

JANUSZ W. SIKORA

Politechnika Lubelska
Katedra Procesów Polimerowych
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin

Wpływ kąta ostrza noża granulatora na efektywność konstrukcyjną procesu wytłaczania z granulowaniem polietylenu^{*)}

GRANULATOR KNIFE WEDGE ANGLE EFFECT ON CONSTRUCTIONAL EFFICIENCY OF THE EXTRUSION PROCESS WITH POLYETHYLENE GRANULATING

Summary — Constructional efficiency of granulating process was determined by conducting an autothermal extrusion process with thermal granulating of medium density polyethylene (MDPE), using a granulator with knives of different tool wedge angle values (β angle 20—40°). β angle value does not affect polymer mass flow rate (\dot{G}), total power consumption by the extruder with granulator and cooling device (\dot{Q}_c), total power conveyed by polymer (\dot{Q}_w), specific energy consumption (E_{JC}) and energy efficiency of the extruder with granulator and cooling device (κ_w) (Table 1). Change in (β) value has a slight effect on bulk density (ρ_N) and natural slip (φ) of granulated product. Decrease in (β) value increases bulk density and reduces (φ).

Key words: extruder head, granulator, thermal granulating, knife wedge angle, bounded rotational cutting, autothermal extrusion.

W większości procesów przetwórstwa jako materiału wejściowego używa się tworzywa w stanie stałym i w postaci granulatu. Tę postać otrzymuje się w wyniku granulowania, któremu poddaje się proszkowy produkt polimeryzacji z ewentualnymi napelniaczami i środkami pomocniczymi. Proces ten polega na mechanicznym nadawaniu tworzywu postaci ziaren o określonym kształcie i wymiarze, czyli granulek. Można go prowadzić na zimno (w stanie stałym) lub na ciepło (w stanie plastycznym oraz ciekłym). Granulowanie można podzielić również na pierwotne, czyli zachodzące w procesie wytwarzania tworzywa, oraz wtórne, stanowiące końcowy etap recyklingu tworzyw [1—3].

Granulowanie zalicza się do metod obróbki skrawaniem tworzyw (narzędziami kilkuostrzowymi), uzupełniającej w stosunku do przetwórstwa, bez której otrzymywanie gotowych do użytkowania wytworów z tworzyw o żądanej jakości jest niemożliwe [1, 4—6].

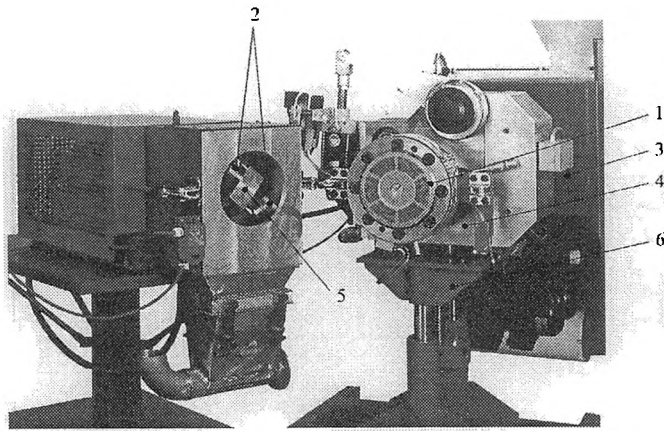
Granulatory do granulowania na ciepło są połączone konstrukcyjnie z głowicami wytłaczarskimi i bardzo różnie rozwiązywane. Wytłaczarską głowicę granulacyjną mocuje się do cylindra wytłaczarki jedno- lub dwuślimakowej, niekiedy z niezależnym podparciem

stosowanym ze względu na dużą masę głowicy i jej małe, ale jednak nieuchronne drgania [7—9].

Granulowanie na zimno polega na wytłaczaniu tworzywa w postaci prętów (żył) średnicy 3—5 mm, ochłodzeniu ich i następnie cięciu na małe odcinki (granulki). W tym przypadku używane są zwykle głowice proste (z punktu widzenia kierunku przepływu tworzywa z głowicy), z dyszą o liczbie otworów od kilku do kilkudziesięciu. Głowice tego typu nie są skomplikowane pod względem konstrukcyjnym i technologicznym oraz nie muszą spełniać wysokich wymagań [10, 11].

Bardziej złożoną budową odznaczają się głowice do granulowania na ciepło (rys. 1), co wynika z faktu, iż w tym przypadku granulowanie odbywa się bezpośrednio po opuszczeniu głowicy przez tworzywo, kiedy jest ono jeszcze w stanie plastycznym. W celu uzyskania granulatu o odpowiednim kształcie i wymiarach tworzywo musi być chłodzone bezpośrednio po cięciu na granulki. Obecnie stosuje się dwa rodzaje czynników chłodzących — powietrze i wodę. Istotą granulowania na ciepło jest nieswobodne obrotowe cięcie poprzeczne żył plastycznego tworzywa. Rolę noża stałego spełnia konstrukcyjny element oporowy — filiera; przez jej dysze jest wyciskane tworzywo, a krawędź tnąca stanowi krawędź dyszy filiera. Nóż obrotowy ma na ogół prostoliniową krawędź tnącą prostopadłą do osi dyszy i rów-

^{*)} Artykuł jest oparty na tekście wykładu wygłoszonego w ramach VI Profesorskich Warsztatów Naukowych „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych”, Poraj, 19—22 czerwca 2001 r.



Rys. 1. Granulator do granulowania na ciepło połączony konstrukcyjnie z głowicą wylączarską: 1 — filiera, 2 — noże tnące obrotowe, 3 — wylączarka, 4 — korpus głowicy wylączarskiej, 5 — wirnik nożowy, 6 — podpora głowicy [8]

Fig. 1. Granulator connected constructionally with extruder head for thermal granulating: 1 — spinning nozzle, 2 — rotating cutting knives, 3 — extruder, 4 — extruder head body, 5 — knife rotor, 6 — head support [8]

noległą do powierzchni roboczej filiera, oddaloną od niej o szczelinę nożową [12].

W rozwiązaniach konstrukcyjnych maszyn do granulowania stosuje się powszechnie pochylenie co najmniej jednej krawędzi tnącej. Współdziałanie nierównoległych krawędzi tnących powoduje znaczne zmniejszenie siły cięcia, wydłużenie drogi i czasu kontaktu tworzywa z krawędzią tnącą, jak również ograniczenie drgań mechanicznych i hałasu.

Uzasadnione wydaje się przeprowadzenie badań doświadczalnych procesu wylączania z granulowaniem na ciepło tworzywa, umożliwiających określenie wpływu zmiany wartości kąta ostrza granulatora na podstawowe wielkości charakteryzujące granulat i na przebieg procesu jego wylączania. W dostępnej literaturze brak jest danych dotyczących tego zagadnienia. W pracy stanowiącej przedmiot niniejszego artykułu badano autotermiczny proces wylączania z granulowaniem na ciepło, stosując jako tworzywo polietylen średniej gęstości (PE-MD).

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materiał

PE-MD o symbolu ME2421 firmy Borealis w postaci ziarn (granulek) średnicy ok. 3 mm. Podstawowe właściwości tego materiału są ogólnie znane i podawane w literaturze [np. 13—15].

Program badań

Na podstawie przeglądu literatury i badań wstępnych, w programie badań przyjęto wymienione poniżej czynniki:

Czynniki badane bezpośrednio:

- masa próbki granulatu m_w (kg),
- czas wylączania próbki granulatu t_w (s),
- czas pomiaru energii pobieranej przez wylączarkę z granulatorem i urządzeniem chłodzącym t_c (s),
- temperatura wylóczyny opuszczającej dyszę głowicy wylączarskiej T_w (°C),

- masa cylindra pomiarowego wraz z granulatorem, użytego w badaniu gęstości nasypowej m_1 (kg),
- największa wysokość stożka usypowego h (m),
- średnica podstawy stożka usypowego d (m).

Czynniki badane pośrednio:

- masowe natężenie przepływu tworzywa w układzie uplastyczniającym wylączarki \dot{G} (kg/h),
- moc całkowita pobierana przez wylączarkę z granulatorem i urządzeniem chłodzącym Q_c (W),
- przyrost entalpii właściwej tworzywa przetwarzanego w układzie uplastyczniającym wylączarki Δi (J/g),
- moc całkowita przenoszona przez tworzywo podczas procesu wylączania z granulowaniem Q_w (W),
- jednostkowe zużycie energii całkowitej pobieranej przez wylączarkę łącznie z granulatorem i urządzeniem chłodzącym E_{JC} (J/g),
- sprawność energetyczna wylączarki z granulatorem i urządzeniem chłodzącym κ_W (%),
- gęstość nasypowa uzyskanego granulatu ρ_N (kg/m³),
- kąt naturalnego usypu granulatu ϕ (deg).

Podstawowym czynnikiem zmiennym był kąt ostrza (β) noży granulatora ustalony w układzie narzędzia: $\beta_1 = 20^\circ$, $\beta_2 = 25^\circ$, $\beta_3 = 30^\circ$, $\beta_4 = 35^\circ$, $\beta_5 = 40^\circ$.

Czynniki stałe to:

- elementy geometryczne ślimaka, cylindra, wylączarskiej głowicy granulacyjnej i urządzenia chłodzącego (z wyjątkiem kąta ostrza noży granulacyjnych);
- liczba stref nagrzewających układu uplastyczniającego wynosząca w przypadku wylączarki 2, a wylączarskiej głowicy granulacyjnej 1;
- częstotliwość obrotów ślimaka $\nu = 2,95 \text{ s}^{-1}$ (18,53 rad/s);
- częstotliwość obrotów wirnika noży granulacyjnych $\nu = 6,93 \text{ s}^{-1}$ (43,54 rad/s);
- temperatura poszczególnych stref układu uplastyczniającego: $T_1 = 115^\circ\text{C}$, $T_2 = 194^\circ\text{C}$;
- temperatura głowicy wylączarskiej $T_g = 164^\circ\text{C}$;
- umowna liczba obrotów tarczy licznika energii elektrycznej $z = 20$;
- masa pustego cylindra pomiarowego w badaniu gęstości nasypowej $m = 0,520 \text{ kg}$;
- objętość cylindra pomiarowego $V = 0,5 \text{ dm}^3$.

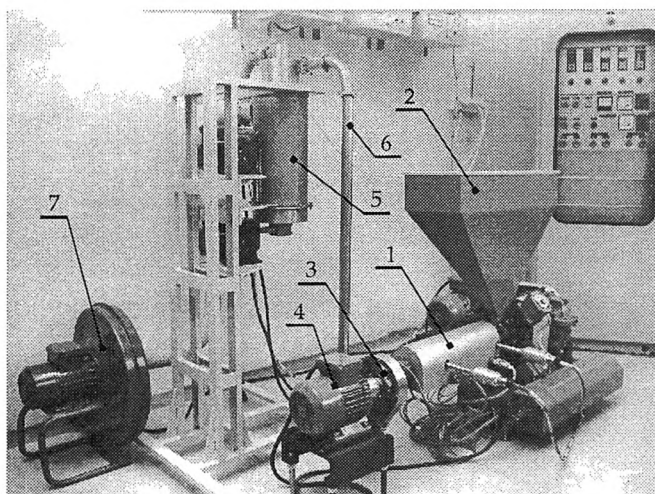
Na wyniki badań mogą wpływać przede wszystkim następujące czynniki zakłócające:

- napięcie prądu elektrycznego (zmiany od ok. 215 do 225 V),
- temperatura otoczenia (zmiany od 20 do 24°C),
- wilgotność bezwzględna tworzywa wejściowego (zmiany od 0,04 do 0,06%),
- wilgotność względna powietrza (zmiany od 55 do 65%).

Założono jednak, że wpływ czynników zakłócających jest bardzo mały i można go pominąć bez szkody dla wyników pracy.

Metodyka badań

Badania przeprowadzono w Laboratorium Katedry Procesów Polimerowych Politechniki Lubelskiej, wykorzystując doświadczalną wylączarkę jednoślیمakową W-25D, o stosunku części roboczej ślیمaka do jego średnicy $L/D = 25$. Dokładny opis konstrukcji oraz działania tej wylączarki zawarto w publikacjach [13, 14, 16]. Proces wylączania był procesem autotermicznym. Stosowaną do badań linię technologiczną wylączania z granulowaniem na ciepło przedstawia rys. 2. Dodatkowo jest ona wyposażona w wylączarską głowicę granulacyjną (rys. 3), składającą się z głowicy wylączarskiej i granulatora oraz w urządzenie chłodzące.

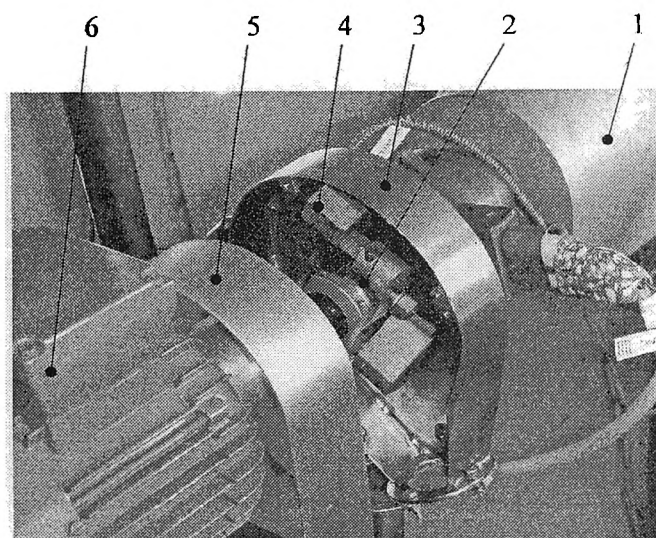


Rys. 2. Linia technologiczna wylączania z granulowaniem na ciepło, stosowana do badań: 1 — osłona cylindra wylączarki W-25D, 2 — zasobnik tworzywa, 3 — wylączarska głowica granulacyjna, 4 — silnik wirnika nożowego, 5 — urządzenie chłodzące granulaty, 6 — rura doprowadzająca, 7 — wentylator promieniowy

Fig. 2. Extrusion technological line with thermal granulating used for research: 1 — barrel housing of the extruder W-25D, 2 — polymer hopper, 3 — granulating extruder head, 4 — knife rotor drive, 5 — device for cooling granulated product, 6 — supplying pipe, 7 — radial fan

Metodykę prowadzenia badań doświadczalnych i sposoby obliczeń zawierają wcześniejsze publikacje [13, 14]. Pomiar gęstości nasypowej oraz kąta naturalne-

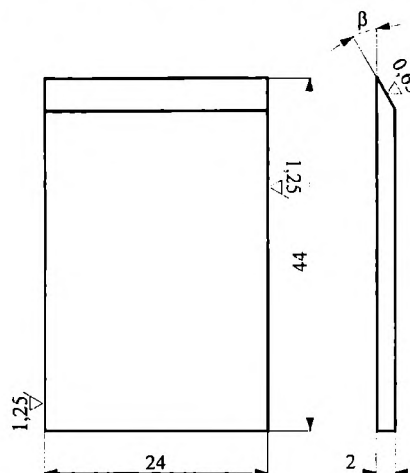
go usypu wykonano zgodnie z normami, odpowiednio PN-80/C-04532 i PN-89/C-04840.



Rys. 3. Wylączarska głowica granulacyjna (częściowo zdemontowana): 1 — układ uplastyczniający wylączarki, 2 — wirnik nożowy, 3 — osłona przednia głowicy, 4 — uchwyt noża, 5 — osłona tylna głowicy, 6 — silnik napędowy wirnika nożowego

Fig. 3. Granulating extruder head (partly disassembled): 1 — extruder plasticating system, 2 — knife rotor, 3 — front head housing, 4 — knife grip, 5 — back head housing, 6 — knife rotor drive

W granulatorze zamontowano filierę z czterema otworami średnicy 3 mm każdy, umieszczonymi symetrycznie względem osi wylączarki, oraz wirnik nożowy z dwoma płytkowymi, jednokrędziowymi nożami tnącymi (rys. 4) usytuowanymi naprzeciw siebie w płaszczyźnie prostopadłej do osi wylączarki. Oś wirnika nożowego jest przesunięta w stosunku do osi układu uplastyczniającego i filierę. Taki mimośrodowy układ granulatora powoduje, że noże kontaktują się z tworzy-



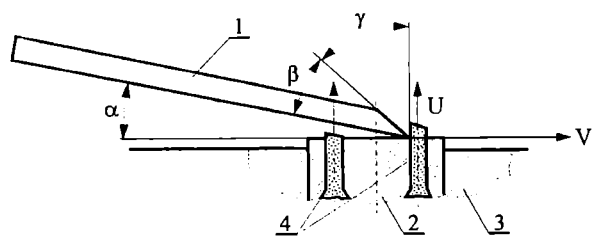
Rys. 4. Nóż tnący granulatora
Fig. 4. Granulator cutting knives

wem cyklicznie tylko w obrębie filiiery, natomiast poza nią następuje ich lepsze ochładzanie. Wirnik nożowy ma niezależny układ napędowy, umożliwiający bezstopniową zmianę prędkości.

Po cięciu, granulki są zdmuchiwane z noży, opadają ok. 70 cm w dół i dalej są transportowane pneumatycznie rurą doprowadzającą do urządzenia chłodzącego pionowo w górę ok. 115 cm.

Urządzenie chłodzące granulat łączy się z obudową wirnika nożowego głowicy granulacyjnej i stanowi końcową część linii technologicznej omawianego procesu. Główną część tego urządzenia stanowi zbiornik chłodzący granulat osadzony na podstawie; w zbiorniku znajduje się śluza wejściowa i wyjściowa — obie napędzane za pomocą oddzielnych silników elektrycznych. Czynnikiem chłodzącym jest powietrze doprowadzane przewodem powietrznym z wentylatora promieniowego, również z napędem elektrycznym.

Przed uruchomieniem wylączarki nastawiano temperaturę poszczególnych stref grzejnych układu uplastyczniającego i głowicy wylączarskiej. Następnie uruchamiano silnik wylączarki oraz urządzenie chłodzące, wylączano grzejniki, a po ustabilizowaniu cieplnym wylączarki działającej autotermicznie, przystępowano do badań. Badania rozpoczynano od użycia noży o najmniejszej wartości kąta ostrza (rys. 5). Po uzyskaniu ilości granulatu wystarczającej do dalszych pomiarów, wymieniano nóż tnący granulatora zgodnie z programem badań i czynności powtarzano od początku.



Rys. 5. Kąty charakteryzujące nóż tnący i jego położenie względem wytłaczanego tworzywa: V — prędkość ruchu głównego, U — prędkość ruchu posuwowego, α — kąt przyłożenia, β — kąt ostrza, γ — kąt natarcia, 1 — nóż, 2 — dysza głowicy wylączarskiej, 3 — korpus głowicy, 4 — wytłaczane tworzywo (żyła plastycznego tworzywa)

Fig. 5. Angles characterising the cutting knife and its position in relation to processed polymer; V — main movement rate, U — feed movement rate, α — tool orthogonal clearance angle, β — wedge angle, γ — tool rake angle, 1 — knife, 2 — extruder head die, 3 — head body, 4 — processed polymer — plasticated rod

WYNIKI BADAŃ

Po wyznaczeniu wartości czynników badanych bezpośrednio, obliczano czynniki badane pośrednio, a wyniki tych obliczeń w przypadku różnych kątów ostrza noży granulatora przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Wyniki obliczeń czynników badanych pośrednio
Table 1. Computation of factors studied indirectly

Czynniki badane	Kąt ostrza noży β , deg				
	20	25	30	35	40
Masowe natężenie przepływu tworzywa, \dot{G} , kg/h	6,73				
Moc całkowita pobierana przez wylączarkę z granulatorem i urządzeniem chłodzącym \dot{Q}_C , W	2704				
Przyrost entalpii właściwej tworzywa Δ_i , J/g	560				
Moc całkowita przenoszona przez tworzywo w procesie wytłaczania z granulowaniem \dot{Q}_w , W	1082				
Jednostkowe zużycie energii całkowitej E_{JC} , J/g	1446				
Sprawność energetyczna wylączarki z granulatorem i urządzeniem chłodzącym κ_w , %	40,0				
Gęstość nasypowa granulatu ρ_N , kg/m ³	539	535	529	520	505
Kąt naturalnego usypu granulatu ϕ , rad (deg)	0,8063 (46,2)	0,8203 (47,0)	0,8290 (47,5)	0,8317 (47,6)	0,8395 (48,1)

Można przyjąć, że zmiana kąta ostrza noży granulatora nie wpływa na moc całkowitą pobieraną przez wylączarkę łącznie z granulatorem i urządzeniem chłodzącym oraz na moc całkowitą przenoszoną przez tworzywo podczas procesu wytłaczania z granulowaniem. Zmiana ta nie wywiera też wpływu zarówno na jednostkowe zużycie energii całkowitej, jak i na sprawność energetyczną κ_w obliczoną z uwzględnieniem energii kinetycznej i potencjalnej granulek tworzywa oraz na wzrost entalpii właściwej tworzywa spowodowany niewielkim podwyższeniem temperatury powierzchni granulki w stosunku do temperatury wytłoczyny opuszczającej dyszę głowicy wylączarskiej.

Wartości \dot{Q}_C oraz E_{JC} są duże. Koreluje to z obliczoną wartością κ_w , którą należy ocenić jako małą — jest ona tu o ok. 20% mniejsza od sprawności samej wylączarki działającej autotermicznie [14]. Mimo specyfiki procesu wytłaczania autotermicznego z granulowaniem na ciepło, wydaje się jednak, że E_{JC} oraz κ_w nie są zadowalające.

Należy sądzić, że w przypadku zastosowania wylączarek ze strefą rowkowaną, o odpowiedniej konstrukcji całego układu uplastyczniającego, zwłaszcza ślimaka przystosowanego do procesu autotermicznego i do przetworstwa danego tworzywa, wyniki będą bardziej korzystne. Wylączarki takie odznaczają się bowiem większym natężeniem przepływu tworzywa wynikającym z większego ciśnienia i tarcia tworzywa przetwarzanego w układzie uplastyczniającym oraz ukierunkowaniem jego ruchu wymuszonym przez rowki. Przy-

czynią się to do polepszenia wszystkich wskaźników energetycznych procesu wytłaczania, mimo intensywnego chłodzenia strefy zasypu i części strefy zasilania.

Nie bez znaczenia jest również potrzeba zoptymalizowania pod względem energetycznym całego granulatora i urządzenia chłodzącego. Rozwiązanie konstrukcyjne granulatora wraz z urządzeniem chłodzącym, wymagające zastosowania aż czterech silników napędzających — odpowiednio, wirnik nożowy, wentylator oraz śluzy wejściową i wyjściową — nie jest rozwiązaniem najkorzystniejszym.

Problemu nie rozwiązuje też zastosowanie innej konstrukcji wytłaczarskiej głowicy granulacyjnej oraz innego sposobu transportowania otrzymanego granulatu do urządzenia chłodzącego, np. polegającego na swobodnym opadaniu otrzymanych granulek do wanny i ochładzaniu wodnym, gdyż następnie konieczne jest suszenie granulatu. Być może jednak rozwiązanie polegające na grawitacyjnym doprowadzaniu granulek tworzywa do zbiornika chłodzącego nieco polepszy wskaźniki energetyczne procesu granulowania.

Badana w tej pracy zmiana kąta (β) ostrza noży granulatora nie wywiera także istotnego wpływu na gęstość nasypową i na kąt naturalnego usypu otrzymywanego granulatu. Zwiększenie kąta β z 20° do 40° , a więc o 100%, powoduje zmniejszenie gęstości nasypowej granulatu zaledwie z 539 do 505 kg/m³, czyli o ok. 6,3%. Zależność tę można opisać następującym równaniem:

$$\dot{Q}_N = 0,068\beta^2 + 2,409\beta + 517,943 \quad (1)$$

Takie samo znaczne zwiększenie tego kąta zwiększa kąt naturalnego usypu z 0,8063 do 0,8395 rad, czyli o ok. 4,1%. Odpowiada to równaniu:

$$\varphi = -3,2 \cdot 10^{-5}\beta^2 + 0,001\beta + 0,1829 \quad (2)$$

Z tabeli 1 wynika ponadto, że w badanych tu warunkach w miarę wzrostu wartości β rośnie intensywność jego oddziaływania na gęstość nasypową granulatu, natomiast zmniejsza się oddziaływanie na kąt naturalnego usypu φ . W obszarze od 20° do 40° przyrost wartości kąta β o jeden stopień zmniejszał przeciętnie wartość gęstości nasypowej granulatu o 1,7 kg/m³ oraz powodował średnie zwiększenie kąta φ o 0,0015 rad (0,085°).

Zmiana kąta β zmienia stan powierzchni cięcia tworzywa oraz ilość ciepła powstającego podczas cięcia. Mały kąt β pozwala na uzyskanie mniej chropowatej powierzchni cięcia, co powoduje, że granulki lepiej układają się względem siebie podczas powstawania stożka usypowego, a to z kolei skutkuje mniejszym kątem naturalnego usypu i większą gęstością nasypową granulatu. Gdy kąt cięcia jest mały, mniejsza staje się praca cięcia [6], czemu towarzyszy wydzielanie się mniejszej ilości ciepła; powoduje to powstawanie znacznie dłuższych odkształceń plastycznych i większą orientację oraz rekryształizację tworzywa w warstwie wierzchniej, przylegającej do powierzchni cięcia. Efektem tego jest wzrost gęstości tworzywa (w tym gęstości nasypowej).

PODSUMOWANIE

Z przedstawionych danych wynika, że stosowanie mniejszych wartości kąta ostrza wpływa korzystnie na charakterystykę granulatu. W warunkach mniejszych wartości kąta β uzyskuje się bowiem nieco większą gęstość nasypową oraz dogodniejszy kąt naturalnego usypu granulatu, a w konsekwencji wytwory o wyższej jakości.

W pewnym zakresie, kąt ostrza noży granulatora może stanowić czynnik konstrukcyjny regulujący kształt i wymiary granulek, a dzięki temu i efektywność procesu granulowania na ciepło. Z drugiej jednak strony, mniejsze wartości β , jak można sądzić z publikacji [17], zmniejszają w pewnym stopniu trwałość noży. Uzasadnione wydaje się więc przeprowadzenie dalszych badań umożliwiających jednoznaczne rozstrzygnięcie tego problemu. Może bowiem okazać się, że wytwarzanie granulatu o wyższej jakości wymaga częstszej wymiany szybciej zużywających się noży.

LITERATURA

1. Sikora R.: „Obróbka tworzyw wielkocząsteczkowych”, Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1996, str. 168, 206—220.
2. Dominik M.: *Kunststoffe* 1997, 87, 1438.
3. Schalles H.: *Kunststoffe* 1997, 87, 1660.
4. Bieliński M.: „Podstawy i badania podatności termoplastycznych tworzyw wtórnych na wybrane procesy przetwórstwa”, Wyd. Uczelniane ATR, Bydgoszcz 1992.
5. Bieliński M.: „Materiałowa i przetwórcza charakterystyka wybranych termoplastycznych tworzyw wtórnych”, Wyd. Uczelniane ATR, Bydgoszcz 1998.
6. Konieczka R.: „Podstawy mechanicznych procesów recykulacji folii z polietylenu małej gęstości”, Wyd. Uczelniane ATR, Bydgoszcz 1996.
7. Kühlbörn D.: *Kunststoffe* 2001, 91, 58.
8. Prospekty i katalogi firmy Hans Weber Maschinenfabrik GmbH.
9. Anonim: *Plast. Techn.* 2001, 47, 33.
10. Gottberg J. P.: *Kunststofftechnik* 1970, 9, 419.
11. Marwick J.: *Kunststoffe* 1998, 88, 2234.
12. Praca zbiorowa: „Granulieren von thermoplastischen Kunststoffen”, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1974.
13. Sikora J. W.: *Polimery* 1998, 43, 548.
14. Sikora J. W.: „Studium autotermiczności procesu wytłaczania i strefy rowkowanej wytłaczarki”, Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 2000, str. 126, 152—160.
15. Prospekty i katalogi firmy Borealis.
16. Dokumentacja techniczno-ruchowa doświadczalnej wytłaczarki W-25D, OBR Metalchem w Toruniu, Toruń 1994.
17. Sikora R., Masztaleruk P.: *Polimery* 1992, 37, 421.