcania się poszczególnych jej obszarów w czasie rozciągania. Obrazuje to odkształcenie względne siatki linii naniesionych na rozciąganą folię w kierunku poprzecznym (rys. 12, 13), oraz w kierunku wzdłużnym (rys. 14, 15). W kierunku poprzecznym, przy krótkim czasie nagrzewania folii w obszarze środka kształtki występowały większe wartości odkształceń względnych oraz mniejsze w obszarze boków kształtki w porównaniu z występującymi przy wydłużaniu czasu nagrzewania. Największym odkształceniom względnym ulegała folia w obszarze boków kształtki. W kierunku wzdłużnym w obszarze środka kształtki odkształcenia nie występują wcale lub są niewielkie. Wraz ze zbliżaniem się do krawędzi kształtki stopniowo wartość odkształceń zwiększa się, poczym następuje gwałtowny ich wzrost w obszarze odpowiadającym bokom kształtki. W obszarze od środka kształtki do jej krawędzi wraz

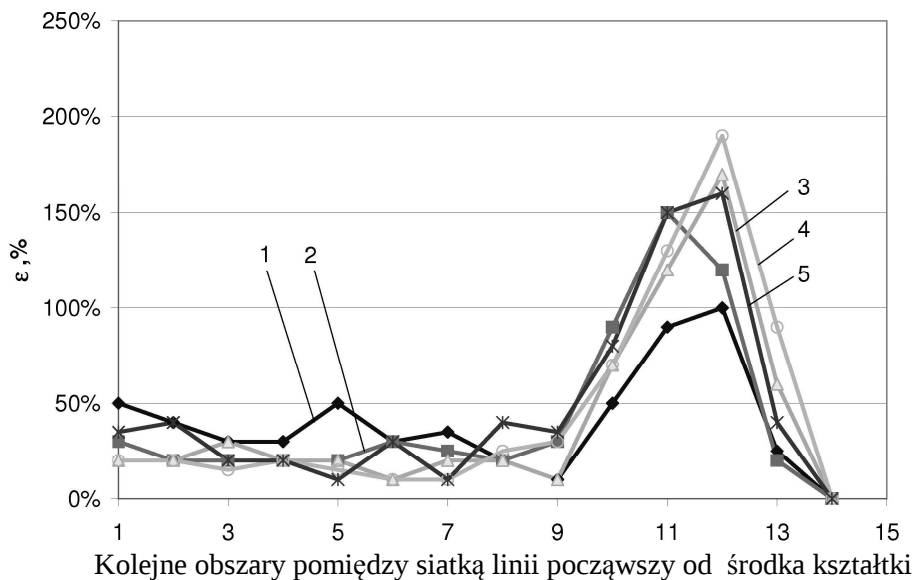
z wydłużaniem czasu nagrzewania folii udział odkształceń zmniejsza się aż do całkowitego zaniku. Przy najdłuższym czasie nagrzewania folia odkształca się wyłącznie w obszarze odpowiadającym bokom kształtki.



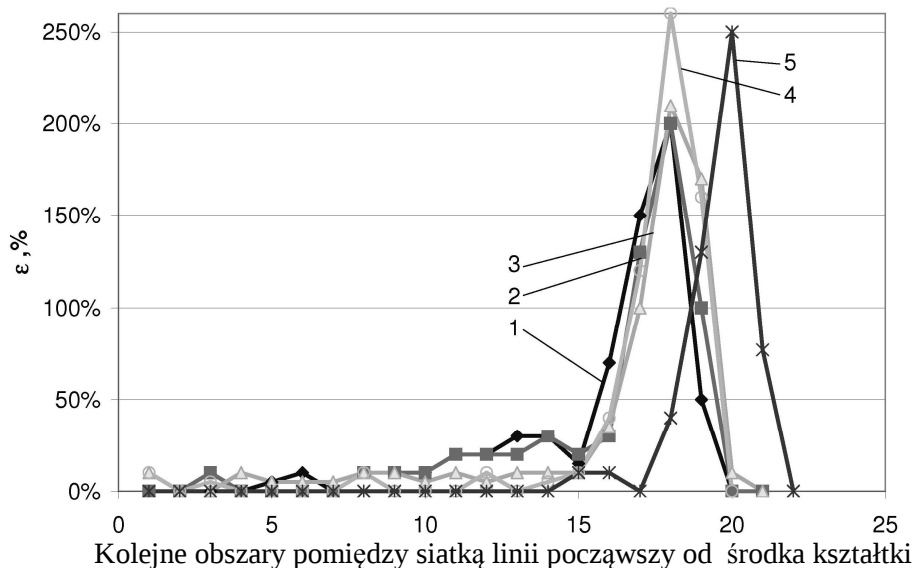
Rys. 11. Zależność grubości ścianki kształtki w punktach charakterystycznych jej przekroju wzdłużnego od czasu nagrzewania folii przy temperaturze w strefie środkowej urządzenia nagrzewającego 420 °C



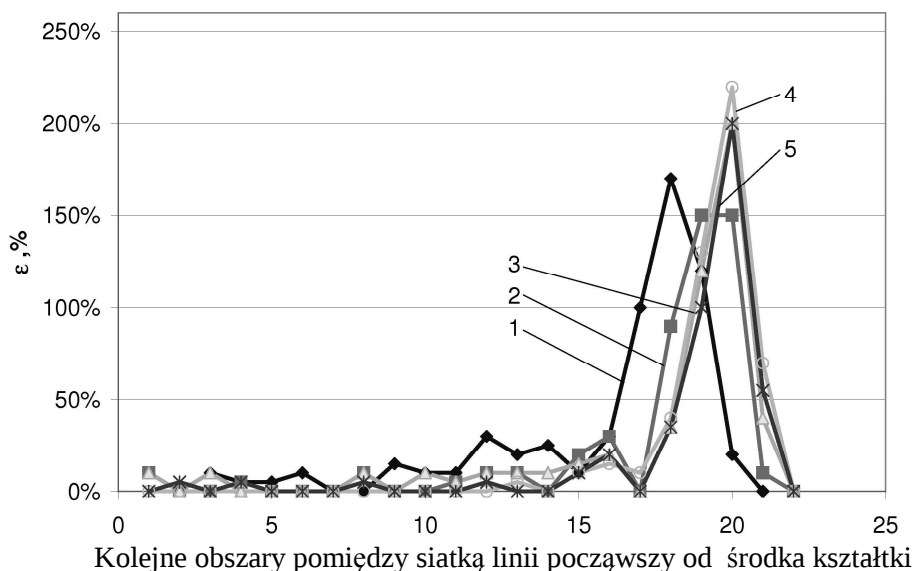
Rys. 12. Odkształcenie względne siatki linii naniesionych na folię, w kierunku poprzecznym kształtki – wzdłuż linii przechodzącej przez punkty pomiarowe A'-F', dla poszczególnych wartości czasu nagrzewania folii przez urządzenie nagrzewające o temperaturze 400 °C w strefie środkowej.



Rys. 13. Odształcenie względne siatki linii naniesionych na folię, w kierunku poprzecznym kształtki – wzdłuż linii przechodzącej przez punkty pomiarowe A'–F', dla poszczególnych wartości czasu nagrzewania folii przez urządzenie nagrzewające o temperaturze 420 °C w strefie środkowej.



Rys. 14. Odształcenie względne siatki linii naniesionych na folię, w kierunku wzdłużnym kształtki – wzdłuż linii przechodzącej przez punkty pomiarowe A–F, dla poszczególnych wartości czasu nagrzewania folii przez urządzenie nagrzewające o temperaturze 400 °C w strefie środkowej.



Rys. 15. Odształcenie względne siatki linii naniesionych na folię, w kierunku wzdłużnym kształtki – wzdłuż linii przechodzącej przez punkty pomiarowe A–F, dla poszczególnych wartości czasu nagrzewania folii przez urządzenie nagrzewające o temperaturze 420 °C w strefie środkowej.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że zarówno czas nagrzewania jak i zróżnicowanie temperatury w poszczególnych strefach urządzenia nagrzewającego ma znaczący wpływ na rozkład temperatury kształtowanej folii z polistyrenu a przez to na nierównomierność grubości ścianki otrzymywanych kształtek.

Zróżnicowanie temperatury w obydwu strefach urządzenia nagrzewającego powoduje nierównomierny i wbrew oczekiwaniom również asymetryczny rozkład temperatury nagrzewanej folii. Zaobserwowane różnice w rozkładzie temperatury folii wpływają bezpośrednio na jej odkształcalność a przez to na zmianę grubości ścianki otrzymywanych kształtek. Większym zróżnicowaniem grubości ścianki charakteryzowały się kształtki otrzymane przy jednakowej temperaturze w obydwu strefach urządzenia nagrzewającego i równomiernym rozkładzie temperatury nagrzewanej folii w porównaniu z otrzymanymi przy wyższej temperaturze urządzenia nagrzewającego w strefie środkowej. Różnice w grubości ścianki kształtki wzrastają wraz z wydłużaniem czasu nagrzewania folii. Związane jest to z tym, że przy krótszym czasie nagrzewania i w efekcie niższej temperaturze folii, odkształceniom ulega zarówno jej obszar od środka do krawędzi dna kształtki jak i odpowiadający bocom kształtki. W miarę wydłużania czasu nagrzewania i wzrostu temperatury folii udział odkształceń obszaru dna kształtki maleje aż do całkowitego zaniku na rzecz odkształceń obszaru folii tworzącego boki kształtki.

Literatura

- [1] Żenkiewicz M., Szach A., *Wybrane problemy termoformowania materiałów polimerowych*, „Polimery” 2010, 55, s. 337.
- [2] Opracowanie zbiorowe pod red. Sikora R., *Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych, Ćwiczenia laboratoryjne*. Politechnika Lubelska, Lublin 199, s. 161.
- [3] Sikora R., *Obróbka tworzyw wielkocząsteczkowych*. Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1996, s. 84.
- [4] Eichler W., *Formowanie próżniowe*, PWT, Warszawa 1960.
- [5] Żenkiewicz M., Lutomirski S., *Wpływ ciepła na niektóre właściwości warstwy wierzchniej folii polimerowych przeznaczonych do formowania próżniowego*. „Polimery” 2006, 51, s. 442.
- [6] Żenkiewicz M., Richert J., *Termoformowanie pojemników opakowaniowych z nanokompozytowych folii polilaktydowych*. „Polimery” 2009, 54, s. 299.
- [7] Nakonieczny L., *Termoformowanie: formowanie z płyt lub folii*. „PlastNews” 2008, 10, s. 44.
- [8] Nakonieczny L., *Termoformowanie – podstawy grzania półwyrobów płaskich: etap, który decyduje o sukcesie*. „PlastNews” 2008, 11, s. 48.
- [9] Nakonieczny L., Wróblewski R.M., *Termoformowanie – grzanie: o rozchodzeniu się ciepła i nie tylko*. „PlastNews” 2009, 2, s. 48.
- [10] Nakonieczny L., Dolny A., *Termoformowanie – własności tworzyw: to, co bywa lekceważone, a jest dokuczliwe*. „PlastNews” 2009, 3, s. 40.
- [11] Nakonieczny L., *Termoformowanie – własności tworzyw: nierozłączne - tworzywo i skurcz*. „PlastNews” 2009, 4, s. 52.
- [12] Nakonieczny L., *Termoformowanie – Narzędzia: Stempel rozciągający*. „PlastNews” 2012, 12, s. 38.
- [13] Hopmann Ch., Martens J., *Thermoformen: Kühlzeitreduktion durch wassernebel*, „Kunststoffe” 2015, 08, s. 67.
- [14] Dokumentacja techniczna stanowiska do rozciągania podciśnieniowego PEX B-3 F firmy PEX Sp. z o.o.
- [15] Klepka T., Samujło B., *The analysis of extrudate cooling in the extrusion process*. PPS Europe/Africa Regional Meeting 2007, Gothenburg, Sweden 2007
- [16] Madura H. i inni, *Pomiary termowizyjne w praktyce. Pomiary Automatyka Kontrola*. Agenda wydawnicza Paku, Warszawa 2004.
- [17] Praca zbiorowa pod red. Sikory R., *Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych, podstawy logiczne, formalne i terminologiczne*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006.
- [18] Samujło B., *Metoda termowizji w badaniu uniepalnienia PE-HD*. „Przetwórstwo Tworzyw” 2004, 10, s. 100.

- [19] Samujło B., *Study of HDPE Flammability by Thermovision Method*. The Polymer Processing Society 2004 Annual Meeting and 20th Anniversary Celebration, Akron, Ohio, USA, 119.
- [20] Samujło B., *Selected aspects of thermovision in extrusion process*. ICPP-2007, International Conference on Polymer Processing, Buct Beijing, Chiny 2007, 126.
- [21] Sasimowski E., Sikora J.W., *Wybrane badania termowizyjne procesu wytłaczania*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Chemia z. 20, Przetwórstwo Tworzyw Polimerowych, Rzeszów 2009, s. 137.
- [22] VIGO System S.A., instrukcja obsługi kamery termowizyjnej V-20 II

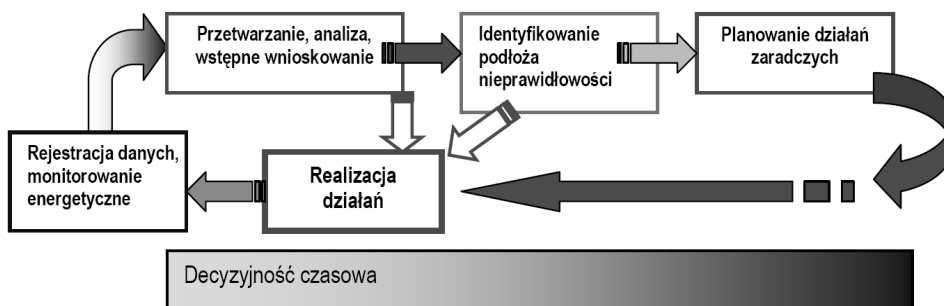
8. Wprowadzenie do administrowania zasobami energetycznymi w przetwórstwie wtryskowym i rozdmuchowym tworzyw

Wprowadzenie

Pojęcie administrowania energią jest stosunkowo nowym obszarem zainteresowań w polskim przemyśle przetwórstwa tworzyw polimerowych. Coraz większe zainteresowanie przetwórców wynika ze wzrostu cen za dostawy energii elektrycznej. Także warunki polityczno-gospodarcze, co do możliwości wykorzystania zróżnicowanych instrumentów finansowych, ukierunkowanych na cele podnoszenia efektywności energetycznej realizowanych procesów technologicznych i samych technologii wytwarzania, (np. PolSEFF II), skłania przedsiębiorców do ukierunkowywania się na realizację technologii przyjaznych środowisku. Jeszcze kilkanaście lat temu motywy związane z racjonalnym gospodarowaniem energią znajdowały się na marginesie aktywności, w tym sektora przetwórstwa tworzyw polimerowych [3], szczególnie w Polsce. Obszar zainteresowania tą tematyką znacznie bardziej intensywnie rozwijał się w krajach zachodnich Europy aniżeli wschodnich. W trakcie ostatniego czasu, sposób podejścia uległ całkowitej zmianie, przez wzgląd między innymi na realne możliwości osiągnięcia zysków ekonomicznych czy stania się firmą przyjazną środowisku. W wielu krajowych zakładach przetwórstwa tworzyw polimerowych obszary tych działań nie są jeszcze znane, wdrażane i wykorzystywane, z uwagi na niedostateczną liczbę instytucji, także tych przyuczelnianych centrów transferu wiedzy tych zagadnień, również promujących i zajmujących się działaniami w rozważanym obszarze. Koszty energii stanowią trzecią największą zmienną kosztową (po materiałach i bezpośrednich kosztach robocizny), a w niektórych firmach jest to nawet drugi najwyższy zmienny koszt [2]. Brak posiadania jednoznacznych informacji na temat konsumpcji energii przez dane jednostki przetwórcze i pomocnicze, a także brak podejmowania jakichkolwiek działań przyczynia się do generowania w firmach strat [1], a także możliwości stawiania się bardziej konkurencyjnym na rynku. Warto wobec powyższego przyjrzeć się kilku podstawowym kwestiom istotnym z punktu widzenia zapotrzebowania energetycznego w przetwórstwie polimerów i ich możliwych technik administrowania.

Jeśli mówi się o administrowaniu lub zarządzaniu [2, 10] także energią należy mieć na myśli łańcuch działań, dzięki którym tworzy się proces wykrywania braków, defektów, oraz sposobów ich likwidacji dla poprawy sytuacji w przedsiębiorstwie [8]. Nieustanny rozwój narzędzi komputerowych, archiwizacji, czy też analizy danych związanych z wykorzystywaniem energii pozwala na coraz sprawniejsze podejmowanie jakichkolwiek działań w zakresie administrowania energetycznego (AE) obszaru przetwórstwa tworzyw (PT) i na tej podstawie

podjmowania właściwych działań zmierzających do zwiększenia efektywności energetycznej (EE) pracy maszyn i urządzeń. Dużą rolę w podwyższaniu EE odgrywa także obszar narzędzi przetwórczych instalowanych na maszynach do PT oraz wspomagania się systemami i narzędziami odnawialnych źródeł energii [9]. Na rysunku 1 przedstawiony został typowy plan zarządzania energią, który ukazuje nieprzerwany proces czynników wpływających na podnoszenie efektywności energetycznej pracy przedsiębiorstwa [6]. Wiele innych bardziej szczegółowych opisów i kierunków działań oraz postępowań można odnaleźć w dyrektywach UE jak i tematycznych ujednoliconych normach z obszaru administrowania energią w przedsiębiorstwach np. PN-EN ISO 50001:2012. Także do adaptacji w obszarze zwiększenia EE powszechnie może być wykorzystana idea cyklu Deminga – PDCA (ang. Plan-Do-Check-Act) [2, 8].



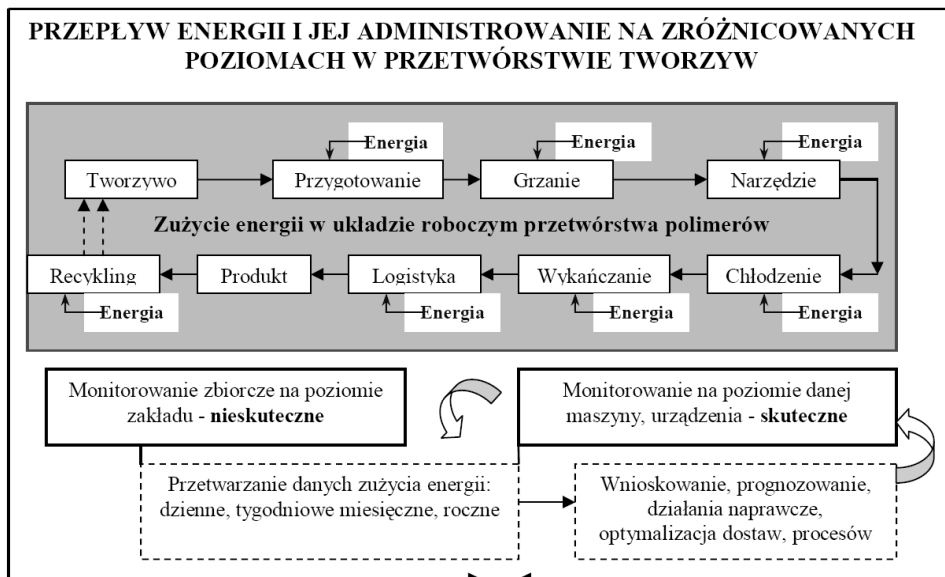
Rys. 1. Ogólny schemat przepływu danych i ich analizy w celu doskonalenia planu zarządzania energią z uwzględnieniem istotności czasowości [1]

Przepływ i zapotrzebowanie energii w przetwórstwie tworzyw

Przemysł przetwórstwa tworzyw polimerowych w UE stanowi znaczący udział gospodarczy na tle firm z innych branż. Świadczą o tym chociażby liczba 62000 przedsiębiorstw z branży przetwórstwa i zagospodarowania tworzyw sztucznych, co stanowi także perspektywiczny obszar współczesnego fundamentu innowacyjnej gospodarki dynamicznie rozwijającej się w Polsce (miejsce 6 pod względem liczby przetwarzanych tworzyw polimerowych) na tle innych krajów europejskich. Wiadomo, iż konkurencyjność w przemyśle tworzyw sztucznych nieustannie rośnie, natomiast ich rynki przemieszczają się systematycznie głównie w stronę krajów wschodnich. Europejska produkcja tworzyw sztucznych utrzymuje się na drugim miejscu w rankingu światowej produkcji [4]. Rosnąca rokrocznie w Polsce liczba przetwarzanych tworzyw polimerowych determinuje zapotrzebowanie na energię elektryczną rozważanego sektora.

Współcześnie jednym z głównych wydatków w sektorze PT są koszty zużycia energii. Przemysł tworzyw sztucznych coraz częściej skupia uwagę różnych

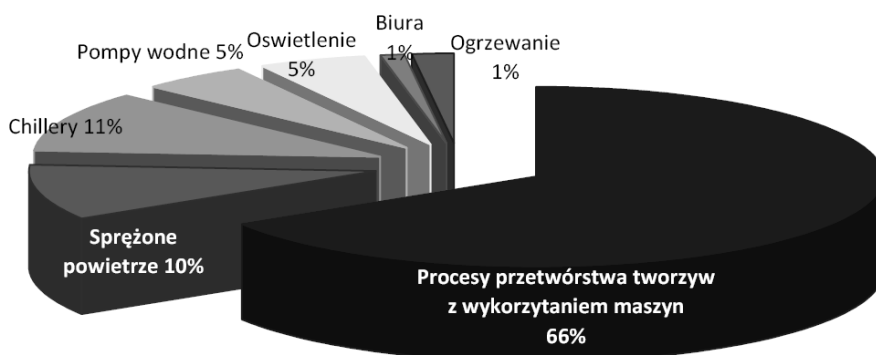
projektów europejskich nastawionych na minimalizację zapotrzebowania energetycznego [5], chociażby Horyzont 2020. Stąd też zmniejszenie zużycia energii już o 5-10 %, daje ogromne oszczędności energetyczne, finansowe oraz obniża emisyjność CO₂ do środowiska naturalnego. Założenia te są niejednokrotnie wyższe i sięgają nawet do 20%. Energia w przetwórstwie tworzyw polimerowych wykorzystywana jest praktycznie na każdym poziomie cyklu wytwarzania i życia wytworów polimerowych rys. 2 [2]. Są to miejsca, w których możliwe jest podjęcie działań zmierzających do obniżenia zapotrzebowania energetycznego. Aby być w stanie AE winno się zacząć przede wszystkim od zdobycia wiedzy na temat tego gdzie, na co oraz kiedy zużywana jest energia. Bardzo pomocne są w tym cykliczne metody pomiaru zużywanej energii przez maszyny i urządzenia do PT. Istnieje wiele systemów umożliwiających nieustanne monitorowanie zużycia mediów. Bardzo duży wpływ na obecne zachowania w branży tworzyw sztucznych ma wspomniana norma PN-EN ISO 50001:2012 [6].



Rys. 2. System zagospodarowania i przetwarzania energii w przetwórstwie tworzyw polimerowych [7]

Zważywszy na fakt, iż przybliżony rozkład zapotrzebowania energii w firmach zajmujących się przetwórstwem tworzyw polimerowych jest następujący: procesy przetwórstwa realizowane na maszynach 66%, zapotrzebowanie na sprężone powietrze 10%, chłodzenie 11%, wytwarzanie ciśnień przesyłowych dla mediów chłodzących 5%, oświetlenie zakładu 5%, biura 1%, ogrzewanie 2% (rys. 3.)[2,3], wydaje się stosownym pierwszorzędnie skupić uwagę na tych obszarach, które są najbardziej energochłonne, nie wykluczając drugorzędnie

obszarów mniej energochłonnych. Każda składowa pochłaniająca energię w ujęciu globalnym jest istotna z punktu widzenia minimalizacji zapotrzebowania energii w obszarze przetwórstwa polimerów. Na rys. 3 dostrzega się, że aż 92% całkowitego zużycia energii wykorzystywane jest przez maszyny i urządzenia pomocnicze. Pozostające koszty energii dotyczą oświetlenia, biur oraz ogrzewania, co stanowi tylko 8% całkowitego zużycia.



Rys. 3. Zużycie energii (%) w głównych obszarach przetwórstwa tworzyw sztucznych [2]

Także na podstawie zapotrzebowania tworzyw polimerowych w poszczególnych sektorach gospodarczych (opakowania 39.6, budownictwo 20.3, motoryzacja 8.5, E&E 5.6, rolnictwo 4.3 i inne 21.7%) [4], można mówić w przybliżeniu o zapotrzebowaniu energetycznym w poszczególnych tych sektorach produkcyjnych. Duży wpływ na uwarunkowania zapotrzebowania energetycznego wynikają z faktu dostępnych technologii i maszyn (relacja stare-nowe-innowacyjne) a także podejmowanych działań zaradczych i naprawczych w celu utrzymania zapotrzebowania energetycznego na danym poziomie lub jego obniżania. Obniżanie na pewno będzie miało miejsce w przypadku wypierania starych rozwiązań technologicznych maszyn, narzędzi i peryferii na rzecz tych nowszych czy zupełnie nowych. Jednakże aby dane poczynania były możliwe do wdrażania należy mieć na uwadze kilka kwestii związanych z globalnym a indywidualnym zużyciem energii, monitorowaniem i prognozowaniem działań (M&T) także rodzajami obciążeń w przetwórstwie tworzyw. Możliwość podziału globalnego zużycia energii spożytkowanej przez maszyny i urządzenia na jednostkowe zużycie przez te jednostki niejednokrotnie bywa niewykonalna z uwagi na brak systemu monitorowania zużycia energii przez te indywidualne gniazda produkcyjne. Monitorowanie i prognozowanie działań (ang.: M&T) dotyczących zużycia energii jest formą gromadzenia, interpretowania i przekazywania informacji dotyczących tej kwestii. M&T polega na dokonywaniu i gromadzeniu danych z pomiarów ich przetwarzania oraz ustalania miejsc, w których można podejmować właściwe działania na rzecz minimalizacji zapo-

trzebowani energetycznego. Niejednokrotnie ogniwa o danym zapotrzebowaniu energetycznym można łatwo identyfikować za pośrednictwem stworzonej mapy energetycznej i jej czasowej aktualizacji. Na podstawie tego można wnioskować o stanie maszyn i urządzeń i ich zapotrzebowaniu na energię. Bardzo pomocne w tym zakresie działań mogą okazać się współczesne nowoczesne rozwiązania informatyczne, które pomagają diagnozować te stany oraz je przetwarzać i informować użytkowników o ewentualnych rozbieżnościach. Oczywiście zebrane dane muszą być przekazane do konkretnych analiz przeprowadzanych przez kompetentnych ludzi, którzy na ich podstawie są w stanie wysunąć odpowiednie wnioski i prognozować kierunki działań. Dla każdego zakładu ilość informacji i wytycznych dotyczących działań M&T musi być odpowiednia do wielkości wydatków energetycznych. M&T może wymagać udoskonalenia zdolności pomiarowych w zależności od alokacji środków finansowych. Nigdy nie należy podejmować działania polegającego na wszechstronnym instalowaniu tychże narzędzi. Każdorazowo należy zdecydować gdzie zainstalować narzędzia pomiarowe, w celu obniżenie kosztów użytkowania maszyn i urządzeń [1–3].

Uwarunkowania obciążenia podstawowego i procesowego dla technologii przetwórstwa

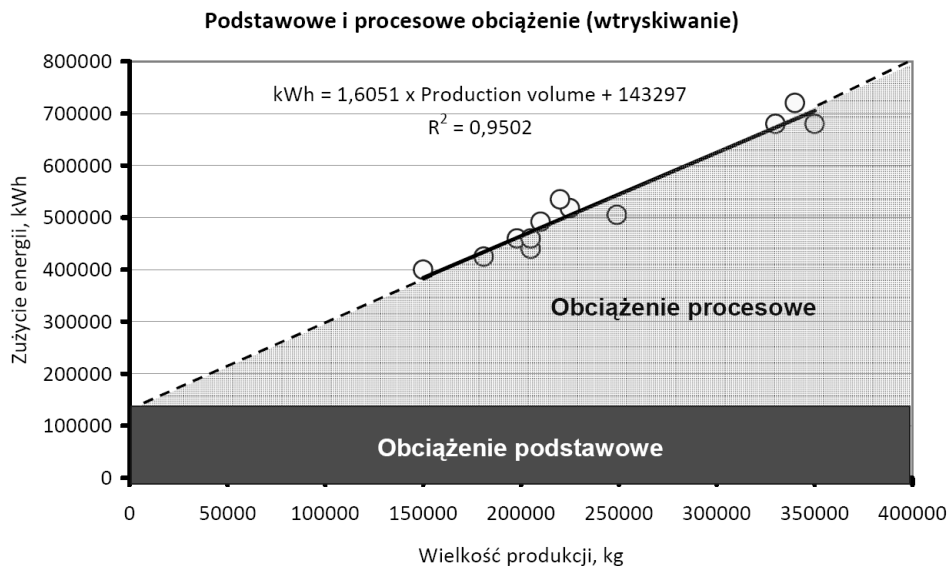
Powszechnie uważa się, że zużycie energii w przetwórstwie tworzyw jest nieustalone i niekontrolowane. Wiele firm rezygnuje z próby podjęcia działań zmierzających do kontroli jej zużycia. W rzeczywistości jest tak, że zużycie energii jest uzależnione bezpośrednio od wielkości produkcji i nie jest aż tak trudne do kontrolowania. Niesłusznym wobec tego jest stwierdzenie, że nie da się nadzorować procesu zużycia energii. Zużycie energii jest zmienne i możliwe do kontrolowania. Na zużycie energii w przetwórstwie tworzyw polimerowych przypada obciążenie podstawowe oraz procesowe [3]. Na podstawowe zużycie energii składa się między innymi: energia wykorzystywana na stałą pracę wybranych układów maszyny na biegu jałowym, na oświetlenie, ogrzewanie, prace kompresorów powietrza, chłodnic, oraz wszelakich innych peryferii w zależności od intensyfikacji ich wykorzystania. Obciążenie procesowe jest obciążeniem, które jest zależne bezpośrednio od rodzaju realizowanej produkcji: wtryskiwanie, wtryskiwanie wieloskładnikowe, rozdmuchiwanie itp. Oba rodzaje obciążenia mogą być ze sobą łączone w celu otrzymania jakościowej linii charakterystycznej (JLH), która opisuje poziom zużycia energetycznego (rys. 4).

Dla maszyn przetwórczych niezależnie od wykorzystywanej techniki przetwórstwa możliwe jest w miarę prosty sposób odnaleźć obciążenie podstawowe i procesowe dotyczące zużycia energii. Zapis objętościowy wielkości produkcyjnych (np. w kilogramach tworzywa) pomnożony przez liczbę miesięcy oraz wielkość zużycia energii (kWh) w tym samym okresie daje określone wartości. Ważne jest, aby takie charakterystyki sporządzać okresowo. Przykładowe dane z wybranej wtryskowni regionu kujawsko-pomorskiego dla jednostek wtryskują-

cych zostały przedstawione w tabeli 1. Zanotowanie kilku charakterystyk (np. 12-15) umożliwia wpisanie zebranych wartości do arkusza kalkulacyjnego i uzyskanie poglądowego wykresu o określonym trendzie liniowym, dzięki zastosowaniu danej funkcji interpolacyjnej. Funkcja ta staje się jakościową linią charakterystyczną (JLH) zużycia energii. Przecięcie linii z osią pionową wyznacza punkt podstawowego zużycia energii dla realizowanego procesu technologicznego na przestrzeni czasu. Jest to punkt zużycia energetycznego w momencie, kiedy produkcja nie jest realizowana, a posiada określone obciążenie podstawowe wynikające z podstawowej pracy maszyn i urządzeń. Nachylenie krzywej JLH do osi poziomej jest obciążeniem procesowym widocznym pod krzywą i przedstawia przeciętne zużycie energii na każdy kilogram przetwarzanego tworzywa. Dane zawarte w tabeli 1 przedstawiono w postaci równania krzywej:

$$JLH \text{ (kWh)} = 1,61 \cdot (\text{wielkość produkcyjna}) + 143297 \quad (1)$$

Podstawowa wartość energetyczna dla tego przypadku obciążenia podstawowego wynosi 143297 kWh, a obciążenie procesowe dla każdego kilograma przetwarzanego tworzywa wynosi 1,61 kWh/kg. Krzywa JLH może także służyć do prognozy zużycia energii w najbliższym czasie np. 6 miesięcy.



Rys. 4. Charakterystyka energetyczna jednostki składa się z obciążenia podstawowego i zmiennego procesowego [3] na przykładzie wtryskowi o zbliżeniowym asortymencie produkcyjnym

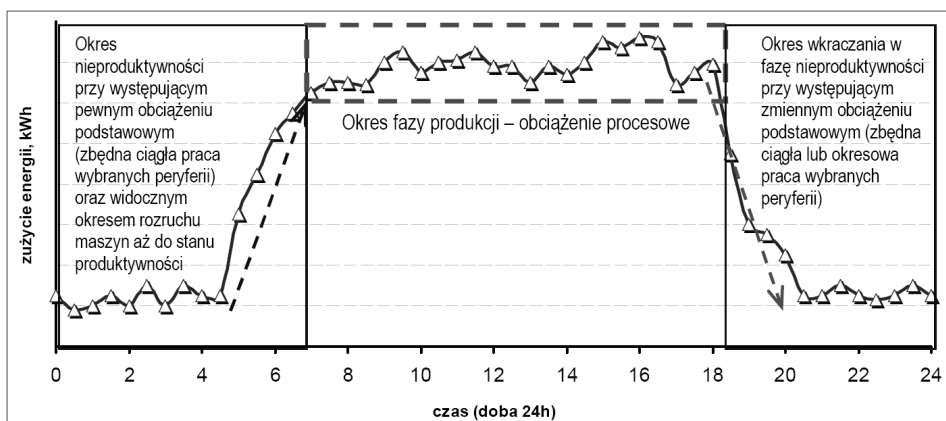
Tabela. 1. Zużycie energii i liczba przetwarzanych tworzyw polimerowych na wtryskowi[3]

Lp.	Miesiąc	Zużycie energii, kWh	Wielkość produkcji, kg
1	Styczeń	425000	181000
2	Luty	460000	198000
3	Marzec	505000	249000
4	Kwiecień	440000	205000
5	Maj	492000	210000
6	Czerwiec	518000	225000
7	Lipiec	535000	220000
8	Sierpień	460000	205000
9	Wrzesień	680000	350000
10	Październik	720000	340000
11	Listopad	680000	330000
12	Grudzień	400000	150000

Znamionowe obciążenie ma miejsce nawet wtedy, kiedy produkcja nie ma miejsca w danym zakładzie i nadal pochłania około 143297 kWh/miesiąc. Przy założonym koszcie 1kWh=0,2 PLN roczna konsumpcja energii kosztuje około 28.000 PLN miesięcznie lub 344.000 PLN rocznie, co stanowi 30% całkowitego możliwego zużycia energii przez jednostkę. Jest to wartość przeciętna zużycia dla przetwórstwa tworzyw, gdzie typowe podstawowe obciążenie może zawierać się pomiędzy 10÷40% totalnego zużycia energii.

Podstawowe obciążenie jest skutecznym zużyciem energii (koszty ogólne) i jest uzależnione od maszyn ich stanu serwisowego, a także statusu zarządzania pracy wybranymi peryferiami i urządzeniami w czasie, kiedy maszyny podstawowe nie pracują np. porą nocna. Stan taki zobrazowano na przykładzie dobowego cyklu pracy na rys. 5. Wyraźnie dostrzega się tutaj dwa zasadnicze okresy: nieproduktywności i produktywności. W stanach tych występują dwa podstawowe wspomniane typy obciążeń. Wielkość podstawowego obciążenia dotyczy także może strat energetycznych wynikających z przecieków sprężonego powietrza, strat zimna-ciepła występujących w trakcie przepływu medium, niepotrzebnego oświetlenia przy braku produkcji, niepotrzebnej pracy przenośników i innych mediów itp. Redukcja obciążenia podstawowego, (co skutkuje obniżeniem krzywej JLH) może być dokonywana bez wpływu na szybkość produkcji czy jej jakość. Oszczędności te są bardzo wysokie i opłacalne, ponieważ obciążenie podstawowe jest tak naprawdę niezależne od produkcji. Informacje dotyczące obciążenia procesowego pokazują, że jednostka zużywa 1,5751 kWh/kg przetworzonego tworzywa. Obciążenie procesowe wskazuje, w jakim stopniu dana firma jest efektywna w trakcie procesu przetwórstwa polimerów. Redukcje obciążenia procesowego (zredukowanie kąta nachylenia krzywej JHL) wskazuje

na poprawę efektywności procesu i wykorzystania maszyny. Zazwyczaj jest to o wiele bardziej trudne do osiągnięcia niż zredukowanie obciążenia podstawowego. JŁH ujawnia wiele informacji na temat działań firmy, a prosta analiza pozwala poznać naturę realizowanego procesu. Fakt niedoskonałego zarządzania energią oraz brak kontroli nad zużyciem energii w czasie z powodzeniem można dostrzec na wykresie. Zauważa się wysokie obciążenie podstawowe oraz wzrost obciążenia procesowego przy dużym rozrzucie wyników (niska wartość współczynnika R^2). Obciążenie podstawowe ma wysoką wartość jeśli proces przetwórstwa i serwisowania maszyn czy urządzeń nie jest na najlepszym poziomie. Obciążenie procesowe będzie niższe niż normalne, ponieważ znaczna część normalnego obciążenia procesowego będzie przekonwertowana do obciążenia podstawowego – co oznacza, że nie jest postrzegana jako zmienna obciążenia procesowego lecz jako ustalone obciążenie podstawowe. Wysoka rozbieżność punktów wynikowych wynika ze słabej linearyzacji pomiędzy zużyciem energii a wielkością produkcyjną. Metoda JHL może być wykorzystywana do wszystkich procesów przetwórczych, których główną wielkością jest zużycie energii elektrycznej. Wysokość jak również kąt pochylenia krzywej zależy od rodzaju procesu przetwórstwa tworzyw, ponieważ każdy z nich charakteryzują się one odmiennymi obciążeniami podstawowymi.



Rys. 5. Typowe zapotrzebowanie energetyczne jednostki (zakładu) w czasie doby – widoczny stan obciążenia podstawowego nieproduktywnego i procesowego - produktywnego

Tak jak wspomniano zapotrzebowanie energetyczne w przetwórstwie tworzyw polimerowych jest w szczególności uzależnione od rodzaju stosowanej technologii. Każda z tych technologii w zróżnicowanym polu zakresu ich wykorzystania posiada określony przedział energochłonności (kWh/kg). Na podstawie danych literaturowych [2] na rysunku 5 przedstawiono takie przedziały wartości dla poszczególnych, popularnych technologii przetwórstwa. Każdy z tych przedziałów zawiera w swoim obszarze możliwe do wygenerowania funkcje liniowe

i ich równania (2) obrazujące wartości zapotrzebowania energetycznego w danym procesie przetwórstwa każdego kilograma masy tworzywa. Ogólnie na podstawie rozważanego równania (1) można je zapisać symbolicznie w postaci [7]:

$$Z_E = \alpha W_p + O_s, \quad (2)$$

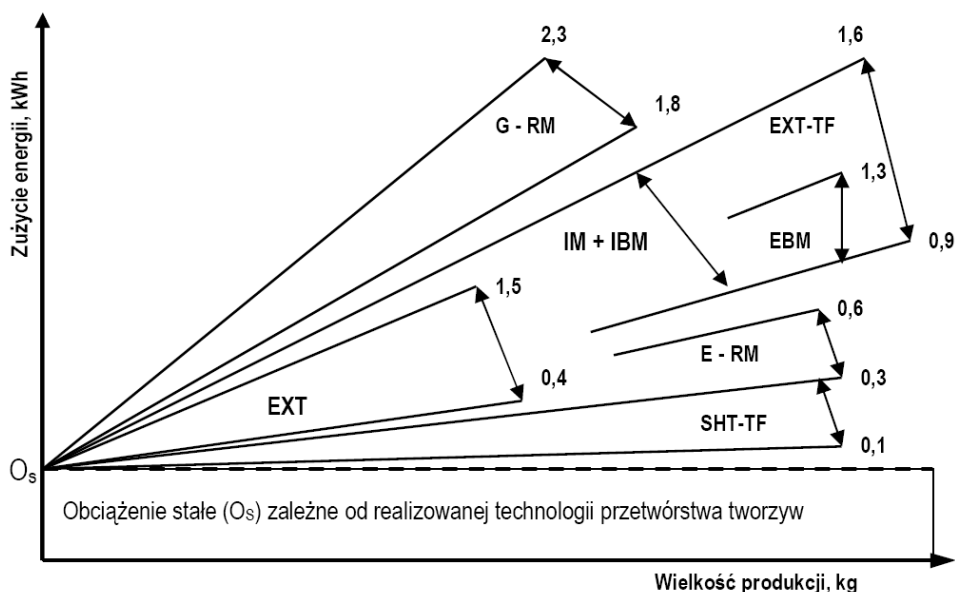
gdzie:

Z_E – zużycie energii, kWh (inaczej JLH)

α – współczynnik obciążenia procesowego (obciążenie procesowe), kWh/kg,

W_p – wielkość produkcji, kg

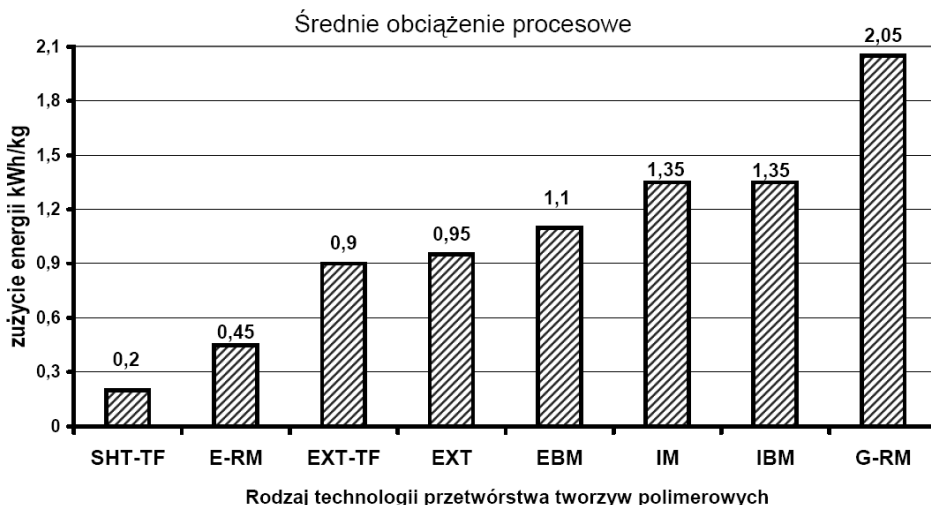
O_s – obciążenie stałe, kWh



Rys. 5. Zbiorcze zestawienie zapotrzebowania energetycznego w wybranych obszarach technologii przetwórstwa polimerów z uwidocznieniem przedziałów rozpiętości zużycia energii R_{PZE} : SHT-TF – termoformowanie z arkusza, E-RM – formowanie rotacyjne oparte na grzaniu energią elektryczną, EXT – wytłaczanie, IM + IBM – wtryskiwanie i wtryskiwanie z rodmuchiowaniem, EBM – wytłaczanie z rodmuchiowaniem, EXT-TF – wytłaczanie arkuszy z jednoczesnym termoformowaniem, G-RM – formowanie rotacyjne oparte na grzaniu gazowym, 2,3; 1,8; 1,6...0,1 wartości obciążenia procesowego kWh/kg [7]

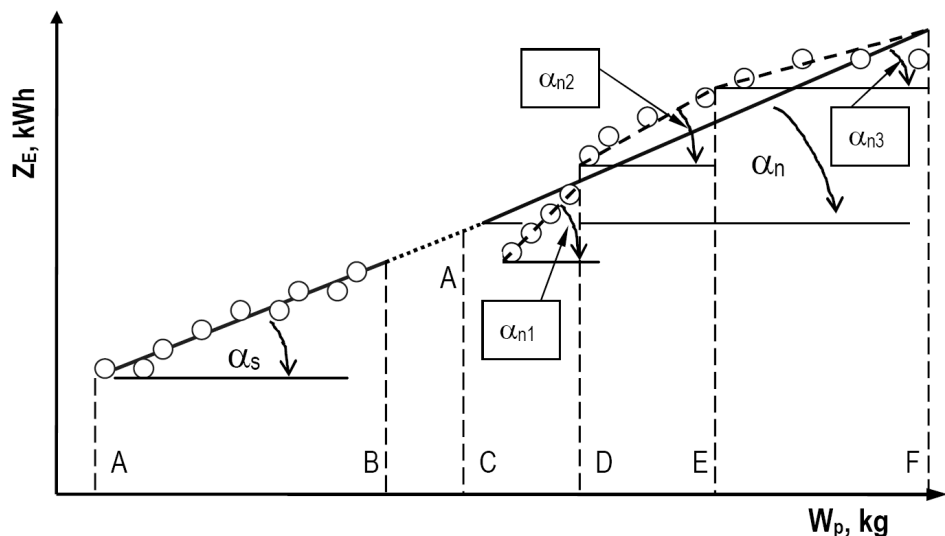
Rosnące zapotrzebowanie energetyczne w danym procesie przekłada się na wzrost wartości współczynnika α , który w ujęciu graficznym (rys.6) jest tangensem kąta nachylenia prostej do osi opisującej wielkość produkcji. Rekomenduje się doskonalenie i organizację sposobów produkcji w taki sposób, aby wartość O_s miała być jak najmniejsza dla danej technologii przetwórstwa. Wartość O_s (punkt wspólny prostej zapotrzebowania energetycznego i osi zużycia energii (rys.5)) dla wszystkich technologii przetwórstwa zawiera się pomiędzy 20 a 40%. Zakłada się, że im niższa wartość O_s , tym technologia mniej energo-

chłonna na poziomie obciążenia podstawowego maszyny, a tym samym bardziej przyjazna środowisku naturalnemu. Rozpiętości przedziałów zapotrzebowania energii (RPZE) można nazywać alternatywnie jako przedziały obciążenia procesowego technologii przetwórstwa, w których zawierają się definiowane proste ZEi. Najmniejszą wartość R_{PZE} uzyskuje się dla technologii termoformowania z arkusza 0,2 kWh/kg, a największą można przypisać technologii wytłaczania 1,1 kWh/kg przetworzonego tworzywa. Dla stosunkowo popularnej technologii wtryskiwania i wtryskiwania z rodmuchiowaniem przedział wynosi $R_{PZE} = 0,7$ kWh/kg. Z kolei średnie wartości obciążenia procesowego dla danych technologii przetwórstwa zobrazowano na rys.6, na podstawie danych literaturowych [2]. Zakłada się, że w każdym z obszarów technologii przetwórstwa zapotrzebowanie energii można zredukować, co najmniej o każde 10% poprzez odpowiednie zarządzanie, utrzymanie i nowe inwestycyjne.



Rys. 6. Średnie obciążenie procesowe dla podstawowych technologii przetwórstwa tworzyw polimerowych [7]

W celu zobrazowania czasowej zmienności zapotrzebowania obciążenia procesowego α_i w technologii przetwórstwa można przytoczyć model graficzny przedstawiony na rys 7, na którym zaprezentowano charakterystyczne przedziały informujące o poziomie efektywności realizowanych procesów. Przedział AB wskazuje na dużą stabilność (α_s) zużycia energii w czasie, w trakcie realizacji określonego procesu przetwórstwa. Przedział CF wykazuje stosunkowo duże zróżnicowane zużycie energii w czasie, przypadające na dany kilogram przetworzonego tworzywa. W tym przedziale uwidoczniło się również przedziały CD, DE i EF, w których dostrzega się stopniowo malejącą wartość współczynnika α_n tj, $\alpha_{n1} > \alpha_{n2} > \alpha_{n3}$. Stan ten oznacza rosnący poziom efektywności energetycznej realizowanego procesu przetwórstwa tworzyw polimerowych.

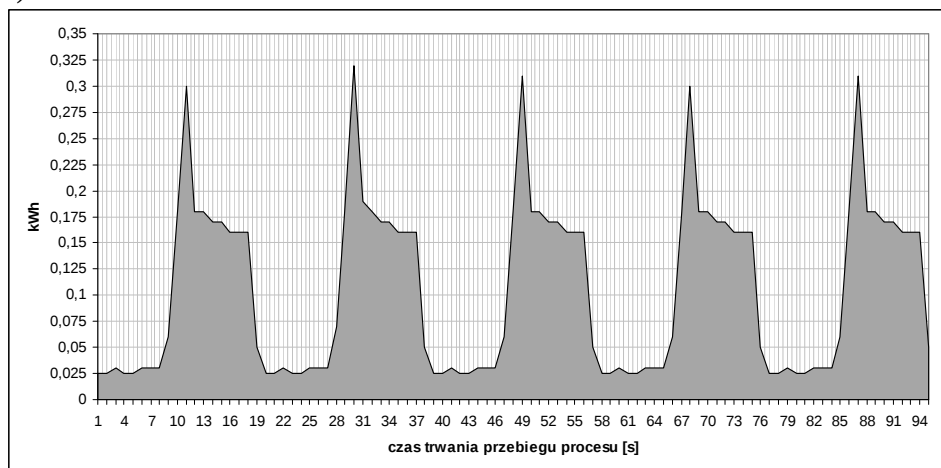


Rys. 7. Dane modelowe dotyczące zużycia energii przez maszynę do przetworstwa tworzyw w funkcji przetworzonego tworzywa; $|AB|$, $|CD|$, $|DE|$, $|EF|$ i $|CF|$ – rozważane przedziały w zakresie stabilności i efektywności procesu przetworstwa; α_{ni} – elementarny współczynnik obciążenia procesowego [7]

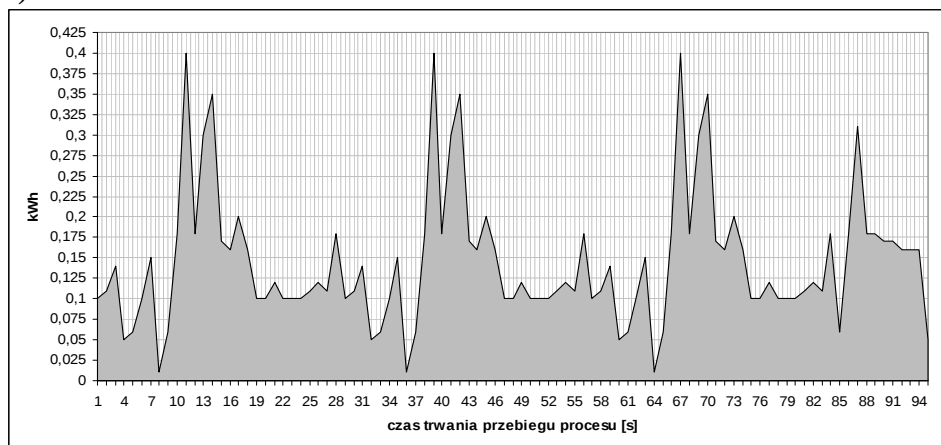
Z kolei przykładowe stany zapotrzebowania energetycznego dla technologii wytłaczania z rodmuchiowaniem i ich zmienności przedstawiono na rys 8. Cykl procesu rodmuchiowania w idealnym przypadku powinien objawiać się powtarzalnym wykresem konsumpcji energetycznej w określonych punktach czasowych (rys. 8a). Jednakże stan ten może zostać zakłócony przez układ uplastyczniający i jego system grzejny, który załącza się według indywidualnych potrzeb zgodnie z czujnikami i regulatorami, które posiada. Z kolei rodmuchiarkę o wysokim stopniu nierównomierności cyklu zapotrzebowania energetycznego zobrazowano na rys. 8b. Stan ten jednoznacznie świadczy o konieczności podjęcia działań zaradczych mających za zadanie zrównoważanie przebiegu krzywej. Zarys technologii wytłaczania z rodmuchiowaniem w ujęciu rekomendowanych działań minimalizujących zapotrzebowanie energetyczne

Wytłaczanie z rodmuchiowaniem (ang. extrusion blow molding, EBM) przebiega przy ograniczeniu mechanicznym procesu rozciągania tworzywa w formie wytłaczarsko-rodmuchowej (formie WR), określane jest jako nieswobodne. W rezultacie tego procesu otrzymuje się przede wszystkim pojemniki z tworzyw termoplastycznych do napojów, środków spożywczych, leków, środków chemicznych i kosmetyków, na ogół poddawane już tylko etykietowaniu lub zdobieniu. Tym sposobem mogą być wytwarzane wytwory o większych rozmiarach na przykład zbiorniki na paliwa płynne, beczki jak i wytwory techniczne stosowane chociażby w motoryzacji [13,14].

a)



b)



Rys. 8. Zróznicowanie obciążeń podstawowych i procesowych w technologii wytłaczania z rozdmuchiwaniem: a) rozdmuchiarka o niskim obciążeniu podstawowym oraz z wysoką powtarzalnością realizowanych cykli wtryskiwania; cykl i jego fazy łatwe do zidentyfikowania. Widoczne także zredukowanie konsumpcji energetycznej w fazie chłodzenia wytworu. Stan rozdmuchiarki prawidłowy z dobrze dobranymi parametrami przetwórstwa, b) rozdmuchiarkę o zdecydowanie wyższym obciążeniu podstawowym oraz zredukowaną powtarzalnością realizowanych cykli: końcowe fazy cyklu rozdmuchiwania trudniejsze do zidentyfikowania. Widoczna także fluktuacja konsumpcji energetycznej w fazie chłodzenia. Stan rozdmuchiarki zmienny z możliwie nieprawidłowo dobranymi parametrami przetwórstwa. Zalecane przeprowadzenie identyfikacji stanu maszyny

W tradycyjnym jednoetapowym procesie wytłaczania z rozdmuchiwaniem w formie, w wytłaczarce następuje uplastycznianie, homogenizacja i przygotowanie stopionego tworzywa (głowica akumulatorowa stopionego tworzywa dla wytworów technicznych) w celu wytłoczenia profilu (węża). Uplastycznione

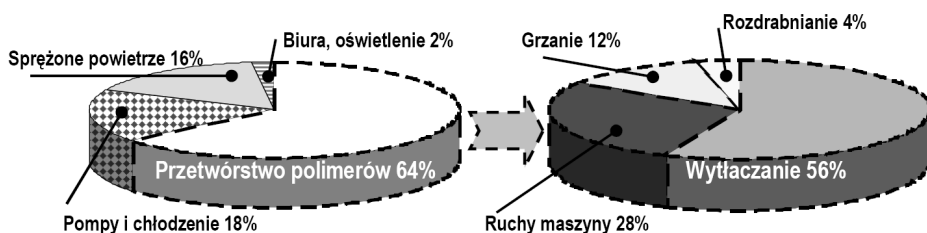
i zgromadzone tworzywo kierowane jest do głowicy wylączarskiej (głowicy kątovej), skąd wąż o określonym przekroju poprzecznym, po osiągnięciu odpowiedniej długości jest umieszczany w formie rozdmuchowej, zgrzewany i odcinany. Zgrzewanie i odcinanie węża następuje wskutek specjalnie ukształtowanych elementów na powierzchni podziału formy. Rozdmuchiwanie, zazwyczaj sprężonym powietrzem (za pomocą trzpienia rozdmuchowego), następuje aż do momentu zetknięcia się tworzywa ze ściankami gniazda formującego i odwzorowania struktury jego powierzchni, które wraz z czynnikiem rozdmuchującym decydują o chłodzeniu uformowanego wytworu. Niejednokrotnie najbardziej energochłonną fazą cyklu jest czas i energochłonne chłodzenie odpadów technologicznych, które wynoszą niejednokrotnie w zakresie ciężaru wagowego do 50-80%. Ostatecznie rozdmuchany wytwór opuszcza formę, po czym usuwa się odpady rozdmuchowe w stacji wykańczającej, skąd wytwór trafia do stacji kontroli jakości. Jeśli spełnia wymagania trafia do magazynu wyrobów gotowych. Reasumując, w procesie wylączania z rozdmuchiowaniem w formie można wyróżnić sześć podstawowych składowych cyklu odpowiedzialnych za konsumpcję energetyczną [13]:

- uplastycznianie tworzywa,
- wylączanie uplastycznionego tworzywa (węża) przez głowicę kątową,
- umiejscowienie węża w formie poprzez jego zaciśnięcie w strefie zgniotu i odcięcie,
- rozdmuchiwanie węża do żadanego kształtu,
- otwarcie formy i przeniesienie wytworu do stacji wykańczającej (usuwanie odpadów) oraz kontroli jakości,
- składowanie wytworów i ewentualny recykling odpadów technologicznych.

Komponentami konwencjonalnej rozdmuchiwarki hydraulicznej odpowiedzialnymi za zróżnicowany konsumpcjonizm energetyczny jest (są) [2]:

- zasilanie sieciowe i przyłącze chłodzenia – chłodzenie oleju pochłania do 50% energii zasilania sieciowego, co jest zamieniane na straty ciepłe i obciążenie układu chłodzenia,
- zasilanie sprężonym powietrzem na potrzeby rozdmuchiwania węża i pracy elementów układu maszynowego,
- zasilanie wsadem i jednostka wylączająca z głowicą kątową lub akumulatorową – mechanizm napędowy ślimaka (obrotowy i posuwisto zwrotny głowicy) dysza wylączająca,
- elementy grzejne układu uplastyczniającego i głowicy – niezbędne dla zaistnienia procesu uplastyczniania tworzywa jak i jego podtrzymania,
- jednostka zamykania – odpowiedzialna za mocowanie formy i wytworzenie odpowiedniej siły zwarcia na etapie rozdmuchiwania oraz zamknięcia formy podczas chłodzenia wytworu i jej końcowego uwolnienia
- system kontrolny – odpowiedzialny za rejestrowanie poszczególnych stanów, ruchów maszyny czy kontrole jakości.

Energia zostaje na wejściu wprowadzona i pochłonięta przez maszynę głównie na wytworzenie odpowiedniej siły hydraulicznej konsumowanej na dane elementarne procesy, także na nagrzanie cylindra, głowicy i przekazanie ciepła do tworzywa, następnie usunięcia ciepła przez system chłodzący i w niewielkim stopniu przez sam wytwór rozdmuchany, który opuszcza formę. Wiadomym jest, że głównie to maszyna i przyłącza sprężonego powietrza oraz ciepłone, głównie chłodzące, są naczelnymi ogniwami zużycia energii. Podstawowe komponenty konsumpcjonizmu energetycznego w zakładach realizujących proces wytłaczania z rozdmuchiwaniami można wyrazić w wartościach średnich [2], co również zaprezentowano na rys. 9: przetwórstwo polimerów 64%, chłodzenie i pompowanie cieczy termostatujującej maszynę i narzędzie 18%, konsumpcja sprężonego powietrza 16%. Łącznie stanowi to 98%. Pozostałe 2% to oświetlenie i biura. Analizując to tylko w odniesieniu do samego przetwórstwa podział jest następujący (wartości średnie): 56% wytłaczanie, 28% ruchy maszyny, 12% grzanie, rozdrabnianie odpadów technologicznych 4%.



Rys. 9. Podstawowe komponenty konsumpcjonizmu energetycznego w zakładach realizujących proces wytłaczania z rozdmuchiwaniami wyrażone w % - wartości średnie

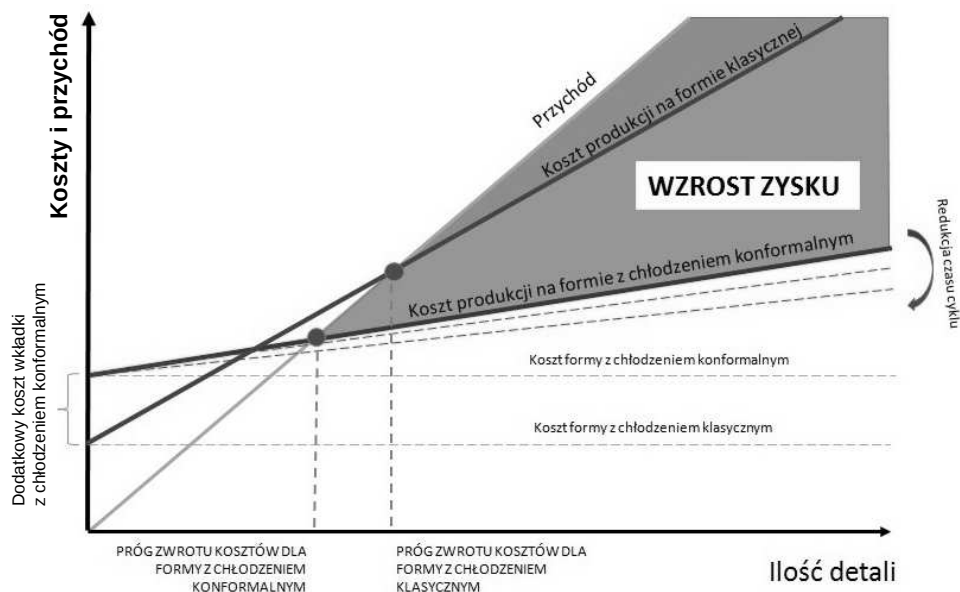
Na podstawie kilkuletnich obserwacji i dostępnych źródeł literatury [1–12] wskazano wybrane obszary działań możliwe do zaimplementowania w przetwórstwie wytłaczania z rozdmuchiwaniami na rzecz minimalizacji konsumpcjonizmu energetycznego i materiałowego:

- minimalizację zapotrzebowania tworzywa polimerowego na jednostkową realizację procesu możliwą do osiągnięcia poprzez zastosowanie zaawansowanych systemów obliczeń MES np. Ansys-Polyflow (blow molding). Podstawowe możliwe oszczędności wsadu polimerowego przetwórstwa rozdmuchowego poprzez zastosowanie optymalizacji profilu wytłaczanego węża wynieść mogą na poziomie minimalnym 5–10% [15]. Niniejszym mniej energii będzie wymagane na podgrzewanie materiału polimerowego i jego wytłaczanie oraz rozdmuchiwanie, a kolejno na ochładzanie wytworu w formie.

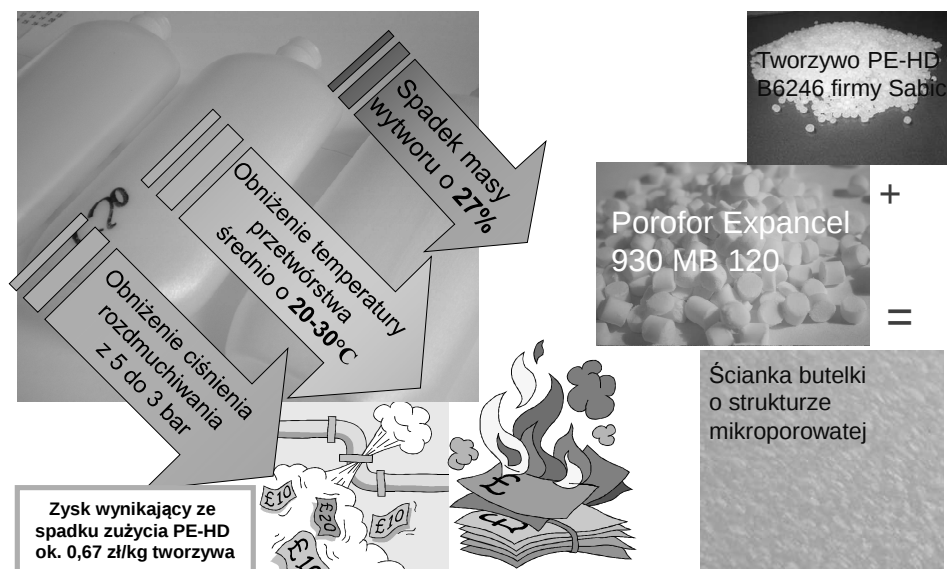
- zredukowania wartości szczeliny głowicy wylączarskiej do wartości zapewniającej uzyskiwanie wytworów o akceptowalnych parametrach jakościowych (program redukcji wartości o każde 0,2–0,5mm); możliwe osiągnięcie mniejszego konsumpcjonizmu materiałowego o m-gram tworzywa na cykl rozmuchiwania (działanie wysoce proekologiczne, obniżające ilość wkładanej energii na przetwarzanie i rozdrabnianie odpadów technologicznych, a także obniżające konsumpcje materiału wsadowego).
- podwyższenia stopnia izolacyjności układów przesyłowych mediów w obrębie strefy pracy maszyny i narzędzi formowych (izolowanie dystrybucyjnych linii przemysłowych otulinami o wysokiej termoizolacyjności, ograniczanie do minimum pasożytniczego przejmowania ciepła z otoczenia, możliwe zyski energetyczne na poziomie ok. 1–2%, działania niskonakładowe)
- izolowanie możliwych układów funkcjonalnych: uplastyczniania, głowicy wylączarskiej (częściowe podwyższenie stopnia izolacyjności).
- stosowanie bezpośredniego rozdrabniania odpadów technologicznych po ich oddzieleniu od wytworów docelowych i kolejno zasypywanie recyklatu z bieżącej stacji rozdrabniania do układu uplastyczniającego w celu unikania strat ciepła dostępnego w recyklerce, a niezbędnego na proces uplastyczniania tworzywa (możliwe obniżenie mocy grzejnej układu o minimum 10%)
- program zredukowania długości wylączanego węża do możliwej wartości minimalnej dla zredukowania ilości wytwarzanych odpadów technologicznych, które wymagają ponownego rozdrobnienia w celu otrzymania recyklatu (możliwość zredukowania odpadu technologicznego o około 5–10%). Kwestia ta jest powiązana ze zredukowaniem ilości powstającego odpadu technologicznego w części dolnej strefy zgniotu formy.
- zaimplementowanie wytycznych co do stref grzejnych układu uplastyczniającego i głowic wylączarskich także tych z akumulatorem stopionego tworzywa (próba obniżania temperatury na układzie i głowicy o każdy 1°C aż do momentu zauważenia istotnych zmian w realizowanym procesie wpływającym negatywnie na postać wytworów końcowych).
- uszczelnienie ognisk wycieku sprężonego powietrza na maszynie do rozmuchiwania. W przypadku okresowego postoju maszyn w najbliższym okresie serwisowym zaleca się załączenie do maksimum ciśnienia w systemie dystrybucji powietrza i zlokalizowanie ognisk możliwego wycieku oraz ich naprawy.
- indywidualne regulatory dystrybucji sprężonego powietrza dla każdej z maszyn, w tym próba obniżenia sprężonego powietrza o 0,1 bar do momentu barku akceptacji stanu jakościowego wytworu. Ustalono możliwość obniżenia o 0,3 bar przy akceptowalnej przez klienta jakości wytworów. Oznacza to tym samym zredukowanie ilości energii niezbędnej na wytworzenie sprężonego powietrza.

- stosowanie technologii przyrostowych (spiekania proszków metali DMLS, SLS, SLM), z zastosowaniem cech chłodzenia konformalnego, wspomagających budowę efektywnie energetycznie form rozdmuchowych w obszarach największego skumulowania energii cieplnej (głównie strefy zgniotu). Możliwe skrócenie czasu cyklu chłodzenia o minimum 10%. Chłodzenie konformalne jest nieocenionym narzędziem, które pomaga sprostać wymogom jakości, stabilności a także powtarzalności otrzymywanej struktury wytworu, przy obniżeniu kosztów produkcji (rys. 10) wynikających także z minimalizacji zapotrzebowania energetycznego [11]. Jak do tej pory zastosowanie tegoż rodzaju chłodzenia w formach rozdmuchowych nie jest popularne.
- możliwość zastosowania specjalnego dodatku mikroporotwórczego Expancel 930 MB 120 zapewniającego realizację procesu wytłaczania mikroporującego z jednoczesnym rozdmuchiowaniem. Standardowe warunki przetwórstwa stosowane np. w przypadku PE-HD w rozumieniu temperatury wytłaczanego węża wynoszą w granicy 190–205 °C, ciśnienia rozdmuchiwania 5–8 bar, temperatury chłodziwa 15–17 °C. Natura zastosowania środka mikroporującego pozwala w szczególności na obniżenie zakresu temperatur przetwórstwa do minimalnego poziomu 175–190°C, zredukowania ciśnień rozdmuchiwania do poziomu 3÷6 bar w zależności od charakteru produkcyjnego asortymentu rozdmuchiwanego. Szersze dane i informacje na ten temat zawarto z pozycji [12]. Zredukowanie zakresu nastaw technologicznych temperatur przetwórstwa i ciśnień rozdmuchiwania niesie za sobą nieodzowny skutek związany z minimalizacją zapotrzebowania energetycznego na jednostkową realizację procesu wytwarzania. Także w zależności % zastosowania środka mikroporującego (w zakresie od 0,2 do 1%) istnieje możliwość obniżenia ciężaru wagowego wytwarzanego obiektu. Im więcej środka mikroporującego tym ciężar wagowy obiektu rozdmuchanego jest mniejszy. Idę możliwych do osiągnięcia korzyści zastosowania dodatku mikroporotwórczego zobrazowano na rys. 11.

Wskazane komponenty konsumpcjonizmu materiałowego i energetycznego pozwalają na obniżanie składowej wsadu materiałowego oraz energetycznego bardzo często poprzez wprowadzenie nisko nakładowych działań. Niejednokrotnie dla osiągnięcia bardziej wyrazistych i większych efektów obniżenia zapotrzebowania materiałowego i energetycznego wymagane jest zastosowanie narzędzi wspomagających które wymagają zainwestowania pewnych środków finansowych. Jednak całokształt implementowanych wybranych czy całościowych wytycznych pozwala z biegiem czasu na szybkie osiągnięcie dodatniego wskaźnika ekonomicznego.



Rys. 10. Tendencja wzrostu zysku dzięki zastosowaniu chłodzenia konformalnego. Im krótszy czas cyklu tym mniejsze nachylenie prostej kosztów produkcji na formie i tym większy przyrost zysków w porównaniu do eksploatacji formy z klasycznym, mniej wydajnym układem chłodzenia [11]



Rys. 11. Możliwe do osiągnięcia korzyści wynikające z zastosowania środka mikroporującego w ilości do 1% w technologii EBM

Powyższe wyszczególnione komponenty odpowiedzialne za konsumpcję energetyczną w cyklu procesu wytłaczania z rozdmuchiwaniami mogą być odpowiednio zarządzane, monitorowane oraz wdrożone w kierunku podwyższenia efektywności realizacji procesu, poprzez zastosowanie działań, których charakterystykę i możliwe do osiągnięcia stany zaprezentowano powyżej, a ich nakłady finansowe mogą być wykorzystane z bieżących środków firmy. Istotną korzyścią jest z pewnością długotrwała redukcja kosztów i zużycia energii elektrycznej w procesie wytłaczania z rozdmuchiwaniami, co prowadzi do poprawy konkurencyjności przedsiębiorstwa i dodatkowo wynikającego stąd zmniejszenia obciążenia dla środowiska. Fakt wdrożenia wybranych działań przedstawionych w punktach A-K. Przedstawione plany wdrożeń określonych środków wymagają jedynie zmiany kwestii podejścia do dróg postępowania i zarządzania materiałem, procesem i maszyną.

Podsumowanie

Zaprezentowane kryteria oraz podstawy administrowania zasobami energetycznymi w przetwórstwie tworzyw polimerowych, dają szerokie możliwości racjonalnego zaimplementowania metody gromadzenia danych wielkości zużycia energii w zależności od ilości przetwarzanego surowca polimerowego, monitorowania i diagnozowania stanu maszyn. Umożliwiają racjonalizację i optymalizację zapotrzebowania energetycznego, w trakcie realizacji szczególnie energochłonnych technologii przetwórstwa tworzyw polimerowych. Administrowanie zapotrzebowania energetycznego na zróżnicowanych poziomach w obszarze układu roboczego przetwórstwa tworzyw polimerowych, pozwala na minimalizację zużycia energii w przedsiębiorstwie, a tym samym przyczynia się do zmniejszenia negatywnego obciążenia środowiska naturalnego. Należy upatrywać, iż w obecnej dobie rosnących cen energii i chęci bycia konkurencyjnym na rynkach europejskich techniki te będą w Polsce zyskiwały coraz większą popularność i uznanie wśród firm zajmujących się przetwórstwem polimerów. Wskazane komponenty postępowania i działań w odniesieniu do procesu wytłaczania z rozdmuchiwaniami umożliwiają uzyskanie wymiernych korzyści energetycznych podczas realizacji procesu przetwórstwa tworzyw polimerowych w tym wytłaczania z rozdmuchiwaniami w formie. Zwiększanie efektywności energetycznej w obszarze układu roboczego przetwórstwa tworzyw polimerowych w obecnej dobie rozwijających się konkurencyjnych rynków polskich będzie odgrywało coraz wyższe znaczenie, także z punktu widzenia istnienia firm o cechach pro-ekologicznych z certyfikatami ekologicznymi [16] np. „Firma przyjazna środowisku” czy ISO 14001.

Literatura

- [1] Barney L., *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology*, CRC Press Taylor & Francis Group, tom 1 i 2, USA 2007
- [2] Kent R., *Energy management in plastics processing. Strategies, targets, techniques and tools*. Plastics Information Direct, London, 2013
- [3] Pepliński K., *Select technical aspect of energy using and management in injection molding process*, „Journal of Polish CIMAC”, 2011 vol. 6, no 3, s. 227–234
- [4] Plastics – the Facts 2014/2015. An analysis of European plastics production, demand and waste data. Plastics Europe, Brussels – Belgium 2015. www.plasticseurope.org (14.09.2015)
- [5] <http://www.euplastvoltage.eu/pl/> (24.09.2015)
- [6] PN-EN ISO 50001:2012–wersja polska. Systemy zarządzania energią – Wymagania i zalecenia użytkowania
- [7] Pepliński K., *Wybrane podstawy zużywania energii w przetwórstwie tworzyw polimerowych*, „Ekologia i technika”, 2015, R. 23, nr 2, s. 80–83
- [8] Blikle A. J., *Doktryna jakości*, książka in statu nascendi udostępniona w domenie publicznej 9 marca 2009 www.oskko.edu.pl (28.09.2015)
- [9] Lewandowski W. M., *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, WNT Warszawa 2012
- [10] Jones F. R., *Strategic Management for the Plastics Industry - Dealing with globalization and Sustainability*, 2nd edition by CRC Press LLC. 2014
- [11] <http://www.fado.info/oferta/chlodzenie-komformalne/> (06.10.2015)
- [12] Pepliński K., *Microcellular monolayer extrusion blow molding for hollow object*, „Journal of Polish CIMAC”, vol. 7, no. 3, s. 237–242, Gdańsk 2012.
- [13] Rosato D.V., *Blow Molding Handbook*, Hanser Publisher 2nd edit., Munich 2004.
- [14] Pepliński K., Bieliński M., *Właściwości przetwórcze i użytkowe pojemników wytwarzanych w procesie wytłaczania z rozdmuchiwaniami w zmiennych warunkach przetwórstwa - ocena wydajności i jakości procesu*, „Polimery” 2009 T. 54, nr 6, s. 448–456
- [15] Pepliński K., Mozer A., *Ansys-Polyflow software use to select the parison diameter and its thickness distribution in blowing extrusion*, „Journal of Polish CIMAC”, Vol. 5, no 3, s. 133–142, Gdańsk 2010,
- [16] Certyfikaty ekologiczne – dlaczego warto je uzyskać? www.akademiaparp.gov.pl (06.10.2015)