

Wykorzystanie metody Taguchi do oceny wpływu sposobu wytłaczania na wybrane właściwości kompozytów polimerowo-drzewnych

Iwona Michalska-Požoga^{1), *)}, Sebastian Węgrzyk²⁾, Tomasz Rydzkowski³⁾

DOI: dx.doi.org/10.14314/polimery.2017.686

Streszczenie: Zbadano wybrane właściwości wytrzymałościowe i fizyczne kompozytów recyklowanego polietylenu dużej gęstości (rPE-HD) napełnionego wiórami drzewnymi (10, 25, 50 % mas.), uzyskanych metodą wytłaczania jednoślismakowego i ślimakowo-tarczowego. Oceniano wpływ szerokości szczeliny strefy tarczowej (W), prędkości obrotowej ślimaka (n) i udziału masowego frakcji drzewnej (i) na cechy wytworzonych kompozytów. Stosując planowanie eksperymentu metodą Taguchi, opracowano warunki i program badań umożliwiające określenie optymalnych wartości parametrów wytłaczania oraz składu mieszanin, uwzględniających kryterium najkorzystniejszych właściwości użytkowych wytłoczonego materiału.

Słowa kluczowe: polietylen dużej gęstości (PE-HD), kompozyty polimerowo-drzewne, wytłaczarka ślimakowa, wytłaczarka ślimakowo-tarczowa, właściwości mechaniczne i fizyczne.

Assessment of influence of extrusion method on selected properties of wood-polymer composites using Taguchi method of experiment planning

Abstract: The selected mechanical and physical properties of the composites of recycled high density polyethylene (rPE-HD) filled with wood chips (10, 25 and 50 wt %) obtained by two methods of extruding: classic screw and screw-disc were investigated. The influence of three process parameters: width of the chink of disc zone (W), rotational speed of the screw (n) and mass fraction of wood filler (i) on the composite properties was investigated. The experiments were planned using the Taguchi method to find optimal extrusion process parameters and mixture composition, taking into account the highest possible properties of the extrudate.

Keywords: high density polyethylene (PE-HD), wood-polymer composites, screw extruder, screw-disc extruder, mechanical and physical properties.

W ostatnich latach znacznie zwiększył się zakres prowadzonych badań zmierzających do poprawy właściwości użytkowych materiałów kompozytowych, przede wszystkim w wyniku minimalizacji ich masy i zwiększenia wytrzymałości. Coraz większe zainteresowanie kompozytami polimerowo-drzewnymi (WPC), obserwowane na rynkach polskim i światowym, przekłada się na rosnącą liczbę producentów granulatów WPC [1]. Jako

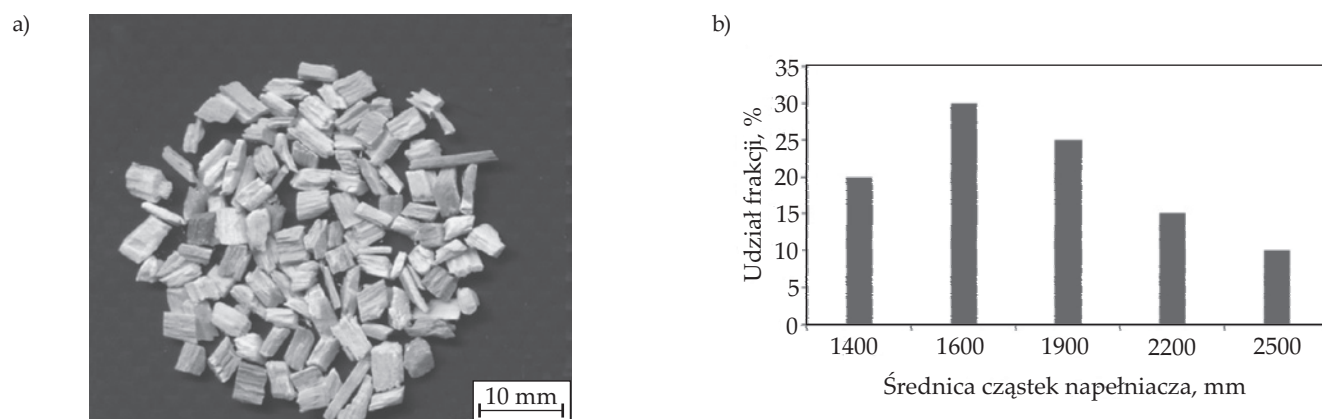
materiał osnowy kompozytów polimerowo-drzewnych stosuje się polimery termoplastyczne, zarówno pierwotne, jak i pochodzące z recyklingu [2], przy czym stale rośnie udział surowców wtórnych o różnym stopniu rozdrobnienia [3] (recyklatów tworzyw polimerowych i odpadów z przemysłu drzewnego) [1]. Czasami udaje się otrzymać takie kompozyty o właściwościach porównywalnych z właściwościami kompozytów uzyskanych z materiałów pierwotnych [4]. Wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu wpływa na podwyższenie poziomu ochrony środowiska, poszanowanie jego zasobów naturalnych i ograniczenie zapotrzebowania na energię [1, 5]. Powszechnie używane kompozyty polimerowo-drzewne są łatwe w przetwarzaniu – w wypadku mieszanin z udziałem do 40 % mas. napełniacza drzewnego stosuje się maszyny typowe dla przetwórstwa termoplastów, czyli wytłaczarki i wtryskarki. Natomiast w odniesieniu do kompozytów z udziałem napełniacza drzewnego ok. 80 % mas. barierą jest pokonanie bardzo

¹⁾ Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin.

²⁾ Politechnika Koszalińska, Wydział Technologii i Edukacji, ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin.

³⁾ Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Wydział Nauk Technicznych, Katedra Technologii Materiałów i Maszyn, ul. Ocza-powskiego 11, 10-719 Olsztyn.

*) Autor do korespondencji; e-mail: iwona.michalska-pozoga@tu.koszalin.pl



Rys. 1. Wióry świerkowo-jodłowe Lignocel BK8/15: a) widok, b) rozkład granulometryczny

Fig. 1. Spruce-fir chips Lignocel BK 8/15: a) view, b) particle size distribution

dużych oporów tarcia wewnątrz kanału przepływu tworzywa w linii śrubowej wylączarki, a także wysokich ciśnień w obrębie głowicy wylączarskiej [6].

Celem przedstawionej pracy było zastosowanie planowania eksperymentu metodą Taguchi do wyznaczenia parametrów wylączania, umożliwiających uzyskanie kompozytu polimerowo-drzewnego charakteryzującego się pożądanymi właściwościami użytkowymi.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materialy

W badaniach zastosowano pochodzący z recyklingu polietylen dużej gęstości rPE-HD [$\rho = 0,918 \text{ g/cm}^3$, $MFR_{(190 \text{ }^\circ\text{C}, 2,16 \text{ kg})} = 0,34 \text{ g/10 min}$] i napełniacz drzewny w postaci wiórów świerkowo-jodłowych (rys. 1a) o nazwie handlowej Lignocel BK8/15, produkcji Rettenmaier & Söhne GmbH + Co KG (Niemcy). Ocenę rozkładu granulometrycznego napełniacza przeprowadzono metodą analizy sitowej (rys. 1b).

Wióry świerkowo-jodłowe suszono w suszarce z termoobiegiem w temp. $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ przez 4 h, następnie sporządzono 3 mieszaniny cząstek napełniacza z rPE-HD, o składach przedstawionych w tabeli 1.

Stanowisko wylączania

W procesie wylączania przeprowadzonym z wykorzystaniem wylączarki ślimakowo-tarczowej parametrem stałym była temperatura strefy gorącej $t = 160 \text{ }^\circ\text{C}$, czynnikami zmiennymi były natomiast prędkość obrotowa ślimaka (i tarczy) n i szerokość szczeliny tarczowej W_s (tabela 2). Dla porównania proces wylączania przeprowadzono z zastosowaniem klasycznej wylączarki ślimakowej T-32, gdzie parametrem zmiennym była tylko prędkość obrotowa ślimaka (tabela 3). Wartości temperatury w poszczególnych strefach wylączarki ślimakowej wynosiły: $t_1 = 140 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_2 = 160 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_3 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_4 = 165 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{\text{głowicy}} = 165 \text{ }^\circ\text{C}$. Prędkość obrotową ślimaków wylączarek dobrano tak, aby ich prędkości obwodowe były po-

Tabela 1. Składy sporządzonych mieszanin użytych do wylączania kompozytów polimerowo-drzewnych

Table 1. Compositions of mixtures used for extruding wood-polymer composites

Udział składników mieszaniny, % mas.	
Wióry drzewne	rPE-HD
10	90
25	75
50	50

Tabela 2. Parametry wylączania z zastosowaniem ślimakowo-tarczowego układu uplastyczniającego

Table 2. Screw-disc extrusion parameters

Parametr	Wartość		
Szczelina strefy tarczowej W_s , mm	0,3	1,7	3,0
Prędkość obrotowa n , obr/min	10	17	26
Udział napełniacza i , % mas.	10	25	50

Tabela 3. Parametry wylączania z zastosowaniem ślimakowego układu uplastyczniającego

Table 3. Classic screw extrusion parameters

Parametr	Wartość		
Prędkość obrotowa n , obr/min	40	70	100
Udział napełniacza i , % mas.	10	25	50

równywalne. Obydwie wylączarki wyposażono w taką samą głowicę, z dyszą o profilu pozwalającym na uzyskanie pełnej wytłoczyny o przekroju kołowym.

Wylączarka ślimakowo-tarczowa to prototypowa konstrukcja, opracowana i wykonana na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej, opisywana przez I. Michalską-Požogę oraz T. Rydzkowskiego [7–12]. Autorzy oceniali wpływ zjawisk zachodzących w ślimakowo-tarczowym układzie uplastyczniającym na efektywniejsze ujednorodnienie mieszanin kompozytowych, a także możliwość wytworzenia tworzywa o właściwościach lepszych niż uzyskiwane za pomocą klasycznych układów ślimakowych [13–16].

Tabela 4. Tablica ortogonalna parametrów (a, b) i wartości (1, 2, 3) dla eksperymentów z zastosowaniem wylączarki ślimakowej (X)
T a b l e 4. Orthogonal array of parameters (a, b) and the values (1, 2, 3) for screw extrusion experiments (X)

Lp.	Oznaczenie eksperymentu	a	b	Parametr	
				<i>i</i> , % mas.	<i>n</i> , obr/min
1	X ₁	1	1	10	40
2	X ₂	1	2	10	70
3	X ₃	1	3	10	100
4	X ₄	2	1	25	40
5	X ₅	2	2	25	70
6	X ₆	2	3	25	100
7	X ₇	3	1	50	40
8	X ₈	3	2	50	70
9	X ₉	3	3	50	100

Tabela 5. Tablica ortogonalna parametrów (a, b, c) i wartości (1, 2, 3) dla eksperymentów z zastosowaniem wylączarki ślimakowo-tarczowej (Y)
T a b l e 5. Orthogonal array of parameters (a, b, c) and the values (1, 2, 3) for screw-disc extrusion experiments (Y)

Lp.	Oznaczenie eksperymentu	a	b	c	Parametr		
					<i>i</i> , % mas.	<i>n</i> , obr/min	<i>W_s</i> , mm
1	Y ₁	1	1	1	10	10	0,3
2	Y ₂	2	3	1	10	26	1,7
3	Y ₃	3	2	1	10	17	3,0
4	Y ₄	1	2	2	25	17	0,3
5	Y ₅	2	1	2	25	10	1,7
6	Y ₆	3	3	2	25	26	3,0
7	Y ₇	1	3	3	50	26	0,3
8	Y ₈	2	2	3	50	17	1,7
9	Y ₉	3	1	3	50	10	3,0

Otrzymywanie płytek kompozytowych

Metodykę otrzymywania płytek kompozytowych zaczerpnięto z monografii Rydzkowskiego [17].

W wyniku procesu wylączania ślimakowego i ślimakowo-tarczowego przygotowanych mieszanin polimero-drzewnych (por. tabela 1) otrzymywano wyciżczynę w postaci pręta, którą natychmiast po opuszczeniu głowicy wylączarskiej układano między płytami matrycy nagrzałej do temp. 100 °C. Za pomocą siłownika hydraulicznego przykładano obciążenie równe 98 kN. Po sprasowaniu wyciżczyny do grubości około 2 mm układ chłodzony wodą wodociągową. Z uzyskanych w ten sposób płytek kompozytowych, przy użyciu wykrojnika mocowanego na prasie hydraulicznej, wycinano próbki do badań. Wykrojnik przystosowano do wykrawania z kompozytu polimero-drzewnego kształtek o grubości do 4 mm. Wycięte próbki miały gładką linię cięcia, pozbawioną karbów, nacięć i innych wad powierzchniowych. Zastosowanie obróbki skrawaniem (np. frezowania) do obróbki próbek prowadziłoby do wyrywania z polime-

rowej matrycy fragmentów frakcji drzewnej, co byłoby bardzo niekorzystnym zjawiskiem.

Planowanie eksperymentu metodą Taguchi

Do planowania eksperymentu naukowego zastosowano metodę Taguchi, szczególnie przydatną na etapie projektowania parametrów procesu. Celem metody było ustalenie wartości tych parametrów, zapewniających uzyskanie wyciżczyny o możliwie najlepszej jakości zgodnie ze zdefiniowanym kryterium [18]. Liczbę eksperymentów wyznaczano za pomocą wzoru:

$$V = L^P \quad (1)$$

gdzie: *P* – liczba parametrów zmiennych w procesie, *L* – liczba wartości przybieranych przez każdy z parametrów.

W wylączarce ślimakowej zmienne są dwa parametry – prędkość obrotowa ślimaka i udział napełniacza, natomiast w wylączarce ślimakowo-tarczowej dodatkowo –

szerokość szczeliny tarczowej. Na podstawie zmiennych sporządzono tablice ortogonalne (tabela 4 i tabela 5).

Metody badań

– Wytrzymałość na rozciąganie (σ_M , MPa) oznaczano zgodnie z normą PN-EN ISO 527-1,2:1998 za pomocą komputerowo sterowanej zrywarki Monsanto (Tensometr Type W) z prędkością rozciągania $v = 10$ mm/min i zakresem siły głowicy pomiarowej do 1,5 kN.

– Udarność (a_k , kJ/m²) metodą Charpy'ego próbek bez karbu określano zgodnie z normą PN-EN ISO 179:2001 przy użyciu elektronicznego młota Charpy'ego typ 5113 firmy ZWICK Roell GmbH & Co (Niemcy). Do badań użyto wahadła o nominalnej energii 7,5 J.

– Gęstość oceniano zgodnie z normą PN EN ISO 1183-1:2003. Posłużono się analityczną wagą hydrostatyczną XS 105 Dual Range Excellence firmy Mettler Toledo z zestawem do określania gęstości ciał stałych nieporowatych. Wykorzystano próbki kompozytu o wymiarach 25 x 25 mm i grubości 2 mm. Badania prowadzono w stałej temperaturze otoczenia, wynoszącej ok. 22 °C.

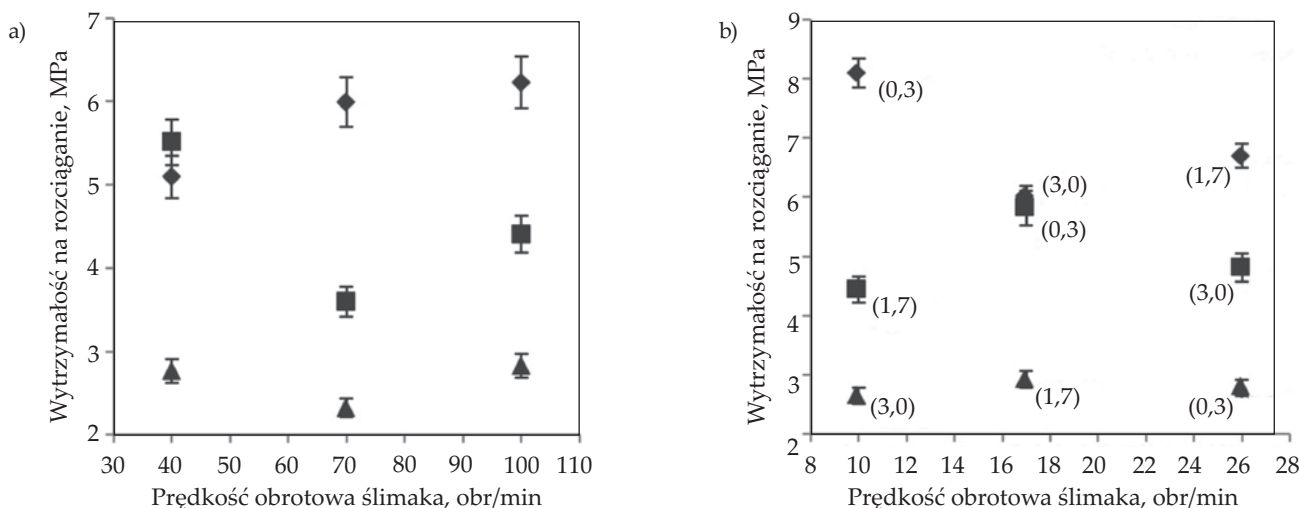
W celu określenia wartości każdego punktu przedstawianych charakterystyk przeprowadzono badania 100 próbek.

WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano szereg zależności (rys. 2–4) wskazujących na wpływ szerokości szczeliny tarczowej (W_s , mm), prędkości obrotowej (n , obr/min) i masowego udziału napełniacza drzewnego (i , % mas.) na właściwości mechaniczne i fizyczne wytworzonych kompozytów.

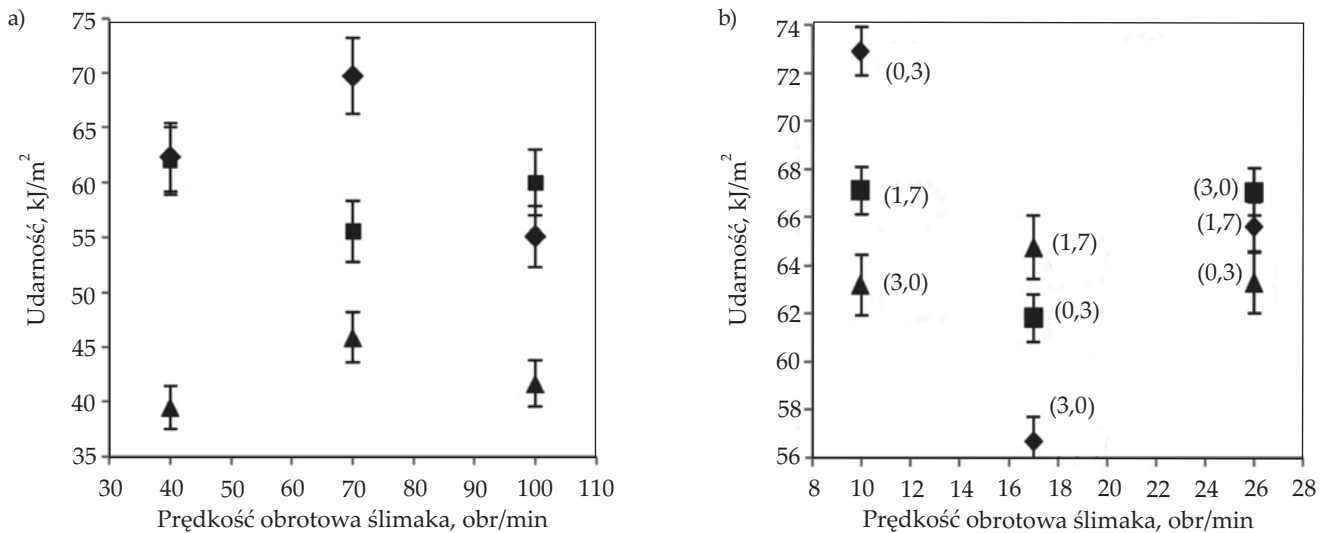
W wypadku próbek kompozytów z najmniejszym udziałem napełniacza, uzyskiwanych w procesie wytłaczania ślimakowego, zależność wytrzymałości na rozciąganie od prędkości obrotowej ślimaka jest niemal liniowa (rys. 2a), a wartość wytrzymałości zwiększa się z rosnącą prędkością obrotową ślimaka (wzrost o 22,4 %). Prawdopodobnie zwiększająca się szybkość ścinania w układzie uplastyczniającym bezpośrednio wpływa na lepsze ujednorodnienie wytłaczanej mieszaniny i bardziej równomierne rozprowadzenie napełniacza w polimerowej osnowie. W wypadku kompozytów średnio napełnionych (udział napełniacza do 25 % mas.) zależność ta ma charakter nieliniowy. Oddziaływanie na mieszaninę polimerowo-drzewną wysokiego ciśnienia w dłuższym czasie, w warunkach mniejszej prędkości obrotowej ślimaka, powoduje zmiany struktury morfologicznej drewna, charakteryzującego się swoistą, porowatą budową. W wyniku dłuższego działania wysokiego ciśnienia ta włóknista budowa z systemem wolnych przestrzeni zostaje „zaprasowana”, dzięki czemu uzyskuje się zwartą strukturę kompozytu o zwiększonej wytrzymałości na rozciąganie. To zjawisko jest znane i potwierdzone w innych publikacjach, m.in. S. Zajchowskiego [6]. Należy zauważyć, że wytrzymałość materiałów zawierających 50 % mas. napełniacza drzewnego jest niemal niezależna od prędkości obrotowej ślimaka.

W wypadku kompozytów polimerowo-drzewnych uzyskanych w wyniku wytłaczania ślimakowo-tarczowego (rys. 2b) stwierdzono, że zarówno zmiana prędkości obrotowej ślimaka, jak i szerokości szczeliny strefy tarczowej wpływa na wytrzymałość przy rozciąganiu badanych materiałów. Największą wytrzymałość na rozciąganie wykazywały kompozyty z udziałem 10 % mas. napełniacza, a uzyskane wartości były większe niż wartość wytrzyma-



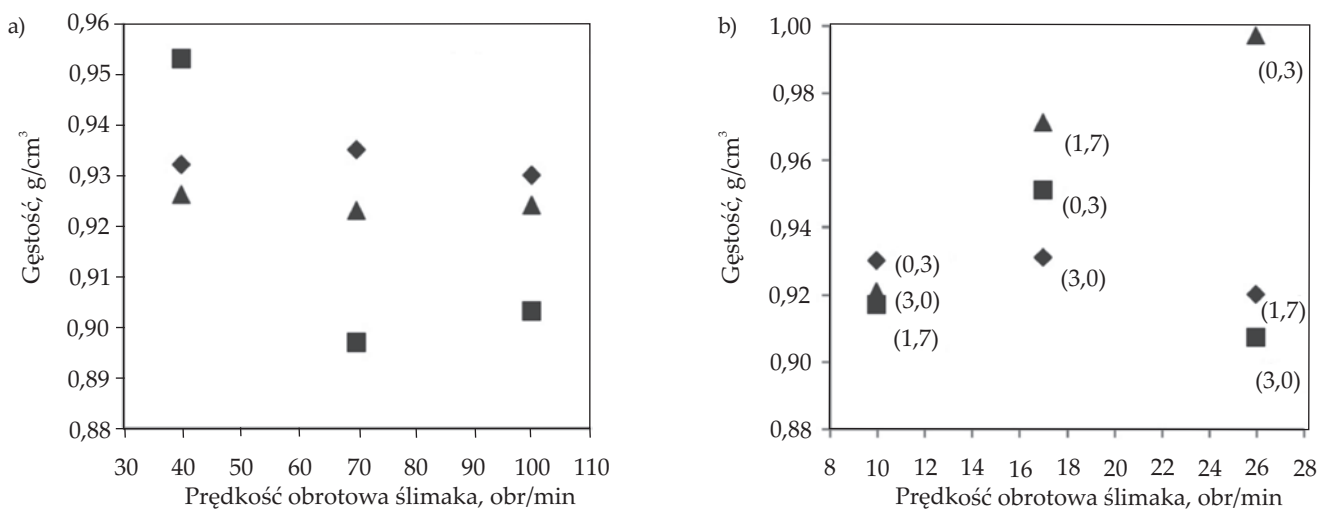
Rys. 2. Wytrzymałość na rozciąganie próbek kompozytów polimerowo-drzewnych z różnym udziałem napełniacza otrzymanych w procesie: a) wytłaczania ślimakowego, w zależności od prędkości obrotowej, b) wytłaczania ślimakowo-tarczowego, w zależności od prędkości obrotowej i szerokości szczeliny tarczowej (wartości W_s podane w nawiasach przy symbolach): \blacklozenge – 10 % mas. napełniacza, \blacksquare – 25 % mas. napełniacza, \blacktriangle – 50 % mas. napełniacza

Fig. 2. Tensile strength at yield of wood-polymer composites with different filler content produced using: a) screw extrusion, depending on the rotational speed, b) screw-disc extrusion, depending on the rotational speed and width of the chink of disc zone (W_s values given in parentheses next to the symbols): \blacklozenge – 10 wt % filler, \blacksquare – 25 wt % filler, \blacktriangle – 50 wt % filler



Rys. 3. Udarność próbek kompozytów polimerowo-drzewnych z różnym udziałem napełniacza otrzymanych w procesie: a) wyłaczania ślimakowego, w zależności od prędkości obrotowej, b) wyłaczania ślimakowo-tarczowego, w zależności od prędkości obrotowej i szerokości szczeliny tarczowej (wartości W_s podane w nawiasach przy symbolach): \blacklozenge – 10 % mas. napełniacza, \blacksquare – 25 % mas. napełniacza, \blacktriangle – 50 % mas. napełniacza

Fig. 3. Impact resistance of wood-polymer composites samples with different filler content produced using: a) screw extrusion, depending on the rotational speed, b) screw-disc extrusion, depending on the rotational speed and width of the chink of disc zone (W_s values given in parentheses next to the symbols): \blacklozenge – 10 wt % filler, \blacksquare – 25 wt % filler, \blacktriangle – 50 wt % filler



Rys. 4. Gęstość próbek kompozytów polimerowo-drzewnych z różnym udziałem napełniacza otrzymanych w procesie: a) wyłaczania ślimakowego, w zależności od prędkości obrotowej, b) wyłaczania ślimakowo-tarczowego, w zależności od prędkości obrotowej i szerokości szczeliny tarczowej (wartości W_s podane w nawiasach przy symbolach): \blacklozenge – 10 % mas. napełniacza, \blacksquare – 25 % mas. napełniacza, \blacktriangle – 50 % mas. napełniacza

Fig. 4. Density of wood-polymer composites samples with different filler content produced using: a) screw extrusion, depending on the rotational speed, b) screw-disc extrusion, depending on the rotational speed and width of the chink of disc zone (W_s values given in parentheses next to the symbols): \blacklozenge – 10 wt % filler, \blacksquare – 25 wt % filler, \blacktriangle – 50 wt % filler

łości na rozciąganie kompozytów wytłaczanych za pomocą wytłaczarki ślimakowej (o 29 %). Zaobserwowano również, że dziesięciokrotne zmniejszenie szerokości szczeliny (W_s) (z 3,0 mm do 0,3 mm) wpływa na zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie wytłaczanego materiału, średnio o 25 %. Zależność taka występowała też w wypadku kompozytów średnionapełnionych (25 % mas. napełniacza), gdzie maksymalną wartość wytrzymałości na rozciąganie wykazywał kompozyt uzyskany w procesie wytłaczania z szerokością szczeliny tarczowej równą 0,3 mm.

Wyniki dowodzą, że na wytrzymałość na rozciąganie wytwarzanych kompozytów polimerowo-drzewnych wpływa przede wszystkim zastosowana szerokość szczeliny strefy tarczowej wytłaczarki. Pod względem wytrzymałości na rozciąganie w każdej grupie materiałów o różnym udziale napełniacza dominowały materiały wytłaczane przy szerokości szczeliny 0,3 mm. Warto zauważyć, że w wyniku zwiększenia udziału napełniacza w kompozycie lub zmniejszenia szerokości szczeliny uzyskano zbliżone wartości wytrzymałości na rozciąganie

badanych materiałów. Zaobserwowano to w wypadku kompozytu zawierającego 10 % mas. napełniacza wytłaczanego z prędkością obrotową ślimaka 17 obr/min przy szczelinie 3,0 mm ($\sigma_M = 6$ MPa) i kompozytu z udziałem 25 % mas. napełniacza wytłaczanego z taką samą prędkością obrotową ślimaka, ale przy szerokości szczeliny strefy tarczowej równej 0,3 mm ($\sigma_M = 5,81$ MPa). Zjawisko to szeroko opisano m.in. w publikacji Michalskiej-Požogi [13]. Na podstawie badań stwierdzono, że zmniejszenie szerokości szczeliny strefy tarczowej powoduje zwiększenie szybkości ścinania. Duża szybkość ścinania oddziałuje na łańcuchy polimerowe – wpływa na ich rozciąganie i porządkowanie struktury, co skutkuje zwiększeniem stopnia krystaliczności, a także lepszym ujednorodnieniem tworzywa polimerowego [15].

W badaniach udarności kompozytów polimerowo-drzewnych, wytłaczanych za pomocą wyciarki ślimakowej, największe wartości uzyskały próbki zawierające 10 % mas. i 25 % mas. napełniacza drzewnego (rys. 3a), jednak kompozyty z udziałem 25 % mas. wiórów drzewnych pękały po uderzeniu młotem. Wiąże się to z mniejszym udziałem rPE-HD – materiału osnowy przenoszącego większe obciążenia dynamiczne. Zwiększenie zawartości napełniacza w kompozycie zwiększa więc jego kruchość. Materiały WPC zawierające 25 % mas. i 50 % mas. wiórów drzewnych, uzyskane w wyniku wytłaczania ślimakowo-tarczowego, wykazywały udarność na porównywalnym poziomie, ale o 50 % większą niż kompozyty wytłaczane klasycznie, zwłaszcza kompozyty wysokonapełnione.

Na podstawie analizy gęstości wytwarzanych klasycznie kompozytów rPE-HD z udziałem 10 i 50 % mas. wiórów drzewnych stwierdzono, że uzyskane wartości są zbliżone, niezależnie od prędkości obrotowej. Znaczne różnice gęstości zaobserwowano natomiast w wypadku kompozytu zawierającego 25 % mas. napełniacza. Największą wartość wykazywał kompozyt wytłaczany z prędkością obrotową ślimaka 40 obr/min ($\rho = 0,953$ g/cm³).

Uzyskane wyniki potwierdzają, że to właśnie wspomniana wcześniej porowata anatomiczna budowa drewna, w warunkach wysokiego ciśnienia panującego w kanale śrubowym ślimaka, ulega „zaprasowaniu”, co przekłada się na gęstość całego kompozytu.

Rysunek 4b przedstawia zmiany gęstości badanych kompozytów wytłaczanych z wykorzystaniem wyciarki ślimakowo-tarczowej. Największą gęstość wykazywały kompozyty wytłaczane przy szerokości szczeliny równej 0,3 mm, niezależnie od prędkości obrotowej ślimaka. Warto zauważyć, że kompozyt rPE-HD zawierający 50 % mas. wiórów drzewnych, uzyskany w toku wytłaczania ślimakowo-tarczowego z prędkością obrotową ślimaka 26 obr/min przy szerokości szczeliny strefy tarczowej 0,3 mm, wykazywał gęstość zbliżoną do gęstości wody. Efekt ten zaobserwował i opisał Zajchowski [6]. Zwiększenie gęstości kompozytów polimerowo-drzewnych wraz ze zwiększaniem udziału napełniacza opisali również m.in. Mirowski [22] i Zajchowski [1].

T a b e l a 6. Wartości współczynników η określone dla parametrów wytłaczania ślimakowo-tarczowego (wytrzymałość na rozciąganie)

T a b l e 6. Values of the parameters η determined for screw-disc extrusion (tensile strength at yield)

Parametr		Wytrzymałość na rozciąganie MPa	Współczynnik η
Prędkość obrotowa ślimaka n , obr/min	10	5,06	12,35
	17	4,91	12,76
	26	4,76	12,80
Udział napełniacza i , % mas.	10	6,93	16,51
	25	5,02	13,90
	50	2,78	7,50
Szerokość szczeliny W_s , mm	0,3	5,56	13,92
	1,7	4,68	12,35
	3,0	4,48	11,63

T a b e l a 7. Wartości współczynników η określone dla parametrów wytłaczania ślimakowo-tarczowego (udarność)

T a b l e 7. Values of the parameters η determined for screw-disc extrusion (impact resistance)

Parametr		Udarność kJ/m ²	Współczynnik η
Prędkość obrotowa ślimaka n , obr/min	10	67,74	36,30
	17	61,08	35,13
	26	65,31	35,82
Udział napełniacza i , % mas.	10	65,06	36,05
	25	65,32	36,14
	50	63,75	35,06
Szerokość szczeliny W_s , mm	0,3	35,87	35,88
	1,7	35,88	35,86
	3,0	35,50	35,50

Optymalizacja parametrów wytłaczania ślimakowo-tarczowego metodą Taguchi

Metoda Taguchi planowania eksperymentu pozwala określić wartości parametrów wytłaczania, umożliwiające uzyskanie najkorzystniejszych właściwości wytrzymałościowych badanych WPC. W wypadku, gdy celowe jest zmaksymalizowanie danej cechy, wprowadza się współczynnik analityczny η :

$$\eta = -10 \cdot \log_{10} [(1/n) \cdot \sum (1/y_i^2)] \quad (2)$$

gdzie: n – liczba próbek w jednakowym procesie (w tym wypadku $n = 5$), y – wartość analizowanej cechy.

Optymalizacja przeprowadzona na podstawie wyników badań pozwoliła na wyznaczenie możliwie najkorzystniejszych parametrów wytłaczania (tabela 6). Osiągnięcie największych wartości wytrzymałości na rozciąganie jest możliwe w wypadku wytłaczania materiałów o najmniejszym udziale napełniacza (10 % mas.),

przy najmniejszej szerokości szczeliny (0,3 mm) i z największą prędkością obrotową ślimaka $n = 26$ obr/min. Dużą wartość współczynnika η uzyskano także z zastosowaniem średniej prędkości $n = 17$ obr/min, umożliwiającą poszukiwanie optymalnej wartości po względem ekonomicznym. W wypadku udarności (tabela 7) optymalne jest wytłaczanie przy najmniejszej szerokości szczeliny 0,3 mm i najmniejszej prędkości obrotowej ślimaka, tj. 10 obr/min, kompozytu rPE-HD z udziałem 10–25 % mas. wiórów drzewnych.

WNIOSKI

– Wytłaczanie kompozytów rPE-HD napełnianych wiórami drzewnymi przy użyciu wytłaczarki ślimakowo-tarczowej pozwala na otrzymanie materiału o wytrzymałości ma rozciąganie większej o 29 % niż wytrzymałość kompozytów uzyskanych w wyniku klasycznego wytłaczania ślimakowego.

– Maksymalna udarność materiałów wytłaczanych za pomocą wytłaczarki ślimakowo-tarczowej jest niewiele większa (4,5 %) niż udarność materiału wytłaczanego przy użyciu wytłaczarki ślimakowej. Większe różnice udarności obserwowano w wypadku kompozytów rPE-HD z udziałem 25 i 50 % mas. wiórów drzewnych.

– Materiały wytłaczane przy szerokości szczeliny strefy tarczowej równej 0,3 mm wykazywały najlepsze właściwości mechaniczne, co wiązało się z występowaniem w strefie tarczowej o takiej szerokości szczeliny dużych szybkości ścinania, wpływających na lepsze ujednorodnienie kompozytu i w efekcie na poprawę jego właściwości mechanicznych.

– Największą gęstością charakteryzowały się kompozyty wytłaczane przy szerokości szczeliny 0,3 mm, niezależnie od zastosowanej prędkości obrotowej ślimaka. Prawdopodobnie było to spowodowane zmianami morfologicznymi struktury drewna, która na skutek wysokich ciśnień panujących w strefie tarczowej i jednocześnie dużych szybkości ścinania ulega „zaprasowaniu”. Ponadto tworzywo rPE-HD może wnikać w porowatą strukturę drewna.

– Należy zauważyć, że rozpatrywane właściwości wytłaczanych kompozytów polimerowo-drzewnych zależą także od innych, nieujętych w niniejszej pracy, czynników. Ważnym zagadnieniem jest np. stopień czystości oraz struktura zastosowanego recyklatu PE-HD, w tym wielko- i małowielkocząsteczkowe frakcje, których udział zmienia się z krotnością przetwórstwa.

– Zastosowana metoda Taguchi planowania eksperymentu pozwoliła na wskazanie wartości parametrów

umożliwiających uzyskanie wytłoczyny kompozytu o najlepszych właściwości wytrzymałościowych.

– Wyniki badań i zastosowana metoda optymalizacji potwierdzają ścisłą zależność właściwości użytkowych badanych kompozytów od szerokości szczeliny strefy tarczowej.

LITERATURA

- [1] Zajchowski S., Ryszkowska J.: *Polimery* **2009**, 54, 674.
- [2] Cyga R., Czaja K.: *Przemysł Chemiczny* **2008**, 87, 932.
- [3] Macko M.: *Przemysł Chemiczny* **2013**, 92, 1499.
- [4] Kuciel S., Liber-Kneć A., Zajchowski S.: *Polimery* **2010**, 55, 718.
- [5] Wolcott M.P., Englund K.: “A technology review of wood – plastic composites”, Proceedings of the 33rd International Particleboard Composite Materials Symposium, Washington State University, Pullman, 13–15 kwietnia 1999, str. 103–111.
- [6] Zajchowski S., Gozdecki C., Kociszewski M.: *Kompozyty* **2005**, 5, 45.
- [7] Rydzkowski T.: *Recykling* **2008**, 3, 28.
- [8] Diakun J., Michalska-Požoga I.: *Polimery* **2004**, 49, 42.
- [9] Michalska-Požoga I., Diakun J.: *Polimery* **2014**, 59, 845. <http://dx.doi.org/10.14314/polimery2014.845>
- [10] Michalska-Požoga I.: *Przetwórstwo tworzyw* **2014**, 158, 145.
- [11] Rydzkowski T., Michalska-Požoga I.: “Recycled Polymers: Chemistry and Processing, Vol. 1” (red. Thakur V.K.), Smithers Rapra Shropshire, 2015, rozdz. 4, str. 115–160.
- [12] Rydzkowski T.: *Polimery* **2011**, 56, 135.
- [13] Michalska-Požoga I., Jakubowski M.: *Przemysł Chemiczny* **2012**, 91, 1808.
- [14] Rydzkowski T., Michalska-Požoga I.: *Mechanika – Czasopismo Techniczne* **2009**, 3, 273.
- [15] Rydzkowski T., Michalska-Požoga I.: *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* **2010**, 5, 99.
- [16] Rydzkowski T.: *Polimery* **2009**, 54, 377.
- [17] Rydzkowski T.: „Teoretyczne i doświadczalne podstawy efektywnego wytłaczania ślimakowo-tarczowego w recyklingu materiałów i kompozytów polimerowych”, Monografia habilitacyjna, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2012.
- [18] Karaszewski R.: „Total Quality Management, Zarządzanie przez jakość – Wybrane zagadnienia”, TNOiK, Toruń 1999.
- [19] Mirowski J.: *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* **2010**, 49, 83.

Otrzymano 9 XI 2016 r.