



Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie
Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki

mgr inż. Jakub Styks

nr indeksu: 1069

**Wpływ geometrii kanału matrycy na jakość peletu uzyskiwanego
z biomasy**

Rozprawa doktorska

Promotor pracy dr hab. inż. Marek Wróbel prof. URK

Katedra Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki

Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki

Kraków, 2023 r.

dr hab. inż. Markowi Wróblowi, prof. URK składam najserdeczniejsze wyrazy wdzięczności za inspirację, wyrozumiałość, życzliwość, wsparcie, możliwość rozwoju naukowego i poświęcony mi czas, które przyczyniły się do powstania niniejszej pracy doktorskiej.

Pracownikom Katedry Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki dziękuję za wszelkie słowa otuchy, życzliwą atmosferę oraz wszelką pomoc.

Rodzinie i bliskim za bezgraniczną pomoc, motywację, troskę, podtrzymywanie na duchu, wsparcie w chwilach zwątpienia

STRESZCZENIE

Przedstawiona praca jest pierwszym dostępnym opracowaniem dotyczącym określenia wpływu geometrii kanału zagęszczającego na jakość peletu uzyskanego z biomasy miskanta olbrzymiego *Miscanthus × giganteus* Greef et Deu różnika przerośniętego *Silphium perfoliatum* L. oraz ślazuwca pensylwańskiego *Sida hermaphrodita* L. Rusby. Przez geometrię kanału zagęszczającego rozumie się długość oraz średnicę kanału zagęszczającego, ale również średnicę podstawy stożka zagęszczającego, wysokość stożka zagęszczającego oraz jego kąt rozwarcia. Do określenia wpływu tych parametrów na jakość biopaliw stałych zaproponowano własną autorską metodę mapowania parametrów procesowych i jakościowych. Jest to nowe, dotychczas nie stosowane, podejście do opisu charakterystyki ciśnieniowego zagęszczania biomasy na cele energetyczne. Metoda pozwala na znalezienie najlepszej geometrii mającej wpływ na przebieg procesu ciśnieniowej aglomeracji. Graficzne przedstawienie zależności w formie map pozwala w prosty sposób, dla każdego z gatunków badawczych, określić geometrię komory zagęszczającej, która gwarantuje uzyskanie peletów klasy jakościowej A oraz B przy minimalnym ciśnieniu.

W pracy określono jaki wpływ na proces zagęszczania ma geometria komory zagęszczającej. Materiałem badawczym była biomasa zielna tj. byliny jedno i dwuliścienne. Są to gatunki, które literatura uznaje za cenne z punktu widzenia wykorzystania na cele energetyczne. Prowadzone są plantacje tych roślin a jednocześnie prowadzone są badania nad procesami przetwarzania uzyskanej biomasy. Gatunki te są perspektywiczne oraz, co istotne w przypadku gatunków obcych, nie są one gatunkami inwazyjnymi.

Przy wykorzystaniu map ustalono, że geometria kanału zagęszczającego ma istotny wpływ na parametry jakościowe osiągnane przez produkowany pelet. Potwierdzono, że wykorzystując mapy, w prosty sposób można określić wpływ każdego parametru geometrycznego (kąt rozwarcia stożka, długość kanału zagęszczającego, średnica wejściowa). Mapa przedstawia długość kanału, kąt rozwarcia stożka zagęszczającego oraz zależne od nich ciśnienie towarzyszące procesowi zagęszczania oraz DE i DU .

Optymalna geometria kanału zapewniająca uzyskanie progów jakościowych (klasa A) przy minimalnej wartości ciśnienia zagęszczania dla materiału o wilgotności 13% zagęszczanego w temperaturze 100°C jest następująca:

- Miskant - $D_1 = 12$ mm: $\alpha 10^\circ$, $L 13$ mm, $P = 280$ MPa; $D_1 = 10$ mm: $\alpha 10^\circ$, $L 24$ mm, $P = 200$ MPa,
- Różnik - $D_1 = 12$ mm: $\alpha 18^\circ - 20^\circ - 20^\circ$, $L 16 - 23$ mm, $P = 70$ MPa; $D_1 = 10$ mm: $\alpha 10^\circ - 21^\circ$, $L 14 - 25$ mm, $P = 40$ MPa,
- Ślazuwec - $D_1 = 12$ mm: $\alpha 10^\circ$, $L 5$ mm, $P = 330$, ale również $\alpha 27^\circ - 29^\circ$, $L 23 - 26$ mm, $P = 340$ MPa; $D_1 = 10$ mm: $\alpha 30^\circ$, $L 28$ mm, $P < 200$ MPa.

Badania wykazały również, że istnieje możliwość wytworzenia matryc uniwersalnych o konfiguracjach: $D_1 = 12$ mm zakres kątów ($10 - 34^\circ$), w przypadku $D_1 = 10$ mm ($10 - 29^\circ$) z odpowiednio dobranymi długościami kanałów L .

Zaproponowane rozwiązanie może cieszyć się zainteresowaniem zarówno w mniejszej jak i większej skali przemysłowej, jako narzędzie umożliwiające optymalizację procesów produkcji biopaliw stałych.

Słowa kluczowe: biomasa, biopaliwa stałe, pelet, ciśnieniowe zagęszczanie, gęstość właściwa, wytrzymałość mechaniczna

SUMMARY

The presented work here is the first available study on determining the effect of the geometry of the compaction channel on the quality of pellets obtained from *Miscanthus* *Miscanthus × giganteus* Greef et Deu, *Silphium perfoliatum* L. and *Sida hermaphrodita* L. Rusby. The geometry of the compaction channel is understood as the length and diameter of the compaction channel, but also the diameter of the inlet opening of the compaction cone, the height of the compaction cone and its opening angle. To determine the impact of these parameters on the quality of solid biofuels, the author's own method of mapping process parameters was proposed. This is a new approach, not previously used, to describe the characteristics of pressure densification of biomass for energy purposes. The method makes it possible to find the best process parameters affecting the course of the pressure agglomeration process. The graphical representation of the relationships in the form of maps makes it possible to easily, for each test species, determine the geometry of the compaction chamber that guarantees the production of pellets of quality classes A and B.

The study determined what effect the geometry of the compaction chamber has on the compaction process. The test material was herbaceous biomass, i.e. monocotyledonous and dicotyledonous perennials. These are species that the literature recognizes as valuable from the point of view of use for energy purposes. Plantations of these plants are being carried out and, at the same time, research is being conducted into the processes of processing the biomass obtained. These species are prospective and, importantly in the case of foreign species, they are not invasive species.

Using maps, it was established that the geometry of the compaction channel has a significant impact on the quality parameters achieved by the pellet produced. It was confirmed that using the maps, the influence of each geometric parameter (cone opening angle, compaction channel length, input diameter) can be easily determined. The map shows the length of the channel, the angle of dilation of the compaction cone and the dependent pressure accompanying the compaction process, as well as DE and DU.

The optimal channel geometry to ensure quality thresholds (Class A) at minimum compaction pressure for 13% moisture material compacted at 100°C is as follows:

- *Miscanthus* - $D_I = 12$ mm: $\alpha 10^\circ$, $L 13$ mm, $P = 280$ MPa; $D_I = 10$ mm: $\alpha 10^\circ$, $L 24$ mm, $P = 200$ MPa,
- *Silphium* - $D_I = 12$ mm: $\alpha 18^\circ - 20^\circ - 20^\circ$, $L 16 - 23$ mm, $P = 70$ MPa; $D_I = 10$ mm: $\alpha 10^\circ - 21^\circ$, $L 14 - 25$ mm, $P = 40$ MPa,
- *Sida* - $D_I = 12$ mm: $\alpha 10^\circ$, $L 5$ mm, $P = 330$, ale również $\alpha 27^\circ - 29^\circ$, $L 23 - 26$ mm, $P = 340$ MPa; $D_I = 10$ mm: $\alpha 30^\circ$, $L 28$ mm, $P < 200$ MPa.

The study also showed that it is possible to produce universal dies with configurations: $D_I = 12$ mm angle range (10 - 34°), for $D_I = 10$ mm (10 - 29°) with appropriately selected L-channel lengths.

The proposed solution may be of interest on both smaller and larger industrial scales as a tool to optimize solid biofuel production processes.

Keywords: biomass, solid biofuels, pellet, pressure compaction, specific density, mechanical durability

Spis treści

1. Wstęp	8
2. Przegląd literatury	10
2.1. Biomasa	10
2.2. Potencjał biopaliw stałych	16
2.3. Klasyfikacja biopaliw stałych	17
2.4. Zagęszczanie ciśnieniowe	18
2.5. Połączenia międzycząsteczkowe i czynniki na nie wpływające	20
2.6. Czynniki wpływające na proces zagęszczania ciśnieniowego	21
2.6.1 Ciśnienie	22
2.6.3 Wilgotność	23
2.6.4 Temperatura procesu zagęszczania	23
2.6.5 Lepiszczka	24
2.6.6 Szybkość procesu	25
2.6.7 Wielkość frakcji	25
2.6.8 Współczynnik tarcia	27
2.6.9 Geometria matrycy	27
2.7 Modele zagęszczania	29
3. Cel	33
4. Materiał badawczy	36
4.1. Miskant olbrzymi <i>Miscanthus × giganteus</i> Greef et Deu	37
4.2. Rożnik przerośnięty <i>Silphium perfoliatum</i> L.	39
4.3. Ślaziowiec pensylwański <i>Sida hermaphrodita</i> L. Rusby	42
5. Metodyka badań	45
5.1 Przygotowanie materiału	47
5.1.1 Zbiór, sezonowanie i rozdrabnianie wstępne	47
5.1.2 Suszenie do osiągnięcia stanu suchego	48
5.1.3 Mielenie	48
5.2 Charakterystyka materiału badawczego	49
5.2.1 Oznaczenie zawartości popiołu	49
5.2.2 Oznaczenie ciepła spalania	50
5.2.3 Oznaczenie gęstości usypowej	51
5.2.4 Oznaczenie gęstości właściwej	51
5.2.5 Oznaczenie gęstości bezwzględnej	52
5.2.6 Oznaczenie składu ziarnowego	52
5.2.7 Wyznaczenie porowatości materiału	54
5.2.8 Oznaczenie współczynnika tarcia	55
5.3 Badania wstępne	57
5.3.1 Dobór ujednoczonego składu ziarnowego	58

5.3.2 Nawilżanie materiału badawczego	58
5.3.3 Zagęszczanie w komorze zamkniętej	59
5.3.4 Oznaczenie parametrów jakościowych	60
5.4 Badania właściwe	63
5.4.1 Projekt stanowiska badawczego oraz zagęszczanie ciśnieniowe	65
5.4.2 Oznaczenie parametrów jakościowych peletów	71
5.4.3 Mapy zmian parametrów jakościowych peletu	74
6. Wyniki	77
6.1 Charakterystyka materiału badawczego	77
6.1.1 Wartość opałowa	77
6.1.2 Zawartość popiołu	78
6.1.3 Gęstość właściwa	78
6.1.4 Gęstość bezwzględna	79
6.1.5 Gęstość nasypowa	79
6.1.6 Porowatość	79
6.1.7 Skład ziarnowy materiału	80
6.1.8 Współczynnik tarcia	81
6.2 Badania wstępne	82
6.2.1 Ujednoczenie składu ziarnowego	82
6.2.2 Oznaczenie wytrzymałości mechanicznej peletów	83
6.3. Badania właściwe	88
6.3.1 Proces zagęszczania na autorskim stanowisku badawczym	88
6.3.2 Gęstość właściwa peletów	101
6.3.3 Wytrzymałość mechaniczna peletów	110
6.4 Mapy zmian parametrów jakościowych peletu	120
7. Podsumowanie i wnioski	137
Bibliografia	141
Spis tabel	157
Spis rysunków	157

WYKAZ OZNACZEŃ

Oznaczenia odnoszące się do parametrów jakościowych biomasy i biopaliw przyjęte za PN-EN ISO 16559:2022-06 - Terminologia:

AD – gęstość bezwzględna ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$),
A_d – zawartość popiołu w stanie suchym (%),
BD – gęstość nasypowa ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$),
C – frakcja wymiarowa składu ziarnowego (mm) wg PN-EN ISO 17827,
D – średnica lub przekątna peletu lub brykietu (mm), wg PN-EN ISO 17225,
DE – gęstość właściwa peletu ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$),
DU – wytrzymałość mechaniczna biopaliwa stałego (%), wg PN-EN ISO 17831,
L_z – długość cząstki biopaliwa (peletu, brykietu, zrębki, sieczki) (mm), wg PNEN ISO 17225,
d₅₀ – środkowa wartość rozmiaru ziarna (mm) wg PN-EN ISO 17827,
M – wilgotność względna (%),
M_a – wilgotność bezwzględna (%),
M_{ad} – wilgotność względna analityczna (%),
M_{ar} – wilgotność całkowita (%),
q_{p,net} – wartość opałowa ($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$),
Q_s – ciepło spalania ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)
S – skumulowany udział frakcji wymiarowych (%) wg PN-EN ISO 17827,
SD – gęstość właściwa surowca ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

Pozostałe oznaczenia:

D₁ – średnica otworu wlotowego stożka zagęszczającego (mm),
D₂ – średnica otworu wylotowego stożka zagęszczającego (mm),
DU₁₀ – wytrzymałość mechaniczna granul zastępczej długości 10 mm (%),
DU₁₇ – wytrzymałość mechaniczna granul zastępczej długości 17 mm (%),
ε_c – porowatość całkowita złoża materiału ziarnistego (%),
ε_w – porowatość wewnętrzna złoża materiału ziarnistego (%),
ε_z – porowatość zewnętrzna złoża materiału ziarnistego (%),
h_{k10} – wysokość peletu zastępczego (mm),
h_{k24} – wysokość peletu po 24 h stabilizacji (mm),
m_A – masa próbki peletu badanego po teście (g),
m_{A10} – masa peletu zastępczego po teście (g),
m_{A17} – masa peletu zastępczego po teście (g),
m_E – masa próbki peletu badanego przed testem (g),
m_{E10} – masa granul zastępczej o wysokości 10 mm (g),
m_{E17} – masa peletu zastępczego o długości 17 mm przed testem (g),
m_{E24} – masa granul po 24 h stabilizacji (g),
m_R – masa rozkruszu (g),
l_{k17} – długość peletu zastępczego (mm),
l_{k24} – długość peletu zastępczego (mm),
P – ciśnienie zagęszczania (MPa),
V – objętość (cm^3)
α – kąt rozwarcia stożka zagęszczającego kanału (°),
L – długość sekcji cylindrycznej kanału zagęszczającego (mm).

1. Wstęp

Polska zalicza się do krajów, które w politykę energetyczną kraju, z powodzeniem wdrażają zastosowanie odnawialnych źródeł energii, a w szczególności biopaliw stałych. Jednym z powodów inicjujących dalszy rozwój tej gałęzi energetycznej może być europejski pakiet klimatyczno-energetyczny „Fit for 55”, który zakłada redukcję wydzielania gazów cieplarnianych i przeciwdziałanie zmianom klimatycznym. Nazwa „Fit for 55” bezpośrednio wynika z celu pakietu, który ma się przyczynić do redukcji emisji gazów cieplarnianych o przynajmniej 55% w 2030 r. w odniesieniu do poziomów z roku 1990.

To czy używanie biomasy będzie dla nas opłacalne zależy w największym stopniu od energochłonności procesów, które są niezbędne do jej odpowiedniego przetworzenia. Nie bez znaczenia w tym procesie są właściwości mechaniczne oraz fizyczne obrabianego materiału. Szczegółowe dogłębne rozpoznanie cech materiału badanego daje nam możliwość optymalizacji poszczególnych etapów przetwarzania materiału, co finalnie daje możliwość wytwarzanie wydajnego biopaliwa przy największej możliwej redukcji nakładów pracy. Nim jednak będziemy mieli do czynienia z biopaliwem stałym w postaci granulatu (peletu lub brykietu), materiał przeznaczony do jego powstania musi zostać poddany szeregowi procesów, które mają za zadanie nadanie mu charakterystycznych cech i właściwości, a wartości parametrów będą spełniały kryteria określone przez właściwe normy jakościowe.

Coraz więcej wskazuje na to, że OZE, a w szczególności produkcja biomasy będzie się dalej rozwijać, dlatego im lepiej poznamy surowiec i jego wymagania co do systemu przetwarzającego, im lepiej dostosujemy ten system do rodzaju przetwarzanego materiału, tym efektywniej będziemy mogli wykorzystać szeroki zakres jego źródeł. W Polsce za najbardziej popularną roślinę o przeznaczeniu energetycznym uważało do się niedawna wierzbę wiciową. Niestety z uwagi na swoje wymagania wodno-glebowe jej plantacje nie mogą być uprawiane na każdym terenie. Ze względu na zmienność gleb na terenie Polski, sugeruje się potencjalnym plantatorom, aby z szerokiej gamy gatunków roślin, dobierali je tak by parametry wodno-glebowe nie stanowiły przeszkody w uprawie roślin energetycznych.

Pozwoli to uniknąć dodatkowych nakładów na uprawę, maksymalizując plon z plantacji. Widząc przyszłość w alternatywnych źródłach energii pochodzenia roślinnego, wiele ośrodków naukowo-badawczych, krajowych jak i zagranicznych, prowadzi szereg badań, celem oceny przydatności nowych gatunków roślin pod uprawy energetyczne. Rośliny uprawiane w celu wykorzystania na cele energetyki cieplnej powinny posiadać pewne właściwości, między innymi charakteryzować się dużym przyrostem rocznym, odpornością na

choroby i szkodniki, niewielkimi wymaganiami siedliskowymi i przystosowaniem do warunków klimatycznych Polski (Frączek i in., 2011).

Ta szeroka gama roślin daje też niestety surowiec o zróżnicowanych właściwościach, mający wpływ na procesy jej przetwarzania do postaci peletów lub brykietów. Praca skupiać się będzie na jednym z etapów końcowych produkcji paliw kompaktowanych, a konkretnie ciśnieniowym zagęszczaniu biomasy do formy peletu. Nie jest to proces dobrze rozpoznany, jak w przypadku zagęszczania w przemyśle paszowym, spożywczym czy farmaceutycznym (Hejft i Obidziński, 2012). Powszechnie dostępna literatura w dużej mierze odnosi się do efektywności ekonomicznej produkcji oraz przydatności roślin energetycznych do zagęszczania na cele opałowe. Źródła podają, że wszelkie materiały poddawane procesom aglomeracji ciśnieniowej powinny być oceniane indywidualnie ze względu na swój specyficzny charakter, cechy fizyczne czy zawartość substancji organicznych oraz nieorganicznych obecnych w materiale roślinnym ułatwiających ten proces (Obidziński, 2012; Obidziński i in., 2016; Szyszlak-Bargłowicz i in., 2021a).

Tematy podjęte w literaturze nie określają w pełni wpływu technologii na jakość surowca, procesu zagęszczania czy produktu końcowego. Mowa tu zwłaszcza o geometrii kanału formującego pelet. Brak, zwłaszcza dla biomasy niedrzewnej, konkretnych wytycznych jaka ma ona być by produkowane paliwo charakteryzowało się wymaganymi poziomami cech jakościowych zależnych od procesu zagęszczania tj. gęstości i wytrzymałości. Praca podejmuje zatem próbę uzupełnienia tej luki w odniesieniu do biomasy zielnej, drugiego co do ważności źródła biomasy do produkcji biopaliw stałych w formie peletu. Natomiast zaproponowany sposób przedstawienia relacji materiał-geometria-jakość, może być na tyle uniwersalny by pozwalał na dobór optymalnej geometrii kanału zagęszczającego (maksymalizującej parametry jakościowe przy minimalnym ciśnieniu zagęszczania), w zależności od wielu czynników: wilgotność surowca, jego skład ziarnowy, dodatek lepiszczy, temperatura procesu, dawka materiału itp. Wyniki uzyskane podczas badań przedstawionych w pracy, mogą być pomocne podczas podejmowania działań, w celu uzyskania produktu jakościowego, spełniającego wymagania norm oraz oczekiwań konsumentów przy jednoczesnej poprawie efektywności wytwarzania produktu.

2. Przegląd literatury

Pojawiające się w ostatnich latach kryzysy związane z wybuchem pandemii COVID-19 czy wybuchem wojny na Ukrainie, skutkowały między innymi, zerwaniem wielu łańcuchów dostaw surowców i produktów. Dotyczy to zwłaszcza sektora paliw i obserwowanego wzrostu ich cen. Sektor biopaliw stałych również odczuwa negatywne wpływy tych wydarzeń. Aby bezpieczeństwo dostaw peletu opałowego mogło być zapewnione, ich produkcja powinna opierać się głównie o krajowe źródła biomasy. W przypadku Polski, głównym źródłem są lasy dostarczające biomasę drzewną, a wytworzony z nich pelet cieszy się coraz większą popularnością. Właśnie ze względu na tę popularność, lasy, ale i plantacje drzew szybkorosnących, mogą się okazać źródłem niewystarczająco wydajnym. Sytuację mogą zatem poprawić źródła biomasy dostarczające surowca do produkcji peletów niedrzewnych. Pelet taki również jest dopuszczony (po spełnieniu wymagań jakościowych), do zastosowań w indywidualnych systemach grzewczych. Proces peletowania biomasy drzewnej jest poznany i szeroko stosowany, w przypadku biomasy niedrzewnej (ze względu na jej właściwości), sytuacja jest trudniejsza i wymaga zwłaszcza badań dotyczących wpływu geometrii kanału matrycy na cechy jakościowe peletu.

2.1. Biomasa

Definicja określenia *biomasa* została ustalona w *Ustawie z dnia o zmianie ustawy o odnawialnych źródłach energii oraz niektórych innych ustaw*¹⁾ Art. 1. W ustawie z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz. U. z 2017 r. poz. 1148, 1213 i 1593 oraz z 2018 r. poz. 9 i mówi, że jest to ulegającą biodegradacji część produktów, odpadów lub pozostałości pochodzenia biologicznego z rolnictwa, w tym substancje roślinne i zwierzęce, leśnictwa i związanych działów przemysłu, w tym rybołówstwa i akwakultury, przetworzoną biomasę, w szczególności w postaci brykietu, peletu, toryfikatu i biowęgla, a także ulegającą biodegradacji część odpadów przemysłowych lub komunalnych pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, w tym odpadów z instalacji do przetwarzania odpadów oraz odpadów z uzdatniania wody i oczyszczania ścieków, w szczególności osadów ściekowych, zgodnie z przepisami o odpadach w zakresie kwalifikowania części energii odzyskanej z termicznego przekształcania odpadów”. Natomiast norma (PN-EN ISO 16559:2022-06) definiuje biomasę jako: materiał pochodzenia biologicznego (roślinny i zwierzęcy) z wyłączeniem materiałów zawartych w formacjach geologicznych i/lub skamieniałościach. Norma (PN-EN ISO 17225-1:2021) wprowadza klasyfikację biomasy ze względu na źródło pochodzenia. Tabela 1 przedstawia fragment tej klasyfikacji w odniesieniu do biomasy z roślin zbieranych w cyklu

rocznym – tzw. biomasy zielnej. Oprócz tego źródła, norma wyróżnia jeszcze biomasę drzewną, owocową, wodną oraz tzw. mieszanki i mieszaniny biomasy z tych źródeł.

Tabela 1

Klasyfikacja pochodzenia i źródeł biomasy – fragment dotyczący biomasy z roślin zbieranych w cyklu rocznym – tzw. biomasa zielna

2 biomasa zielna	2.1 Rośliny zielne rolnicze i ogrodnicze	2.1.1 Zboża	2.1.1.1 Całe rośliny
			2.1.1.2 Słoma
			2.1.1.3 Ziarna lub nasiona
			2.1.1.4 Łuski lub łupiny
			2.1.1.5 Mieszanki i mieszaniny
		2.1.2 Trawy	2.1.2.1 Całe rośliny
			2.1.2.2 Słoma
			2.1.2.3 Nasiona
			2.1.2.4 Łupiny
			2.1.2.5 Mieszanki i mieszaniny
		2.1.3 Rośliny oleiste	2.1.3.1 Całe rośliny
			2.1.3.2 Łodygi i liście
			2.1.3.3 Nasiona
			2.1.3.4 Łuski lub łupiny
			2.1.3.5 Mieszanki i mieszaniny
		2.1.4 Rośliny okopowe	2.1.4.1 Całe rośliny
			2.1.4.2 Łodygi i liście
			2.1.4.3 Korzenie
			2.1.4.4 Mieszanki i mieszaniny
		2.1.5 Rośliny strączkowe	2.1.5.1 Całe rośliny
			2.1.5.2 Łodygi i liście
			2.1.5.3 Owoce
			2.1.5.5 Strąki
			2.1.5.5 Mieszanki i mieszaniny
		2.1.6 Kwiaty	2.1.6.1 Całe rośliny
			2.1.6.2 Łodygi i liście
			2.1.6.3 Nasiona
			2.1.6.4 Mieszanki i mieszaniny
		2.1.7 Biomasa zielna z konserwacji terenów użyteczności publicznej	
2.2 Produkty uboczne i pozostałości z przetwórstwa roślin zielnych		2.2.1 pozostałości zielne nie poddane obróbce chemicznej	2.2.1.1 Zboża i trawy
			2.2.1.2 Rośliny oleiste
			2.2.1.3 Rośliny okopowe
			2.2.1.4 Rośliny strączkowe i kwiaty
			2.2.1.5 Mieszanki i mieszaniny
		2.2.2 pozostałości zielne poddane obróbce chemicznej	2.2.2.1 Zboża i trawy
			2.2.2.2 Rośliny oleiste
			2.2.2.3 Rośliny okopowe
			2.2.2.4 Rośliny strączkowe i kwiaty
			2.2.2.5 Mieszanki i mieszaniny
2.3 Mieszanki i mieszaniny			

Źródło: wg PN-EN ISO 17225-1:2021-11

Jednak, aby poznać zalety, potencjał ale i ograniczenia biomasy, należy zapoznać się krótko z nieodległą historią jej wykorzystania.

W drugiej połowie XX wieku zaczęły zwielać się zdarzenia, które dezorganizowały postęp cywilizacyjny oraz jakość życia społeczności, takie jak: wyczerpywanie się zasobów nieodnawialnych źródeł energii, wzrost kosztów ich

pozyskiwania, znaczne zanieczyszczenie atmosfery tlenkami węgla, azotu i siarki, ale również wytwarzanie zwiększonej ilości odpadów (Meadows, 1973). Wyżej wymienione zjawiska były impulsem do intensyfikacji badań nad wykorzystaniem alternatywnych nośników energii.

W tym samym czasie rolnictwo krajów wysoce rozwiniętych gospodarczo natrafiło na komplikacje w postaci:

- pojawienia się nadwyżek surowców rolniczych,
- wzrostu powierzchni odłogów i gruntów czasowo wyłączonych z produkcji rolniczej oraz obszarów o ponadnormatywnym zanieczyszczeniu substancjami toksycznymi,
- spadku opłacalności i zmniejszeniu dochodów rodzin gospodarujących na roli.

Mając na uwadze powyższe fakty, zdecydowano się na podjęcie działań w kierunku alternatywnego wykorzystania gruntów rolnych. Potencjał dostrzeżono w produkcji odnawialnych źródeł energii. Takie wykorzystanie gruntów ornych, jak również gleb marginalnych, przynosi istotne profity miejscowym społecznościom dzięki zmniejszeniu nadwyżek produktów rolnych, pozyskanie nowych rynków zbytu, utworzenie nowych miejsc pracy na terenach wiejskich, ale także w strefach przemysłu przetwórstwa tych produktów. Co więcej wzrasta poziom zabezpieczenia energetycznego oraz polepszeniu ulega stan naturalnego środowiska (Sajnóg i Wójcik, 2013).

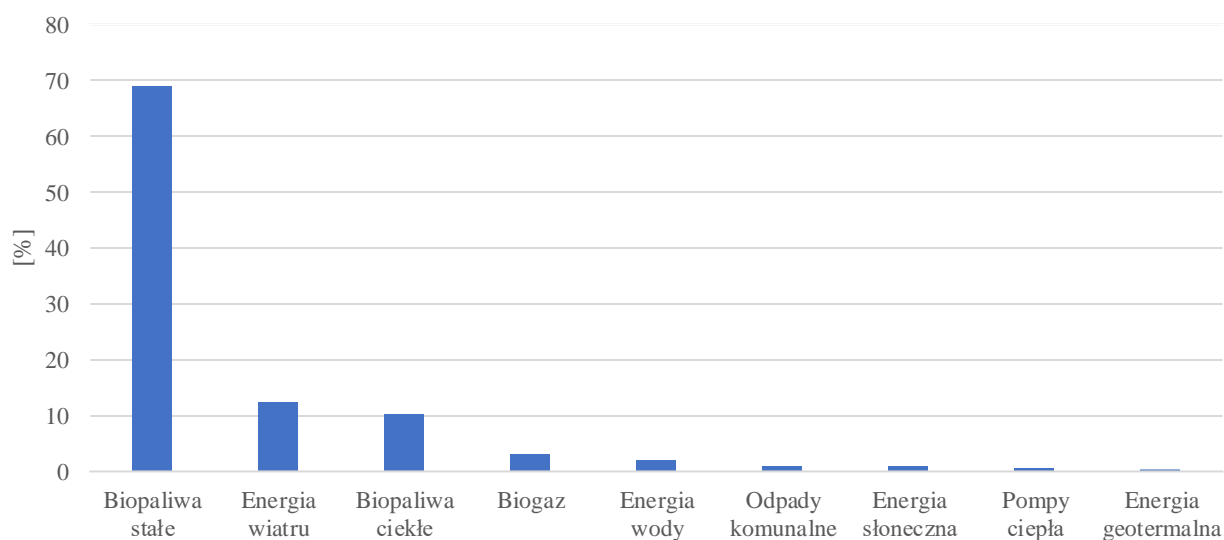
Początkiem lat 80. w Stanach Zjednoczonych, w ramach programu Growing Industrial Materials (GIM), przeprowadzono badania dotyczące pożądaných przez przemysł surowców na przeszło dwóch tysiącach gatunków roślin, spośród których wybrano i zalecono do uprawy kilkadziesiąt (Bertram, 1992). Wzmożenie badań nad uprawą roślin w celach przemysłowych w Europie datuje się na rok 1982, kiedy to Komisja Europejska pracowała nad przygotowanym przez XII Dyрекcję Generalną (DG XII) – Nauka, Badania, Rozwój – raportem zarządzającym współpracę środowisk rolniczych wraz z przemysłem na rzecz zróżnicowania produkcji rolnej i zastosowania nowych technologii.

Badania mające na celu wykazanie aspektów poza żywnościowych w produkcji rolniczej były kontynuowane przez następne programy. Rezultatem tego działania było powstanie długiej listy roślin uprawnych, które mogły odnaleźć swoje zastosowanie w kilkunastu innych, poza spożywczą, branżach oraz gałęziach przemysłowych (Nalborczyk, 1999). Zdecydowana większość z tych roślin może być również uprawiana na glebach marginalnych, które nie nadają się do aktywnego rolniczego wykorzystania (Gradziuk i Wojtaszek, 2001). Zastosowanie wytworzonego surowca biomasowego do celów energetycznych warunkuje wprowadzenie do upraw określonej grupy roślin. Przemawia za tym także troska o środowisko naturalne, ponieważ dotychczasowy sposób wykorzystywania

i przetwarzania surowców rolniczych wywiera to środowisko negatywny wpływ (Folmer i in., 1996).

Strategia rozwoju energetyki odnawialnej", przyjęta przez sejm w dniu 23 sierpnia 2001 roku, zakładał, że odnawialne źródła energii w postaci biopaliw będą poszerzały swój zasięg wykorzystania energetycznego i nadadzą w ten sposób szybszego tempa rozwoju nowych technologii. Wkład energii odnawialnej w bilansie energetycznym w skali kraju powinien wzrosnąć z poziomu około 2,5% do 7,5% w 2010 r. Na ten okres wkład jaki stanowi biomasa w całości energii pierwotnej otrzymanej z OZE powinien być wyższy niż 90%. Ze względu na restrykcyjne prawo dotyczące możliwości wykorzystania drewna pochodzącego z lasów, drewna odpadowego pochodzącego z przemysłu drzewnego czy słomy z rolnictwa, aby zrealizować te założenia konieczne było zakładanie plantacji roślin energetycznych. Warto dodać, że biomasa występowała w dostatecznej ilości na terenie całej Polski, jednak jej wykorzystanie nie było na zaplanowanym poziomie (Gradziuk, 1999; Kowalik, 2004).

W ostatnich latach energia pochodząca ze źródeł odnawialnych pozyskiwana jest z następujących źródeł: energia promieniowania słonecznego, wody, wiatru, zasobów geotermalnych, biopaliw stałych, biogazu, biopaliw ciekłych. Jej pozyskanie odnotowało w ostatnich latach tendencję zwyżkową. Z danych udostępnionych przez Główny Urząd Statystyczny w 2018 r. udział energii z OZE w końcowym zużyciu energii brutto wynosił 11,16%. Tymczasem wkład energii pochodzącej z odnawialnych źródeł energii w ujęciu pozyskania energii pierwotnej ogółem odnotował przyrost w latach 2014-2018 z 12,12% do 14,31%. Możliwości pozyskiwania energii z OZE w Polsce w głównej mierze wynikają z korzystnych panujących warunków geograficznych oraz możliwych do wykorzystania zasobów. Energia otrzymana ze źródeł odnawialnych w 2018 r. była w niewątpliwej przewadze z biopaliw stałych (68,88%) następnie z energii wiatru (12,55%) oraz biopaliw ciekłych (10,33%). Ogółem w Polsce w 2018 r. uzyskano 367 091 TJ energii pierwotnej z OZE. Struktura pozyskania energii ze źródeł odnawialnych w Polsce wg nośników w 2018 r. została przedstawiona na wykresie (Rys. 1).



Rysunek 1. Struktura pozyskania energii ze źródeł odnawialnych w Polsce wg nośników w 2018 r.

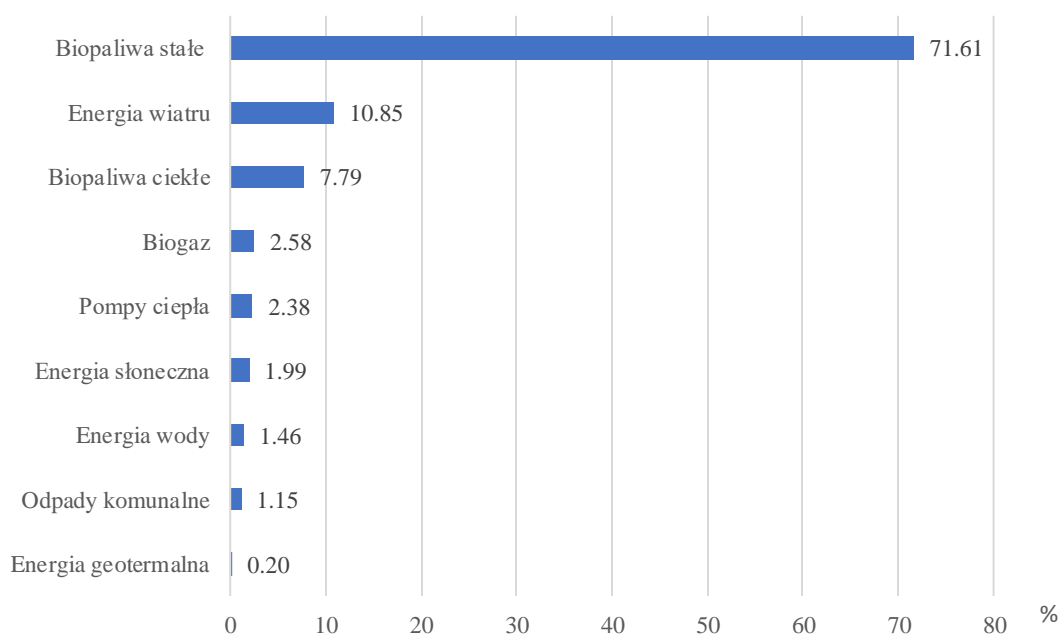
Źródło: GUS, *Energia ze źródeł odnawialnych w 2018 r.*

Aktualna sytuacja dotycząca energetyki odnawialnej w Polsce

W ostatnim czasie energia odnawialna w Polsce jest wytwarzana głównie z: promieniowania słonecznego, wiatru, wody, biopaliw stałych, biopaliw ciekłych, biogazu, zasobów geotermalnych jak również z energii otoczenia pozyskanej przez pompy ciepła (GUS, 2021).

W porównaniu z rokiem 2019, udział energii ze źródeł odnawialnych w pozyskaniu energii pierwotnej zwiększył się z 19,74% do 21,60% w roku 2020 (GUS, 2021).

Energia, jaką udało się uzyskać ze źródeł odnawialnych w Polsce w 2020 r. była głównie pozyskiwana z biopaliw stałych i procentowo wynosiła 71,61%. Kolejnym, dużo mniejszym źródłem była energia wiatru z udziałem na poziomie 10,85%. Ostatnim dużym źródłem okazały się być biopaliwa ciekłe, z których udało się pozyskać 7,79% energii. Biogaz, pompy ciepła, energia słoneczna, energia wody, odpady komunalne oraz energia geotermalna stanowiły sumarycznie 9,76%. Łączną wartość energetyczną uzyskanej energii pierwotnej pochodzącej ze źródeł odnawialnych w Polsce w 2020 r. wyniosła 524113 TJ (GUS, 2021). Struktura pozyskania energii ze źródeł odnawialnych w Polsce przedstawiono na wykresie poniżej (Rys. 2). Jak widać, udział energii pozyskiwanej z biomasy jest nadal najwyższy a jego udział wzrasta.

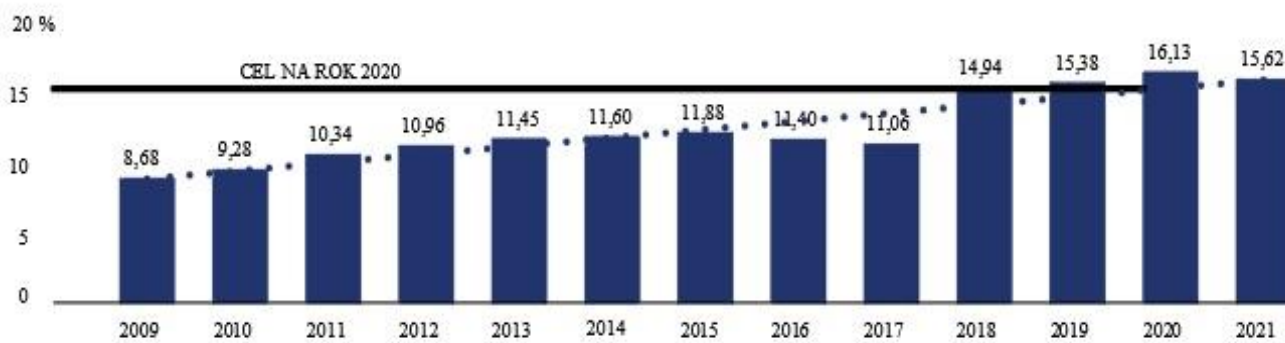


Rysunek 2. Struktura pozyskania energii ze źródeł odnawialnych w Polsce wg nośników w 2020 r.

Źródło: GUS, *Energia ze źródeł odnawialnych w 2020 r.*

Całkowity i sektorowy udział energii ze źródeł odnawialnych w latach 2009 - 2021

Stosownie do dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. odnoszącej się do promowania użytkowania energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych, państwa członkowskie zostały zobligowane do osiągnięcia założonego udziału procentowego energii z OZE w końcowym zużyciu energii brutto w 2020 r. Celem dla polskiej energetyki było osiągnięcie 15%. Dodatkowo, każde z państw członkowskich musi zagwarantować, że w 2020 r. udział energii z OZE w transporcie będzie na poziomie przynajmniej 10% finalnego zużycia energii w transporcie (GUS, 2022). Udział procentowy energii z OZE w końcowym zużyciu energii brutto przedstawiono na poniższym rysunku (Rys. 3).



Rysunek 3. Udział energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto

Źródło: GUS, *Energia ze źródeł odnawialnych w 2021 r.*

2.2. Potencjał biopaliw stałych

W czasie opracowywania Strategii Rozwoju Odnawialnych Źródeł Energii dla Polski założono, że rozwój energetyki będzie przede wszystkim oparty na biopaliwach stałych. Polska charakteryzuje się dużym potencjałem naturalnym. Pierwsza waloryzacja zasobów znajdujących się w Polsce określała potencjał biomasy szczególnie w formie drewna czy też słomy. Strategia określiła roczną ilość technicznie możliwych do zagospodarowania w przeznaczeniu energetycznym biopaliw i wynosi ona około 465,1 PJ (Strategia Rozwoju Energetyki Odnawialnej 2000). Wlicza się do tego nadwyżki materiału powstałe w: rolnictwie (195 PJ), leśnictwie (158,6 PJ), sadownictwie (57,6 PJ) oraz odpady drzewne z przemysłu (53,9 PJ) (Ekonomiczne i prawne aspekty wykorzystania odnawialnych źródeł energii w Polsce, 2000).

Lata 90-te pokazały, że w skali kraju sektor rolniczy wytwarza rocznie około 25 mln ton słomy oraz około 18 mln ton siana. Możliwości techniczne przy zużytkowaniu ich w celach energetycznych określono na około 11,8 mln ton, co stanowiło 50% zużycia krajowych zasobów słomy zbożowej, 10% siana oraz 70% słomy rzepakowej (Ekonomiczne i prawne aspekty wykorzystania odnawialnych źródeł energii w Polsce, 2000).

Paliwa kompaktowane (pelet, brykiet), które zostały wytworzone z materiałów pochodzenia leśnego są drugą pod względem wielkości wykorzystania w celach energetycznych grupą biopaliw stałych. Stopień zalesienia Polski w roku 1999 stanowił 28,8% powierzchni kraju. Biorąc pod uwagę ten fakt, uważano, że potencjał biomasy pochodzenia leśnego jest znaczny i będzie dalej wzrastał (Ekonomiczne i prawne aspekty wykorzystania odnawialnych źródeł energii w Polsce, 2000). W 2021 r. lesistość polski to 29,6% co stanowi zalesienie na poziomie ponad 9,2 mln ha (<https://www.lasy.gov.pl/pl/nasze-lasy/polskie-lasy>, 2021). Według szacunków udział drewna z przeznaczeniem energetycznym stanowi

około 18,5% drewna uzyskiwanego z Lasów Państwowych oraz mniej więcej 23% z lasów, które są własnością prywatną.

Jednak rzeczywista dostępność biomasy leśnej z przeznaczeniem na biopaliwa stałe może okazać się niższa z uwagi na: potrzebę pokrycia zapotrzebowania społecznego na drewno opałowe, potrzebę pozostawiania w lesie niezbędnej ilości drewna dla zapewnienia ochrony ekosystemów leśnych, redukujących się z rocznie poziomów zalesień, czy też wyłączenie ze wsparcia na zalesianie trwałych użytków zielonych oraz ziem znajdujących się na terenie obszarów Natura 2000 (Zajązkowski, 2013).

Kolejnym źródłem biomasy z przeznaczeniem energetycznym są plantacje roślin szybko rosnących. Warunki klimatyczne panujące w Polsce pozwalają na uprawy plantacyjne, do których można zaliczyć: drzewa, krzewy, trawy oraz byliny. Najbardziej popularnymi uprawami energetycznymi są plantacje: wierzby krzewiastej, topoli, brzozy, olchy, miskanta olbrzymiego oraz wielu innych roślin wieloletnich. Rośliny te z powodzeniem mogą zastępować biomasę leśną, która jest niezbędna w innych sektorach gospodarczych, a ze względu na szybki przyrost masy możliwe jest częste pozyskiwanie biomasy z tych upraw (Stolarski i in., 2014).

Aktualnie można zauważyć wzrost popularności biomasy wśród odbiorców indywidualnych, ale również przez sektor gospodarki komunalnej czy jednostki użyteczności publicznej. Jest to prawdopodobny efekt wymogów modernizacyjnych kotłowni oraz ciepłowni. Na terenie Polski, niestety w dalszym ciągu słabo rozwija się uzyskiwanie biomasy drzewnej z gospodarki komunalnej, gdzie do tej grupy można zaliczyć: zużyte meble (20%); elementy wyeksploatowanych budynków i budowli (16%); zużyte opakowania, a przede wszystkim palety (13%) oraz zużyte drzwi i okna (12%) (Ratajczak i Bidziński, 2013).

2.3. Klasyfikacja biopaliw stałych

Norma EN ISO 17225-1:2021 porządkuje również kwestię biopaliw stałych pod kątem najbardziej popularnych formy handlowych (Tab. 2). Znajduje się w niej również informacja odnośnie charakterystyki wymiarowej czy sposobu przygotowania paliwa. Paliwa charakteryzujące się najwyższą formą przetworzenia a zarazem najwyższym stopniem ujednoczenia parametrów technicznych to pelet i brykiet. Ich stosowanie jest wygodne i może być w dużym stopniu zautomatyzowane, dlatego to te formy, a zwłaszcza pelet, zyskują coraz większą popularność mimo, że ich proces wytwarzania wiąże się z wyższymi nakładami ponoszonymi na produkcję a produkt finalny jest przez to droższy w porównaniu do innych form biopaliw stałych.

Tabela 2
Główne formy handlowe biopaliw stałych

Paliwo	Typowy wymiar ziarna	Metoda przygotowania
Brykiety	$\varnothing > 25$ mm	Sprasowanie mechanicznie
Pelety	$\varnothing < 25$ mm	Sprasowanie mechanicznie
Proszek paliwowy	1 mm	Mielenie
Trociny	1 mm do 5 mm	Cięcie ostrymi narzędziami
Zrębki drzewne	5 mm do 100 mm	Cięcie ostrymi narzędziami
Paliwa z rozdrobnionych pozostałości drzewnych (łupki)	Zmienny	Rozdrobnione tępymi narzędziami
Drewno opałowe w postaci kłód/kłoców	100 mm do 1000 mm	Cięcie ostrymi narzędziami
Drewno lite	> 500 mm	Cięcie ostrymi narzędziami
Małe bele słomy	$0,1$ m ³	Sprasowane i związane kwadratowe
Duże bele słomy	$3,7$ m ³	Sprasowane i związane kwadratowe
Okrągłe bele słomy	$2,1$ m ³	Sprasowane i związane cylindryczne
Wiązka	Zmienny	Ułożone wzdłuż i związane
Kora	Zmienny	Pozostałość z okorowania drzew Może być rozdrobniona lub nierozdrobniona
Sieczka słomy	100 mm do 200 mm	Cięta podczas zbiorów
Ziarna lub nasiona	Zmienny	Bez przygotowania lub suszenie
Łupiny i pestki owoców	5 mm do 15 mm	Bez przygotowania
Osad włóknisty	Zmienny	Odwodnienie odpadów włóknistych

UWAGA: Mogą być stosowane również inne formy

Źródło: EN ISO 17225-1:2021

2.4 Zagęszczanie ciśnieniowe

Kompaktowanie (brykietowanie, peletowanie) polega na sprasowaniu pod wysokim ciśnieniem odpowiednio przygotowanej biomasy. Najczęściej proces ten przebiega bez udziału dodatkowych substancji klejących (lepiszczy). Materiałem wyjściowym może być w zasadzie każdy materiał roślinny, ale odpowiednio przygotowany. Jak już wcześniej wspomniano, w Polsce aglomerowana jest biomasa drzewna, niedrzewna oraz owocowa. Najczęściej są to trociny oraz sieczka słomy. W mniejszym stopniu zagęszczany jest miskant, ślazier, rożnik przerośnięty, łuska słonecznikowa i gryczana (Obidziński i in., 2016), otręby pszenne, wytloki owocowe (Dołżyńska i in., 2019) itp. Natomiast końcowa forma uzyskiwanego paliwa zależy przede wszystkim od jego przeznaczenia. W dużym uproszczeniu, odbiorców przetworzonych biopaliw stałych można podzielić na trzy grupy: systemy dużej energetyki cieplnej, średniej wielkości zakłady energetyczne, odbiorcy indywidualni. Wymagania jakościowe będą różne w poszczególnych grupach.

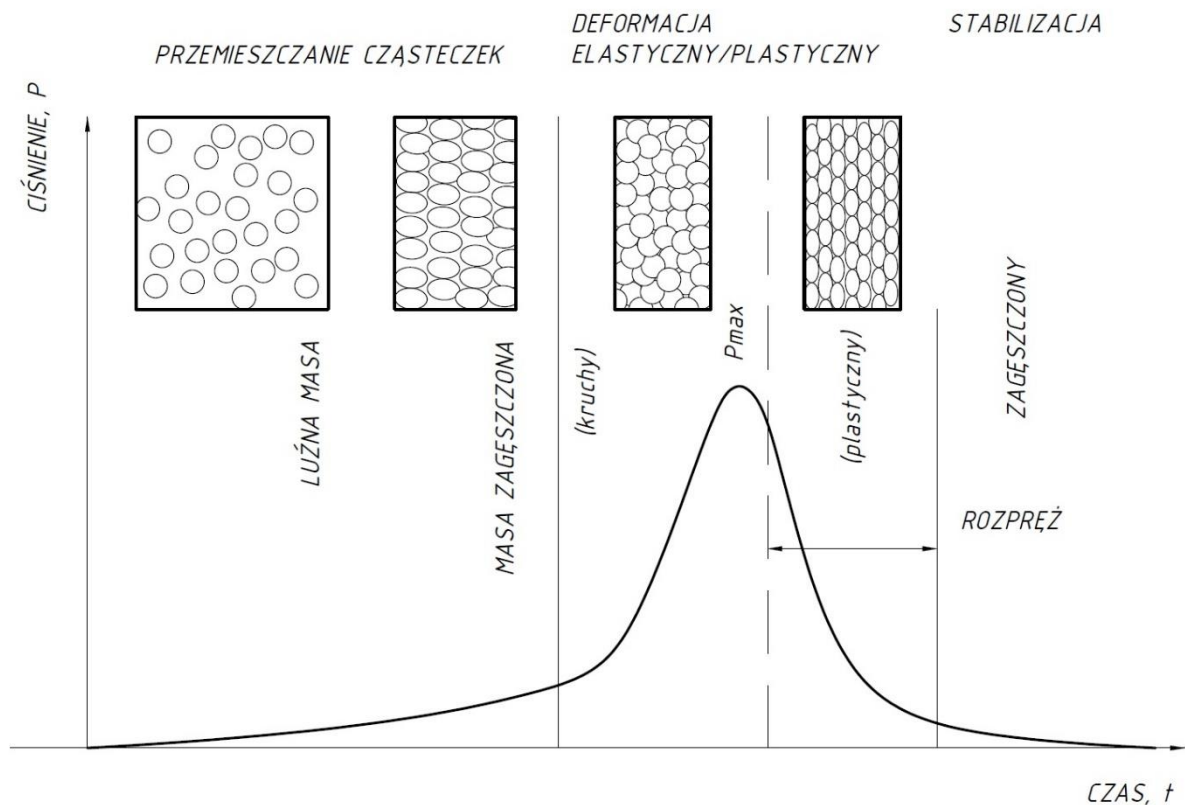
Proces zagęszczania jest procesem, którego obecność można zaobserwować w wielu gałęziach przemysłowych. Wykorzystywany jest między innymi przez koncerny spożywcze, farmaceutyczne, paszowe, chemiczne, metalurgiczny czy paliwowy, w którym zawierają się biopaliwa stałe (Obidziński i in., 2019, 2020a; Zawisłak i in., 2020). Najważniejszym założeniem tego procesu jest otrzymanie finalnego produktu, który będzie się charakteryzował wysoką trwałością, określonymi wymiarami, ujednocionym kształtem. Wynikiem prawidłowo prowadzonego procesu będzie granula, która będzie spełniała wymagania jakościowe obowiązujące w danej gałęzi przemysłowej.

Osiągnięcie założonych właściwości granul jest w głównej mierze zależne od czynników procesowych, które zwykle są właściwie dobierane według charakterystyki materiału zagęszczanego (Wróbel, 2019)

Powodem popularności procesu zagęszczania materiału są w głównej mierze:

- redukcja objętości,
- maksymalizacja gęstości,
- ujednociony skład dawki,
- redukcja kosztów magazynowania,
- łatwiejsze magazynowanie,
- redukcja zapylenia,
- redukcja kosztów transportu.

Zagęszczanie jako proces, składa się z trzech charakterystycznych dla siebie etapów. Pierwszym z nich jest przemieszczanie cząsteczek, podczas którego cząsteczki materiału przemieszczają się względem siebie redukując wolną przestrzeń, a maksymalizując powierzchnię kontaktową między sobą. Drugim etapem jest deformacja sprężysto-plastyczna. W tej fazie można zaobserwować wzrost ciśnienia do wartości maksymalnej. Cząsteczki podczas tego etapu są już względem siebie ciasno upakowane, nawiązują między sobą połączenia międzycząsteczkowe. Ostatnim, trzecim, etapem procesu zagęszczania jest stabilizacja. W tym etapie ciśnienie zmniejsza swoją wartość, a materiał, który jest zagęszczany rozpręża się, czyli następuje niewielki wzrost jego objętości. Przebieg takiego procesu przedstawia rysunek nr 4:

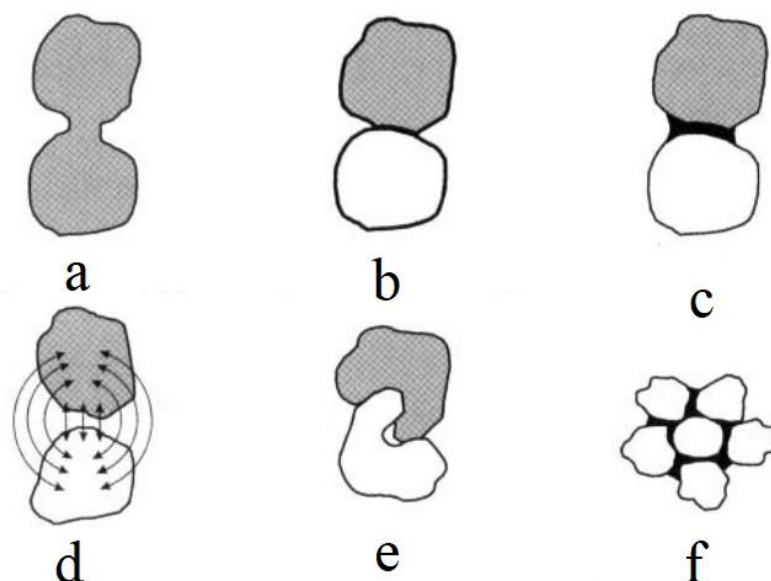


Rysunek 4. Schemat zagęszczania cząsteczek

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Pietsch 2001 (Pietsch, 2001)

2.5 Połączenia międzycząsteczkowe i czynniki na nie wpływające

Podczas procesu zagęszczania, w obecności ciśnienia oraz temperatury, cząsteczki materiału napierają na siebie tworząc interakcje (Anglès i in., 2001). Jest to o tyle istotne, ponieważ w wyniku tych interakcji wytwarzają się połączenia międzycząsteczkowe, które mają bezpośredni wpływ na wytrzymałość mechaniczną zgranulowanego materiału. Połączenia mogą powstać na skutek obecności temperatury (zmiękczenie materiału i aktywacja naturalnych substancji spajających) (Bika i in., 2005), odpowiedniej wilgotności materiału. Potwierdzili to Kaliyan wraz z Moreyem w swoich badaniach (Kaliyan i Morey, 2010) jak również wielu innych. Pietsch (Pietsch, 2001) w swojej obszernej pracy dokładnie omawiającej proces zagęszczania oraz wszystkie jego składowe, opisał rodzaje połączeń międzycząsteczkowych, które mogą powstać w skutek procesu zagęszczania. Typy tych połączeń przedstawione zostały na rysunku 5.



Rysunek 5. Typy połączeń międzycząsteczkowych: a - częściowe topnienie, b - reakcje chemiczne, c - mostki ciekłe, d - siły molekularne, e - blokowanie cząsteczek, f - siły kapilarne

Źródło: Pietch 2001 (Pietsch, 2001)

Występowanie takich połączeń potwierdzili Kaliyan oraz Morey (Kaliyan i Morey, 2009a), ich obecność oraz wpływ innych czynników mogą pozytywnie wpływać na wytrzymałość i trwałość uzyskiwanych granulatów. Wyniki tych badań i znajomość występujących połączeń międzycząsteczkowych pozwalają na zaplanowanie procesu produkcyjnego jak i późniejszą jego optymalizację (Kaliyan i Morey, 2009b)

2.6. Czynniki wpływające na proces zagęszczania ciśnieniowego

Czynniki, które mają bezpośredni wpływ na proces zagęszczania można podzielić na trzy grupy parametrów: parametry materiałowe (typ biomasy, wielkość frakcji, skład chemiczny itd.), parametry technologiczne (wilgotność, temperatura, ciśnienie, szybkość zagęszczania, czas itd.) oraz parametry strukturalne systemu (geometria komory zagęszczającej, stopień sprężu) (Križan, Šooš, i in., 2015). Jak powszechnie wiadomo, materiały charakteryzują się różnymi właściwościami, które należy uwzględnić podczas procesu zagęszczania, co sugeruje, że materiały te będą zagęszczały się w zróżnicowany sposób. Aby określić odpowiednie warunki oraz parametry zagęszczania dla danego surowca, należy wykonać badania podstawowe, które będą stanowiły bazę do kolejnych bardziej szczegółowych badań.

Wytrzymałość mechaniczna oraz stopień zagęszczenia wyprodukowanego granulatu jest zależna od wielu istotnych czynników towarzyszących procesowi zagęszczania takich jak: naciski zagęszczające, prędkość narastania nacisków zagęszczających, naciski boczne,

współczynnik tarcia, współczynnik sprężu, geometria matrycy oraz tłoka, temperatura w jakiej odbywa się proces, obecność lepiszczy, wstępne podgrzewanie biomasy (Kaliyan i Morey, 2009c; Skonecki, 2004; Tumuluru, Wright, i in., 2010).

2.6.1 Ciśnienie

Podstawowym i sprawczym czynnikiem procesu jest ciśnienie wywierane na zagęszczany w komorze materiał. Bez tego czynnika proces nie może być realizowany. Wpływ ciśnienia na jakość biopaliw stałych jest badana przez wielu naukowców (Hejft, 2002; Križan, Matúš, i in., 2015; Kulig i Laskowski, 2011; Li, Liu, 2000; Rhén i in., 2005b; Stelte i in., 2011; Wrobel i in., 2018). Wykazano, że jest to jeden z ważniejszych i w głównej mierze wpływających na jakość paliw kompaktowanych czynników. Ciśnienie w połączeniu z odpowiednią temperaturą procesu oraz wilgotnością materiału potrafi w dużym stopniu zredukować koszt produkcji biopaliw. To dzięki ciśnieniu istnieje możliwość redukcji objętości na rzecz wzrostu gęstości produktu finalnego.

Należy jednak pamiętać, że ciśnienie będzie inaczej oddziaływało na poszczególne materiały, dlatego warto do każdego z nich podejść indywidualnie, określając krzywe zagęszczania, z których możliwe będzie odczytanie właściwych wartości ciśnienia potrzebne do właściwego zagęszczenia materiału.

Zbyt niskie wartości ciśnienia podczas procesu zagęszczania mogą skutkować niskim stopniem zagęszczenia, co za tym idzie niską wytrzymałością mechaniczną granulatu oraz gęstością. Powodem będzie niska redukcja przestrzeni międzycząsteczkowych oraz niewielka powierzchnia kontaktowa cząsteczek. Duże upakowanie cząsteczek sprzyja również powstawaniu wiązań i połączeń międzycząsteczkowych.

Wysokie wartości ciśnienia w dużym stopniu ułatwiają proces zagęszczania ciśnieniowego, natomiast zbyt duże wartości mogą spowodować uszkodzenia matryc pelecarki np. pęknięcia.

Rahaman (Rahaman i Salam, 2017) w swoich badaniach wykazał, że dla zagęszczenia trawy ryżowej z dodatkiem trocin, jako lepiszcza, wystarczy ciśnienie 34,5 MPa, aby uzyskać brykiet o zadowalającej jakości. Z kolei w badaniach Križana (Križan, 2007) określono ciśnienie niezbędne dla uzyskania dobrej jakości brykietów z biomasy drzewnej przy użyciu niskiej temperatury całej produkcji. Wykazano, że przy niższych temperaturach kompaktowania biomasy potrzebne jest wyższe ciśnienie i wynosiło ono 286 MPa. Kulig wraz z zespołem (Kulig i in., 2014) stwierdzili, że zwiększenie ciśnienia aglomeracji materiału w przedziale 45-96 MPa skutkuje zwiększeniem gęstości produkowanych granul przeciętnie o 26% natomiast rozpręż biopaliwa wzrasta o około 51%. Zauważono również, że wraz ze

wzrostem ciśnienia zwiększyła się wytrzymałość mechaniczna otrzymanych aglomeratów (średnio 83%). Dalsze zwiększanie ciśnienia tłoczenia nie przynosi istotnych statystycznie zmian w jakości produktu w przypadku zagęszczania topinamburu oraz mozgi trzciny. W przypadku karagany Korszyńskiego określono, że proces zagęszczania należy przeprowadzić przy ciśnieniu 50-110 MPa, aby produkt końcowy był dobrej jakości (Zhang i Guo, 2014).

2.6.3 Wilgotność

Zawartość wody w materiale badanym może mieć zarówno pozytywny jak i negatywny wpływ na wytrzymałość mechaniczną peletów. Jej obecność pozwala na interakcje spoiw/lepiszcz naturalnych wraz z cząsteczkami co finalnie może dawać korzystny lub niekorzystny efekt, powodujący większą lub niższą trwałość produktu procesu zagęszczania ciśnieniowego.

W przypadku dębu, sosny oraz topoli wykazano, że zbyt niska wilgotność może skutkować osypywaniem się granulatu, jego niską wytrzymałością. Jest to spowodowane tym, że granulaty o niskiej wilgotności na skutek absorpcji wody z powietrza stają się kruche i mniej stabilne (Li, 2000). W przypadku sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* L. najbardziej korzystnym przedziałem okazał się 11 - 13% zawartości wody (Samuelsson i in., 2012).

Jednakże stwierdzono również, że obecność wilgotności w biomacie ma pozytywny wpływ na wzrost sił van der Waalsa (Mani i in., 2003). Zauważono, że brykiety o wilgotności w przedziale 5 – 10% charakteryzują się większą wytrzymałością mechaniczną, gęstością oraz stabilnością.

Skonecki i Kulig (Skonecki, Kulig, 2011) w swoich badaniach dowiedli, że wzrost wilgotności materiału (słoma pszenna, wierzba wiciowa) od 10 do 18% wywołuje zwiększenie maksymalnej gęstości surowca w komorze zagęszczającej, zmniejszenie gęstości aglomeratu, polepszenie podatności materiału na zagęszczanie oraz zwiększenie rozprężenia aglomeratu, co powoduje spadek wytrzymałości mechanicznej aglomeratu.

Optymalne warunki produkcji biopaliw z biomasy celulozowej pod kątem wilgotności surowca uważane są za przedziały 8–12% w zależności od gatunku (Shahab Sokhansanj i in., 2005; Styks i in., 2020). Stwierdzono również, że niższa zawartość wilgoci skutkuje wyższą gęstością produktu finalnego procesu zagęszczania (Shaw, Tabil, 2007; Styks i in., 2020).

2.6.4 Temperatura procesu zagęszczania

Surowiec poddawany ciśnieniowej aglomeracji musi być poddany szeregowi procesów, które umożliwią jego dalsze przetwarzanie. Takie wstępne przygotowanie biomasy może mieć istotny wpływ na skład chemiczny oraz właściwości mechaniczne materiału wsadowego, które

to mogą poprawić jakość finalnego produktu (Bhattacharya i in., 1989; Tumuluru, Wright, i in., 2010).

Podczas zagęszczania ciśnieniowego biomasy, na skutek tarcia, dochodzi do wzrostu temperatury. Może być ona również podniesiona za pomocą dodatkowego systemu zintegrowanego z instalacją zagęszczającą materiał. Temperatura jest jednym z ważniejszych czynników, które mają istotny wpływ na parametry jakościowe tj. trwałość oraz gęstość zagęszczonej biomasy (peletów). Powszechnie dostępna literatura wskazuje znaczący, często pozytywny wpływ temperatury na proces zagęszczania biomasy (Obidziński i Hejft, 2012). Zwykle zestawiana jest wraz z pozostałymi czynnikami jako czynnik, którego obecność jest aktywatorem naturalnych, zawartych w roślinach lepiszcz (żywice, ligniny) (Zabava i in., 2018).

Z dostępnych źródeł dowiadujemy się, że przy odpowiedniej temperaturze procesu zagęszczania można stosować materiał o większej zawartości wody oraz niższym ciśnieniu co pozwala na oszczędność energii prowadzenia procesu (Carone i in., 2011). Todaro i inni (Todaro i in., 2015) w swoich badaniach wykazali, że drewno poddane obróbce termicznej charakteryzuje się wyższą wartością opałową. Z kolei Rhen (Rhén i in., 2005b) wraz z zespołem wykazali, że najlepszymi warunkami do procesu zagęszczania próbki pochodzącej ze świerka norweskiego są niska zawartość wody w próbce oraz wysoka temperatura procesu aglomeracji ciśnieniowej. Hall i Hall (1968) w swoich badaniach dowiedli, że dla konkretnej wilgotności zagęszczanego materiału, można zmniejszyć ciśnienie zagęszczania lucerny oraz trawy bermudzkiej stosując odpowiednio wysoką temperaturę. Ponadto, dzięki temperaturze istnieje możliwość aglomeracji surowca o wyższej wilgotności wciąż otrzymując odpowiednią gęstość granulatu. Smith i inni (Smith i in., 1977) zauważyli w swoich badaniach dotyczących brykietowania słomy pszenicznej, że dzięki wzrostowi temperatury z 60 do 140°C wzrósł stopień zagęszczenia materiału oraz późniejsza stabilność brykietów. Stwierdzono również zmniejszenie występowania zjawiska rozprężu. Tabil (Tabil, 2022) zaobserwował wzrost trwałości peletów, które powstały z lucerny, po dodaniu do procesu zagęszczania czynnika temperatury powyżej 90°C. Z kolei Kalian oraz Morey (Kaliyan i Morey, 2006) w swych badaniach wykorzystali temperaturę zeszklenia ligniny, w celu lepszego rozpoznania zachowania cząstek pod jej wpływem. Zaobserwowali, że w temperaturze 75 oraz 100°C, a więc w obrębie temperatury zeszklenia, wyniki były wyższe, niż przy temperaturze 150°C tj. znacznie wykraczającej poza wcześniej opisany zakres.

2.6.5 Lepiszcz

Rośliny w swoich komórkach zawierają wiele zróżnicowanych substancji, które w różnych proporcjach nadają roślinom charakterystyczne dla danego gatunku właściwości.

Substancje te mogą mieć znaczący wpływ na parametry fizyko-mechaniczne przetworzonej biomasy pochodzącej z tychże roślin. Będzie można go zaobserwować między innymi podczas procesu zagęszczania, gdzie występowanie naturalnych spoiw, jakimi są lignina czy żywice, znacząco wpływają na produkt finalny, jakim są pelety czy też brykiet. Lepszcza te aktywowane są zwykle temperaturą, ale na ich działanie mają wpływ również inne czynniki takie jak wilgotność czy ciśnienie zagęszczania (Kulig i in., 2013). Jak już wspomniano najważniejszymi naturalnymi lepszczami są:

Lignina – obok celulozy oraz hemicelulozy jeden z głównych składników drewna, w którym jej udział wynosi około 20% (Lautenschläger i in., 2007). Jest substancją o właściwościach lepkich, powodujących zwartość budowy komórek drewna. Jej zawartość powoduje sztywność oraz wytrzymałość mechaniczną na ściskanie.

Żywice – substancja produkowana w roślinach, w szczególności w drzewach, zwłaszcza iglastych (Malinowski, 1966). Żywice są nierozpuszczalnymi w wodzie, bezpostaciowymi lub częściowo krystalicznymi mieszaninami nielotnych związków organicznych, głównie terpenoidów (kwasy żywiczne i ich pochodne) oraz związków fenolowych (kwasów fenolowych, fenoli) (Szweykowska Szweykowski, 2003).

2.6.6 Szybkość procesu

Naukowcy badają również prędkość przeprowadzanego procesu ciśnieniowej aglomeracji (Dołżyńska i in., 2020a; Gageanu i in., 2021a; Obidziński i in., 2020b; Szyszlak-Bargłowicz i in., 2021b). Wynika to z tego, że dłuższy czas przebywania materiału w komorze zagęszczającej umożliwia powstanie trwalszych wiązań między cząsteczkami materiału kompaktowanego, które będą charakteryzowały się większą wytrzymałością mechaniczną. Z kolei zbyt krótki czas procesu zagęszczania może skutkować powstaniem granuli o niskiej trwałości co jest związane z zbyt krótkim czasem, w którym cząsteczki mogą się wzajemnie wiązać.

Prędkość, z jaką obraca się matryca pelecarki ma również wpływ na zużycie energetyczne. Im obroty są wyższe, tym jest większy pobór energii elektrycznej (Dołżyńska i in., 2020b).

2.6.7 Wielkość frakcji

Rozmiar cząstek materiału zagęszczanego jest jednym z ważniejszych czynników, które wpływają bezpośrednio na parametry jakościowe granulatu. Jest to spowodowane tym, że w trakcie trwania procesu ciśnieniowej aglomeracji materiału mniejsze rozmiarowo cząsteczki charakteryzują się większą powierzchnią styku. Spowodowane jest to tym, że redukując

wielkość cząstek redukujemy również wolne przestrzenie między cząsteczkami, co ułatwia upakowanie cząsteczek a co za tym idzie zwiększenie powierzchni kontaktowej (Kaliyan i Morey, 2009c; Taulbee i in., 2009; Tumuluru i in., 2011; Tumuluru, Wright, i in., 2010; Wróbel, 2019).

Co więcej, redukcja wielkości cząstek może istotnie wpływać na wyższą wydajność procesu zagęszczania materiału oraz mniejsze zużycie energii podczas procesu aglomeracji (Kirsten i in., 2016). Zauważono również, że redukcja wielkości cząstek materiału zwiększa gęstość peletów oraz ich wytrzymałość mechaniczną. Zaobserwowano również, że granule charakteryzowały się niską higroskopijnością i wysoką odpornością na okruszanie co jest atutem podczas cykli transportowych czy magazynowych (Setter i in., 2021; Wang i in., 2018).

Badania prowadzone przez MacBaina oraz Payna (Tumuluru, Wright, i in., 2010) wykazały, że mniejsze cząstki materiału mają znaczny wpływ na wzrost wydajności procesu zagęszczania wraz z obniżeniem kosztów tego procesu. Stwierdzono również, że średnie oraz małe cząstki są tymi najbardziej pożądanymi podczas granulacji, ponieważ łatwiej oddają się działaniu pary wodnej w trakcie trwania procesu kondycjonowania, co skutkuje lepszą żaletynizacją skrobi. Z kolei najmniejsza frakcja może powodować zapychanie się matryc co będzie negatywnie wpływało na proces zagęszczania. Doświadczenie opisane przez Hilla i Pulkinena (Tumuluru i in., 2011; Tumuluru, Wright, i in., 2010) pokazało, że zwiększenie wielkości cząstek podczas peletowania lucerny z 2,8 mm do 6,4 mm skutkuje pogorszeniem wytrzymałości mechanicznej na poziomie 15%. Autorzy twierdzą, że ujednoczenie rozmiaru cząstek oraz wytrzymałości mechanicznej peletów powinna korespondować z energią niezbędną do przetwarzania biomasy. Z kolei badania Kronbergsa (Kronbergs, 2000), które dotyczyły brykietowania słomy wykazały, że zmniejszenie cząstek materiału z 20 mm do 1,5 mm skutkowało wzrostem gęstości brykietu aż o 25%.

Wpływ rozmiaru cząstek na wytrzymałość mechaniczną peletów ze słomy pochodzącej z pszenicy, kukurydzy czy jęczmienia również został zauważony przez Maniego i in. (Mani i in., 2006). Powiązано również właściwości wiążące materiału z rozmiarem cząstek. Peleg wraz z Mannheim (Peleg i Mannheim, 1973) zauważają, że mniejsze cząstki mając większą powierzchnię styku cechują się większą energią wiązań w odniesieniu do jednostki masy. Zatem zagęszczanie odpowiednio przetworzonej biomasy o dużej gęstości usypowej daje możliwość uzyskania granulatu charakteryzującego się wyższą gęstością. Jest to powiązane z redukcją wolnej przestrzeni między cząstkami a dokładnie ilością zredukowanego powietrza. Obidziński (Obidziński, 2005) podaje, że wiązanie cząstek o dużej gęstości usypowej następuje w obecności niższego ciśnienia procesu zagęszczania. Im wyższa jest gęstość usypowa kompaktowanego materiału tym niższe jest zapotrzebowanie na energię.

2.6.8 Współczynnik tarcia

Wpływ współczynnika tarcia na proces zagęszczania oraz jakość granulatu powstałego w jego skutek jest badany w wielu ośrodkach badawczych dla różnych materiałów (Frączek i Wróbel, 2003; Kabas i Ozmerzi, 2009; Kalkan i Kara, 2011; Koval'chenko, 1975; Markowski i in., 2013; Sologubik i in., 2013; Wójcik i in., 2019, 2020) Autorzy zgodnie wykazują istotny wpływ tego czynnika na energochłonność procesu kompaktowania. Wyniki otrzymane z analiz dotyczących właściwości fizycznych surowca zagęszczanego mają kluczowe znaczenie dla projektowania linii produkcyjnych, przetwórczych czy zagęszczających.

Koval'chenko w swojej pracy przeprowadził serię badań dla newtonowskich i nienewtonowskich porowatych ciał stałych zagęszczanych w obecności temperatury. Wykazał, że tarcie zewnętrzne (pomiędzy materiałem a ścianką matrycy) powoduje nierównomierny przepływ materiału zagęszczanego (Koval'chenko, 1975). W tej samej pracy stwierdził również, że redukcja współczynnika tarcia zewnętrznego korzystnie wpływa na prędkość procesu aglomeracji, dając możliwość otrzymania zwiększonej oraz bardziej jednorodnej gęstości wraz z polepszonymi właściwościami fizyko-mechanicznymi zagęszczanych półfabrykatów oraz komponentach. Sologubik i inni (Sologubik i in., 2013) w badaniach określili właściwości fizyczne dla dwóch odmian ziaren jęczmienia o wilgotności mieszczącej się w zakresie 10,12 do 42,17%. Wraz z zawartością wody zmieniały się: wymiary, objętość, masa jednostkowa, kulistość, kąt usypu oraz współczynnik tarcia. Do podobnych wniosków doszła Markowska w swoich badaniach (Markowska i in., 2016). Praca wykazała wpływ zawartości wody w ziarnach na ich właściwości fizyczne – w tym tarcia. Wraz ze wzrostem wilgotności zaobserwowano wzrost współczynnika tarcia. Podobnymi obserwacjami podzielili się Wójcik i inni (Wójcik i in., 2019) w badaniach dotyczących zgranulowanych materiałów roślinnych. Kabas i Ozmerzi (Kabas i Ozmerzi, 2009) jako materiał badany przyjęli opuncję figową *Opuntia ficus india* L. i określili statyczne oraz dynamiczne współczynniki tarcia dla jej dwóch odmian. Jako punkt odniesienia przyjęto cztery różne powierzchnie: stal ocynkowaną, gumę, sklejkę oraz papier. Badania wykazały, że zarówno prędkość jak i powierzchnia cierna nie wpływały w podobny sposób na obie odmiany opuncji.

2.6.9 Geometria matrycy

Mówiąc o geometrii matrycy zwykle bierze się pod uwagę rozmiar oraz typ matrycy (płaska lub pierścieniowa). Należy jednak dodać kolejne wymiary takie jak: średnica wejściowa kanału zagęszczającego, wysokość stożka zagęszczającego, kąt rozwarcia stożka zagęszczającego w kanale zagęszczającym, średnica kanału zagęszczającego czy długość kanału zagęszczającego, która nie oznacza grubości matrycy, ponieważ może być od niej

mniejsza. W takim przypadku zwykle mamy dodatkowo kanał rozprężający ułatwiający granulowaniu opuszczenie kanału zagęszczającego.

Wyżej wymienione wymiary mają istotny wpływ na ilość materiału, która może być w danej chwili granulowana, ale również na siłę jaka będzie towarzyszyła temu procesowi. Wpływają również na jakość otrzymywanego finalnie peletu.

Stożek zagęszczający to pierwszy odcinek, jaki musi pokonać materiał zagęszczany w systemie zagęszczającym. Jak nazwa wskazuje ma on kształt stożka, który jest skrócony na odpowiedniej długości i przechodzi w cylindryczny kanał zagęszczający. Stożki również mogą mieć różną geometrię, począwszy od wysokości, średnicy wlotowej oraz wylotowej po kąt rozwarcia. Obecnie niewielu autorów prowadzi badania na temat wpływu konkretnego kąta na proces zagęszczania. Dostępne są nieliczne i w dużej mierze ogólne informacje. Nielsen w badaniach poświęconych zagęszczaniu biomasy drzewnej (Nielsen i in., 2009) przy użyciu matrycy o kącie rozwarcia stożków zagęszczających 60° sprawdzał zużycie energii w czasie procesu aglomeracji. Okazało się, że 74% zużycia całej energii procesu zagęszczania zostało zużyte przez „elementy przepływowe” w czasie aglomeracji buka oraz 66% w przypadku kompaktowania sosny. Badania nad wpływem geometrii komory zagęszczającej prowadził również Križan (Križan, 2022) dla biomasy drzewnej. Obiektem jego badań był wpływ kanałów zagęszczających o kącie 2° ; 4° ; 6° ; 10° ; 14° . Jego badania skupiły się głównie na optymalizacji geometrii, a wynikiem jego analiz było określenie stosunku powierzchni kontaktu materiału do objętości komory zagęszczającej. Wraz ze zmianą stożka zagęszczającego stosunek ten się zmienia. Winter (Winter, 1981) w swoich badaniach jako materiał badawczy wybrał RDF. Badał wpływ kątów 0° ; 4° ; 14° ; 28° na produkcję pojedynczych granul. Otrzymane wyniki wskazują, że kątowi 28° towarzyszyło najniższe ciśnienie zagęszczania, a wyprodukowany pelet był najlepszej jakości wśród wszystkich wariantów. Kryterium jakościowym była odporność na pękanie. Mišljenović i inni (Mišljenović i in., 2016) peletowali słomę pszenną za pomocą stanowiska pojedynczego, ale również w skali pilotażowej przy użyciu płaskiej matrycy ze stożkiem zagęszczającym o kącie rozwarcia $37,6^\circ$. Ich doświadczenie wykazało, że większą wytrzymałością mechaniczną charakteryzowały się pelety wytłoczone za pomocą stanowiska do produkcji pojedynczych granul. Hu wraz z zespołem (Hu i in., 2012) badali zużycie energii podczas zagęszczania trawy ryżowej przy użyciu pięciu kątów w zakresie $\alpha = 29,5^\circ - 60,5^\circ$. Najniższe zużycie energii osiągnięto stosując kąt $\alpha = 60,5^\circ$. Wu i inni (Wu i in., 2011) przeprowadzili symulację procesu zagęszczania dla kątów α mieszczących się w zakresie $\alpha = 15^\circ - 120^\circ$. Stwierdzili oni, że malejące wartości kąta α obniżały siłę granulowania, a tym samym tarcie.

Stosunek długości otworu kanału zagęszczającego do jego średnicy (L/D), zwany również współczynnikiem sprężu, może przyjmować wartości z przedziału 4 do 7,5. Jego wartość koniecznie trzeba dobrać do materiału peletowanego, ponieważ materiały wyróżniają się swoją indywidualną charakterystyką (<http://pelet.atlibron.com/>, 2023).

Zwiększając długość kanału zagęszczającego możemy spodziewać się wzrostu ciśnienia peletowania, jeśli jednocześnie zwiększymy średnicę kanału, możemy zaobserwować spadek siły potrzebnej do przemieszczenia materiału przez kanał. Biorąc pod uwagę tę obserwację, można stwierdzić, że geometria matrycy pelecarki ma również istotny wpływ na warunki pracy systemu technicznego (Holm i in., 2006). Heffner i Pfof (Heffner i Pfof, 2012) sprawdzili w trzech wariantach geometrycznych wpływ geometrii matryc na wytrzymałość mechaniczną peletów. Z badań wynika, że największą wytrzymałością na okruszanie charakteryzowały się granule wytworzone na matrycy o najkrótszej długości.

Doświadczenia Butlera i McColly (Butler McColly, 1958) dowiodły, że przy stałej dawce materiału i określonym ciśnieniu wytwarzania, gęstość oraz długość granulki były większe dla mniejszych komór zagęszczających. Tumuluru i inni (Tumuluru i Sokhansanj, i in., 2010) porównali ze sobą wyniki otrzymane z zagęszczania biomasy na matrycy o średnicy otworów 7,2 mm oraz 6,4 mm. Potwierdzono, że pelety wytworzone na matrycach o większej średnicy otworów charakteryzowały się mniejszą wytrzymałością mechaniczną. Hill i Pulkinen (Hill i Pulkinen, 1988) w swoich badaniach określili, że najwyższą trwałość przypisano aglomeratowi z lucerny wytłoczonemu przez matrycę o współczynniku sprężu na poziomie 8 - 10.

2.7 Modele zagęszczania

Przegląd literatury wykazał, że trwają prace badawcze nad określaniem modeli zagęszczania dla różnych materiałów pochodzenia roślinnego. Model zagęszczania dla biomasy pozyskanej z rdzenia kokosowego opracowany został przez Viswanathana i Gothandapani (Viswanathan i Gothandapani, 1999) i opisuje on zmianę gęstości upakowania na skutek przyłożonego ciśnienia. Ferrero i inni (Ferrero i in., 1991), Faborode i O'Callaghan (Faborode i O'Callaghan, 1989) oraz Butler wraz z McColly (Butler, 1958) opisali model zagęszczania dla słomy, również parametrami determinującymi model ustanowili zmianę gęstości w odniesieniu do ciśnienia. O'Dogherty i Wheeler (O'Dogherty, Wheeler, 1984) jako materiał badawczy wybrali trawy włókniste a ich model również odnosi się do wywołanej ciśnieniem zmiany gęstości materiału zagęszczanego. Walker (Walker, 1923), Kawakita, Lüdde (Kawakita Lüdde, 1971), Shapiro (Shapiro, 1993) oraz Jones (Jones, 1960) z kolei opracował model matematyczny zagęszczania proszków i również jako składowe użył ciśnienia oraz gęstości. Bilanski i inni (Watts i Bilanski, 1991; Bilanski i in., 1985) oraz Afzalnia

(Afzalinia i Roberge, 2013) zajęli się modelowaniem procesu zagęszczania lucerny co również opisał jako zmianę gęstości w skutek oddziaływania ciśnienia.

Wszystkie modele matematycznie opisują proces zagęszczania materiału, gdzie głównymi elementami równania są ciśnienie oraz gęstość danego materiału. Przykłady modeli procesu zagęszczania przedstawiono w tabeli 3. Żaden z modeli nie podejmuje tematu zmiany geometrii kanału zagęszczającego, w którym kompaktowany jest materiał. Żaden też nie mówi co z wytrzymałością aglomeratu a to ona jest, oprócz gęstości, parametrem jakościowym najważniejszym zależnym właśnie od procesu aglomeracji.

Tabela 3
Modele matematyczne procesu zagęszczania

Model matematyczny	Oznaczenia	Autor	Materiał
$P = C_{29} + C_{30}\rho + C_{31}\rho^2$	P - ciśnienie kPa c - wartości stałe ρ - Gęstość upakowania kompaktu $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Viswanathan i Gothandapani 1999	Rdzeń kokosowy
$\rho = \rho_0 + (C_{26} + C_{27}P)(1 - e^{-C_{28}P})$	P - ciśnienie kPa c - wartości stałe ρ - Gęstość upakowania kompaktu $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ρ_0 - Gęstość początkowa materiału $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Ferrero 1991	Słoma
$P = C_{20}\rho^{C_{21}}$ Jeśli $\rho < 400\text{kg} * \text{m}^{-3}$ $P = C_{22}\ln\rho^{C_{23}}$ Jeśli $\rho > 400\text{kn} * \text{m}^{-3}$	P - ciśnienie kPa c - wartości stałe ρ - Gęstość upakowania kompaktu $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	O'Dogherty i Wheeler 1989	Trawy włókniste
$P = C_3\rho^{C_4}$ $P = C_5(\rho^{C_6} - \rho_0^{C_7})$ $P = C_8(\rho - \rho_0)^{C_9}$	P - ciśnienie kPa c - wartości stałe ρ - Gęstość upakowania kompaktu $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ρ_0 - Gęstość początkowa materiału $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Mewes 1959 Spencer Heckel 1950; 1961	Słoma Rozdrobniona biomasa
$\ln\left(\frac{1}{1 * \rho_f}\right) = C_{10}P + C_{11}$	P - ciśnienie kPa c - wartości stałe ρ - Gęstość upakowania kompaktu $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ρ_0 - Gęstość początkowa materiału $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Faborode O'Callaghan 1989	Słoma
$P = \frac{C_{24}\rho_0}{C_{25}} e^{\left(C_{25}\left(\left(\frac{P}{\rho_0}\right)-1\right)-1\right)}$	V_r - stosunek objętości materiału. p - ciśnienie zagęszczania, kPa. V - objętość materiału zagęszczonego w m^3 przy ciśnieniu p . V_s - objętość właściwa materiału stałego, m^3 . a, b - wartości stałe.	Walker 1923	Proszek, węgiel wapniowy

$\rho = k_1 \ln\left(\frac{p}{k_2}\right)$	ρ – gęstość materiału zagęszczonego przy ciśnieniu p , $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. p – ciśnienie zagęszczania, kPa k_1, k_2 – wartości stałe.	Butler, McColly 1959	Słoma
$\ln \rho = a \ln p + b$	ρ – gęstość zagęszczonego materiału przy ciśnieniu p , $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. p – ciśnienie zagęszczania, kPa. a, b , – wartości stałe.	Jones 1960	Proszki
$\frac{V_0 - V}{V_0 - V_s} = C_{14} e^{-\frac{C_{15}}{P}} + C_{16} e^{-\frac{C_{17}}{P}}$	V – objętość zagęszczonego materiału przy ciśnieniu p , m^3 . V_0 – objętość materiału przy zerowym ciśnieniu, m^3 . V_s – objętość właściwa materiału stałego, m^3 . p – ciśnienie zagęszczania, kPa. a_1, a_2, k_1, k_2 – wartości stałe.	Cooper, Eaton 1962	Biomasa
$\frac{V_0 - V}{V_0} = \frac{C_{18} C_{19} P}{1 + C_{19} P}$	C – stopień zmniejszenia objętości lub odkształcenielińiowe. V – objętość zagęszczonego materiału przy ciśnieniu p , m^3 . V_0 – objętość materiału przy zerowym ciśnieniu, m^3 . p – ciśnienie zagęszczania, kPa. a, b – wartości stałe.	Kawakita, Lüdde 1971	Proszki miękkie i puszyste
$\frac{V_0 - V}{V_0} = \frac{C_{18} C_{19} P}{1 + C_{19} P}$	V_0 – objętość materiału przy zerowym ciśnieniu, m^3 . p – ciśnienie zagęszczania, kPa. a, b – wartości stałe.		
$\frac{\rho_{max} - \rho}{\rho_{max} - \rho_0} = e^{(-\rho/K)}$	ρ – gęstość materiału zagęszczonego przy ciśnieniu p , $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. ρ_{max} – gęstość maksymalna, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; ρ_0 – gęstość początkowa, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. p – ciśnienie zagęszczania, kPa. K – sztywność cząstek, kPa; λ – wartość stała.	Bilanski i in. 1985	Trawy
$\rho = K_1 \log[1 - K_2(\rho - \rho_0)]$	ρ – gęstość materiału zagęszczonego przy ciśnieniu p , $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. ρ_0 – gęstość początkowa materiału, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. p – ciśnienie zagęszczania, kPa. K_1, K_2 , – wartości stałe.	Watts, Bilanski 1991	Lucerna
$\ln \varepsilon = \ln \varepsilon_0 - kp - bp^{0.5}$	ε – porowatość zagęszczonego materiału; ε_0 – porowatość początkowa materiału niezagęszczonego. p – ciśnienie zagęszczania, kPa. k, b – wartości stałe	Shapiro 1993	
$\rho = \rho_0 + (A_0 + B_0 p + C p^2)(1 - e^{-D_0 p})$	ρ – gęstość materiału zagęszczonego przy ciśnieniu p , $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. p – ciśnienie zagęszczania, kPa. ρ_0 – gęstość początkowa materiału, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. A_0, B_0, C, D_0 , – wartości stałe.	Afzalinia 2005	lucerna, słoma pszenicy, zielony jęczmień
$\ln \frac{1}{1 - \rho_f} = mp + n\rho_f$ $= \frac{\rho}{\rho_1 X_1 + \rho_2 X_2}$	ρ_f – gęstość układu upakowania lub gęstość względna materiału po reorganizacji cząstek; p – zastosowane ciśnienie, kPa. m, n – wartości stałe.	Henkel 1961	Proszki

$\ln \frac{1}{1 - \rho_f} = m\sqrt{p + n}$	<p>ρ – gęstość objętościowa mieszaniny zagęszczonego proszku, kgm^{-3}.</p> <p>ρ_1, ρ_2 – gęstość cząstek składników mieszaniny, kgm^{-3}.</p> <p>X_1, X_2 – udział masowy składników mieszaniny.</p>	<p>Panelli, Filio 2001</p>
$\rho_f = \frac{\rho}{\rho_1 X_1 + \rho_2 X_2}$		

Źródło: własne na podstawie Świętochowski 2013 (Świętochowski, 2013)

Jak już wspomniano pelet musi mieć odpowiednie parametry energetyczne, ale to zapewnia odpowiedni surowiec a nie proces zagęszczania. Od procesu natomiast, wymaga się by doprowadził surowiec do odpowiedniej gęstości *DE* (i głównie to opisują modele matematyczne procesu zagęszczania). Przede wszystkim proces ma spowodować powstanie aglomeratu odpornego na procesy jego degradacji zachodzące w trakcie składowania i transportu. Inaczej mówiąc pelet musi mieć wysoką odporność na okruszanie, czyli być wytrzymały mechanicznie. Bo to zapewnia, że kształt nadany w miejscu produkcji zostanie utrzymany na etapach dystrybucji, aż do momentu podania do komory spalania. Wytrzymałość mechaniczna *DU* zapobiega okruszaniu, pyleniu i niedogodnościom z tym związanym. Z punktu widzenia klienta, *DU* jest parametrem ważniejszym niż *DE*. Spadek *DE* zwiększa tylko objętość paliwa, natomiast spadek *DU*, powoduje całe mnóstwo problemów związanych z pojawieniem się frakcji pylistej w złożu peletu.

Wymogi jakościowe jakie musi spełnić pelet opałowy wytworzony z biomasy zawarte są w normach (PN-EN ISO 17225-2:2021-10) (pelet drzewny) i (PN-EN ISO 17225-6:2021-12) (pelet nie drzewny).

Dla peletu drzewnego norma przewiduje trzy klasy jakości A1, A2 oraz B. Niezależnie od klasy, gęstość usypowa peletu powinna wynosić co najmniej $600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ i nie przekroczyć $750 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Natomiast w przypadku *DU*, klasa A1 wymaga wartości tego parametru co najmniej 98% dla peletu 6 mm i 97,5% dla peletu 8 mm, A2 to *DU* co najmniej 97,5% niezależnie od średnicy, a klasa B to *DU* co najmniej 96,5% również niezależnie od średnicy. W przypadku peletu nie drzewnego mamy dwie klasy jakości A i B. Klasa A wymaga peletu o gęstości usypowej co najmniej $600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ i wytrzymałości mechanicznej co najmniej 97,5%. W przypadku klasy B pelet powinien mieć gęstość usypową na poziomie $550 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, a wytrzymałość mechaniczną na poziomie 96%.

W trakcie procesu nie wystarczy zatem odpowiednio upakować cząstki materiału by uzyskać wymaganą gęstość, ale jeszcze należy aktywować na tyle mocno mechanizmy wiążące te cząstki, by uzyskać wymaganą wytrzymałość. Nastąpić to musi w komorze zagęszczania matrycy peletarki, a odpowiada za to geometria tej komory. Nadal jednak kwestią otwartą jest to, jaka ta geometria ma być w zależności od zagęszczanego materiału bo uniwersalnego rozwiązania nie ma.

3. Cel

Przeprowadzony przegląd literatury wykazał, że w przypadku wielu materiałów znane są specyficzne parametry pozwalające na uzyskanie dobrego jakościowo biopaliwa kompaktowanego (brykiet, pelet). Parametry o jakich mowa to wilgotność materiału, skład frakcyjny zagęszczanej mieszanki oraz wielkość cząstek, gęstość właściwa oraz nasypowa materiału, ale również parametry, które wynikają bezpośrednio z zaplanowanego procesu technologicznego ciśnieniowego zagęszczania biomasy tj. ciśnienie i temperatura zagęszczania, prędkość prowadzenia procesu, siła z jaką materiał będzie przetłaczany przez matrycę. Parametry te decydują o prowadzeniu procesów zagęszczania, stosowanych w wielu gałęziach produkcyjnych tj. np. przemysł paszowy (materiał roślinny), przemysł farmaceutyczny (proszki). Przegląd wykazał jednak, że dane dotyczące zagęszczania roślin szybkoorosnących z grupy biomasy zielnej, przeznaczonych na cele energetyczne, nie są w pełni opracowane a wyniki prezentowane w literaturze wskazują, że nie istnieją uniwersalne wytyczne procesowe (parametry surowca jak i prowadzonych etapów przetwarzania) dotyczące przygotowania a zwłaszcza kompaktowania biomasy pochodzącej z różnych źródeł (drzewnej, zielnej, owocowej czy wodnej wg klasyfikacji zgodnej z (PN-EN ISO 17225-1:2021) .

Na podstawie przeglądu, można stwierdzić również, że autorzy badań dotyczących procesu zagęszczania proponują wiele modeli matematycznych opisujących proces zagęszczania (Tabela 3). Modele te głównie opisują proces zagęszczania w komorze zamkniętej (Frodeson i in., 2019; Gageanu i in., 2021b; Jia i in., 2020; Molenda i in., 2021; Styks i in., 2020, 2021; Wang i in., 2020). Takie podejście powoduje, że pomijany jest wpływ przepływu materiału przez kanał zagęszczający jak i wpływ geometrii kanału na parametry jakościowe uzyskanej granuli (pod pojęciem jakości należy tu głównie rozumieć cechy peletu zależne od procesu aglomeracji, czyli jego gęstość właściwą DE i wytrzymałość mechaniczną DU).

W konsekwencji tego, modele o których mowa, w głównej mierze opisują zmianę objętości materiału pod wpływem badanych czynników (głównie ciśnienia, temperatury i wilgotności) i odnoszą się głównie do gęstości otrzymanego granulatu całkowicie pomijając kwestię najważniejszego z parametrów jakościowych, czyli wytrzymałości mechanicznej granulatu.

Ponadto, modele te nie zawierają informacji, jaka powinna być geometria kanału zagęszczającego oraz jak ona wpływa zarówno na proces jak i jakość produkowanego granulatu. Konstrukcje stanowisk do weryfikacji modeli bazują zwykle na tulejach, w których za pomocą tłoka, zagęszczany jest materiał. Komora zagęszczająca, którą stanowi tuleja, jest zamknięta dnem. W warunkach rzeczywistych, w procesie peletowania, takie stałe zamknięcie

komory zagęszczającej dnem, nie występuje. W tym przypadku, dnem jest sprasowana porcja materiału pozostająca w tulei. Tutaj to rodzaj materiału, jego parametry oraz długość kanału zagęszczającego, decydują o tym jakie ciśnienie (siła) wywoła przesunięcie prasowanego materiału w kanale. Wartość tego ciśnienia będzie też jednocześnie maksymalną wartością ciśnienia zagęszczającego materiał. Zbyt krótki kanał spowoduje ruch materiału zanim uzyskamy ciśnienie pozwalające na uzyskanie pożądanego poziomu zagęszczenia materiału, zbyt długi – nadmierny wzrost ciśnienia nie wywołujący już istotnego zwiększenia stopnia zagęszczenia materiału. Zatem z punktu widzenia procesu peletowania, samo poznanie jaka wartość ciśnienia powoduje zagęszczenie materiału do poziomu uzyskania przez pelet wymaganych parametrów jakościowych (DE i DU) jest niewystarczająca. W tym procesie istotna jest zwłaszcza praktyczna informacja, jaka geometria kanału zagęszczającego spowoduje, że w komorze nastąpi wzrost ciśnienia do poziomu zapewniającego uzyskanie przez pelet wymaganych parametrów jakościowych.

Zatem, to odpowiednio dobrana do danego materiału geometria kanału zagęszczającego, gwarantuje odpowiednią jakość peletu, czyli produkt charakteryzujący się jednocześnie wytrzymałością mechaniczną i gęstością na wymaganym przez normy poziomie, oczywiście przy zachowaniu parametrów jakościowych niezależnych od procesu zagęszczania takich jak np.: wartość opałowa czy zawartość popiołu. Ze względu na właściwości biomasy (zwłaszcza niską gęstość nasypową i właściwą oraz dużą porowatość) geometria kanału zagęszczającego to nie tylko jego średnica i długość. W tym przypadku, przez geometrię rozumie się także wymiary ściętego stożka sprężającego tj.: kąt tworzącej, średnica podstawy oraz średnica na wysokości ścięcia, równa średnicy tulei zagęszczającej. To właśnie głównie w tym stożku następuje proces zagęszczania materiału biomasowego

Prowadzone są badania, choć jest ich niewiele, na stanowiskach symulujących rzeczywisty proces zagęszczania. Badania te dostarczają istotnych danych, jednak ich realizacja jest trudniejsza, ponieważ materiał swobodnie przepływa przez kanał i nie jest zatrzymywany przez żaden element wspomagający (S. Nielsen i in., 2020a). Kluczową kwestią w tego typu badaniach dobór geometrii kanału zagęszczającego matrycy do wymagań badanego materiału, ponieważ to on będzie odpowiedzialny za zatrzymywanie materiału w komorze zagęszczającej oraz jego zagęszczenie (Crawford i in., 2015; Puig-Arnabat i in., 2016).

Wyniki badań dowodzą, że wartość wymaganego ciśnienia zagęszczania zależy od rodzaju badanego materiału, wiemy też, że pozostałe czynniki wpływające na proces zagęszczania (takie jak np.: wilgotność i stopień rozdrobnienia materiału czy też temperatura procesu) determinują wartość wymaganego ciśnienia zagęszczania. Zatem dany materiał, przy

udziale innych parametrów procesu, wymaga dedykowanej dla niego wartości czynnika sprawczego jakim jest ciśnienie a co za tym idzie dedykowanej geometrii kanału.

W wielu opracowaniach znajdujemy informacje o wpływie ciśnienia i innych czynników materiałowych i procesowych na uzyskaną gęstość lub/i wytrzymałość mechaniczną granulatów, jednak zauważalny jest brak badań na temat geometrii kanału zagęszczającego, jej znaczeniu w procesie kompaktowania oraz wpływie jaki ma na produkt końcowy procesu. Braki te widoczne są zwłaszcza w odniesieniu do biomasy niedrzewnej, która ze względu na niską zawartość naturalnych lepiszczy (np.: lignina lub żywica) i duże zróżnicowanie gatunkowe, traktowana jest jako biomasa trudna do peletowania.

Biorąc pod uwagę powyższe, należy postawić pytanie: czy możliwe jest określenie geometrii kanału zagęszczającego pozwalającej na uzyskanie wymaganych poziomów gęstości właściwej i wytrzymałości mechanicznej peletów wykonanych z różnego rodzaju biomasy zielnej. Ten typ biomasy uznawany jest za drugie, zaraz po biomacie drzewnej, źródło surowca do produkcji biopaliw stałych w postaci peletu.

Celem głównym pracy było zatem określenie wpływu geometrii kanału zagęszczającego na jakość peletu uzyskanego z wybranych rodzajów biomasy zielnej.

Przeprowadzona analiza literatury, dotyczącej badań nad procesem zagęszczania biomasy, pozwala na stwierdzenie, że do danego rodzaju lub grupy materiałów należy dobrać parametry procesu zagęszczania, aby możliwe było uzyskanie pożądaných parametrów produktu finalnego jakim jest pelet.

Na podstawie powyższego stwierdzenia postawiono dwie hipotezy badawcze:

H1: Geometria kanału zagęszczającego matrycy ma istotny wpływ na DE i DU peletu,

H2: Uzyskanie wysokiej jakości peletu wymaga geometrii kanału zagęszczającego dostosowanej do biomasy danego gatunku roślin.

Celem naukowym pracy było wyznaczenie powiązań pomiędzy właściwościami surowca roślinnego, geometrią kanału zagęszczającego a parametrami jakościowymi (DE i DU) granulatu powstałego w skutek procesu zagęszczania ciśnieniowego. Realizacja celu pracy wymagała: przeprowadzenia badań dotyczących charakterystyki surowca roślinnego, opracowania i zbudowania stanowiska badawczego, które umożliwiło prowadzenie badań nad wpływem geometrii kanału zagęszczającego na parametry peletu, opracowania takiego sposobu przedstawienia uzyskanych wyników z których jednoznacznie można uzyskać praktyczne informacje jaka geometria kanału zagęszczającego pozwala na uzyskanie peletu o założonych poziomach parametrów jakościowych (DU i DE) przy minimalnych wartościach ciśnienia zagęszczania. Założono że informacje te będą mogły być odczytane z tzw. map zmian parametrów jakości na tle zmian ciśnienia zagęszczania.

4. Materiał badawczy

Na podstawie przeglądu literatury dotyczącej badań właściwości biomasy zielnej wybrano materiał na którym zrealizowano badania. Selekcja materiału do badań wyłoniła trzy rośliny energetyczne, które są znane w środowisku naukowym, są to: miskant olbrzymi *Miscanthus × giganteus* Greef et Deu (Cudjoe i in., 2017; Demianiuk, 2011; Doczekalska i in., 2020; Dohleman i in., 2009; Dyjakon i in., 2020; Francik i in., 2020, 2022; Fusi i in., 2020; Lewandowski i in., 2000; Miao i in., 2013; Moiceanu i in., 2017; Styks i in., 2020, 2021; Voicu i in., 2011; Wójcik i in., 2020; Wróbel i in., 2018), ślazier pensylwański *Sida hermaphrodita* L. Rusby (Borkowska i Molas, 2012; Cherney i Verma, 2013; Cumplido-Marin i in., 2020; Franzaring i in., 2014, 2015; Jablonowski i in., 2017; Jasinskas i in., 2008; Krička i in., 2017; Kurucz i in., 2014; Kwiatkowski i in., 2023; McKendry, 2002; Molas i in., 2019a; Nahm i Morhart, 2018; Niedziółka i in., 2015; Oleszek i in., 2013; Remlein-Starosta i in., 2016a; Šiaudinis, 2017; Šiaudinis i in., 2015; Spooner i in., 1985; M. J. Stolarski i in., 2017; Styks i in., 2020, 2021; Sultana Kumar, 2012), oraz różnik przerośnięty *Silphium perfoliatum* L. (Alzageem i in., 2019; Cumplido-Marin i in., 2020; Ibitoye i in., 2021; Igliński i in., 2011; Jasinskas i in., 2022; Jewiarz, Wróbel, i in., 2020; Lisowski i in., 2017; Mudryk i Wróbel, 2011; Peni i in., 2020; Styks i in., 2020, 2021). Wybór ten został umotywowany tym, że rośliny te, wg klasyfikacji biomasy zawartej w normie (PN-EN ISO 17225-1:2021, 2021) należą do biomasy zielnej. Reprezentują byliny jednoliścienne (miskant) oraz dwuliścienne (ślazier i różnik). Są to gatunki, które literatura uznaje za cenne z punktu widzenia wykorzystania na cele energetyczne. Prowadzone są plantacje tych roślin a jednocześnie prowadzone są badania nad procesami przetwarzania uzyskanej biomasy. Gatunki te są perspektywiczne oraz, co istotne w przypadku gatunków obcych, nie są one gatunkami inwazyjnymi zatem mogą być uprawiane bez obawy niekontrolowanego rozprzestrzeniania się w środowisku naturalnym zagrażającego gatunkom rodzimym jak np. ma to miejsce w przypadku rdestowców czy nawłoci. Co najważniejsze, są to rośliny stosunkowo nowe w literaturze co daje możliwość poszerzenia stanu wiedzy na ich temat. Ponadto, badania dotyczące parametrów jakościowych specyficznych dla surowca (zawartość popiołu, ciepło spalania, wartość opałowa, gęstość właściwa) wskazują, że stanowią one potencjalnie właściwy materiał bazowy do produkcji biopaliw stałych takich jak brykiet czy pelet. Wybrane gatunki należą do różnych rodzin (miskant - trawy, ślazier - ślazierowate, różnik – astrowate) a zatem ich biomasa będzie potencjalnie charakteryzowała się dużym zróżnicowaniem parametrów, co za tym idzie będzie wymagała różnych parametrów procesu zagęszczania. Materiał do badań został pozyskany

z plantacji roślin energetycznych Wydziału Inżynierii Produkcji i Energetyki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie.

4.1. Miskant olbrzymi *Miscanthus* × *giganteus* Greef et Deu

Miskant olbrzymi nazywany jest również trzciną chińską lub trzcinnikiem olbrzymim. Spotkać można się też z nazywaniem tego gatunku trawą słoniową, co jest błędnym utożsamianiem miskanta z gatunkiem trawy występującej pospolicie na sawannie (*Pennisetum purpureum* Schumach.). Miskant jest gatunkiem wieloletniej trawy kępowej, pochodzącej z Azji Południowo-Wschodniej (Japonia, Chiny, Korea) (Lewandowski i in., 2000). Swoją obecność w Europie zapoczątkował około 50 temu w charakterze rośliny ozdobnej. Pierwszą znaną europejską plantacją miskanta olbrzymiego na cele energetyczna była założona w 1982 r. plantacja znajdująca się w Moser koło Magdeburga. Miskant olbrzymi powstał na skutek naturalnego skrzyżowania się miskanta chińskiego (*Miscanthus sinensis* Anders.) z miskantem cukrowym (*Miscanthus sacchariflorus* Maxim.) (Greef Deuter, 1993). Systematyka rośliny została przedstawiona w tabeli 4, a jej morfologia na rysunku 6.

Tabela 4

Miskant olbrzymi *Miscanthus* × *giganteus* Greef et Deu - systematyka

Królestwo	jądrowe	<i>Eukaryota</i>
Podkrólestwo	rośliny	<i>Phytobionta</i>
Gromada	rośliny telomowe	<i>Telomophyta</i>
Podgromada	okrytozalążkowe	<i>Angiospermae</i>
Klasa	jednoliścienne	<i>Monocotyledones</i>
Podklasa	liliowe	<i>Liliidae</i>
Nadrząd	komelinopodobne	<i>Commelinanae</i>
Rząd	trawowce	<i>Poales</i>
Rodzina	wiechlinowate (trawy)	<i>Poaceae = Gramineae</i>
Rodzaj	miskant	<i>Miscanthus</i>
Gatunek	miskant olbrzymi	<i>Miscanthus</i> × <i>giganteus</i> Greef et Deu.

Źródło: Opracowanie własne wg Szweykowska i Szweykowski 2006 (Szweykowska i Szweykowski, 2006)



Rysunek 6. Miskant olbrzymi *Miscanthus × giganteus* Greef et Deu.: 1) pęd, 2) przekrój pędu, 3) liść, 4) sadzonka korzeniowa, 5) łodyga z liśćmi

Źródło: Mudryk i Wróbel 2010 (Mudryk i Wróbel, 2010)

Miskant olbrzymi jako mieszaniec jest gatunkiem sterylnym i nie wytwarza nasion. Rozmnażanie możliwe jest w wyniku podziału karpy, dzięki któremu pozyskujemy sadzonki tzw. rizomy. Istnieje również możliwość rozmnażania z sadzonek uzyskanych dzięki metodzie in vitro, natomiast rośliny powstałe na skutek tego procesu charakteryzują się niższą odpornością na niskie temperatury. Młode sadzonki przed nadejściem zimy powinny być zabezpieczane np. ściółką ze słomy (Gubišová i in., 2013; Moll i in., 2020).

Jeśli chodzi o wymagania glebowe, miskant nie jest wymagającą rośliną. Jest dobrym rozwiązaniem na obsadę terenów nierównych, pochyłych, gdzie grunt narażony jest na silną erozję. Pod uprawę można wykorzystywać nawet gleby IV, V oraz IV klasy, aby posiadała ona zdolność do zatrzymywania oraz oddawania wody (Feng i in., 2017; Wagner i in., 2019; Xue i in., 2016). Dzięki mocno rozwiniętemu systemowi korzeni, miskant jest odporny na okresy suszy. Gleby, na jakich jest uprawiany powinna być średnio zwięzła o podłożu piaszczystym. Im wyższa jest klasa gleby, tym wyższych plonów można oczekiwać. Na wysokość plonów ma również wpływ nawodnienie gleby. W pierwszych latach wzrostu, sadzonki miskanta są wrażliwe na poziom wody gruntowej, której minimalny akceptowalny poziom wynosi 2 m. Pomimo tego, że roślina wymaga relatywnie wysokiego poziomu wody gruntowej nie powinny być to tereny podmokłe oraz bagienne.

Żywotność miskanta określa się około 15 lat (Cudjoe i in., 2017). Ze względu na predyspozycje sadzonek do krzewienia się, uprawia się je w rozsadzie 1 x 1 m.

Surowcem do produkcji biopaliw stałych jest część nadziemna zasychająca po okresie wegetacyjnym. W pierwszym roku uprawy nie wykonuje się zbioru roślin, natomiast w drugim roku można uzyskać plon 8 – 10 t·ha⁻¹, a w kolejnych latach nawet 20 – 30 t·ha⁻¹ suchej masy (Flaig i Mohr, 1993; Schwarz, 1993).

4.2. Rożnik przerośnięty *Silphium perfoliatum* L.

Rożnik przerośnięty nazywany również pospolicie sylfią, to dużych rozmiarów bylina pochodząca z rodziny astrowatych. Szczegółowa systematyka została zaprezentowana w tabeli 5. Jest to gatunek pochodzący z Ameryki Północnej, będący częścią flory preriowej. Można go spotkać na dużych połaciach terenu Kanady oraz USA. Z powodu swoich aspektów wizualnych został sprowadzony do Europy około XVII wieku i znalazł zastosowanie jako roślina dekoracyjna w ogrodach jak również parkach. Znane jest również jej zastosowanie w roli rośliny wykorzystywanej w mieszankach paszowych głównie w państwach sąsiadujących z Polską po stronie wschodniej (Białoruś, Ukraina czy obecna Rosja) (Majtkowski, 2006). Jednak wyniki badań wskazują, że nie jest dobrym wyborem, jeśli chodzi o produkcję pasz z

powodu obecności w biomacie kwasów fenolowych (Kowalski i Wolski, 2003; Piłat i in., 2007). Sylfia cieszy się również zainteresowaniem przemysłu farmaceutycznego z uwagi na wysoką zawartość związków saponinowych, które znajdują się w liściach, kwiatostanach oraz kłączach (Kowalski. R., 2002). Przemysł spożywczy również docenił rożnik, ponieważ jest to roślina miododajna, a jej wydajność miodowa wynosi 550 kg·ha⁻¹ (Jabłoński i Kołtowski, 2005; Kołtowski, 2006).

Podobnie jak miskant oraz ślazier, rożnik charakteryzuje się niskimi wymaganiami klimatycznymi oraz glebowymi co powoduje, że wykorzystywana jest jako roślina pionierska do rekultywacji terenów zdegradowanych. Dodatkowo, mając na uwadze wysoki plon rożnika (15 - 19 t·ha⁻¹ suchej masy), roślina ta oceniana jest jako roślina z wysokim potencjałem wykorzystania na cele energetyczne (Majtkowski, 2006). Niewątpliwym atutem gatunku jest wysoka tolerancja a niską temperaturę (Frączek i in., 2011; Frączek i Mudryk, 2009).

Morfologia rożnika przerośniętego została przedstawiona na rysunku 7. Cechą charakterystyczną rożnika jest łodyga o przekroju czworokąta, która osiąga wysokość około 2,5 – 3 m.

Tabela 5
Rożnik przerośnięty *Silphium perfoliatum* L.- systematyka

Królestwo	jądrowe	<i>Eukaryota</i>
Podkrólestwo	rośliny	<i>Phytobionta</i>
Gromada	rośliny telomowe	<i>Telomophyta</i>
Podgromada	okrytozalążkowe	<i>Angiospermae</i>
Klasa	dwuliścienne	<i>Dicotyledones</i>
Podklasa	astrowe	<i>Asteridae</i>
Nadrząd	astropodobne	<i>Asteranae</i>
Rząd	astrowce	<i>Asterales</i>
Rodzina	astrowate	<i>Asteraceae</i>
Rodzaj	rożnik	<i>Silphium</i>
Gatunek	rożnik przerośnięty	<i>Silphium perfoliatum</i> L.

Źródło: Opracowanie własne wg Szwejkowski i Szwejkowski 2006 (Szwejkowska i Szwejkowski, 2006)



Rysunek 7. Rożnik przerośnięty *Silphium perfoliatum* L.: 1 – pęd generatywny, 2 – pąk kwiatowy, 3 – kwiat, 4 - owocnik, 5 - nasiona, 6 - przekrój poprzeczny pędu, 7 – sadzonka korzeniowa

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Frączek i inni 2011 (Frączek i in., 2011)

4.3. Ślazowiec pensylwański *Sida hermaphrodita* L. Rusby

Ślazowiec pensylwański (sida, malwa wirginijska, ale też błędnie nazywany w literaturze jako malwa pensylwańska) – pochodzi z grupy roślin bylinowych, oznacza to, że odrastając corocznie zwiększa liczbę wyrastających z kępy łodyg. Liczba ta w zwartej kępie może wynosić od jednej do trzydziestu w kolejnych latach. Przyrost liczby łodyg występuje wraz z wiekiem rośliny. Jest przedstawicielem rodziny ślazowatych, która w swojej grupie liczy kilkaset gatunków roślin. Jako kraj pochodzenia ślazowca uznaje się Amerykę Północną, gdzie można go spotkać dziko rosnącego w kilku stanach np. Wirginii czy Pensylwanii (Borkowska Molas, 2012; Remlein-Starosta i in., 2016b). W Polsce, roślina ta pojawiła się w 1955 roku, jako roślina pastewna (Borkowska Molas, 2012). Morfologię rośliny przedstawiono na rysunku 8. Systematyka ślazowca została zaprezentowana w tabeli nr 6.

Tabela 6
Ślazowiec pensylwański *Sida hermaphrodita* L. Rusby - systematyka

Królestwo	jądrowe	<i>Eukaryota</i>
Podkrólestwo	rośliny	<i>Phytobionta</i>
Gromada	rośliny telomowe	<i>Telomophyta</i>
Podgromada	okrytozalążkowe	<i>Angiospermae</i>
Klasa	dwuliścienne	<i>Dicotyledones</i>
Podklasa	ukęśłowe	<i>Dilleniidae</i>
Nadrząd	ślazopodobne	<i>Malvanae</i>
Rząd	ślazowce	<i>Malvales</i>
Rodzina	ślazowate	<i>Malvaceae</i>
Rodzaj	ślazowiec	<i>Sida</i>
Gatunek	ślazowiec pensylwański	<i>Sida hermaphrodita</i> Rusby

Źródło: Opracowanie własne wg Szweykowska i Szweykowski 2006 (Szweykowska i Szweykowski, 2006)



Rysunek 8. Ślaziowiec pensylwański *Sida hermaphrodita* L. Rusby.: 1 – pęd generatywny, 2 – pąk kwiatowy, 3 – kwiaty, 4 – owocostany w różnym stadium dojrzałości, 5 – liść, 6 – sadzonka korzeniowa, 7 – nasiona

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Mudryk i Wróbel 2010 (Mudryk i Wróbel, 2010)

Ślazier jest rośliną wieloletnią a jego plantacja może być użytkowana nawet do dwudziestu lat (Pszczółkowska i in., 2012). Rozmnaża się generatywnie, czyli przez nasiona i wegetatywnie - przez sadzonki korzeniowe lub zielne. Należy do grupy roślin owadopylnych. Ślazier wydaje owoce w postaci rozłupni, która może zawierać 5 - 8 nasion. Naturalne rozsiewanie nie ma tutaj miejsca, ponieważ nasiona ślazierca się nie obsypują (Kurucz i in., 2014).

Jeżeli chodzi o wymagania klimatyczne oraz glebowe, ślazier nie należy do roślin o dużych wymaganiach. Jego uprawa nie jest trudna i udaje się na każdym rodzaju gleby, a nawet na terenach piaszczystych pod warunkiem odpowiedniego nawodnienia. Ślazier jest odporny zarówno na suszę jak i mrozy co daje możliwość uprawy bez ograniczeń klimatycznych w warunkach Polski.

Zbiór pędów ślazierca z przeznaczeniem na cele energetyczne należy planować na okres jesienno-zimowy. Pędy ślazierca w tym czasie są naturalnie zaschnięte. Z uwagi na charakter pory roku, jesienią materiał będzie charakteryzował się dużą zawartością wody – do około 40%, dlatego optymalnym czasem na zbiór są miesiące zimowe (Oleszek i in., 2013).

Zarówno charakterystyka plantacji ślazierca, jego cechy gatunkowe jak i właściwości adaptacyjne dają szansę na zwiększenie arealu uprawy tej rośliny. Nadaje się do zagospodarowania nieużytków oraz innych terenów o mniejszym znaczeniu uprawowym. Biorąc pod uwagę obecne trendy energetyczne, jest to roślina, którą z powodzeniem można wykorzystać jako biopaliwo po wcześniejszym jej przetworzeniu. Liście sady znajdują zastosowanie w produkcji biogazu, natomiast suche łodygi do produkcji biopaliw stałych (Molas i in., 2019b). Plon z suchej masy ślazierca wynosi w zależności od warunków glebowych 7 – 20 t·ha⁻¹.

5. Metodyka badań

Materiał badawczy został pozyskany z plantacji roślin energetycznych znajdującej się na Wydziale Inżynierii Produkcji i Energetyki Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie. Obiektem badań były pędy miskanta olbrzymiego, rożnika przerośniętego oraz ślázowca pensylwańskiego. Jak już wspomniano gatunki te są bylinami co oznacza, że ich jednoroczne pędy zamierają po okresie wegetacyjnym i w takiej formie są pozyskiwane do dalszego przetwarzania. Pędy badanych gatunków, łącznie z liśćmi i kwiatostanami, zostały pozyskane w listopadzie.

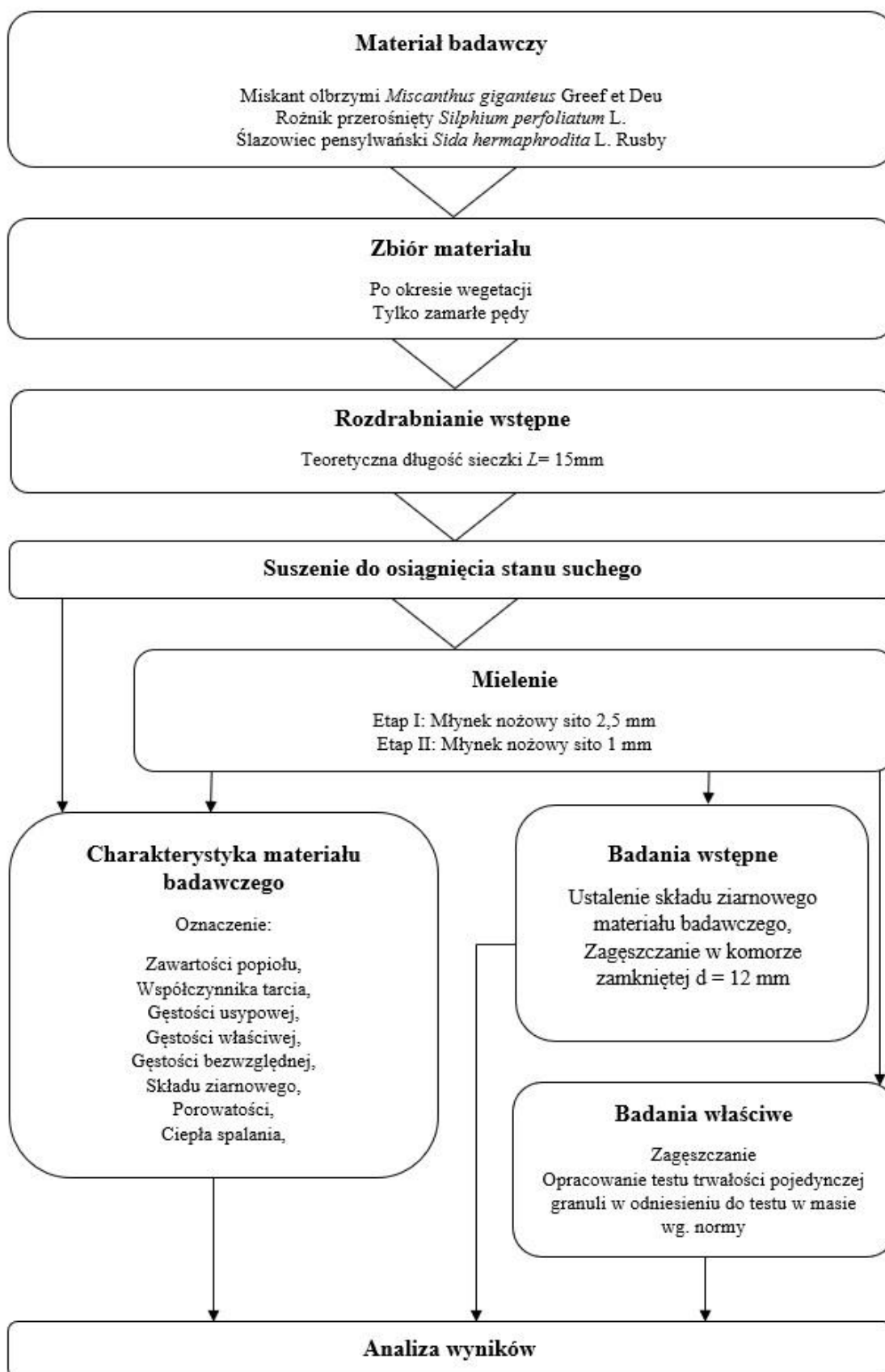
Proces badawczy składał się z trzech głównych etapów:

- etap I – charakterystyka surowca,
- etap II – badania wstępne, które pozwoliły na ustalenie które z parametrów i o jakim zakresie będą brane pod uwagę na kolejnym etapie,
- etap III – badania właściwe wpływu geometrii kanału matrycy na jakość uzyskanego granulatu.

Przed przystąpieniem do głównych etapów badań, pozyskane pędy poddano procesowi przygotowania. Przebieg tego procesu i głównych etapów badawczych przedstawiono schematycznie na rysunku 9.

Cały proces badawczy został przeprowadzony w Laboratorium Technologii Produkcji i Oceny Jakości (LABIOM) Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, które w 2016 roku uzyskało i utrzymuje akredytację Polskiego Centrum Akredytacji jako laboratorium badawcze (nr akredytacji AB 1585). Oznaczenia wszystkich badanych parametrów wykonano na aparaturze laboratoryjnej opierając się o metody znormalizowane, metody zalecane przez producentów urządzeń laboratoryjnych oraz w dużym stopniu w oparciu o metody autorskie opracowane na potrzeby niniejszej pracy.

Celem uproszczenia opisu toku realizacji pracy, pełne nazewnictwo botaniczne badanych gatunków w postaci polskiej i łacińskiej nazwy rodzajowej i epitetów gatunkowych skrócono do polskiej nazwy rodzajowej. I tak, w dalszej części pracy, badane gatunki będą opisywane jako: miskant, rożnik i ślázowiec.



Rysunek 9. Ogólny schemat badań

Źródło: Opracowanie własne

5.1 Przygotowanie materiału

5.1.1 Zbiór, sezonowanie i rozdrabnianie wstępne

Pędy badanych roślin zostały ścięte przy pomocy sekatora, związane w wiązki i pozostawione do sezonowania w pomieszczeniu o swobodnym dostępie powietrza. Wiązki zebranego materiału przedstawiono na rysunku 10.



Rysunek 10. Materiał badawczy pozyskany z plantacji i przygotowany do sezonowania: a - miskant, b - rożnik, c – ślaziovec

Źródło: własne

Proces sezonowania polegający na naturalnym suszeniu w pomieszczeniu o swobodnym dostępie powietrza trwał do momentu uzyskania przez materiał wilgotności poniżej 10%. Taka wilgotność spowodowała wstrzymanie procesów biologicznej degradacji materiału oraz pozwoliła na prawidłowe przeprowadzenie kolejnego kroku jakim było rozdrabnianie materiału badawczego.

Zawartość wilgoci całkowitej w materiale została określona na podstawie procedury zawartej w normie (PN-EN ISO 18134-1:2023-02). Próbkę materiału zostały umieszczone na tackach pomiarowych, zważone (waga precyzyjna WLC10/A2, RADWAG, Polska) i umieszczane w komorze suszarce laboratoryjnej celem wysuszenia (SLW 115, Pol-Eko, Polska). Proces suszenia przebiegał w temperaturze $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$, aż do momentu stabilizacji masy suszonego materiału. Wilgotność całkowita M_{ar} została określona według zależności:

$$M_{ar} = \frac{(m_2 - m_3) - (m_4 - m_5)}{(m_2 - m_1)} * 100 \quad (1)$$

- M_{ar} – wilgotność całkowita (%),
 m_1 – masa pustej tacki pomiarowej (g),
 m_2 – masa tacki pomiarowej wraz z próbką (g),
 m_3 – masa tacki pomiarowej wraz z próbką po suszeniu (g),
 m_4 – masa referencyjnej tacki pomiarowej przed suszeniem (g),
 m_5 – masa referencyjnej tacki pomiarowej po suszeniu (g).

Pędy sezonowanej biomasy poddano procesowi wstępnego rozdrabniania realizowanego za pomocą sieczkarni toporowej. Założona teoretyczna długość sieczki badanego materiału $L_z = 15$ mm.

5.1.2 Suszenie do osiągnięcia stanu suchego

Celem realizacji badań charakteryzujących materiał badawczy oraz celem pozyskania materiału bazowego do realizacji etapów badań związanych z zagęszczaniem, cały materiał badawczy poddano suszeniu do uzyskania stanu suchego. Biorąc pod uwagę te założenia, materiał został umieszczony w suszarce laboratoryjnej (SLW 115, Pol-Eko, Polska) i suszony aż do momentu, w którym masa materiału suszonego nie ulegała zmianie. Proces dosuszania materiału przebiegał w temperaturze 80°C, którą przyjęto na podstawie literatury (Wilén i in., 1996). Podobne do zaproponowanej temperatury stosuje się w celu powolnego, nieinwazyjnego suszenia np. liści tytoniu czy drewna. Pozwala to uniknąć ryzyka odparowania z materiału również innych substancji np. lotnych składników, które mogą korzystnie wpływać na proces zagęszczania.

Kontrola suszonego materiału odbywała się w dwugodzinnych odstępach. Pomiaru masy dokonano wagą laboratoryjną WLC10/A2 firmy RADWAG.

5.1.3 Mielenie

Wysuszony materiał wymagał dalszego rozdrobnienia. Zarówno oznaczenie parametrów charakteryzujących materiał (poza oznaczeniem gęstości właściwej DE), jak i badania procesu zęszczania wymagały rozdrobnienia go do uzyskania wielkości ziarna d równej lub mniejszej od 1 mm. Proces mielenia przeprowadzono dwuetapowo.

Pierwszy etap polegał na rozdrobnieniu sieczki do uzyskania materiału w której wielkość ziarna nie przekracza 6 mm. Zrealizowano to przy użyciu młynka nożowego z sitem o średnicy otworów 6 mm (Testchem LMN-100, Polska) widocznego na rysunku 11a.



Rysunek 11. Młynki laboratoryjne: a - Testchem LMN-100, Polska, b - PX-MFC 90D, Polymix, Kinematika, Luzern, Switzerland

Źródło: własne

W drugim etapie surowiec został dodatkowo rozdrobniony na młynku nożowym (PX-MFC 90D, Polymix, Kinematika, Luzern, Switzerland), który został przedstawiony na zdjęciu (11b). Młynek został wyposażony w sito o średnicy otworów 1 mm.

5.2 Charakterystyka materiału badawczego

W celu poznania indywidualnych cech badanych materiałów, wykonano oznaczenia parametrów istotnych z punktu widzenia ich energetycznego wykorzystania (zawartość popiołu, ciepło spalania) jak i parametrów mogących potencjalnie mieć wpływ na proces zagęszczania (gęstość właściwa i bezwzględna, skład ziarnowy, współczynnik tarcia).

5.2.1 Oznaczanie zawartości popiołu

Oznaczanie zawartości popiołu w materiale badawczym przeprowadzono wg normy (PN-EN ISO 18122:2023-). Spopieleniu podlegały próbki każdej rośliny badanej. Proces zachodził w temperaturze $550 \pm 10^{\circ}\text{C}$ przez 6 godzin. Badanie wykonano w trzech powtórzeniach dla każdego z materiałów. Zawartość popiołu obliczono za pomocą wzoru:

$$A_d = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \times \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (2)$$

gdzie:

A_d – zawartość popiołu w stanie suchym (%),

m_1 – masa pustego tygla (g),

m_2 – masa pustego tygla z naważką przed spopieleniem (g),

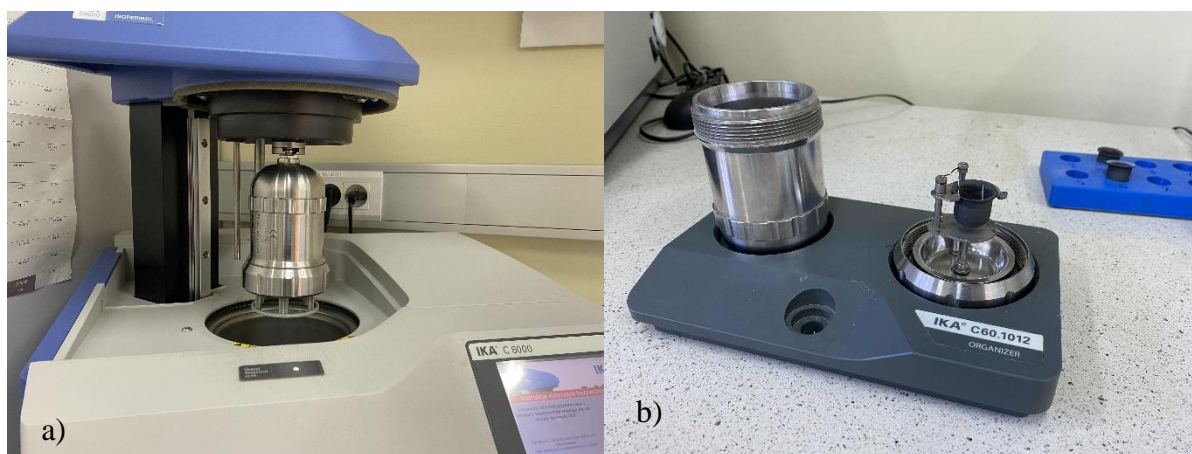
m_3 – masa pustego tygla z popiołem (g),

M_{ad} – zawartość wilgoci w stanie analitycznym (%).

5.2.2 Oznaczenie ciepła spalania

Najważniejszym parametrem z punktu widzenia energetycznego wykorzystania badanej biomasy jest ciepło spalania Q_s . Dana biomasa, musi charakteryzować się odpowiednim poziomem tego parametru by w ogóle móc mówić że nadaje się ona potencjalnie jako surowiec do produkcji biopaliw stałych. Przez ciepło spalania rozumiemy ilość energii w postaci ciepła otrzymaną na skutek całkowitego i zupełnego spalania jednostki masy lub objętości paliwa i obniżeniu temperatury produktów procesu spalania do temperatury początkowej substratów. Woda, która znajduje się w spalinach powinna się skroplić.

Analizę wykonano za pomocą kalorymetru IKA C6000 (IKA C6000 firmy IKA®, Niemcy) wg procedury zawartej w normie PN-EN ISO 18125:2017-07 (PN-EN ISO 18125:2017-07). Właściwie przygotowana próbka materiału tzn. rozdrobniona do frakcji $d < 1$ mm zagęszczana była do postaci pastylki o masie $1 \text{ g} \pm 0,05 \text{ g}$. Pastylkę wykonano na ręcznej prasie. Średnica tulei zagęszczającej wynosiła 12 mm. Przygotowaną próbkę umieszczono w tyglu, który to mocowano w uchwycie bomby kalorymetrycznej. Jako zapalnik, w procesie spalania próbki został użyty sznurek bawełniany o oznaczonej przez producenta wartości ciepła spalania. Przygotowana bomba kalorymetryczna została umieszczona w prowadnicy znajdującej się w ruchomej pokrywie kalorymetru i tym samym przystąpiono do zautomatyzowanego procesu oznaczania ciepła spalania. Stanowisko badawcze przedstawiono na rysunku 12.



Rysunek 12. Kalorymetr IKA C600: a – uchwyt bomby, b - bomba kalorymetryczna

Źródło: własne

5.2.3 Oznaczenie gęstości usypowej

Dla materiału badawczego oznaczono gęstość usypową, będącą masą materiału w stanie usypanym znajdującą się w określonej objętości. Wg normy (PN-EN ISO 17828:2016-02), pomiar tej wielkości odbywa się poprzez zważenie masy materiału w pojemniku o znanej objętości. Badanie wykonano w pięciu powtórzeniach dla każdego z materiałów. Objętość naczynia pomiarowego jest uzależniona od stopnia rozdrobnienia materiału, w badanym przypadku objętość ta wynosiła 1l. Gęstość usypowa została wyznaczona wg wzoru:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

gdzie:

ρ – gęstość usypowa ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$),

m – masa badanego materiału (kg),

V – objętość naczynia pomiarowego (m^3)

5.2.4 Oznaczenie gęstości właściwej

Gęstość właściwa SD badanych materiałów, oznaczona została na próbkach materiału w stanie suchym, pobranych przed etapem mielenia. Próbki stanowiły cylindryczne fragmenty pędów miskanta, roznika i ślázowca. Oznaczenie przeprowadzono używając użyciu quassicieczowego piknometru (Micromeritics Instrument Corp., GeoPyc 1360, USA – rysunek 13a). Zasada pomiaru polega na określeniu objętości próbki o znanej masie. Próbka materiału umieszczona w cylindrze pomiarowym, który jest wypełniony proszkiem o wielkości cząstek

poniżej 250 μm . Aparat mierzy wzrost objętości proszku spowodowany „zanurzeniem” w nim próbki badanego materiału. Gęstość właściwa próbki obliczana jest na bazie masy próbki i jej objętości. Szczegółowy opis procedury pomiarowej można znaleźć w publikacjach autora (Styks i in., 2020, 2021) Ta sama procedura wykorzystana została na kolejnych etapach badań do oznaczenia gęstości właściwej DE uzyskanych peletów badawczych.



Rysunek 13. Piknometry: a - quascieczowy GeoPyc 1360, b – helowy AccuPyc II 1340

Źródło: własne

5.2.5 Oznaczenie gęstości bezwzględnej

Gęstość bezwzględna AD inaczej nazywana gęstością absolutną, odnosi się do materiałów porowatych do których zaliczana jest również badana biomasa. Jest to gęstość szkieletu tworzącego strukturę materiału bez uwzględnienia objętości porów wewnętrznych materiału. Parametr ten oznaczono przy użyciu piknometru gazowego (AccuPyc II 1340, Micromeritics Instrument Corp., USA – rysunek 13b). Aparat pozwala na określenie objętości próbki materiału bez uwzględnienia jego porów wewnętrznych, które w czasie trwania pomiaru są wypełnione gazem pomiarowym (w tym przypadku helem). Znając masę próbki i jej objętość obliczono wartość AD badanych materiałów. Szczegółowy opis procedury pomiarowej można znaleźć w publikacji (Wróbel, 2019).

5.2.6 Oznaczanie składu ziarnowego

Oznaczenie składu ziarnowego rozdrobnionego materiału badawczego wykonano zarówno po I i II etapie mielenia czyli po rozdrobnieniu materiał do wielkości ziarna $d \leq 6 \text{ mm}$ oraz $d \leq 1 \text{ mm}$. W przypadku biopaliw stałych normy (PN-EN ISO 17827-1:2016-07) oraz (EN ISO 17827-2:2016-07), zawierają procedury oznaczania tego parametru. Pierwsza z nich, dedykowana jest głównie dla zrębków oraz siczki i zawiera zestaw sit, których otwory mają

następujące średnice: 63; 45; 31,5; 16; 8; 3,15 i sito plecione # 1 mm. Druga jest natomiast przeznaczona do biomasowych pyłów, trocin itp. Zawiera ona zestaw składający się z sita o otworach okrągłych o średnicy 3,15 mm oraz sit plecionych #: 2,8; 2; 1,4; 1; 0,5; 0,25 mm.

Norma PN-EN ISO 17827-1:2016-07 wymaga, dla materiałów o uziarnieniu $d_{95} \geq 1$ mm, próbki materiału badanego o objętości minimum 8 l. W przypadku, jeśli materiał charakteryzuje się wielkością cząstek $d < 45$ mm (jak to miało miejsce w przypadku badanej biomasy), można zmniejszyć objętość próbki do 4l. Wilgotność materiału nie powinna być wyższa niż 20%.

Natomiast norma PN-EN ISO 17827-2:2016-07 stosowana w przypadku materiałów o wielkości cząstek $d_{95} < 3,15$ mm próbka powinna wynosić co najmniej 50 g.

W badanych przypadkach, materiał po I etapie mielenia charakteryzował się wielkością ziarna $d \leq 6$ mm. Dlatego do oznaczania składu przyjęto masę próbki na poziomie 200 g i zestaw sit o otworach o średnicy 6 mm (sito spoza zestawu normatywnego, mające potwierdzić rozdrobnienie materiału poniżej 6 mm), 3,15 mm oraz sita plecione #: 2,8; 2; 1,4; 1; 0,5; 0,25 mm. Dodatkowo, aby określić strukturę wymiarową ziaren poniżej 0,25 mm, do zestawu włączono jeszcze sita plecione #: 0,1 i 0,075 mm.

Materiał po II etapie mielenia charakteryzował się wielkością ziarna $d \leq 1$ mm. Dlatego do oznaczania składu przyjęto zalecaną przez normę masę próbki na poziomie 50 g i zestaw sit plecionych #: 1; 0,5; 0,25 i dodatkowo 0,1 mm.

Pomiar masy poszczególnych frakcji zrealizowano z dokładnością 0,01 g (waga laboratoryjna AS 160.R2, RADWAG, Polska).

Proces przesiewania został zrealizowany na wstrząsarce laboratoryjnej (Morek Multiserw LPzE-4e, Polska). Pojedyncza analiza trwała 15 min. Wykonano dwa powtórzenia dla każdego badanego materiału.

W ten sposób badane próbki zmielonego miskanta, roznika i ślazu zostały podzielony na frakcje wymiarowe, które to wg normy określane są klasami sitowymi C. Materiał po I etapie mielenia podzielono na 10 klas:

C₁: 0,075 – średnica ziarna $d \leq 0,075$ mm,

C₂: 0,1 – średnica ziarna $d \leq 0,1$ mm,

C₃: 0,25 – średnica ziarna w granicach $0,1 < d \leq 0,25$ mm,

C₄: 0,5 - średnica ziarna w granicach $0,25 < d \leq 0,5$ mm,

C₅: 1 - średnica ziarna w granicach $0,5 < d \leq 1$ mm,

C₆: 1,4 - średnica ziarna w granicach $1 < d \leq 1,4$ mm,

C₇: 2 - średnica ziarna w granicach $1,4 < d \leq 2$ mm,

C₈: 2,8 - średnica ziarna w granicach $2 < d \leq 2,8$ mm,

C_9 : 3,15 - średnica ziarna w granicach $2,8 < d \leq 3,15$ mm,

C_{10} : 6 - średnica ziarna w granicach $3,15 < d \leq 6$ mm.

Natomiast materiał po II etapie mielenia podzielono na 4 klasy:

C_1 : 0,1 – średnica ziarna $d \leq 0,1$ mm,

C_2 : 0,25 – średnica ziarna w granicach $0,1 < d \leq 0,25$ mm,

C_3 : 0,5 - średnica ziarna w granicach $0,25 < d \leq 0,5$ mm,

C_4 : 1 - średnica ziarna w granicach $0,5 < d \leq 1$ mm.

Aby lepiej zobrazować różnice w składach ziarnowych materiału badawczego uzyskanego po II etapie mielenia należało wykreślić krzywe ich skumulowanych składów ziarnowych. W tym celu, bazując na uzyskanych danych wyznaczono tzw. skumulowane udziały frakcji S . Uzyskano w ten sposób 4 skumulowane udziały frakcji:

S_1 – udział procentowy klasy sitowej C_1 w całej masie próbki,

S_2 – suma udziałów klasy C_1 i C_2 ,

S_3 – suma udziałów klas C_1 , C_2 i C_3 ,

S_4 – suma udziałów klas C_1 , C_2 , C_3 , i C_4 .

Kolejnym krokiem było obliczenie d_{50} (średkowa wartość wielkości ziarna). Wartość tego parametru jednoznacznie pokazuje różnice pomiędzy rozkładem wielkości ziaren każdego materiału. Parametr ten wyznaczono z zależności:

$$d_{50} = C_{<50} + (50 - S_{<50}) \cdot \frac{C_{>50} - C_{<50}}{S_{>50} - S_{<50}} \quad (4)$$

gdzie:

$S_{<50}$ – najwyższy skumulowany udziały frakcji S jednak nieprzekraczający wartości 50%,

$S_{>50}$ - najniższy skumulowany udział frakcji S , jednak przekraczający wartości 50%,

$C_{<50}$ – klasa sitowa odpowiadająca $S_{<50}$

$C_{>50}$ – klasa sitowa odpowiadająca $S_{>50}$

Na bazie uzyskanych wyników, podjęto decyzję o ujednoczeniu składu ziarnowego materiałów poddawanych procesowi aglomeracji.

5.2.7 Wyznaczenie porowatości materiału

Na bazie uzyskanych wyników oznaczenia gęstości (BD , SD i AD) wyznaczono wartości porowatości. W odniesieniu do rozdrobnionego surowca biomasowego pochodzenia roślinnego możemy wyróżnić trzy rodzaje porowatości. Pierwszym z nich jest porowatość zewnętrzna złoża, która określa stosunek między gęstością właściwą SD a usypową BD zgodnie z zależnością:

$$\varepsilon_z = \frac{SD-BD}{SD} * 100 \quad (5)$$

gdzie:

ε_z - porowatość zewnętrzna złoża,

SD - gęstość właściwa ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),

BD - gęstość nasypowa ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

Składowe złoża biomasy (rozdrobione cząstki materiału), charakteryzują się porowatością wewnętrzną ε_w czyli procentowym udziałem wolnej przestrzeni wewnątrz cząstek w odniesieniu do objętości tych cząstek. Wzór pozwalający obliczyć porowatość wewnętrzną przedstawiono poniżej:

$$\varepsilon_w = \frac{AD-SD}{AD} * 100 \quad (6)$$

gdzie:

ε_w – porowatość wewnętrzna złoża,

AD - gęstość bezwzględna ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),

SD - gęstość właściwa ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),

Pory wewnętrzne złoża oraz wewnętrzne cząstek tworzą razem porowatość całkowitą ε_c rozdrobnionego materiału, a wylicza się ją wg następującego wzoru:

$$\varepsilon_c = \frac{AD-BD}{AD} * 100 \quad (7)$$

gdzie:

ε_c – porowatość całkowita,

AD – gęstość bezwzględna ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),

BD – gęstość nasypowa ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

5.2.8 Oznaczanie współczynnika tarcia

Wartość współczynnika tarcia badanych materiałów zostały określone przy użyciu specjalnego stanowiska badawczego. Materiał po II etapie mielenia, w stanie suchym i ujednoliconym składzie ziarnowym (opis w dalszej części pracy), umieszczono w kasecie pomiarowej wymiarach 200x150x40 mm, która nie posiada dna. Jest ona wyposażona w boczne rolki toczne dzięki którym przetacza się ona podczas testu. Rolki są tak

umiejscowione, że dolna krawędź kasety nie styka się z podłożem po którym jest ona przetaczana. Ruch kasety jest zapewniony dzięki silnikowi elektrycznemu, który umiejscowiony jest w maszynie wytrzymałościowej (INSIGHT 2, MTS, USA). Stanowisko badawcze posiada poziomą bieżnię z wymienną powierzchnią cierną po której przetaczana jest wcześniej opisana kasetka wypełniona materiałem. W tym przypadku określano współczynnik tarcia pomiędzy badaną biomasą a stalą z której wykonane są również komory zgęszczające wykorzystane na dalszych etapach badań. Stanowisko badawcze przedstawiono na rysunku 14.

Wyniki badań siły tarcia zarejestrowano przy pomocy programu TestWork 4, który steruje maszyną wytrzymałościową i zbiera niezbędne dane. Podczas trwania próby program sporządzał wykres zależności siły tarcia materiału od jego przemieszczenia na wybranej powierzchni. Aby wyznaczyć współczynnik tarcia statycznego oznaczono maksymalną siłę, która jest odpowiedzialna za zerwanie połączenia statycznego podczas próby. Z kolei w celu wyznaczenia współczynnika tarcia kinetycznego wyznaczono średnią wartość siły z danego odcinka pomiarowego tarcia (Mudryk i in., 2019).



Rysunek 14. Stanowisko do wyznaczania współczynnika tarcia

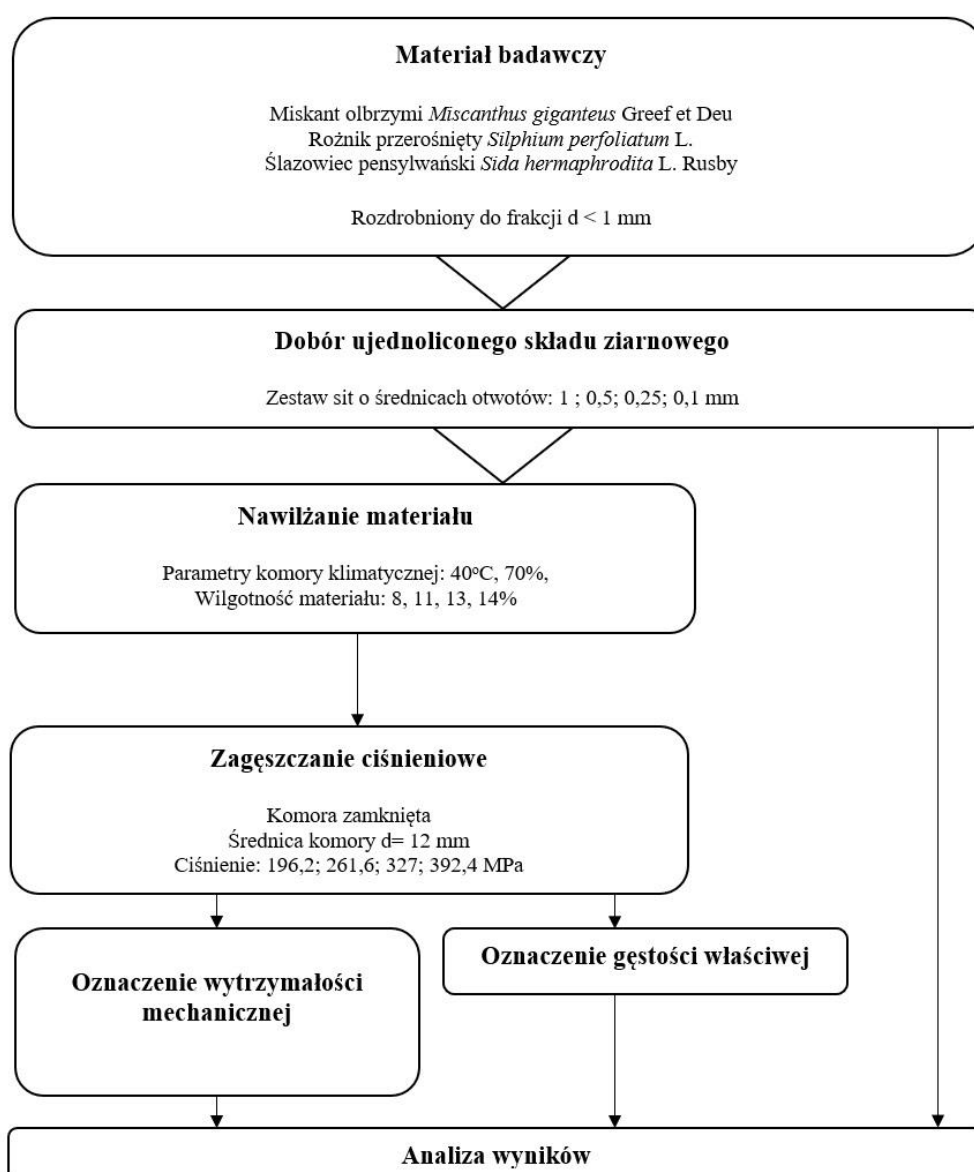
Źródło: własne

5.3 Badania wstępne

Przed przystąpieniem do badań właściwych wykonano serię badań wstępnych, które pozwoliły na określenie wpływu wilgotności oraz ciśnienia zagęszczania na wytrzymałość mechaniczną DU peletów jak również na ich gęstość DE . W tym etapie badań, zagęszczanie materiału realizowano w komorze zamkniętej.

Celem tych badań było ustalenie jakie wartości parametrów materiału badawczego (wilgotność, skład ziarnowy mieszanki badawczej), zostaną wybrane do etapu badań właściwych.

Szczegółowy schemat prowadzenia badań przedstawiono na poniższym rysunku 15.



Rysunek 15. Schemat badań - etap wstępny

Źródło: własne

5.3.1 Dobór ujednoliconego składu ziarnowego

Ja już wspomniano, analiza wyników składu ziarnowego materiału po I i II etapie mielenia wykazała, że pomimo zastosowania tych samych procedur rozdrabniania, uzyskane składy ziarnowe miskant, rożnika i ślazu różnią się od siebie (szczegóły zawarto w rozdziale “Wyniki badań”). Skład ziarnowy ma wpływ na przebieg procesu zagęszczania biomasy. Badania potwierdzające znaczenie składu ziarnowego zostały przedstawione, między innymi, przez Jewiarza (Crawford i in., 2015; Jackson i in., 2016; Jewiarz, Mudryk, i in., 2020; Manouchehrinejad i in., 2018; Puig-Arnavat i in., 2016; Wróbel, 2019). Aby na etapie badań wstępnych, jak i badań właściwych, pominąć wpływ zróżnicowanego składu ziarnowego badanych materiałów na wyniki dotyczące procesu zagęszczania, postanowiono go ujednolicić. Do dalszych badań przyjęto skład zaproponowany przez Wróbla (Wróbel, 2019).

Przygotowanie materiału o ujednoliconym składzie przebiegało następująco. Materiał uzyskany po II etapie rozdrabniania rozdzielono, analogicznie jak przy oznaczaniu składu ziarnowego, na 4 klasy sitowe: C_1 : 0,1; C_2 : 0,25; C_3 : 0,5 i C_4 : 1. Następnie z nich, dla każdego materiału, utworzono mieszankę o takim samym składzie ziarnowym (tabela 7).

Tabela 7
Ujednolicony skład ziarnowy rozdrobnionego materiału badawczego

Klasa sitowa	C_1	C_2	C_3	C_4
Udział w mieszance (%)	20	32	14,4	33,6

Źródło: własne

5.3.2 Nawilżanie materiału badawczego

W celu określenia wilgotności którą będzie posiadał materiał podczas zagęszczania na etapie badań właściwych, przeprowadzono badania określające wpływ wilgotności materiału na gęstość właściwą DE i wytrzymałość mechaniczną DU peletów. Badania prowadzono na materiale suchym oraz materiale nawilżonym do poziomu 8; 11; 13 i 14%. Dla osiągnięcia oraz utrzymania wymaganego poziomu wilgotności materiału wykorzystano komorę klimatyczną (KBF-S 115, BINDER, Niemcy). Urządzenie to daje możliwość precyzyjnego nawilżenia materiału do pożądanego poziomu, co ma duże znaczenie dla dokładności wyników. Dla potwierdzenia wymaganej zawartości wilgoci w materiale, przed podjęciem zęszczania, oznaczono jego wilgotność analityczną z zależności (8):

$$M_{ad} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} * 100 \quad (8)$$

M_{ad} – wilgotność analityczna (%),

m_1 – naczynie pomiarowe z pokrywką (g),

m_2 – naczynie pomiarowe z pokrywką oraz próbką przed suszeniem (g),

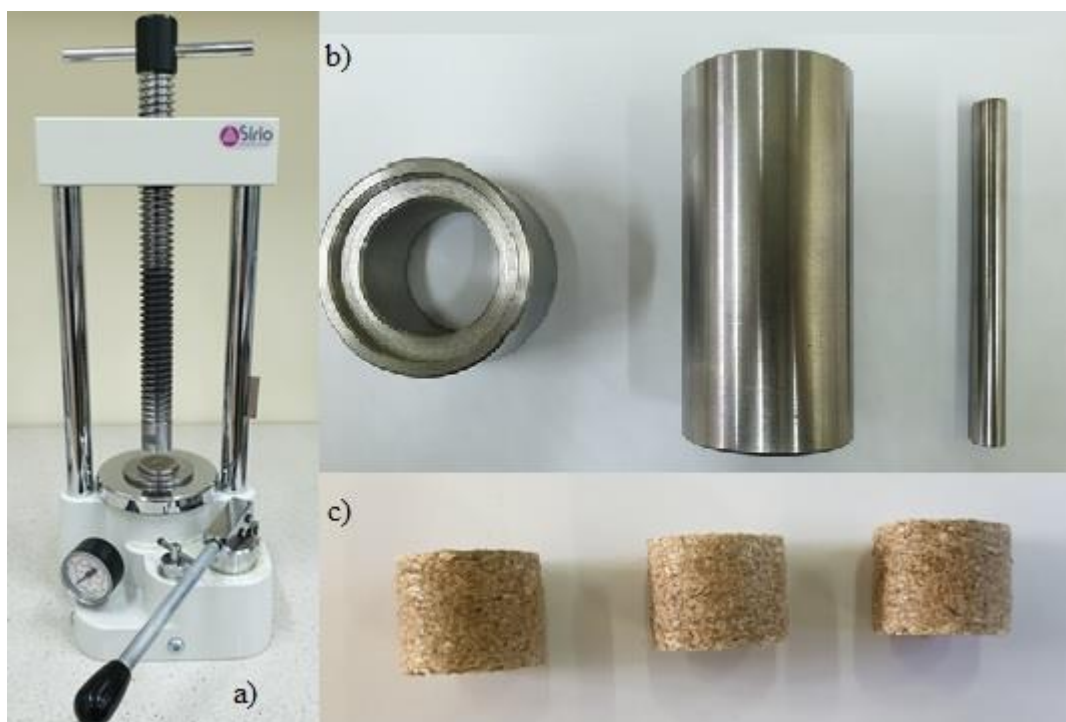
m_3 – naczynie pomiarowe z pokrywką oraz próbką po suszeniu (g).

Oznaczenie zawartości wilgoci analitycznej realizowano wg (PN-EN ISO 18134-3:2015-11, 2015).

5.3.3 Zagęszczanie w komorze zamkniętej

Po odpowiednim przygotowaniu materiału (skład ziarnowy, zawartość wilgoci) przystąpiono do badań procesu zagęszczania w komorze zamkniętej. Proces zagęszczania zrealizowano na prasie hydraulicznej (P400, Sirio, Włochy). Prasę wyposażono w zestaw zagęszczający składający się z otwartej tulei która podczas testu zamykana jest od góry tłokiem a od dołu przeciwtłokiem tworząc w ten sposób zamkniętą komorę o średnicy 12 mm (rysunek 16a). Masę próbki dobrano tak by po zagęszczeniu, utworzony pelet posiadał wysokość $h \leq$ jego średnicy. Przyjęto 5 poziomów ciśnienia zagęszczania: 130,8; 196,2; 261,6; 327; 392,4 MPa, co odpowiada sile zagęszczania odpowiednio: 14,8; 22,2; 29,6; 37 oraz 44,3 kN. Temperatura procesu zagęszczania była stała i wynosiła 20°C. Prędkość, z jaką zagęszczano materiał miała wartość 12,9 mm·min⁻¹. Dla jednego wariantu pomiarowego wykonano 5 peletów badawczych. Wytworzone granule umieszczono w szczelnie zamkniętych pojemnikach na 24 godziny po upływie których oznaczano ich masę, wysokość oraz parametry jakościowe tj. DE i DU .

Bardziej szczegółowy opis przebiegu procesu badawczego zamieszczono w publikacji autora (Styks i in., 2020). w której zaprezentowano również wyniki badań wpływu wilgotności materiału na poziomie 8; 11 i 14% na DE i DU uzyskanych granulatów. W pracy, do wspomnianego zakresu wilgotności dodano wyniki dla materiału w stanie suchym oraz o zawartości wilgoci na poziomie 13%. Po analizie uzyskanych wyników do etapu badań właściwych przyjęto, że materiał będzie w stanie suchym (jako materiał kontrolno porównawczy) oraz o wilgotności na poziomie 13%.



Rysunek 16. Stacja zagęszczająca: a - prasa hydrauliczna SIRIO P400, b - komora zagęszczająca oraz tłok, c- próbki

Źródło: Styks 2020 (Styks i in., 2020)

5.3.4 Oznaczenie parametrów jakościowych

Oznaczanie gęstości właściwej DE uzyskanych peletów zostało przeprowadzone wg metody przedstawionej w rozdziale 5.2.5 *Oznaczenie gęstości bezwzględnej*.

Do określenia wytrzymałości mechanicznej DU uzyskanych granул użyto testera wytrzymałości mechanicznej peletu i brykietu (Rysunek 18), lewa część modułu testującego (prostopadłościenna komora), spełnia wymogi co do geometrii i zasady działania zawarte w normie (EN ISO 17831-1:2016-02) (Rysunek 17).

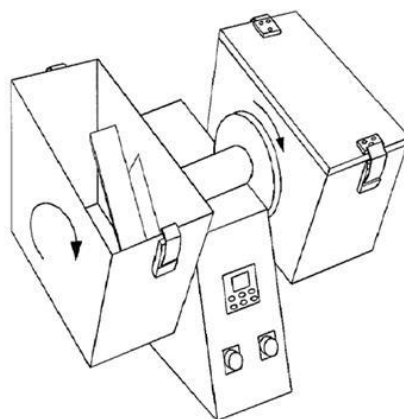
Procedura pomiarowa wymaga próbki peletu o masie $500 \text{ g} \pm 10 \text{ g}$. Komora z próbką obracać się ma z prędkością 50 obrotów na minutę przez 10 minut. Po tym czasie próbkę należy wyjąć z komory, przesiać przez sito o średnicy otworów 3,15 mm i ponownie zważyć. Wytrzymałość mechaniczna tak badanego granulatu wyznaczania jest z zależności:

$$DU = \frac{m_E}{m_A} * 100 \quad (7)$$

DU – wytrzymałość mechaniczna peletu (%),

m_E – masa próbki badanego peletu przed testem (g),

m_A – masa próbki badanego peletu po teście (g).



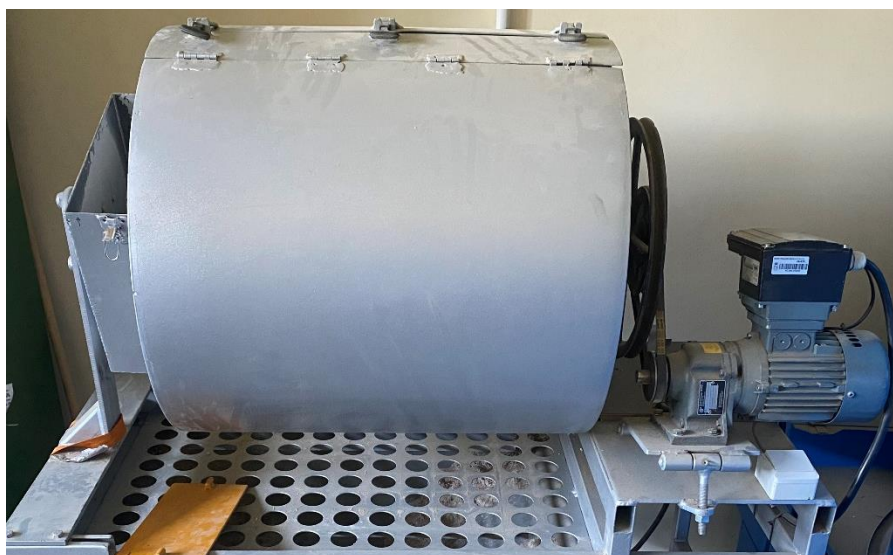
Rysunek 17. Stanowisko do określania wytrzymałości mechanicznej peletów wg Normy EN ISO 17831-1:2016-02

Źródło: własne

W badanym przypadku masa uzyskanych granul dla jednego wariantu pomiarowego była znacznie mniejsza niż wymagana. Dlatego też zdecydowano, że do oznaczenia *DU* wykorzystana zostanie metoda zmodyfikowana przez Wróbla (Wróbel, 2019)

Modyfikacja wprowadzona do metodyki polega na zastosowaniu materiału balastowego (wykonanego z polistyrenu) o gęstości właściwej około $1070 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, zbliżonej do gęstości właściwej typowego, wysokojakościowego peletu drzewnego (około $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Masa materiału balastowego, który został użyty wynosiła 500 g, a masa próbek poddanych badaniu nie przekroczyła 10 g, a więc łączna masa próbki była zgodna ze wytycznymi PN-EN ISO 17831-1:2016-02.

Kolejną wprowadzoną zmianą metody badawczej była redukcja prędkości, z jaką obraca się komora, w której umiejscowiony jest materiał. Na podstawie badań przeprowadzonych przez Wróbla (Wróbel, 2019) komora obracała się z prędkością 50 obrotów na minutę jednak tylko przez 5 minut. Uzyskane wyniki testu *DU* peletów badawczych nie są oczywiście tożsame z wynikami przeprowadzonymi wg PN-EN ISO 17831-1:2016-02 jednak ze względu na fakt że testy wszystkich uzyskanych peletów przeprowadzono przy takich samych parametrach testu, mogą być ze sobą porównywane, obrazują wpływ badanych czynników na uzyskaną wytrzymałość mechaniczną peletu i pozwalają na wskazanie która kombinacja czynników jest najlepsza.



Rysunek 18. Uczelniane stanowisko do oznaczania wytrzymałości mechanicznej biopaliw stałych

Źródło: własne

Konsekwencją przyjęcia zmodyfikowanej procedury testowej było też przyjęcie zmodyfikowanego sposobu obliczenia wartości DU . W tym przypadku DU obliczano dla każdego peletu osobno (w procedurze standardowej DU obliczana jest w odniesieniu do całej masy próbki). Jak podaje Wróbel, podczas testu DU okruszanie peletu w formie walca następuje tylko w obszarze jego podstaw, co za tym idzie masa rozkruszu peletów o różnej wysokości jest podobna. Jednak, obliczona wg wzoru wartość DU będzie różna bo dłuższy pelet ma większą masę od krótszego. Aby pominąć wpływ wysokości peletu na wynik DU , bazując na peletu i jego wysokości, należy obliczyć masę tzw. peletu zastępczego m_{E10} o wysokości h_{k10} równej 10 mm:

$$m_{E10} = \frac{m_{E10} * h_{k10}}{h_{k24}} \quad (8)$$

gdzie:

m_{E10} – masa peletu zastępczego [g],

h_{k24} – wysokość peletu po 24h [mm],

m_{E24} – masa peletu po 24h [g],

h_{k10} – długość peletu zastępczego [mm],

Następnym krokiem było wyznaczenie masy rozkruszu, czyli różnicy pomiędzy masą peletu przed testem m_{E24} a masą peletu po teście m_A :

$$m_R = m_{E24} - m_A \quad (9)$$

gdzie:

m_R – masa rozkruszu (g),

m_{E24} – masa peletu przed testem (g),

m_A – masa peletu po teście (g),

Bazując na powyższych danych wyznaczono masę peletu zastępczego po teście m_{A10} :

$$m_{A10} = m_{E10} - m_R \quad (10)$$

gdzie:

m_{A10} – masa peletu zastępczego po teście (g),

m_{E10} – masa peletu zastępczego (g),

m_R - masa rozkruszu (g).

Ostatnim krokiem było wyznaczenie wytrzymałości mechanicznej peletu zastępczego DU_{10} , według równania:

$$DU_{10} = \frac{m_{A10}}{m_{E10}} * 100 \quad (11)$$

gdzie:

DU_{10} – wytrzymałość mechaniczna peletu zastępczego (%),

m_{A10} – masa peletu zastępczego po teście (g),

m_{E10} – masa peletu zastępczego (g).

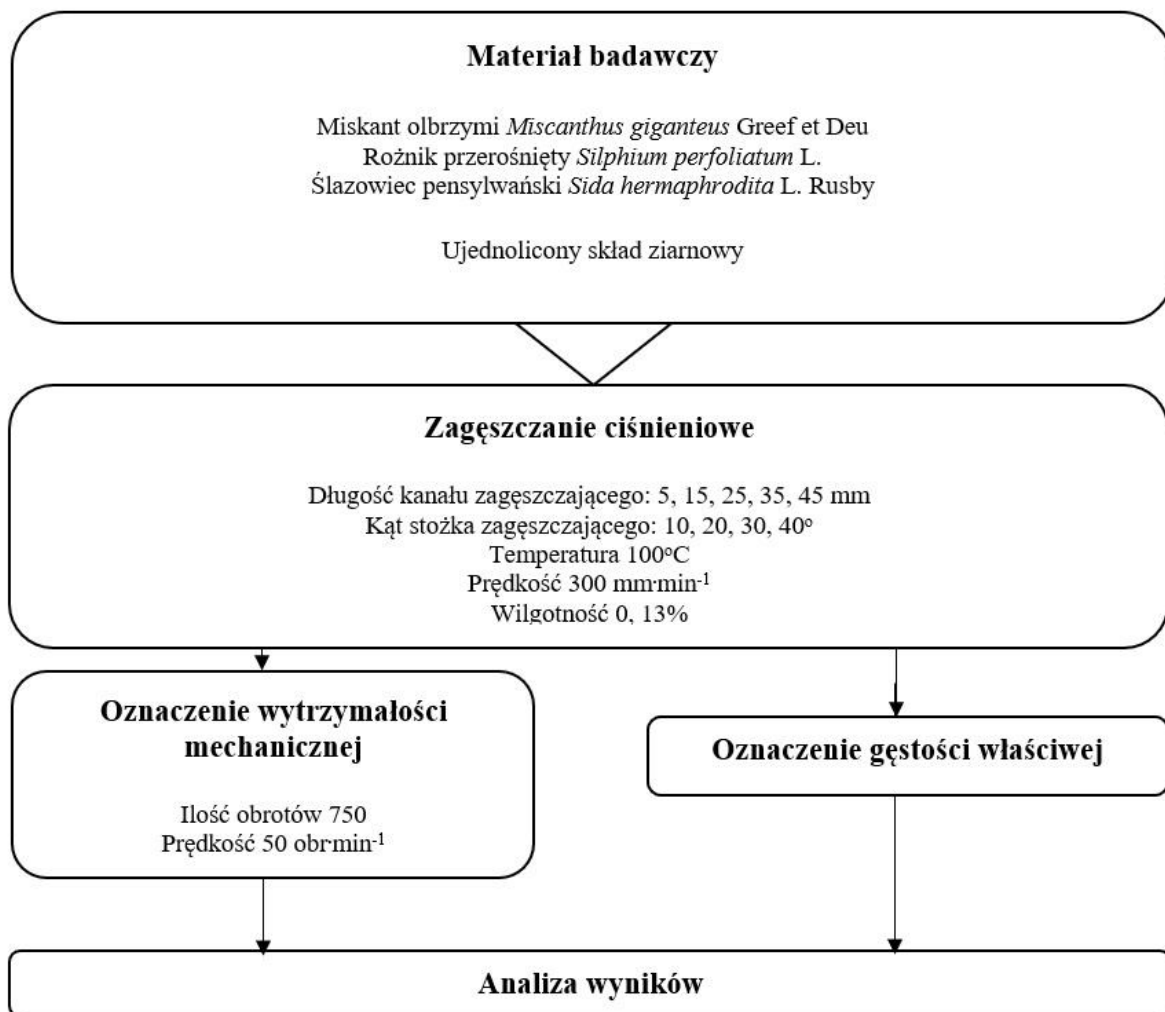
Tak uzyskane wartości DU peletów badawczych mogły być do siebie porównywane i nie zależały od wysokości peletów, która w zależności od warunków procesu zagęszczania przyjmowała różne wartości.

5.4 Badania właściwe

Na podstawie wyników uzyskanych na wcześniejszych etapach określono parametry materiału zagęszczanego na etapie badań właściwych. Przyjęto, że zagęszczany będzie nawilżony do poziomu 13%, dodatkowo zgęszczany będzie również materiał w stanie suchym jako materiał kontrolno porównawczy. W badaniach uwzględniony też zostanie wpływ temperatury procesu.

Celem tego etapu badań było określenie wpływu geometrii kanału zgęszczającego na parametry jakościowe uzyskanego peletu tj. gęstość właściwą DE a zwłaszcza wytrzymałość mechaniczną DU . Ze względu na powyższy cel, skupiono się na szerokim zakresie parametrów do dotyczących geometrii kanału przy minimalizacji wariantów zmienności cech surowca.

Szczegółowy schemat realizacji tego etapu badań został przedstawiony na rysunku 19.



Rysunek 19. Schemat badań właściwych

Źródło: własne

5.4.1 Projekt stanowiska badawczego oraz zagęszczanie ciśnieniowe

Plan badań zakładał, że realizacja tego etapu powinna jak najbardziej symulować proces zagęszczania realizowany w matrycach maszyn peletujących. Dlatego też, inaczej niż w przypadku większości badań dotyczących procesu aglomeracji biomasy na cele energetyczne, założono, że zagęszczanie materiału przebiegało będzie w komorze otwartej. Komora zagęszczająca, zgodnie z zaleceniami dotyczącymi konstrukcji matryc do peletarek wytwarzających pelet opałowy, składać się powinna z dwóch sekcji: cylindrycznej i stożkowej.

Zgodnie z definicją zawartą w PN-EN ISO 16559 pelet to zagęszczone biopaliwo wytworzone z biomasy z/lub bez dodatków, przyjmuje formę walca o maksymalnej średnicy 25 mm i długości do 40 mm (PN-EN ISO 16559:2022-06 Biopaliwa stałe -- Terminologia). W zależności od surowca z którego jest wytworzony dzielimy go na pelet drzewny i niedrzewny. W zależności od tego podziału, wymagane parametry jakościowe zawarte są w normach (PN-EN ISO 17225-2:2021-10) i (PN-EN ISO 17225-6:2021-12). Wg wytycznych jakościowych dotyczących peletu niedrzewnego (PN-EN ISO 17225-6), aby mógł on być zaliczony do klas jakości A i B, oprócz spełnienia innych wymagań, musi posiadać średnicę z zakresu 6 – 25 mm. W przypadku peletu drzewnego (PN-EN ISO 17225-2), klasy jakości A1, A2, i B dopuszczają tylko średnicę 6 i 8 mm. Biorąc pod uwagę powyższe, przyjęto, że pelety badawcze wykonywane będą w kanale zagęszczającym o średnicy 8 mm. Taki wybór podyktowany był kilkoma przesłankami. Po pierwsze, wymagało to będzie mniejszych gabarytów stanowiska niż w przypadku większych średnic i prawdopodobnie mniejszych sił zagęszczających. Po drugie, na rynku dominuje pelet o średnicy 6 i 8 mm. Po trzecie, wybór padł na średnicę 8 mm a nie 6 mm aby materiał rozdrobniony do $d < 1$ mm miał mniejszy wpływ na przebieg procesu, poza tym samo wykonanie segmentów stanowiska jest technologicznie łatwiejsze w przypadku średnicy 8 niż 6 mm. Testowane długości sekcji cylindrycznej to 5; 15; 25; 35 i 45 mm.

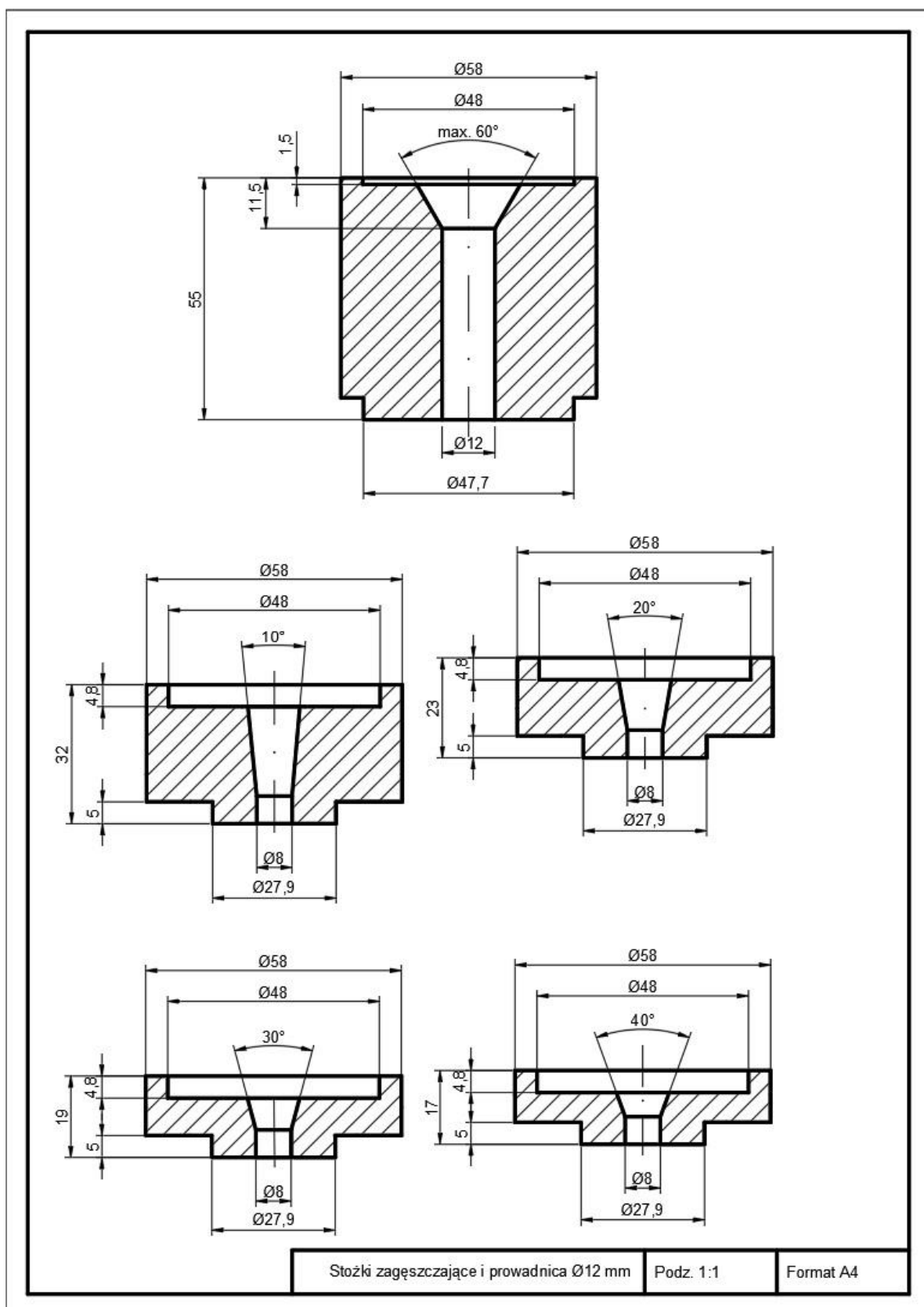
W przypadku części stożkowej, na podstawie danych literaturowych oraz danych producentów matryc przyjęto, że badany będzie stożek wejścia o kącie wierzchołkowym 10; 20; 30 i 40°. Przyjęto dwa warianty badawcze w których średnica podstawy stożka wynosi 12 i 10 mm. W obu przypadkach średnica ścięcia stożka jest równa średnicy części cylindrycznej i wynosi 8 mm.

Analiza powyższych danych i założeń pozwoliła przyjąć koncepcję stanowiska. Koncepcja ta zakłada że stanowisko będzie miało budowę modułową. W zależności od badanego wariantu geometrii, umożliwi to składanie kanału z modułu cylindrycznego i stożkowego. Oprócz modułów formujących pelet stanowisko składa się jeszcze z:

- modułu wprowadzającego – tuleja do której wprowadzana jest dawka materiału i w której porusza się tłok, podczas procesu zagęszczania tłok dochodzi do dolnej powierzchni czołowej tulei nie wchodząc do części stożkowej (symuluje to w przybliżeniu rzeczywiste warunki procesu peletowania gdzie rolka toczy się po powierzchni matrycy wtłaczając dawkę materiału do kanałów zagęszczających,
- modułu odbierający pelet – tuleja o większej średnicy niż część cylindryczna kanału zagęszczającego, umieszczona bezpośrednio pod nią. Pelet opuszczający kanał ulega tu częściowemu rozprężeniu i po odłamaniu może być odebrany, opisany i przekazany do dalszych badań,
- korpusu który łączy wymienione powyżej moduły w całość a jednocześnie jest zamontowany w uchwycie maszyny wytrzymałościowej,
- opcjonalnie grzałkę, termoparę i moduł sterowania temperaturą kanału zagęszczającego. Podczas badań, w wybranych wariantach badawczych, cały kanał zagęszczający podgrzewano temperatury 100°C.

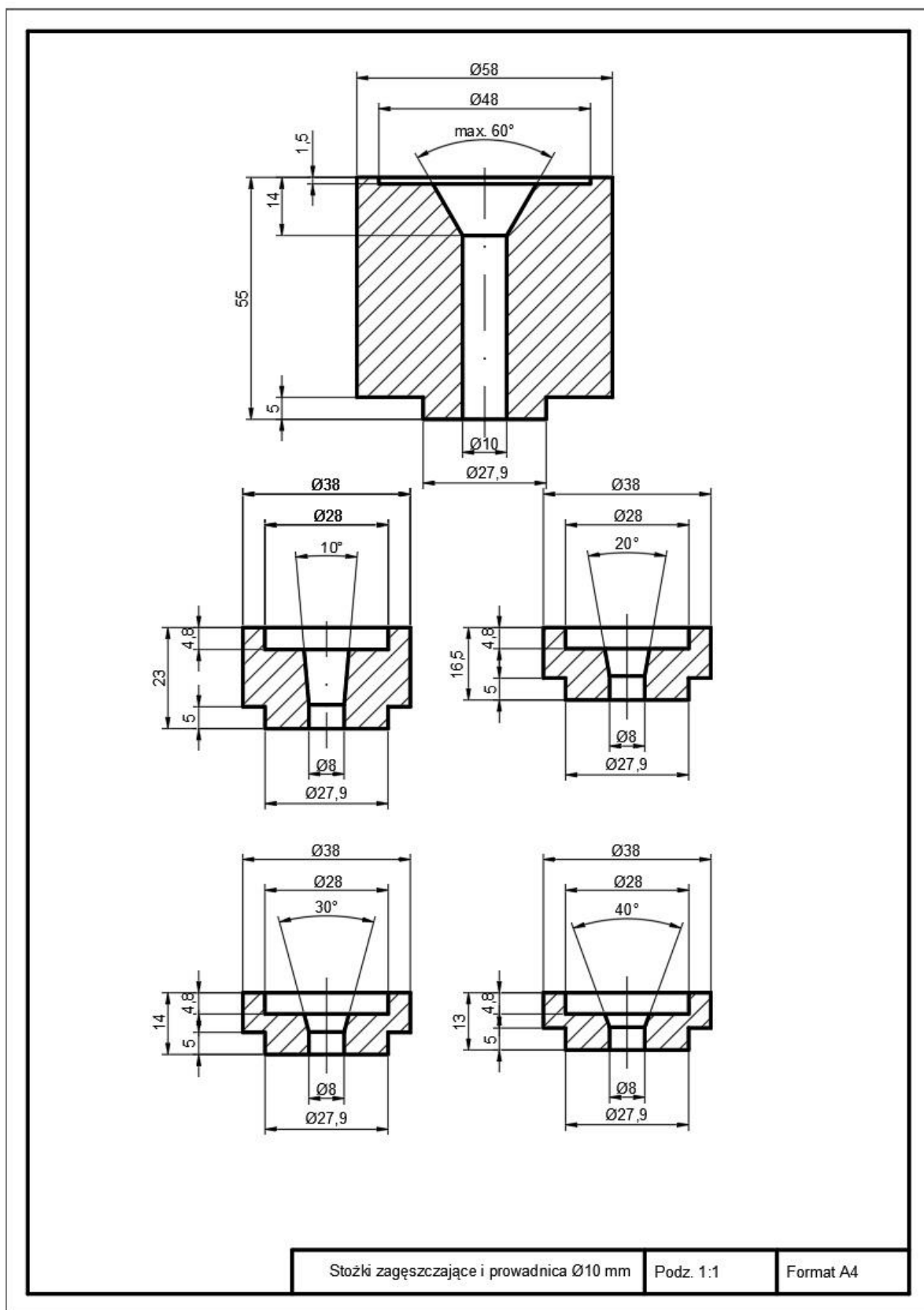
Przekroje poszczególnych modułów stanowiska przedstawiono na rysunkach 20, 21 oraz 22.

Wybrany do danego wariantu badawczego zestaw modułów umieszczano w korpusie a ten montowany był na uchwycie maszyny wytrzymałościowej Wance TestStar (rysunek 23). Prędkość przemieszczania tłoka wynosiła 300 mm·min⁻¹. Dawka materiału zagęszczana podczas jednego ruchu tłoka wynosiła 0,2 g, masę tą przyjęto na podstawie literatury (Nielsen i Mandø, 2020).



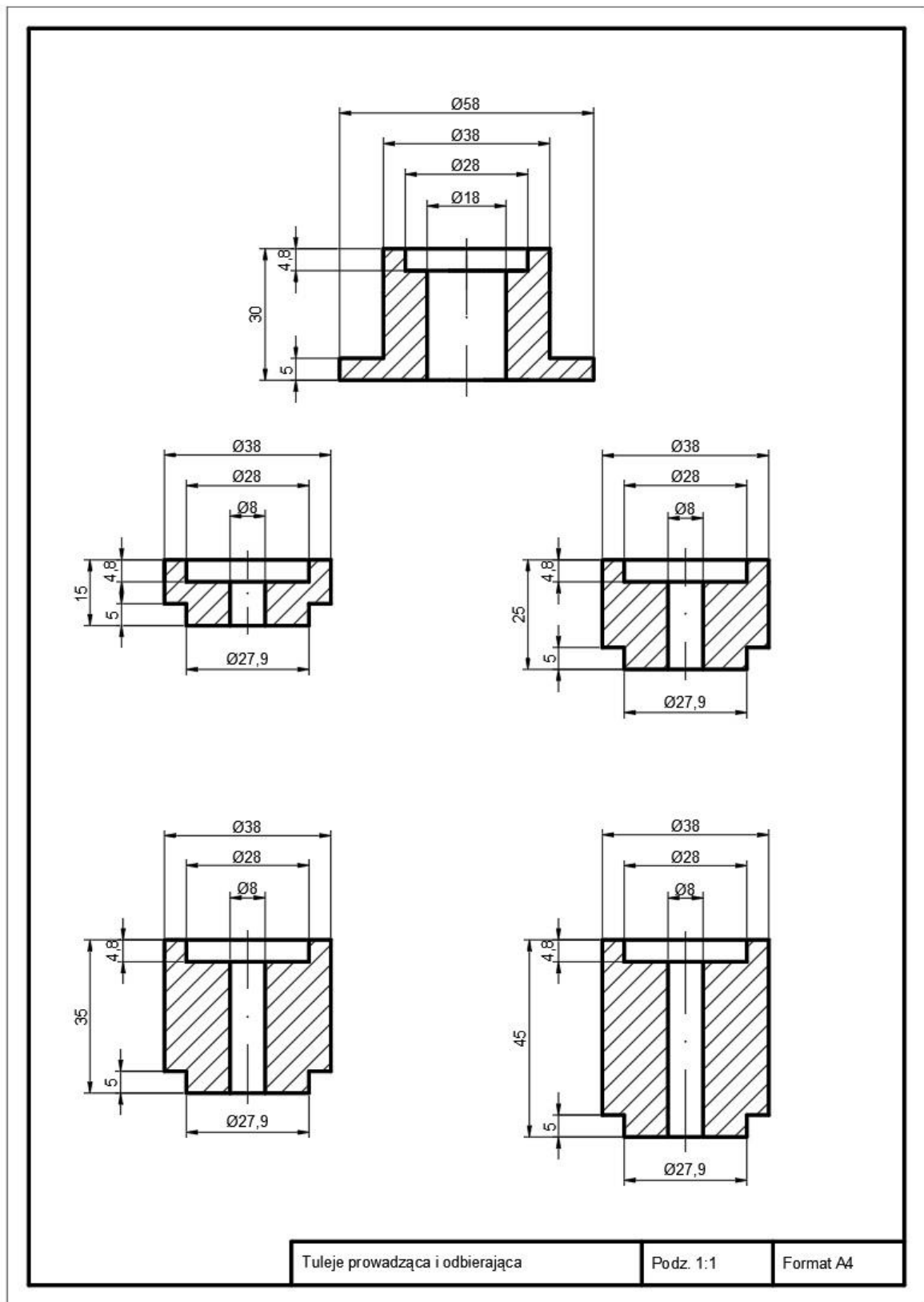
Rysunek 20. Moduł wprowadzający i moduły stożkowe $\varnothing 12$ mm

Źródło: własne



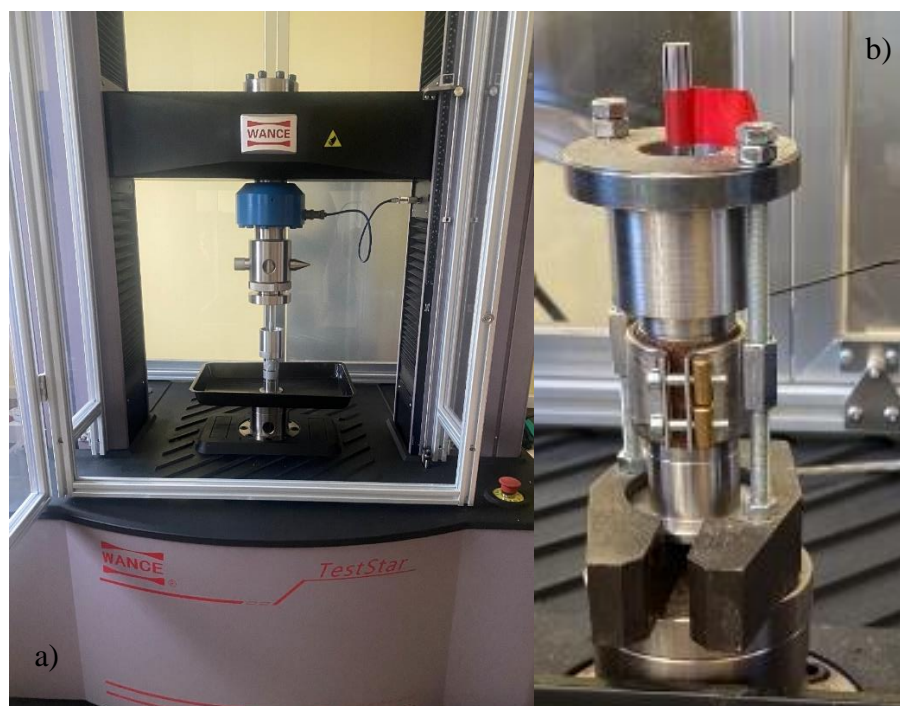
Rysunek 21. Moduł wprowadzający i moduły stożkowe ø10 mm

Źródło: własne



Rysunek 22. Moduł odbierający i moduły cylindryczne $\varnothing 8$ mm

Źródło: własne



Rysunek 23. Stanowisko badawcze: a - maszyna wytrzymałościowa Wance TestStar, b - modułowa przystawka zagęszczająca

Źródło: własne

Dla zapewnienia bezpieczeństwa podczas wykonywania pomiarów, wykorzystując bezpieczniki krańcowe w które wyposażona jest maszyna wytrzymałościowa wprowadzono warunki bezwzględnego przerwania testu. Miały one za zadanie przerwanie testu w momencie gdy tłok zaczął by wchodzić w część stożkową kanału i powodował by jej uszkodzenie. Niektóre warianty (zwłaszcza te dotyczące materiału w stanie suchym) wymagały wysokich wartości sił zagęszczających dlatego jako kolejny warunek przerywający proces badawczy ustawiono siłę zagęszczania na poziomie 120000 N. Przekroczenie tej siły skutkowało by trwałym uszkodzeniem stanowiska badawczego, ponadto są to wartości sił które wywołują ciśnienie niespotykane i niepożądane w rzeczywistym procesie zagęszczania.

Podczas testu rejestrowano przebieg zmiany siły w odniesieniu do przemieszczenia tłoka. Wartość siły maksymalnej przyjmowano za wartość siły powodujące zagęszczenie danego wariantu badawczego. Na jej podstawie określano ciśnienie wywierane na powierzchnię zagęszczanego materiału (powierzchnia podstawy stożka wejścia). Siła jak i wywierane ciśnienie jest parametrem który nie był zadawany podczas pomiaru a tylko rejestrowany. To geometria kanału, materiał, wilgotność i temperatura decydowała o tym jaka siła będzie musiała towarzyszyć procesowi. Inaczej mówiąc rejestrowano siłę jaką generuje dany wariant badawczy.

Dla każdego wariantu badawczego wykonywano po 6 - 7 peletów badawczych. Wytworzone pelety umieszczono w szczelnie zamkniętych pojemnikach na okres 24 godzin po upływie którego oznaczano ich masę, geometrię oraz parametry jakościowe tj. *DE* i *DU* jako mierniki wpływu geometrii kanału zagęszczającego na jakość uzyskanych peletów.

5.4.2 Oznaczenie parametrów jakościowych peletów

Podobnie jak w przypadku badań wstępnych, uzyskane pelety testowe oceniono pod kątem parametrów jakościowych tj. wytrzymałości mechanicznej i gęstości właściwej.

Jak już wspomniano wcześniej test *DU* bazujący na PN-EN ISO 17831-1:2016-0

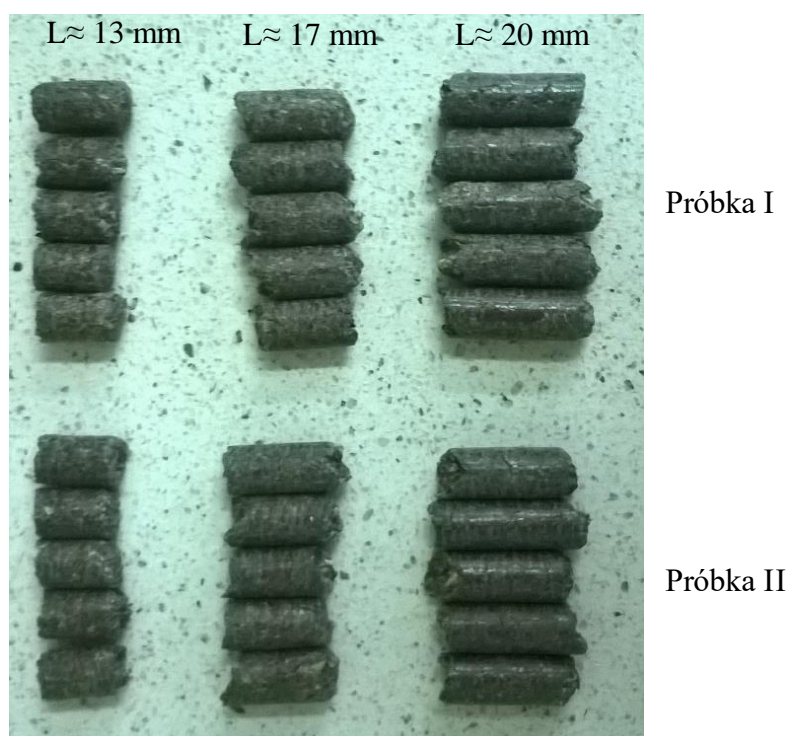
2,

a oparty na pomiarze wytrzymałości pojedynczych peletów w masie materiału balastowego, daje wynik który nie może być porównywany do wyniku testu przeprowadzonego wg PN-EN ISO 17831-1:2016-02. Dlatego też podjęto próbę opracowania testu *DU* pozwalającego określić ten parametr dla pojedynczego peletu a jednocześnie pozwalającego porównać uzyskany wynik do wyniku testu *DU* realizowanego wg wytycznych PN-EN ISO 17831-1:2016-02 bazującego na masie próbki 500 g. Taki test pozwoliłby na stwierdzenie, że jeśli dany materiał zagęszczany na testowanym wariantcie komory zagęszczania uzyskuje wytrzymałość mechaniczną peletu testowego spełniającą wymagania jakościowe, to również próbka takiego peletu o masie 500 g testowana wg klasycznej metody uzyska zbliżony wynik.

Założono, że test realizowany będzie w testerze zgodnym z wytycznymi normy PN-EN ISO 17831-1:2016-02, i zgodnie z nimi obroty komory wynosić będą $50 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$. Materiałem balastowym były kulki o średnicy 6 mm wykonane z tworzywa ABS (terpolimer akrylonitrylo-butadieno-styrenowy). Masa balastu to 950 g (taka masa balastu zajmuje taką samą objętość co 500 g próbka peletu). Przyjęto, że metody będą porównywalne, jeśli znajdziemy taką liczbę obrotów komory które dadzą wynik porównywalny do uzyskanego przez pelet w teście klasycznym. Badania realizowano na próbce peletu niedrzewnego o średnicy 8 mm wytworzonego z łuski słonecznika.

W pierwszym etapie, ze złoża materiału, pobrano 2 próbki peletu o masie 500 g i określono średnią długość *L* peletu w tych próbkach. Następnie z masy próbek wybrano po 5 peletów (tzw. peletów wskaźnikowych) o długości zbliżonej do 13; 17 i 20 mm i wykonano pomiary ich masy z dokładnością do 0,0001 g (AS 160.R2, RADWAG, Polska), oraz długości i średnicy (Rys. 24). Pelety te zostały oznakowane, umieszczone ponownie w masie próbek i poddane próbie *DU* wg wytycznych PN-EN ISO 17831-1:2016-02. Po przeprowadzeniu testu, oznakowane pelety wskaźnikowe zostały ponownie zważone a na bazie ich masy przed i po teście określono *DU* każdego z nich.

W drugim etapie, ze złoza materiału ponownie wybrano po 5 peletów o długości zbliżonej do 13; 17 i 20 mm i wykonano pomiary ich masy oraz geometrii. Pelety zostały oznakowane i tym razem umieszczone w materiale balastowym (kulki z ABS) znajdującym się w komorze testera. Po uruchomieniu testera sprawdzano wpływ liczby obrotów na wartość DU peletów. Testowano zakres obrotów od 200 do 1000. Co każde 100 obrotów, począwszy od 200, zatrzymywano test, wyjmowano z komory badane pelety i je ważono. Pozwoliło to na określenie jak w trakcie testu zmienia się ich masa a co za tym idzie DU .



Rysunek 24. Pelety wskaźnikowe z próbki klasycznego testu DU

Źródło: własne

Ostatnim etapem była analiza uzyskanych wyników i określenie jaka liczba obrotów powoduje uzyskanie przez pelety DU porównywalnej do DU uzyskanej przez pelety badane w masie wg procedury klasycznej. Wartość ta wyniosła 740 obrotów.

Wytrzymałość mechaniczna wszystkich uzyskanych peletów badawczych została oznaczona wg powyższej metody której parametry są następujące:

- komora testera zgodna z PN-EN ISO 17831-1:2016-02,
- prędkość obrotowa komory – $50 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$,
- materiał balastowy – kulki $\varnothing 6 \text{ mm}$ z tworzywa ABS, masa 950 g,
- liczba obrotów – 740.

Biorąc pod uwagę, że średnia długość testowego peletu ze słonecznika wynosiła 17 mm, i że masa rozkruszu niezależnie od długości peletu testowego jest do siebie zbliżona, podobnie jak w przypadku badań wstępnych, aby uniknąć wpływu długości peletu na wynik DU , wartość tego parametru oznaczono w odniesieniu do peletu zastępczego o długości l_{k17} wynoszącej 17 mm z zależności:

$$DU_{17} = \frac{m_{A17}}{m_{E17}} * 100 \quad (12)$$

gdzie:

DU_{17} – wytrzymałość mechaniczna peletu zastępczego (%),

m_{A17} – masa peletu zastępczego po teście (g),

m_{E17} – masa peletu zastępczego przed testem (g).

Masę peletu zastępczego m_{E17} wyznaczono z zależności:

$$m_{E17} = \frac{m_{E17} * l_{k17}}{l_{k24}} \quad (13)$$

gdzie:

m_{E17} – masa peletu zastępczego (g),

l_{k24} – długość peletu zastępczego (mm),

m_{E24} – masa peletu testowego (g),

l_{k17} – długość peletu zastępczego (mm),

Natomiast masę peletu zastępczego po teście m_{A10} , która stanowiła różnicę między masą granuli zastępczej m_{E17} a masą rozkruszu m_R wyznaczono z zależności:

$$m_{A17} = m_{E17} - m_R \quad (14)$$

gdzie:

m_{A17} – masa peletu zastępczego po teście (g),

m_{E17} – masa peletu zastępczego (g),

m_R - masa rozkruszu (g).

Z kolei masa rozkruszu, to różnica masy peletu przed m_{E24} oraz peletu po teście m_A :

$$m_R = m_{E24} - m_A \quad (15)$$

gdzie:

m_R – masa rozkruszu (g),

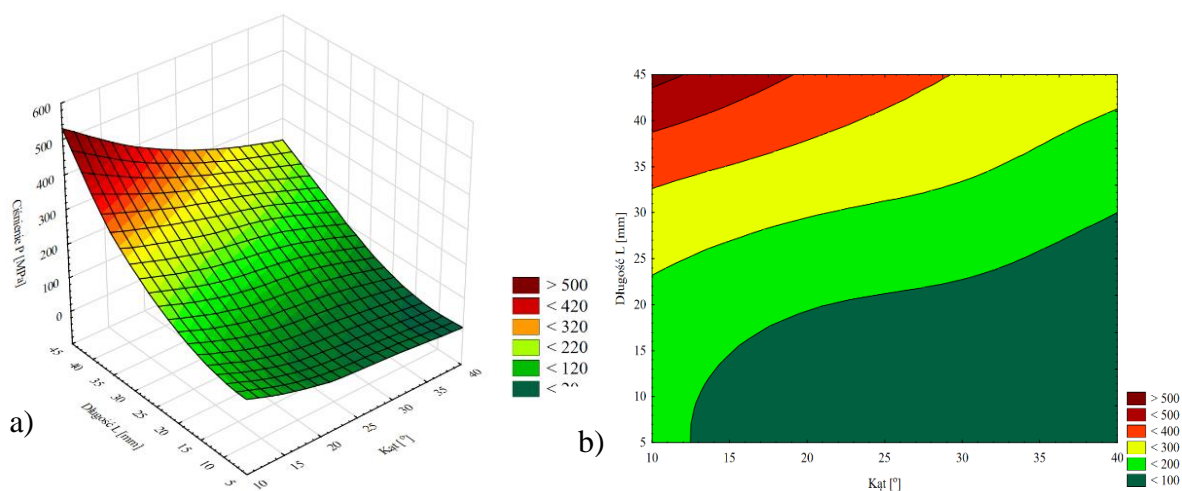
m_{E24} – masa peletu testowego (g),

m_A – masa peletu testowego po teście (g),

Oznaczanie gęstości właściwej peletów testowych zostało wykonane wg metody przedstawionej w rozdziale 5.2.5 *Oznaczenie gęstości bezwzględnej*.

5.4.3 Mapy zmian parametrów jakościowych peletu

Uzyskane wyniki pozwoliły na wyznaczenie przebiegów zmian ciśnienia, DE i DU w zależności od długości matrycy L dla danego kąta wejścia α . Zależności te, dla danego wariantu badawczego (materiał o określonych parametrach), przedstawiają osobno zmiany P , DE i DU co w znacznym stopniu utrudnia analizę i ostateczne wskazanie jaka geometria pozwala uzyskać wymagane progi DE i DU przy minimalnym ciśnieniu zagęszczania. Przestrzenne wykresy powierzchniowe dają w pewnym stopniu czytelniejszy obraz tych zależności, ale ponownie osobno dla każdego parametru (Rys. 25a). Przydatniejsze, z kolei są warstwiczne wykresy powierzchniowe na których można precyzyjnie wskazać która kombinacja L i α generuje dana wartość ciśnienia, gęstości lub wytrzymałości jednak w dalszym ciągu informacje te muszą być odczytywane z trzech wykresów (Rys. 25b).



Rysunek 25. Przykładowe wykresy powierzchniowe: a - przestrzenny, b - warstwiczny

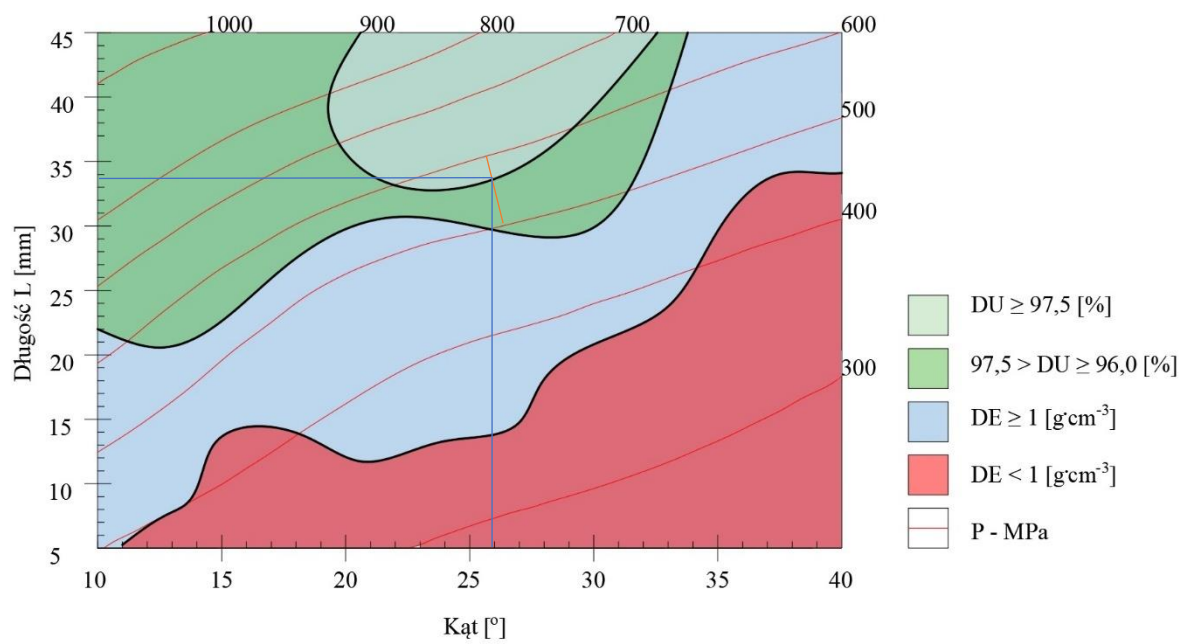
Źródło: własne

Zgodnie z powiedzeniem, jeden obraz zastępuje 1000 słów, pod warunkiem że ten obraz jest czytelny i zawiera niezbędne dane. Aby możliwy był odczyt wszystkich tych informacji z jednego wykresu powstała koncepcja połączenia wykresów warstwicznych w jeden tworzący, nazwaną tak na potrzeby pracy, mapę zmian parametrów jakości peletu na tle zmian ciśnienia zagęszczania. Mapa ta jednocześnie wskazywać powinna granice gdzie pelet osiąga

wymagane progi DU , DE oraz warstwy zmian ciśnienia. Teoretyczny przykład takiej mapy przedstawia rysunek 26. Mapa, niezależnie od analizowanych parametrów (P , DE , DU), obejmuje taki sam „obszar” zawierający zakres badanej długości sekcji cylindrycznej matrycy L (5-45mm) i kąta tworzącej sekcji stożkowej α (10-40°). Analizując przykładową mapę, możemy wyróżnić 4 obszary powstałe na bazie wyników badań i założonych progów. Obszar czerwony oznacza, że żadna kombinacja L i α będąca współrzędnymi punktów z tego obszaru nie pozwala uzyskać peletu o DE powyżej $1\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Obszar niebieski to pelety o $DE \geq 1\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ jednak jeszcze poniżej wymaganej wartości DU . Obszar ciemno zielony to pelet o $DE \geq 1\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ i DU z zakresu 96 – 97,5% Czyli spełniający wymagania jakościowe klasy B odnośnie peletu nieдрzewnego wg (PN-EN ISO 17225-6:2014-08). Dopiero obszar jasno zielony to strefa w której pelet uzyskuje $DE \geq 1\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ i $DU \geq 97,5\%$ a więc progi klasy A - najwyższej klasy jakościowej wymaganej przez wspomnianą normę. Zatem aby uzyskać wysokojakościowy pelet należy brać pod uwagę kąt α z zakresu 19-32° i długość kanału L powyżej 35 mm. Jeśli natomiast dodatkowo zależy nam na tym, aby procesowi zagęszczania towarzyszyło jak najniższe ciśnienie należy użyć matrycy o kącie α około 26° i długości L około 34 mm, wtedy ciśnienie zagęszczania wynoszące będzie w przybliżeniu 570MPa X (25,9; 33,8).

Mapy pozwalają w łatwy sposób określić który z parametrów jest łatwiejszy do uzyskania. Natomiast łączenie map (w tym przypadku informacja o przebiegu zmian ciśnienia musi być odczytywana z osobnych map – te same współrzędne, lub warstwy ciśnienia dla różnych materiałów zaznaczone muszą być różnymi kolorami) pozwala na obserwacje zmian w P , DE i DU powodowanych zmianą czynnika wpływającego na proces np. wilgotność, temperatura, materiał, stopień rozdrobnienia itp. z zakresu.

Opracowane mapy mają zatem potencjał by stać się uniwersalnym narzędziem do analizy procesu zagęszczania biomasy z uwzględnieniem wszystkich czynników na niego wpływających. Zaproponowane mapy stanowią nowe podejście do analizy wpływu geometrii kanału zagęszczającego na jakość uzyskiwanego peletu i pozwalają na dobór tej geometrii dla badanego materiału, wilgotności, temperatury procesu itd.



Rysunek 26. Przykładowa mapa zmian parametrów jakościowych peletu

Źródło: własne

6. Wyniki

6.1 Charakterystyka materiału badawczego

Celem sprawdzenia czy materiał badawczy posiada potencjał jako surowiec do produkcji biopaliw stałych określono główne parametry istotne z tego punktu widzenia (zawartość popiołu i ciepło spalania). Drugą grupą cech charakteryzujących materiał były parametry surowca mogące wpływać na proces zagęszczania tj. gęstość usypowa, właściwa i bezwzględna, skład ziarnowy uzyskany po etapie rozdrabniania, współczynnik tarcia.

6.1.1 Wartość opałowa

Dla każdego z materiałów oznaczono ciepło spalania w trzech powtórzeniach. Z otrzymanych wyników obliczono wartości średnie i zestawiono w tabeli 8. Najwyższy wynik uzyskano dla biomasy miskanta i wyniósł on $18,4 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$, a najniższe różnika ze średnią wartością na poziomie $17,5 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ przy wilgotności M_{13} wynoszącej 13%. Uzyskane wyniki przeliczono na wartość opałową przy wilgotności 12 i 15% (odpowiednio M_{12} i M_{15} w tabeli). W odniesieniu do normy PN-EN ISO 18125:2017-07 można zauważyć, że materiał charakteryzuje się wartością opałową na poziomie typowym dla biomasy zielonej, jednak wyższym niż wymagany przez normę. Wartości opałowe materiału badawczego, podobnie jak ciepło spalania, również spełniają kryterium normatywne. Można zaobserwować, że wraz ze wzrostem wilgotności materiału badawczego ciepło spalania, ale również wartość opałowa zmniejsza się. Najwyższą wartość opałową zarejestrowano dla miskanta - $17,12 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$. Najniższą wartością opałową charakteryzuje się różnik - $16,23 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$. Wartość opałowa odnosząca się do M_{12} odpowiada klasie jakościowej A, z kolei M_{15} klasie jakościowej B.

Tabela 8
Parametry materiału badawczego

Materiał	Miskant	Rożnik	Ślázowiec
Ciepło spalania stan suchy ($\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$)	21,14	20,1	20,45
Ciepło spalania M_{13} ($\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$)	18,4	17,5	17,8
Wartość opałowa M_{12} ($\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$)	17,12	16,23	16,52
Wartość opałowa M_{15} ($\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$)	16,45	15,6	15,88
Zawartość popiołu (%)	1,2	3,4	2,5

Źródło: własne

6.1.2 Zawartość popiołu

Wyniki zawartości popiołu w materiale badawczym w stanie suchym przedstawiono w tabeli 8. Badania wykazały, że najniższą zawartość procentową popiołu zawierała próbka miskanta, wynosiła ona 1,2%. Najwyższą zawartością popiołu charakteryzował się różnik z wynikiem 3,4%.

Norma PN-EN ISO 18122:2023-05 opisuje dopuszczalną zawartość popiołu dla dwóch klas jakościowych peletów. Dla klasy A dopuszczalna zawartość popiołu w suchej masie wynosi 6%, natomiast dla klasy B 10%. Odnosząc się do tych wartości można stwierdzić, że materiał badawczy mieści się w zakresie przewidzianym dla obu klas jakościowych.

6.1.3 Gęstość właściwa

Oznaczanie gęstości właściwej SD materiału badawczego w stanie suchym wykonano w trzech powtórzeniach dla każdego z materiałów. Wyniki zestawiono w tabeli nr 9. Najwyższą średnią gęstością właściwą charakteryzował się miskant - $412,7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Wyróżnia się on na tle pozostałych materiałów, ponieważ jego SD jest prawie dwukrotnie wyższa niż pozostałych materiałów. Najniższą wartość gęstości właściwej zaobserwowano u ślazowca - $229,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Różnik charakteryzuje się nieco wyższą niż ślazowiec wartością SD . Wyniki tych badań pokazują pośrednio na różnice w budowie pędów badanych roślin. Wszystkie gatunki charakteryzują się pędami wypełnionymi gąbczastym rdzeniem, zatem na wartość gęstości wpływa najprawdopodobniej gęstość zewnętrznej części pędu oraz stosunek objętości tej części do objętości wypełnienia. W przypadku miskanta, którego pędy mają najmniejszą średnicę spośród badanych gatunków, część zewnętrzna pędu ma największy udział i stąd wartość gęstości właściwej tego gatunku jest najwyższa.

Tabela 9
Średnie gęstości oraz porowatość materiału badawczego w stanie suchym

Materiał	Miskant	Różnik	Ślazowiec
Gęstość właściwa SD ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	412,7	234,9	229,1
Gęstość nasypowa BD ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	215	196	204
Gęstość bezwzględna AD ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1501,9	1493,2	1493,8
Porowatość zewnętrzna ε_z (%)	65,83	42,66	41,42
Porowatość wewnętrzna ε_w (%)	72,52	84,27	84,64
Porowatość całkowita ε_c (%)	90,61	90,98	91,00

Źródło: własne

6.1.4 Gęstość bezwzględna

Analizując wyniki pomiarów gęstości bezwzględnej AD , można zauważyć, że ponownie najwyższą wartością tego parametru charakteryzował się miskant - $1501,9 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-3}$ (tabela 9). Natomiast ślazowiec i rożnik uzyskały nieco niższe wartości AD . Uzyskane wyniki mieszczą się w zakresie $1561 - 1493 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ co wskazuje na to, że wybrane gatunki mimo przynależności do różnych rodzin systematycznych, posiadają szkielet zbudowany z wspólnego dla biomasy o zdrewniałych pędach, kompozytu lignocelulozowego, którego gęstość bezwzględna jest do siebie zbliżona w przypadku wszystkich materiałów i nie przekracza wartości $1560 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Prosiński, 1984).

6.1.5 Gęstość nasypowa

Wyniki pomiarów gęstości nasypowej BD wskazują, że najwyższą gęstością nasypową charakteryzuje się miskant - $215 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-3}$. Rożnik i ślazowiec uzyskały podobne, choć niższe, wyniki. Wynika to ze specyficznych cech materiałowych a dokładnie gęstości właściwej surowca, gdzie miskant również charakteryzuje się najwyższą wartością. Dzięki ujednoczonemu składowi ziarnowemu materiału oraz analizie w stanie suchym pominięto wpływ tych czynników na uzyskane wyniki. Wyniki zestawiono w tabeli 9.

6.1.6 Porowatość

Bazując na uzyskanych wartościach AD , SD i BD określono porowatość zewnętrzną ε_z , wewnętrzną ε_w i całkowitą materiału ε_c . Wyniki oznaczenia porowatości zestawiono w tabeli 9. Wynika z nich, że najwyższą porowatością zewnętrzną charakteryzował się miskant z wartością ε_z 65,83%. Najniższy wynik ε_z osiągnął ślazowiec uzyskując wynik 41,42%, a nieco wyższą rożnik. Z kolei w przypadku porowatości wewnętrznej ε_w , najwyższą wartość uzyskał ślazowiec (84,64%), i podobna do niego rożnik. W tym przypadku, wyraźnie ε_w charakteryzuje miskanta - 72,52%. Wartości porowatości całkowitej ε_c , wszystkich materiałów są porównywalne i mieszczą się w zakresie 90,6 - 91%. Porowatość zewnętrzna zależy od kształtu cząstek tworzących złożę rozdrobnionego materiału oraz tarcia pomiędzy nimi. W tym przypadku miskant charakteryzuje się złożem które cząstki lepiej się usypują w dostępnej przestrzeni. Wewnętrzna porowatość zależy natomiast od struktury wewnętrznej cząstek, i tu potwierdza się że ślazowiec i rożnik ma cząstki bardziej gąbczaste od miskanta (wyniki gęstości właściwej). Porowatość całkowita materiałów jest podobna więc w procesie zagęszczania taka sama objętość porów u wszystkich materiałów musi zostać usunięta by powstał pelet o wymaganej gęstości. Jednak analizując różnice w wartościach ε_z i ε_w pomiędzy materiałami można założyć że proces zagęszczania będzie przebiegł inaczej w zależności od materiału. Usunięcie porowatości zewnętrznej jest łatwiejsze, wymaga tylko dopasowania cząstek a co za

tym idzie mniejszych wartości ciśnienia. W przypadku porowatości wewnętrznej, proces musi trwale odkształcić strukturę wewnętrzną materiału co wiąże się z zastosowaniem wyższego ciśnienia (Pietsch, 2001)

6.1.7 Skład ziarnowy materiału

Materiał po I etapie mielenia ($d < 6$ mm) scharakteryzowano pod względem składu ziarnowego. Wyniki oznaczenia przedstawiono w tabeli 10. Analiza wyników ujawniła różnice w udziale procentowym poszczególnych frakcji materiału. Najliczniejszą grupą u miskanta była frakcja 2,8 mm i liczyła 21,2%. Rożnik najliczniejszą grupę odnotował we frakcji 0,5 mm i stanowiła ona 20,9% całego materiału badawczego. Z kolei ślazowiec charakteryzował się najwyższym udziałem frakcji 2,8 mm o wielkości 25,9%. Uzyskane wyniki wskazują, że pomimo tych samych warunków procesu mielenia, każdy z materiałów uzyskał inny skład ziarnowy. Dla przykładu, dla frakcji C_4 masa miskanta wynosiła 11,04, gdzie dla rożnika wartość ta była równa 20,96, a dla ślazowca 11,39%. Aby wyeliminować wpływ rozdrobnienia materiału na przebieg badań oraz otrzymane wyniki, postanowiono ujednoczyć skład mieszanek tak, aby dla każdego z materiałów był taki sam. To pozwoliło na redukcję ilości czynników, które mogły zaważyć na rezultacie badań.

Tabela 10
Udział procentowy frakcji materiałów badawczych

Wielkość frakcji [mm]	Udział procentowy [%]		
	Miskant	Rożnik	Ślazowiec
C_{10} : 6	10,53	0,42	0,52
C_9 : 3,15	17,87	0,33	2,20
C_8 : 2,8	3,342	0,28	25,86
C_8 : 2,8	21,25	20,76	25,25
C_7 : 2	17,59	20,13	12,37
C_6 : 1,4	4,59	14,04	8,49
C_5 : 1	4,57	11,82	4,65
C_4 : 0,5	11,04	20,96	11,39
C_3 : 0,25	8,21	10,37	8,82
C_2 : 0,1	0,28	0,65	0,33
C_1 : 0,075	0,20	0,23	0,11

Źródło: własne

Kolejny etap mielenia ($d < 1$ mm) spowodował dalszą redukcję cząstek materiału, który ponownie zbadano pod względem składu ziarnowego. Wyniki przedstawiono w tabeli 11. Analiza wyników ponownie ujawniła różnice w uzyskanym składzie ziarnowym zmielonych pędów miskanta, rożnika i ślazowca. I tak zauważono kolejne różnice między materiałami badawczymi. Biorąc pod uwagę poszczególne frakcje, najmniejsze różnice w udziale procentowym widać między rożnikiem a ślazowcem. Na ich tle wyróżnia się miskant, który posiada najmniej liczną frakcję C_4 – 30,2 g, z kolei największy udział frakcji C_2 – 21,4 g oraz C_1 – 11,1 g.

Tabela 11
Udział procentowy frakcji materiałów badawczych – etap II

Wielkość frakcji [mm]	Udział procentowy (%)		
	Miskant	Rożnik	Ślazowiec
C_4 : 1	30.2	38.9	37.5
C_3 : 0,5	35.8	33.5	34.7
C_2 : 0,25	21.4	16.8	19.6
C_1 : 0,1	11.1	8.8	7.5

Źródło: własne

Aby wyeliminować wpływ różnic w składzie ziarnowym materiału badawczego na przebieg badań procesu zagęszczania oraz otrzymane wyniki, postanowiono ujednoczyć skład mieszanek tak, aby dla każdego z materiałów był taki sam. To pozwoliło na redukcję ilości czynników, które mogły zaważyć na uzyskanych na kolejnych etapach wynikach badań.

6.1.8 Współczynnik tarcia

W tabeli 12 przedstawiono wartości uzyskanych współczynników tarcia statycznego oraz dynamicznego. Wyniki wskazują, że najwyższym współczynnikiem tarcia statycznego charakteryzuje się ślazowiec, z kolei najniższą wartość współczynnika osiągnął rożnik. Taka sama sytuacja ma miejsce w przypadku współczynnika tarcia dynamicznego. Wyniki te mogą mieć wpływ na siły obserwowane podczas procesu zagęszczania (Puig-Arnavat i in., 2016; Serrano i in., 2011; Tumuluru i in., 2011). Tarcie towarzyszące procesowi ciśnieniowej aglomeracji biomasy może wpływać zarówno pozytywnie jak i negatywnie na jego przebieg. Dzięki występowaniu współczynnika tarcia unika się ciągłego przepływu luźnej masy przez kanały zagęszczające, ponieważ materiał trąc o ściany matrycy zatrzymuje się w wąskich kanałach zagęszczających, co w dalszych etapach pozwala na odpowiednie jego zagęszczenie.

Z kolei zbyt duże tarcie może powodować zbyt duże siły towarzyszące procesowi zagęszczania co może skutkować blokowaniem komory zagęszczającej a nawet uszkodzeniem matrycy peletarki.

Tabela 12
Współczynnik tarcia materiału badawczego

Materiał	Miskant	Rożnik	Ślázowiec
Współczynnik tarcia statycznego	0,26	0,24	0,30
Współczynnik tarcia dynamicznego	0,25	0,22	0,27

Źródło: własne

6.2 Badania wstępne

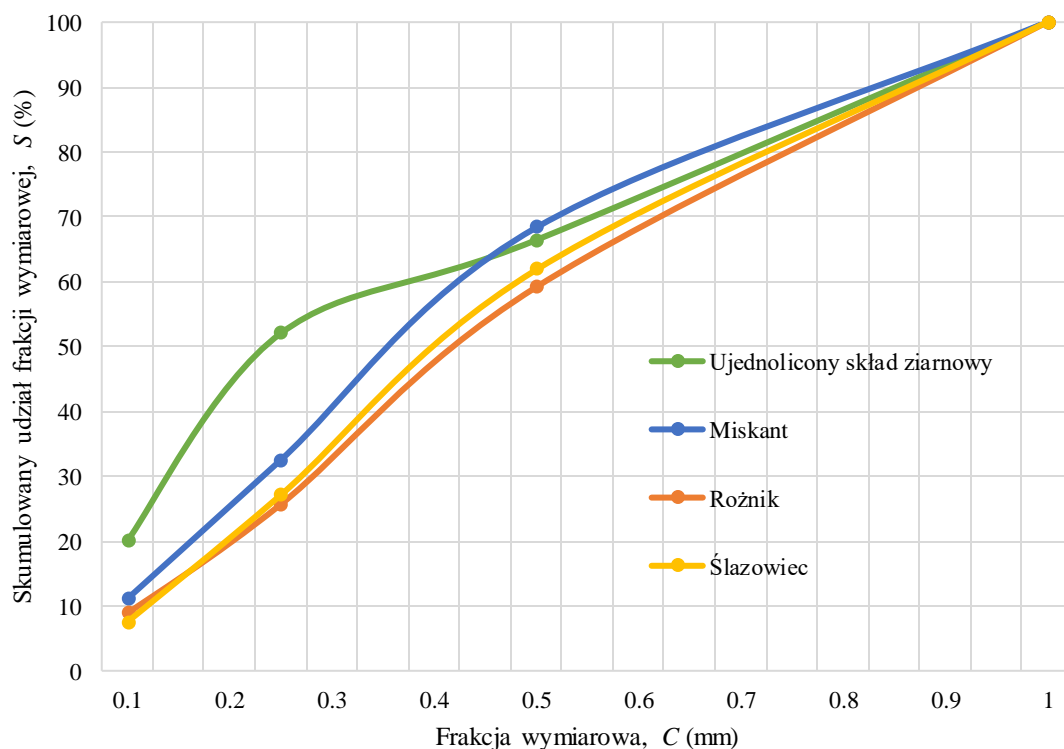
Znając charakterystykę surowca badawczego przystąpiono do badań wstępnych, które miały za zadanie wykazanie wpływu wilgotności oraz ciśnienia na jakość otrzymanego peletu badawczego. Badany zakres wilgotności mieścił się w przedziale 0 – 14% a ciśnienia w przedziale 130 – 392 MPa co odpowiada sile z zakresu 14,8 – 44,4 kN. Badanym parametrem jakościowym decydującym o wyborze poziomu wilgotności do dalszego etapu badań była wytrzymałość mechaniczna DU peletu. Badania realizowano w cylindrycznej komorze zamkniętej. Etap ten pozwolił w dużej mierze ograniczyć zakres czynników branych pod uwagę w etapie zagęszczania w tulejach otwartych.

6.2.1 Ujednolicenie składu ziarnowego

Jak wykazały wyniki badań składu ziarnowego materiału uzyskanego po etapach mielenia, mimo tych samych warunków prowadzenia procesu, uzyskane materiały różnią się pod względem tego parametru. A pominiąc wpływ tych różnic na przebieg procesu zagęszczania ujednolicono skład ziarnowy materiału. Na rysunku 27 przedstawiono skumulowane składy ziarnowe badanych materiałów rozdrobnionych do $d < 1$ mm. Różnice pomiędzy ślázowcem i rożnikiem są mniejsze niż pomiędzy miskantem. Celem wykazania różnic pomiędzy poszczególnymi materiałami w postaci jednego wyznacznika, obliczono średnią wartość wielkości ziarna d_{50} . Uzyskane wyniki wynosiły kolejno: miskant 0,37 mm, rożnik 0,42 mm oraz 0,41 ślázowiec. Wartości te potwierdzają fakt że miskant charakteryzuje się większym rozdrobnieniem niż ślázowiec i rożnik.

Korzystając z literatury (Wróbel, 2019) przyjęto zaproponowany tam skład ziarnowy mieszanek

o składzie podanym w rozdziale Metodyka. Skład ten charakteryzuje się zwiększonym udziałem frakcji najmniejszych. W rzeczywistości, podczas peletowania, materiał zmielony (o składzie takim jaki uzyskuje się po młynku) jest jeszcze rozdrabniany pomiędzy rołkami a powierzchnią matrycy, w badaniach tego nie da się zasymulować dlatego też zwiększenie udziału drobnych cząstek. Środkowa wartość wielkości ziarna d_{50} tej mieszanki wynosi 0,22.



Rysunek 27. Skumulowany skład ziarnowy materiału po mieleniu i mieszanki ujednoliconej

Źródło: własne

6.2.2 Oznaczenie wytrzymałości mechanicznej peletów

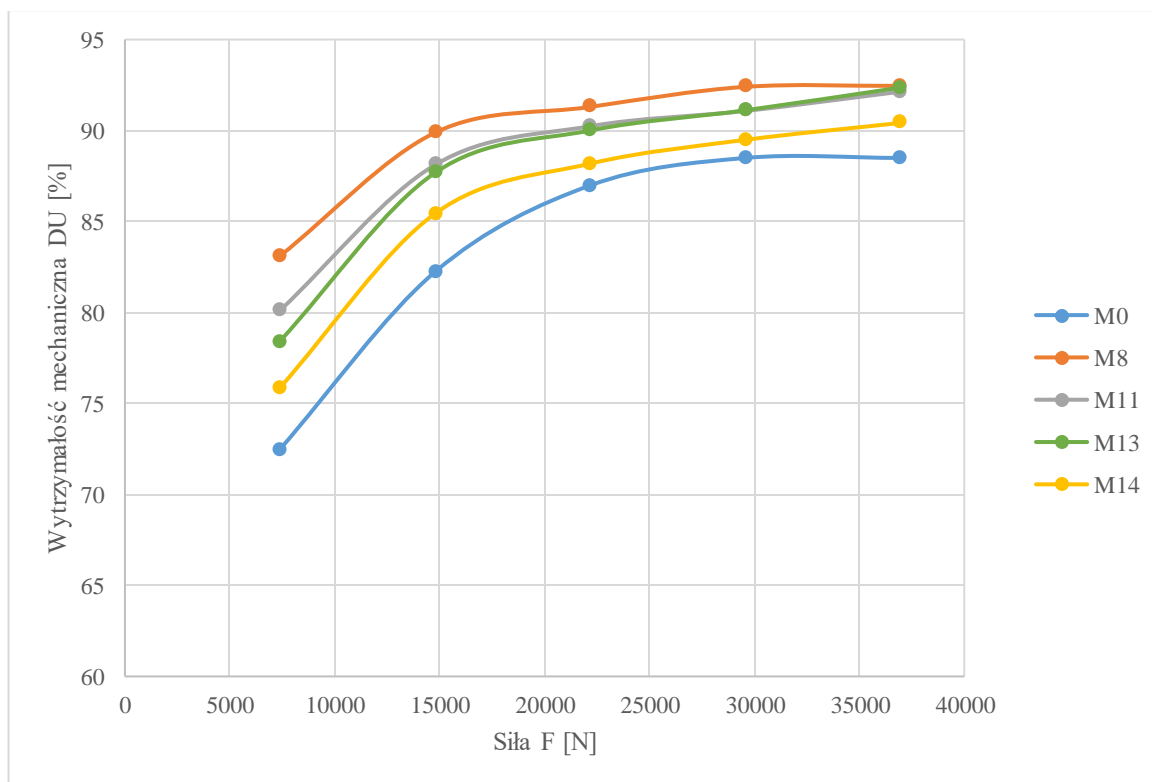
Analiza uzyskanych wyników DU peletów wytworzonych z ujednoliconych mieszanek miskanta, ślázowca i rożnika pozwoliły na wybór optymalnej wilgotności zagęszczanego na kolejnym etapie materiału. Szczegółowe wyniki badań dotyczące wpływu wilgotności z zakresu 8 – 14% na gęstość właściwą DE peletów zostały opublikowane w pracy autorskiej (Styks i in., 2020), z kolei wpływ wilgotności na rozpręż poaglomeracyjny zawiera publikacja (Styks i in., 2021).

Przebieg zmian DU w zależności od siły zagęszczania przedstawiono na wykresach (Rys. 28, Rys. 29, Rys. 30). Dane na wykresie stanowią uśredniona wartość DU peletów

uzyskanych dla danego wariantu badawczego. Wszystkie wyniki DU mieściły się w granicach powtarzalności wymaganych przez normę PN-EN ISO 17831-1 tj. dla $DU \geq 97,5 - 0,3\%$ a dla $DU < 97,5\% - 2\%$.

Miskant

Na rysunku 28 przedstawiono relację między siłą F zagęszczania a wytrzymałością mechaniczną wyprodukowanego peletu DU . Najniższą trwałością w całym zakresie wartości siły charakteryzował się materiał w stanie suchym. Może to wynikać z tego, że brak obecności wilgotności w surowcu nie wspomógł procesu powstawania wiązań międzycząsteczkowych. Granule te osypywały się i były nietrwałe już w momencie opuszczenia komory zagęszczającej. Podobnie niskim wynikiem charakteryzuje się mieszanka nawilżona do 14%. U peletów, po upływie 24h, zaobserwowano znaczny rozpręż tj. zwiększenie objętości w stosunku do objętości zmierzonej natychmiast po opuszczeniu komory zagęszczającej przez granulę. Świadczy to o tym, że 14% zawartości wody w materiale to zbyt duża wartość, aby nawiązać stałe połączenia między cząsteczkami. Granule rozklejały się i były nietrwałe. Najmniejszy ubytek masy w teście trwałości zarejestrowano dla materiału, który został nawilżony do 8%. Można zauważyć, że przy najwyższej sile procesu zagęszczania osiąga on podobne wyniki do mieszanki, która została nawilżona do 13%. Stosunkowo wysoką trwałość materiału można osiągnąć już przy sile nacisku równej 15 kN. Po przekroczeniu tej siły można zauważyć, że w przypadku najbardziej trwałych wariantów (8, 11 oraz 13%) wytrzymałość mechaniczna peletów nie rosła już tak efektywnie.



Rysunek 28. Wytrzymałość mechaniczna peletów wykonanych z miskanta - badania wstępne

Źródło: własne

Rożnik

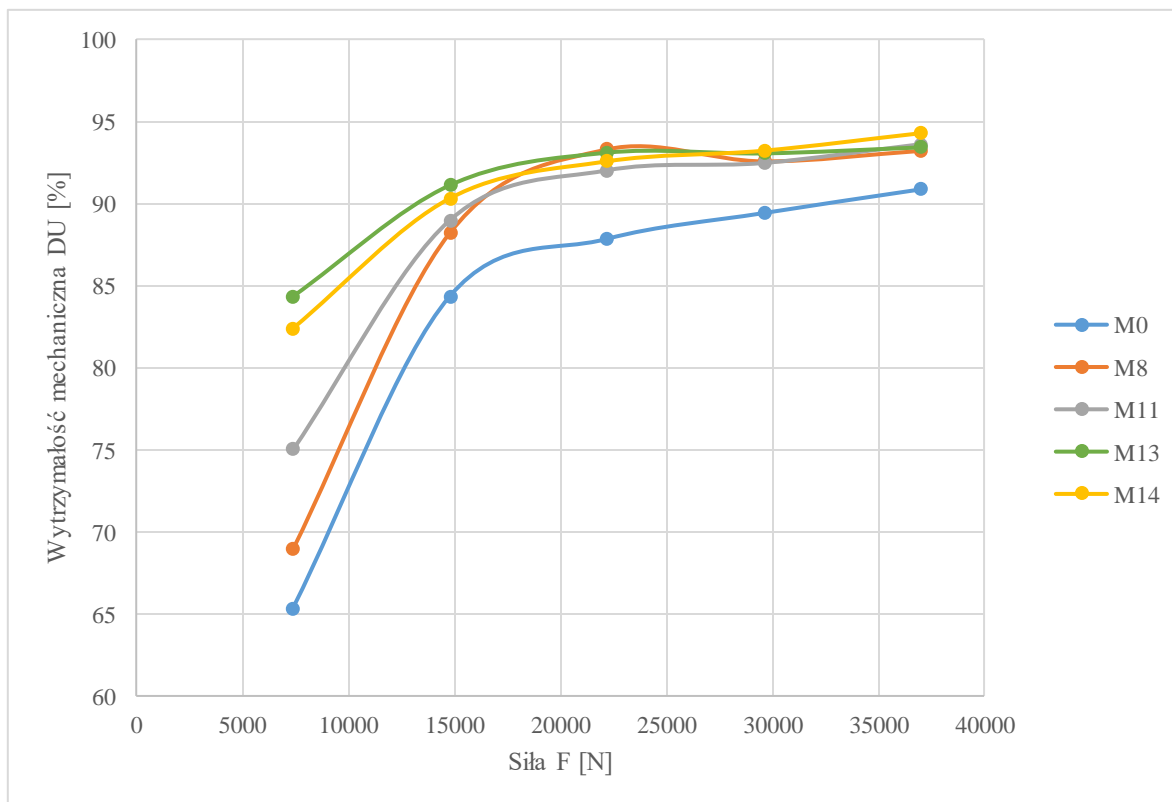
Podobnie jak w przypadku zagęszczania ciśnieniowego miskanta, rożnik został zagęszczony w pięciu seriach a uzyskane wyniki przedstawiono w postaci poniższego wykresu.

Tak jak i miskant, rożnik w stanie suchym osiąga najniższe wartości w kwestii wytrzymałości mechanicznej, osiągając DU niewiele ponad 90%. Z kolei najwyższą trwałość zaobserwowano w materiale nawilżonym do 14%, gdzie trwałość osiągnęła niespełna 95%. Niewiele niższą wytrzymałość można zauważyć w wariancie nawilżonym do 8, 11 oraz 13%. Porównując trwałość peletów wytworzonych z rożnika do granul z miskanta zarejestrowano, że granul z rożnika we wszystkich przypadkach charakteryzuje się wyższą wytrzymałością mechaniczną niż ten wykonany z miskanta.

Wyniki wskazują, że po przekroczeniu siły nacisku na materiał wielkości 15 kN jakoś, a dokładnie wytrzymałość mechaniczna peletu, nie wzrasta już tak efektywnie jak w niższych rejestrach siłowych, więc można stwierdzić, że przyrosty trwałości powyżej 15 kN nie są na tyle wysokie, aby były uzasadnione ekonomicznie.

Kolejną obserwacją wynikającą z przedstawionych wyników jest zbliżona wartość trwałości dla wilgotności 8, 11, 13, 14% w przedziale sił 15 - 35,5 kN. Wynika z tego, że rożnik jest dobrze zagęszczającym się materiałem w szeroki zakresie wilgotności, ponieważ

wilgotność materiału nie ma aż tak dużego wpływu na jakość peletu uzyskanego z tego surowca i odpowiednio dobrane pozostałe parametry pozwolą na odpowiednie zagęszczenie materiału. Oznacza to również, że wybierając wilgotność spośród wymienionych zakresów, możemy otrzymać relatywnie trwały produkt przy podobnym nakładzie siły.



Rysunek 29. Wytrzymałość mechaniczna peletów wykonanych z rożnika - badania wstępne

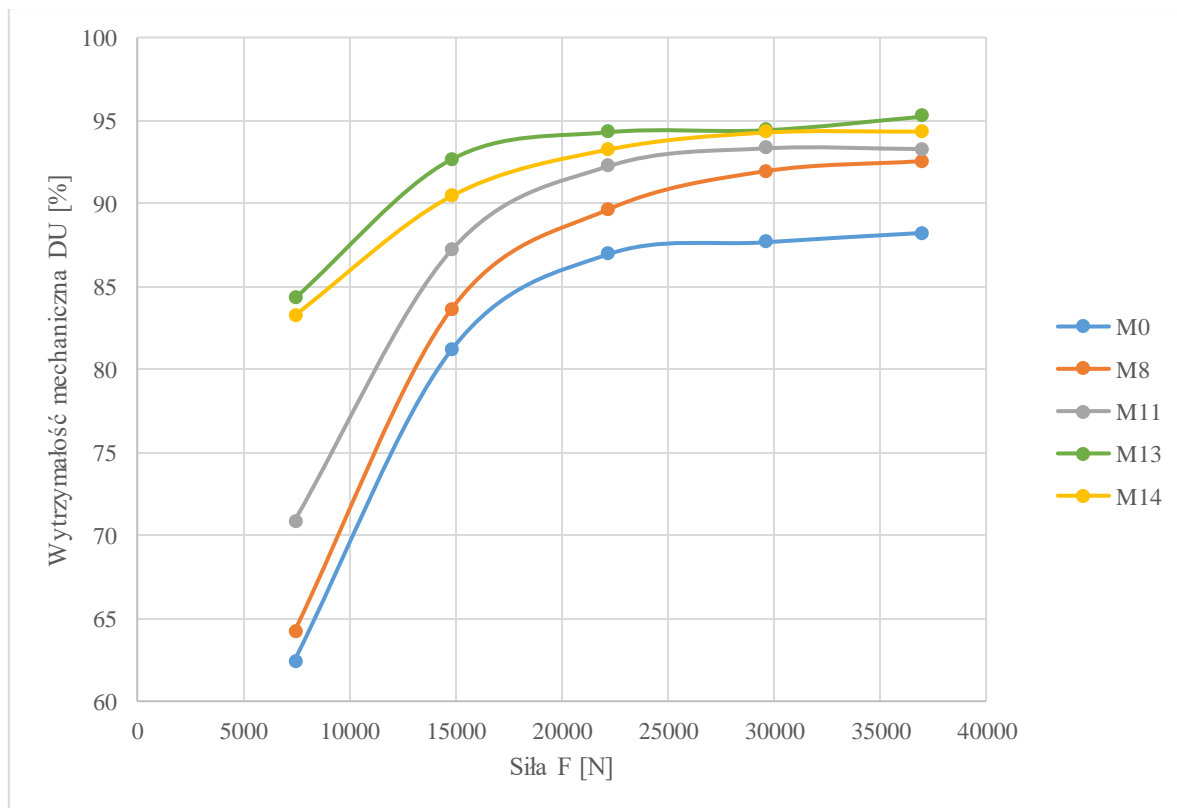
Źródło: własne

Ślázowiec

W przypadku tego materiału, największy wzrost DU ślázowca zarejestrowano w przedziale sił 7,5 – 15 kN, jednak nie był on na tyle wysoki, aby wartość uzyskanego DU była zadawalająca. Kontynuacja wykazała, że materiał w stanie suchym, jak w przypadku poprzednich zagęszczanych materiałów, charakteryzował się granulami o najniższej wytrzymałości mechanicznej, których trwałość nie przekroczyła 90%. Najwyższym wskaźnikiem DU opisano mieszankę ślázowca nawilżoną do 13%. Pelety zagęszczone przy sile 37,5 kN jako jedyny z badanych wariantów, przekraczają wytrzymałość mechaniczną na poziomie 95%. Można zauważyć, że w przedziale sił 15 - 37,5 kN mieszanki zwiększają swoją trwałość. Najniższym wzrostem jakości we wspomnianym przedziale charakteryzowała się mieszanka o nawilżeniu 13%, co oznacza, że już przy sile zagęszczania 15 kN jest możliwość

uzyskania trwałego produktu. Największy przyrost w tym zakresie zarejestrowano dla surowca o wilgotności 8%, który niemalże dorównał reszcie wariantów.

Mała zmienność trwałości dla 13% wilgotności powyżej 15 kN wskazuje na to, że jest to wystarczające ciśnienie do uzyskania odpowiedniego granulatu, a zwiększenie siły nie będzie powodować wzrostu wytrzymałości peletu. Wyniki przedstawiono na rysunku 30.



Rysunek 30. Wytrzymałość mechaniczna peletów wykonanych z ślázowca - badania wstępne

Źródło: własne

Badania wstępne wykazały wpływ zawartości wody w materiale na wytrzymałość oraz gęstość wytworzonych peletów. Wykazano, że w przypadku miskanta, najwyższe parametry wytrzymałościowe pelet osiąga przy wilgotności równej 8%, jednak przy wyższych wartościach siły z badanego przedziału, DU peletu z materiału o wilgotności 11 i 13% jest porównywalna do tych o wilgotności 8%. W przypadku rożnika najlepszy jakościowo okazał się materiał o wilgotności 8 - 14%. Ślázowiec przy wilgotności 14% osiągnął najlepsze rezultaty wytrzymałościowe ale wilgotność 13% daje podobną wytrzymałość peletu. Według powszechnie dostępnej literatury optymalnym zakresem wilgotności materiału zagęszczanego jest przedział 8 – 18% (Serrano i in., 2011; Tumuluru i in., 2011).

Węższy zakres został zaproponowany przez Oberbergera i Theka, ponieważ zakłada on wilgotność na poziomie 8- 12% (Oberberger i Thek, 2004). Wiele badań wykazuje zależność między zawartością wody w materiale a wytrzymałością mechaniczną produktu

finalnego. Samuelson (Samuelsson i in., 2012) wykazał, że wytrzymałość mechaniczna peletów wytworzonych z sosny o wilgotności 8,1% charakteryzowała się wytrzymałością na poziomie 91,8% w sytuacji, gdy dla 10,7% wynosiła ona 96,9%, natomiast dla 13,1% zaobserwował spadek wytrzymałości mechanicznej o około 70%. Colley (Colley i in., 2006) określił, że pelety wykonane z prosa o wilgotności około 6-8% przechodziły test wytrzymałościowy w 96%, z kolei wraz ze wzrostem zawartości wody zauważył spadek wytrzymałości do 78% przy nawilżeniu materiału do 17%. Ishii (Ishii i Furuichi, 2014) w swoich badaniach stwierdził, że zwiększając wilgotność materiału z 15% do 20% można zaobserwować wzrost wytrzymałości aglomeratu, jednak nie jest możliwe porównanie do siebie różnych materiałów, ponieważ zwykle są zagęszczane w innych warunkach, są innego pochodzenia itp.

Biorąc pod uwagę powyższe informacje jak i wyniki badań własnych, za wspólny poziom wilgotności pozwalający uzyskać pelety o wysokiej wytrzymałości mechanicznej, uznano poziom 13%. Wybór ten był umotywowany tym, że ten poziom zawartości wody mieści się w zakresie proponowanym przez autorów wielu prac, a pelety wytworzone w ramach badań wstępnych nie były znacznie gorsze jakościowo od tych, wytworzonych w niższej wilgotności. Kolejnym argumentem przemawiającym za utrzymaniem tego poziomu wilgotności był fakt, że znacznie łatwiej jest utrzymać tę wilgotność materiału niż niższe oraz wyniki badań na materiale o poziomie wilgotności 13% były bardziej stabilne od pozostałych poziomów (8% oraz 14%) (Styks i in., 2020).

6.3. Badania właściwe

Celem tych badań było określenie wpływu geometrii kanału zagęszczającego na jakość uzyskanego peletu (DE i DU) w wyniku ciśnieniowej aglomeracji biomasy oraz rejestracja siły towarzyszącej temu procesowi. W efekcie, wyniki powinny pozwolić wskazać, właściwą dla danego materiału, geometrię kanału pozwalającą uzyskać wysokojakościowy pelet.

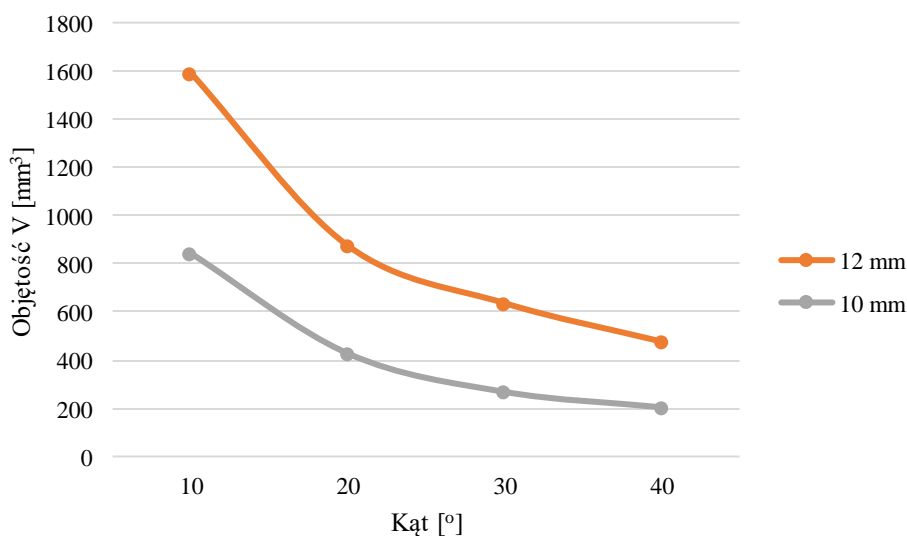
6.3.1 Proces zagęszczania na autorskim stanowisku badawczym

Na tym etapie, jak już wspomniano, materiał badawczy stanowiła biomasa miskanta, roznika i ślazuca o ujednoliconym składzie ziarnowym w stanie suchym i nawilżona do poziomu wilgotności 13%. Parametry te przyjęto w oparciu o uzyskane wyniki badań wstępnych jak również posiłkując się danymi zawartymi w literaturze. Ponadto, opierając się na danych literaturowych przyjęto, że w jednym wariantcie badawczym temperatura kanału będzie wynosiła 100°C (Larsson i in., 2013; Nielsen i in., 2020b; Puig-Arnabat i in., 2016; Serrano i in., 2011; Tumuluru i in., 2011). Stałymi parametrami procesu ciśnieniowej aglomeracji były: prędkość przemieszczania tłoka 300 mm·min⁻¹ oraz wielkość dawki materiału wynosząca 0,2 g. Wielkość dawki została przyjęta na podstawie (Nielsen i Mandø, 2020) oraz

obserwacji procesu zagęszczania biomasy na rzeczywistych stanowiskach do produkcji peletu. Dawka odpowiada warstwie materiału, jednorazowo wtlaczanej przez rolkę pelecarki do kanału matrycy.

Badania wykonano w dwóch etapach dla 3 kombinacji parametrów materiału badawczego: 1 - stan suchy, 2 - wilgotność na poziomie 13%, 3 – materiał nawilżony do poziomu 13% oraz podgrzanie elementów roboczych kanału zagęszczającego do 100°C.

Etap pierwszy to zagęszczanie materiału przy użyciu tulei o średnicy sekcji stożkowej 12 mm schodzącej do średnicy sekcji cylindrycznej 8 mm. Etap drugi to sekcja stożkowa o średnicy 10mm schodząca do średnicy sekcji cylindrycznej 8 mm. Pozwoliło to sprawdzenie jak zmieniają się siły towarzyszące procesowi i jakość peletu gdy sekcja stożkowa zmieni objętość. W każdym etapie testowano 4 wartości kąta wierzchołkowego sekcji stożkowej (10°, 20°, 30°, 40°). Ze względu na stałe wymiary średnic sekcji stożkowej (12 do 8 i 10 do 8mm) wraz ze zmianą kąta zmianie ulegała wysokość tej sekcji i jej objętość. W objętości tej sekcji zachodzi głównie proces zagęszczania dawek materiału. Zależność objętości sekcji stożkowej w zależności od jej kąta wierzchołkowego przedstawiono na rysunku 31.



Rysunek 31. Wykres zmiany objętości stożków zagęszczających

Źródło: własne

Ostatecznie zagęszczanie gotowych mieszanek materiału przeprowadzono w sześciu seriach:

- 1) Zagęszczanie materiału w stanie suchym z przejściem ze średnicy wlotowej 12 mm na kanał zagęszczający 8 mm,
- 2) Zagęszczanie materiału nawilżonego do 13% z przejściem ze średnicy wlotowej 12 mm na kanał zagęszczający 8 mm,

- 3) Zagęszczanie materiału nawilżonego do 13% w obecności temperatury 100°C z przejściem ze średnicy wlotowej 12 mm na kanał zagęszczający 8 mm,
- 4) Zagęszczanie materiału w stanie suchym z przejściem ze średnicy wlotowej 10 mm na kanał zagęszczający 8 mm,
- 5) Zagęszczanie materiału nawilżonego do 13% z przejściem ze średnicy wlotowej 10 mm na kanał zagęszczający 8 mm,
- 6) Zagęszczanie materiału nawilżonego do 13% w obecności temperatury 100°C z przejściem ze średnicy wlotowej 10 mm na kanał zagęszczający 8 mm.

W wyniku realizacji badań procesu uzyskano pelety badawcze, których parametry jakościowe oceniono po 24 godzinach. Przykład takich peletów przedstawiano na rysunku 32.

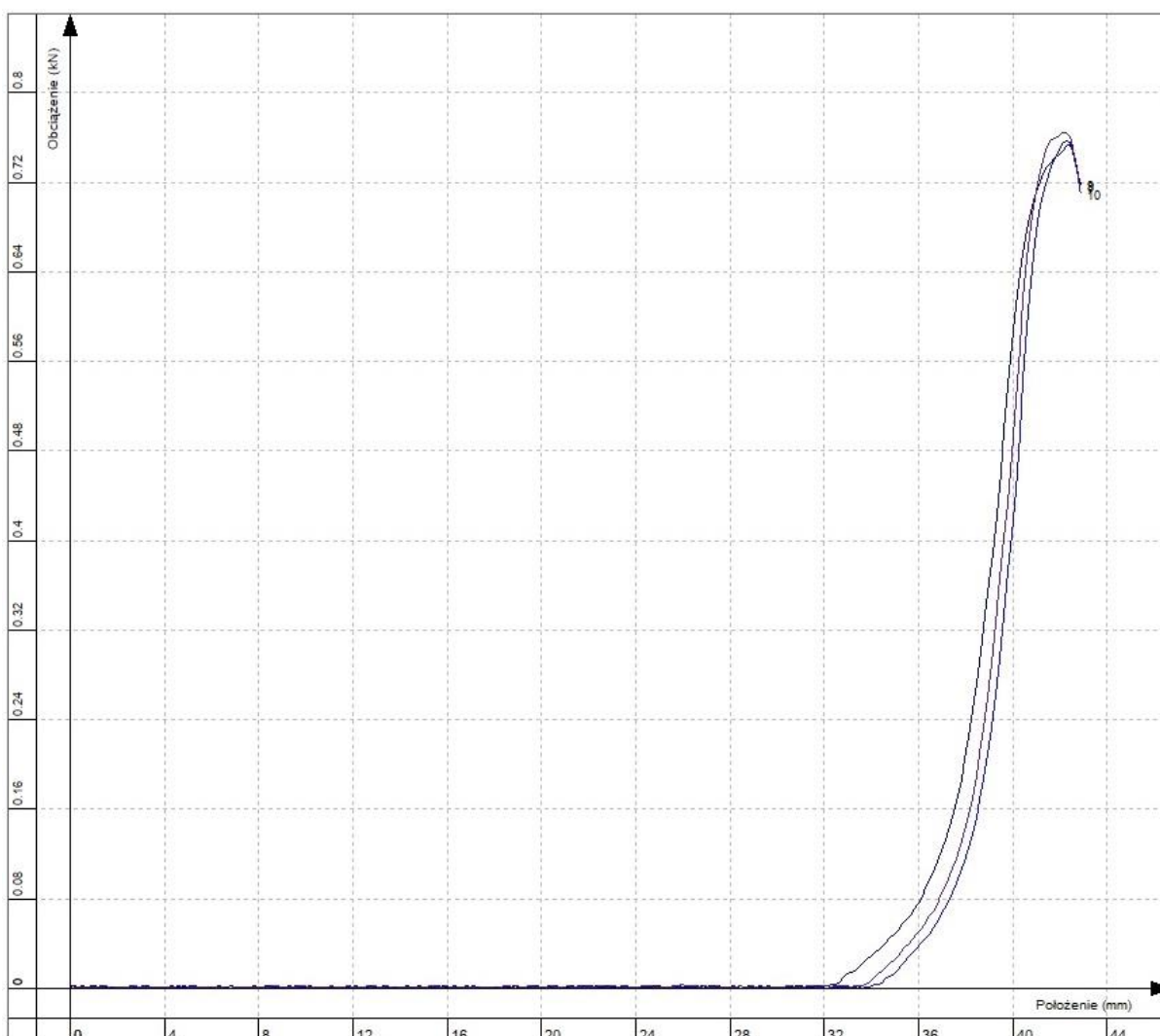


Rysunek 32. Przykład peletów testowych wytworzonych z biomasy rożnika

Źródło: własne

Jak już wspomniano podczas próby nie zadawano konkretnej wartości siły tylko przemieszczenie tłoka. Aplikacja sterująca maszyną wytrzymałościowa rejestrowała wartość siły towarzyszącej procesowi (kN) i przemieszczenie tłoka (mm) a uzyskane dane wizualizowała w postaci wykresu. Na rysunku 33 przedstawiono przykładowe wykresy zarejestrowane podczas procesu ciśnieniowego zagęszczania. Do dalszych analiz archiwizowano maksymalna wartość siły. Można zauważyć, że wykresy przedstawione na rysunku mają zbliżony przebieg do procesu zagęszczania zilustrowanego przez Pietscha (Pietsch, 2001) Wzrost siły następuje w momencie uzyskania kontaktu powierzchni tłoka z powierzchnią zagęszczanego materiału (po przesunięciu tłoka o około 32 mm). Widoczne są następnie charakterystyczne dla procesu ciśnieniowej aglomeracji etapy tj. etap wzajemnego przemieszczenia cząsteczek (32 – 36 mm), deformacja elastyczno-plastyczna (36 – 42 mm), po uzyskaniu siły maksymalnej, charakterystycznej dla danego wariantu badawczego i danej geometrii kanału, następuje ruch materiału w kanale z jednoczesnym spadkiem siły potrzebnej

do przesunięcia peletu (42 – 44 mm). Materiał po przejściu przez cały badany kanał matrycy opuszczał ją w postaci peletów testowych i poddawany był stabilizacji i oznaczeniu DE i DU .



Rysunek 33. Przykładowe wykresy zagęszczania biomasy

Źródło: własne

Pierwszą zależnością, jaka została wyznaczona na podstawie uzyskanych wyników, była zależność pomiędzy siłą F towarzyszącą procesowi a długością sekcji cylindrycznej L . Każda kolejna seria dotyczy kąta rozwarcia stożka $\alpha = 10^\circ; 20^\circ; 30^\circ$ oraz 40° . Zależności te, dla danego materiału i wariantu badawczego, przedstawiono w postaci wykresów.

Miskant

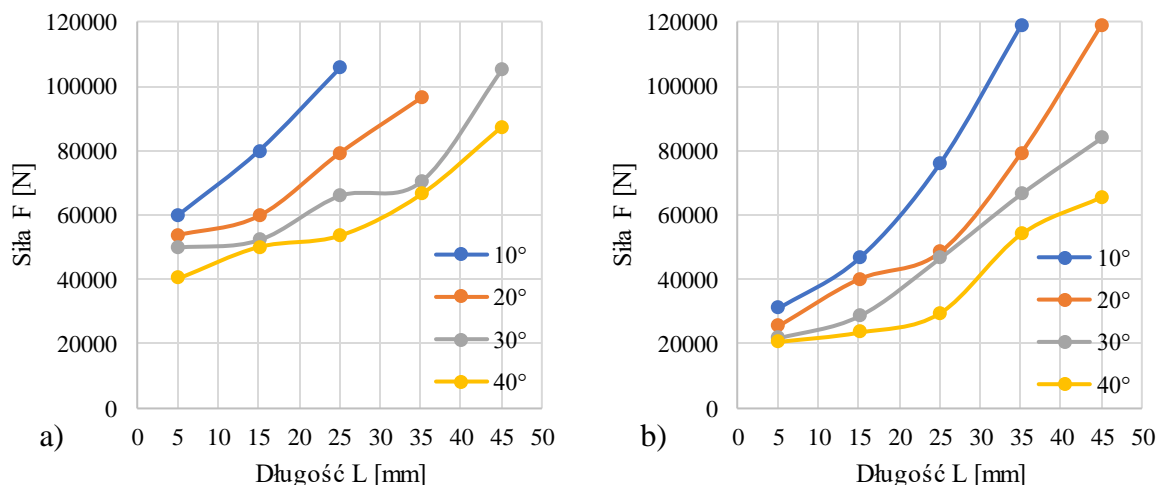
Pierwsza para wykresów (Rys. 33) przedstawia wpływ długości kanału zagęszczającego L , oraz kąta rozwarcia stożka zagęszczającego α na siłę procesu zagęszczania ciśnieniowego miskanta w stanie suchym. Wykres po lewej stronie (Rys. 34a), przedstawia siły, jakie zarejestrowano w czasie kompaktowania przy użyciu stożków zagęszczających

o średnicy podstawy $D_1 = 12$ mm z redukcją do $D_2 = 8$ mm (średnica ścięcia stożka i średnica sekcji cylindrycznej). Z prawej strony (rysunek 34b), przedstawiono wyniki uzyskane przy użyciu stożków zagęszczających o średnicy $D_1 = 10$ mm z redukcją do $D_2 = 8$ mm. Taki porządek przedstawienia wyników będzie stosowany również w dalszej części pracy.

Siły zarejestrowane przy zagęszczaniu miskanta z użyciem stożków o średnicy $D_1 = 12$ mm i długości sekcji cylindrycznej $L = 5$ mm mieszczą się w zakresie 40,2 – 59,8 kN. Wraz ze wzrostem długości L , dla wszystkich badanych kątów zaobserwowano wzrost siły. Dla $L = 45$ mm, najwyższa wartość zanotowanej siły wynosiła 10,5 kN, dla $\alpha = 40^\circ$ zanotowana siła to 87,2 kN. Dla pozostałych kątów (10° i 20°), $L = 45$ mm powoduje wzrost siły powyżej przyjętego limitu bezpieczeństwa 120 kN. Co więcej limit ten, dla kąta 10° osiągnięty został już przy $L = 35$ mm. Z powodu zbyt dużych sił wykraczających poza zakres graniczny, pozyskane dane nie zawsze pokrywały pełny zakres badawczy i podobne luki pojawiają się na niektórych wykresach w dalszej części pracy. Jednak na bazie pozostałych danych można stwierdzić, że w omawianym przypadku, siła wzrasta wraz ze wzrostem L co powodowane jest większymi oporami podczas przesuwania materiału w coraz dłuższym kanale, im dłuższy jest kanał zagęszczający, tym wyższe są siły potrzebne do przetłoczenia materiału przez komorę zagęszczającą, co wynika z tarcia, które występuje między materiałem a ścianą komory zagęszczającej. Siła wzrasta również wraz ze spadkiem wartości kąta α , wydawać by się mogło, że zależność powinna mieć odwrotną tendencję, jednak przy stałej średnicy podstawy sekcji stożkowej, wraz ze spadkiem kąta rośnie objętość tej sekcji (przebieg zmian powierzchni przedstawiono na rysunku 31), a więc i objętość materiału w niej zagęszczanego a to, w połączeniu ze wzrastającą powierzchnią boczną stożka również powoduje wzrost oporów generując wyższe wartości sił towarzyszących procesowi.

Drugi wykres, odnoszący się do procesu zagęszczania miskanta przy użyciu stożków zagęszczających o $D_1 = 10$ mm przedstawia podobne zależności. W porównaniu do poprzedniego, wartości sił są niższe, co tłumaczy się spadkiem objętości i polem powierzchni bocznej sekcji stożkowej. Najniższą zaobserwowaną siłą była ta osiągnięta przy parametrach $L = 5$ mm, $\alpha = 40^\circ$ – 20,6 kN, z kolei najwyższą zanotowaną siłą była osiągnięta za pomocą $L = 45$ mm i $\alpha = 20^\circ$ – 11,9 kN. W tym przypadku jedynie jeden przebieg przekroczył wartość siły granicznej, co spowodowało przerwanie badania - $L = 45$ mm, $\alpha = 10^\circ$.

Porównując ze sobą oba te wykresy można zauważyć, że zmniejszenie D_1 pozytywnie wpływa na wartość siły potrzebnej do przetłoczenia materiału (powoduje jej spadek), daje nam to możliwość zagęszczania z użyciem niższej siły. W rzeczywistym procesie powinno przełożyć się to niższe nakłady energetyczne ponoszone na proces i mniejsze obciążenie elementów peletujących, zwłaszcza konstrukcji rolek i matryc.

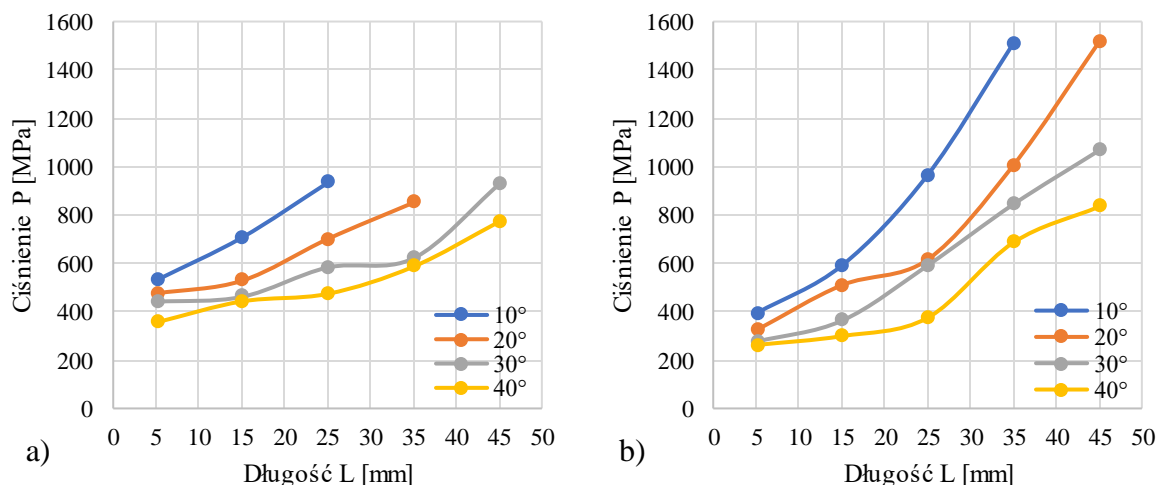


Rysunek 34. Wpływ długości L kanału zagęszczającego oraz kąta stożka α na siłę zagęszczania F miskanta w stanie suchym: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

Źródło: własne

Ze względu na różne średnice D_I badanych stożków, sama informacja jaka siła towarzyszy procesowi nie w pełni odzwierciedla jakie obciążenie wywierane jest na materiał. Aby uzyskać informację jakie ciśnienie wywierane jest na powierzchnie materiału włączanego do komory, bazując na wartości siły F i powierzchni D_I określono wartość ciśnienia zagęszczania materiału P . Wykresy (Rys. 35a i b.) przedstawiają wcześniejsze dane, ale w odniesieniu do ciśnienie zagęszczania.

Na podstawie załączonych wykresów można zauważyć, że ciśnienie zaobserwowane podczas zagęszczania z $D_I = 12$ mm na niemalże wszystkich długościach L jest niższe niż w przypadku $D_I = 10$ mm. Zakres otrzymanych ciśnień to 355,3 - 932,7 MPa dla $D_I = 12$ mm oraz 262,2 – 1514,9 MPa dla $D_I = 10$ mm. Wyższe ciśnienie procesu zagęszczania powinno skutkować większym zagęszczeniem surowca, co za tym idzie zwiększeniem gęstości, ale również najprawdopodobniej wzrostem wytrzymałości mechanicznej granulatu. Co analizowane będzie na dalszym etapie. W dalszym etapie, jako dająca lepsze porównanie, analizowana będzie zależność P od L i α .

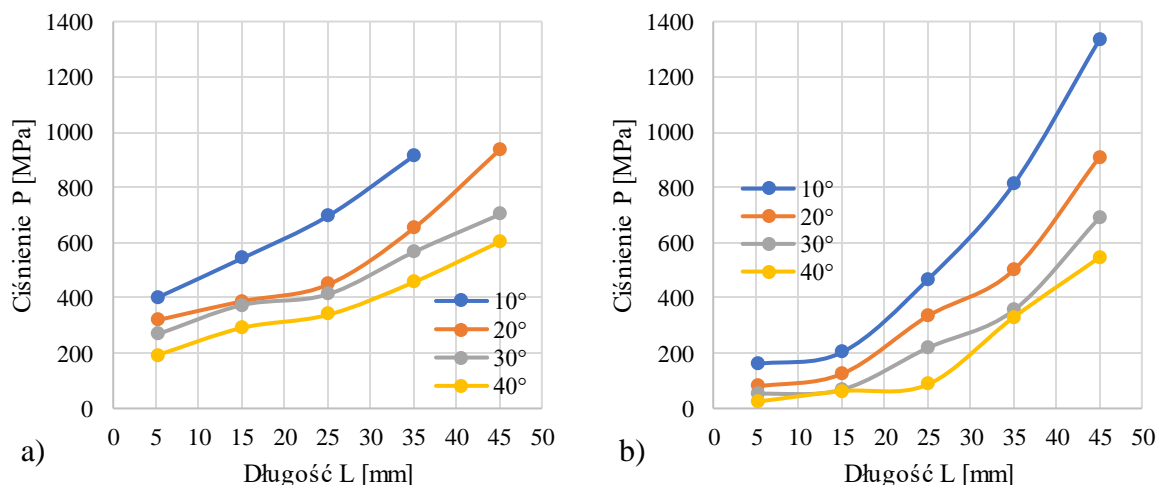


Rysunek 35. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego oraz kąta stożka α na ciśnienie zagęszczania P miskanta w stanie suchym: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

Źródło: własne

Trzecia para wykresów (Rys. 36), przedstawia przebieg zmian ciśnienia procesu realizowanego w takich samych warunkach jak powyżej, z tą różnicą, że materiał charakteryzował się wilgotnością na poziomie 13%. Przebiegi zmian są podobne i nie wymagają dalszego omawiania. Natomiast istotną zmianą jest wartość rejestrowanego ciśnienia. Zaobserwowano spadek wartości P w porównaniu do materiału zagęszczanego w stanie suchym. Potwierdza to wcześniejsze spostrzeżenie (zarówno z etapu badań wstępnych jak i wyników literaturowych), że wilgotność (na właściwym poziomie) ułatwia prowadzenie procesu i obniża wymagana wartość ciśnienia.

Redukcja z $D_I = 12$ mm do $D_I = 10$ mm przy niższych wartościach L wpłynęła na obniżenie ciśnienia zagęszczania miskanta. Zakres P dla $L = 5$ mm, z 191,1 – 398,8MPa spadł do 24,0 – 160,4MPa. Natomiast wraz ze wzrostem L wartości ciśnienia były już w porównywalnym zakresie np. dla $L = 45$ mm odpowiednio 601,4 – 933,5 MPa (bez uwzględnienia kąta 10 °) i 545,1 – 1331,3 MPa.

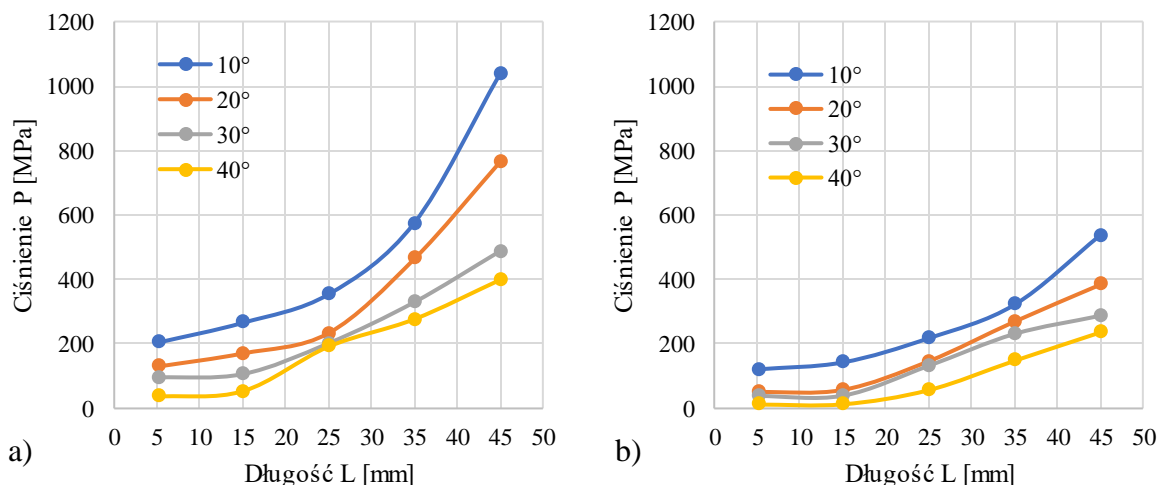


Rysunek 36. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego oraz kąta stożka α na ciśnienie zagęszczania P miskanta o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

Źródło: własne

Wpływ wprowadzenia kolejnego czynnika, jakim była temperatura kanału wynosząca 100°C obrazuje kolejna para wykresów (Rys. 37a i b).

Analizując wykresy, obserwujemy dalsze spadki ciśnienia procesu w porównaniu do wariantu z wilgotnością materiału 13%. Szczególnie wyraźny jest spadek w przypadku stożka o podstawie $D_1 = 10$ mm. Zanotowany zakres ciśnienia to 235,3 – 536,6 MPa. W poprzednim wariancie zakres też zaczynał się dopiero od 545,1 MPa. W tym przypadku możemy stwierdzić również że wzrost ciśnienia zależny od L ma mniejszą dynamikę niż w pozostałych przypadkach. Testowana wartość temperatury i wilgotność materiału uplastycznia zagęszczany materiał a analizowana objętość stożka i L kanału matrycy już nie wywołuje tak dużych, jak we wcześniejszych wariantach, oporów. Stąd spadek ciśnienia potrzebnego na zagęszczanie (pytanie do jakiego poziomu) a zwłaszcza na przesunięcie tego materiału w tulei. Z jednej strony spadek ten jest pożądany, z drugiej, dopiero analiza wartości DE i DU tak wykonanych peletów, wykaże czy spadek tego ciśnienia nie będzie miał negatywnego wpływu na jakość.



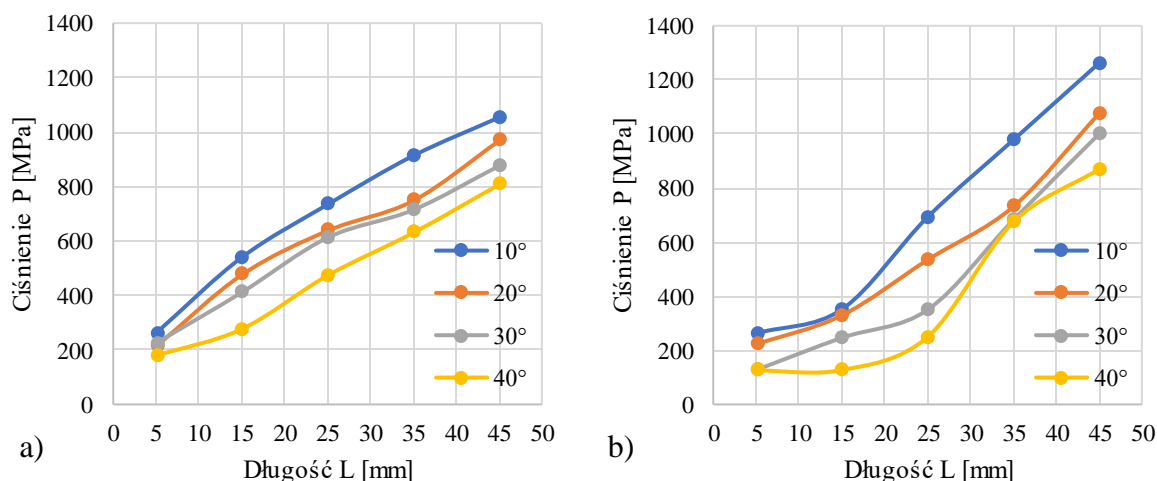
Rysunek 37. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α oraz temperatury 100°C na ciśnienie zagęszczania P miskanta o wilgotności 13% w temperaturze 100°C : a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

Źródło: własne

Rożnik

Podobnie jak w przypadku miskanta, przebieg zmian ciśnienia w zależności od długości kanał i kąta stożka dla badanych wariantów średnicy stożka, wilgotności i temperatury przedstawiono w formie wykresów (Rys. 38 – 40). Obserwowane trendy zmian są podobne do tych zaobserwowanych dla miskanta: ciśnienie wzrasta wraz ze wzrostem L i spadkiem α . Ciśnienie spada też wraz z uwzględnieniem kolejnych czynników tj. wilgotności i temperatury.

Wartość rejestrowanych sił towarzyszących procesowi w żadnym z przypadków nie przekroczyła wartości granicznej, stąd też pozyskano informację o ciśnieniu zagęszczania w całym zakresie badanej geometrii kanału. W przypadku materiału suchego zakres ciśnienia wynosił 125,4 – 1261,8 MPa i obejmuje oba warianty średnicy stożka.

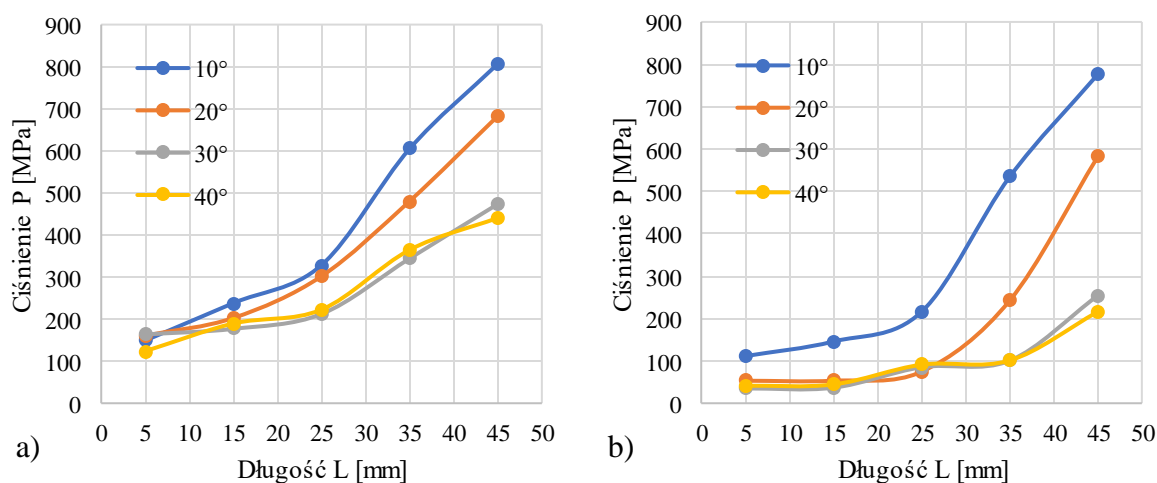


Rysunek 38. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α na ciśnienie zagęszczania P roznika w stanie suchym: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

Źródło: własne

Obecność wody w materiale (Rys. 39) spowodowało w przypadku $D_I = 12$ mm redukcję ciśnienia zagęszczania biomasy względem surowca w stanie suchym. Osiągnięto zakres sił 123,8 – 806,6 MPa. Najwyższa zanotowana wartość odnosi się do próbek zagęszczanych na $\alpha = 10^\circ$ oraz $L = 45$ mm. Najmniejsze ciśnienie zaobserwowano dla procesu prowadzonego na $\alpha = 40^\circ$ oraz $L = 5$ mm. Można zauważyć, że przebieg serii zagęszczania dla $\alpha = 30^\circ$ oraz $\alpha = 40^\circ$ są niemalże takie same co wskazuje, że zmiana kąta α w tym zakresie nie ma dużego wpływu.

W przypadku $D_I = 10$ mm zauważono, że ciśnienie procesu zagęszczania zmalało dla $L = 5$ mm. Najniższa zanotowana wartość to 34,92 MPa.



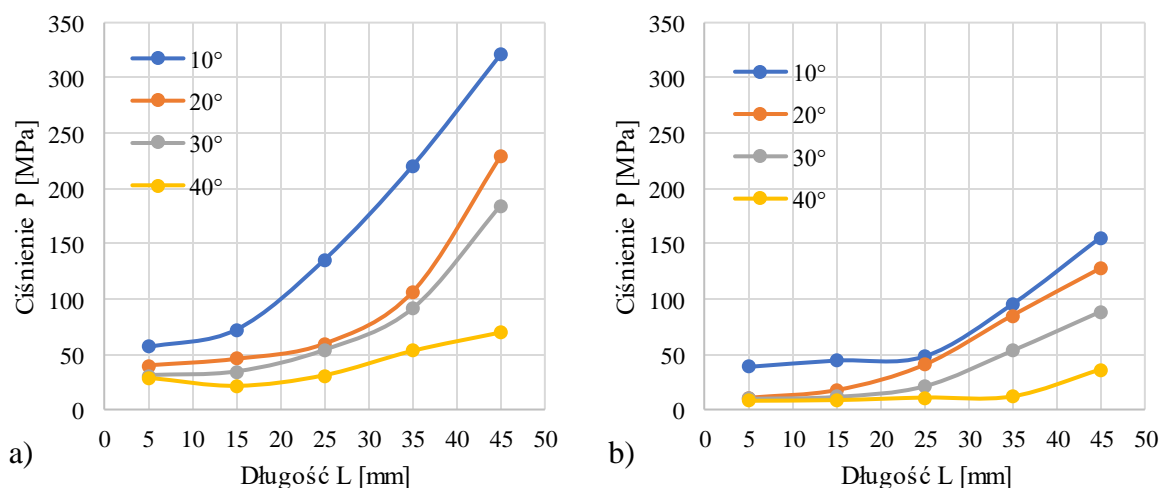
Rysunek 39. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego oraz kąta stożka α na ciśnienie zagęszczania P roznika o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

Źródło: własne

Ostatnią parę wykresów stanowią wyniki procesu zagęszczania przeprowadzonego wg powyższych metod dla tych samych wariantów. Zmienną dodaną była temperatura procesu, która wynosiła 100°C i była utrzymywana na stałym poziomie przez cały proces ciśnieniowej aglomeracji. Można zauważyć, że obecność temperatury jako dodatkowego czynnika w procesie aglomeracji znacznie zredukowała ciśnienia zagęszczania roznika. Dla $D_I = 20$ mm, najwyższe ciśnienia zauważono przy serii wykonanej przy użyciu stożka zagęszczającego o kącie $\alpha = 10^\circ$ i $L = 45$ mm o wartości 321,43 MPa, najniższe z kolei zarejestrowano dla $\alpha = 40^\circ$ i $L = 5$ mm i wartości 28,79 MPa. Największą różnicę można zauważyć pomiędzy $\alpha = 10^\circ$ i $L = 45$ mm oraz $\alpha = 40^\circ$ i $L = 45$ mm i wynosi ona 251,67 MPa.

Wykres odnoszący się do zagęszczania na stożkach zagęszczających o średnicy otworu wlotowego $D_I = 10$ mm pokazuje, że podgrzanie stożka zagęszczającego oraz komory zagęszczającej zredukowało ciśnienie jakie towarzyszyło procesowi aglomeracji. Najwyższą zanotowaną wartością ciśnienia była 155,88 MPa dla $\alpha = 10^\circ$ i $L = 45$ mm a najniższą 7,91 MPa $\alpha = 40^\circ$ i $L = 5$ mm.

Porównując oba wykresy można zauważyć, że zarówno temperatura jak i wilgotność w znacznym stopniu redukują ciśnienie procesu zagęszczania. W odniesieniu do stanu suchego można zauważyć kilkukrotny spadek wartości. Czynniki te sprawiają, że materiał staje się bardziej plastyczny i skory do compactowania. Obniżenie ciśnienia zagęszczania skutkuje mniejszym wydatkiem energetycznym, ale czy pozwoli na uzyskanie właściwego poziomu DE i DU wykaże dalsza analiza.



Rysunek 40. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α oraz temperatury 100°C na ciśnienie zagęszczania P roznika o wilgotności 13% w temperaturze 100°C: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

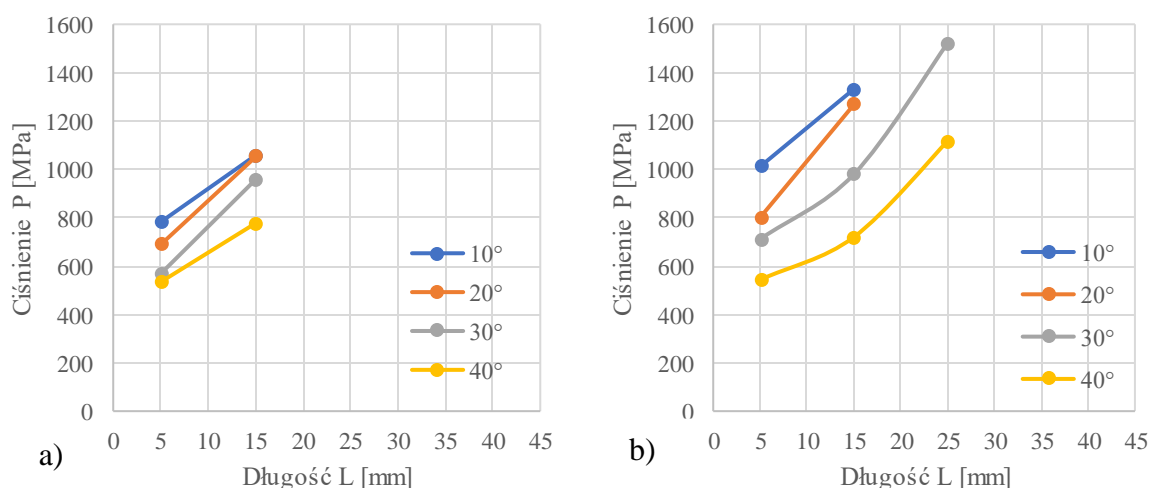
Źródło: własne

Ślázowiec

Ślázowiec, jak można zauważyć na poniższych wykresach, wykazywał w wielu wariantach, wartość siły przekraczająca założony zakres.

Szczególnie widoczne jest to dla materiału w stanie suchym (Rys. 41a i b). Stożki o większej objętości powodują występowanie sił granicznych we wcześniejszych etapach procesu zagęszczania co w znacznym stopniu zmniejsza możliwości produkcji peletów. Przy redukcji z 12 mm, osiągnięcie wartości krytycznej występowało już przy kanale długości powyżej 15 mm. Przy redukcji z 10 mm graniczne wartości sił zarejestrowano przy kanałach długości 25 mm oraz 35 mm.

Porównując obie pary wykresów można zauważyć, że wraz z redukcją średnicy otworu wlotowego ciśnienie pozostaje na podobnym poziomie. W tym przypadku wyraźnie widać wpływ ogólnie pojętych cech materiału na proces. W porównaniu do pozostałych, ślázowiec w stanie suchym wymaga najwyższego ciśnienia.

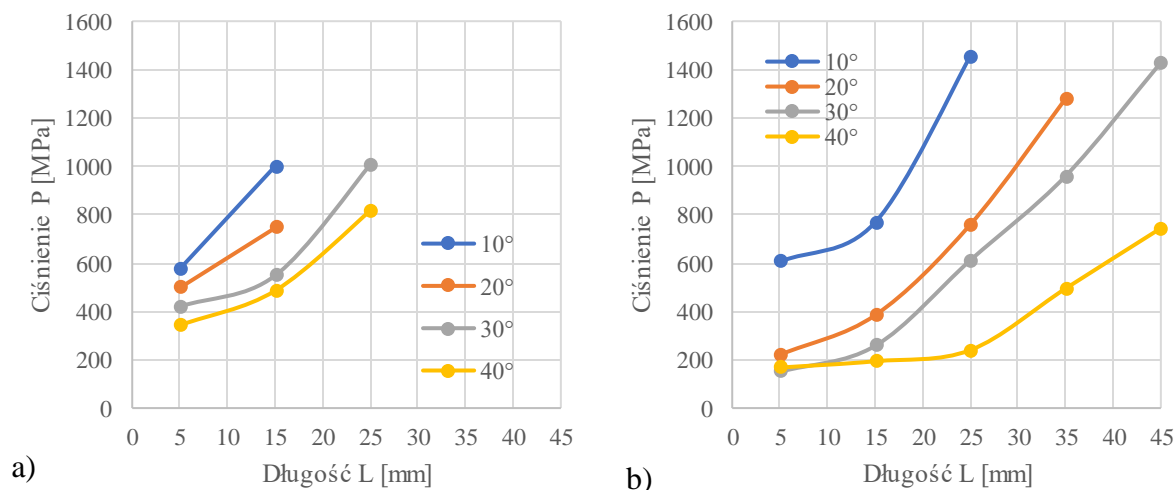


Rysunek 41. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego oraz kąta stożka α na siłę zagęszczania F mieszanki w stanie suchym a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

Źródło: własne

Po uwzględnieniu wilgotności sytuacja ulega nieznacznej poprawie (Rys. 42a i b). Jak można zaobserwować na wykresach, badania przeprowadzone przy użyciu stożka o średnicy $D_1 = 12$ mm ponownie na skutek wysokiego ciśnienia obecnego w czasie zagęszczania, L powyżej 15 mm powodowała przerwanie procesu zagęszczania przy kątach 10° i 20° . Natomiast przy pozostałych kątach przerwanie następowało po przekroczeniu $L = 25$ mm. Uzyskane wartości ciśnienia dla $L = 5$ i 15 mm są niższe niż w przypadku badań prowadzonych na surowcu w stanie suchym. Mniejsza średnica otworu wlotowego w połączeniu z nawilżonym

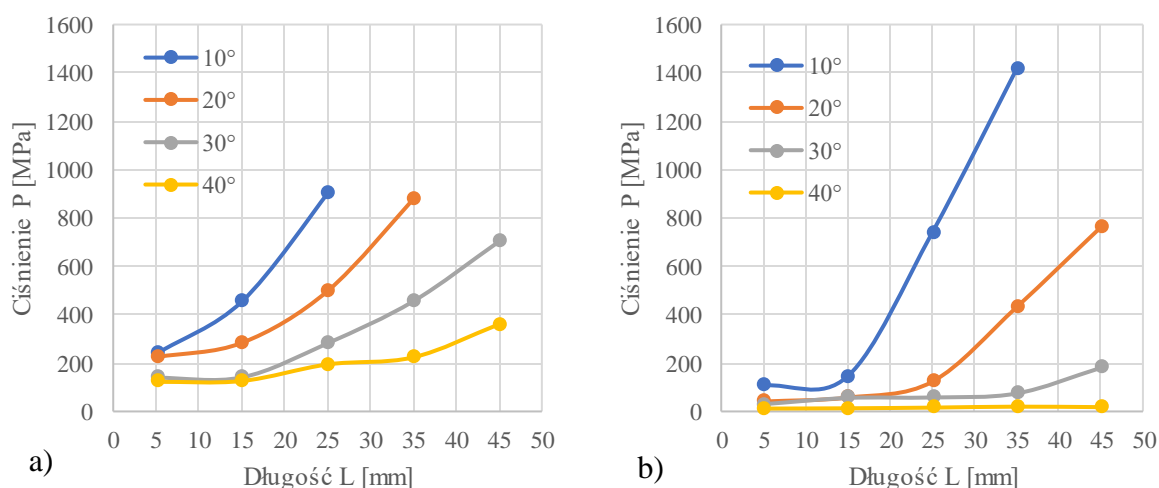
materiałem spowodowała redukcję ciśnienia w przypadku kąta 20° , 30° oraz 40° , natomiast dla 10° ciśnienie początkowe właściwie się nie zmienia. Ponadto dla kąta 30° i 40° proces udało się przeprowadzić dla całego zakresu L .



Rysunek 42. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α na ciśnienie zagęszczania P ślazuca o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

Źródło: własne

Nawet wprowadzenie temperatury, nie we wszystkich przypadkach wywołało spadki ciśnienia pozwalające przeprowadzić pomiar bez przekroczenia siły granicznej (Rys. 43a i b). Połączenie nawilżenia materiału wraz z ogrzaniem elementów zagęszczających i materiału, powodują znaczną redukcję ciśnienia zagęszczającego. Najniższe ciśnienie uzyskano dla serii wykonanej przy użyciu stożka zagęszczającego 40° . Wraz ze zmniejszeniem się kąta stożka ciśnienie procesu wzrastało. Szczególnie wysokie ciśnienia towarzysza procesowi zagęszczania w stożku o kacie 10° .



Rysunek 43. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α oraz temperatury 100°C na ciśnienie zagęszczania P mieszanki o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

Źródło: własne

Jak już wspomniano, powyższe wykresy obrazują tylko przebiegi zmian ciśnienia towarzyszącego badanym wariantom. O jego wartości decyduje badana geometria, materiał i jego parametry oraz temperatura. Przyjmując dany wariant badawczy nie mamy wpływu na uzyskaną wartość ciśnienia a jedynie ją rejestrujemy. Dodatkowo ciśnienie to jest ciśnieniem zagęszczającym materiał, ale tylko do momentu gdy ten zostaje w kanale przesuwany. W tym przypadku istotna jest zatem informacja czy w badanych wariantach udało się uzyskać pelet o wymaganych parametrach jakościowych tj. gęstość właściwą i wytrzymałość mechaniczną.

6.3.2 Gęstość właściwa peletów

Gęstość właściwa uzyskanych peletów to jeden analizowanych parametrów jakościowych. Wpływ geometrii kanału na wartość tego parametru przedstawiono na wykresach w takim samym układzie jak w przypadku ciśnienia. Gęstość właściwą peletów oznaczono dla granul otrzymanych z każdej serii badawczej wykonanej dla każdego materiału badawczego. Minimalna wartość, jaką pelet musi uzyskać, aby spełniać kryterium jakości to $1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Norma, dla klasy jakości A, wymaga aby gęstość nasypowa peletu wynosiła co najmniej $600\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Ze względu na ilość peletów testowych nie było możliwości określenia gęstości nasypowej. Przyjęto jednak za (Wróbel, 2019), że pelet o gęstości usypowej $600\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ charakteryzuje się jednocześnie gęstością właściwą DE peletu powyżej $1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Miskant

Wyniki zagęszczania miskanta przedstawiono na poniższych wykresach. Przedstawiają zależność gęstości właściwej peletów DE od długości kanału zagęszczającego L , kąta stożka

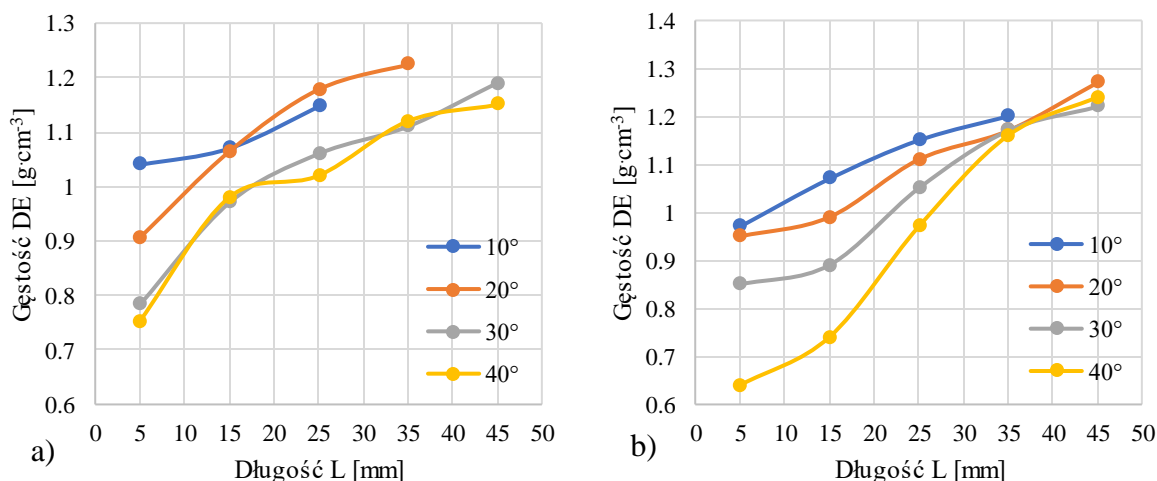
zagęszczającego α oraz dodatkowych czynników takich jak wilgotność materiału czy temperatura prowadzenia procesu zagęszczania.

Pierwsza para wykresów (Rys. 44a i b) przedstawia przebieg procesu zagęszczania prowadzonego dla czterech seriach pomiarowych. Surowiec badawczy był w stanie suchym, aby pozbyć się możliwego wpływu wilgotności na wyniki aglomeracji.

Wykres przedstawiony z lewej strony zestawia dane otrzymane w wyniku badań prowadzonych przy użyciu stożków zagęszczających o $D_I = 12$ mm. Wyniki wskazują, że większość zaproponowanych wariantów badawczych spełnia kryteria jakościowe, które muszą spełnić pelety ($DE > 1$ g·cm⁻³). Najniższą gęstość zarejestrowano dla peletu wykonanego na kącie $\alpha = 40^\circ$ oraz $L = 5$ mm i wartości 0,75 g·cm⁻³. Najwyższą gęstość osiągnięto dla granulatu wykonanego na kącie stożka zagęszczającego $\alpha = 20^\circ$ oraz $L = 35$ mm i wartości 1,22 g·cm⁻³. Najwyższy wzrost gęstości zauważono w serii wykonanej na kącie $\alpha = 40^\circ$, ponieważ z 0,75 g·cm⁻³ przy długości kanału zagęszczającego, gęstość wzrosła do 1,15 g·cm⁻³ przy długości 45 mm.

Dla zagęszczania przy użyciu stożka zagęszczającego $D_I = 10$ mm wyniki zestawiono na rysunku 44b. Najwyższą możliwą gęstością na tej konfiguracji stanowiska jest gęstość na poziomie 1,27 g·cm⁻³ dla $\alpha = 20^\circ$ oraz $L = 45$ mm, z kolei najniższą gęstością odnotowaną wśród peletów było 0,64 g·cm⁻³ dla wariantu $\alpha = 40^\circ$ oraz $L = 5$ mm. Najwyższy wzrost gęstości postępujący wraz ze wzrostem długości komory zagęszczającej zauważono dla $\alpha = 40^\circ$ a zanotowane wyniki mieściły się w zakresie 0,64 – 1,24 g·cm⁻³. Osiem kombinacji L i α nie osiągnęło gęstości powyżej 1 g·cm⁻³.

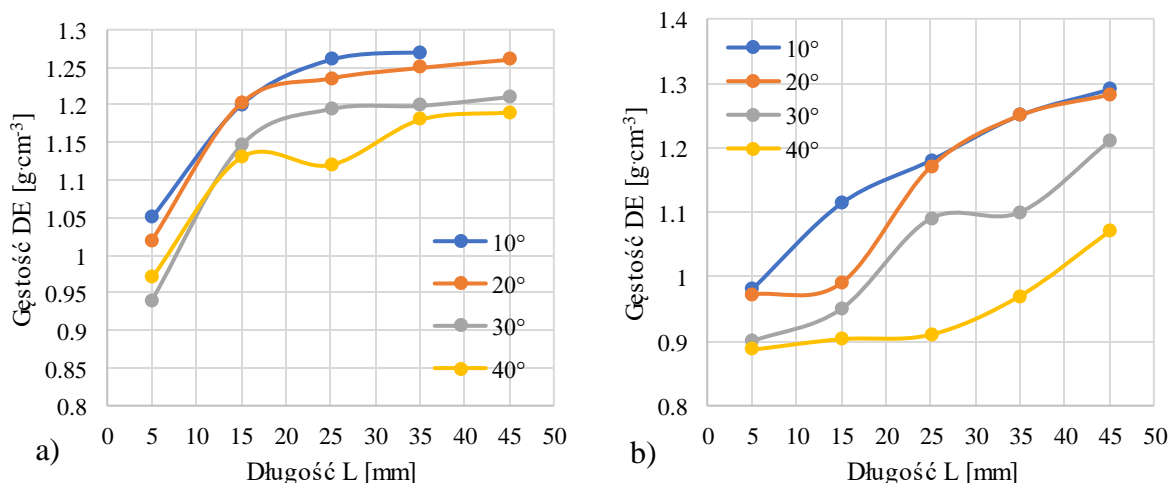
Porównując oba wykresy można zaobserwować, że wyższą gęstość peletu można było uzyskać dla średnicy podstawy stożka zagęszczającego $D_I = 12$ mm.



Rysunek 44. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α na gęstość DE otrzymanych peletów w stanie suchym: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

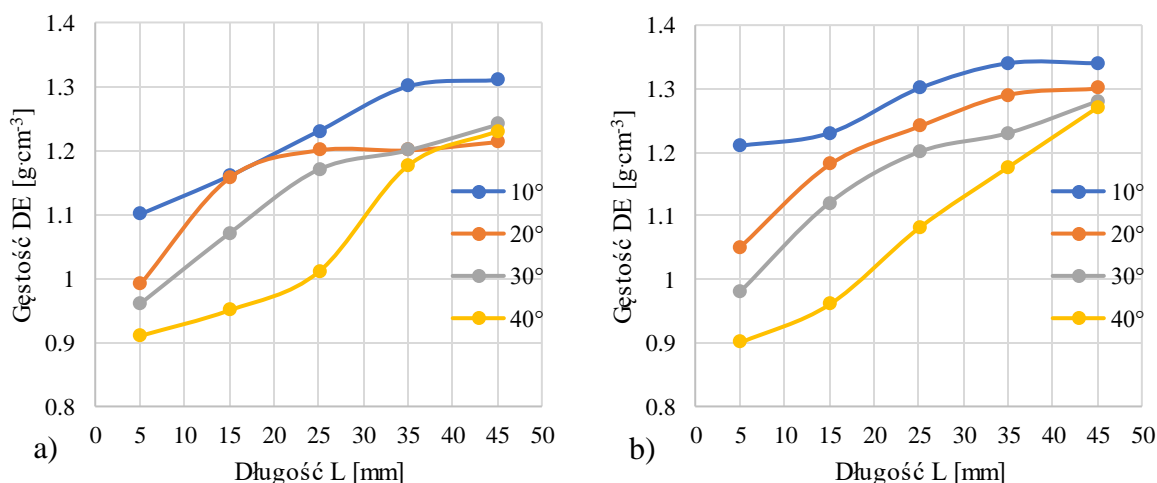
Źródło: własne

Po nawilżeniu materiału do poziomu 13% gęstość peletu wytwarzanego w stożku o średnicy $D_I = 12$ mm wzrosła powyżej wymaganego poziomu $1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, wyjątek stanowią kombinacje $L = 5 \text{ mm}$ z $\alpha = 30$ i 40° (Rys. 45a). W przypadku $D_I = 10$ mm takich kombinacji nie zapewniających odpowiedniego poziomu DE jest więcej, zwłaszcza dla kąta 40° (Rys. 45b). Po uwzględnieniu w badaniach temperatury sytuacja uległa poprawie w przypadku $D_I = 10$ mm, natomiast w przypadku $D_I = 12$ mm, zwłaszcza pelet wytworzony w stożku o kącie 40° zanotował spadek gęstości.



Rysunek 45. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α na gęstość DE peletu o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

Źródło: własne



Rysunek 46. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α oraz temperatury 100°C na gęstość DE peletu o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

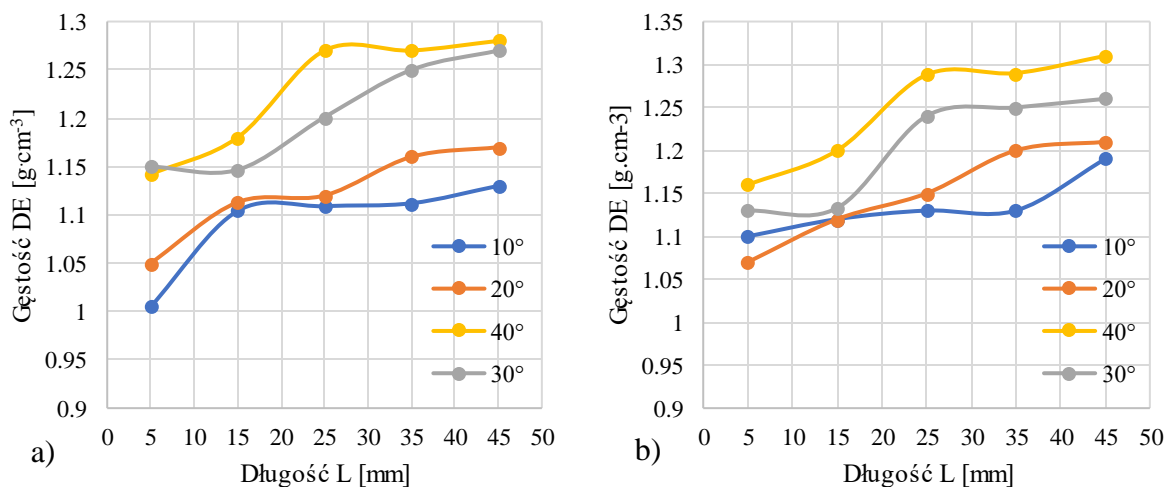
Źródło: własne

Rożnik

W przypadku rożnika w stanie suchym, można zauważyć, że wszystkie warianty zagęszczania rożnika spełniają kryterium jakościowe (Rys. 47a i b). Żaden z wyników nie okazał się być niższy niż $DE < 1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Dla $D_1 = 12 \text{ mm}$, zauważono podobieństwa w przebiegu serii wykonanej na stożkach zagęszczających $\alpha = 10^{\circ}$ oraz 20° i $\alpha = 30^{\circ}$ oraz 40° . Najniższą gęstością jaką zarejestrowano była $DE = 1,005 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ dla $\alpha = 10^{\circ}$ i długości $L = 5 \text{ mm}$, z kolei najwyższy wynik zaobserwowano zagęszczając biomasę na stożku zagęszczającym $\alpha = 40^{\circ}$ oraz długości kanału $L = 45 \text{ mm}$, a jej wartość wynosiła $1,28 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Zauważono, że im dłuższy jest kanał zagęszczający oraz większy jest kąt rozwarcia stożka zagęszczającego, tym wyższa jest gęstość otrzymanego peletu.

Dla $D_1 = 10 \text{ mm}$, najniższą gęstością $DE = 1,07 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ charakteryzowały się pelety wytworzone przy użyciu stożków zagęszczających o kącie $\alpha = 20^{\circ}$ oraz długości kanału $L = 5 \text{ mm}$. Najwyższy wynik stanowi wartość $DE = 1,31 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ i odpowiada granulom wytłoczonym przy użyciu stożka o kącie $\alpha = 40^{\circ}$ oraz długości $L = 45 \text{ mm}$. Wynika z tego, że nie ma potrzeby stosowania dłuższego kanału zagęszczającego niż 35 mm , aby osiągnąć maksymalną możliwą gęstość peletu wytworzonego z rożnika. Wyróżniającym się na tle innych przebiegiem zmiany gęstości jest ten, uzyskany dla kąta $\alpha = 40^{\circ}$. Można zaobserwować, że pierwsze pelety charakteryzują się przeciętną gęstością na poziomie $1,09 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ natomiast wydłużenie komory zagęszczającej o 10 mm spowodowało gwałtowny skok jakości powstałych granul.

Porównując oba wykresy można zauważyć, że nie występuje znacząca różnica w gęstości uzyskanych peletów.



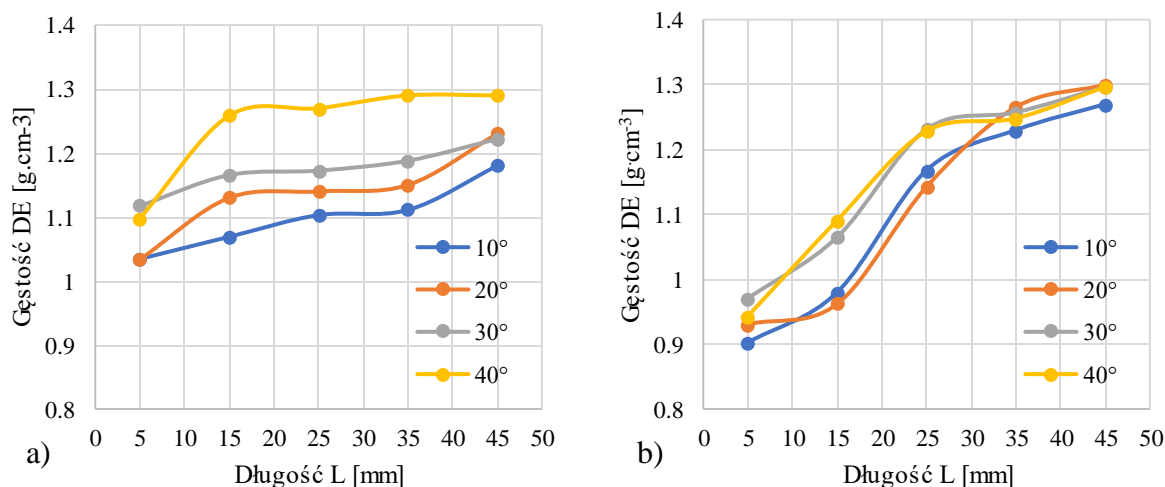
Rysunek 47. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α na gęstość DE otrzymanych peletów w stanie suchym: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

Źródło: własne

Druga para wykresów przedstawia wyniki otrzymane z badań na materiale nawilżonym do 13% (Rys. 48a i b). Pierwszy wykres przedstawia zestawienie wyników uzyskanych podczas zagęszczania rożnika na stożkach zagęszczających o średnicy $D_I = 12$ mm. Odnotowano, że w tym przypadku każda grupa peletów badanych spełniała kryterium jakościowe odnoszące się do gęstości właściwej wytłoczonego granulatu. Najniższą gęstość aglomeratu ($DE = 1,03$ g·cm⁻³) otrzymano stosując stożek zagęszczający o kącie $\alpha = 20^\circ$ oraz długości kanału $L = 5$ mm.

Drugi wykres to zestawienie wyników uzyskanych w procesie zagęszczania mieszanek rożnika przy użyciu stożków zagęszczających o średnicy otworów wlotowych $D_I = 10$ mm. Zaobserwowano, że nawilżenie materiału do 13% pogorszyło jakość peletów wykonanych przy pomocy kanałów zagęszczających o długości $L = 5$ mm we wszystkich przypadkach oraz dla $\alpha = 10^\circ$ oraz 20° dla $L = 15$ mm. W pozostałych seriach również zaobserwowano spadek jakości peletów, jednak spełniły one kryteria jakościowe. Spadek jakości peletów jest związany z dużą redukcją ciśnienia procesu zagęszczania w porównaniu z zagęszczaniem biomasy w stanie suchym. Wystąpiło, wspomniane już zjawisko, obniżenia ciśnienia wywołane parametrami surowca i geometrią kanału. Czynniki te spowodowały, że aby materiał mógł być przepchnięty przez kanał, wystarczy stosunkowo niskie ciśnienie, jednak ciśnienie to nie wywołuje odpowiedniego zagęszczenia materiału zanim zostanie on przesunięty w kanale.

Porównując warianty $D_I = 12$ mm i $D_I = 10$ mm można zauważyć, że zmniejszenie średnicy otworu wlotowego spowodowało zmniejszenie wariantów spełniających kryteria jakościowe dotyczące gęstości.



Rysunek 48. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α na gęstość DE peletu o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

Źródło: własne

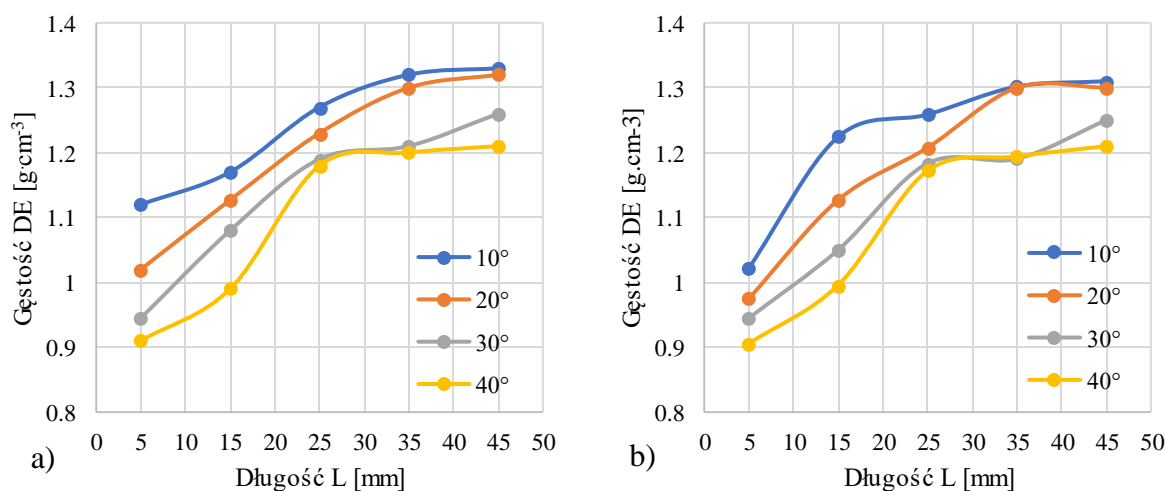
Kolejna para wykresów (Rys. 49a i b) przedstawia przebieg zmian DE z uwzględnieniem kolejnego czynnika, którego wpływ badano podczas tej serii badań. Była temperatura prowadzenia procesu, która wynosiła 100°C.

Jak można zaobserwować, podgrzanie tulei jeszcze bardziej uplastyczyło zagęszczany materiał, co w efekcie spowodowało że jeszcze łatwiejsze jego przesuwanie w kanale. Skutkiem tego, zarówno dla $D_I = 12$ mm i $D_I = 10$ mm, przy najkrótszych badanych długościach tulei L , nie zawsze uzyskano odpowiednia wartość DE .

I tak dla średnicy $D_I = 12$ mm zaobserwowano, że temperatura dodana do procesu spowodowała spadek gęstości peletów wytworzonych na najkrótszym kanale zagęszczającym oraz $\alpha = 40^\circ$ i $L = 15$ mm. Jednocześnie odnotowano wzrost gęstości peletów otrzymanych z procesów ciśnieniowej aglomeracji prowadzonych na dłuższych kanałach zagęszczających. Najwyższą gęstość $DE = 1,33$ g·cm⁻³ osiągnęły pelety wykonane w stożku o kącie $\alpha = 10^\circ$ i długości kanału $L = 45$ mm. Najniższą gęstość $DE = 0,91$ g·cm⁻³ zaobserwowano dla peletów wykonanych w stożku $\alpha = 40^\circ$ i $L = 5$ mm. Wyniki te są spowodowane tym, że dodanie poszczególnych czynników do procesu zagęszczania biomasy znacznie zredukowało ciśnienie procesu aglomeracji. To z kolei spowodowało mniejsze zagęszczenie surowca. Wyższa gęstość peletów produkowanych na dłuższych kanałach zagęszczających wynika z tego, że mają one dłuższy kontakt z elementami, które są rozgrzane do 100°C. Powoduje to

większą aktywację wewnętrznych naturalnych lepiszczy, które pozwalają na otrzymanie trwalszych połączeń międzycząsteczkowych.

Dla $D_I = 10$ mm zaobserwowano, że redukcja średnicy otworu z 12 mm do 10 mm spowodowała większy zakres uzyskanych wyników. Najniższą gęstość $DE = 0,9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ osiągnęły pelety wykonane na kącie $\alpha = 40^\circ$ oraz $L = 5$ mm. Najwyższą gęstość $DE = 1,31 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ osiągnął granulat wykonany przy użyciu stożka o $\alpha = 10^\circ$ i $L = 45$ mm. Wyniki wskazują również, że temperatura pozytywnie wpłynęła na samą gęstość peletów, ponieważ w tej serii badawczej zaledwie cztery grupy tłoczonych peletów nie spełniały kryteriów jakościowych, w porównaniu do wcześniejszych sześciu. Ponownie wyższe gęstości granulatu można zauważyć dla granul uzyskanych na $L = 25; 35$ oraz 45 mm. Potwierdza to fakt, że mimo dużej redukcji ciśnienia procesu osiągnięto dobry jakościowo pelet. Przyczyniła się do tego temperatura, aktywująca naturalne lepiszcza zawarte w tym materiale.



Rysunek 49. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α oraz temperatury 100°C na gęstość DE peletu o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

Źródło: własne

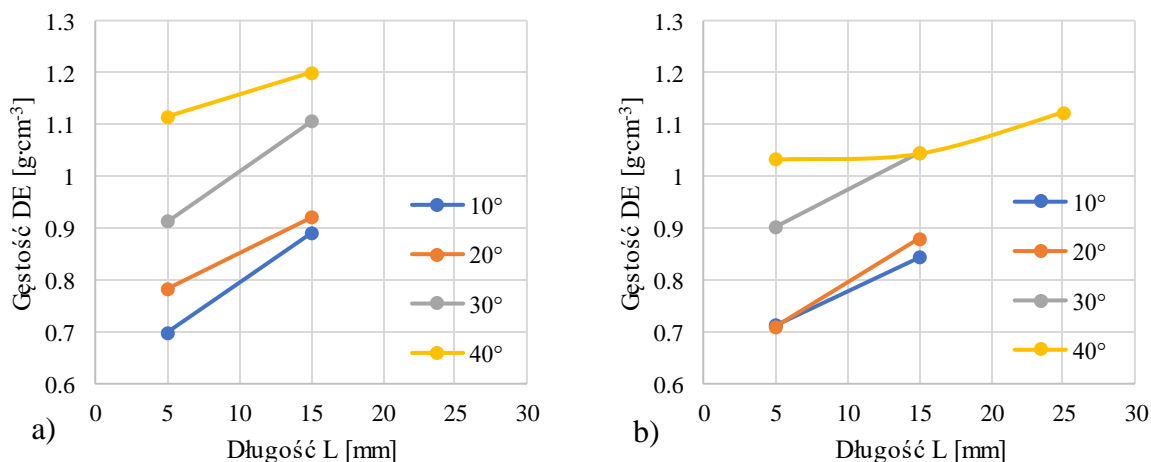
Ślazowiec

Na rysunku 50a i b przedstawiono wyniki dla oznaczenia gęstości peletów ze ślazowca w stanie suchym. Zauważono, że redukcja z 12 – 8 mm pozwala na osiągnięcie dobrej jakości peletu zagęszczając materiał w stożku o kącie 40° przy długości kanału zagęszczającego 5 mm – $1,12 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ oraz 10 mm – $1,2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Dobrą jakość ($1,1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) można również otrzymać zagęszczając materiał używając kąta 30° na kanale o długości 15 mm. Reszta wariantów nie mogła zostać zbadana z powodu zbyt wysokich ciśnień występujących w komorze zagęszczającej w czasie procesu tłoczenia, jednak należało by się spodziewać wzrostu DE . Najniższą gęstość o wartości $0,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ uzyskano dla peletów zagęszczonych przy pomocy

stożka zagęszczającego o kącie 10° i kanale 5 mm, wzrost długości L najprawdopodobniej spowodowałby wzrost gęstości jednak by bardzo wysokim wzroście ciśnienia.

Redukcja z 10 – 8 mm pozwoliła na osiągnięcie dobrej jakości peletu w przypadku użycia stożka o kącie 40° oraz kanale długości 5, 15 oraz 25 mm. Gęstości wynosiły kolejno: $1,03 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, $1,04 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ oraz $1,12 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Wymagania jakościowe spełnia również pelet wytworzony za pomocą stożka zagęszczającego o kącie 30° i kanale zagęszczającym długości 15 mm, który osiągnął gęstość na poziomie $1,04 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Na pozostałych wariantach nie udało się uzyskać peletów dobrej gęstości, spełniającej kryteria jakościowe, a najniższą wartość zarejestrowano dla peletu o gęstości $0,71 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ wytworzonego przy użyciu stożka 10° oraz kanału długości 5 mm. Jest to spowodowane zbyt suchym materiałem, który podczas zagęszczania potrzebuje znacznych ciśnień, aby móc przemieścić się przez stożek oraz kanał zagęszczający.

Porównując ze sobą oba warianty wytworzonych peletów można zaobserwować, że więcej możliwości uzyskania peletu spełniającego kryteria jakościowe otrzymujemy używając stożków zagęszczających z redukcją otworów z 10 – 8 mm. Zauważono również, że dobrej jakości granule powstały przy użyciu stożków o większym kącie, czyli mniejszej objętości.



Rysunek 50. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α na gęstość właściwą DE mieszanki w stanie suchym: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

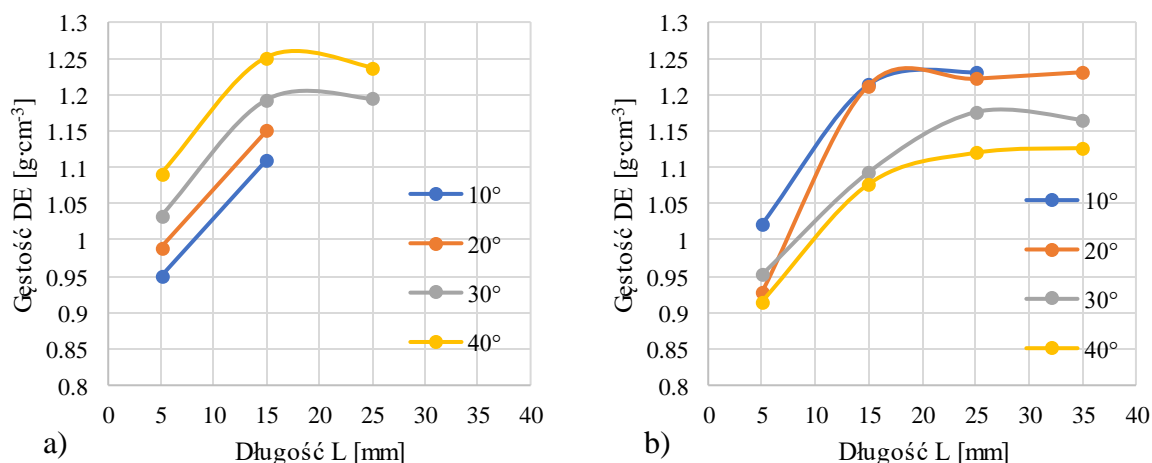
Źródło: własne

W przypadku materiału o wilgotności 13%, seria badań wykonana ze stożkami o średnicy otwory wlotowego 12 mm (Rys. 51a) pokazuje, że dodanie wilgotności pozytywnie wpływa na gęstość otrzymywanego peletu. Można zauważyć, że zaledwie dwa z przypadków badanych nie spełniają kryteriów jakościowych, pozostałe osiągają wyniki, które są zadawalające. Najwyższą gęstość - $1,25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, zanotowano dla peletów uzyskanych przy

użyciu stożka zagęszczającego o kącie 40° oraz długości kanału 15 mm. Zauważono również, że wydłużenie długości komory zagęszczającej negatywnie wpłynęło na gęstość granuli, w związku z tym nie jest zasadnym stosowanie dłuższych kanałów zagęszczających dla tego kąta. Najniższą wartością DE uzyskaną w procesie zagęszczania było $0,95 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ dla peletów wytworzonych na stanowisku o kącie 10° oraz długości kanału 5 mm.

Wyniki serii wykonanej na stożkach o średnicy otworu wlotowego 10 mm (Rys. 51b) wskazują, że spośród wszystkich badanych wariantów, zaledwie trzy nie spełniają kryterium jakościowego i są to: 20° i 5 mm, 30° i 5 mm oraz 40° i 5 mm. Wszystkie pozostałe badane przypadki spełniają kryterium jakościowe. Najwyższą gęstość o wysokości $1,23 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ odnotowano dla granul wytworzonych na stożku zagęszczającym o kącie 20° i kanale o długości 35 mm. Najwyższy przyrost gęstości granul zauważono między 5 a 15 mm i kącie 20° , wyniósł on $0,29 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Najniższym zanotowanym wynikiem jest $0,91 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ dla peletów wytworzonych używając kąta 40° oraz kanału długości 5 mm.

Porównując otrzymane wyniki do badań prowadzonych na materiale w stanie suchym można zauważyć, że wilgotność pozwala uzyskać wymagana gęstość peletów przy krótszych kanałach. Jest to zapewne spowodowane większą redukcją przestrzeni między- i wewnątrzcząsteczkowych w granulach na skutek obecności wody uplastyczniającej materiał.



Rysunek 51. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α na gęstość właściwą DE mieszanki o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

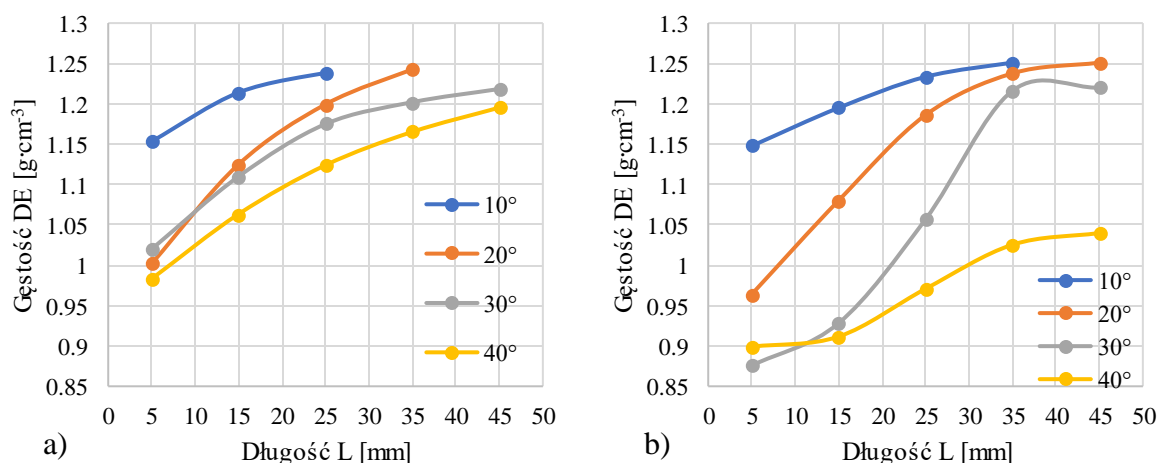
Źródło: własne

Wpływ temperatury 100°C na wartość DE obrazują wykresy na rysunku 52a i b.

Wśród wyników zagęszczania biomasy na stożkach zagęszczających o średnicy 12 mm zauważono pozytywny wpływ temperatury na gęstość granul. Niemal wszystkie warianty spełniają założony próg jakościowy. Niewiele poniżej progu znalazł się

tylko pelet uzyskany w stożku o kącie 40° oraz długości komory zagęszczającej 5 mm, jego gęstość wyniosła $0,98 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Najwyższą zarejestrowaną gęstość $1,24 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ uzyskał pelet zagęszczony na stożku 20° i kanale długości 35 mm.

Wyniki uzyskane na stożkach o średnicy podstawy 10 mm wskazują, że najlepszym rozwiązaniem dla kompaktowania ślazuwa jest kąt 10° , ponieważ, przy użyciu każdej długości komory zagęszczającej otrzymujemy pelet spełniający kryterium jakościowe. Najwyższą otrzymaną gęstością w tej serii badawczej uzyskały granule zagęszczane zarówno przy użyciu kąta 10° oraz długości kanału zagęszczającego 35 mm oraz 20° i długości 45 mm osiągając $1,25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Z kolei najniższy wynik otrzymano zagęszczając przy użyciu stożka o kącie 30° i długości kanału równej 5 mm. Osiągnięto gęstość $0,88 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Kąt 40° wymagał długości kanału ponad 25 mm by uzyskać gęstość powyżej wymaganego progu.



Rysunek 52. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α oraz temperatury 100°C na gęstość właściwą DE mieszanki o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

Źródło: własne

Podsumowując, dla każdego badanego materiału można znaleźć kombinację kąta i długości kanału pozwalającą uzyskać pelet o wymaganym progu gęstości. Kombinacja taka istnieje dla materiału w stanie suchym, nawilżonym do 13% oraz nawilżonym do 13% i podgrzanym do temperatury 100°C .

6.3.3 Wytrzymałość mechaniczna peletów

Drugim z analizowanych wyznaczników jakości peletu była ich wytrzymałość mechaniczna DU . Podobnie jak w przypadku DE , wpływ geometrii kanału na wartość tego parametru przedstawiono na wykresach. DU peletów oznaczono dla granul otrzymanych

z każdej serii badawczej wykonanej dla każdego materiału badawczego, tych samych na których oznaczono wcześniej gęstość właściwą.

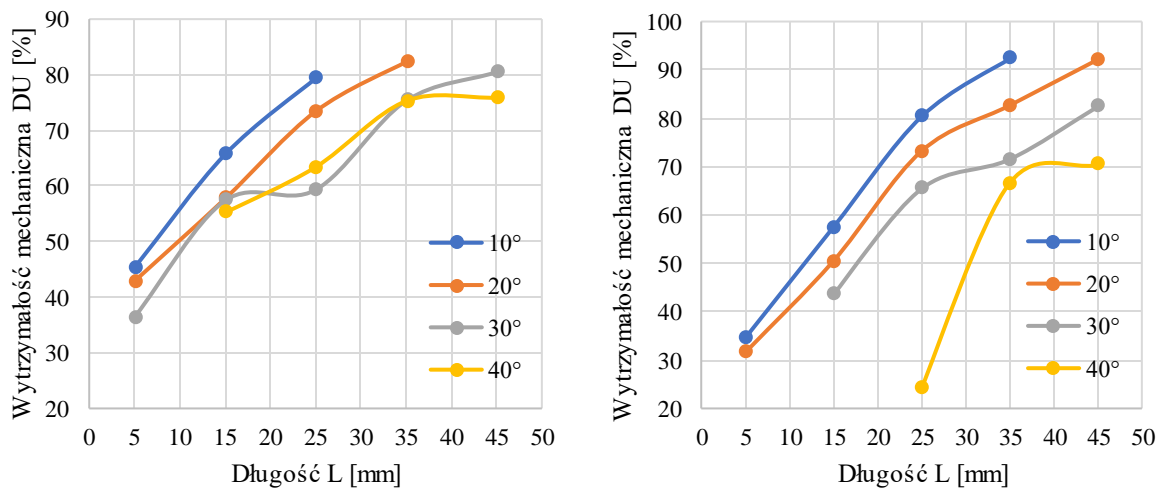
Jako kryterium jakościowe ustalono procentowy ubytek masy, który nie powinien przekraczać 2,5% masy wejściowej w przypadku peletów klasy A ($DU = 97,5\%$) oraz 4% w przypadku klasy B ($DU = 96\%$). Poziomy te zostały przyjęte za PN-EN ISO 17255-6:2021. Testy wytrzymałościowe wykonano po upływie 24 godzin od wytworzenia peletów. Wyniki badań uśredniono i przedstawiono w formie graficznej. Nieliczne wyniki, będące poza zakresem powtarzalności wymaganym przez normę, nie były brane pod uwagę.

Na wykresach zobrazowano wpływ geometrii kanału oraz stożka zagęszczającego, wilgotności materiału, ale również temperatury prowadzenia procesu zagęszczania na DU .

Miskant

Pierwsza para wykresów (Rys. 53a i b) przedstawia wyniki testu trwałości peletów wytworzonych z biomasy w stanie suchym. Z otrzymanych danych możemy wywnioskować, że żaden z wariantów nie spełnił wymogów jakościowych ani dla klasy A, ani dla klasy jakościowej B. Powodem braku dostatecznej wytrzymałości peletów było użycie suchego materiału, który nie był zdolny do utworzenia trwałych połączeń międzycząsteczkowych. Pelety osypywały się, a niejednokrotnie zaraz po opuszczeniu komory zagęszczającej się rozpadały.

Porównując oba poniższe wykresy, można zaobserwować, że zagęszczając biomasę na średnicy $D_I = 10$ mm możemy otrzymać pelet o wyższej wytrzymałości mechanicznej niż przy zagęszczaniu z użyciem stożków o średnicy wejścia $D_I = 12$ mm. Jest to najprawdopodobniej spowodowane tym, że w przypadku $D_I = 10$ mm wartość ciśnienia była wyższa względem $D_I = 12$ mm. Niemniej jednak, jeszcze raz warto zauważyć, że żaden z wyprodukowanych peletów nie osiągnął wartości minimalnej wytrzymałości mechanicznej wymaganej przez normę.



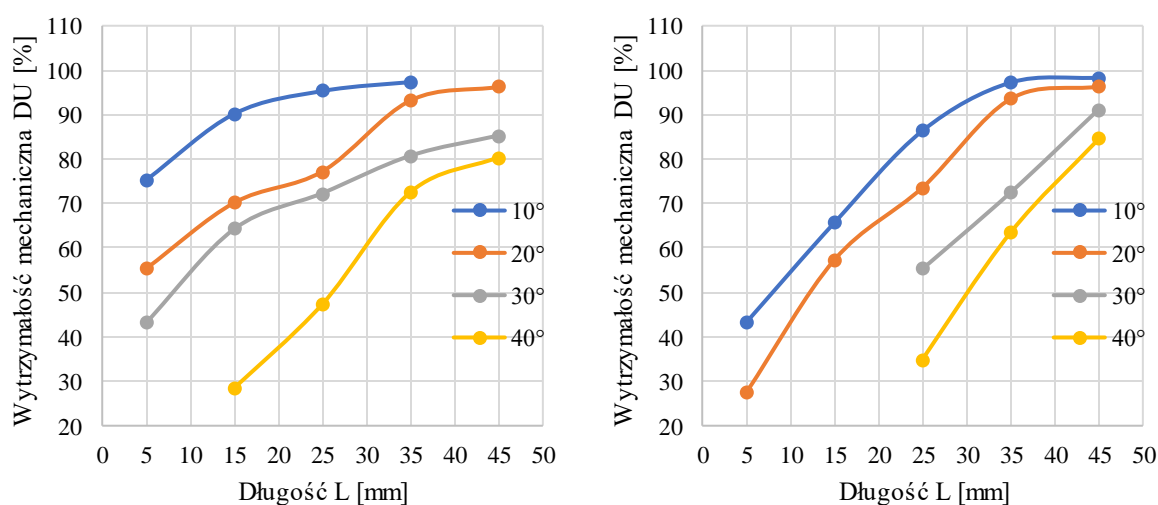
Rysunek 53. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α na wytrzymałość mechaniczną DU peletów w stanie suchym: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

Źródło: własne

Druga para wykresów (Rys. 54a i b) przedstawia analogiczny proces badawczy, ale realizowany na materiale nawilżonym do 13%. Pierwszy z nich zestawia wyniki uzyskane z testów DU prowadzonych na granulach wytworzonych za pomocą stożków zagęszczających o średnicy $D_I = 12$ mm. Użycie wilgotnego materiału pozytywnie wpłynęło na wytrzymałość wytworzonych peletów. Wyniki wskazują, że dwie grupy peletów uzyskały minimalną wartość DU niezbędną, aby spełniać wymogi jakościowe. Były to granule zagęszczane w konfiguracjach $\alpha = 10^\circ$ i $L = 35$ mm oraz $\alpha = 20^\circ$ i $L = 45$ mm. Kolejno uzyskały wytrzymałość mechaniczną na poziomach $DU = 97,3\%$ oraz $DU = 96,3\%$. Oznacza to, że należą one do klasy jakościowej B.

Drugi z wykresów przedstawia wyniki testu DU dla peletów wytworzonych w stożkach zagęszczających o średnicy wejścia $D_I = 10$ mm. Podobnie jak w poprzednim przypadku, użycie materiału o wilgotności 13% również korzystnie wpłynęło na produkcję peletów w porównaniu do materiału suchego. Zaobserwowano, że trzy grupy granul uzyskały niezbędną wytrzymałość mechaniczną. Aglomeraty, które osiągnęły wyniki klasyfikujące je do klasy B osiągnęły konfiguracje: $\alpha = 20^\circ$ i $L = 45$ mm z wynikiem $DU = 96,3\%$ oraz $\alpha = 10^\circ$ i $L = 35$ mm z wynikiem $DU = 97,2\%$. Do klasy jakościowej A można zaliczyć pelet wytworzony przy użyciu stożka zagęszczającego o kącie $\alpha = 10^\circ$ i $L = 45$ mm o wytrzymałości mechanicznej $DU = 98,3\%$. Można zauważyć, że wraz ze zmianą geometrii kanału oraz stożka zagęszczającego oraz wzrostem wilgotności i długości kanału zagęszczającego uzyskiwano pelety o większej wytrzymałości mechanicznej.

Porównując oba wykresy można zauważyć, że prowadzenie procesu zagęszczania z użyciem materiału nawilżonego do 13% okazało się być lepszym wyborem niż zagęszczanie materiału w stanie suchym. Zarówno dla $D_1 = 12$ mm oraz $D_2 = 10$ mm zaobserwowano zmniejszenie ciśnienia zagęszczania oraz wzrost wytrzymałości mechanicznej uzyskanych peletów. Redukcja średnicy otworu wlotowego spowodowała zwiększenie zakresu uzyskanych wyników, ale również pozwoliła na uzyskanie peletów wyższej jakości. Zwiększanie długości kanałów zagęszczających korzystnie wpłynęło na wytrzymałość mechaniczną aglomeratu, natomiast zwiększenie kąta stożka zagęszczającego powodowało pogorszenie się jakości produktu.



Rysunek 54. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α na wytrzymałość mechaniczną DU peletów o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

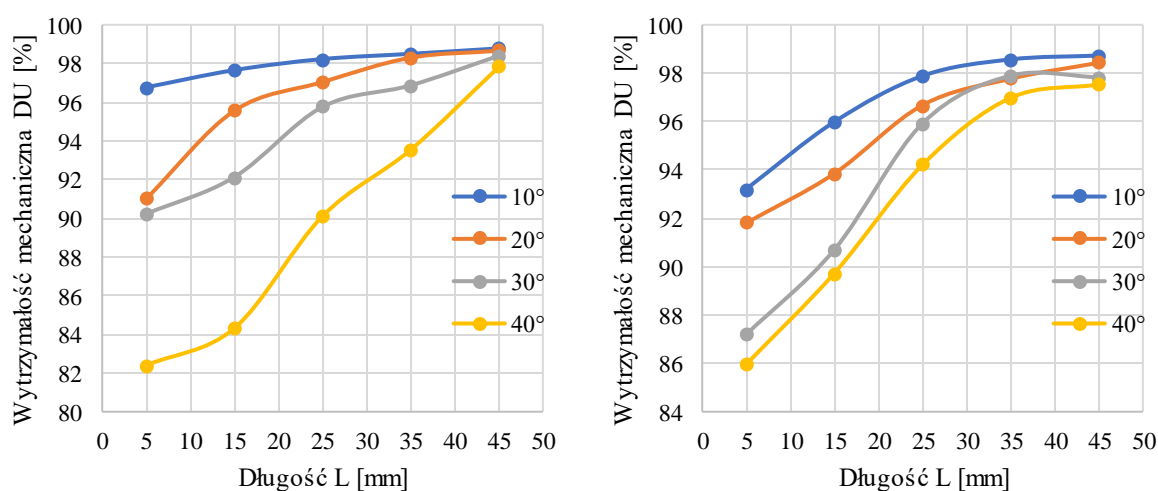
Źródło: własne

Trzecia para wykresów (Rys. 55a i b) przedstawia wyniki uzyskane dla wariantów z uwzględnieniem temperatury 100°C .

Na pierwszym wykresie (dla $D_1 = 12$ mm), można zauważyć, że temperatura poprawia jakości peletów, a dokładniej ich wytrzymałość mechaniczną. Wśród wariantów badawczych trzy spełniają kryteria jakościowe klasyfikujące je tylko do klasy B oraz aż osiem klasyfikuje się do klasy jakościowej A. Klasę B osiągnęły pelety wytworzone w stożkach zagęszczających o kącie $\alpha = 10^{\circ}$ i $L = 5$ mm, $\alpha = 20^{\circ}$ i $L = 25$ mm oraz $\alpha = 30^{\circ}$ i $L = 35$ mm. Klasę A osiągnięto dla konfiguracji: $\alpha = 10^{\circ}$ oraz $L = 15; 25; 35$ oraz 45 mm, $\alpha = 20^{\circ}$ i $L = 35$ oraz 45 mm, $\alpha = 30^{\circ}$ i $L = 45$ mm, $\alpha = 40^{\circ}$ i $L = 45$ mm. Najwyższą wytrzymałością $DU = 98,8\%$ charakteryzują się pelety wytworzone za pomocą stożka zagęszczającego o kącie $\alpha = 10^{\circ}$ i $L = 45$ mm.

Drugi wykres sporządzony dla $D_I = 10$ mm, wskazuje, że połowa zaproponowanych wariantów spełnia wymogi jakościowe podyktowane normami. Dwa z nich zaliczają się do klasy jakościowej B, a pozostałe osiem można zaliczyć też do klasy A. W klasie B znalazły się pelety wykonane w konfiguracji: $\alpha = 20^\circ$ i $L = 25$ mm oraz $\alpha = 40^\circ$ i $L = 35$ mm. Warianty, które zaliczają się do klasy A to: $\alpha = 10^\circ$ oraz $L = 25; 35; 45$ mm, $\alpha = 20^\circ$ oraz $L = 35; 45$ mm, $\alpha = 30^\circ$ oraz $L = 35; 45$ mm, $\alpha = 40^\circ$ oraz $L = 45$ mm. Najwyższym wynikiem $DU = 98,7\%$ charakteryzuje się pelet uzyskany w konfiguracji $\alpha = 10^\circ$ i $L = 45$ mm.

Porównując oba wykresy można zaobserwować, że geometria kanału zagęszczającego oraz stożka, wilgotność materiału, ale również temperatura prowadzenia procesu korzystnie wpływają na jakość otrzymywanego granulatu zwiększając jego wytrzymałość mechaniczną.



Rysunek 55. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α oraz temperatury 100°C na wytrzymałość mechaniczną DE peletów o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

Źródło: własne

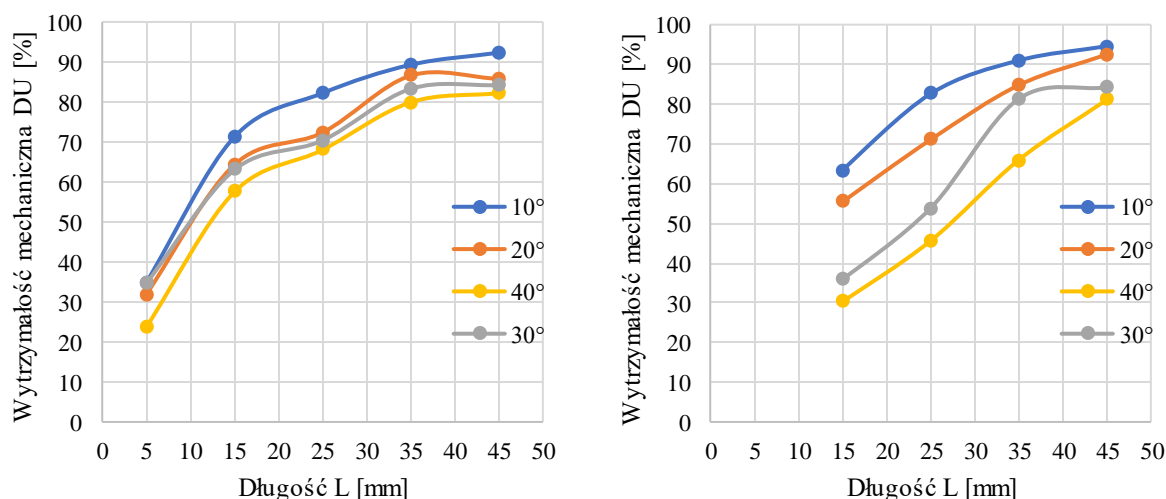
Rożnik

W przypadku zagęszczania suchego materiału rożnika, zaobserwowano, że przy $D_I = 12$ mm wszystkie warianty kąta stożka mają bardzo zbliżone do siebie przebiegi. Uzyskane wyniki mieściły się w zakresie $DU = 23,7 - 92,3\%$ (Rys. 56a). Co oznacza, że żaden z wytworzonych peletów nie spełnił kryterium jakościowego.

Drugi z wykresów (Rys. 56b) wykonano dla $D_I = 10$ mm. Na wykresach można zaobserwować, że zakres wytrzymałości mechanicznej to $DU = 30,2 - 94,6\%$. Jak w poprzednim przypadku, żaden z wariantów nie spełnia kryterium normatywnego dotyczącego DU . Najwyższa zanotowana wytrzymałość mechaniczna $DU = 94,6\%$ została zarejestrowana dla peletów zagęszczanych za pomocą stożków zagęszczających o kącie $\alpha = 10^\circ$

i $L = 45$ mm. Najniższą wytrzymałość mechaniczną $DU = 30,2\%$ osiągnął pelet zagęszczony w konfiguracji stanowiska $\alpha = 40^\circ$ oraz $L = 15$ mm. Wszystkie pelety wytworzone na długości kanału zagęszczającego $L = 5$ mm okazały się być na tyle złe jakościowo, że nie przetrwały testu wytrzymałościowego.

Analizując oba wykresy można stwierdzić, że w stanie suchym nie ma możliwości uzyskania wymaganej DU peletów.

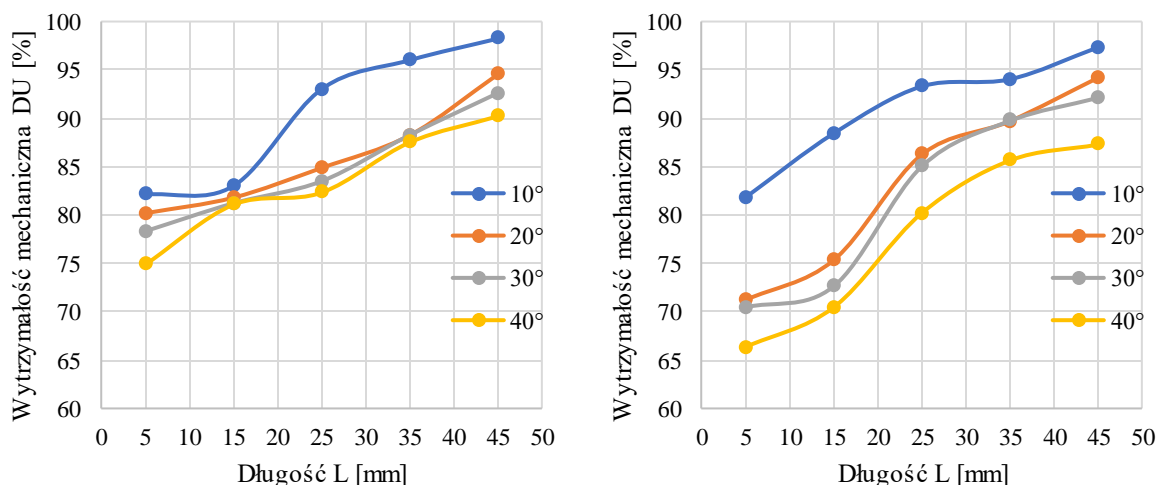


Rysunek 56. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α na wytrzymałość mechaniczną DU peletów w stanie suchym: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

Źródło: własne

Nawilżenie materiału zagęszczanego do poziomu 13% wpłynęło pozytywnie na uzyskane wartości DU (Rys. 57a i b). Dla $D_I = 12$ mm wyniki wytrzymałości mechanicznej DU wskazują, że istnieje możliwość uzyskania peletów spełniających kryteria jakościowe zarówno dla klasy jakościowej B jak również A. Aglomerat, który spełniał kryteria dla klasy B został uzyskany za pomocą stożka zagęszczającego o kącie $\alpha = 10^\circ$ oraz $L = 35$ mm a jego $DU = 96\%$. Pelet spełniający kryteria jakościowe dla klasy A został uzyskany na stożku o kącie $\alpha = 10^\circ$ oraz $L = 45$ mm a jego $DU = 98,2\%$. Przedział w jakim zarejestrowano wyniki DU to 74,9 – 98,2%. Wyróżniający się wzrost wytrzymałości zaobserwowano dla biomasy zagęszczanej za pomocą stożka o kącie $\alpha = 10^\circ$.

W przypadku $D_I = 10$ mm, zaobserwowano, że jedynie jedna grupa peletów spełniła wymagania jakościowe i znalazła się w klasie jakościowej B. Konfiguracja kanału to $\alpha = 10^\circ$ oraz $L = 45$ mm a wartość uzyskana to $DU = 97,3\%$. Wyróżniającą się serią badawczą była ta zagęszczana na stożku o kącie $\alpha = 10^\circ$. Charakteryzowała się najwyższymi (w ramach tej samej długości kanału) wynikami testu trwałości, jednak wymaganą wartość uzyskał zaledwie jeden granulak.



Rysunek 57. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α na wytrzymałość mechaniczną DU peletów o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

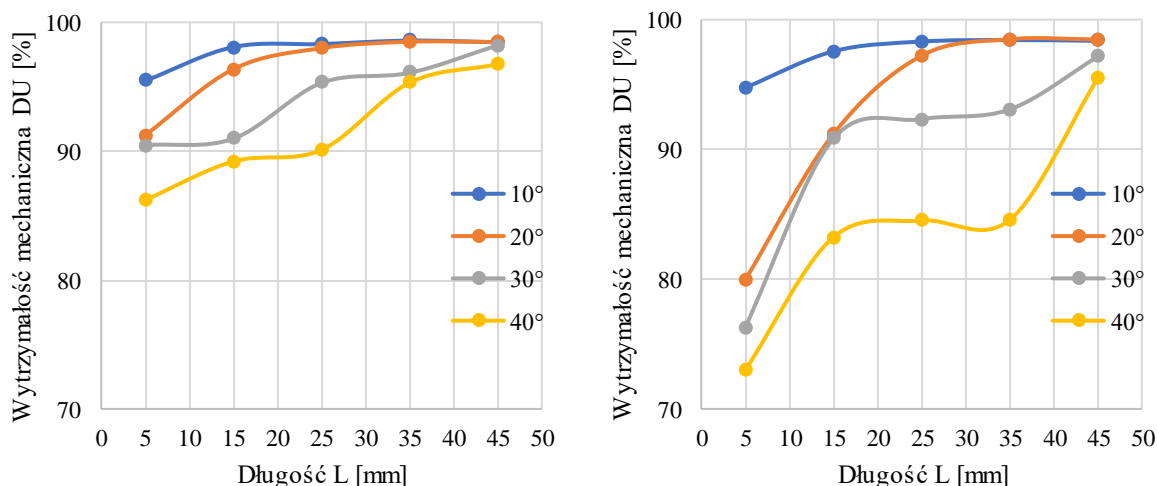
Źródło: własne

Wprowadzenie czynnika temperaturowego miało również pozytywny wpływ na uzyskane wartości DU (Rys. 58a i b). Dla $D_I = 12$ mm najniższą wytrzymałością mechaniczną $DU = 86,2\%$ charakteryzowały się pelety zagęszczone na stożku o kącie $\alpha = 40^\circ$ oraz $L = 5$ mm. Wśród badanych konfiguracji aż jednaście spełniło wymagania jakościowe podyktowane normą. Samą klasę jakościową B osiągnęły pelety uzyskane na kombinacjach: $\alpha = 20^\circ$ oraz $L = 15$ mm, $\alpha = 30^\circ$ oraz $L = 35$ mm, $\alpha = 40^\circ$ oraz $L = 45$ mm. Klasę jakościową A osiągnęły pelety: $\alpha = 10^\circ$ oraz $L = 15; 25; 35; 45$ mm, $\alpha = 20^\circ$ oraz $L = 25; 35; 45$ mm, $\alpha = 30^\circ$ oraz $L = 45$ mm. Zaobserwowano, że najwyższą wytrzymałość DU osiągnięto na kanałach długości 35 mm, wydłużenie kanału o kolejne 10 mm spowodowało niewielki spadek wytrzymałości mechanicznej.

W przypadku $D_I = 10$ mm kryterium jakościowe zostało spełnione przez osiem grup peletów. Samą klasę jakościową B uzyskały granule zagęszczane w konfiguracji: $\alpha = 20^\circ$ oraz $L = 25$ mm, $\alpha = 30^\circ$ oraz 45 mm. Klasę A uzyskały konfiguracje: $\alpha = 10^\circ$ oraz $L = 15; 25; 35; 45$ mm, $\alpha = 20^\circ$ oraz $L = 35; 45$ mm. Największą wytrzymałość mechaniczną zanotowano dla $\alpha = 10^\circ$ oraz $L = 35$ mm z wynikiem $DU = 98,5\%$. Wśród serii badawczych najbardziej wyróżnia się $\alpha = 10^\circ$, która na całym przebiegu charakteryzuje się wysoką trwałością. Pozostałe serie na długości kanału $L = 5$ oraz 15 mm mają niską wytrzymałość. Najgorszym wariantem z wybranych okazał się $\alpha = 40^\circ$, ponieważ żadna długość kanału nie spowodowała osiągnięcia wymaganej DU .

Porównując ze sobą oba warianty średnicy wejściowej można zauważyć, że większa średnica otworu wlotowego jest lepszym rozwiązaniem, jeśli chodzi o zagęszczanie rożnika.

Dzięki niej otrzymano więcej grup peletów spełniających próg jakościowy. Zauważono również, że większa średnica powoduje, że zakres wartości jest dużo mniejszy niż w przypadku mniejszej średnicy. Jest to spowodowane wyższym ciśnieniem procesu zagęszczania w przypadku $D_I = 12$ mm, które w połączeniu z wilgotnością materiału oraz temperaturą procesu pozwalają na wytworzenie trwalszych połączeń międzycząsteczkowych a co za tym idzie lepszych jakościowo peletów.

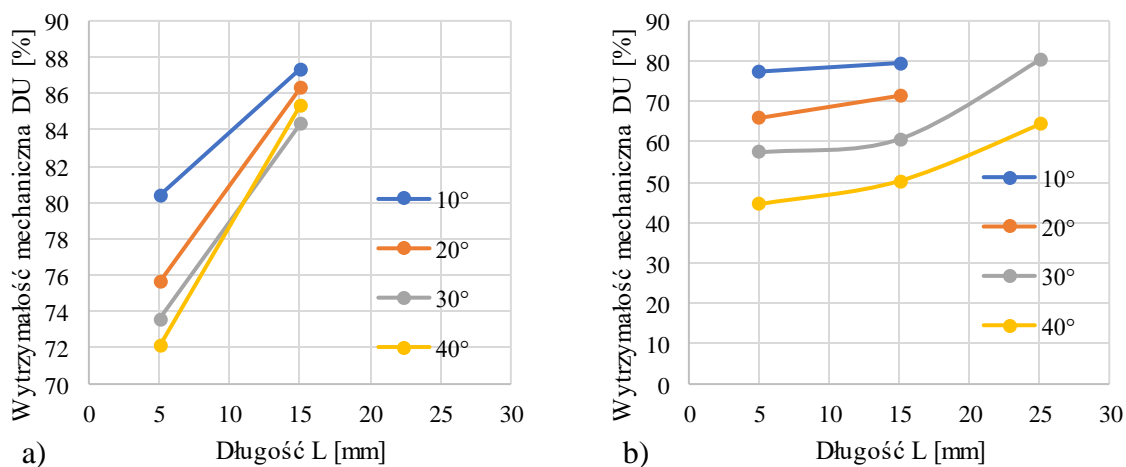


Rysunek 58. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α oraz temperatury 100°C na wytrzymałość mechaniczną DE peletów o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

Źródło: własne

Ślazowiec

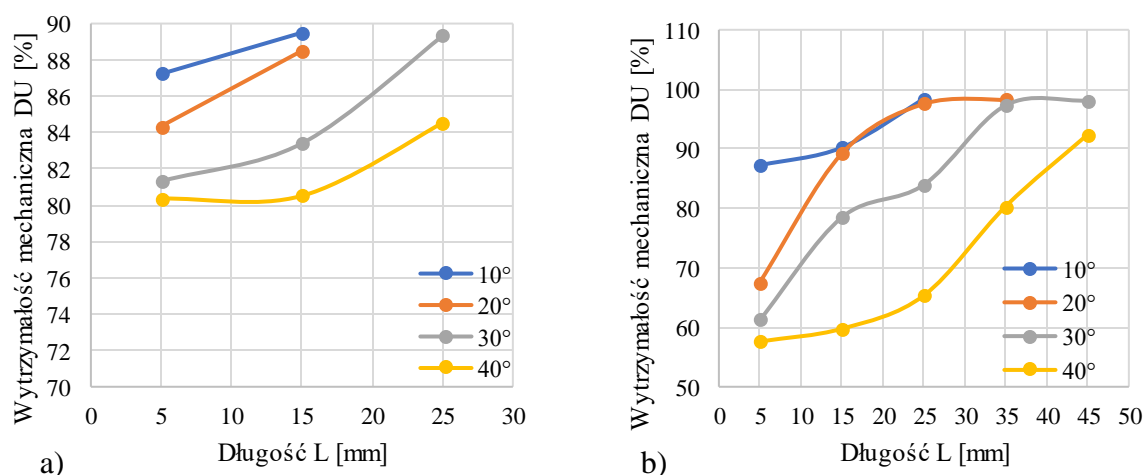
W przypadku zagęszczania ślazowca w stanie suchym, żadna z badanych konfiguracji nie uzyskała założonych progów jakościowych (Rys. 59a i b).



Rysunek 59. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego na wytrzymałość mechaniczną peletów w stanie suchym: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

Źródło: własne

Po nawilżeniu materiału do 13% sytuacja uległa nieznacznej poprawie (Rys. 60a i b). Co prawda żaden pelet wytworzony z użyciem stożków zagęszczających o średnicy otworu wejściowego 12 mm nie osiągnęły progowych wartości DU , jednak już w przypadku zagęszczania na stożkach o $D_I = 10$ mm, w czterech przypadkach uzyskano odpowiedni poziom wytrzymałości mechanicznej. Jeden z wariantów osiągnął niezbędną wartość DU dla klasy jakościowej B. Konfiguracją jaką zastosowano to kąt $\alpha = 30^\circ$ oraz $L = 35$ mm, a osiągnięta wytrzymałość jest równa $DU = 97,3\%$ a więc blisko progę DU dla klasy A. Klasę tą osiągnęły pelety zagęszczone na konfiguracji: $\alpha = 10^\circ$ oraz $L = 25$ mm, $\alpha = 20^\circ$ oraz $L = 35$ mm, $\alpha = 30^\circ$ oraz $L = 45$ mm.



Rysunek 60. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego na wytrzymałość mechaniczną peletów o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

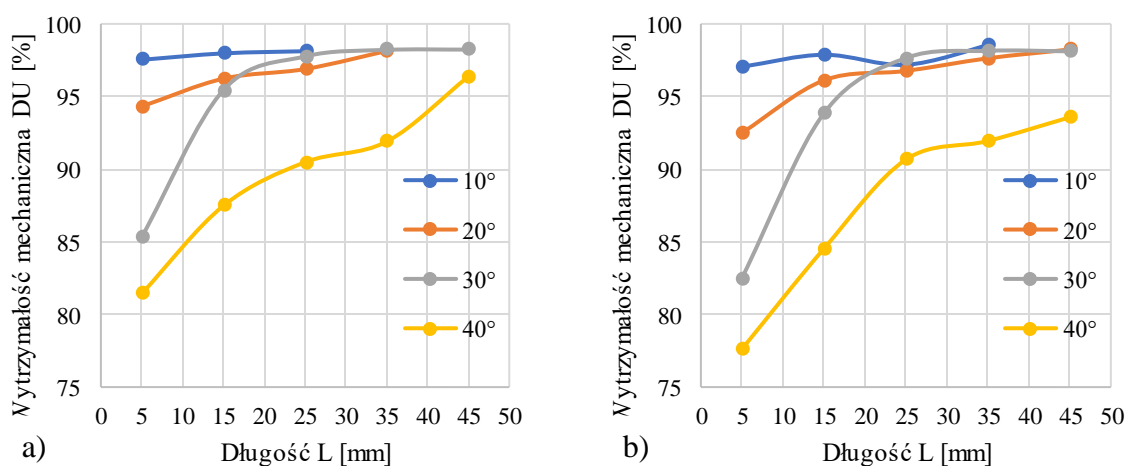
Źródło: własne

Dopiero wprowadzenie do badań czynnika temperaturowego wywołało znacząca poprawę uzyskiwanych wartości DU (Rys. 61a i b).

Granulat uzyskany w procesie zagęszczania na stożkach o średnicy otworu wejściowego $D_I = 12$ mm spełnia wymogi jakościowe przy dziesięciu kombinacjach kąta i długości. Trzy konfiguracje pozwalają na uzyskanie peletu spełniającego tylko wymagania jakościowe dla klasy B a pozostałe kwalifikują się do klasy A. Klasa B została osiągnięta przy konfiguracji: $\alpha = 20^\circ$ oraz $L = 15; 25$ mm, $\alpha = 40^\circ$ oraz $L = 45$ mm. Klasę A uzyskały konfiguracje: $\alpha = 10^\circ$ oraz $L = 5; 15; 25$ mm, $\alpha = 20^\circ$ oraz $L = 35$ mm, $\alpha = 30^\circ$ oraz $L = 25; 35; 45$ mm. Najwyższą wytrzymałość zaobserwowano dla próbek wytworzonych przy kącie $\alpha = 30^\circ$ oraz długości kanału 45 mm i wyniosła 98,2%.

Z kolei pelety wytworzone na stożkach o średnicy otworu wlotowego $D_I = 10$ mm charakteryzowały się podobną wytrzymałością mechaniczną do peletów wytworzonych na stożkach o $D_I = 12$ mm. Osiem konfiguracji pozwoliło na uzyskanie granulii o właściwościach spełniających wymagania normatywne. Trzy z nich zakwalifikowały się do klasy jakościowej B, a konfiguracje, które to umożliwiły to: $\alpha = 10^\circ$ oraz $L = 5; 15; 25$ mm. Klasę A uzyskały pelety zagęszczone na konfiguracji: $\alpha = 10^\circ$ oraz $L = 35$ mm, $\alpha = 20^\circ$ oraz $L = 35; 45$ mm, $\alpha = 30^\circ$ oraz $L = 35; 45$ mm. Najwyższą $DU = 98,5\%$ osiągnęła grupa peletów wytworzonych za pomocą $\alpha = 10^\circ$ oraz $L = 35$ mm.

Porównując ze sobą oba warianty średnic stożków, można zauważyć, że są one do siebie podobne.



Rysunek 61. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego temperatury 100°C na wytrzymałość mechaniczną peletów o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm

Źródło: własne

Podsumowując ten etap, należy stwierdzić, że niezależnie od badanego materiału łatwiej uzyskać wymaganą gęstość peletu niż jego trwałość (wymagany próg DE wymaga zastosowania krótszego kanału L niż w przypadku DU). Jest to najczęstszy przypadek, jednak nie reguła w przypadku biomasy zagęszczanej na cele energetyczne. Jak wykazały badania zagęszczalności i kompaktowalności biomasy lignocelulozowej prowadzone przez Wróbla, można spotkać przypadki biomasy, która wraz ze wzrostem ciśnienia zagęszczania wcześniej uzyskuje wymagana wartość DU a dopiero później DE (Wróbel, 2019). Takim przykładem jest biomasa jodły i topoli (w tym przypadku zagęszczane w stanie suchym). Spotkać się można też materiałem który co prawda osiąga próg DE ale wraz ze wzrostem ciśnienia wartość DU nie jest uzyskiwana.

Pomimo minimalizacji czynników materiałowych (wilgotność, ujednoczony skład ziarnowy) widać wyraźnie wpływ specyficznych cech materiału (interakcje współczynnika tarcia, gęstości właściwej i bezwzględnej, porowatości, składu strukturalnego itp.) na uzyskane wyniki DE i DU oraz wartość towarzyszącego procesowi ciśnienia. Pomimo takich samych zakresów zmiennych geometrii kanału zagęszczającego, w zależności od materiału, przebiegi DE i DU różnią się od siebie. Wpływ poszczególnych cech materiału jak i ich wpływu na przebieg procesu wymaga oczywiście dalszych badań jednak istotnym jest fakt, że na podstawie badanego w pracy zakresu zmiennych geometrycznych da się znaleźć warianty pozwalające na uzyskanie odpowiedniej jakości peletu wytworzonego z badanych gatunków biomasy.

Na podstawie przedstawionych powyżej zależności wiemy, że dla każdego materiału istnieje kombinacja kąta i długości która pozwala uzyskać próg wymaganej gęstości oraz że dla każdego materiału istnieje kombinacja kąta i długości która pozwala uzyskać próg wytrzymałości mechanicznej. Jednak nie możemy jednoznacznie określić kiedy (przy jakim kącie stożka α i jakiej minimalnej długości L) pelet uzyska wymagane progi DE i DU i jednocześnie będzie to miało miejsce przy możliwie najniższym ciśnieniu. Inaczej mówiąc trudno wskazać optymalną dla danego materiału (lub wszystkich materiałów) optymalną kombinację kąta α i długości L .

Taką możliwość dało by zestawienie wszystkich powyższych danych na jednym miejscu. Na takie zestawienie pozwoliły, opracowane na potrzeby niniejszej pracy, mapy zmian parametrów jakościowych peletu na tle przebiegu zmian ciśnienia zagęszczania towarzyszącego procesowi.

6.4 Mapy zmian parametrów jakościowych peletu

Ze względu na fakt, iż pelety uzyskane w efekcie zagęszczania materiału w stanie suchym nie uzyskały wymaganych poziomów parametrów jakościowych oraz fakt, że jak podaje literatura, do produkcji peletów biomasa powinna mieć co najmniej 8% (Arshadi i in., 2008; Huang i in., 2017).

Mapy zmian parametrów jakościowych peletu wykonano dla peletów wytworzonych w wariancie badawczym w którym materiał miał wilgotność 13% oraz wariancie badawczym w którym materiał wilgotność miał wilgotność 13% i był podgrzewany w tulei do 100°C.

Na mapach wykonanych dla jednego materiału, kolorem jasnozielonym oznaczono obszar w którym pelety spełniają kryterium jakościowe klasy A, Ciemniejszym odcieniem koloru zielonego oznaczono pole w którym pelety uzyskują tylko jakość klasy B. Kolor niebieski został zarezerwowany dla peletów, które osiągnęły gęstość właściwą DE na poziomie równym lub większym niż $1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a nie uzyskały jeszcze wymaganego progu DU . Obszary zaznaczone kolorem czerwonym to te w których pelety nie spełniają żadnego z przyjętych

kryteriów jakościowych. Linia czerwona zaznaczono warstwicę, które odpowiadały wartości ciśnienia.

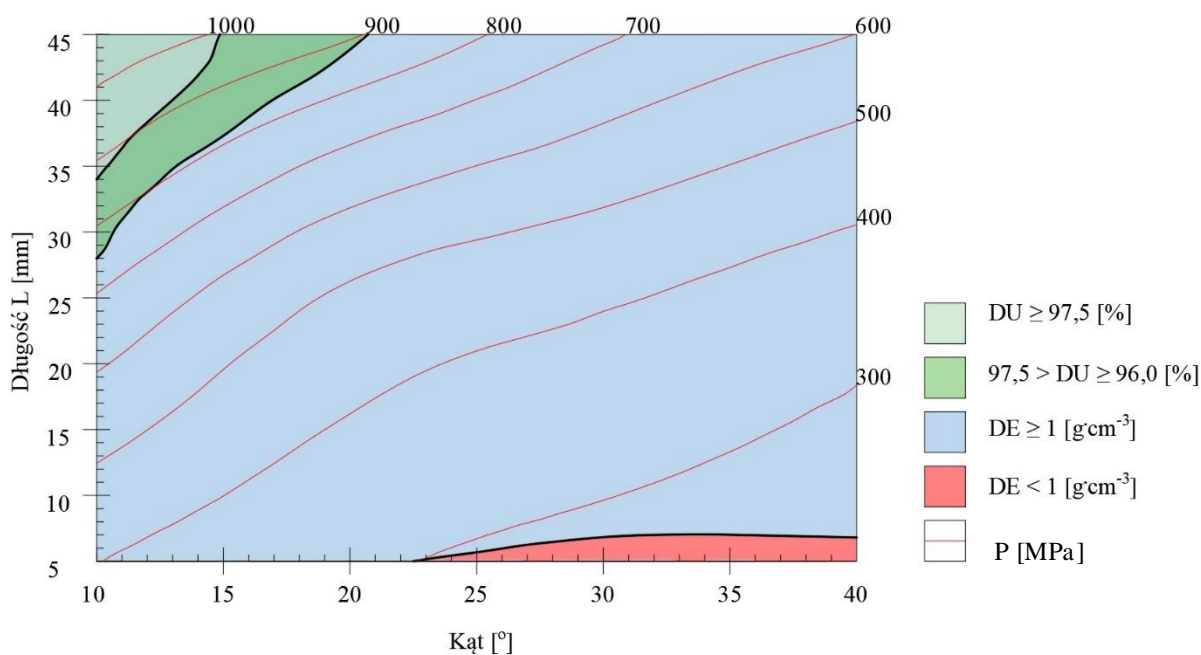
Jak już wspomniano, mapy zmian parametrów jakościowych peletu pozwalają na dokładne dobranie zakresów geometrii kanału zagęszczającego (zakres wartości kąta stożka i minimalnej długości strefy cylindrycznej), które zastosowane w procesie zagęszczania miskanta, rożnika oraz ślazuca, zapewnią wytworzenie peletów klasy jakościowej A lub B, w zależności od wymagań procesu. Dodatkowo pozwalają na wskazanie, której z dopuszczalnej kombinacji wartości kąta i długości, towarzyszyć będzie najniższa wartość ciśnienia. Aby właściwie odczytać geometrię, która pozwala na zagęszczenie materiału w sposób, który zagwarantuje otrzymanie aglomeratu wysokiej jakości należy wybrać punkt w obszarze, który jest opisany jako spełniający kryteria jakościowe. Następnie należy go rzutować na oś X oraz Y, co pozwoli odczytać odpowiednie wartości kąta i długości. Wraz z kątem stożka zagęszczającego oraz długością kanału zagęszczającego za pomocą warstwic odczytujemy ciśnienie jakiego możemy spodziewać się podczas procesu.

Taki sposób odczytu wymaganej dla danego materiału geometrii kanału, jest bardzo ważny ze względów produkcyjnych, ponieważ pozwala uzyskać produkt wysokiej jakości stosując optymalne wartości parametrów procesu zagęszczania, ale również z uwagi na dobór odpowiednich matryc do aglomeracji tej biomasy. Jest to nowa, nowatorska metoda wyznaczania parametrów kanału matrycy do danego procesu ciśnieniowego zagęszczania. Do tej pory w literaturze taka metoda nie została zaproponowana.

Miskant

Pierwsza z prezentowanych map dotyczy zmian parametrów jakościowych peletu wytworzonego z biomasy miskanta o wilgotności 13% z zastosowaniem stożków o średnicy podstawy $D_1 = 12$ mm (Rys. 62). Dzięki zestawieniu można wyraźnie zauważyć, w jakich zakresach parametrów pelet uzyskuje wartości, które spełniają kryteria jakościowe. Zaobserwowano, że wymaganą gęstość DE można osiągnąć niemalże przy zastosowaniu każdego wariantu badanych kątów stożków i długości kanału, a jedynie przedział kątów $22,5 - 40^\circ$ na długości kanału zagęszczającego $5 - 7$ mm nie zapewni spełnienia wymagań. Przy zastosowaniu reszty możliwych kombinacji pelety osiągały gęstość $DE \geq 1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Jednak powierzchnia mapy, która opisuje wartości parametrów pozwalających na osiągnięcie klasy A (jednoczesne uzyskanie progów $DU \geq 97,5\%$ i $DE \geq 1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ stanowi niewielką część całej powierzchni mapy. Wyraźnie widać tu, co już sygnalizowano wcześniej, że uzyskanie wymaganej gęstości jest „łatwiejsze” niż uzyskanie odpowiedniej wytrzymałości (mamy do dyspozycji węższy zakres kątów a dobrany kanał musi być dłuższy). Najlepszej jakości pelet można uzyskać zagęszczając biomasę na kanale długości $34 - 45$ mm przy użyciu stożka

zagęszczającego o kącie rozwarcia z zakresu 10° . Kąt ten możemy zwiększyć do wartości 15° ale wymagać to też będzie wydłużenia kanału do 45 mm. Pelet klasy B można otrzymać stosując kanał długości 28 – 34 mm oraz stożek o kącie 10° , ale również 37 – 45 mm oraz 15° jak również 45 mm i 20° , jak również stosując wszystkie wartości pośrednie wzdłuż linii warstwy klasy B. Jeśli natomiast procesowi temu ma towarzyszyć dodatkowo najniższa z możliwych wartość ciśnienia to geometria kanału musi być następująca: α : 10° ; L: 34 mm. Wartość ciśnienia wyniesie wtedy około 870 MPa.



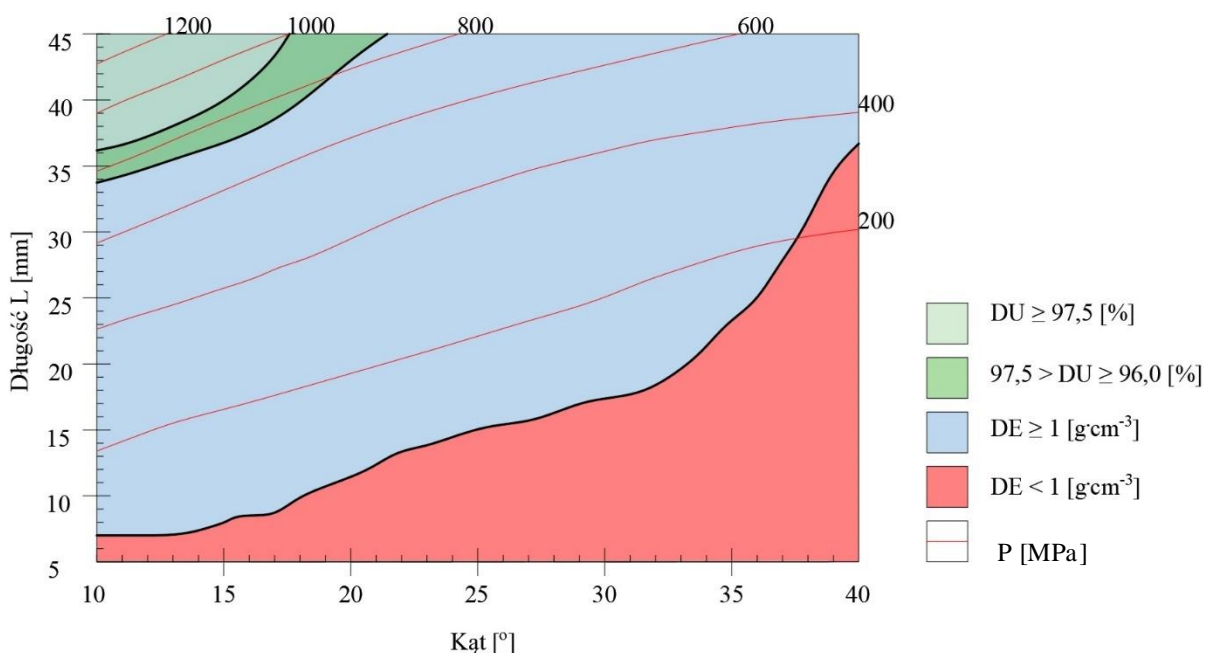
Rysunek 62. Mapa zmian parametrów jakościowych dla miskanta $M_{13\%}$, $D_1 = 12$ mm

Źródło: własne

Redukując średnicę otworu wlotowego do stożka zagęszczającego z 12 mm na 10 mm można zauważyć zmianę w powierzchniach zajętych przez specyficzne obszary (Rys. 63). Zmniejszenie średnicy spowodowało widoczne zmniejszenie powierzchni wariantów spełniających wymagania jakościowe odnoszące się do gęstości peletów. Kolejna zmiana dotyczy ciśnienia, które wzrosło w strefie górnych wartości długości kanału L . Jest to ważna informacja, ponieważ chcąc osiągnąć dobrej jakości pelet, trzeba liczyć się z większym ciśnieniem. Projektując, np.: matryce do produkcji peletów należy wziąć te informacje pod uwagę, ponieważ nieodpowiednio dobrane parametry wytrzymałościowe mogą skutkować usterkami rolek, łożysk itp.

Jednak szukając optymalnej geometrii, ponownie najlepszy jakościowo pelet (klasy A) można otrzymać stosując kombinację α : 10° ; L: 34mm dla której wartość ciśnienia wyniesie około 880 MPa a więc porównywalnie jak w poprzednim wariantcie. W tym przypadku mamy

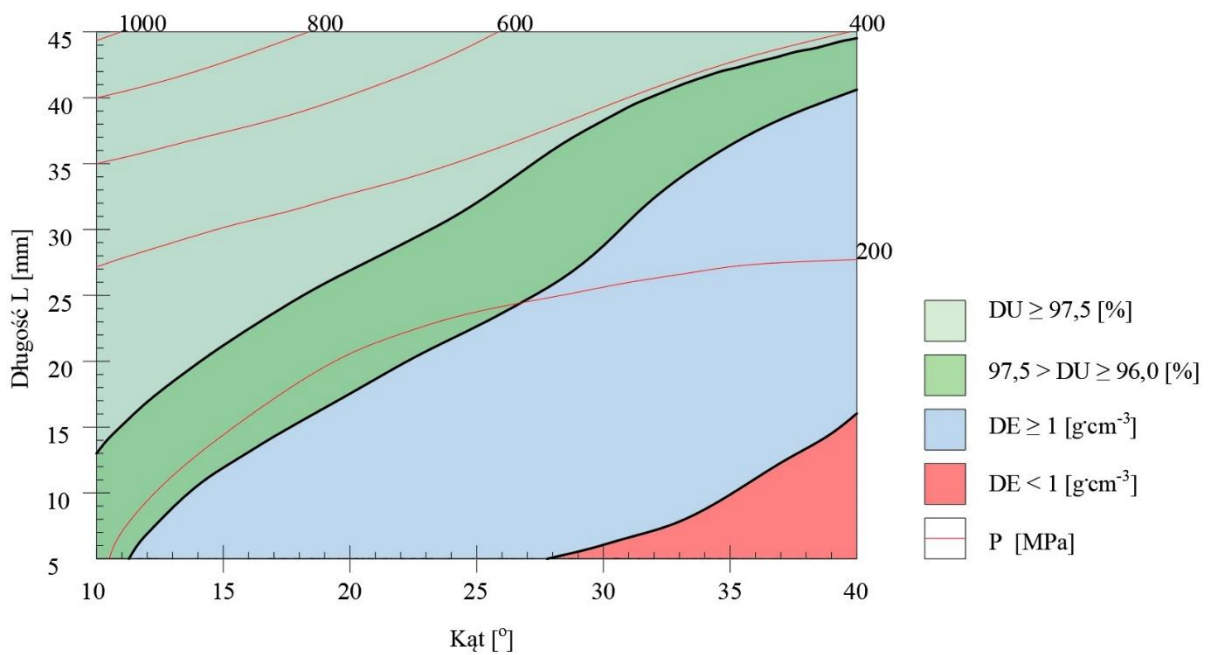
do dyspozycji szerszy zakres kąta ($10^\circ - 21^\circ$) ale ich wybór wiąże się ze wzrostem wartości ciśnienia zagęszczania.



Rysunek 63. Mapa zmian parametrów jakościowych dla miskanta $M_{13\%}$, $D_1 = 10$ mm

Źródło: własne

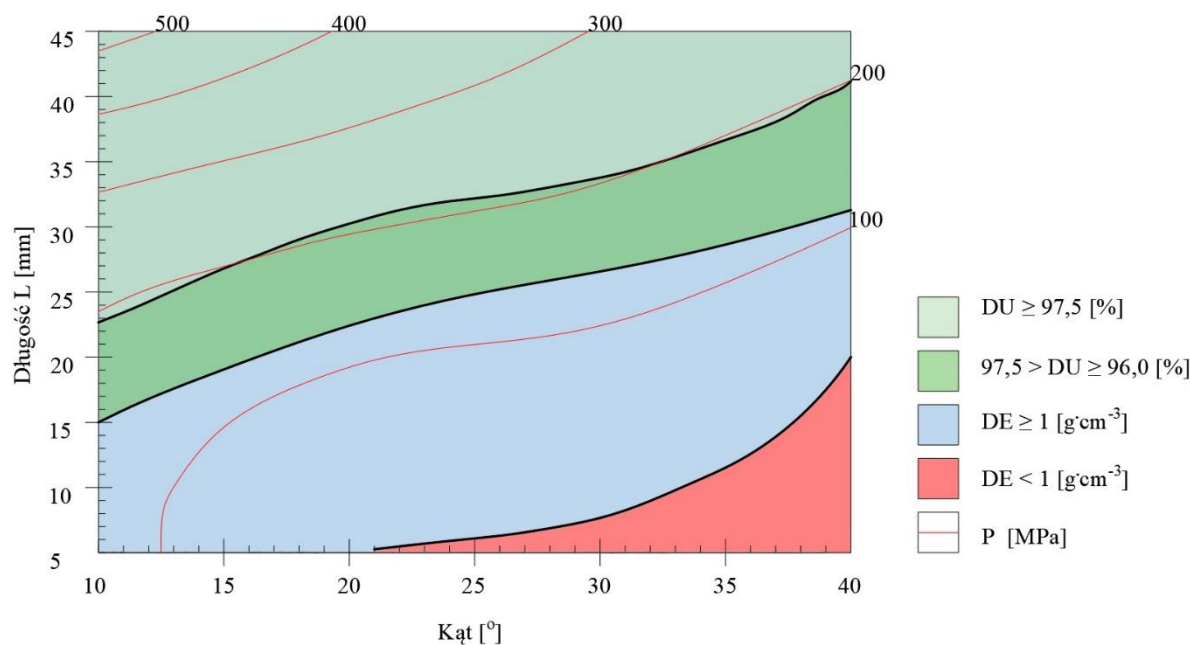
Większe zmiany polegające na zwiększeniu się obszarów jakości klasy A spowodowało uwzględnienie w procesie temperatury (Rys. 64 i 65). Badania potwierdziły zatem powszechną zależność jakości peletu od temperatury procesu (Franzaring i in., 2015; Križan i in., 2014; Larsson i in., 2013; Lisowski i in., 2017; Nielsen i in., 2009; Rhén i in., 2005a). Ponadto, w rzeczywistych warunkach procesu wręcz niemożliwe jest pominięcie tego czynnika, występuje on w wyniku tarcia materiału o powierzchnię kanału zagęszczającego. Na etapie badań mógł on być w jednym wariantcie pominięty, a porównanie wariantów z i bez temperatury pokazuje skalę wpływu czynnika temperaturowego na przebieg procesu i jakość peletu. Aglomerat klasy A można osiągnąć stosując każdy kąt z badanego zakresu, natomiast optymalnymi warunkami jest zastosowanie kanału długości 13 mm wraz ze stożkiem zagęszczającym o kącie rozwarcia 10° , ponieważ ciśnienie procesu zagęszczania jest wtedy najniższe i wynosi około 280 MPa. Dla klasy B, optymalnym jest zakres kąta z przedziału $11 - 21^\circ$, wtedy minimalne ciśnienie ma wartość poniżej 200 MPa, wzrost wartości kąta powoduje stopniowy wzrost ciśnienia.



Rysunek 64. Mapa zmian parametrów jakościowych dla miskanta $M_{13\%}$, $D_I = 12$ mm, 100°C

Źródło: własne

Zastosowanie stożków zagęszczających o średnicy $D_I = 10$ mm zmienia wymagania co do optymalnej geometrii. Wraz z redukcją D_I zmieniły się wartości, jakie gwarantują otrzymanie jakościowo najlepszego peletu. Aglomerat klasy A można teraz uzyskać stosując ten sam stożek o kącie 10° ale kanał musi mieć minimalną długość 24 mm. Podobnie jak dla $D_I = 10$ mm, pelet klasy A można osiągnąć stosując każdy kąt z badanego zakresu i co warto zauważyć wzrost wartości kąta nie powoduje znacznych zmian ciśnienia towarzyszącego procesowi (około 200 MPa, co za tym idzie, w tym przypadku każdy kąt α z odpowiednio dobraną długością L pozwoli na uzyskanie peletów klasy A przy podobnej wartości ciśnienia. W porównaniu do wariantu bez temperatury istotnie spadła wartość ciśnienia towarzyszącego procesowi, w punktach optymalnej geometrii spadła ona z wartości około 880 MPa do wartości 280 MPa ($D_I = 12$ mm) i 200 MPa ($D_I = 10$ mm).



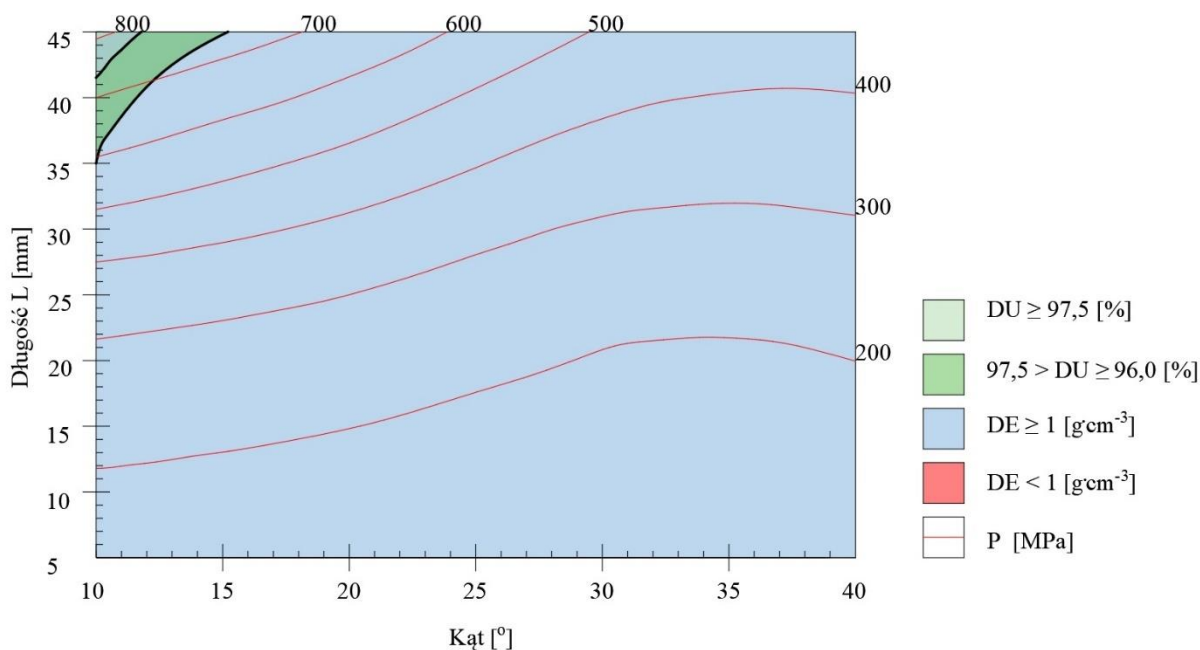
Rysunek 65. Mapa zmian parametrów jakościowych dla miskanta $M_{13\%}$, $D_I = 10$ mm, 100°C

Źródło: własne

Podsumowując, analiza danych zawartych na mapach zmian parametrów jakości pozwala stwierdzić, że dla miskanta optymalna geometria kanału to: $D_I = 10$ mm, α w zakresie $10-40^\circ$, L z zakresu 24 - 41 mm dobrane do kąta, minimalne ciśnienie osiągnie wtedy wartość około 200 MPa. Dla kanału to: $D_I = 12$ mm, mamy do dyspozycji tylko $\alpha = 10^\circ$, L równe co najmniej 13mm, spodziewana wartość ciśnienia to 280 MPa. W obu przypadkach proces musi przebiegać w obecności temperatury 100°C .

Rożnik

Mapa na rysunku 66 odnosi się do wyników badań prowadzonych na materiale nawilżonym do 13% o średnicy otworu wlotowego $D_I = 12$ mm. Zakresy odpowiadające klasom jakości A i B nie są duże. Najlepszy jakościowo granulat (klasa A), uzyskano stosując optymalną konfigurację stożka o kącie rozwarcia 10° oraz kanału zagęszczającego długości 42 mm, ciśnienie na poziomie 730 MPa. Klasę B można uzyskać stosując ten sam stożek, natomiast należy użyć kanału długości 35 mm, ciśnienie osiągnie wartość minimalną około 600 MPa.

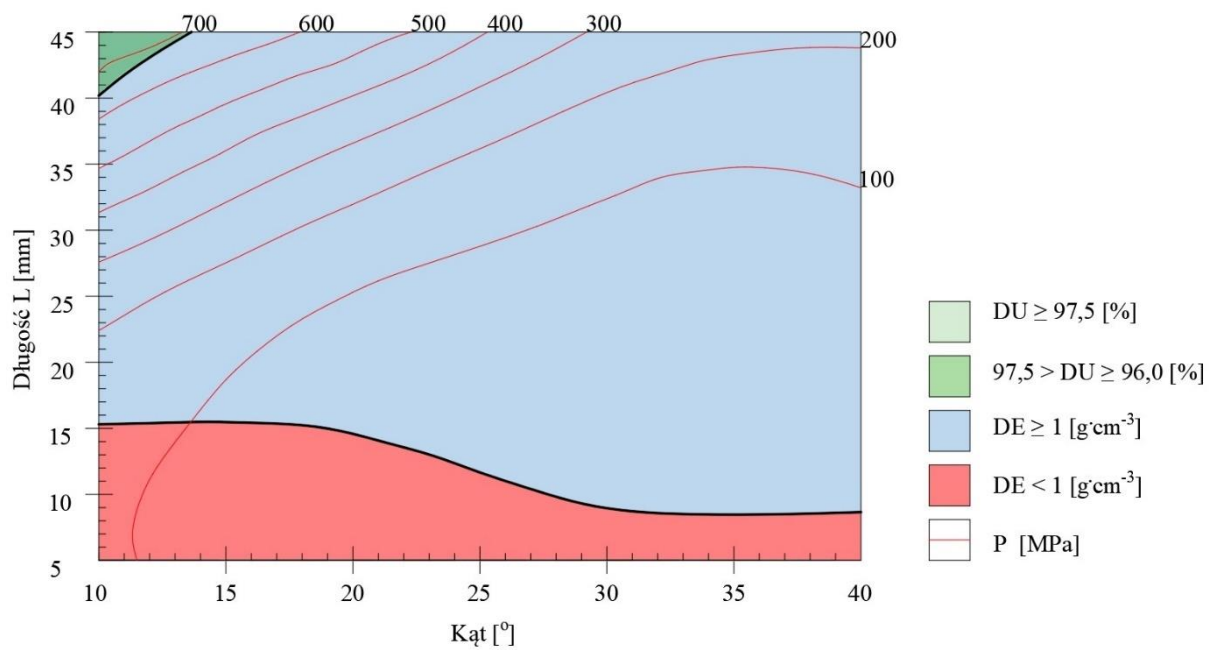


Rysunek 66. Mapa zmian parametrów jakościowych dla roznika $M_{13\%}$, $D_I = 12$ mm

Źródło: własne

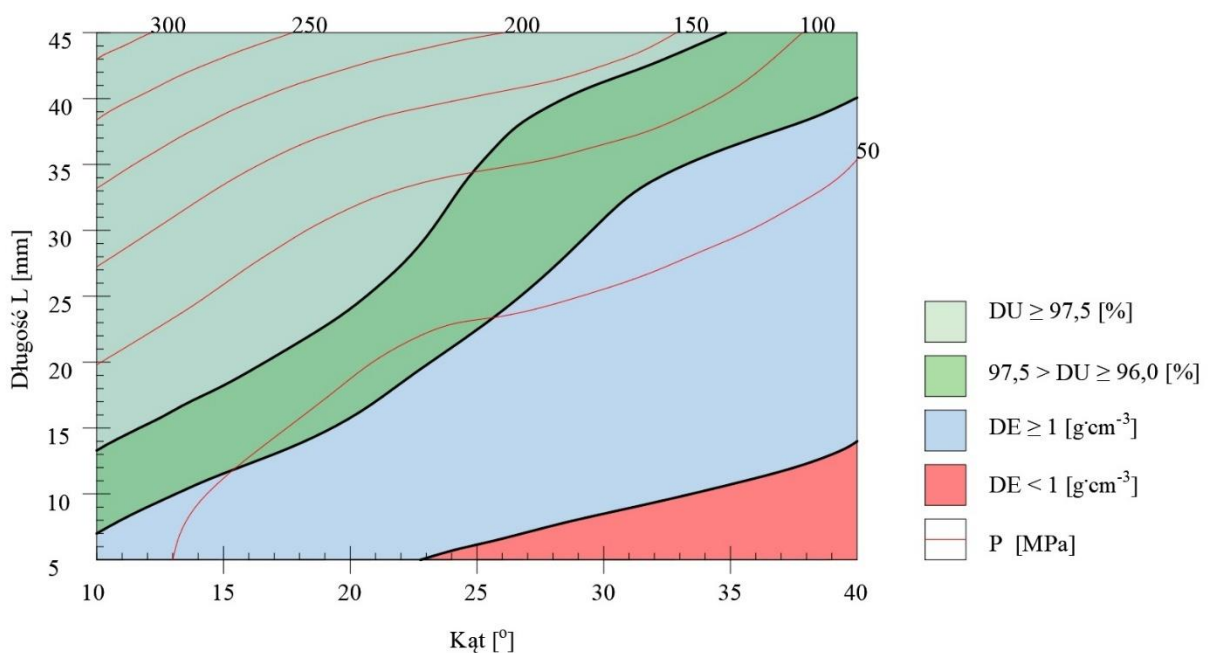
Po zmniejszeniu średnicy otworu wlotowego do $D_I = 10$ mm, żadna z badanych konfiguracji α i L nie gwarantuje uzyskania peletu klasy A (Rys. 66). Wyprodukowany granulát spełniał wymogi klasy B i otrzymano go używając stożka zagęszczającego o kącie rozwarcia z zakresu $10 - 14^\circ$ oraz kanału zagęszczającego długości z zakresu 45 mm, minimalne ciśnienie to 650 MPa. Najprawdopodobniej objętość stożka zagęszczającego jest w tym przypadku zbyt mała i proces zagęszczania co prawda utworzył pelet o odpowiedniej gęstości, jednak nie aktywował wystarczająco procesów scalania cząstek materiału.

Dopiero wprowadzenie do procesu temperatury wywołało znaczną zmianę uzyskiwanych wyników (Rys. 68 i 69). W przypadku $D_I = 10$ mm można zauważyć, że temperatura pozwoliła na uzyskanie peletu klasy A oraz B na znacznie większych obszarach mapy niż w przypadku, gdzie materiał nie był ogrzewany. Dopuszczalna wartość kąta pozwalająca uzyskać klasę A mieści się w przedziale $10 - 34^\circ$. Jednak warunki zagęszczania roznika przy minimalnej wartości ciśnienia (około 70 MPa) zapewniła konfiguracja: α z zakresu $18 - 20^\circ$ oraz $L = 16 - 23$ mm. Obecność temperatury spowodowała również pojawienie się obszaru, który nie spełnia żadnych wymagań jakościowych. Porównując tę mapę z odpowiadającą procesowi zagęszczania bez użycia temperatury można bezsprzecznie stwierdzić, że temperatura pozytywnie wpłynęła na możliwości wytworzenia peletów dobrej i najwyższej jakości, wzrósł obszar dostępnych konfiguracji a ponadto obejmuje on teraz strefy o znacznie niższym ciśnieniu zagęszczania.



Rysunek 67. Mapa zmian parametrów jakościowych dla roznika $M_{13\%}$, $D_I = 10$ mm

Źródło: własne

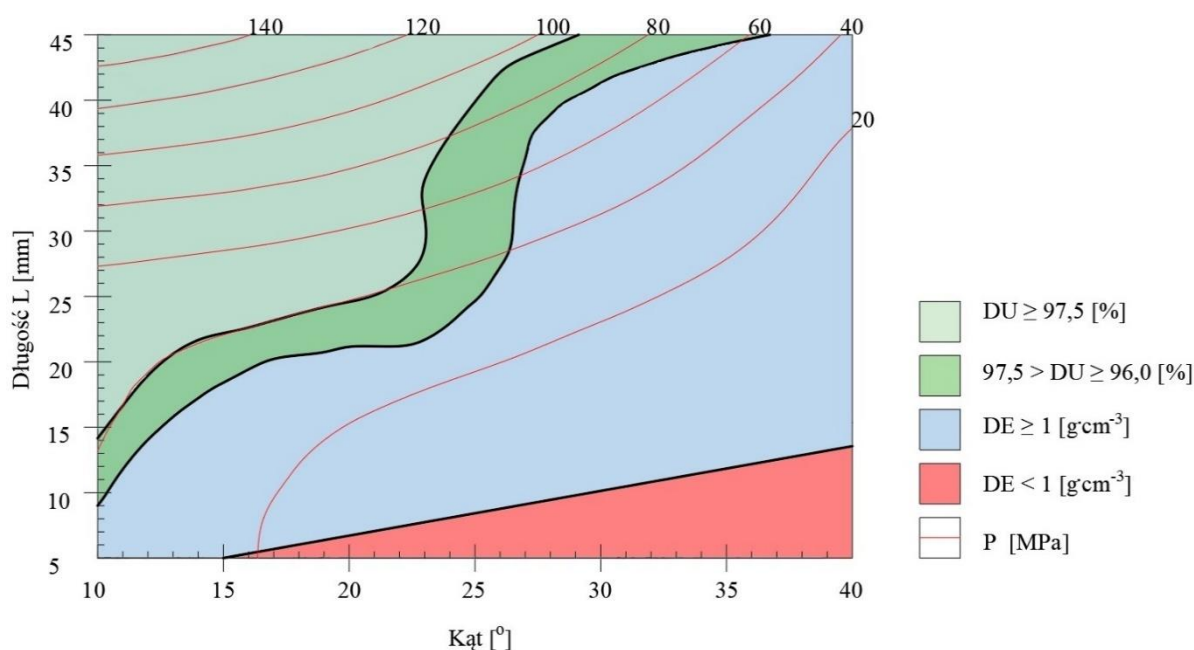


Rysunek 68. Mapa zmian parametrów jakościowych dla roznika $M_{13\%}$, $D_I = 12$ mm, 100°C

Źródło: własne

W przypadku $D_I = 10$ mm również obserwujemy pozytywny wpływ temperatury. Pelet klasy A można otrzymać używając stożków zagęszczających o kącie rozwarcia z zakresu

10 - 27° i długości kanałów od 14 mm wzwyż. Zaobserwowano również zwiększenie się obszaru, który odnosi się do granulatu niespełniającego kryteriów jakościowych. Optymalna konfiguracja to: α z zakresu 10 - 21° oraz $L = 14 - 25$ mm, wtedy ciśnienie osiągnie wartość zaledwie 40 MPa. Wzrost wartości kąta powoduje wzrost ciśnienia towarzyszącego zagęszczaniu. W porównaniu do wariantu $D_I = 12$ mm w optymalnej konfiguracji ciśnienie spadło z 70 MPa do poziomu 40 MPa. Zatem podobnie jak w przypadku miskanta to $D_I = 10$ mm jest lepszą średnicą kanału zagęszczającego o optymalnej geometrii.



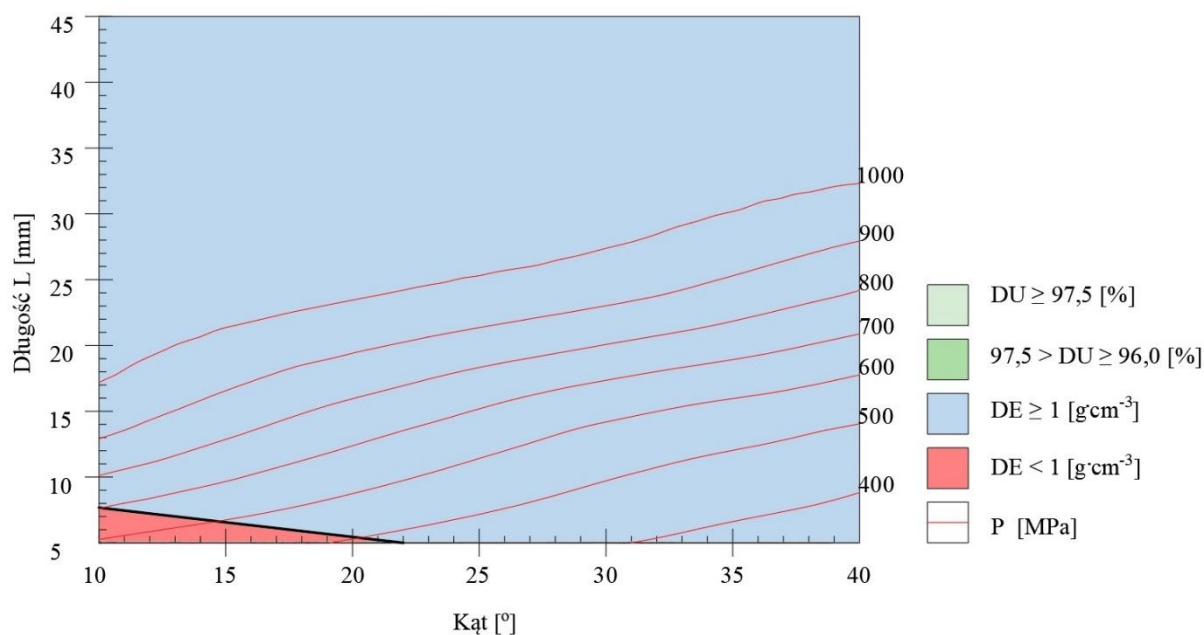
Rysunek 69. Mapa zmian parametrów jakościowych dla różnika $M_{13\%}$, $D_I = 10$ mm, 100°C

Źródło: własne

Ślazier

W przypadku tego materiału, zagęszczanego przy wilgotności 13% w stożkach o średnicy otworu wlotowego do $D_I = 12$ mm, żadna z badanych konfiguracji α i L nie gwarantuje uzyskania nawet peletu klasy B (Rys. 70). Warto podkreślić, że tym przypadku wiele kombinacji nie zostało przetestowanych ponieważ rejestrowana siła przekroczyła założony próg bezpieczeństwa 120 kN. Najprawdopodobniej, gdyby zastosować wyższe ciśnienie niż zarejestrowane 1000 MPa pelet uzyskał by w pewnych wariantach wymaganą wytrzymałość. Jednak wartość ciśnienia jest tu znacznie powyżej wartości rejestrowanych dla wcześniejszych materiałów jak i powyżej wartości ciśnienia wymaganego do zagęszczania różnego rodzaju biomasy. Križan w swoich badaniach (Križan i in., 2010) zagęszczał biomasę

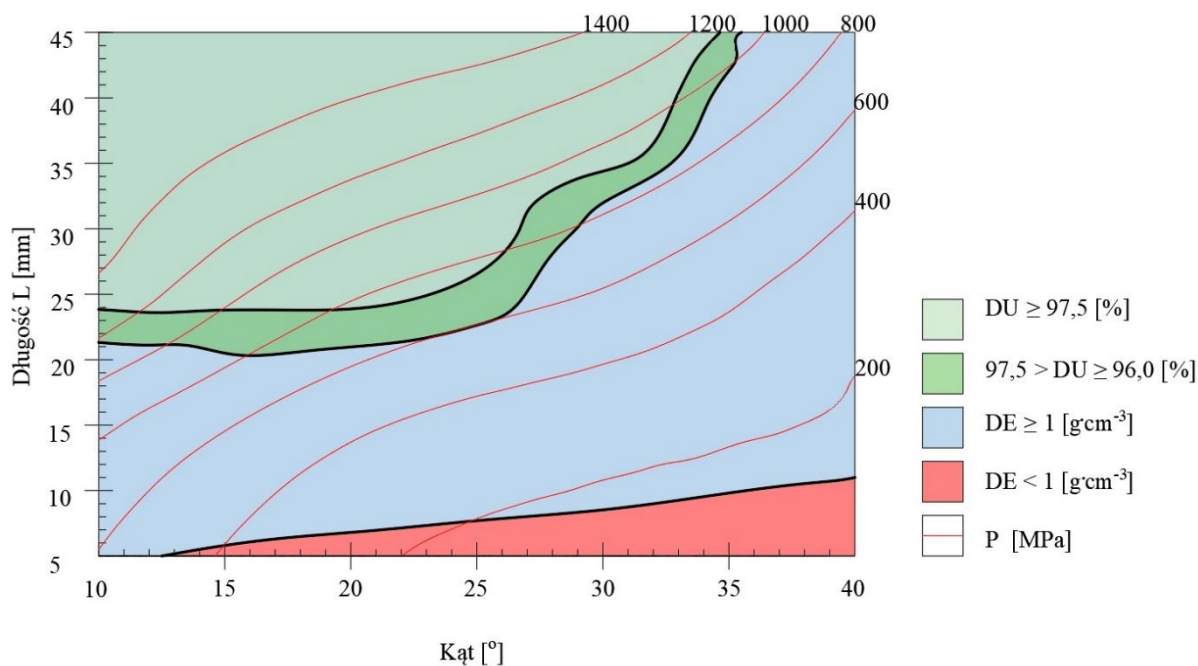
drzewną przy użyciu ciśnienia 31; 63; 159; 191 oraz 254 MPa. Materiał uzyskuje prawie w całym badanym obszarze wymaganą gęstość, jednak nie zostają uruchomione mechanizmy łączenia cząstek na tyle silnie by uzyskać wymagany poziom DU pomimo wysokiej wartości ciśnienia. Najprawdopodobniej objętość testowanych stożków jest zbyt duża, zagęszczany materiał blokuje stożek a jego przepchniecie do kanału generuje ponadnormatywne ciśnienie.



Rysunek 70. Mapa zmian parametrów jakościowych dla ślazu $M_{13\%}$, $D_I = 12$ mm

Źródło: własne

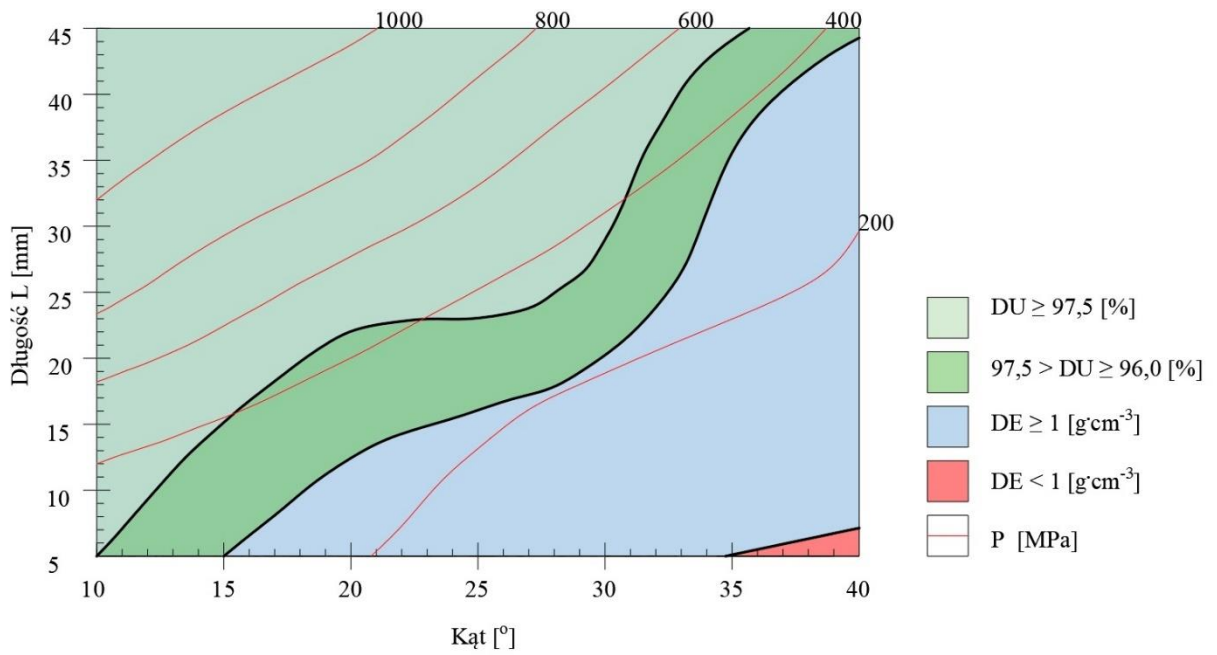
Zmniejszenie średnicy otworu wlotowego do $D_I = 10$ mm spowodowało całkowitą zmianę charakterystyki mapy (Rys. 71). Pojawiają się obszary peletu klasy B oraz peletu klasy A. Zakres kątów α od 10 do 34° umożliwia uzyskanie klasy A. Co ciekawe, zwiększając kąt α z 10 do około 24° nie zwiększa się minimalna wymagana długość kanału L (około 24 mm), dodatkowo wraz ze wzrostem wartości kąta w tym zakresie spada wartość ciśnienia z około 1100 do około 720 MPa. Dalszy wzrost wartości kąta wymaga wzrostu L i generuje wzrost ciśnienia. Zatem optymalna konfiguracja to: α : 24°; L : 24mm, której towarzyszy ciśnienie 720 MPa. Podobny trend charakteryzuje klasę B.



Rysunek 71. Mapa zmian parametrów jakościowych dla ślazu $M_{13\%}$, $D_I = 10$ mm

Źródło: własne

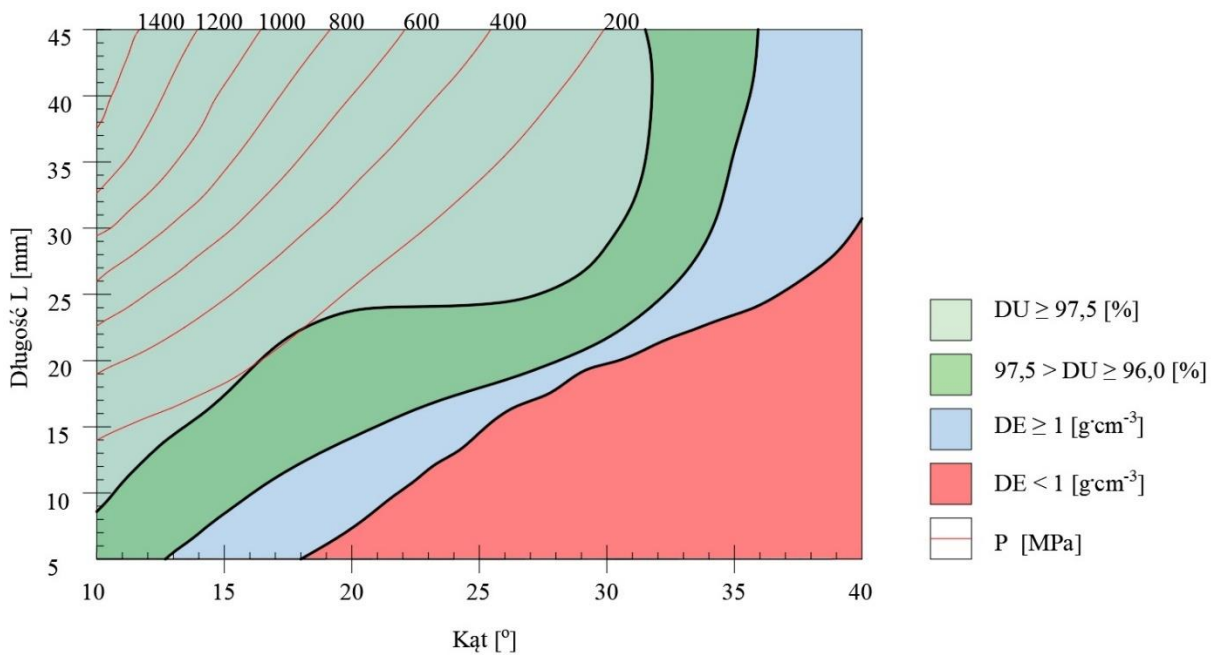
Wprowadzenie temperatury wyraźnie spowodowało spadek ciśnienia rejestrowanego podczas procesu, najwyraźniej czynnik ten wpływa na zmianę właściwości materiału ślazu ułatwiając jego przepływ przez komorę a jednocześnie pozwala ukształtować w czasie tego przepływu pelet o wymaganej jakości (Rys. 72). Dla $D_I = 12$ mm można zauważyć, że podgrzanie materiału pozytywnie wpływa na zwiększenie możliwości zagęszczania materiału w celu uzyskania granulatu spełniającego wymagania klas A i B. Jest to możliwe już przy wykorzystaniu stożka o kącie rozwarcia 10° oraz kanału zagęszczającego długości 5 mm. Zauważono również, że otrzymanie takiego produktu jest możliwe przy stosunkowo niedużym ciśnieniu – około 330 MPa. Drugą optymalną kombinacją jest: α : 27 - 29°; L : 23 - 26mm, której towarzyszy ciśnienie około 340 MPa.



Rysunek 72. Mapa zmian parametrów jakościowych dla ślazuwca $M_{13\%}$, $D_I = 12$ mm, 100°C

Źródło: własne

Dla $D_I = 10$ mm również mamy do dyspozycji szeroki zakres wartości kąta pozwalający uzyskać pelet klasy A (10-31°), jednak najniższe ciśnienie towarzyszy kombinacji: α : około 30°; L : 28mm (Rys. 73).



Rysunek 73. Mapa zmian parametrów jakościowych dla ślazuwca $M_{13\%}$, $D_I = 10$ mm, 100°C

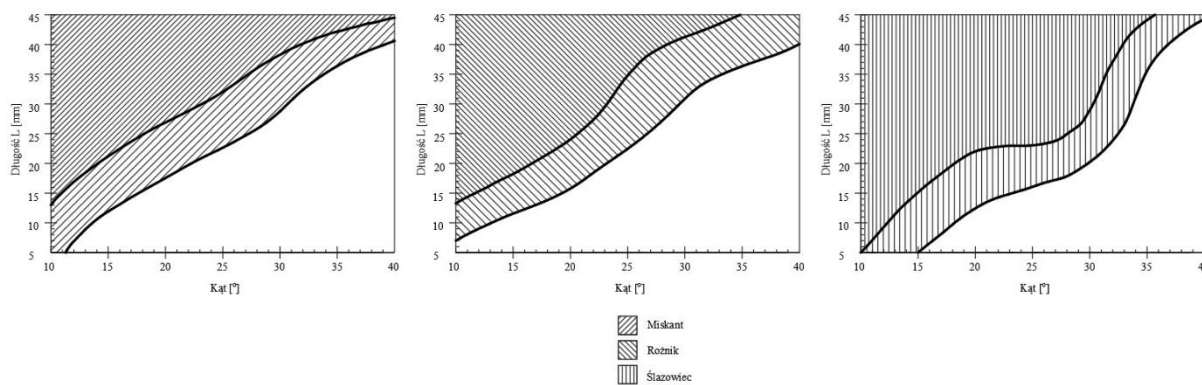
Źródło: własne

Podsumowując, dane zawarte na mapach wyraźnie wskazują i potwierdzają fakt, że bez uwzględnienia w procesie temperatury, trudno lub w ogóle nie da się uzyskać peletu o wymaganej jakości. Jest to oczywiście potwierdzenie pozytywnego wpływu temperatury na proces szeroko spotykanego w literaturze. Zostało to potwierdzone przez Smitha (Smith i in., 1977), który zauważył w swoich badaniach, że dzięki wzrostowi temperatury z 60°C do 140°C wzrósł stopień zagęszczenia biopaliwa, ale również jego stabilność. Podobnymi obserwacjami podzielił się Tabil (Tabil, 2022), który zaobserwował wzrost wytrzymałości mechanicznej peletów, produkowanych z lucerny, po kanału zagęszczającego do 90°C. Kalian i Morey (Kaliyan i Morey, 2006) zaobserwowali, że w temperaturze 75 – 100°C wyniki testów wytrzymałościowych dawały lepszy rezultat niż w przypadku temperatury 150°C. Ważnym spostrzeżeniem jest to, że średnica podstawy stożka $D_I = 10$ mm jest lepszym rozwiązaniem niż $D_I = 12$ mm, dla obu wariantów uzyskano pelty klasy B jak i A jednak w przypadku $D_I = 10$ mm optymalnym konfiguracjom α z L towarzyszy niższe ciśnienie. Spostrzeżenie to jest zwłaszcza istotne w aspekcie konstrukcji systemu peletującego jak i w aspekcie energochłonności procesu. Porównując badane materiały, każdy z nich wymaga innej optymalnej konfiguracji kąta stożka i długości matrycy, ponadto tym optymalnym konfiguracjom towarzyszy inna dla danego materiału, wartość ciśnienia procesu. Miskant dla $D_I = 12$ mm wymaga ciśnienia około 280 MPa, które przy $D_I = 10$ mm spada do 200 MPa. Rożnik dla $D_I = 12$ mm wymaga tylko około 70 MPa, które przy $D_I = 10$ mm spada do 40 MPa. Ślazowiec dla $D_I = 12$ mm wymaga najwyższego spośród badanych materiałów ciśnienia - około 340 MPa, które jednak przy $D_I = 10$ mm spada znacznie poniżej 2000 MPa. Mowa jest tu o wariantach z temperaturą 100°C.

Analizując powyższe dane, postawiono pytanie czy dla wszystkich badanych materiałów można wyznaczyć wspólną, uniwersalną geometrię kanału zagęszczającego pozwalającą na uzyskanie peletów o wymaganej jakości i czy da się to zrealizować przy pomocy opracowanych map?

Dobór uniwersalnej geometrii kanału matrycy

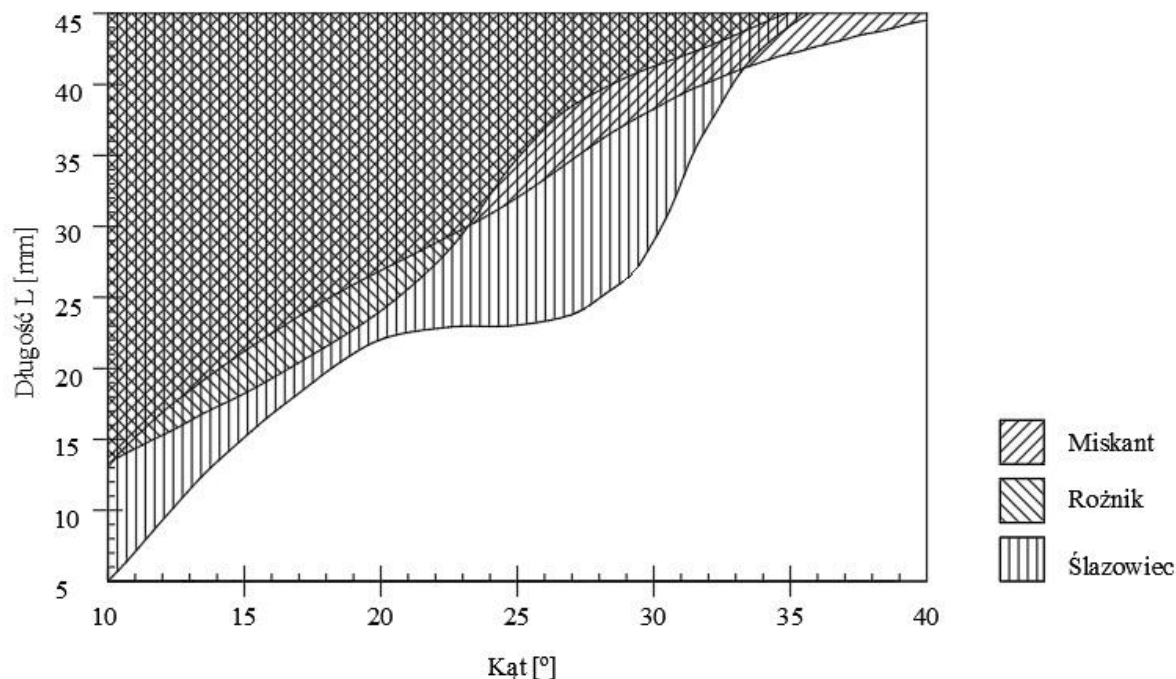
Dobór uniwersalnej geometrii zrealizowano etapowo. Pod uwagę wzięto mapy dla wariantów w którym zagęszczano materiał o wilgotności 13% w tulei o temperaturze 100°C z wykorzystaniem stożków o $D_I = 12$ mm i 10 mm, ponieważ te warianty najwierniej symulują przemysłowy proces produkcyjny peletów. Dla $D_I = 12$ mm, w pierwszym etapie uproszczono mapy do postaci zawierającej tylko informacje o granicach uzyskania przez pelet progu klasy A i B (Rys. 74).



Rysunek 74. Graficzne uproszczenie map zmian parametrów jakościowych peletu dla wszystkich materiałów badawczych dla $D_l = 12$ mm

Źródło: własne

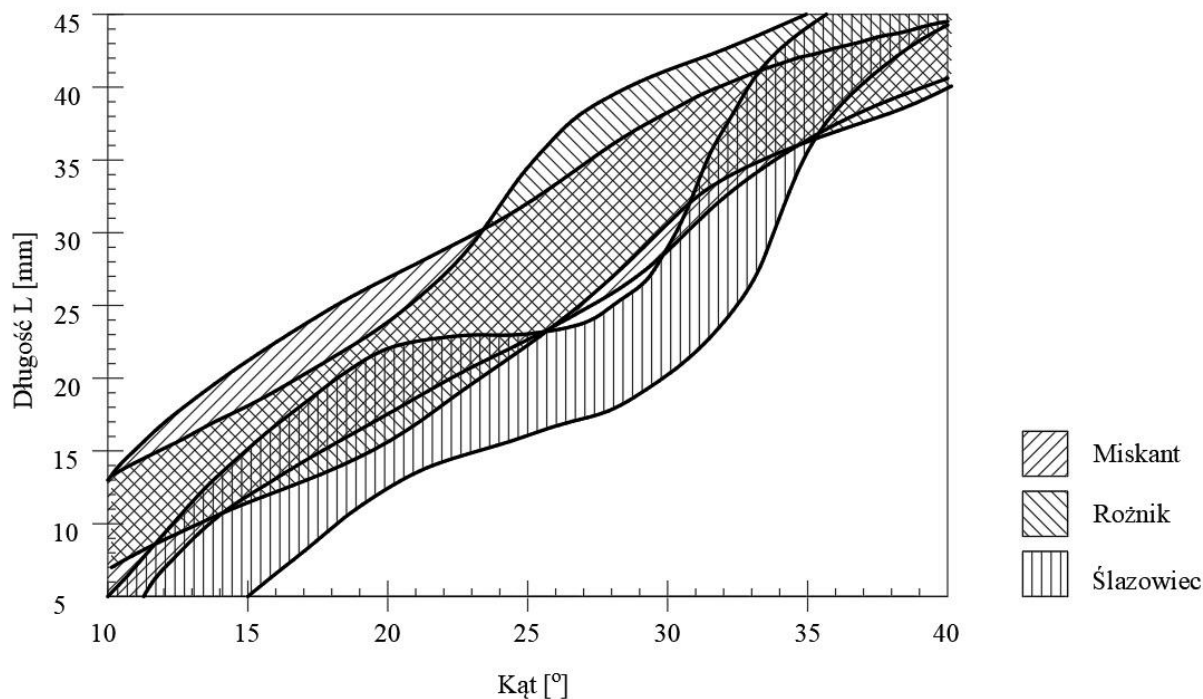
Następnie na mapę wspólną dla wszystkich materiałów, naniesiono linie graniczne progu klasy A. Powstała mapa przedstawiająca nakładające się na siebie trzy obszary, które gwarantują uzyskanie peletów klasy jakościowej A każdego z materiałów (Rys. 75). Po nałożeniu powstał też pewien obszar wspólny dla wszystkich materiałów a co z tym idzie geometria matrycy odczytana z tego obszaru jest geometrią uniwersalną dla badanych materiałów. Zatem istnieje możliwość wyznaczenia uniwersalnej geometrii kanału, która umożliwi produkcję peletów z miskanta, rożnika oraz ślázowca, które będą spełniały wymagania jakościowe klasy A (Rys. 77).



Rysunek 75. Mapa obszarów odpowiadających klasie jakościowej A dla $D_l = 12$ mm

Źródło: własne

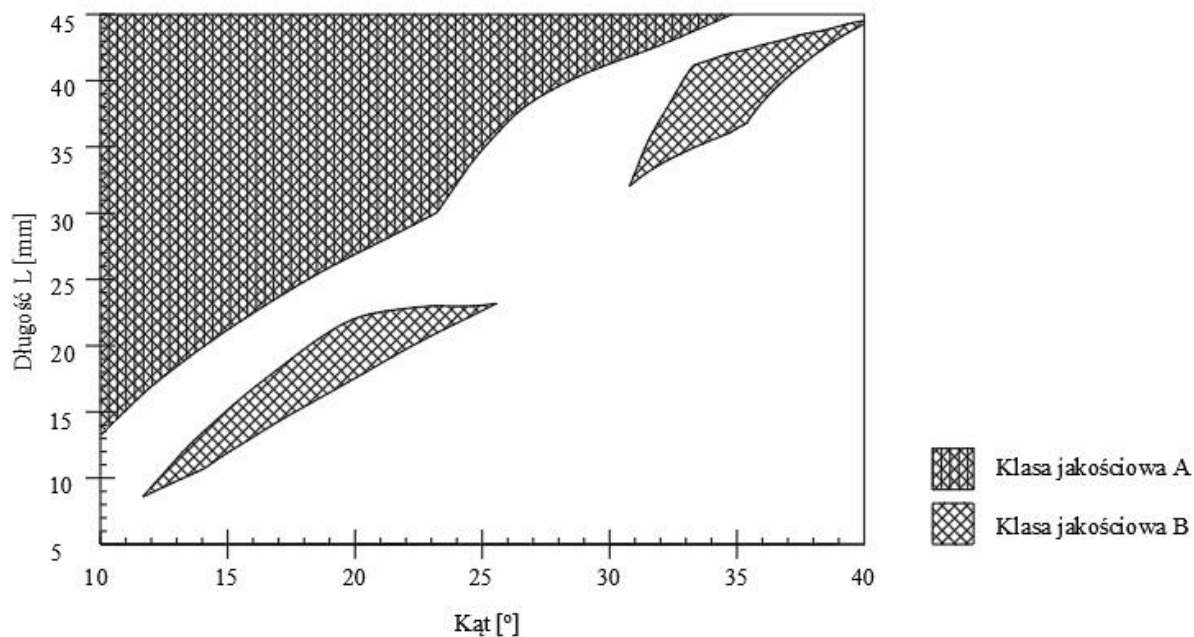
Podobny tok postępowania zastosowano do obszarów klasy B (Rys. 76) i w tym przypadku też udało się wyznaczyć wspólny zakres (Rys. 77).



Rysunek 76. Mapa obszarów odpowiadających klasie jakościowej B dla $D_t = 12$ mm

Źródło: własne

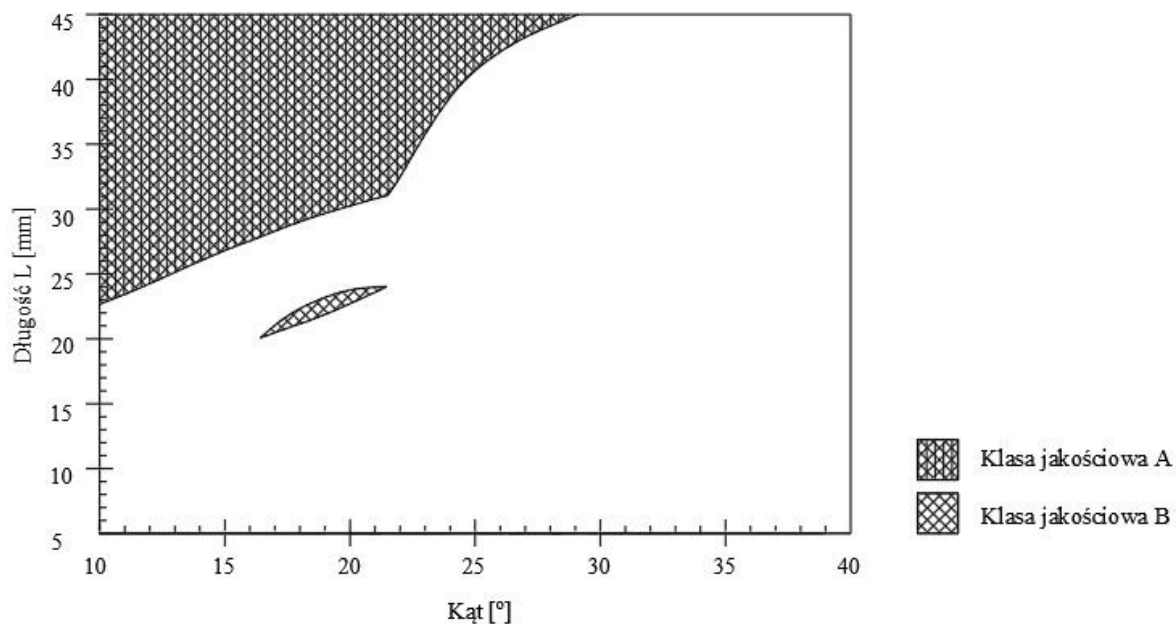
Ostatnim krokiem było zestawienie graficzne wspólnych zakresów parametrów, które odpowiadają klasie jakościowej A oraz klasie jakościowej B. Oczywiście z punktu widzenia producenta peletu trudno się ograniczać tylko do produkcji paliwa o klasie B (chyba że klasa A nie jest możliwa do uzyskania) więc to informacja o obszarze klasy A jest tutaj najistotniejsza.



Rysunek 77. Obszary odpowiadające klasie jakościowej A oraz B dla $D_1 = 12$ mm

Źródło: własne

Stosując ten sam tok postępowania wykonano mapę uniwersalnej geometrii dla $D_1 = 10$ mm przedstawiona na rysunku 78.



Rysunek 78. Obszary odpowiadające klasie jakościowej A oraz B dla $D_1 = 10$ mm

Źródło: własne

Dane zawarte na uzyskanych mapach pozwalają stwierdzić że w przypadku $D_I = 12$ mm mamy do dyspozycji szerszy zakres kątów ($10 - 34^\circ$), niż w przypadku $D_I = 10$ mm ($10 - 29^\circ$). Długość kanału dla danego kąta musi być większa w przypadku $D_I = 10$ mm. Idąc dalej, można na uzyskane mapy nanieść warstwice zmian ciśnienia dla badanych materiałów i wtedy wskazać tę geometrię kanału zagęszczającego na której produkcja peletu realizowana będzie przy najniższej z możliwych wartości ciśnienia.

7. Podsumowanie i wnioski

Wyniki uzyskane w skutek przedstawionych badań pokazują, jak złożonym procesem jest ciśnieniowe zagęszczanie biomasy i jak wiele czynników może mieć znaczący wpływ na jakość produkowanych peletów. W pracy wykazano, że geometria komory zagęszczającej, ciśnienie, temperatura procesu oraz wilgotność materiału mają istotny wpływ na wytrzymałość mechaniczną oraz gęstość granulatu. Celem pracy było wykazanie czy geometria kanału zagęszczającego ma wpływ na parametry jakościowe biopaliw stałych oraz w przypadku występowania wpływu, określenie, jakie jest to zjawisko- korzystne czy też nie. Parametry takie jak skład ziarnowy, czas i prędkość zagęszczania zostały ujednolicone, aby pominąć ich wpływ i skupić się w pełni na geometrii. W przypadku *DU* dla peletów wytworzonych z materiału w stanie suchym żaden z wytworzonych granulatów nie spełniał kryteriów jakościowych. W przypadku *DE* dla materiału w stanie suchym udało się osiągnąć gęstość, która spełnia wymagania jakościowe określone normatywnie. Dopiero użycie materiału o wilgotności 13%, a później dodanie czynnika temperaturowego spowodowało, że otrzymywany granulaty był pełnowartościowym produktem. Jako, że celem badań było odnalezienie geometrii, która pozwoli na produkcję peletów najwyższej jakości oraz możliwość stworzenia na podstawie wyników matrycy o optymalnej geometrii, skupiono się w głównej mierze na wynikach pozyskanych z badań poświęconych zagęszczaniu nawilżonego materiału na ogrzewanym stanowisku.

Optymalne parametry geometrii kanału zagęszczania określono zatem dla wariantu z temperaturą, bo tylko taki wchodzi w grę w praktyce. Wykazano, że w zależności od materiału, wpływ geometrii kanału zagęszczającego na jakość peletów, ale również ciśnienie procesu jest różny. W przypadku miskanta wyprodukowany pelet o wymaganych parametrach jakościowych i najmniejszym ciśnieniu, uzyskiwano korzystając ze stożków zagęszczających o kącie rozwarcia $\alpha = 10^\circ$. W przypadku różnika najlepsze wyniki były zależne od średnicy D_I stożka zagęszczającego. Dla $D_I = 12$ mm α mieściła się w zakresie $18^\circ - 20^\circ$, a ciśnienie wynosiło 70 MPa. Po redukcji do $D_I = 10$ mm α mieściła się w zakresie $10^\circ - 21^\circ$, a ciśnienie spadło do poziomu 40 MPa. W przypadku ślazowca również optymalne rozwiązanie zależy od średnicy D_I . Główną różnicę stanowiła tu długość kanału zagęszczającego. Oczywiście dla każdego optymalnego kąta α , bazując na mapach zmian parametrów jakościowych należy dobrać odpowiednią długość sekcji cylindrycznej L .

Stosując wyżej wymienione parametry procesu, udało się wyprodukować pelety klasy jakościowej A oraz B. W przypadku miskanta, zauważono, że zmniejszenie średnicy otworu wlotowego do stożka zagęszczającego zmienia wymagania co do optymalnej geometrii.

Zauważono również zmianę w wysokości towarzyszącego temu procesowi ciśnienia, które uległo redukcji. Podobna sytuacja miała miejsce w przypadku roznika oraz ślazuca. Największą zauważalną zmianą była redukcja ciśnienia w skutek dodania do procesu temperatury. Podobne wnioski można zauważyć u Križana (Križan, 2007), który wykazał, że przy niższych temperaturach kompaktowania biomasy potrzebne jest wyższe ciśnienie i wynosiło ono 286 MPa. W kolejnych badaniach (Križan i in., 2014) uzyskał wyniki pozwalające stwierdzić, że w niskich temperaturach można osiągnąć wyższe wartości gęstości w brykietach dębowych. Z kolei wzrost temperatury spowodował wyższą gęstość granulatu z trocin sosnowych. Temperatura prasowania wpływa na plastyfikację ligniny, a to wpływa na gęstość brykietów.

Literatura wskazuje, że zakres zawartości wody w surowcu badawczym powinna wynosić od 8% - 18% (Serrano i in., 2011; Tumuluru i in., 2011) Obernberger i Thek twierdzą, że prowadzenie procesu ciśnieniowej aglomeracji biomasy jest możliwe w zakresie wilgotności 8% - 12%, z kolei Skonecki i Kulig (Skonecki i Kulig, 2011) w swojej pracy dowiedli, że zwiększenie wilgotności materiału (słoma pszenna, wierzba wiciowa) od 10 do 18% powoduje wzrost maksymalnej gęstości materiału, redukcję gęstości aglomeratu, zwiększenie możliwości materiału do aglomeracji oraz wzrost rozprężu aglomeratu, co powoduje spadek DU biopaliwa. W pracy użyto materiału nawilżonego do 13% co zostało również zaproponowane przez Samuelssona w jego badaniach (Samuelsson i in., 2012). Taki poziom nawilżenia materiału gwarantuje brak zjawiska przesuszenia materiału podczas procesu zagęszczania na stanowiskach ogrzewanych.

Uzyskane wyniki dotyczące geometrii kanału zagęszczającego są inne niż trendy, które w swoich badaniach uzyskali Wu i inni (Wu i in., 2011) Zasympulowali oni proces zagęszczania używając stożków zagęszczających o kątach rozwarcia mieszczących się w zakresie $\alpha = 15^\circ - 120^\circ$. Zauważyli, że malejące wartości kąta α obniżały siłę granulowania. Jednak w ich badaniach zmianie kąta nie towarzyszyła zmiana objętości stożka. Inaczej niż w prezentowanym przypadku, gdzie wraz ze spadkiem wartości kąta rosła objętość stożka, a co za tym idzie objętość zagęszczanego materiału. To najprawdopodobniej spowodowało, że we wszystkich badanych przypadkach wartość ciśnienia rośnie wraz ze wzrostem objętości stożka spowodowanym spadkiem wartości kąta α z 40° do 10° .

Otrzymane wyniki oraz ich zestawienie z danymi literaturowymi wskazują, że geometria kanału zagęszczającego jest czynnikiem, który ma kluczowy wpływ na parametry jakościowe uzyskanych peletów, a jej właściwy dobór powoduje spadek ciśnienia niezbędnego do realizacji procesu.

Zatem w świetle uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że postawione w celu pracy hipotezy zostały potwierdzone:

H1: Geometria kanału zagęszczającego matrycy ma istotny wpływ na *DE* i *DU* peletu

Uzyskane wartości parametrów jakościowych peletów wytworzonych ze wszystkich badanych materiałów wskazywały wyraźnie, że zmiana konfiguracji geometrii matrycy powoduje zmiany zarówno gęstości właściwej jak i wytrzymałości mechanicznej.

H2: Uzyskanie wysokiej jakości peletu wymaga geometrii kanału zagęszczającego dostosowanej do biomasy danego gatunku roślin.

Porównując optymalne konfiguracje kąta α stożka zagęszczającego i długości sekcji cylindrycznej *L*, należy stwierdzić, że każdy z badanych materiałów wymaga dedykowanej konfiguracji bo tylko wtedy ciśnienie zagęszczania towarzyszące procesowi uzyskuje wartość minimalną. Zatem mimo podobieństw pochodzenia (biomasa zielna), mimo ujednoczenia wszystkich pozostałych czynników (wilgotność, temperatura oraz skład ziarnowy), badana biomasa nie zagęszcza się w ten sam sposób.

Praca daje solidną podstawę do kolejnych badań wzbogacając dotychczasowy stan wiedzy na temat miskanta, rożnika oraz ślazuca. Z powodu aktualnej sytuacji energetycznej oraz dążenia do jak najbardziej ekologicznych rozwiązań energetycznych, badania są perspektywiczne i mogą korzystnie wpłynąć na produkcję biopaliw stałych. Oprócz wartości badawczej, praca proponuje również nowe, nigdzie dotąd niestosowane narzędzie, które w sposób precyzyjny pozwala dobierać parametry zagęszczania danego gatunku roślin, które gwarantują otrzymanie najlepszej jakości produktu. Może być to przydatne zarówno dla ośrodków badawczych pogłębiających stan wiedzy na temat roślin energetycznych, ich przetwórstwa na cele energetyczne jak również dla sektora przemysłowego, zajmującego się ciśnieniową aglomeracją biomasy lub samej produkcji systemów zagęszczających biomasę na cele energetyczne.

Na podstawie zrealizowanego toku badań i przeprowadzonej analizy uzyskanych wyników, sformułowano następujące wnioski:

- 1) Geometria kanału zagęszczającego ma istotny wpływ na gęstość właściwą oraz wytrzymałość mechaniczną peletów uzyskanych z biomasy miskanta, rożnika oraz ślazuca,
- 2) Swoiste cechy badanych materiałów (gęstość, porowatość, budowa strukturalna, chropowatość, współczynnik tarcia itp.) na które nie mamy wpływu, a oddziaływanie jest trudne do określenia w sposób znaczący determinują proces zagęszczania. Dlatego,

uzyskanie wysokiej jakości peletu wymaga geometrii kanału zagęszczającego dostosowanej do biomasy danego gatunku roślin.

- 3) Optymalna geometria kanału zapewniająca uzyskanie progów jakościowych (klasa A) przy minimalnej wartości ciśnienia zagęszczania dla materiału o wilgotności 13% zagęszczanego w temperaturze 100°C jest następująca:
 - Miskant - $D_I = 12$ mm: $\alpha 10^\circ$, $L 13$ mm, $P = 280$ MPa; $D_I = 10$ mm: $\alpha 10^\circ$, $L 24$ mm, $P = 200$ MPa,
 - Rożnik - $D_I = 12$ mm: $\alpha 18^\circ - 20^\circ - 20^\circ$, $L 16 - 23$ mm, $P = 70$ MPa; $D_I = 10$ mm: $\alpha 10^\circ - 21^\circ$, $L 14 - 25$ mm, $P = 40$ MPa,
 - Ślázowiec - $D_I = 12$ mm: $\alpha 10^\circ$, $L 5$ mm, $P = 330$, ale również $\alpha 27^\circ - 29^\circ$, $L 23 - 26$ mm, $P = 340$ MPa; $D_I = 10$ mm: $\alpha 30^\circ$, $L 28$ mm, $P < 200$ MPa.
- 4) Średnica D_I stożka zagęszczającego wynosząca 10 mm wymaga zawsze mniejszej wartości ciśnienia zagęszczania w porównaniu z $D_I = 12$ mm niezależnie od badanego materiału.
- 5) Materiałem badawczym, któremu w trakcie zagęszczania towarzyszyć musi najniższa wartość ciśnienia zagęszczania był rożnik. Wyższych wartości ciśnienia zagęszczania wymaga miskant i ślázowiec.
- 6) Dobór optymalnej geometrii kanału matrycy może być realizowany za pomocą opracowanych na potrzeby badań map zmian parametrów jakościowych peletu. Mapy są nowym, nigdzie wcześniej niestosowanym innowacyjnym narzędziem, które pomaga dobrać najlepsze parametry procesu zagęszczania zapewniające uzyskanie progów jakościowych przy minimalnych wartościach siły lub ciśnienia towarzyszącego procesowi produkcji. Mapy te mogą być również narzędziem przydatnym w badaniach wpływu różnorodnych czynników na parametry jakościowe uzyskanych granulatów.
- 7) Połączenie map wszystkich badanych materiałów pozwoliło na określenie obszaru, w którym badane materiały uzyskują wymagane wartości DE i DU . Oznacza to, że istnieje możliwość wskazania uniwersalnej dla wszystkich badanych materiałów geometrii kanału zagęszczającego. Wartość ciśnienia zagęszczania będzie w tym przypadku wyższa niż w przypadku kanałów optymalnych. Ale pozwala to na produkcję peletu z wyżej wymienionych materiałów na jednej matrycy.
- 8) Uniwersalne matryce mogą mieć konfiguracje geometrii z zakresów: $D_I = 12$ mm zakres kątów (10 - 34°), w przypadku $D_I = 10$ mm (10 - 29°) z odpowiednio dobranymi długościami kanałów L .

Bibliografia

- Afzalina, S., Roberge, M. (2013). Modeling of the pressure-density relationship in a large cubic baler. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 15, 35–44.
- Alzagameem, A., Bergs, M., Do, X. T., Klein, S. E., Rumpf, J., Larkins, M., Monakhova, Y., Pude, R., Schulze, M. (2019). Low-Input Crops as Lignocellulosic Feedstock for Second-Generation Biorefineries and the Potential of Chemometrics in Biomass Quality Control. *Applied Sciences*, 9(11), 2252. <https://doi.org/10.3390/app9112252>
- Anglès, M. N., Ferrando, F., Farriol, X., Salvadó, J. (2001). Suitability of steam exploded residual softwood for the production of binderless panels. Effect of the pre-treatment severity and lignin addition. *Biomass and Bioenergy*, 21(3), 211–224. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(01\)00031-9](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(01)00031-9)
- Arshadi, M., Gref, R., Geladi, P., Dahlqvist, S., Lestander, T. (2008). The influence of raw material characteristics on the industrial pelletizing process and pellet quality. *Fuel Processing Technology*, 89(12), 1442–1447. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.07.001>
- Bertram, R. B. (1992). New Crops and the International Agricultural Research Centers. *New Crops*, 11–22.
- Bhattacharya, S. C., Sivasakthy, S., Shrestha, R. M. (1989). State of the Art for Biomass Densification. *Energy Sources*, 11(3), 161–182. <https://doi.org/10.1080/00908318908908952>
- Bika, D., Tardos, G. I., Panmai, S., Farber, L., Michaels, J. (2005). Strength and morphology of solid bridges in dry granules of pharmaceutical powders. *Powder Technology*, 150(2), 104–116. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2004.11.024>
- Borkowska, H., Molas, R. (2012). Two extremely different crops, Salix and Sida, as sources of renewable bioenergy. *Biomass and Bioenergy*, 36, 234–240. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.10.025>
- Butler, J. L. (1958). *Factors Affecting the Pelleting of Hay*.
- Butler, J. L., McColly, H. F. (1958). Factors affecting the pelleting of hay. *Michigan State University of Agriculture and Applied Science. Department of Agricultural Engineering*.
- Carone, M. T., Pantaleo, A., Pellerano, A. (2011). Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea* L. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), 402–410. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.052>
- Cherney, J. H., Verma, V. K. (2013). Grass pellet Quality Index: A tool to evaluate suitability of grass pellets for small scale combustion systems. *Applied Energy*, 103, 679–684. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.050>
- Colley, Z., Fasina, O. O., Bransby, D., Lee, Y. Y. (2006). Moisture effect on the physical characteristics of switchgrass pellets. *Transactions of the ASABE*, 49(6), 1845–1851.
- Crawford, N. C., Ray, A. E., Yancey, N. A., Nagle, N. (2015). Evaluating the pelletization of “pure” and blended lignocellulosic biomass feedstocks. *Fuel Processing Technology*, 140, 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.08.023>

- Cudjoe, E., Hunsen, M., Xue, Z., Way, A. E., Barrios, E., Olson, R. A., Hore, M. J. A., Rowan, S. J. (2017). Miscanthus Giganteus: A commercially viable sustainable source of cellulose nanocrystals. *Carbohydrate Polymers*, 155, 230–241. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.08.049>
- Cumplido-Marin, L., Graves, A. R., Burgess, P. J., Morhart, C., Paris, P., Jablonowski, N. D., Facciotto, G., Bury, M., Martens, R., Nahm, M. (2020). Two Novel Energy Crops: *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby and *Silphium perfoliatum* L.—State of Knowledge. *Agronomy*, 10(7), 928. <https://doi.org/10.3390/agronomy10070928>
- Demianiuk, L. (2011). Research on the process of compressing giant miscanthus. *Acta Agrophysica*, 17(1), 43–53.
- Doczekalska, B., Bartkowiak, M., Waliszewska, B., Orszulak, G., Cerazy-Waliszewska, J., Pniewski, T. (2020). Characterization of Chemically Activated Carbons Prepared from Miscanthus and Switchgrass Biomass. *Materials*, 13(7), 1654. <https://doi.org/10.3390/ma13071654>
- Dohleman, F. G., Heaton, E. A., Leakey, A. D. B., Long, S. P. (2009). Does greater leaf-level photosynthesis explain the larger solar energy conversion efficiency of Miscanthus relative to switchgrass? *Plant, Cell Environment*, 32(11), 1525–1537. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02017.x>
- Dołżyńska, M., Obidziński, S., Kowczyk-Sadowy, M., Krasowska, M. (2019). Densification and Combustion of Cherry Stones. *Energies*, 12(16). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en12163042>
- Dołżyńska, M., Obidziński, S., Piekut, J., Yildiz, G. (2020a). The Utilization of Plum Stones for Pellet Production and Investigation of Post-Combustion Flue Gas Emissions. *Energies*, 13(19), 5107. <https://doi.org/10.3390/en13195107>
- Dołżyńska, M., Obidziński, S., Piekut, J., Yildiz, G. (2020b). The Utilization of Plum Stones for Pellet Production and Investigation of Post-Combustion Flue Gas Emissions. *Energies*, 13(19), 5107. <https://doi.org/10.3390/en13195107>
- Dyjakon, A., Sobol, Ł., Krotowski, M., Mudryk, K., Kawa, K. (2020). The Impact of Particles Comminution on Mechanical Durability of Wheat Straw Briquettes. *Energies*, 13(23), 6186. <https://doi.org/10.3390/en13236186>
- Ekonomiczne i prawne aspekty wykorzystania odnawialnych źródeł energii w Polsce, EC BREC, Europejskie Centrum Energetyki Odnawialnej (2000).
- Faborode, M. O., O’Callaghan, J. R. (1989). A rheological model for the compaction of fibrous agricultural materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 42(3), 165–178. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(89\)90048-6](https://doi.org/10.1016/0021-8634(89)90048-6)
- Feng, Q., Chaubey, I., Engel, B., Cibin, R., Sudheer, K. P., Volenec, J. (2017). Marginal land suitability for switchgrass, Miscanthus and hybrid poplar in the Upper Mississippi River Basin (UMRB). *Environmental Modelling Software*, 93, 356–365. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.027>
- Ferrero, A., Horabik, J., Molenda, M. (1991). *Density-pressure relationships in compaction of straw*.

- Flaig, H., Mohr, H. (Red.). (1993). *Energie aus Biomasse*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-78511-5>
- Folmer, H., Gabel, L., Opschoor, H. (1996). Ekonomia środowiska i zasobów naturalnych. Podręcznik dla studentów i praktyków. *Ekonomia i Środowisko*, 1–2, 195–198.
- Francik, S., Knapczyk, A., Knapczyk, A., Francik, R. (2020). Decision Support System for the Production of Miscanthus and Willow Briquettes. *Energies*, 13(6), 1364. <https://doi.org/10.3390/en13061364>
- Francik, S., Knapik, P., Łapczyńska-Kordon, B., Francik, R., Ślipek, Z. (2022). Values of Selected Strength Parameters of Miscanthus × Giganteus Stalk Depending on Water Content and Internode Number. *Materials*, 15(4), 1480. <https://doi.org/10.3390/ma15041480>
- Franzaring, J., Holz, I., Kauf, Z., Fangmeier, A. (2015). Responses of the novel bioenergy plant species *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby and *Silphium perfoliatum* L. to CO₂ fertilization at different temperatures and water supply. *Biomass and Bioenergy*, 81, 574–583. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.07.031>
- Franzaring, J., Schmid, I., Bäuerle, L., Gensheimer, G., Fangmeier, A. (2014). Investigations on Plant functional traits, epidermal structures and the ecophysiology of the novel bioenergy species *Sida hermaphrodita* Rusby and *Silphium perfoliatum* L. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 87, 36–45.
- Frączek, J., Mudryk, K. (2009). Wpływ wilgotności rozdrabnianych pedów wierzby *Salix viminalis* L. na skład granulometryczny uzyskiwanych zrębków. *Acta Agrophysica*, 14, 49–60.
- Frączek, J., Mudryk, K., Wróbel, M. (2011). Rożnik przerośnięty *silphium perfoliatum* L. - źródło biomasy do produkcji biopaliw stałych. *Inżynieria Rolnicza*, 131(6).
- Frączek Jarosław and Wróbel, M. (2003). Analyse of possibility of application of existing models for description of plant granular materials. *Acta Agrophysica*, 83, 83–92. <http://www.acta-agrophysica.org/Analiza-mozliwosci-wykorzystania-istniejacych-modeli-osrodkow-granularnych-do-opisu,144799,0,2.html>
- Frodeson, S., Lindén, P., Henriksson, G., Berghel, J. (2019). Compression of Biomass Substances—A Study on Springback Effects and Color Formation in Pellet Manufacture. *Applied Sciences*, 9(20), 4302. <https://doi.org/10.3390/app9204302>
- Fusi, A., Bacenetti, J., Proto, A. R., Tedesco, D. E. A., Pessina, D., Facchinetti, D. (2020). Pellet Production from Miscanthus: Energy and Environmental Assessment. *Energies*, 14(1), 73. <https://doi.org/10.3390/en14010073>
- Gageanu, I., Cujbescu, D., Persu, C., Tudor, P., Cardei, P., Matache, M., Vladut, V., Biris, S., Voicea, I., Ungureanu, N. (2021a). Influence of Input and Control Parameters on the Process of Pelleting Powdered Biomass. *Energies*, 14(14), 4104. <https://doi.org/10.3390/en14144104>
- Gageanu, I., Cujbescu, D., Persu, C., Tudor, P., Cardei, P., Matache, M., Vladut, V., Biris, S., Voicea, I., Ungureanu, N. (2021b). Influence of Input and Control Parameters on the Process of Pelleting Powdered Biomass. *Energies*, 14(14), 4104. <https://doi.org/10.3390/en14144104>

- Gradziuk, P., Wojtaszek, Z. (2001). *Alternatywne wykorzystanie gruntów rolniczych na cele niezwiązane z produkcją żywności*. SGGW.
- Greef, J. M., Deuter, M. (1993). *Syntaxonomy of Miscanthus x giganteus Greef et Deu.*
- Gubišová, M., Gubiš, J., Žofajová, A., Mihálik, D., Kraic, J. (2013). Enhanced in vitro propagation of Miscanthus×giganteus. *Industrial Crops and Products*, 41, 279–282. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.05.004>
- GUS. (2021, grudzień 16). *Energia ze źródeł odnawialnych w 2020 r.*
- GUS. (2022, grudzień 15). *Energia ze źródeł odnawialnych w 2021 r.*
- Hall; Glenn E., Hall; Carl W. (1968). Heated-Die Wafer Formation of Alfalfa and Bermudagrass. *Transactions of the ASAE*, 11(4), 0578–0581. <https://doi.org/10.13031/2013.39472>
- Heffner, L. E., Pfost, H. B. (2012). Gelatinization during pelleting. *Tecnica-Molitoria*, 26, 102–104.
- Hejft, R. (2002). Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych. *Białystok: Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji.*
- Hejft, R., Obidziński, S. (2012). Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych - innowacje technologiczno-techniczne. Część 1. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 57, 63–65.
- Hill, B., Pulkinen, D. A. (1988). *A study of factors affecting pellet durability and pelleting efficiency in the production of dehydrated alfalfa pellets. A special report.*
- Holm, J. K., Henriksen, U. B., Hustad, J. E., Sørensen, L. H. (2006). Toward an Understanding of Controlling Parameters in Softwood and Hardwood Pellets Production. *Energy Fuels*, 20(6), 2686–2694. <https://doi.org/10.1021/ef0503360>
- <http://pelet.atlibron.com/>. (2023, czerwiec 8). *Współczynnik sprężu.*
- <https://www.lasy.gov.pl/pl/nasze-lasy/polskie-lasy>. (2021, czerwiec 21).
- Hu, J., Lei, T., Shen, S., Zhang, Q. (2012). Specific Energy Consumption Regression and Process Parameters Optimization in Wet-Briquetting of Rice Straw at Normal Temperature. *BioResources*, 8(1). <https://doi.org/10.15376/biores.8.1.663-675>
- Huang, Y., Finell, M., Larsson, S., Wang, X., Zhang, J., Wei, R., Liu, L. (2017). Biofuel pellets made at low moisture content – Influence of water in the binding mechanism of densified biomass. *Biomass and Bioenergy*, 98, 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.01.002>
- Ibitoye, S. E., Jen, T.-C., Mahamood, R. M., Akinlabi, E. T. (2021). Densification of agro-residues for sustainable energy generation: an overview. *Bioresources and Bioprocessing*, 8(1), 75. <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00427-w>
- Igliński, B., Iglińska, A., Kujawski, W., Buczkowski, R., Cichosz, M. (2011). Bioenergy in Poland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 2999–3007. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.037>

- Ishii, K., Furuichi, T. (2014). Influence of moisture content, particle size and forming temperature on productivity and quality of rice straw pellets. *Waste Management*, 34(12), 2621–2626.
- Jablonowski, N. D., Kollmann, T., Nabel, M., Damm, T., Klose, H., Müller, M., Bläsing, M., Seebold, S., Krafft, S., Kuperjans, I., Dahmen, M., Schurr, U. (2017). Valorization of *Sida (Sida hermaphrodita)* biomass for multiple energy purposes. *GCB Bioenergy*, 9(1), 202–214. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12346>
- Jabłoński, B., Koltowski, Z. (2005). Nectar secretion and honey potential of honey-plants growing under Poland's conditions-part XV. *Journal of Apicultural Science*, 49, 59–63.
- Jackson, J., Turner, A., Mark, T., Montross, M. (2016). Densification of biomass using a pilot scale flat ring roller pellet mill. *Fuel Processing Technology*, 148, 43–49. <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2016.02.024>
- Jasinskas, A., Kleiza, V., Streikus, D., Domeika, R., Vaiciukevičius, E., Gramauskas, G., Valentin, M. T. (2022). Assessment of Quality Indicators of Pressed Biofuel Produced from Coarse Herbaceous Plants and Determination of the Influence of Moisture on the Properties of Pellets. *Sustainability*, 14(3), 1068. <https://doi.org/10.3390/su14031068>
- Jasinskas, A., Sakalauskas, A., Domeika, R. (2008). Evaluation of physical-mechanical properties of herbaceous bioenergy plants. *Biomass and Bioenergy*, 32(10), 952–958. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.01.024>
- Jewiarz, M., Mudryk, K., Wróbel, M., Frączek, J., Dziedzic, K. (2020). Parameters Affecting RDF-Based Pellet Quality. *Energies*, 13(4), 910. <https://doi.org/10.3390/en13040910>
- Jewiarz, M., Wróbel, M., Mudryk, K., Szufa, S. (2020). Impact of the Drying Temperature and Grinding Technique on Biomass Grindability. *Energies*, 13(13), 3392. <https://doi.org/10.3390/en13133392>
- Jia, H., Chen, T., Zhang, S., Sun, X., Yuan, H. (2020). Effects of pressure maintenance and strain maintenance during compression on subsequent dimensional stability and density after relaxation of blocks of chopped corn straw. *BioResources*, 15(2), 3717–3736. <https://doi.org/10.15376/biores.15.2.3717-3736>
- Jones, W. D. (1960). *Fundamental Principles of Powder Metallurgy*.
- Watts, K., Bilanski, W. (1991). Stress relaxation of alfalfa under constant displacement. *Transactions of the ASAE*, 34(6), 2491–2504. <https://doi.org/10.13031/2013.31897>
- Kabas, O., Ozmerzi, A. (2009). Relationship between the friction coefficient and velocity of two cactus pear *Opuntia ficus india* cultivars on different surfaces. *International Journal of Food Science Technology*, 44(1), 100–105. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2007.01659.x>
- Kaliyan, N., Morey, R. V. (2006). Densification Characteristics of Corn Stover and Switchgrass. 2006 Portland, Oregon, July 9-12, 2006. <https://doi.org/10.13031/2013.21202>
- Kaliyan, N., Morey, R. V. (2010). Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. *Bioresource Technology*, 101(3), 1082–1090. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.064>

- Kaliyan, N., Vance Morey, R. (2009a). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337–359. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>
- Kaliyan, N., Vance Morey, R. (2009b). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337–359. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>
- Kaliyan, N., Vance Morey, R. (2009c). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337–359.
- Kalkan, F., Kara, M. (2011). Handling, frictional and technological properties of wheat as affected by moisture content and cultivar. *Powder Technology*, 213(1–3), 116–122. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.07.015>
- Kawakita, K., Lüdde, K.-H. (1971). Some considerations on powder compression equations. *Powder Technology*, 4(2), 61–68. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(71\)80001-3](https://doi.org/10.1016/0032-5910(71)80001-3)
- Kirsten, C., Lenz, V., Schröder, H.-W., Repke, J.-U. (2016). Hay pellets — The influence of particle size reduction on their physical–mechanical quality and energy demand during production. *Fuel Processing Technology*, 148, 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.02.013>
- Kołtowski, Z. (2006). *Wielki atlas roślin miododajnych*. Przedsiębiorstwo Wydawnicze Rzeczpospolita S.A. .
- Koval'chenko, M. S. (1975). Effects of external friction upon the rate of densification of a viscous porous solid in hot pressing. *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 14(7), 534–537. <https://doi.org/10.1007/BF00810985>
- Kowalik, P. (2004). Stan obecny i perspektywy stosowania peletyzowanej biomasy jako paliwa w Polsce. *Instal* 6, 18–25.
- Kowalski, R. (2002). Ocena zawartości oleanozydów w organach naziemnych i podziemnych roznika przerośniętego *Silphium perfoliatum* L. *Acta Scientiarum Polonorum. Hortorum Cultus*, 1(2), 5–15.
- Kowalski, R., Wolski, T. (2003). Evaluation of phenolic acid content in *Silphium perfoliatum* L. leaves, inflorescences and rhizomes. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities. Series: Horticulture*, 06.
- Krička, T., Matin, A., Bilandžija, N., Jurišić, V., Antonović, A., Voća, N., Grubor, M. (2017). Biomass valorisation of *Arundo donax* L., *Miscanthus × giganteus* and *Sida hermaphrodita* for biofuel production. *International Agrophysics*, 31(4), 575–581. <https://doi.org/10.1515/intag-2016-0085>
- Križan, P. (2007). Research of factors influencing the quality of wood briquets. *Acta Montanistica Slovaca*, 12.
- Križan, P. (2022). The Effects of the Pressing Chamber Design Parameters on the Quality of Extrusions. W *Biomass Compaction* (s. 65–87). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89956-1_5

- Križan, P., Matúš, M., Šooš, J., Beniak, J. (2015). Behavior of Beech Sawdust during Densification into a Solid Biofuel. *Energies*, 8(7). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en8076382>
- Križan, P., Šooš, L., Matúš, M. (2010). Optimisation of briquetting machine pressing chamber geometry. *Machine Design ISSN 1821-1259*, 19–24.
- Križan, P., Šooš, L., Matúš, M., Beniak, J., Svátek, M. (2015). Research of significant densification parameters influence on final briquettes quality. *Wood Res.*, 60, 301–316.
- Križan, P., Svátek, M., Matúš, M., Beniak, J., Lisý, M. (2014). Determination of compacting pressure and pressing temperature impact on biomass briquettes density and their mutual interactions. *14th SGEM GeoConference on Energy and Clean Technologies*, 133–140.
- Kronbergs, E. (2000). Mechanical strength testing of stalk materials and compacting energy evaluation. *Industrial Crops and Products*, 11(2–3), 211–216. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(99\)00052-7](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(99)00052-7)
- Kulig, R., Laskowski, J. (2011). The effect of preliminary processing on compaction parameters of oilseed rape straw. *Teka Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, 11, 209–217.
- Kulig, R., Łysiak, G., Skonecki, S., Kobus, Z., Rydzak, L., Guz, T. (2014). Określenie zależności między ciśnieniem a parametrami zagęszczania wybranych roślin energetycznych. *Motrol*, 16, 55–58.
- Kulig, R., Skonecki, S., Gawłowski, S., Zdybel, A., Łysiak, G. (2013). Oddziaływanie ciśnienia na efektywność zagęszczania trocin wybranego drewna miękkiego. *Acta Scientiarum Polonorum, Technica Agraria*, 12(1–2), 31–40.
- Kurucz, E., Antal, G., Gabor, F. M., Popp, J. (2014). Cost-effective mass propagation of Virginia Fanpetals (*Sida hermaphrodita* (L.) Rusby) from seeds. *Environmental Engineering and Management Journal*, 13(11), 2845–2852. <https://doi.org/10.30638/eemj.2014.319>
- Kwiatkowski, J., Graban, Ł., Stolarski, M. J. (2023). The energy efficiency of Virginia fanpetals biomass production for solid biofuel. *Energy*, 264. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126180>
- Larsson, S. H., Rudolfsson, M., Nordwaeger, M., Olofsson, I., Samuelsson, R. (2013). Effects of moisture content, torrefaction temperature, and die temperature in pilot scale pelletizing of torrefied Norway spruce. *Applied Energy*, 102, 827–832. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.08.046>
- Lautenschläger, K. H., Schröter, W., Wanninger, A. (2007). *Nowoczesne kompendium chemii*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Lewandowski, I., Clifton-Brown, J. C., Scurlock, J. M. O., Huisman, W. (2000). Miscanthus: European experience with a novel energy crop. *Biomass and Bioenergy*, 19(4), 209–227. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00032-5](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00032-5)
- Li, Y. (2000). High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. *Biomass and Bioenergy*, 19(3), 177–186. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00026-X](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00026-X)

- Li, Y., Liu, H. (2000). High pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. *Biomass and Bioenergy*, 19(3), 177–186.
- Lisowski, A., Dąbrowska-Salwin, M., Ostrowska-Ligęza, E., Nawrocka, A., Stasiak, M., Świętochowski, A., Klonowski, J., Sypuła, M., Lisowska, B. (2017). Effects of the biomass moisture content and pelleting temperature on the pressure-induced agglomeration process. *Biomass and Bioenergy*, 107, 376–383. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.10.029>
- Majtkowski, W. (2006). Źródła biomasy do celów energetycznych. *Regionalne forum energetyki odnawialnej*, 49–55.
- Malinowski, E. (1966). *Anatomia Roślin*. PWN.
- Mani, S., Tabil, L. G., Sokhansanj, S. (2003). An Overview of Compaction of Biomass Grinds. *Powder Handling and Processing*, 15(2), 160–168.
- Mani, S., Tabil, S., Sokhansanj, S. (2006). Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass and Bioenergy*, 30(7), 648–654.
- Manouchehrinejad, M., Yue, Y., Lopes de Morais, R., Souza, L., Singh, H., Mani, S. (2018). Densification of Thermally Treated Energy Cane and Napier Grass. *Springer*, 11, 538–550. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12155-018-9921-4>
- Markowska, A., Warechowska, M., Warechowski, J. (2016). Influence of moisture on external friction coefficient and basic physical properties of Astoria variety wheat grain. *Technical Sciences*.
- Markowski, M., Żuk-Gołaszewska, K., Kwiatkowski, D. (2013). Influence of variety on selected physical and mechanical properties of wheat. *Industrial Crops and Products*, 47, 113–117. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.02.024>
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37–46. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3)
- Meadows, D. L. (1973). *Granice wzrostu* (W. Rączkowska S. Rączkowski, Red.). Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne.
- Miao, Z., Phillips, J. W., Grift, T. E., Mathanker, S. K. (2013). Energy and pressure requirement for compression of *Miscanthus giganteus* to an extreme density. *Biosystems Engineering*, 114(1), 21–25. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.10.002>
- Mišljenović, N., Čolović, R., Vukmirović, Đ., Brlek, T., Bringas, C. S. (2016). The effects of sugar beet molasses on wheat straw pelleting and pellet quality. A comparative study of pelleting by using a single pellet press and a pilot-scale pellet press. *Fuel Processing Technology*, 144, 220–229. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.01.001>
- Moiceanu, G., Voicu, P., Paraschiv, G., Voicu, G. (2017). Behaviour of miscanthus at cutting shear with straight knives with different edge angles. *Environmental Engineering and Management Journal*, 16(5), 1203–1209. <https://doi.org/10.30638/eemj.2017.126>
- Molas, R., Borkowska, H., Kupczyk, A., Osiak, J. (2019a). Virginia Fanpetals (*Sida*) Biomass Can be Used to Produce High-Quality Bioenergy. *Agronomy Journal*, 111(1), 24–29. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.01.0044>

- Molas, R., Borkowska, H., Kupczyk, A., Osiak, J. (2019b). Virginia Fanpetals Sida Biomass Can be Used to Produce High-Quality Bioenergy. *Agronomy Journal*, 111(1), 24–29. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.01.0044>
- Molenda, M., Horabik, J., Parafiniuk, P., Oniszczyk, A., Bańda, M., Wajs, J., Gondek, E., Chutkowski, M., Lisowski, A., Wiącek, J., Stasiak, M. (2021). Mechanical and Combustion Properties of Agglomerates of Wood of Popular Eastern European Species. *Materials*, 14(11), 2728. <https://doi.org/10.3390/ma14112728>
- Moll, L., Wever, C., Völkerling, G., Pude, R. (2020). Increase of Miscanthus Cultivation with New Roles in Materials Production—A Review. *Agronomy*, 10(2), 308. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020308>
- Mudryk, K., Hutsol, T., Wrobel, M., Jewiarz, M., Dziedzic, B. (2019, maj 22). *Determination of friction coefficients of fast-growing tree biomass*. <https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N506>
- Mudryk, K., Wróbel, M. (2010). *Optymalizacja procesu produkcji paliw kompaktowanych wytwarzanych z roślin energetycznych* (K. Dreszer J. Jakóbiec, Red.; T. 1). Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej.
- Mudryk, K., Wróbel, M. (2011). Cup plant *Silphium perfoliatum* L.-biomass source for biofuels production. *Inżynieria Rolnicza*, 6, 21–27.
- Nahm, M., Morhart, C. (2018). Virginia mallow (*Sida hermaphrodita* (L.) Rusby) as perennial multipurpose crop: biomass yields, energetic valorization, utilization potentials, and management perspectives. *GCB Bioenergy*, 10(6), 393–404. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12501>
- Nalborczyk, E. (1999). Rośliny alternatywne rolnictwa XXI wieku i perspektywy ich wykorzystania. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 468, 17–30.
- Niedziółka, I., Szpryngiel, M., Kachel-Jakubowska, M., Kraszkiewicz, A., Zawisłak, K., Sobczak, P., Nadulski, R. (2015). Assessment of the energetic and mechanical properties of pellets produced from agricultural biomass. *Renewable Energy*, 76, 312–317. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.040>
- Nielsen, K., Gardner, D., Poulsen, T., Felby, C. (2009). Importance of temperature, moisture content, and species for the conversion process of wood residues into fuel pellets. *Wood and Fiber Science*, 41, 414–425.
- Nielsen, S. K., Mandø, M. (2020). Experimental and numerical investigation of die designs in biomass pelleting and the effect on layer formation in pellets. *Biosystems Engineering*, 198, 185–197. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.08.010>
- Nielsen, S., Mandø, M., Rosenørn, A. (2020a). Review of die design and process parameters in the biomass pelleting process. *Powder Technology*, 364, 971–985. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2019.10.051>
- Nielsen, S., Mandø, M., Rosenørn, A. B. (2020b). Review of die design and process parameters in the biomass pelleting process. *Powder Technology*, 364, 971–985. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2019.10.051>

- Obernberger, I., Thek, G. (2004). Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 653–669.
- Obidziński, S. (2005). *Granulowanie materiałów roślinnych w pierścieniowym układzie roboczym granuladora*.
- Obidziński, S. (2012). Analysis of usability of potato pulp as solid fuel. *Fuel Processing Technology*, 94(1), 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.10.012>
- Obidziński, S., Dołżyńska, M., Stasieluk, W. (2019). Production of fuel pellets from a mixture of sawdust and rye bran. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 214, 012073. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012073>
- Obidziński, S., Hejft, R. (2012). Badanie nacisków wywieranych przez materiał na ściankę otwartej komory zagęszczania. *Inżynieria Rolnicza*, 3(138), 175–184.
- Obidziński, S., Piekut, J., Dec, D. (2016). The influence of potato pulp content on the properties of pellets from buckwheat hulls. *Renewable Energy*, 87, 289–297. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.10.025>
- Obidziński, S., Puchlik, M., Dołżyńska, M. (2020a). Pelletization of Post-Harvest Tobacco Waste and Investigation of Flue Gas Emissions from Pellet Combustion. *Energies*, 13(22), 6002. <https://doi.org/10.3390/en13226002>
- Obidziński, S., Puchlik, M., Dołżyńska, M. (2020b). Pelletization of Post-Harvest Tobacco Waste and Investigation of Flue Gas Emissions from Pellet Combustion. *Energies*, 13(22), 6002. <https://doi.org/10.3390/en13226002>
- O'Dogherty, M. J., Wheeler, J. A. (1984). Compression of straw to high densities in closed cylindrical dies. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 29(1), 61–72. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(84\)90061-1](https://doi.org/10.1016/0021-8634(84)90061-1)
- Oleszek, M., Matyka, M., Lalak, J., Tys, J., Paprota, E. (2013). Characterization of *Sida hermaphrodita* as a feedstock for anaerobic digestion process. *Journal of Food, Agriculture Environment*, 11(3–4), 1839–1841.
- Peleg, M., Mannheim, C. H. (1973). Effect of conditioners on the flow properties of powdered sucrose. *Powder Technology*, 7(1), 45–50. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(73\)80007-5](https://doi.org/10.1016/0032-5910(73)80007-5)
- Peni, D., Stolarski, M. J., Bordiean, A., Krzyżaniak, M., Dębowski, M. (2020). Silphium perfoliatum—A Herbaceous Crop with Increased Interest in Recent Years for Multi-Purpose Use. *Agriculture*, 10(12), 640. <https://doi.org/10.3390/agriculture10120640>
- Pietsch, W. (2001). *Agglomeration Processes: Phenomena, Technologies, Equipment*. <https://doi.org/10.1002/9783527619801>
- Piłat, J., Majtkowski, W., Majtkowska, G., Mikołajczak, J., Górska, A. (2007). Przydatność do zakiszania wybranych form gatunku roślin z rodzaju *Silphium*. *Journal of Central European Agriculture*, 8(3), 363–368.
- Piotr Gradziuk. (1999). Możliwości wykorzystania surowców pochodzenia rolniczego na cele energetyczne. *Roczniki Naukowe Stowarzyszenia Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu*, 1(3).

- PN-EN ISO 16559:2022-06. (2022). *Biopaliwa stałe - Terminologia*.
- PN-EN ISO 17225-2:2021-10. (2021). *Biopaliwa stałe - Specyfikacje paliw i klasy - Część 2: Klasy peletów drzewnych*.
- PN-EN ISO 17225-6:2021-12. (2021). *Biopaliwa stałe - Specyfikacje paliw i klasy - Część 6: Klasy peletów nie drzewnych*.
- PN-EN ISO 17827-1:2016-07. (2016). *Biopaliwa stałe - Oznaczanie składu ziarnowego paliw niesprasowanych - Część 1: Metoda przesiewania oscylacyjnego przy użyciu sit o wymiarach oczka 3,15 mm lub większych*.
- PN-EN ISO 17828:2016-02. (2016). *Biopaliwa stałe - Określanie gęstości nasypowej*.
- PN-EN ISO 18122:2023-05. (2023). *Biopaliwa stałe - Oznaczanie zawartości popiołu*.
- PN-EN ISO 18125:2017-07. (2021). *Biopaliwa stałe - Oznaczanie wartości opałowej*.
- PN-EN ISO 18134-1:2023-02. (2023). *Biopaliwa stałe - Oznaczanie zawartości wilgoci - Część 1: Metoda referencyjna*.
- PN-EN ISO 18134-3:2015-11. (2015). *Biopaliwa stałe - Oznaczanie zawartości wilgoci - Metoda suszarkowa - Część 3: Wilgoć w próbce do analizy ogólnej*.
- PN-EN ISO 17225-1:2021. (2021). *Biopaliwa stałe -- Specyfikacje paliw i klasy - Część 1: Wymagania ogólne*.
- PN-EN ISO 17225-6:2014-08. (b.d.). *Biopaliwa stałe -- Specyfikacje paliw i klasy -- Część 6: Pelety nie drzewne do zastosowań nieprzemysłowych*.
- PN-EN ISO 17827-2:2016-07. (2016). *Biopaliwa stałe - Oznaczanie składu ziarnowego paliw niesprasowanych - Część 2: Metoda przesiewania wibracyjnego przy użyciu sit o wymiarach oczka 3,15 mm lub poniżej*.
- PN-EN ISO 17831-1:2016-02. (2016). *Biopaliwa stałe - Oznaczanie wytrzymałości mechanicznej peletów i brykietów - Część 1: Pelety*.
- Prosiński, S. (1984). *Chemia drewna*. PWRiL.
- Pszczółkowska, A., Romanowska-Duda, Z., Pszczółkowski, W., Grzesik, M., Wysokińska, Z. (2012). Biomass Production of Selected Energy Plants: Economic Analysis and Logistic Strategies. *Comparative Economic Research. Central and Eastern Europe*, 15(3), 77–103. <https://doi.org/10.2478/v10103-012-0018-6>
- Puig-Arnabat, M., Shang, L., Sárossy, Z., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U. B. (2016). From a single pellet press to a bench scale pellet mill — Pelletizing six different biomass feedstocks. *Fuel Processing Technology*, 142, 27–33. <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2015.09.022>
- Rahaman, S. A., Salam, P. A. (2017). Characterization of cold densified rice straw briquettes and the potential use of sawdust as binder. *Fuel Processing Technology*, 158, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.12.008>
- Ratajczak, E., Bidziński, G. (2013). Rynek biomasy drzewnej na cele energetyczne – aspekty ekonomiczne i społeczne. *Biomasa leśna na cele energetyczne* (P. Gołos A. Kaliszewski, Red.).

- Remlein-Starosta, D., Krzymińska, J., Kowalska, J., Bocianowski, J. (2016a). Evaluation of yeast-like fungi to protect Virginia mallow (*Sida hermaphrodita*) against *Sclerotinia sclerotiorum*. *Canadian Journal of Plant Science*, 96(2), 243–251. <https://doi.org/10.1139/cjps-2015-0230>
- Remlein-Starosta, D., Krzymińska, J., Kowalska, J., Bocianowski, J. (2016b). Evaluation of yeast-like fungi to protect Virginia mallow *Sida hermaphrodita* against *Sclerotinia sclerotiorum*. *Canadian Journal of Plant Science*, 96(2), 243–251. <https://doi.org/10.1139/cjps-2015-0230>
- Rhén, C., Gref, R., Sjöström, M., Wästerlund, I. (2005a). Effects of raw material moisture content, densification pressure and temperature on some properties of Norway. *Fuel Process. Technol.*, 87, 11–16.
- Rhén, C., Gref, R., Sjöström, M., Wästerlund, I. (2005b). Effects of raw material moisture content, densification pressure and temperature on some properties of Norway spruce pellets. *Fuel Processing Technology*, 87(1), 11–16. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2005.03.003>
- Sajnóg, N., Wójcik, J. (2013). Możliwości zagospodarowania gruntów marginalnych i nieużytków gruntowych w scalaniu gruntów. *Infrastruktura I Ekologia Terenów Wiejskich*, 2(2), 155–166.
- Samuelsson, R., Larsson, S. H., Tyhrel, M., Lestander, T. A. (2012). Moisture content and storage time influence the binding mechanisms in biofuel wood pellets. *Applied Energy*, 99, 109–115.
- Schwarz, H. (1993). *Miscanthus sinensis* ‘giganteus’ production on several sites in Austria. *Biomass and Bioenergy*, 5(6), 413–419. [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(93\)90036-4](https://doi.org/10.1016/0961-9534(93)90036-4)
- Serrano, C., Monedero, E., Lapuerta, M., Portero, H. (2011). Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets. *Fuel Process. Technol.*, 92, 699–706.
- Setter, C., Ataíde, C. H., Mendes, R. F., de Oliveira, T. J. P. (2021). Influence of particle size on the physico-mechanical and energy properties of briquettes produced with coffee husks. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(7), 8215–8223. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11124-0>
- Shahab Sokhansanj, Sudhagar Mani, Xiaotao Bi, Parisa Zaini, Lope Tabil. (2005). Binderless Pelletization of Biomass. *2005 Tampa, FL July 17-20, 2005*. <https://doi.org/10.13031/2013.19922>
- Shapiro, I. (1993). Compaction of powders X. Development of a general compaction equation. *Advances in Powder Metallurgy Particulate Materials*, 3, 229–243.
- Shaw, M. D., Tabil, L. G. (2007). Compression and Relaxation Characteristics of Selected Biomass `Grinds. *2007 Minneapolis, Minnesota, June 17-20, 2007*. <https://doi.org/10.13031/2013.23511>
- Šiaudinis, G. (2017). The investigation of three potential energy crops: common mugwort, cup plant and Virginia Mallow on western Lithuania’s albeluvisol. *Applied Ecology and Environmental Research*, 15(3), 611–620. https://doi.org/10.15666/aer/1503_611620

- Šiaudinis, G., Jasinskas, A., Šarauskis, E., Steponavičius, D., Karčauskiene, D., Liaudanskiene, I. (2015). The assessment of Virginia mallow (*Sida hermaphrodita* Rusby) and cup plant (*Silphium perfoliatum* L.) productivity, physico–mechanical properties and energy expenses. *Energy*, 93, 606–612. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2015.09.065>
- Skonecki, S. (2004). *Modelowanie ciśnieniowego zagęszczania materiałów roślinnych* (s. 9–89).
- Skonecki, S., Kulig, R. (2011). Wpływ wilgotności biomasy roślinnej i nacisku tłoka na parametry brykietowania i wytrzymałość aglomeratu. *Autobusy, Technika, Eksploatacja, Systemy transportowe*, 10, 375–386.
- Smith, I. E., Probert, S. D., Stokes, R. E., Hansford, R. J. (1977). The briquetting of wheat straw. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 22(2), 105–111. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(77\)90054-3](https://doi.org/10.1016/0021-8634(77)90054-3)
- Sologubik, C. A., Campañone, L. A., Pagano, A. M., Gely, M. C. (2013). Effect of moisture content on some physical properties of barley. *Industrial Crops and Products*, 43, 762–767. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.08.019>
- Spooner, D. M., Cusick, A. W., Hall, G. F., Baskin, J. M. (1985). Observations on the distribution and ecology of *Sida Hermaphrodita* (L.) Rusby (Malvaceae). *SIDA, Contributions to Botany*, 11(2), 215–225. <http://www.jstor.org/stable/23909315>
- Stelte, W., Holm, J., Sanadi, A., Barsberg, S., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U. (2011). Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. *Fuel*, 90(11), 3285–3290. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.011>
- Stolarski, M. J., Krzyżaniak, M., Warmiński, K., Tworowski, J., Szczukowski, S. (2017). Perennial herbaceous crops as a feedstock for energy and industrial purposes: Organic and mineral fertilizers versus biomass yield and efficient nitrogen utilization. *Industrial Crops and Products*, 107, 244–259. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.05.059>
- Stolarski, M., Tworowski, J., Szczukowski, S., Kwiatkowski, J., Graban, Ł. (2014). Opłacalność i efektywność energetyczna produkcji biomasy Ślázowca Pensylwańskiego w zależności od stosowanego materiału siewnego. *Fragmenta Agronomica*, 31(2), 96–106.
- Strategia Rozwoju Energetyki Odnawialnej 2000, Warszawa: Ministerstwo Środowiska. (2000).
- Styks, J., Knapczyk, A., Łapczyńska-Kordon, B. (2021). Effect of Compaction Pressure and Moisture Content on Post-Agglomeration Elastic Springback of Pellets. *Materials*, 14(4), 879. <https://doi.org/10.3390/ma14040879>
- Styks, J., Wróbel, M., Frączek, J., Knapczyk, A. (2020). Effect of Compaction Pressure and Moisture Content on Quality Parameters of Perennial Biomass Pellets. *Energies*, 13(8), 1859. <https://doi.org/10.3390/en13081859>
- Sultana, A., Kumar, A. (2012). Ranking of biomass pellets by integration of economic, environmental and technical factors. *Biomass and Bioenergy*, 39, 344–355. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.01.027>
- Szweykowska, A., Szweykowski, J. (2003). *Słownik botaniczny* (II). Wiedza Powszechna.

- Szweykowska, A., Szweykowski, J. (2006). *Botanika, tom 1 i 2*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Szyszlak-Bargłowicz, J., Słowik, T., Zając, G., Blicharz-Kania, A., Zdybel, B., Andrejko, D., Obidziński, S. (2021a). Energy Parameters of Miscanthus Biomass Pellets Supplemented with Copra Meal in Terms of Energy Consumption during the Pressure Agglomeration Process. *Energies*, 14(14), 4167. <https://doi.org/10.3390/en14144167>
- Szyszlak-Bargłowicz, J., Słowik, T., Zając, G., Blicharz-Kania, A., Zdybel, B., Andrejko, D., Obidziński, S. (2021b). Energy Parameters of Miscanthus Biomass Pellets Supplemented with Copra Meal in Terms of Energy Consumption during the Pressure Agglomeration Process. *Energies*, 14(14), 4167. <https://doi.org/10.3390/en14144167>
- Świętochowski, A. (2013). *Aglomeracja ciśnieniowa biomasy i właściwości fizyczne paliw formowanych z roślin energetycznych*. Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie.
- Tabil, L. (2022). *Binding and pelleting characteristics of alfalfa*.
- Taulbee, D., Patil, D. P., Honaker, R. Q., Parekh, B. K. (2009). Briquetting of Coal Fines and Sawdust Part I: Binder and Briquetting-Parameters Evaluations. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 29(1), 1–22. <https://doi.org/10.1080/19392690802628705>
- Todaro, L., Rita, A., Cetera, P., D’Auria, M. (2015). Thermal treatment modifies the calorific value and ash content in some wood species. *Fuel*, 140, 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.060>
- Tumuluru, J. S., Sokhansanj, S., Lim, C. J., Bi, T., Lau, A., Melin, S., Sowlati, T., Oveisi, E. (2010). Quality of Wood Pellets Produced in British Columbia for Export. *Applied Engineering in Agriculture*, 26(6), 1013–1020. <https://doi.org/10.13031/2013.35902>
- Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Hess, J. R., Kenney, K. L. (2011). A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioprod. Biorefining*, 5, 683–707.
- Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Kenney, K. L., Hess, J. R. (2010, czerwiec). A technical review on biomass processing: densification, preprocessing, modeling, and optimization. *The 2010 ASABE Annual International Meeting held in Pittsburg*.
- Viswanathan, R., Gothandapani, L. (1999). Pressure Density Relationships and Stress Relaxation Characteristics of Coir Pith. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 73(3), 217–225. <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0408>
- Voicu, G., Moiceanu, E., Sandu, M., Poenaru, I. C., Voicu, P. (2011). Experiments regarding mechanical behaviour of energetic plant miscanthus to crushing and shear stress. *In Proceedings of the Engineering for Rural Development*, 490–495.
- Bilanski, W., Graham, V., Hanusiak, J. (1985). Mechanics of Bulk Forage Deformation with Application to Wafering. *Transactions of the ASAE*, 28(3), 697–702. <https://doi.org/10.13031/2013.32322>
- Wagner, M., Mangold, A., Lask, J., Petig, E., Kiesel, A., Lewandowski, I. (2019). Economic and environmental performance of miscanthus cultivated on marginal land for biogas production. *GCB Bioenergy*, 11(1), 34–49. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12567>

- Walker, E. E. (1923). The properties of powders. Part VI. The compressibility of powders. *Transactions of the Faraday Society*, 19(July), 73. <https://doi.org/10.1039/tf9231900073>
- Wang, Y., Sun, Y., Wu, K. (2020). Methods to Determine the Interactions Between the Biomass and the Pellet Channel During Biomass Pelletizing Process. *Waste and Biomass Valorization*, 11(8), 4469–4480. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00755-1>
- Wang, Y., Wu, K., Sun, Y. (2018). Effects of raw material particle size on the briquetting process of rice straw. *Journal of the Energy Institute*, 91(1), 153–162. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.09.002>
- Wilén, C., Moilanen, A., Kurkela, E. (1996). *Biomass feedstock analyses*.
- Winter, E. (1981). *Fundamental Considerations For Preparing Densified Refuse-derived Fuel*.
- Wójcik, A., Frączek, J., Niemczewska-Wójcik, M. (2020). The relationship between static and kinetic friction for plant granular materials. *Powder Technology*, 361, 739–747. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.048>
- Wójcik, A., Frączek, J., Wota, A. K. (2019). The methodical aspects of the friction modeling of plant granular materials. *Powder Technology*, 344, 504–513. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.037>
- Wrobel, M., Mudryk, K., Jewiarz, M., Knapczyk, A. (2018). Impact of raw material properties and agglomeration pressure on selected parameters of granulates obtained from willow and black locust biomass. *17th International Scientific Conference Engineering for Rural Development*, 1933–1938. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N542>
- Wróbel, M. (2019). Zagęszczalność i kompaktowalność biomasy celulozowej. W *Inżynieria Rolnicza*.
- Wróbel, M., Mudryk, K., Jewiarz, M., Głowacki, S., Tulej, W. (2018). *Characterization of Selected Plant Species in Terms of Energetic Use* (s. 671–681). https://doi.org/10.1007/978-3-319-72371-6_66
- Wu, K., Shi, S. J., Wang, Y. L., Peng, B. Bin. (2011). FEA Simulation of Extruding Feed through Die Hole in Pelleting Process. *Applied Mechanics and Materials*, 109, 350–354. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.109.350>
- Xue, S., Lewandowski, I., Wang, X., Yi, Z. (2016). Assessment of the production potentials of Miscanthus on marginal land in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 932–943. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.040>
- Zabava, B.-S., Voicu, G., Dinca, M.-N., Ungureanu, N., Ferdes, M. (2018, maj 23). *Durability of pellets obtained from energy plants: review*. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N419>
- Zajączkowski, S. (2013). Prognozy pozyskania drewna w Polsce w perspektywie 20 lat oraz możliwości ich wykorzystania do szacowania zasobów drewna na cele energetyczne. W P. Gołos A. Kaliszewski (Red.), *Biomasa leśna na cele energetyczne*.
- Zawiślak, K., Sobczak, P., Kraszkiewicz, A., Niedziółka, I., Parafiniuk, S., Kuna-Broniowska, I., Tanaś, W., Żukiewicz-Sobczak, W., Obidziński, S. (2020). The use of lignocellulosic waste in the production of pellets for energy purposes. *Renewable Energy*, 145, 997–1003. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.051>

Zhang, J., Guo, Y. (2014). Physical properties of solid fuel briquettes made from *Caragana korshinskii* Kom. *Powder Technology*, 256, 293–299.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.02.025>

Spis tabel

Tabela 1 Klasyfikacja pochodzenia i źródeł biomasy – fragment dotyczący biomasy z roślin zbieranych w cyklu rocznym – tzw. biomasa zielna	11
Tabela 2 Główne formy handlowe biopaliw stałych	18
Tabela 3 Modele matematyczne procesu zagęszczenia	30
Tabela 4 Miskant olbrzymi <i>Miscanthus × giganteus</i> Greef et Deu - systematyka	37
Tabela 5 Rożnik przerośnięty <i>Silphium perfoliatum</i> L.- systematyka	40
Tabela 6 Ślaziolec pensylwański <i>Sida hermaphrodita</i> L. Rusby - systematyka	42
Tabela 7 Ujednolicony skład ziarnowy rozdrobnionego materiału badawczego	58
Tabela 8 Parametry materiału badawczego	77
Tabela 9 Średnie gęstości oraz porowatość materiału badawczego w stanie suchym	78
Tabela 10 Udział procentowy frakcji materiałów badawczych.....	80
Tabela 11 Udział procentowy frakcji materiałów badawczych – etap II	81
Tabela 12 Współczynnik tarcia materiału badawczego.....	82

Spis rysunków

Rysunek 1. Struktura pozyskania energii ze źródeł odnawialnych w Polsce wg nośników w 2018 r.	14
Rysunek 2. Struktura pozyskania energii ze źródeł odnawialnych w Polsce wg nośników w 2020 r.	15
Rysunek 3. Udział energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto	16
Rysunek 4. Schemat zagęszczania cząsteczek	20
Rysunek 5. Typy połączeń międzycząsteczkowych: a - częściowe topnienie, b - reakcje chemiczne, c - mostki ciekłe, d - siły molekularne, e - blokowanie cząsteczek, f - siły kapilarne	21
Rysunek 6. Miskant olbrzymi <i>Miscanthus × giganteus</i> Greef et Deu.: 1) pęd, 2) przekrój pędu, 3) liść, 4) sadzonka korzeniowa, 5) łodyga z liśćmi	38
Rysunek 7. Rożnik przerośnięty <i>Silphium perfoliatum</i> L.: 1 – pęd generatywny, 2 – pąk kwiatowy, 3 – kwiat, 4 - owocnik, 5 - nasiona, 6 - przekrój poprzeczny pędu, 7 – sadzonka korzeniowa.....	41
Rysunek 8. Ślaziolec pensylwański <i>Sida hermaphrodita</i> L. Rusby.: 1 – pęd generatywny, 2 – pąk kwiatowy, 3 – kwiaty, 4 – owocostany w różnym stadium dojrzałości, 5 – liść, 6 – sadzonka korzeniowa, 7 – nasiona	43
Rysunek 9. Ogólny schemat badań.....	46

Rysunek 10. Materiał badawczy pozyskany z plantacji i przygotowany do sezonowania: a - miskant, b - rożnik, c – ślázowiec	47
Rysunek 11. Młynki laboratoryjne: a - Testchem LMN-100, Polska, b - PX-MFC 90D, Polymix, Kinematika, Luzern, Switzerland	49
Rysunek 12. Kalorymetr IKA C600: a – uchwyt bomby, b - bomba kalorymetryczna	51
Rysunek 13. Piknometry: a - quasicieczowy GeoPyc 1360, b – helowy AccuPyc II 1340	52
Rysunek 14. Stanowisko do wyznaczania współczynnika tarcia	56
Rysunek 15. Schemat badań - etap wstępny.....	57
Rysunek 16. Stacja zagęszczająca: a - prasa hydrauliczna SIRIO P400, b - komora zagęszczająca oraz tłok, c- próbki	60
Rysunek 17. Stanowisko do określania wytrzymałości mechanicznej peletów wg Normy EN ISO 17831-1:2016-02	61
Rysunek 18. Uczelniane stanowisko do oznaczania wytrzymałości mechanicznej biopaliw stałych	62
Rysunek 19. Schemat badań właściwych	64
Rysunek 20. Moduł wprowadzający i moduły stożkowe $\varnothing 12$ mm	67
Rysunek 21. Moduł wprowadzający i moduły stożkowe $\varnothing 10$ mm	68
Rysunek 22. Moduł odbierający i moduły cylindryczne $\varnothing 8$ mm	69
Rysunek 23. Stanowisko badawcze: a - maszyna wytrzymałościowa Wance TestStar, b - modułowa przystawka zagęszczająca	70
Rysunek 24. Pelety wskaźnikowe z próbki klasycznego testu DU	72
Rysunek 25. Przykładowe wykresy powierzchniowe: a - przestrzenny, b - warstwiczny	74
Rysunek 26. Przykładowa mapa zmian parametrów jakościowych peletu	76
Rysunek 27. Skumulowany skład ziarnowy materiału po mieleniu i mieszanki ujednoliconej	83
Rysunek 28. Wytrzymałość mechaniczna peletów wykonanych z miskanta - badania wstępne	85
Rysunek 29. Wytrzymałość mechaniczna peletów wykonanych z rożnika - badania wstępne	86
Rysunek 30. Wytrzymałość mechaniczna peletów wykonanych z ślázowca - badania wstępne	87
Rysunek 31. Wykres zmiany objętości stożków zagęszczających	89
Rysunek 32. Przykład peletów testowych wytworzonych z biomasy XXX	90
Rysunek 33. Przykładowe wykresy zagęszczania biomasy	91
Rysunek 34. Wpływ długości L kanału zagęszczającego oraz kąta stożka α na siłę zagęszczania F miskanta w stanie suchym: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm	93

Rysunek 35. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego oraz kąta stożka α na ciśnienie zagęszczania P miskanta w stanie suchym: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm...	94
Rysunek 36. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego oraz kąta stożka α na ciśnienie zagęszczania P miskanta o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm	95
Rysunek 37. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α oraz temperatury 100°C na ciśnienie zagęszczania P miskanta o wilgotności 13% w temperaturze 100°C: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm.....	96
Rysunek 38. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α na ciśnienie zagęszczania P rożnika w stanie suchym: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm	97
Rysunek 39. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego oraz kąta stożka α na ciśnienie zagęszczania P rożnika o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm .	97
Rysunek 40. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α oraz temperatury 100°C na ciśnienie zagęszczania P rożnika o wilgotności 13% w temperaturze 100°C: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm.....	98
Rysunek 41. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego oraz kąta stożka α siłę zagęszczania F mieszanki w stanie suchym a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm..	99
Rysunek 42. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α na ciśnienie zagęszczania P ślazuca o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm	100
Rysunek 43. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α oraz temperatury 100°C na ciśnienie zagęszczania P mieszanki o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm.....	101
Rysunek 44. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α na gęstość DE otrzymanych peletów w stanie suchym: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm.....	103
Rysunek 45. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α na gęstość DE peletu o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm	103
Rysunek 46. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α oraz temperatury 100°C na gęstość DE peletu o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm	104
Rysunek 47. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α na gęstość DE otrzymanych peletów w stanie suchym: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm.....	105
Rysunek 48. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α na gęstość DE peletu o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm	106
Rysunek 49. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α oraz temperatury 100°C na gęstość DE peletu o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm	107
Rysunek 50. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α na gęstość właściwą DE mieszanki w stanie suchym: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm..	108

Rysunek 51. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α na gęstość właściwą DE mieszanki o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm	109
Rysunek 52. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α oraz temperatury 100°C na gęstość właściwą DE mieszanki o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm	110
Rysunek 53. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α na wytrzymałość mechaniczną DU peletów w stanie suchym: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm	112
Rysunek 54. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α na wytrzymałość mechaniczną DU peletów o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm	113
Rysunek 55. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α oraz temperatury 100°C na wytrzymałość mechaniczną DE peletów o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm	114
Rysunek 56. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α na wytrzymałość mechaniczną DU peletów w stanie suchym: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm	115
Rysunek 57. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α na wytrzymałość mechaniczną DU peletów o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm	116
Rysunek 58. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego, kąta stożka α oraz temperatury 100°C na wytrzymałość mechaniczną DE peletów o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm	117
Rysunek 59. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego na wytrzymałość mechaniczną peletów w stanie suchym: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm.....	117
Rysunek 60. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego na wytrzymałość mechaniczną peletów o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm ..	118
Rysunek 61. Wykres wpływu długości L kanału zagęszczającego temperatury 100°C na wytrzymałość mechaniczną peletów o wilgotności 13%: a) redukcja 12 – 8 mm, b) redukcja 10 – 8 mm	119
Rysunek 62. Mapa zmian parametrów jakościowych dla miskanta $M_{13\%}$, $D_1 = 12$ mm.....	122
Rysunek 63. Mapa zmian parametrów jakościowych dla miskanta $M_{13\%}$, $D_1 = 10$ mm.....	123
Rysunek 64. Mapa zmian parametrów jakościowych dla miskanta $M_{13\%}$, $D_1 = 12$ mm, 100°C	124
Rysunek 65. Mapa zmian parametrów jakościowych dla miskanta $M_{13\%}$, $D_1 = 10$ mm, 100°C	125
Rysunek 66. Mapa zmian parametrów jakościowych dla roznika $M_{13\%}$, $D_1 = 12$ mm	126
Rysunek 67. Mapa zmian parametrów jakościowych dla roznika $M_{13\%}$, $D_1 = 10$ mm	127

Rysunek 68. Mapa zmian parametrów jakościowych dla rożnika $M_{13\%}$, $D_1 = 12$ mm, 100°C	127
Rysunek 69. Mapa zmian parametrów jakościowych dla rożnika $M_{13\%}$, $D_1 = 10$ mm, 100°C	128
Rysunek 70. Mapa zmian parametrów jakościowych dla ślazuca $M_{13\%}$, $D_1 = 12$ mm.....	129
Rysunek 71. Mapa zmian parametrów jakościowych dla ślazuca $M_{13\%}$, $D_1 = 10$ mm.....	130
Rysunek 72. Mapa zmian parametrów jakościowych dla ślazuca $M_{13\%}$, $D_1 = 12$ mm, 100°C	131
Rysunek 73. Mapa zmian parametrów jakościowych dla ślazuca $M_{13\%}$, $D_1 = 10$ mm, 100°C	131
Rysunek 74. Graficzne uproszczenie map zmian parametrów jakościowych peletu dla wszystkich materiałów badawczych dla $D_1 = 12$ mm.....	133
Rysunek 75. Mapa obszarów odpowiadających klasie jakościowej A dla $D_1 = 12$ mm	133
Rysunek 76. Mapa obszarów odpowiadających klasie jakościowej B dla $D_1 = 12$ mm.....	134
Rysunek 77. Obszary odpowiadające klasie jakościowej A oraz B dla $D_1 = 12$ mm.....	135
Rysunek 78. Obszary odpowiadające klasie jakościowej A oraz B dla $D_1 = 10$ mm.....	135