

Politechnika Lubelska Wydział Mechaniczny



Katedra Technologii i Przetwórstwa Tworzyw Polimerowych

# Odlewanie rotacyjne polietylenu z zastosowaniem form z różnych materiałów metalicznych

dr inż. Karolina Głogowska



Wieliczka, 29-30.05.2025 r.



### Plan prezentacji



- Analiza obecnego stanu wiedzy
  - Cel i zakres pracy
    - Metodyka badań
      - Wyniki badań
        - Wnioski

### Analiza obecnego stanu wiedzy



Główne czynniki wpływające na proces odlewania rotacyjnego: ▶prędkość obrotowa formy odlewniczej,

➢temperatura i czas ogrzewania formy odlewniczej w komorze grzejnej,

>temperatura i czas chłodzenia formy odlewniczej,

>ciśnienie w gnieździe formującym formy odlewniczej,

materiał konstrukcyjny formy odlewniczej,

> grubość ścianki formy odlewniczej,

temperatura i czas ogrzewania formy odlewniczej w komorze grzejnej.



### Cel naukowy pracy



Głównym celem naukowym pracy jest określenie wpływu:

- rodzaju materiału konstrukcyjnego formy odlewniczej,
- > grubości ścianki formy odlewniczej,
- temperatury i czasu ogrzewania formy w komorze grzejnej na proces odlewania rotacyjnego i właściwości odlewów z liniowego polietylenu małej gęstości.

#### Plan i metodyka badań doświadczalnych Czynniki stałe



Czynniki stałe:

- rodzaj tworzywa polimerowego liniowy polietylen małej gęstości (PE-LLD),
- masa tworzywa polimerowego 450 g,
- metoda chłodzenia formy odlewniczej wentylator,
- wartości prędkości obrotowych formy odlewniczej 12 obr/min (oś główna) i 3 obr/min (oś pomocnicza),
- czas ogrzewania formy odlewniczej w komorze grzejnej 1 200 s,
- kształt i wymiar odlewu prostopadłościan o wymiarach 196 mm x 196 mm x 195 mm.

#### Plan i metodyka badań doświadczalnych Tworzywo polimerowe użyte w badaniach



- Liniowy polietylen małej gęstości (PE-LLD) w postaci proszku o nazwie handlowej DOWLEX® 2629UE (tab. 1).
  - Tab. 1. Podstawowe właściwości liniowego polietylenu małej gęstości DOWLEX® 2629UE według danych producenta [3]

Właściwości	Wartość	Struktura cząsteczki (schemat)
Gęstość 23°C, kg/m <sup>3</sup>	935	
Masowy wskaźnik szybkości płynięcia (190°C/2.16 kg), g/10 min	4,0	
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	17,5	
Wydłużenie względne przy zerwaniu, %	650	$\wedge$
Moduł Younga, MPa	645	
Twardość, °ShD	57	
Temperatura ugięcia pod obciążeniem (0,45 MPa), °C	65	$ \rightarrow                                   $
Temperatura mięknienia wg Vicata, °C	119	$\gamma$
Temperatura topnienia, °C	124	
Odporność skrośna, Ω m	1015	
Stała dielektryczna (110 Hz)	2,3	

#### Plan i metodyka badań doświadczalnych Czynniki zmienne



Na podstawie przeglądu literatury oraz badań wstępnych określono następujące czynniki zmienne:

- materiał konstrukcyjny formy odlewniczej: stal niskowęglowa, mosiądz oraz aluminium,
- grubość ścianki form odlewniczych: 3 mm, 5 mm oraz 8 mm,
- temperatura w komorze grzejnej: 230°C, 250°C oraz 270 °C.



#### Plan i metodyka badań doświadczalnych Formy odlewnicze



Materiał konstrukcyjny form odlewniczych:

≻stal niskowęglowa,

≻mosiądz,

≻aluminium.



**Rys. 2.** Wygląd form odlewniczych o grubości ścianki 3 mm użytych w procesie odlewania rotacyjnego: a) forma odlewnicza ze stali niskowęglowej, b) mosiężna, c) aluminiowa Tab. 2. Skład chemiczny i właściwości materiałów konstrukcyjnych form odlewniczych

Skład chemiczny,	Stal niskowęglowa	Mosiądz	Aluminium
właściwości		Wartość	
			Al-95,64; Mg-
Skład chemiczny, %	$\begin{array}{c} Fe-99,25, C-0,12;\\ Mn-0,6; P-0,045; inne:\\ S, Si, P, S, Cr, Mo, Ni,\\ Al., Cu, B, Nb, Co, V,\\ W, Sn, Pb, As, Bi, Ca,\\ Ti, Sb, Zn, Zr \leq 0,016 \end{array}$	Cu-62,92, Zn- 36,96; Fe- 0,031; inne: Al; Pb, Sn, P, Mn, Ni, Cr, S, Sb, Si $\leq 0,01$	3,08; Si-0,34; Fe- 0,40; Cu-0,08; Mn- 0,024; inne: Zn, Ni, V, Pb, Sn, Co, Ag; B, Be, Bi, Ca, Cr, Ga, Li, Na, Sr, Ti, Zr, Cd, In ≤
	140 000	120	0,06
Granica plastyczności, MPa	140-280	130	80
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	270 - 410	340	240
Twardość metodą Vickersa, HV <sub>10</sub>	127,06	118,93	56,9
Gęstość, kg/m <sup>3</sup>	7850	8440	2680
Współczynnik przewodzenia ciepła, W/(m K)	31,2	120	168
Ciepło właściwe, J/(kg K)	452	400	897
Dyfuzyjność cieplna, m <sup>2</sup> /s10 <sup>-5</sup>	0,9	3,6	6,9

Wieliczka, 29-30.05.2025 r.

#### Plan i metodyka badań doświadczalnych Warunki procesu odlewania rotacyjnego



Badania doświadczalne realizowano przy wykorzystaniu maszyny laboratoryjnej do odlewania rotacyjnego (rys. 4).



**Rys. 3.** Widok laboratoryjnej maszyny do odlewania rotacyjnego oraz odlewu: 1 – osłona układu narzędziowego, 2 – komora grzejna, 3 – forma odlewnicza, 4 – podstawa ramion formy odlewniczej, 5 – ramię formy odlewniczej, 6 – przekładnia stożkowa, 7 – przekładnia łańcuchowa, 8 – wentylator, 9 – silnik, 10 – osłona silnika

#### Plan i metodyka badań doświadczalnych



Warunki procesu odlewania rotacyjnego

**Tab. 3.** Matryca planu statycznego trójpoziomowego kompletnego (PS/DK 3<sup>3</sup>) z odkodowanymi czynnikami zmiennymi wraz z oznaczeniami próbek

Lp.	Materiał konstrukcyjny formy odlewniczej oraz wartość współczynnika przewodzenia ciepła, W/(m K)	Grubość ścianki formy odlewniczej, mm	Temperatura w komorze grzejnej, ℃	Oznaczenie próbek/ konfiguracje czynników zmiennych
1.		8	270	S/8/270
2.		8	250	S/8/250
3.		8	230	S/8/230
4.	Stal nickowaglowa	5	270	S/5/270
5.		5	250	S/5/250
6.	51,2	5	230	S/5/230
7.		3	270	S/3/270
8.		3	250	S/3/250
9.		3	230	S/3/230
13.		5	270	M/5/270
14.		5	250	M/5/250
15.	Mosiądz	5	230	M/5/230
16.	120	3	270	M/3/270
17.		3	250	M/3/250
18.		3	230	M/3/230
19.		8	270	Al/8/270
20.		8	250	Al/8/250
21.		8	230	Al/8/230
22.	A 1	5	270	Al/5/270
23.		5	250	Al/5/250
24.	108	5	230	Al/5/230
25.		3	270	Al/3/270
26.		3	250	Al/3/250
27.		3	230	Al/3/230



#### Metodyka badań doświadczalnych Proces odlewania rotacyjnego



<sup>></sup>roces odlewania rotacyjnego

> 11



rozkład temperatury w komorze grzejnej, °C,

- rozkład temperatury na powierzchni formy odlewniczej, °C,

- rozkład temperatury powietrza w gnieździe formującym formy odlewniczej, °C,

- rozkład temperatury tworzywa polimerowego, °C,

- czas cyklu odlewania rotacyjnego, s

- stopień zestalenia, °C-min.

temperatura i jej rozkład w gnieździe formującym formy odlewniczej, °C,
 czas cyklu odlewania rotacyjnego, s,

rozkład grubości ścianki odlewów z PE-LLD, mm.



#### Metodyka badań doświadczalnych Badania właściwości odlewu



Badania właściwości odlewów

Statyczna próba rozciągania maszyna wytrzymałościowa ZwickRoell - wytrzymałość na rozciąganie, AllroundLine Z010, zgodnie z PN EN ISO 527-1 MPa Badanie właściwości mechanicznych Próba przebicia udarowego maszyna Instron Ceast 9350 HES - energia zużyta do zniszczenia zgodnie z PN-EN ISO 6603 próbek, J Skaningowa kalorymetria DSC Phox 200 P firmy NETZSCH, Badanie właściwości różnicowa zgodnie z PN EN ISO 11357-1 cieplnych - stopień krystaliczności, % Struktura geometryczna odlewu urządzenie 3D firmy Hommel-Etamic zgodnie z normą PN-EN 25178 - profil chropowatości Ra, µm Badanie strukturalne Struktura wewnętrzna próbek tomograf komputerowy Nikon M2 LES System odlewu

#### Wyniki badań Modelowanie procesu odlewania rotacyjnego





b)



**Rys. 4.** Rozkład temperatury podczas odlewania rotacyjnego dla form odlewniczych wykonanych ze stali niskowęglowej: a) S/3/230, b) S/3/270, c) S/8/230 i d) S/8/270; objaśnienia do wykresów: krzywa w kolorze czerwonym – temp. w komorze grzejnej, krzywa w kolorze zielonym – temp. na powierzchni zewnętrznej formy odlewniczej, krzywa w kolorze niebieskim – temp. w gnieździe formującym formy odlewniczej, krzywa w kolorze fioletowym – temp. tworzywa polimerowego w postaci proszku



a)

#### Wyniki badań Modelowanie procesu odlewania rotacyjnego



- Najkrótszy czas cyklu wyniósł 48 min (Al/3/230), a najdłuższy 55 min (S/3/230) czas cyklu uległ wydłużeniu o 12,12%.
- Najkrótszy czas cyklu wyniósł 73 min (Al/8/270), a najdłuższy 81 min (S/8/270) czas cyklu uległ wydłużeniu o 10,20%.



**Rys. 5.** Czas cyklu odlewania rotacyjnego w zależności od grubości ścianki materiału konstrukcyjnego formy odlewniczej i temperatury w komorze grzejnej: a) 230°C i b) 270°C

a)

#### Wyniki badań Modelowanie procesu odlewania rotacyjnego

b)



a)



**Rys. 6.** Stopień zestalenia tworzywa polimerowego w zależności od grubości ścianki materiału konstrukcyjnego formy odlewniczej i temperatury w komorze grzejnej: a) 230°C i b) 270°C

#### Wyniki badań Proces odlewania rotacyjnego





**Rys. 7.** Rozkład temperatury w gnieździe formującym formy odlewniczej podczas odlewania rotacyjnego dla form odlewniczych wykonanych ze stali niskowęglowej: a) S/3/230, S/3/270, b) S/8/230, S/8/270, c) Al/3/230, Al/3/270 i d) Al/8/230, Al/8/270

> 16

#### Wyniki badań Proces odlewania rotacyjnego



- Najkrótszy czas cyklu odnotowano dla próbki Al/3/230 45 min, a najdłuższy dla próbki S/8/230 62 min (czas cyklu uległ wydłużeniu 37,77%).
- Najkrótszy czas cyklu zaobserwowano dla próbki Al/3/270 47 min, a najdłuższy dla próbki S/8/270 68 min (czas cyklu uległ wydłużeniu 44,68%).

b)



**Rys. 8.** Czas cyklu odlewania rotacyjnego w zależności od grubości ścianki materiału konstrukcyjnego formy odlewniczej: a) temperatura w komorze grzejnej 230°C, b) temperatura w komorze grzejnej 270°C

a)

#### > 17

Wieliczka, 29-30.05.2025 r.

#### Wyniki badań Proces odlewania rotacyjnego





**Rys. 9.** Wyniki pomiarów rozkładu grubości ścianki odlewów z PE-LLD wykonanych za pomocą: a) stalowej, b) mosiężnej oraz c) aluminiowej formy odlewniczej

Wieliczka, 29-30.05.2025 r.

#### Wyniki badań Właściwości odlewów





Materiał konstrukcyjny formy odlewniczej

#### Wyniki badań Właściwości odlewów



**Tab. 4.** Wyniki wybranych pomiarów stopnia krystalicznościodlewów z liniowego polietylenu małej gęstości

Oznaczenie	Stopień krystaliczności V. %
próbek	Stopien Krystanczności Ak, %
S/3/230	60,14
S/3/270	59,60
S/5/230	60,89
S/5/270	59,10
S/8/230	60,65
S/8/270	59,10
M/3/230	58,21
M/3/270	49,68
M/5/230	58,32
M/5/270	57,22
Al/3/230	58,99
Al/3/270	48,78
Al/5/230	58,88
Al/5/270	50,93
Al/8/230	57,38
Al/8/270	57,49

- Największa wartość stopnia krystaliczności S/5/230 60,89%.
- Najmniejsze wartości X<sub>k</sub> zaobserwowano dla materiałów M/3/270 (49,68%), Al/3/270 (48,78%) oraz Al/5/270 (50,93%), co odpowiada spadkowi o 18,41%, 19,88% i 16,35% w porównaniu do próbek S/5/230.

#### 

#### Wyniki badań Właściwości odlewów



**Tab. 5.** Wyniki wybranych pomiarów energii zużytej do zniszczenia ( $E_m$ ) próbek odlewów z liniowego polietylenu małej gęstości

Oznaczenie	Wartość średnia pomiarów energii zużytej do
próbek	zniszczenia próbek odlewów z PE-LLD, J
S/3/230	$12,32 \pm 0,7$
S/3/270	$14,34 \pm 0,5$
S/5/230	$12,10 \pm 0,6$
S/5/270	$14,00 \pm 0,8$
S/8/230	$9,22 \pm 0,7$
S/8/270	$11,71 \pm 0,9$
M/3/230	$13,29 \pm 0,9$
M/3/270	$10,16 \pm 0,7$
M/5/230	$13,22\pm0,5$
M/5/270	$15,12 \pm 0,9$
Al/3/230	$14,68 \pm 0,9$
Al/3/270	$12,21 \pm 0,7$
Al/5/230	$13,39 \pm 0,8$
Al/5/270	$12,16 \pm 0,6$
Al/8/230	$11,80 \pm 0,6$
Al/8/270	$13,71 \pm 0,9$

 Największe wartości E<sub>m</sub> - AI/3/230 (14,68 J), M/5/270 (15,12 J) oraz AI/8/270 (13,71 J),

Najmniejsze wartości E<sub>m</sub> - S/3/230 (12,32 J), S/5/230 (12,10 J) oraz S/8/230 (9,22 J),

#### Wyniki badań Właściwości odlewów







#### Wyniki badań Właściwości odlewów





 Przyczyną występowania wad był nieodpowiedni dobór temperatury w komorze grzejnej, w zależności od rodzaju materiału konstrukcyjnego i grubości ścianki formy odlewniczej oraz na niska temperatura w gnieździe formującym formy odlewniczej.

**Rys. 12.** Wyniki analizy porowatości próbek odlewów z PE-LLD wytworzonych przy użyciu formy odlewniczej ze stali niskowęglowej o grubości ścianki 5 mm i temperaturze w komorze grzejnej: a) 230°C, b) 250°C i c) 270°C

Wieliczka, 29-30.05.2025 r.



#### Wnioski poznawcze



- Komputerowe badania symulacyjne odlewania rotacyjnego wykazały znaczący wpływ materiału konstrukcyjnego formy odlewniczej, grubości ścianki, temperatury w komorze grzejnej oraz czasu ogrzewania na rozkład temperatury powietrza w gnieździe formującym formy odlewniczej, czas cyklu odlewania rotacyjnego oraz stopień zestalenia.
- Wyniki symulacji komputerowej i badania doświadczalne procesu odlewania rotacyjnego wykazały, że najlepszym materiałem konstrukcyjnym formy odlewniczej użytym w badaniach odlewania rotacyjnego jest aluminium. Stosując aluminiową formę odlewniczą osiągnięto rozkład temperatury najbardziej zbliżony do temperatury w komorze grzejnej, najdłuższy czas utrzymania tworzywa polimerowego w stanie plastycznym/ciekłym, najkrótszy czas cyklu, największą wartość stopnia zestalenia tworzywa polimerowego oraz najbardziej równomierny rozkład grubości ścianki odlewu.
- Zwiększenie grubości ścianki formy odlewniczej (od 3 do 8 mm) i temperatury (od 230°C od 270°C) w komorze grzejnej powoduje wydłużenie czasu cyklu odlewania rotacyjnego.
- Najkrótszy czas cyklu zaobserwowano dla aluminiowych form odlewniczych, z kolei najdłuższy dla form stalowych. Odpowiedni dobór warunków odlewania rotacyjnego może wpłynąć na skrócenie czasu cyklu odlewania rotacyjnego nawet o 44%.



#### Wnioski poznawcze



- Czynniki zmienne przyjęte w badaniach mają wpływ na właściwości mechaniczne, cieplne, powierzchniowe i strukturalne odlewów z PE-LLD.
- Wzrost temperatury w komorze grzejnej oraz zmniejszanie grubości ścianki formy odlewniczej powodują polepszenie właściwości próbek z odlewów (S/3-8/230-270). Zatem poprzez odpowiedni wybór warunków odlewania rotacyjnego, można wpływać na uzyskanie odlewów o oczekiwanych właściwościach użytkowych.
- Największe wartości właściwości mechanicznych oraz odporności na obciążenia dynamiczne otrzymano dla odlewów wytworzonych przy użyciu aluminiowych form odlewniczych, natomiast najmniejsze w przypadku próbek otrzymanych przy użyciu stalowych form odlewniczych.
- Zastosowanie wysokiej temperatury w komorze grzejnej (270°C) i długiego czasu ogrzewania dla form odlewniczych wykonanych z materiałów metalicznych o wysokim współczynniku przewodzenia ciepła i małej grubości ścianki formy odlewniczej powoduje obniżenie właściwości mechanicznych, odporności na uderzenie i stopnia krystaliczności odlewów.

_	

#### Literatura



[1] Crawford R.J., Kearns M.P.: Practical guide to rotational moulding. Elsevier, United Kingdom, 2021

[2] Głogowska K., Pączkowski P., Samujło B.: *Study on the Properties and Structure of Rotationally Moulded Linear Low-Density Polyethylene Filled with Quartz Flour*. Materials, 15 (6), 2022, s. 2154

[3] Crawford R.J., Throne J.L.: *Rotational molding technology*. William Andrew, United States of America, 2001.

[4] Crawford R.J.: *Practical guide to rotational moulding*. Smithers Rapra, United Kingdom, 2012

[5] Kutz M.: *Applied plastics engineering handbook: processing and materials*. William Andrew, United States of America, 2016.
[6] Ramkumar P.L., Ramesh A., Alvenkar P.P., Patel N.: *Prediction of heating cycle time in Rotational Moulding*. Materials Today: Proceedings, 2 (4-5), 2015, s. 3212–3219.

[7] Sikora R.: *Przetwórstwo tworzyw polimerowych: podstawy logiczne, formalne i terminologiczne: praca zbiorowa*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2006.

[8] Umbare V., Arakerimath R.: Investigating the influence of peak internal air temperature (PIAT) on material characteristics of linear low-density polyethylene (LLDPE) during rotational moulding. Engineering Research Express, 6 (1), 2024, s. 015043.

[9] Löhner M., Drummer D.: *Characterization of layer built-up and inter-layer boundaries in rotational molding of multi-material parts in dependency of the filling strategy*. Journal of Polymer Engineering, 37 (4), 2017, s. 411–420.

[10] Nguyen H.T., Cosson B., Lacrampe M.F., Krawczak P.: Numerical simulation on the flow and heat transfer of polymer powder in rotational molding. International Journal of Material Forming, 8 (3), 2015, s. 423–438.

[11] Gogos G.: Bubble removal in rotational molding. Polymer Engineering and Science, 44 (2), 2004, s. 388–394.

[12] Qin L., Ding Y.M., Zhu G.C., Yu H.C., Yang W.M.: Heat flow analysis and efficiency optimization of rotational molding equipment.



Odlewanie rotacyjne polietylenu z zastosowaniem form z różnych materiałów metalicznych

## Dziękuję za uwagę



Politechnika Lubelska Wydział Mechaniczny Katedra Technologii i Przetwórstwa Tworzyw Polimerowych

dr inż. Karolina Głogowska

