



POLITECHNIKA POZNAŃSKA
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Instytut Konstrukcji Maszyn



PRACA DOKTORSKA

Wpływ ciśnienia powietrza w układzie odmuchiwania
cebuli na energochłonność i efektywność procesu
obierania oraz jakość produktu

mgr inż. Paweł WOŹNIAK

Promotor:

prof. dr hab. inż. Stanisław Nosal

Promotor pomocniczy:

dr inż. Agata Bieńczak

Poznań, 2024

Rozprawa doktorska wykonana w ramach programu „Doktorat Wdrożeniowy”
finansowanego ze środków Ministerstwa Edukacji i Nauki

Podziękowania

*Pragnę serdecznie podziękować
promotorowi rozprawy doktorskiej
Panu prof. dr. hab. inż. Stanisławowi Nosalowi
oraz opiekunowi dr inż. Agacie Bieńczyk
za motywowanie w osiąganiu zamierzonych celów,
za wyrozumiałość i pomoc w trudnych momentach,
a także za wiarę w moje umiejętności*

Spis treści

STRESZCZENIE	5
WYKAZ SKRÓTÓW	6
WYKAZ SYMBOLI I OZNACZEŃ.....	7
1. WSTĘP	8
2. ANALIZA STANU WIEDZY O OCZYSZCZANIU CEBULI.....	11
2.1. Znaczenie cebuli w żywieniu i jej charakterystyka	11
2.1.1. Przegląd uprawianych odmian, okresów wegetacji i sposobów przechowywania cebuli w Polsce	11
2.1.2. Zapotrzebowanie rynku na cebulę	14
2.1.1. Wskaźniki oceny jakościowej oczyszczonej cebuli.....	15
2.2. Przegląd sposobów obróbki cebuli w przemyśle	19
2.2.1. Zabiegi technologiczne oczyszczania cebuli	19
2.2.2. Metody usuwania suchej łuski z cebuli	21
2.3. Określenie parametrów eksploatacyjnych procesu oczyszczania.....	24
2.3.1. Zapotrzebowanie na energię procesu odmuchu suchej łuski z cebuli	24
2.3.2. Ocena efektywności procesu oczyszczania	25
2.3.3. Ocena ilości odpadu suchej łuski cebuli	26
2.4. Podsumowanie stanu wiedzy	27
3. CEL I HIPOTEZY PRACY.....	29
4. BADANIA PARAMETRÓW FIZYCZNYCH CEBULI ORAZ PARAMETRÓW PROCESOWYCH MAJĄCYCH WPLYW NA JEJ OCZYSZCZENIE.....	31
4.1. Określenie parametrów fizycznych cebuli.....	31
4.2. Określenie parametrów użytkowych dysz odmuchowych.....	43
4.2.1. Badania porównawcze dysz odmuchowych	43
4.3. Opracowanie stanowiska badawczego do odmuchu suchej łuski cebuli	46
4.4. Badania wstępne procesu usuwania suchej łuski.....	50
4.4.1. Analiza efektywności oczyszczania wybranych dysz odmuchowych	50
4.4.2. Wpływ wielkości cebuli na efektywność oczyszczania.....	54
4.4.3. Wpływ ilości suchej łuski w cebuli na efektywność oczyszczania	55
4.4.4. Wpływ udziału korzenia i szczypioru na efektywność oczyszczania suchej łuski z cebuli	56
4.4.5. Wpływ odległości dyszy od cebuli na prędkość strugi powietrza	58
4.5. Analiza wyników badań wstępnych oraz wyznaczenie istotnych parametrów fizycznych cebuli.....	60

5. BADANIA ZASADNICZE ODMUCHU SUCHEJ ŁUSKI CEBULI, OBEJMUJĄCE WPŁYW CIŚNIENIA NA PARAMETRY EKSPLOATACYJNE PROCESU OCZYSZCZANIA CEBULI.....	63
5.1. Program badań zasadniczych odmuchu suchej łuski cebuli	63
5.2. Badania zasadnicze oczyszczania cebuli	64
5.2.1. Ocena jakościowa cebuli oczyszczonej	64
5.2.2. Badania efektywności oczyszczania cebuli	68
5.2.3. Badania ilości odpadu suchej łuski	75
5.2.4. Badania nakładów energetycznych układu zasilania sprężonego powietrza.....	82
5.3. Analiza i wnioski z eksperymentalnych badań zasadniczych.....	84
5.4. Wyznaczenie parametrów cebuli wpływających na proces jej oczyszczania.....	85
5.5. Omówienie wyników badań zasadniczych	87
6. OPRACOWANIE APLIKACJI OBLICZENIOWEJ DO GENEROWANIA PARAMETRÓW EKSPLOATACYJNYCH W PROCESIE OCZYSZCZANIA CEBULI	90
6.1. Opracowanie programu aplikacyjnego	90
6.2. Testy aplikacji z udziałem przemysłowej linii do obróbki cebuli	92
6.3. Podsumowanie badań eksploatacyjnych.....	98
7. ANALIZA RYNKU POD KĄTEM WDROŻENIA APLIKACJI OBLICZENIOWEJ W PRZEDSIĘBIORSTWACH PRZETWÓRSTWA WARZYWNEGO	99
7.1. Użyteczność aplikacji obliczeniowej na rynku maszyn dostępnych i nowo opracowanych.....	99
7.2. Możliwości i perspektywy rynkowe dystrybucji aplikacji	100
8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	102
8.1. Odniesienie do hipotezy i celu pracy	103
8.2. Wnioski poznawcze	103
8.3. Wnioski utylitarne.....	104
8.4. Propozycja dalszych prac.....	105
LITERATURA	106
SPIS RYSUNKÓW.....	111
SPIS TABEL	115
ABSTRACT	116

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wpływ ciśnienia powietrza na parametry eksploatacyjne procesu odmuchu suchej łuski z cebuli. Wśród nich uwzględniono efektywność oczyszczania, zapotrzebowanie na energię procesu oraz ilość odpadu w postaci suchej łuski. Stwierdzono, że parametry procesowe proponowane przez producentów maszyn nie odpowiadają zróżnicowanym parametrom fizycznym cebul. Ponadto w literaturze przedmiotu brakuje wiedzy na temat ich wpływu na parametry eksploatacyjne, co powoduje obniżenie opłacalności przetwarzania na rzecz obróbki ręcznej. W pierwszej części pracy dokonano przeglądu technologii przemysłowego oczyszczania uwzględniając metody i narzędzia obróbcze do usuwania suchej łuski z cebuli. Przeprowadzono również analizę literaturową odnośnie efektywności oczyszczania i jej wyznaczania na podstawie wskaźników jakościowych oczyszczonej cebuli.

Przeprowadzono badania wybranych parametrów fizycznych cebuli, kluczowych do jej oczyszczenia oraz wyszczególniono parametry procesowe mające istotny wpływ na proces jej obróbki. Przeprowadzono badania porównawcze wybranych dysz odmuchowych pod kątem wyznaczenia ich siły odmuchu i zużycia powietrza, celem wytypowania reprezentatywnej dyszy wykorzystanej do badań wstępnych i zasadniczych. Opracowano modele wirtualne stanowiska do odmuchu suchej łuski z cebuli i układu zasilania dysz sprężonym powietrzem. Zbudowano fizyczny prototyp wyposażony w szereg czujników do pomiaru ciśnienia zasilania, natężenia przepływu oraz zużycia sprężonego powietrza. Na stanowisku przeprowadzono badania wpływu wielkości cebuli, ilości warstw suchej łuski oraz udziału korzenia i szczypioru na efektywność oczyszczenia. Efektem badań wstępnych było określenie zakresów parametrów ciśnienia zasilania, czasu i siły odmuchu, natężenia przepływu oraz twardości i okresu przechowywania cebul, które posłużą do określenia parametrów eksploatacyjnych w ramach badań zasadniczych.

Ponadto na stanowisku przeprowadzono badania zasadnicze efektywności oczyszczania, ilości odpadu i zapotrzebowania na energię procesu względem parametrów uzyskanych w badaniach wstępnych. Doświadczenia przeprowadzono dla ciśnienia zasilania dysz odmuchowych w zakresie od 4 do 12 bar. Wyniki badań przedstawiono w postaci modeli predykcyjnych, określających zależności efektywności i ilości odpadu od ciśnienia zasilania, twardości cebuli, natężenia przepływu oraz siły i czasu odmuchu.

Na podstawie zależności opracowano aplikację obliczeniową do generowania parametrów eksploatacyjnych względem zmiennych parametrów fizycznych cebuli i procesowych maszyn obróbczych. Przeprowadzono walidację poprawności działania opracowanych modeli obliczeniowych podczas badań na linii do oczyszczania cebuli. Doświadczenia przeprowadzono w trakcie oczyszczania cebuli w firmie Stanek Sp. z o.o., w ramach której potwierdzono poprawność działania aplikacji obliczeniowej.

Wyniki prac zestawiono w syntetycznym podsumowaniu, w którym przedstawiono dalsze kierunki badań.

WYKAZ SKRÓTÓW

3D	– przestrzeń trójwymiarowa,
ANOVA	– Analysis of Variance (Ananliza wariancji)
CAD	– Computer-Aided Design (projektowanie wspomagane komputerowo),
CFD	– Computational Fluid Dynamics (obliczeniowa mechanika płynów),
CV	– Coefficient of Variation (współczynnik zmienności),
Dz.U	– Dziennik Ustaw,
FMV	– Finite Volume Method (metoda objętości skończonych),
FPY	– First Pass Yield [%],
FTY	– First Time Yield [%],
GUS	– Główny Urząd Statystyczny,
HoReCa	– Hotel, Restaurant, Catering,
M	– wartość średnia,
Max	– maksimum,
Me	– mediana,
Min	– minimum,
Q1	– pierwszy kwartył,
Q3	– trzeci kwartył,
p.p.	– punkty procentowe,
RANS	– Reynolds-averaged Navier–Stokes equations (uśrednione w czasie równania Naviera-Stokesa),
RTY	– Rolled Through Yield [%],
RTY _{pk}	– Rolled Through Yield (w procesie przetwarzania) [%],
RTY _{pt}	– Rolled Through Yield (w procesie kontroli) [%],
SD	– standard deviation (odchylenie standardowe),
UE	– Unia Europejska,
WE	– Wspólnota Europejska,

WYKAZ SYMBOLI I OZNACZEŃ

A_c	– przekrój poprzeczny cebuli [mm ²],
D_x	– maksymalna średnica podziałowa cebuli [mm],
D_y	– minimalna średnica podziałowa cebuli [mm],
E_f	– efektywności oczyszczania [%],
E_e	– zapotrzebowanie na energię elektryczną [%],
F	– siła odmuchu [N],
h_o	– wysokość cebuli [mm],
H_o	– twardość cebuli [kG/cm ²],
m_o	– masa odpadu [g],
m_c	– masa cebuli przygotowanej do badań [g],
m_p	– masa cebuli oczyszczonej [g],
n_o	– liczba cebul dostarczonych do badań [szt.],
n_p	– liczba cebul oczyszczonych poprawnie [szt.],
n_s	– liczba cebul uszkodzonych [szt.],
n_r	– liczba cebul doczyszczonych [szt.],
n_l	– liczba warstw cebuli [szt.],
O_c	– obwód cebuli [mm],
p	– ciśnienie zasilania sprężonego powietrza [bar],
q_v	– natężenie przepływu sprężonego powietrza [Nm ³ /s],
Q	– zużycie sprężonego powietrza [m ³],
S_c	– kulistość cebuli [-],
t	– czas odmuchu [s],
t_{pp}	– czas przerwy odmuchu (transport cebuli w module) [s],
t_h	– jednostka godzinowa trwania procesu [s],
T	– okres przechowywania cebuli [m-c],
U_{el1}	– zapotrzebowanie na energię w przeliczeniu na sztukę cebuli oczyszczonej [Wh],
U_{el2}	– zapotrzebowanie na energię w przeliczeniu na jedną godzinę procesu [kWh],
U_{el3}	– zapotrzebowanie na energię w przeliczeniu na 1 kg cebuli oczyszczanej [Wh],
V_c	– objętość cebuli [mm ³],
X_0	– ilość odpadu suchej łuski [%],
ρ_c	– gęstość rzeczywista cebuli [kg/m ³].

1. WSTĘP

Przemysł rolno – spożywczy w Polsce jest jedną z kluczowych gałęzi gospodarki. Obejmuje szeroki zakres działań, od produkcji rolniczej, przez przetwórstwo żywności, aż po jej dystrybucję i sprzedaż. W ostatniej dekadzie coroczna wartość tempa wzrostu produkcji przekroczyła 5%. Według danych GUS [6] produkcja samej cebuli stanowi 12% uprawy warzyw w Polsce, którą szacuje się na około 643 tys. ton rocznie. W ostatnich latach zauważalny jest spadek eksportu świeżej cebuli, przy jednoczesnym wzroście udziału cebuli przetworzonej, tj. oczyszczonej z części suchej w całości lub w formie pokrojonej. Potencjalne kierunki rozwoju sektora przetwórczego obejmują zwiększenie innowacji technologicznych, wdrożenie bardziej efektywnych procesów produkcyjnych oraz rozwijanie strategii zrównoważonego rozwoju. Wprowadzenie nowoczesnych technologii, takich jak automatyzacja produkcji czy analiza danych, może przyczynić się do zwiększenia wydajności oraz konkurencyjności firm. Potencjał rozwoju sektora przetwórczego cebuli w Polsce jest ogromny, lecz ogranicza go niska efektywność w efekcie mała rentowność produkcji, co stanowi barierę dla ekspansji na rynki pozaeuropejskie. Pomimo wieloletniego postępu w rozwoju maszyn i urządzeń do mechanicznego przetwarzania cebuli, wciąż powszechnie stosowaną praktyką na polskim rynku jest jej ręczne oczyszczanie. Manualna praca, obarczona jest nie tylko nieprzyjemnym zapachem, ale także niską wydajnością, która prowadzi do ograniczonej opłacalności.

Dodatkowo, obniżenie stopy bezrobocia na rynku przyczynia się do trudności w pozyskaniu nowego oraz utrzymaniu obecnego personelu odpowiedzialnego za ręczne obieranie cebuli. Przetwórcy zazwyczaj sięgają po skup cebuli od lokalnych pośredników, którzy organizują obróbkę ręczną i dostarczają obraną cebulę do miejsca przeznaczenia. Brak kontroli warunków i higieny pracy w procesie obierania oraz przechowywania powoduje, że przedsiębiorcy coraz chętniej sięgają po nowoczesne rozwiązania techniczne. Zarówno w kraju, jak i na świecie, prowadzone są ciągłe prace mające na celu doskonalenie maszyn do oczyszczania cebuli, z naciskiem na zwiększenie ich wydajności, zmniejszenie ilości odpadów poprodukcyjnych oraz zmniejszenia zapotrzebowania na energię, co ma kluczowe znaczenie dla opłacalności procesu oczyszczania surowca. Dodatkowo, utylizacja łuski cebuli wymaga bardziej zrównoważonych praktyk. Obecnie stosowna jest jako nawóz naturalny, ale nadmierne jego stosowanie może prowadzić do chorób grzybowych gruntów rolnych. Ponadto nieprzyjemny zapach odpadu z cebuli utrudnia jej składowanie lub wykorzystanie jako paszy dla zwierząt [11]. Zgodnie z literaturą, w Unii Europejskiej powstaje corocznie około 500 tys. ton tych odpadów, głównie w Hiszpanii, Wielkiej Brytanii, Holandii oraz Polsce, z których sucha łuska stanowi przeważającą ilość. Rozpoczęto już testy nad możliwościami wykorzystania łuski cebuli, które pokazały, iż materiał ten, charakteryzuje się wysoką zawartością związków o charakterze antyoksydacyjnym, głównie flawonoidów (2-10 g/kg łupiny) [62], a także zawiera bogate

źródła witamin i minerałów, w tym wapnia, magnezu, żelaza, seleniu, potasu oraz chromu. Obecnie prowadzone są badania suchej łuski w kierunku wykorzystania jej na cele kompostowania (nawóz organiczny) [21], cele energetyczne [59] oraz jako substraty w żywności funkcjonalnej. Dla przedsiębiorców kluczowe jest uzyskanie wysokiego wskaźnika opłacalności produkcji, dlatego też istotne jest aby generowany odpad w postaci łuski został zagospodarowany.

Znane w przetwórstwie metody mechanicznego oczyszczania cebuli i przyjęte w nich rozwiązania konstrukcyjno – technologiczne nie zawsze spełniają oczekiwania producentów żywności. Poza większą ilością surowca odpadowego w porównaniu z obieraniem ręcznym, metody te charakteryzują się wysokim zapotrzebowaniem energetycznym oraz koniecznością segregacji cebuli na klasy pod względem jej wielkości. Najnowsze rozwiązania proponują nacinanie łuski cebuli oraz jej odmuch sprężonym powietrzem. Rozwiązanie takie charakteryzuje się brakiem uszkodzeń fizycznych i termicznych w odróżnieniu od metody ścierania łuski w bębnach obrotowych [35] oraz większą wydajnością oczyszczania. Ze względu na zauważalny brak prac naukowych dotyczących metod oczyszczania cebuli przy wykorzystaniu sprężonego powietrza, nie można jednoznacznie określić, które cechy i parametry konstrukcyjne oraz procesowe maszyny mają decydujący wpływ na efektywność oczyszczania. Stąd pojawia się konieczność poszukiwania nowych rozwiązań optymalizujących wydajność procesu i minimalizację produktów ubocznych poprzez skrócenie czasu operacyjnego, a tym samym zmniejszenie strat i nakładów energetycznych na realizację procesu.

Obecne na rynku światowym rozwiązania przetwarzania cebuli pozwalają na wprowadzanie podstawowych zmian konstrukcyjnych poprzez zmianę narzędzi głównie związanych obróbką korzenia i szczypioru. Brak wiedzy użytkowników maszyn na temat zależności nastaw parametrów sprężonego powietrza w procesie odmuchiwania suchej łuski od zmiennych cech morfologicznych cebuli determinuje konieczność wprowadzania uproszczeń w maszynach, co skutkuje generowaniem wysokich ilości odpadu, niskiej wydajności, a w dalszych krokach przyczynia się do zmniejszenia opłacalności mechanicznego oczyszczania cebuli na rzecz jej obróbki ręcznej.

W związku z powyższym problemem badawczym jest brak w literaturze przedmiotu określonych modeli obliczeniowych opisujących wpływ parametrów procesowych oraz parametrów fizycznych cebuli na parametry eksploatacyjne (ilość odpadu, efektywność oczyszczania i zapotrzebowanie na energię) mechanicznego procesu usuwania suchej łuski za pomocą dysz zasilanych sprężonym powietrzem.

Powyższe przesłanki potwierdzają konieczność opracowania nowatorskiego podejścia do optymalizacji parametrów procesowych maszyn do oczyszczania cebuli, zależnych od zmiennych jej właściwości, która zakłada, że opracowana technologia odmuchu cebuli uzależniona będzie od przetwarzanego surowca. Ponadto pozwoli to na poprawę jakości oczyszczania oraz wzrost jej efektywności, przy zmniejszeniu nakładów energetycznych

realizacji procesu. **Głównym celem pracy jest dobór parametrów oczyszczania cebuli wpływających korzystnie na zapotrzebowanie na energię, efektywność oraz jakości obieranego produktu.** Jego realizacja przyczyni się do wzrostu wskaźników opłacalności procesu oraz zwiększenia konkurencyjności polskich przedsiębiorstw zarówno na krajowym, jak i międzynarodowym rynku. Wdrożenie innowacyjnych rozwiązań w praktyce może zostać zastosowane zarówno w już istniejących maszynach, jak i tych, które zostaną dopiero opracowane.

2. ANALIZA STANU WIEDZY O OCZYSZCZANIU CEBULI

2.1. Znaczenie cebuli w żywieniu i jej charakterystyka

2.1.1. Przegląd uprawianych odmian, okresów wegetacji i sposobów przechowywania cebuli w Polsce

Cebula zwyczajna (łac. *Allium cepa* L.) jest jednym z najczęściej uprawianych warzyw na świecie, w Polsce od XIV wieku [18]. Pełni ona rolę rośliny odżywczej, leczniczej oraz przyprawowej, dzięki jej bogatym właściwościom. Stosowanie różnych metod uprawy oraz sposobów jej przechowywania, pozwala na dostępność cebuli na rynku przez cały rok. Choć jest rośliną dwuletnią, praktycznie uprawiana jest jako jednoroczna. Spożywana jest zarówno na surowo, jak i poddawana obróbce termicznej, w tym gotowaniu, smażeniu czy marynowaniu.

Powszechność uprawy cebuli oraz szeroki zakres jej zastosowań w racjonalnym żywieniu wynika z jej właściwości odżywczych, szczególnie zawartości witamin z grupy A, B1, B2 i C [18], będąc niezbędnym składnikiem żywności prozdrowotnej (tabela 2.1).

Tabela 2.1. Wykaz zawartości składników odżywczych w cebuli zwyczajnej [82]

Składniki odżywcze	100 g	1 duża cebula (ok.200 g)	Składniki odżywcze	100 g	1 duża cebula (ok.200 g)
Energia	39 kcal	78 kcal	Witamina B ₆	0,120 mg	0,240 mg
Białko	1,1 g	2,2 g	Kwas foliowy	19 µg	40 µg
Tłuszcz	0,1 g	0,2 g	Kwas pantotenowy	0,123 mg	0,246 mg
Węglowodany	9 g	18 g	Fitosterole	15 mg	30 mg
Cukry proste	4,2 g	8,4 g	Żelazo	0,21 mg	0,4 mg
Błonnik	1,7 g	3,4 g	Magnez	10 mg	20 mg
Sód	4 mg	8 mg	Fosfor	29 mg	60 mg
Witamina A	2 I.U.	4 I.U.	Potas	146 mg	290 mg
Witamina E	0,02 mg	0,04 mg	Selen	0,5 µg	1 µg
Witamina K	0,4 µg	0,8 µg	Cynk	0,17 mg	0,34 mg
Witamina C	7,4 mg	14,8 mg	Miedź	0,04 mg	0,08 mg
Witamina B ₁	0,046 mg	0,09 mg	Mangan	0,13 mg	0,26 mg
Witamina B ₂	0,027 mg	0,054 mg	Wapń	23 mg	46 mg
Witamina B ₃	0,116 mg	0,232 mg	Fluor	1,1 µg	2,2 µg

Cebula jest także bogatym źródłem wapnia i potasu, działających odkwaszająco oraz zawiera olejki eteryczne odpowiadające za korzystne właściwości zdrowotne. Zawarte fitoncydy, zwłaszcza allicyna i allina, wykazują działanie przeciwbakteryjne, nadając jednocześnie cebuli charakterystyczny ostry smak i łzawiący zapach. Dodatkowo, cebula zawiera kwercetynę, kemferol oraz selen, istotne dla diety człowieka, wykazując właściwości przeciwutleniające i przeciwnowotworowe [30]. Badania potwierdzają

skuteczność cebuli w zwalczaniu chorób pasożytniczych, takich jak leishmanioza oraz infekcji grzybiczych wywołanych przez dermatofity [17]. Jej działanie przeciwbakteryjne ogranicza infekcje *Helicobacter pylori* [72], co dodatkowo zmniejsza ryzyko wystąpienia wrzodów i raka żołądka. Prozdrowotne właściwości cebuli powodują wzrost popularności stosowania jej w racjonalnym żywieniu, co korzystnie wpływa na rozwój technologii jej uprawy i przetwarzania.

Ze względu na rosnący import surowej cebuli do Polski, warto zaznaczyć, że na świecie uprawia się kilkaset jej odmian, podzielonych według długości okresu wegetacyjnego, który zależy od szerokości geograficznej uprawy [37]. Wśród nich wyróżnia się odmiany wczesne (80–100 dni), średnio wczesne (100–120 dni), średnio późne oraz późne (powyżej 120 dni). W Polsce najczęściej uprawiane są odmiany średnio późne i późne, które przeznaczone są przede wszystkim do przechowywania. Charakteryzują się one różnym kształtem i wielkością cebuli, przyjmując postać od elipsoidy spłaszczonej do elipsoidy wydłużonej. Ponadto cebule charakteryzują się barwą białą, czerwoną, słomkową, słomkowożółtą, brązowożółtą lub żółtą. Ze względu na określoną strefę geograficzną [37] i zróżnicowane okresy dojrzewania cebuli wyróżnia się cztery podstawowe jej typy:

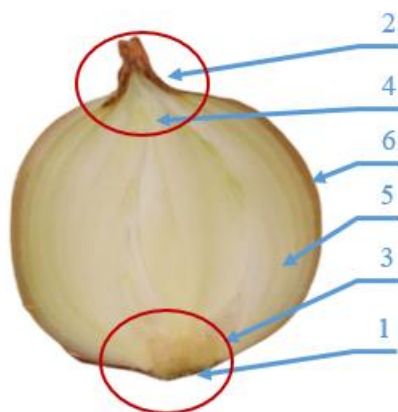
- a) typ hiszpański - to cebule od średniego do późnego okresu dojrzewania, charakteryzujące się dużą średnicą podziałową i wysokim potencjałem plonotwórczym (plon 100 t/ha i większy). Odmiany tego typu wyróżniają się silnym systemem korzeniowym, rozbudowaną częścią szczypiorową oraz cienką, woskową łuską. Są uprawiane głównie przez producentów, którzy dostarczają cebule przeznaczone do obierania i nadają się do długotrwałego przechowywania. Przykładowe odmiany to: Action, Armstrong, Banko, Frontino, Fundador, Meranto, Rhino, Spanish, Wolska, Valentino, Vicking, Yellow;
- b) typ amerykański – cebule wczesnej odmiany charakteryzują się silnym systemem korzeniowym, dobrze przylegającą łuską o jasnobrązowym kolorze oraz mocnym, silnie rozbudowanym szczypiorze. Odmiany tej grupy są odporne na niedobory wody i wysokie temperatury. Cebule są przeznaczone głównie na świeży rynek oraz na początek kampanii zbiorów przeznaczonych do obierania. Przykładowe odmiany to: Candy, Carlos, Golden Spike, Meranto, Prelesco, Venus,;
- c) typ japoński – cebule o silnym systemie korzeniowym, dużym plonie i wyrównanej średnicy podziałowej wynoszącej 60-90 mm oraz szybkim przyrostem masy po złamaniu szczypioru. Przykładowe odmiany to: Superon, Bonus, Medusa;
- d) typ rijnsburger – odmiany te są doskonale przystosowane do polskich warunków klimatycznych i charakteryzują się zdolnością do długotrwałego przechowywania. Cebule są bardzo twarde, posiadają mocną łuskę oraz cienką szyjkę. Przykładowe odmiany to: Centro, Firmo, Dormo, Retano, Lagergold, Baldito, Wellington.

Zbiór uprawianych na polach cebul odbywa się dwufazowo. W pierwszej fazie cebule są wykopane z ziemi i pozostawiane do podsuszenia, co trwa maksymalnie do 10 dni, zależnie od warunków atmosferycznych. Druga faza to właściwy zbiór cebul podsuszonych, które są pakowane do skrzyń i transportowane do przewiewnych przechowalni w celu dalszego dosuszania. Istnieje również możliwość zbioru jednofazowego, preferowanego przez przedsiębiorstwa z odpowiednio dostosowanymi przechowalniami, wyposażonymi w urządzenia wentylacyjne umożliwiające szybkie dosuszenie. Przy zbiorze jednofazowym wymaga się obcięcia szczypioru bezpośrednio po wykopaniu. W przechowalni tworzy się pryzmy o maksymalnej wysokości 4 m. Przechowywanie cebuli odbywa się w ściśle określonych warunkach, aby zachować jej świeżość. W pierwszych dniach utrzymuje się temperaturę podwyższoną do 27 °C, a następnie stopniowo obniża do 25 °C, przy względnej wilgotności powietrza na poziomie od 60 do 80%, celem zapobiegania spękaniu suchej łuski podczas wysuszania [7]. Wybierając cebule do przechowywania, zaleca się eliminację tych z widocznymi uszkodzeniami, objawami chorób, nietypowym kształcie oraz grubą szyjką szczypioru.

Optymalną temperaturą przechowywania jest 0°C, przy utrzymaniu wilgotności względnej na poziomie od 60 do 75%. Okres przechowywania zależy od odmiany i wynosi od 8 do 12 miesięcy, co umożliwia całoroczną dostępność cebuli [7]. W okresie jesienno – zimowym w Polsce do schładzania i utrzymywania parametrów przechowywania cebuli wykorzystuje się chłodne powietrze z zewnątrz. Zaleca się stopniowe schładzanie cebuli przez maksymalnie 6 tygodni, aby ograniczyć tempo zachodzących procesów życiowych, takich jak wyrastanie szczypioru i korzenia.

Dla zachowania dobrej jakości cebuli umożliwiającej długotrwałe przechowywanie coraz częściej stosuje się algorytmy utrzymania stałych warunków klimatycznych w przechowalni. System ten umożliwia kontrolę i automatyczne sterowanie parametrami przepływu powietrza, utrzymania zadanej temperatury oraz cyrkulacji powietrza, przy użyciu układów klimatyzacyjnych lub grawitacyjnie w chłodne dni.

W celu zrozumienia procesu oczyszczania oraz zidentyfikowania elementów koniecznych do usunięcia z cebuli, kluczowe jest poznanie jej budowy morfologicznej (rys. 2.1). Główka cebuli składa się ze skróconego w procesie obłuskiwania korzenia (1) i łodygi szczypioru (2), części wzrostu korzenia (3) i szczypioru (4) oraz poszczególnych warstw łuski mokrej (5) i suchej (6) [74].



Rys. 2.1. Budowa morfologiczna główki cebuli:

1) korzeń, 2) szczypior, 3) część wzrostu korzenia, 4) część wzrostu szczypioru, 5) warstwy łuski mokrej, 6) warstwy łuski suchej, (kolorem czerwonym oznaczono elementy do usunięcia z cebuli).

Procesowi oczyszczania cebuli „na biał” poddane są wszystkie jej elementy zawierające suche części, oznaczone kolorem czerwonym, obejmując korzeń i szczypior wraz z ich wzrostem (1-4) oraz wszystkie warstwy suchej łuski (4). W procesie obróbki kluczowe jest pozabawienie potencjalnych zanieczyszczeń z cebuli związanych z uprawą oraz warunkami przechowywania. W przypadku większych uszkodzeń cebuli, szczególnie w warstwach łuski mokrej i wystąpienia procesów gnicia, wskazane jest jej dodatkowe ręczne oczyszczenie celem usunięcia wszelkich zanieczyszczeń. Produktem finalnym jest obrana cebula, gotowa do dalszego przetwarzania.

2.1.2. Zapotrzebowanie rynku na cebulę

Produkcja cebuli w Polsce, według danych EUROSTAT [23], stanowi ponad 13,5% powierzchni uprawy tego warzywa w Unii Europejskiej, a udział ten przekłada się na około 8,3% zbiorów w UE. W 2023 roku cebulę uprawiano w Polsce na obszarze 21,4 tys. ha, a z tego obszaru, z uwagi na niekorzystne warunki pogodowe, uzyskano 643 tys. ton. Według szacunków GUS w roku 2024 powierzchnia uprawy znacząco wzrosła i wynosi ponad 25,3 tys. ha [6]. Względem 2023 roku powierzchnia wzrosła o 3,91 tys. ha, czyli o 18,2%. Wielu producentów wyraża zadowolenie z jakości oraz z powtarzalności wielkości cebuli. Polski eksport cebuli stanowi 2,5% światowego eksportu, co plasuje Polskę na dziewiątej pozycji na świecie.

W 2023 roku z Polski wyeksportowano 143,7 tys. ton cebuli o wartości 558,1 mln zł [6]. Najważniejszym rynkiem zbytu dla polskiej cebuli w 2023 roku była Holandia, co stanowi 24,7% udziału w eksporcie cebuli z Polski. Wielka Brytania zajmuje drugie miejsce, gdzie wyeksportowano 30,6 tys. ton cebuli. Ukraina zajmuje trzecie miejsce, 23,3 tys. ton. Ważnymi odbiorcami są również Niemcy i Francja, do których wyeksportowano odpowiednio 15,3 i 7,2 tys. ton cebuli. Łącznie do 5 największych odbiorców polskiej cebuli dostarczono 112 tys. ton, co stanowi 78% eksportu tego warzywa.

Perspektywy eksportu cebuli były kształtowane przez różnorodne czynniki, które wprowadziły nowe realia na rynku. Przede wszystkim zaobserwowano dynamiczny wzrost ożywienia rynków HoReCa (**H**otel, **R**estaurant, **C**atering). Zakończenie pandemii przyniosło stopniowe odradzanie się tego sektora, co istotnie wpłynęło na popyt na cebulę obraną, zwłaszcza w kontekście przygotowywania potraw w restauracjach, hotelach i kawiarniach. Pojawiły się również nowe trendy żywieniowe, zmieniające nawyki konsumenckie i oddziałujące na popyt na różne produkty spożywcze, w tym cebulę. Wzrastające zainteresowanie zdrową żywnością może dodatkowo zwiększyć konsumpcję tego warzywa.

Rosnące zainteresowanie ekologicznymi i zrównoważonymi produktami otwiera nowe perspektywy dla eksporterów cebuli. Klienci mogą być zmotywowani wspieraniem producentów, którzy stosują zrównoważone praktyki. Ostateczny wpływ na eksport cebuli zależeć będzie od wielu czynników, takich jak zmiany w preferencjach konsumentów, innowacje w sektorze oraz kształtowanie się warunków handlowych.

2.1.1. Wskaźniki oceny jakościowej oczyszczonej cebuli

W Polsce ocenę jakościową cebuli nieobranej określają przepisy wydane w rozporządzeniu Komisji (WE) NR 1508/2001 z dnia 24 lipca 2001 ustanawiające normę handlową dla cebuli [69]. W Dzienniku Ustaw (Dz.U. L 200 z 25.7.2001, str. 14) opisano trzy klasy jakościowe, dla których wyznaczono minimalne wymagania jakościowe oraz dopuszczalne tolerancje. Ogólne założenia normy określają wymagania dotyczące stanu morfologicznego, uszkodzeń spowodowanych warunkami uprawy lub przez szkodniki, długości ususzonego szczypioru, ilości łuski, gdyż te parametry mają bezpośredni wpływ na jakość i trwałość produktu przeznaczonego do długiego przechowywania. W obrocie handlowym cebuli, normy dotyczące jej jakości są skategoryzowane i wprowadzają one standardy, które zapewniają zgodność z oczekiwaniami konsumentów, ułatwiając handel tym warzywem i definiując jednolite kryteria dla wszystkich producentów.

Poprzez określone klasy jakościowe w normie handlowej, nabywcy mogą mieć pewność, że cebula spełnia określone standardy jakości, co wpływa korzystnie na zaufanie do produktu wprowadzonego na rynek [69]:

- a) klasa I – obejmuje cebulę dobrej jakości, charakteryzującą się zwartą strukturą, bez przerostów oraz oznak kiełkowania. Wymagania dopuszczają nieznaczne wady kształtu, zabarwień oraz pęknięcia powierzchniowe łuski suchej, pod warunkiem pełnego okrycia warstw mokrych cebuli;
- b) klasa II – zalicza cebule z drobnymi wadami kształtu, przebarwieniami, śladami otarć i pęknięć suchej łuski oraz jej brakami do 1/3 powierzchni cebuli. Ponadto dopuszcza się delikatne przerośnięcia części szczypioru, kępki korzeni oraz plamy na powierzchni zewnętrznej warstwy suchej łuski;

- c) klasa III – obejmuje cebule, które nie spełniają wymagań klas wyższych, lecz zaspokoją kryteria klasy II. Widoczne są niewielkie ślady ziemi, wczesne oznaki wyrośnięcia (maksymalnie 10%) oraz liczne obicia i pęknięcia, które przypuszczalnie nie wpłyną niekorzystnie na jej jakość.

Klasyfikacja cebuli przedstawiona powyżej umożliwia jednoznaczną ocenę jej jakości, co ma ogromne znaczenie zarówno dla producentów, jak i konsumentów. Opisane cechy jakościowe zawarte w normie odnoszą się przede wszystkim do cebuli przeznaczonej do składowania. Warto jednak zaznaczyć, że norma nie uwzględnia oceny jakościowej cebuli przeznaczonej do celów przetwórstwa przemysłowego, takich jak krojenie w kostkę czy plastry. W przypadku cebuli poddanej obróbce mechanicznego oczyszczania, konieczne jest określenie nowych cech jakościowych.

Niemniej jednak kluczowym zagadnieniem jest zdefiniowanie wad, które umożliwią ocenę dopuszczenia cebuli do procesu oczyszczania. Zgodnie z normą handlową [69], niedopuszczalne jest wprowadzenie cebul do obrotu, jeżeli posiadają następujące wady:

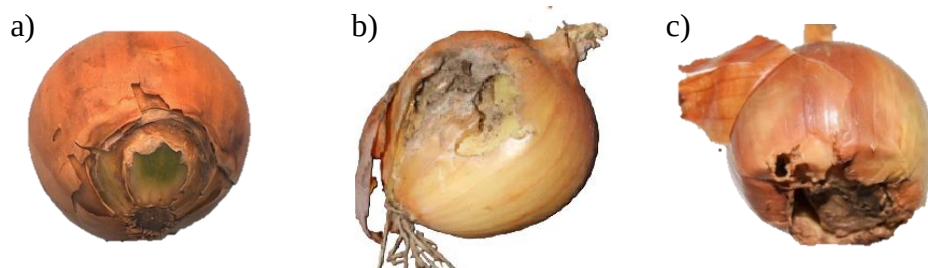
- a) objawy gnicia na zewnątrz oraz wewnątrz warstw mokrych o nieprzyjemnym zapachu, wynikające ze złych warunków przechowywania oraz pojawienia się chorób w trakcie uprawy, co przedstawiono na rys. 2.2;



Rys. 2.2. Zgnilizna główki cebuli [20,92]:

- a) poszczególnych warstw mokrych cebuli, b) wewnątrz cebuli, c) na zewnątrz cebuli

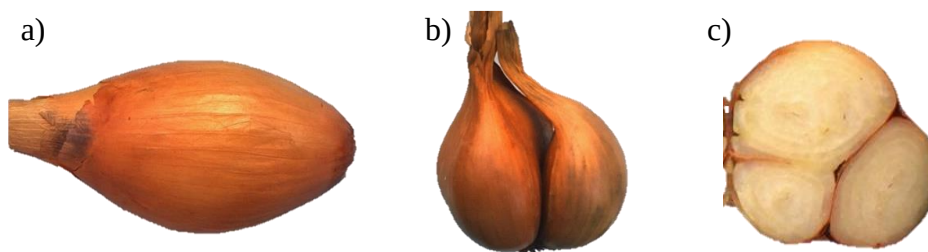
- b) uszkodzenia mechaniczne cebuli, które są kwestią szczególnie istotną, zwłaszcza ze względu na szereg procesów mechanicznych, podczas zbioru, sortowania czy oczyszczania cebuli. W przypadku obecności uszkodzeń mechanicznych, może dojść do pogorszenia jakości cebuli i znacznego zwiększenia ilości odpadu podczas procesów jej przetwarzania (rys. 2.3);



Rys. 2.3. Uszkodzenia mechaniczne cebuli [20,92]:

- a) uderzenie w okolicy korzenia, b) zniszczenie warstw cebuli, c) zniszczenie korzenia

- c) wady kształtu cebuli wynikające z deformacji części szczypiorowej oraz zrośnięcia więcej niż jednej główki cebuli wraz z warstwami suchej łuski wewnątrz cebuli, które przedstawiono na rys. 2.4. Przypadki, w których występują tego rodzaju deformacje, są uznawane za niezgodne z normą handlową i nie powinny być dopuszczone do obrotu;



Rys. 2.4. Wady kształtu główki cebuli [16]:

- a) zgrubiały szczypior, b) zrośnięta główka cebuli, c) łuska wewnątrz warstw mokrych cebuli

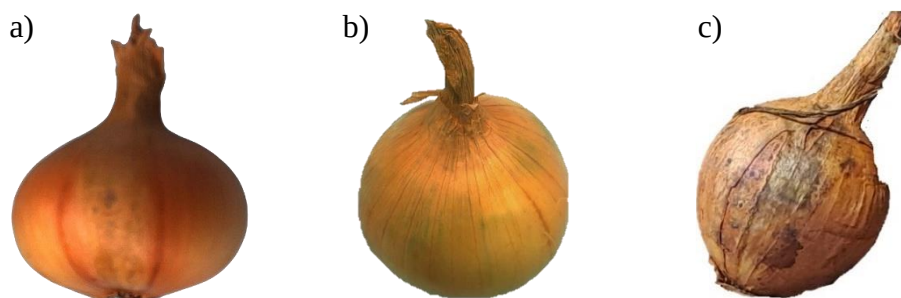
W przetwórstwie dopuszcza się minimalne tolerancje w ocenie wymagań jakościowych dla cebul oczyszczanych uznając za dopuszczalne wady dla cebul posiadających:

- a) minimalne wady kształtu obejmujące zniekształcenia główki cebuli w okolicy części szczypiorowej oraz korzeniowej, zrośnięte główki cebuli, lecz pokryte jedną zewnętrzną warstwą suchej łuski (rys. 2.5);



Rys. 2.5. Deformacja kształtu cebuli [16]:

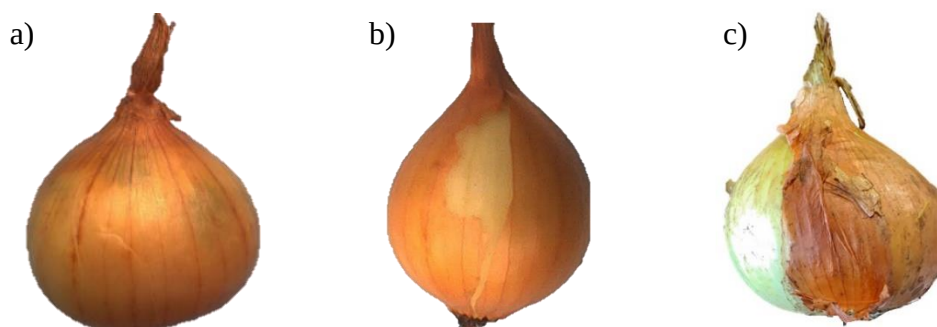
- a) zniekształcenia powierzchni cebuli, b) zrośnięte warstwy mokre cebuli, c) zniekształcenia łodygi
b) odbarwienia zewnętrznej warstwy suchej łuski, które przedstawione w postaci pojawiających się plam, zazielenienia, oraz odbarwienia do 15% zewnętrznej powierzchni główki (rys. 2.6);



Rys. 2.6. Odbarwienia łuski suchej cebuli [16]:

- a) plamy na suchej łusce, b) odbarwienia łuski, c) odbarwienia wewnętrznych warstw łuski

- c) uszkodzenia warstwy zewnętrznej cebuli, obejmujące jej pęknięcia suchej łuski, lub częściowy brak, dochodzący nawet do połowy powierzchni cebuli, co pokazano na rys. 2.7.



Rys. 2.7. Uszkodzenia łuski na powierzchni cebuli [16]:

a) pęknięcia łuski, b) braki części łuski c) brak łuski na połowie powierzchni cebuli

Nie wszystkie przedstawione na powyższych rysunkach wady deklasują cebule do dalszych etapów mechanicznego przetwarzania. W przypadku cebul, w których występują objawy gnicia utylizacja ich jest konieczna ze względu na możliwy rozwój bakterii. Natomiast cebule, których warstwy uległy lekkim uszkodzeniom mogą być wykorzystane do dalszej obróbki.

Wobec powyższych zasad możliwe jest wyznaczanie nowych cech dla cebuli obranej korzystając z norm branżowych, takich jak BN-87 8165-31 dotyczących cebuli krojonej oraz zamrożonej [58]. Norma przedstawia wytyczne jakości cebuli, które należy uwzględnić w jej ocenie po procesie oczyszczania mechanicznego. Ponadto określa konieczność zachowania wysokich wymagań w przypadku gdy cebula przeznaczona jest to dalszego przetwórstwa. Kluczowe wskaźniki określone w normie, na podstawie których prowadzono ocenę jakościową:

- wygląd – obejmuje zwartą, całościową strukturę cebuli, pozbawioną rozwarstwień i przełamań wynikających z cech morfologicznych okresu wegetacyjnego oraz uszkodzeń mechanicznych;
- barwa – wymaga jednolitego koloru naturalnego warstw mokrych cebuli, z przewagą białokremowego, bez żółtej części suchej łuski;
- powierzchnia zewnętrzna – dotyczy jakości powierzchni wycięcia części szczypiorowej, korzeniowej i zewnętrznej warstwy mokrej. Minimalne wymagania określają tolerancje spękań powierzchni części wycinanych, wynikających z procesu przetwórczego;
- zdrowotność – określa stan uszkodzenia warstw mokrych cebuli, wynikające z procesu mechanicznego przetwarzania oraz z uprawy, w której po oczyszczeniu zaobserwować można wewnętrzne warstwy cebuli niespełniające wymagań;

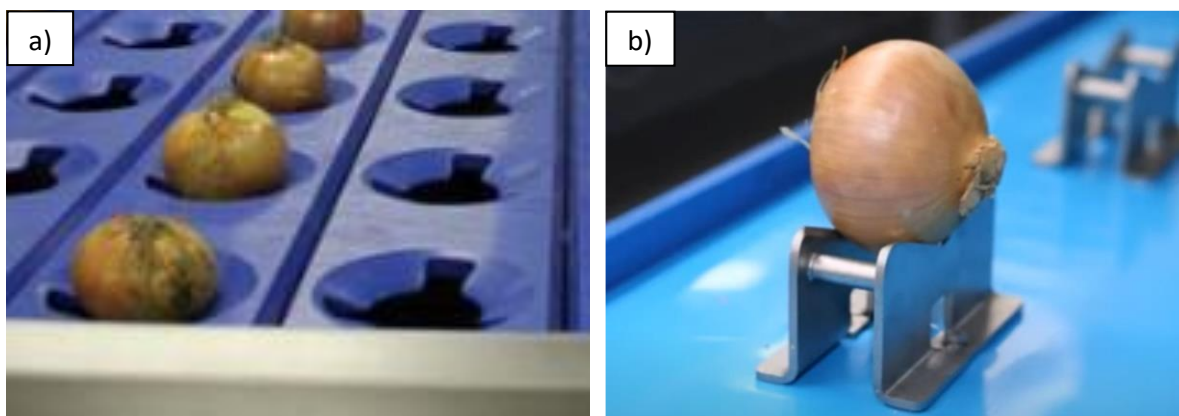
- e) zanieczyszczenia – w postaci pozostałych na główce cebuli części suchych oraz innych pozostałości, takich jak części korzeniowej, szczypiorowej, wynikające z niedokładnego oczyszczenia.

Powyższe wskaźniki umożliwiają ocenę produktu finalnego która jest podstawą do zakwalifikowania cebuli do dalszego przetwórstwa bez konieczności ponownej obróbki lub ręcznego doczyszczania. W przemyśle etap oceny jakościowej oczyszczanej w procesie obróbki cebuli przed jej przetwarzaniem odbywa się przede wszystkim na liniach sortowniczych, a po oczyszczeniu ocena jakościowa prowadzona jest na ostatnim etapie jej obróbki, tj. na rolkowym lub taśmowym stole inspekcyjnym.

2.2. Przegląd sposobów obróbki cebuli w przemyśle

2.2.1. Zabiegi technologiczne oczyszczania cebuli

Powszechnie stosowane technologie oczyszczania cebuli skupiają się głównie na procesie usuwania z główki cebuli części korzeniowej i szczypiorowej oraz suchej łuski. Zarówno duże przedsiębiorstwa przetwórcze, jak i mniejsze firmy zajmujące się obieraniem, realizują proces przetwarzania surowca korzystając z dostępnych na rynku rozwiązań. Na podstawie przeglądu powszechnie stosowanych maszyn na rynku, można wyróżnić dwie główne technologie jej oczyszczania (rys. 2.8): obróbkę pionową oraz pionową. Ułożenie cebuli w gniazdach względem osi pionowej określa, która technologia jest zastosowana w maszynie.



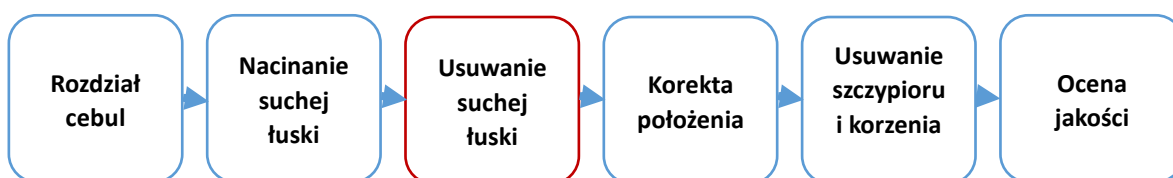
Rys. 2.8. Technologie obróbki cebuli:
a) obróbka pionowa [78], b) obróbka pozioma [79]:

Obie technologie mają zbliżony przebieg procesu usuwania części szczypiorowej oraz korzeniowej, a także suchej łuski cebuli. Różnorodność właściwości cebuli, zależna od odmiany i warunków uprawy, wpływa na wielkość, kształt oraz twardość cebuli, co powoduje trudności mechanicznego jej oczyszczania. W maszynach przemysłowych sucha łuska oczyszczana jest przy użyciu sprężonego powietrza. W tym procesie kluczowe jest aby łuska cebuli była nacinana przed odmuchem powietrzem co ułatwi jej usunięcie

[85]. Istotna jest również możliwość zmiany parametrów procesu w zależności od obieranej cebuli, która jest materiałem morfologicznie zmiennym.

Przed procesem mechanicznego oczyszczenia, z cebuli przywiezionej z pola usuwa się resztki gleby oraz skraca zeschnięty szczypior i korzeń za pomocą obcinarek śmigłowych. W wyspecjalizowanych zakładach przetwórczych cebula przechodzi weryfikację pod kątem spełnienia kluczowych parametrów jakościowych. Parametry takie jak odmiana, twardość czy wielkość cebuli są dokładnie sprawdzane, przy czym cebule o średnicy poniżej 40 mm, nie są oczyszczane mechanicznie i często stanowią odpad poprodukcyjny, zawyżając jednocześnie jego ilość do wartości od 40 do 50%.

Wśród istniejących rozwiązań na rynku wyróżnić można dwa główne trendy technologiczne, różniące się w naprzemiennym stosowaniu poszczególnych etapów obróbki cebuli (rys. 2.9). Niezależnie od orientacji ułożenia cebuli w gniazdach obróbczych w części maszyn przed procesem usuwania korzenia i szczypioru odbywa się usuwanie suchej łuski.



Rys. 2.9. Usuwanie suchej łuski z cebuli zawierającej szczypior i korzeń

Natomiast w innych rozwiązaniach maszyn przetwórczych zaobserwowano, iż proces odcinania korzenia i szczypioru następuje przed usunięciem suchej łuski (rys. 2.10). W tych maszynach w pierwszej kolejności następuje rozdział cebul z kosza zasypowego, które umieszczono w gniazdach. Po przeprowadzaniu korekty położenia i uzupełnieniu pustych gniazd dodatkowymi cebulami następuje proces nacinania suchej łuski oraz odcinania korzenia i szczypioru. Zaobserwowano również, iż powyższe dwa etapy są stosowane zamiennie. Następnie odbywa się proces usunięcia suchej łuski i następuje ocena wizualna jakości obróbki cebuli wraz z wymagającym doczyszczaniem ręcznym.

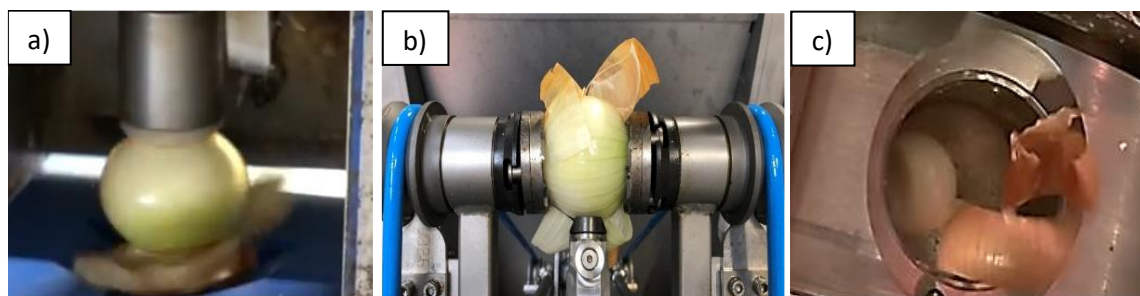


Rys. 2.10. Usuwanie suchej łuski z cebuli pozbawionej korzenia i szczypioru

W istniejących maszynach przygotowywana cebula do procesu oczyszczania z suchej łuski za pomocą dysz zasilanych sprężonym powietrzem może przyjmować dwie formy jako surowiec gotowy do badań, zawierający lub pozbawiony części korzeniowej i szczypiorowej. Konieczna jest zatem analiza wpływu udziału korzenia i szczypioru na stopień oczyszczenia cebuli oraz ilość powstającego odpadu w procesie usuwania suchej łuski.

2.2.2. Metody usuwania suchej łuski z cebuli

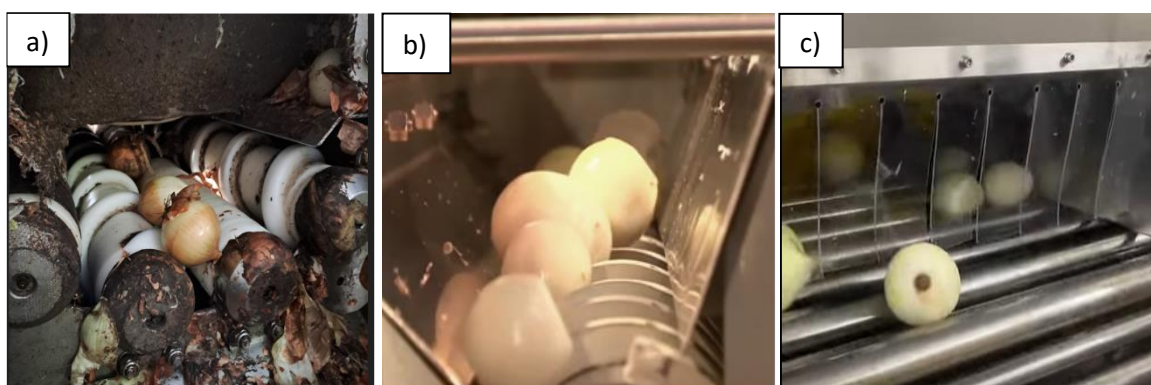
Na podstawie przeglądu literaturowego, patentowego oraz istniejących rozwiązań, stwierdzono, że wysokowydajną metodą oczyszczania cebuli z suchej łuski jest usuwanie jej za pomocą strumienia sprężonego powietrza, kierowanego na obracającą się główkę cebuli z dysz zasilanych sprężonym powietrzem. Ze względu na wymagane wysokie natężenie przepływu sprężonego powietrza, we wszystkich rozwiązaniach powszechnie stosuje się sprężarki tłokowe o mocy od 10 do 50 kW przy ciśnieniu zasilania w zakresie od 4 do 13 bar. Konieczne jest zatem poszukiwanie skutecznych i oszczędnych rozwiązań redukujących zużycie powietrza. Ponadto w istniejących maszynach stosuje się różnorodne metody obrotu cebuli umożliwiającej jej odmuch, których rozwiązania uzależnione są od wydajności przetwarzania, a czas oczyszczania jest ograniczony przez inne etapy obróbki (rys. 2.11).



Rys. 2.11. Metody obrotu cebuli w ciągu technologicznym linii:

a) na taśmie [78], b) rewolwerowy [66], c) bębnowy [13]

Wśród urządzeń obróbczych różnice w rozwiązaniach dotyczą głównie transportu i obrotu cebul odmuchiwanym (rys. 2.12). Charakteryzują się głównie niezależną pracą od pozostałych głównych etapów obróbki i są to przeważnie odrębne urządzenia wchodzące w skład linii obróbczej.



Rys. 2.12. Metody obrotu cebuli w postaci odrębnych urządzeń linii:

a) wieloślimakowy [77], b) ślimakowy [13], c) rolkowy [67]

Cechą wspólną przedstawionych rozwiązań układu oczyszczania cebuli z suchej łuski jest metoda odmuchu za pomocą dysz zasilanych sprężonym powietrzem. W zależności

od wydajności urządzeń stosuje się odpowiednią liczbę dysz, które pozwalają przy odpowiedniej wartości ciśnienia zachować wymagany przepływ powietrza. W tym celu przedsiębiorcy stosują dysze jednootworowe o zmiennej średnicy wylotowej lub dysze wielootworowe.

Rodzaje dysz pneumatycznych

Trudności w pozyskaniu informacji o parametrach dysz od producentów, przetwórców oraz brak wiedzy i doświadczenia w ich doborze stanowi istotny problem w określeniu wpływu podstawowych parametrów na efektywność obróbki. Wśród różnych dostępnych rozwiązań na rynku dysz sprężonego powietrza, zaobserwowano różnice w ich kształcie, średnicy oraz ilość otworów wylotowych, a także w sposobie przepływu powietrza.

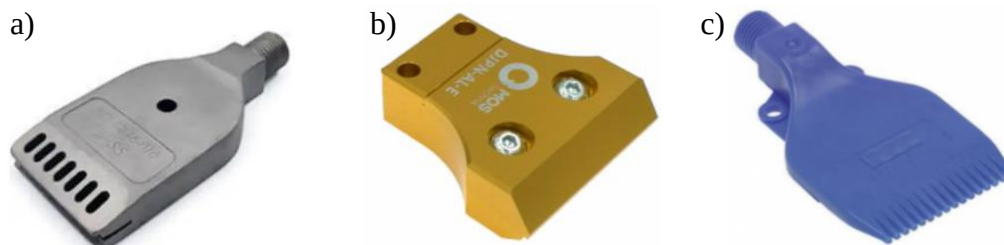
Popularność w maszynach obróbczych zyskały jednak dysze punktowe, które są używane w pistoletach pneumatycznych i charakteryzują się dużą siłą odmuchu, niskim zużyciem powietrza oraz małym stożkiem strugi powietrza. Wśród nich wyróżnić można dysze z jednym otworem, jak i wielootworowe, a średnice otworów wylotowych mieszczą się w zakresie od 1 do 5 mm, (rys. 2.13).



Rys. 2.13. Dysze punktowe:

a) CCP 1.5A (Ikeuchi), b) SD-BLP (Landefeld), c) MSA 1 (Euspray), d) LPZ-SD (Festo)

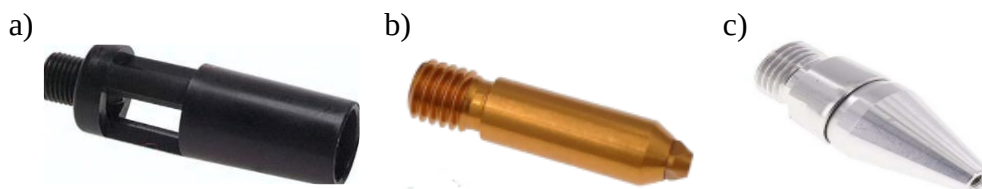
Wśród dysz pneumatycznych, w liniach urządzeń i maszyn rolno-spożywczych do oczyszczania przedmiotów oraz ich osuszania i odpylania powszechnie stosuje się dysze płaskie, stanowiące kurtyny powietrzne, które charakteryzują się niskim zużyciem oraz płaskim, szerokim strumieniem wydmuchu. Ich kształt wylotu przyjmuje formę płaskiej, grzebieniowej, a także wielootworowej szczeliny o szerokości od 0,2 do 2 mm



Rys. 2.14. Dysze płaskostrumieniowe:

a) PVT-14-SS (Pneumat), b) Seri DJPS (MOS Pneumatics), c) C0301-001-0047 (Ebmia)

Kolejnym przykładem są dysze redukujące zużycie powietrza, takie jak dysze Venturiego, Laval'a oraz Coanda. Rozwiązania (rys. 2.15) cechują się nowym sposobem tworzenia strumienia powietrza poprzez zasysanie dodatkowego powietrza z otworów bocznych (w przypadku dyszy Venturiego) oraz przylegania strugi ściśle do powierzchni odwzorowując jej kształt (w przypadku dysz Laval'a i Coanda).



Rys. 2.15. Dysze specjalne:

a) dysza Venturiego D-BLP (firma Air-Com), b) dysza Laval'a (firma MOS Technics), c) dysza Coanda (firma MOS Technics)

Ostatnim przykładem są dysze rotacyjne i uderzeniowe (rys. 2.16), w których podczas przepływu sprężonego powietrza przez dyszę dochodzi do rotacji rurki z miękkiego poliuretanu razem z wewnętrzną tubką rotacyjną. Sprężone powietrze wychodzi z wirującej rurki, tworząc falę uderzeniową.



Rys. 2.16. Dysze rotacyjne uderzeniowe:

a) PetraGUN firma (Mos pneumatics), b) RT-18-A (Mos technics)

2.3. Określenie parametrów eksploatacyjnych procesu oczyszczania

2.3.1. Zapotrzebowanie na energię procesu odmuchu suchej łuski z cebuli

W ramach podjętych działań w celu oceny nakładów energetycznych w procesie przetwarzania zastosowano metodykę określania wskaźników zapotrzebowania na energię elektryczną mierzoną względem czasu, liczby cebul oraz masy oczyszczanej cebuli. Z uwagi na wysokie zapotrzebowanie na sprężone powietrze w układzie odmuchowym, konieczne jest wyznaczenie zapotrzebowania na energię procesu oczyszczania cebuli.

W pracy dokonano analizy nakładów energetycznych procesu na podstawie poniższych wskaźników:

- a) *zapotrzebowanie na energię w przeliczeniu na jedną sztukę oczyszczanej cebuli (U_{el1})* opisane jako jednostkowy wskaźnik pomiaru energii elektrycznej w stosunku do liczby oczyszczanych surowców [84]. Wskaźnik ten jest wyrażony w jednostkach [Wh/szt.], a jego wzór można przedstawić następująco:

$$U_{el1} = \frac{E_e}{n_o} \quad [\text{Wh/szt.}] \quad (2.3.1)$$

gdzie: E_e – zapotrzebowanie na energię elektryczną [Wh], n_o – ilość cebul oczyszczanych [szt.].

- b) *zapotrzebowanie na energię w przeliczeniu na godzinę trwania procesu (U_{el2})* obejmuje pomiar energii wymaganej do przygotowania sprężonego powietrza zasilania układu odmuchowego. Wskaźnik ten jest wyrażony w jednostce [Wh] i opisany w postaci wzoru [70]:

$$U_{el2} = \frac{E_e(t-t_{pp})}{t_h} \quad [\text{Wh}] \quad (2.3.2)$$

gdzie: t – czas odmuchu [s], t_{pp} – czas przerwy odmuchu (transport cebuli w module) [s], t_h – czas trwania procesu [s].

- c) *zapotrzebowanie na energię w przeliczeniu na kilogram oczyszczanej cebuli (U_{el3})* obejmuje pomiar energii w stosunku do masy obranego surowca, wyrażona w jednostce [Wh/kg].

$$U_{el3} = \frac{E_e}{m_p} \quad [\text{Wh/kg}] \quad (2.3.3)$$

gdzie: m_p – masa oczyszczanej cebuli [kg].

2.3.2. Ocena efektywności procesu oczyszczania

Efektywność procesu oczyszczania cebuli jest wyznaczana na podstawie analizy jakościowej stopnia jej oczyszczania. Dodatkowo, miarą efektywności jest określony cel zorientowany na ilość poprawnie oczyszczonych cebul w danej partii, co stanowi jej cechę binarną (zerojedynekową).

W przedsiębiorstwach jakościowe miary efektywności procesu określa się na podstawie trzech głównych wskaźników [93], które nie tylko przedstawiają, jaką efektywność osiągają procesy, ale także dostarczają obraz jakości, w postaci stopnia jej oczyszczenia. Ocena jakości może być wyrażana w postaci wskaźników *FTY* (*First Time Yield*), *FPY* (*First Pass Yield*) i *RTY* (*Rolled Through Yield*). Każdy z nich różni się metodą obliczeń w kontekście oceny niezgodności, uwzględniającą liczbę cebul oczyszczonych poprawnie oraz liczbę cebul wymagających ponownego doczyszczania. Wskaźnik *FTY* natomiast opiera się na analizie liczby cebul, które przechodzą przez proces produkcyjny na poszczególnych etapach. Następnie od liczby elementów przetworzonych w danym procesie odejmowana jest liczba cebul, które zostały uznane za wadliwe i nienadające się do ręcznego doczyszczania oraz definiowane jako odpad.

$$FTY = \frac{n_p - n_s}{n_p} * 100 \quad [\%] \quad (2.3.4)$$

gdzie: n_p – liczba cebul oczyszczonych poprawnie za pierwszym razem [szt.], n_s – liczba cebul uszkodzonych [szt.].

Wskaźnik *FTY* przyjmuje wartości mierzone procentowo, gdzie wartość maksymalna oznacza pełną skuteczność, czyli brak niezgodnych cebul na wyjściu przeznaczonych do usunięcia. Stanowi on ocenę spełniania lub niespełniania wymagań. Z kolei wskaźnik *FPY* uwzględnia nie tylko sztuki usunięte n_s , ale także bierze pod uwagę cebule wymagające doczyszczania n_r . Analiza obejmuje elementy, które są ponownie przetwarzane lub naprawiane w innym etapie przetwórczym. Wskaźnik *FPY*, podobnie jak *FTY*, wyrażony jest w postaci procentowej za pomocą odpowiedniego równania.

$$FPY = \frac{n_p - (n_s + n_r)}{n_p} * 100 \quad [\%] \quad (2.3.5)$$

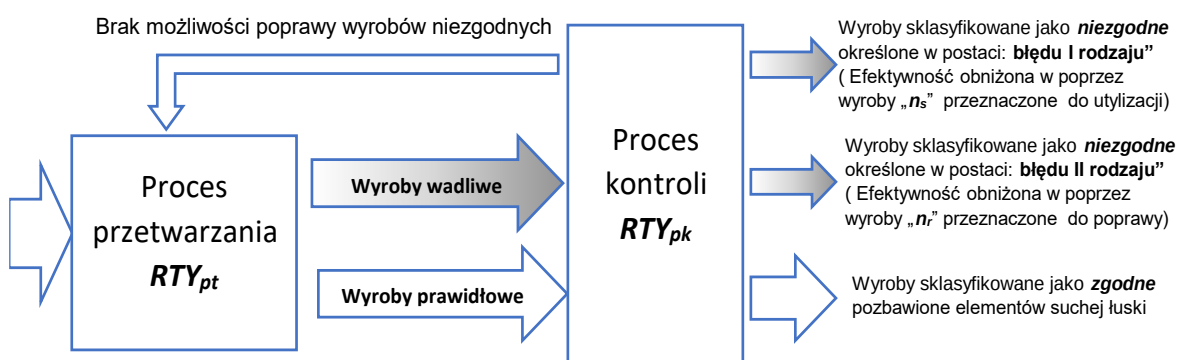
gdzie: n_r – liczba cebul doczyszczanych [szt.].

W odniesieniu do *FTY*, wskaźnik *FPY* bierze pod uwagę cebule doczyszczane ręcznie jako zgodne [40]. Ostatnią miarą skuteczności parametrycznej jest wskaźnik *RTY*, który analogicznie do poprzednich wskaźników, uwzględnia sumę wad obliczoną dla cebul

niezgodnych, tj. odpadu oraz doczyszczonych ręcznie. Wskaźnik ten jest wyrażony w następującej formule [71].

$$RTY = \frac{n_p - \sum_{i=1}^n n_r}{n_p} * 100 \text{ [%]} \quad (2.3.6)$$

W ocenie efektywności procesu przetwarzania cebuli na stanowisku badawczym, obejmującym mechaniczne usuwanie łuski z cebuli, najbardziej rzeczywisty obraz odzwierciedla wskaźnik *RTY*, ze względu na umniejszenie wartości wskaźnika liczbą cebul wymagających doczyszczczenia (rys. 2.17).



Rys. 2.17. Metodyka działania procesu kontroli oceny jakościowej przetwarzanej cebuli

Podjęte działania w ramach badań eksperymentalnych nie obejmują całego procesu przetwórczego cebuli w przedsiębiorstwie, gdzie finalnie cebule są ręcznie doczyszczane (poprawiane) na stole inspekcyjnym i uznawane za zgodne. Ograniczają się one jedynie do procesu odmuchu, który definiuje powyższe cebule jako niezgodne.

2.3.3. Ocena ilości odpadu suchej łuski cebuli

Ilość odpadu w procesie odmuchiwania suchej łuski określono w postaci stosunku masy odpadu do masy cebuli przygotowanej do badań. Każdorazowo na potrzeby badań wstępnych oraz zasadniczych prowadzono pomiary pojedynczych cebul. Wartość ilości odpadu wyrażono jako procentowy ubytek części cebuli w procesie obróbki i wyrażono za pomocą następującego równania:

$$X_0 = \frac{m_o}{m_c} * 100 \text{ [%]} \quad (2.3.7)$$

$$m_0 = m_c - m_p \text{ [g]} \quad (2.3.8)$$

gdzie: X_0 – ilość odpadu suchej łuski [%], m_o – masa odpadu [g], m_c – masa cebuli przygotowanej do badań [g], m_p – masa cebuli przetworzonej [g].

W przypadku badań eksploatacyjnych, z uwagi na wysoką wydajność obróbki ilość odpadu wyznacza się poprzez sumaryczny pomiar masy cebul przygotowanych do badań oraz masy cebul przetworzonych, które mierzone były w skrzyniopaletach.

2.4. Podsumowanie stanu wiedzy

Przeprowadzenie analizy stanu wiedzy na temat metod procesu usuwania suchej łuski z główki cebuli, pozwoliło zaobserwować trendy rozwoju istniejących rozwiązań jej oczyszczania. Badania literaturowe umożliwiły wyznaczenie parametrów eksploatacyjnych obróbki surowca, obejmujące efektywność oczyszczania, ilość odpadu oraz zapotrzebowania na energię procesu. W literaturze przedmiotu brakuje informacji dotyczących zależności i wpływu parametrów procesowych, (w tym. ciśnienia zasilania, przepływu powietrza oraz parametrów użytkowych dysz) na efekty pracy urządzeń obróbczych. Ponadto w maszynach brakuje uwzględnienia różnych właściwości cebuli. co więcej, brakuje również systemów oraz oprogramowania zewnętrznego do analiz efektywności oczyszczania oraz prognozowania ilości odpadu na podstawie stosowanych nastaw parametrów procesowych oraz właściwości cebuli. W urządzeniach obróbczych zaobserwowano jedynie dostępne w rozwiązaniach metody wykorzystania kształtu cebuli w procesie usuwania korzenia i szczypioru, lecz nie przekłada się to na minimalizację powstającego odpadu. Podstawowe parametry układu odmuchowego zazwyczaj zależą od charakteru pracy układów sprzęgniętych w ciąg technologiczny i nie są warunkowane właściwościami obrabianego produktu.

Zarówno w technologii obróbki pionowej, jak i poziomej parametry ciśnienia, natężenia przepływu oraz czasu odmuchu są ustalane przez producenta, bez możliwości ich dostosowania do oczyszczanych cebul. Co więcej, zmiana tych parametrów może prowadzić do nieprawidłowości w pracy całej maszyny, obniżając efektywność oczyszczania i grożąc jej uszkodzeniem. Ze względu na dużą różnorodność surowca producenci maszyn celowo wprowadzają ograniczenia w nastawach powyższych parametrów, ze względu na zaburzenia pracy ciągu linii przetwórczej. Producenci maszyn skupiają się na niezawodności urządzeń, kosztem utrzymania wysokich wymagań procesowych.

Niniejsza praca miała na celu wypełnienie luki badawczej w zakresie poszukiwanych nieznanych zależności umożliwiających wyznaczanie parametrów eksploatacyjnych (efektywności, zapotrzebowania na energię i ilości odpadu) na podstawie zmiennych parametrów fizycznych cebul oraz nastaw procesowych. W tym celu w pracy podjęto działania w kierunku opracowania modeli obliczeniowych, które posłużą do modelowego wyznaczania powyższych parametrów użytkowych procesu. Obszar badań obejmuje opracowanie prototypowego modułu odmuchu suchej łuski, umożliwiającego wykonanie badań wstępnych i zasadniczych. Finalnym efektem prac będzie aplikacja programu obliczeniowego wykorzystywana do generowania parametrów eksploatacyjnych.

Ponadto, przeprowadzono analizę porównawczą dysz odmuchowych, która pozwoliła na wytypowanie ich reprezentantów do dalszych badań procesu obróbki surowca. Z uwagi na wymagane w procesie odmuchu cebuli duże zapotrzebowanie sprężonego powietrza, zasadna jest analiza jego zapotrzebowania na energię. Proces odmuchu suchej łuski stanowi od 80 do 90% nakładów energii w odniesieniu do pozostałych procesów w maszynach do oczyszczania cebuli.

3. CEL I HIPOTEZY PRACY

Głównym celem rozprawy doktorskiej jest dobór parametrów oczyszczania cebuli wpływających korzystnie na zapotrzebowanie na energię, efektywność oraz jakości obieranego produktu.

Praktycznym celem pracy jest opracowanie aplikacji do generowania parametrów eksploatacyjnych procesu oczyszczania cebuli, zależnych od jej rodzaju oraz czasu przechowywania. Aplikacja ma wpływać na wzrost wskaźników opłacalności procesu, poprzez dostosowywanie parametrów procesowych do właściwości cebuli uwzględniając jej warunki przechowywania.

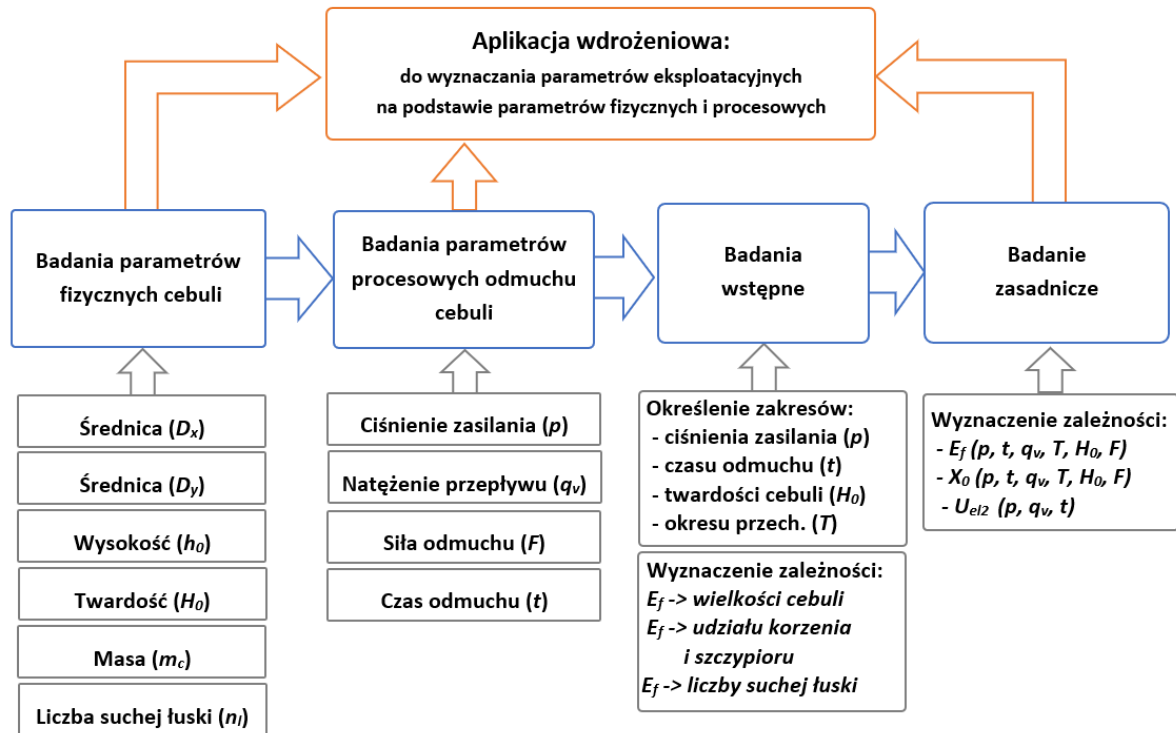
W rozprawie doktorskiej przyjęto **dwie hipotezy**:

- 1. Właściwości cebuli mają wpływ na parametry eksploatacyjne mechanicznego jej oczyszczania.**
- 2. Parametry procesu oczyszczania cebuli mają wpływ na efektywność, zapotrzebowanie na energię oraz jakość obieranego produktu.**

W ramach pracy przyjęto metodykę badań, która obejmuje szeroko zakrojone analizy, skupiające się na badaniach parametrów fizycznych cebuli oraz parametrów dysz oddechowych, aby dokonać oceny ich wpływu na efektywność. W tym celu, konieczne jest wyznaczenie parametrów cebuli, takich jak średnica, wysokość, ilość i masa łuski, a także twardość, uwzględniając przy tym czas przechowywania cebuli. Wyniki tych badań posłużą jako wytyczne parametry do opracowania stanowiska badawczego oddechu łuski cebuli za pomocą dyszy zasilanej sprężonym powietrzem.

Dla wybranej dyszy o określonej średnicy wylotowej, konieczne będzie wyznaczenie jej parametrów użytkowych, tj. natężenia przepływu oraz zużycia powietrza w zależności od ciśnienia i czasu oddechu. Otrzymane parametry posłużą do określenia zakresu badań eksperymentalnych, podczas których przeprowadzone zostaną testy oddechu w celu określenia efektywności oraz pomiaru energii procesu, a także ilości generowanego odpadu w postaci suchej łuski. Istotne jest także dokładne określenie oceny jakościowej finalnego produktu, co będzie decydujące dla efektywności oczyszczania, charakteryzując jej stopień oczyszczenia.

Na podstawie wyników badań wstępnych określone zostaną istotne parametry fizyczne cebuli oraz parametry procesowe względem parametrów eksploatacyjnych. Umożliwią one prognozowanie oczekiwanej efektywności oczyszczenia, zapotrzebowania na energię w procesie oraz ilości generowanego odpadu w ramach badań zasadniczych. Metoda obliczeniowa zostanie zaimplementowana w programie aplikacyjnym, co ułatwi ich obsługę przedsiębiorcom zajmującym się oczyszczaniem cebul. Podsumowując etapy postępowania prac badawczych zestawiono na poniższym schemacie (rys. 3.1)



Rys. 3.1. Etapy postępowania prac badawczych

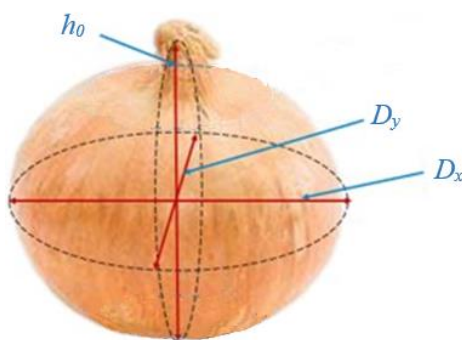
Prowadzenie badań wstępnych jest niezbędne do określenia zakresów parametrów procesowych. Cebule zostaną poddane oczyszczeniu przy zmiennym ciśnieniu i czasie odmuchu. Na stanowisku zostanie zaimplementowany innowacyjny układ lokalnego sprężania powietrza w celu zwiększenia ciśnienia w układzie zasilania ponad normatywną wartość 10 bar, występującą w wyspecjalizowanych zakładach przetwórczych. Zastosowanie tego układu umożliwi poszerzenie zakresu badań wpływu ciśnienia na efektywność oczyszczania i czas odmuchu. Jednocześnie przeprowadzony zostanie pomiar energii procesu odmuchu w celu określenia jego zapotrzebowania energetycznego. Analiza wyników danych pomiarowych wraz z oceną jakościową produktu finalnego pozwoli na wyznaczenie zależności parametrów procesowych od parametrów fizycznych obrabianych cebul. Umożliwi to na prognozowanie efektywności i zapotrzebowania na energię procesu oczyszczania cebuli oraz pozwoli na określenie ilości odpadu w postaci suchej łuski.

Utylitarność przyjętej metodyki obliczeniowej w pracy pozwoli na wszechstronne jej wykorzystanie we wszystkich układach odmuchowych, bez ograniczeń dla stosowanej metody obrotu i transportu cebuli. Warto zauważyć, że wartość ciśnienia odmuchu nie jest uzależniona od sterowania urządzeniem, lecz od źródła przygotowania sprężonego powietrza, czyli warunków ustalonych w zakładzie. Ponadto, zastosowano innowacyjny układ wzmocnienia ciśnienia odmuchu, który nie wymaga dodatkowego sterowania i umożliwia montaż w każdym układzie odmuchowym zasilanym sprężonym powietrzem, lecz z ograniczeniem dla pracy periodycznej (interwałowej).

4. BADANIA PARAMETRÓW FIZYCZNYCH CEBULI ORAZ PARAMETRÓW PROCESOWYCH MAJĄCYCH WPŁYW NA JEJ OCZYSZCZENIE

4.1. Określenie parametrów fizycznych cebuli

Badania parametrów fizycznych zostały przeprowadzone dla wybranych odmian cebuli, które są przeznaczone do jej mechanicznego oczyszczania. Analiza oczyszczania cebuli wybranych odmian ma na celu zweryfikowanie, czy występują istotne różnice pomiędzy ich parametrami fizycznymi oraz jak te różnice wpływają na efektywność oczyszczania i ilość odpadu w postaci suchej łuski. Kluczowe było przeprowadzanie pomiarów parametrów fizycznych główki cebuli, uwzględniając jej odmianę oraz okres przechowywania [42,22]. Zebrane dane umożliwiły określenie cech cebuli za pomocą parametrów fizycznych, opisujących jej odmianę, czas i warunki przechowywania. Badania przeprowadzono dla czterech odmian cebuli, tj. Wolska, Dormo, Centro oraz Armstrong, dla których wybrano następujące parametry fizyczne (rys. 4.1):



Rys. 4.1. Pomiary liniowe główki cebuli

- maksymalna średnica podziałowa cebuli (D_x) [mm]* – maksymalna liniowa wartość średnicy cebuli [mm] w przekroju poprzecznym względem jej osi pionowej, mierzona suwmiarką ręczną z dokładnością do 0,1 mm;
- minimalna średnica podziałowa cebuli (D_y) [mm]* - wartość średnicy prostopadła do średnicy cebuli (D_x) [mm] w przekroju poprzecznym względem osi, mierzona suwmiarką ręczną z dokładnością do 0,1 mm;
- wysokość cebuli (h_o) [mm]* – wielkość mierzona od korzenia od szczytipioru za pomocą suwmiarki ręcznej z dokładnością do 0,1 mm;
- masa cebuli (m_c) [g]* - masa główki cebuli wraz wysuszoną częścią szczytipiorową, korzeniową oraz suchą łuską. W celu wyznaczenia średniej masy cebuli każdą cebulę ważono za pomocą wagi elektronicznej o dokładności 0,01g;
- twardość cebuli (H_o) [kG/cm²] = [10⁵Pa] = 9,81 [N/ cm²]*– zmierzona za pomocą penetrometru FT 327 firmy TR Turoń o głowicy pomiarowej 11,3 mm, wyznaczona w jednostkach tożsamy z urządzeniem pomiarowym oraz normami branżowymi sektora warzywnego, do którego odnoszą się producenci cebuli obranej (poza

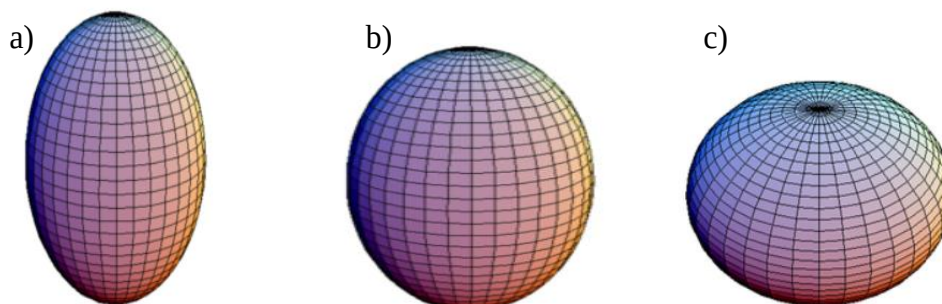
układem jednostek SI);

- f) *liczba suchej łuski* (n_l) [szt.] – liczba warstw zewnętrznych cebuli przeznaczonych do jej usunięcia,
- g) *kulistość cebuli* (S_c) [-] – wyrażona jako stosunek maksymalnej średnicy podziałowej do iloczynu maksymalnej i minimalnej średnicy podziałowej oraz jej wysokości cebuli.

$$S_c = \frac{(D_x * D_y * h_o)^{1/3}}{h_o} \quad [-] \quad (4.1.1)$$

W przypadku cebuli spłaszczonej wzdłuż osi, kształt opisany jest w postaci elipsoidy spłaszczonej, a przypadku mniejszej średnicy podziałowej do jej wysokości to kształt opisany jest jako elipsoidalna wydłużona. Na podstawie zależności opisanej wzorem (4.1.1), kształt cebuli określono w postaci (rys. 4.2):

- elipsoidy wydłużonej, gdzie $S_c < 1$;
- kulistej, dla $S_c \approx 1$,
- elipsoidy spłaszczonej, dla $S_c > 1$.



Rys. 4.2. Kształt cebuli: a) elipsoidalna wydłużona, b) kulista, c) elipsoidalna spłaszczona

- h) *przekrój poprzeczny cebuli* (A_c) – wartość wyznaczona na podstawie dwóch średnic prostopadłych do siebie w płaszczyźnie przekroju:

$$A_c = \pi * \frac{D_x * D_y}{4} \quad [\text{mm}^2] \quad (4.1.2)$$

- i) *obwód cebuli* (O_c) – przybliżona wartość obwodu elipsy wyznaczonej w przekroju o największej wartości średnicy cebuli (D_x):

$$O_c = \pi \left(\frac{3(D_x + D_y)}{2} - \sqrt{\frac{(D_x * D_y)}{4}} \right) \quad [\text{mm}] \quad (4.1.3)$$

- j) *objętość cebuli* (V_c) – wartość wyznaczona na podstawie pomiarów liniowych, korzystając ze wzoru:

$$V_c = \frac{4}{3} \pi \frac{D_x D_y h_o}{8} \quad [\text{mm}^3] \quad (4.1.4)$$

- k) *gęstość rzeczywista cebuli* (ρ_c) [kg/m^3] - wielkość charakterystyczna wyznaczona na podstawie pomiaru masy i objętości rzeczywistej cebuli.

$$\rho_c = \frac{m_c}{V_c} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (4.1.5)$$

Badania prowadzone były na cebuli dostarczanej prosto od producenta i czas realizacji badań od pobrania nie przekraczał 4 h. Analizowane były parametry fizyczne cebuli przechowywanej przez okres do 12 miesięcy. Magazynowano ją w pomieszczeniu zamkniętym o wentylacji grawitacyjnej i wilgotności względnej od 60 do 70% na przymie o wysokości do 3 metrów. Średnia wartość utrzymywanej stałe temperatury mieściła się w zakresie od 2 do 10°C. Przy pobieraniu prób badawczych każdorazowo przeprowadzono ocenę wizualną jakości cebuli w celu wyeliminowania materiału badawczego z oznakami gnicia i chorób powierzchni.

Badania cebuli przeprowadzono w celu oceny zmian jej parametrów fizycznych w rocznym okresie jej przechowywania. Próby składające się z 180 cebul każdej odmiany pobierano od producenta co 2 miesiące przez okres 12 miesięcy. Celem weryfikacji ich wzajemnej zależności przeprowadzono analizy statystyczne w oprogramowaniu Statistica. Z uwagi na nieliniowość wyników badań wykorzystano analizę korelacji Spearmana do identyfikacji istotności związków pomiędzy badanymi zmiennymi (tabela 4.1). W analizach zastosowano osiem statystyk opisowych: medianę (Me), średnią (M), minimum (Min), maksimum (Max), pierwszy kwartył (Q1), trzeci kwartył (Q3), rozstęp oraz odchylenie standardowe (SD). Za poziom istotny statystycznie przyjęto wartość odpowiadającą $p < 0,05$.

Tabela 4.1 Związek pomiędzy analizowanymi zmiennymi parametrów fizycznych cebul

Parametr	D_x [mm]	D_y [mm]	h_0 [mm]	H_0 [kG/cm ²]	m_c [g]	T [m-c]
D_x [mm]	-	$r_s = 1,00$; $p < 0,001$	$r_s = 0,90$; $p < 0,001$	$r_s = 0,17$; $p = 0,11$	$r_s = 0,99$; $p < 0,001$	$r_s = 0,10$; $p = 0,18$
D_y [mm]	$r_s = 1,00$; $p < 0,001$	-	$r_s = 0,90$; $p < 0,001$	$r_s = 0,17$; $p = 0,11$	$r_s = 0,94$; $p < 0,001$	$r_s = 0,10$; $p = 0,152$
h_0 [mm]	$r_s = 0,90$; $p < 0,001$	$r_s = 0,90$; $p < 0,001$	-	$r_s = 0,07$; $p = 0,15$	$r_s = 0,94$; $p < 0,001$	$r_s = 0,15$; $p = 0,66$
H_0 [kG/cm ²]	$r_s = 0,17$; $p = 0,110$	$r_s = 0,17$; $p = 0,11$	$r_s = 0,07$; $p = 0,15$	-	$r_s = 0,15$; $p = 0,14$	$r_s = -0,89$; $p < 0,001$
m_c [g]	$r_s = 0,99$; $p < 0,001$	$r_s = 0,99$; $p < 0,001$	$r_s = 0,94$; $p < 0,001$	$r_s = 0,15$; $p = 0,14$	-	$r_s = 0,11$; $p = 0,21$
T [m-c]	$r_s = 0,10$; $p = 0,18$	$r_s = 0,10$; $p = 0,15$	$r_s = 0,15$; $p = 0,66$	$r_s = -0,89$; $p < 0,001$	$r_s = 0,11$; $p = 0,21$	-

Na podstawie wyników korelacji analizowanych parametrów, przy poziomie ufności $p < 0,05$, zaobserwowano występowanie statystycznie istotnych zależności pomiędzy średnicami D_x i D_y , wysokością h_0 i masą m_0 oraz pomiędzy twardością H_0 a okresem

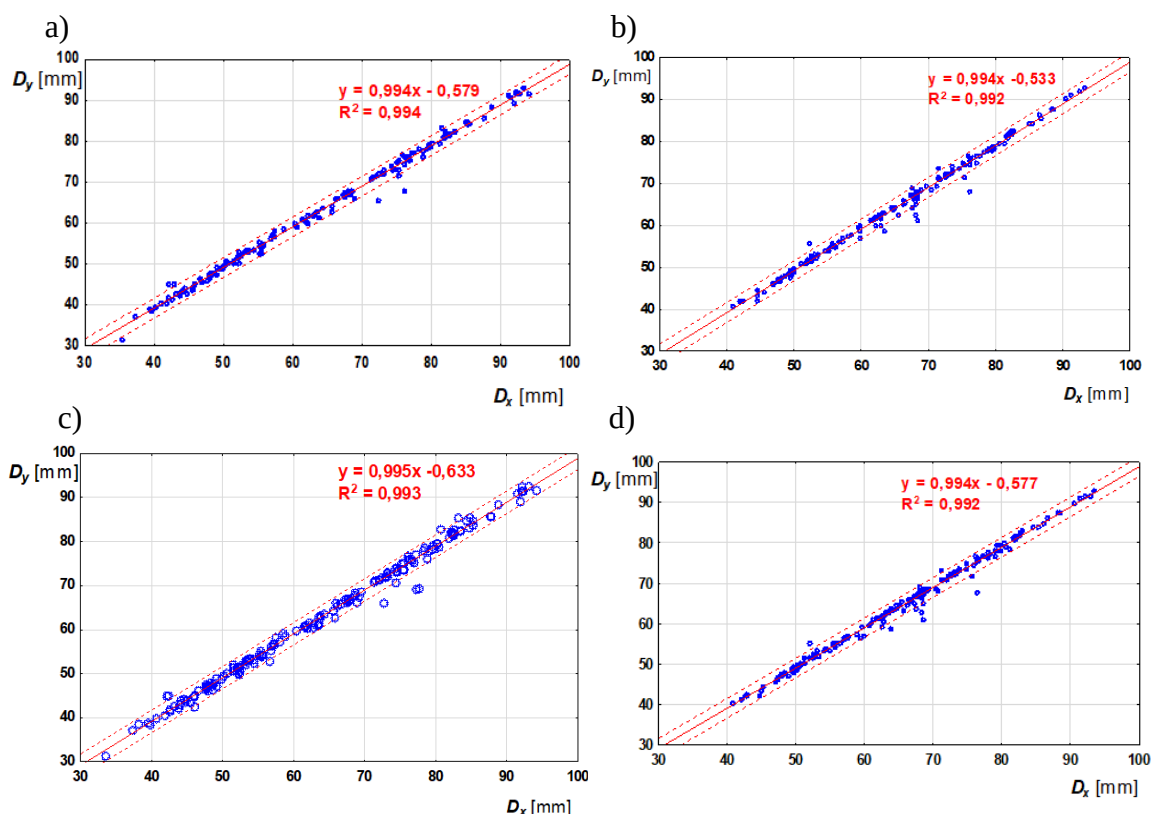
przechowywania T cebul. Najsilniejszy związek zaobserwowano pomiędzy średnicami D_x i D_y , dla których współczynnik $r_s = 1,00$, co świadczy, iż przekrój analizowanych cebul jest zbliżony do okręgu. Ponadto im większa jest średnica cebuli, tym większa jest jej wysokość i masa. W przypadku analizowanej twardości cebuli, obserwuje się zmniejszenie jej wartości względem okresu jej przechowywania, co potwierdza wysoką jakość cebuli świeżej, która zebrana prosto z pola posiada najwyższą twardość.

W kolejnym kroku poddano ocenie parametry liniowe w postaci opisu statystycznego, aby określić zmienność wielkości średnich względem wybranych odmian (tabela 4.2).

Tabela 4.2 Analiza statystyczna parametrów liniowych cebuli względem jej wybranych odmian

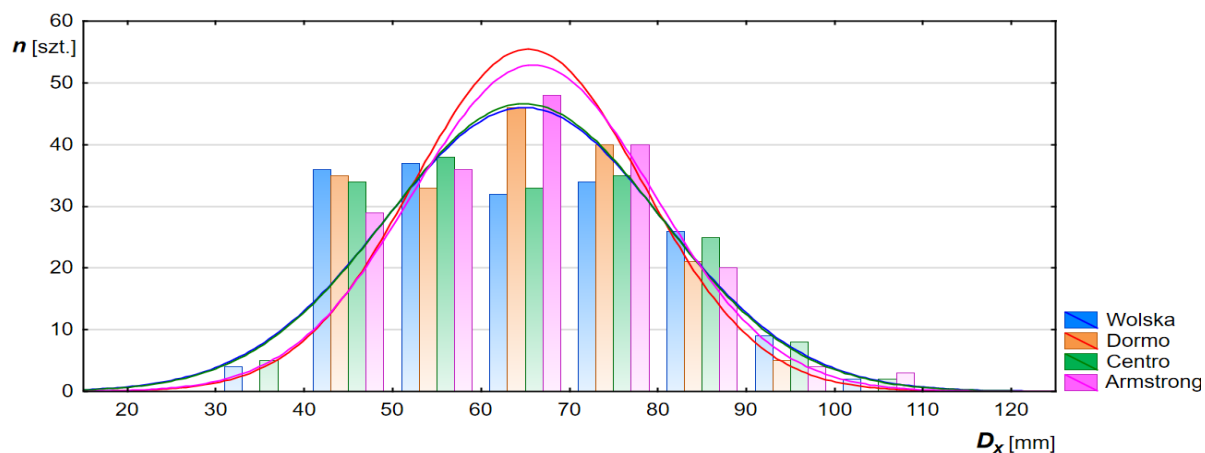
Parametr	Odmiana	Me	M	Min	Max	Q1	Q3	Rozstęp	SD
D_x [mm]	Wolska	63,35	64,34	35,26	94,16	51,77	76,78	58,90	15,17
	Dormo	66,26	65,08	40,88	93,22	53,00	75,18	52,34	12,95
	Centro	63,61	64,37	33,49	94,16	51,78	77,04	60,67	14,98
	Armstrong	66,32	65,30	40,77	93,33	53,29	75,75	52,56	12,87
D_y [mm]	Wolska	62,11	63,38	31,22	92,89	50,45	76,07	61,67	15,13
	Dormo	64,21	64,17	40,72	92,89	52,67	73,79	52,17	12,93
	Centro	62,67	63,44	31,32	92,55	50,70	76,02	61,23	14,97
	Armstrong	64,48	64,34	40,22	92,98	53,22	74,08	52,76	12,85
h_0 [mm]	Wolska	67,35	68,95	48,49	89,77	61,13	78,50	41,28	10,44
	Dormo	70,55	70,34	49,55	91,44	62,55	78,36	41,89	9,95
	Centro	67,35	69,09	48,49	90,67	61,39	78,85	42,18	10,26
	Armstrong	70,55	70,34	49,55	91,44	62,55	78,36	41,89	9,95

Wielkość analizowanych cebul, określanej na podstawie maksymalnej średnicy D_x mieści się w zakresie od 35,26 do 94,16 mm i wysokości od 48,49 do 91,44 mm. Dodatkowo obserwuje się minimalne rozproszenie wartości średnich pomiędzy średnicami podziałowymi D_x i D_y , w której największą wartością średnią cechuje się odmiana Armstrong, a najmniejszą Wolska. W tym celu dla rozrzutu wyników ich średnic podziałowych D_x i D_y wyznaczono funkcję regresji liniowej do oceny siły zależności pomiędzy zmiennymi (rys 4.3), dla których dodatkowo wyznaczono pasy regresji przedziału ufności wynoszącego $p < 0,05$.



Rys 4.3. Rozrzut cebul o średnicach podziałowych D_x , D_y :
a) odmiana Wolska; b) odmiana Dormo, c) odmiana Centro, d) odmiana Armstrong

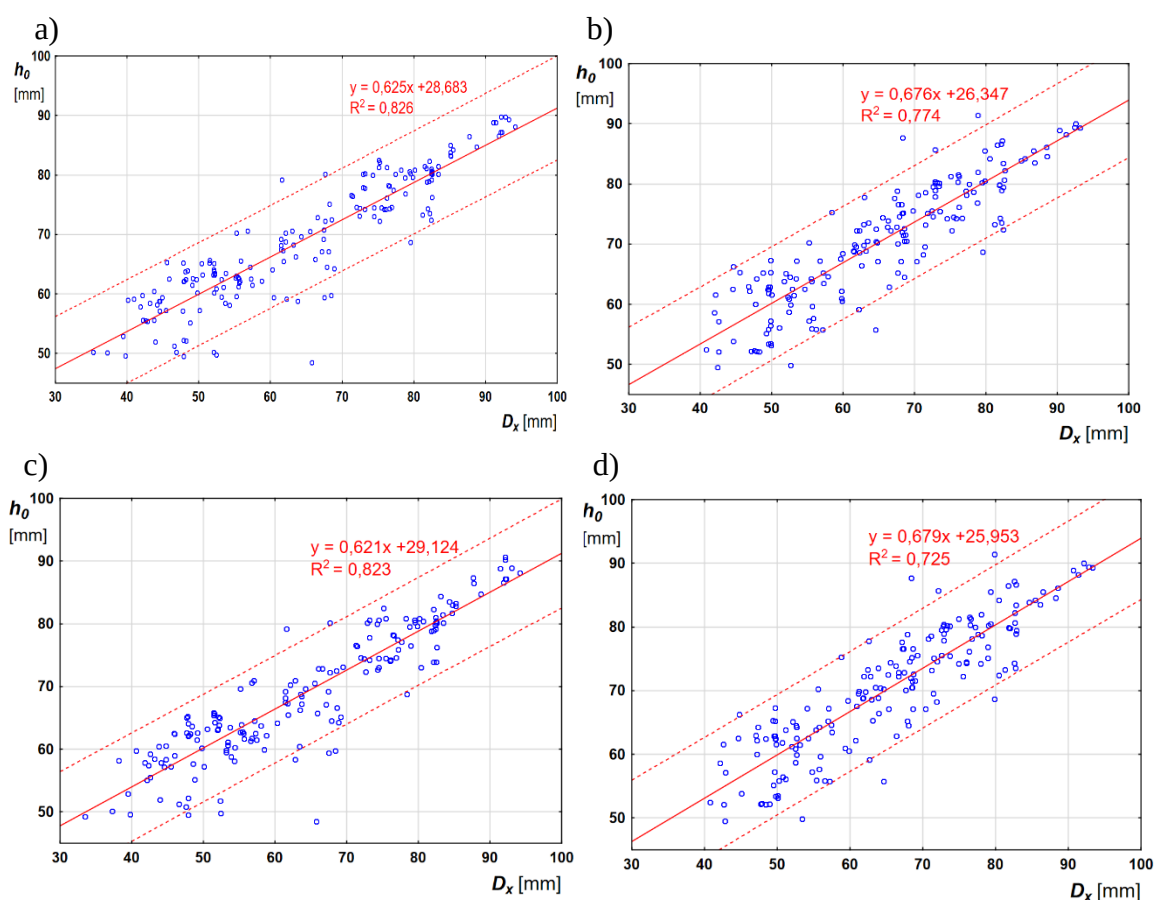
W całym zakresie pomiarowym zaobserwowano silną dodatnią zależność pomiędzy analizowanymi średnicami, charakteryzującymi się minimalnym rozrzutem, co wskazuje, że cebule mają kształt elipsy o zbliżonych do siebie półosiach. W dalszych analizach wykorzystano parametr średnicy podziałowej D_x jako wielkość cebuli. Na potrzeby badań eksperymentalnych oraz wytycznych do opracowania stanowiska badawczego zasadne było opracowanie histogramu częstości występowania parametru D_x z uwzględnieniem odmiany cebuli (rys. 4.4).



Rys. 4.4. Histogram wystąpień odmian cebuli o średnicy podziałowej cebuli

Na podstawie histogramów oraz rozkładów normalnych wybranych odmian cebuli wykazano, iż wielkość cebul opisanych w postaci średnicy podziałowej D_x cechuje się dużą zmiennością w zakresie od 40 do 100 mm. Dla odmiany Dormo oraz Armstrong najwyższe wartości osiągnięto dla średnic w przedziale od 60 do 70 mm, a dla odmiany Wolska i Centro jest to poziom w zakresie od 50 do 60 mm.

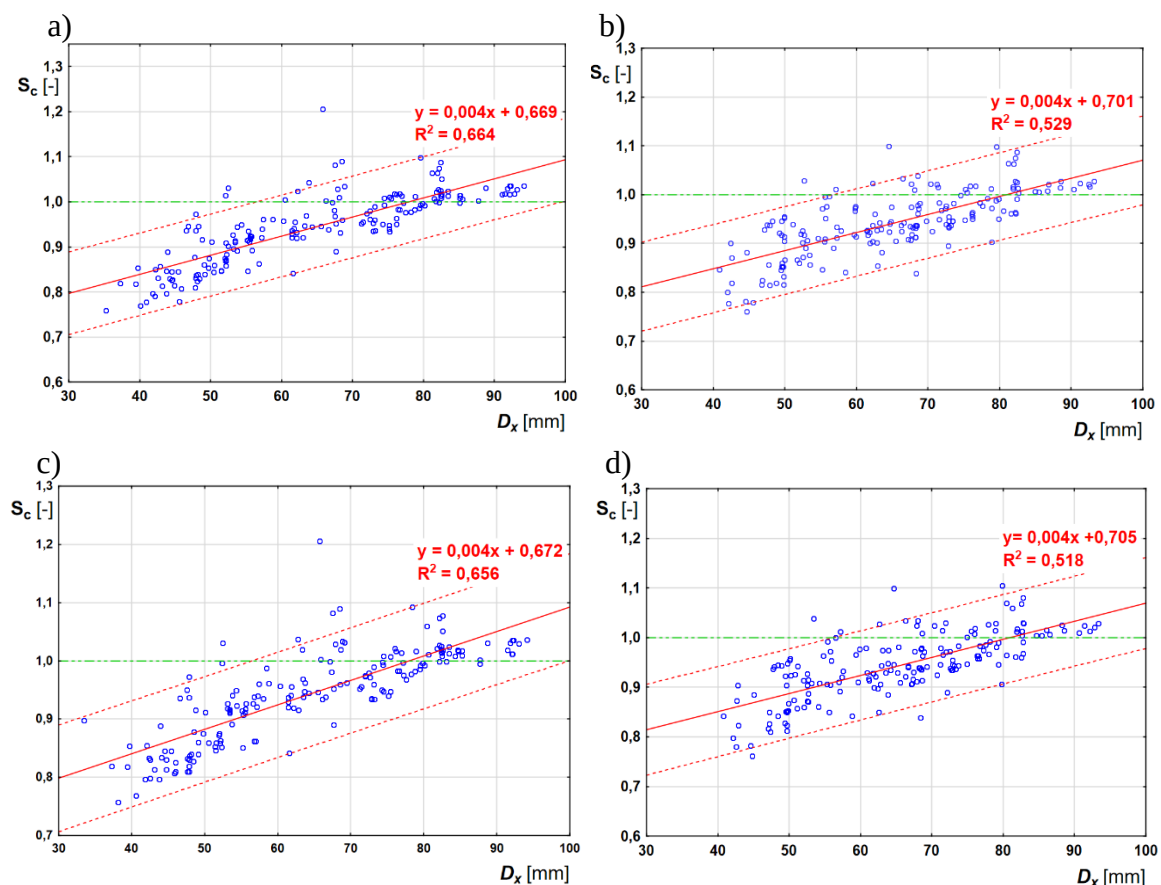
W kolejnym kroku przeprowadzono badania rozrzutu wysokości h_0 względem parametru D_x , dla których wyznaczono funkcję w postaci regresji liniowej, określającej ich wzajemną zależność. Pozwoliło to na ocenę zmienności kształtu cebuli względem jej wielkości (rys. 4.5). Niezależnie od odmiany rozproszenie wyników dla cebuli o średnicy podziałowej poniżej 80 mm, które wykazały cebule o większej wysokości niż średnicy podziałowej.



Rys. 4.5. Rozkład maksymalnej średnicy D_x od wysokości cebuli h_0 :

a) odmiana Wolska; b) odmiana Dormo, c) odmiana Centro, d) odmiana Armstrong

Cebula o średnicy podziałowej powyżej 80 mm wykazała niższą wysokość względem jej średnicy podziałowej. Zmiana zależności dla powyższych zmiennych przyczyniła się do zmiany kształtu elipsy, który wyznaczono za pomocą parametru kulistości cebuli S_c , (wzór 4.1.1). Pokazana na rys. 4.6 linia koloru zielonego określa cebule o kształcie kulistym.



Rys. 4.6. Rozrzut współczynnika kulistości S_c od maksymalnej średnicy podziałowej D_x :

a) odmiana Wolska, b) odmiana Dormo, c) odmiana Centro, d) odmiana Armstrong

Cebule o średnicy podziałowej poniżej 80 mm osiągały wartość $S_c < 1$, wykazując podobieństwo do kształtu elipsoidy wydłużonej. Z kolei cebule o średnicy powyżej 80 mm osiągały wartość współczynnika $S_c \geq 1$, przyjmując kształt w kierunku elipsoidy spłaszczonej.

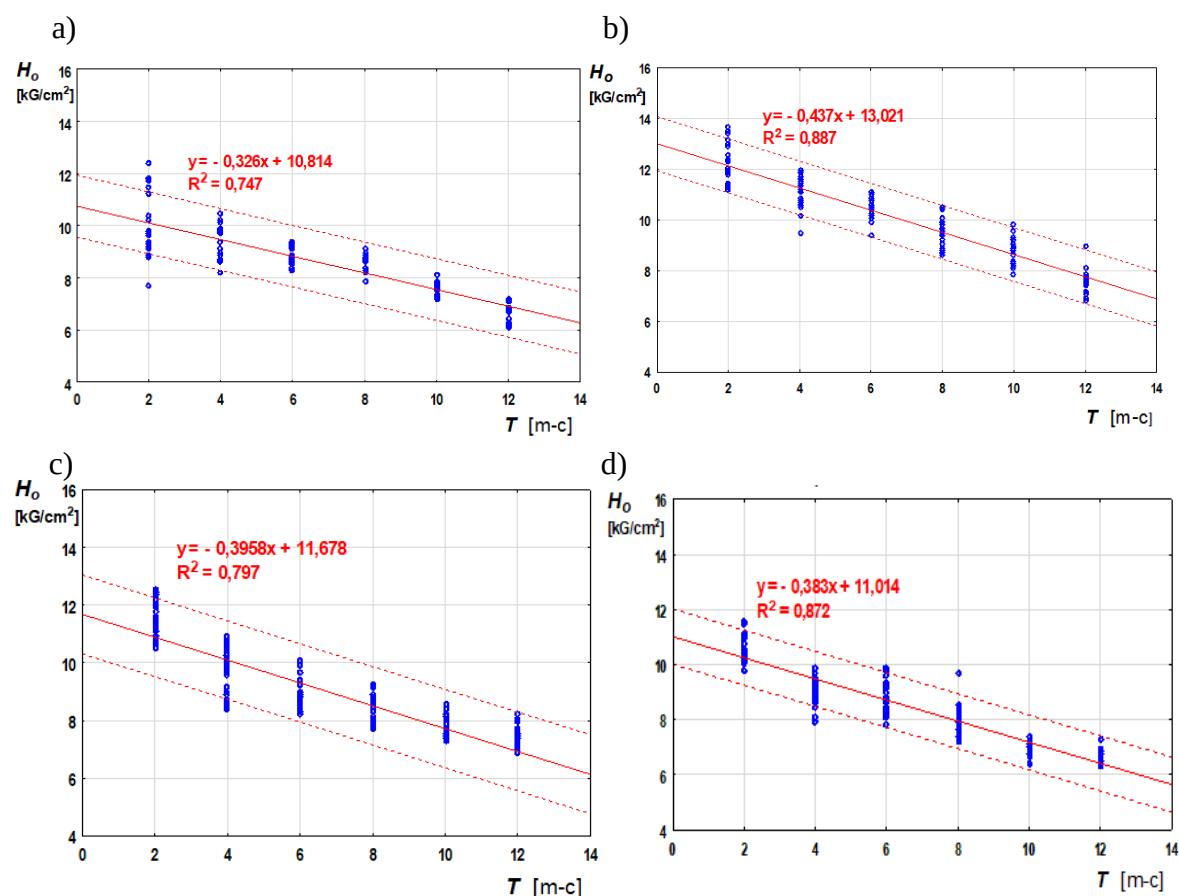
Równolegle do pomiarów liniowych prowadzono badania twardości (H_0) cebuli przechowywanej przez okres 12 miesięcy. Wyniki badań zestawiono w postaci opisu statystycznego (tabela 4.3), które wyszczególniono dla wybranych odmian cebuli.

Tabela 4.3. Analiza statystyczna twardości cebuli z uwzględnieniem jej odmian

Parametr	Odmiana	Me	M	Min	Max	Q1	Q3	Rozstęp	SD
H_0 [kG/cm ²]	Wolska	8,52	8,70	6,10	13,25	7,60	9,30	7,15	1,67
	Dormo	9,95	10,10	6,80	13,70	8,80	11,2	6,90	2,53
	Centro	8,90	8,47	6,90	12,58	7,68	9,93	5,68	2,30
	Armstrong	8,32	8,16	6,31	11,55	7,01	9,40	5,24	1,97

Wartości średnie twardości wszystkich odmian są zbliżone do siebie i mieszczą się w zakresie od 8,33 do 9,96 kG/cm². Najwyższą twardość osiągnęła odmiana Dormo o wartości 13,7 kG/cm², a najniższą odmiana Armstrong równą 6,31 kG/cm². W dalszym

postępowaniu wyznaczono jej zależność od okresu przechowywania T . Wyniki zaprezentowano za pomocą rozrzutu wyników twardości w funkcji okresu przechowywania, dla których wyznaczono funkcje regresji liniowej (rys. 4.7).



Rys. 4.7. Rozkład twardości cebuli w czasie przechowywania:

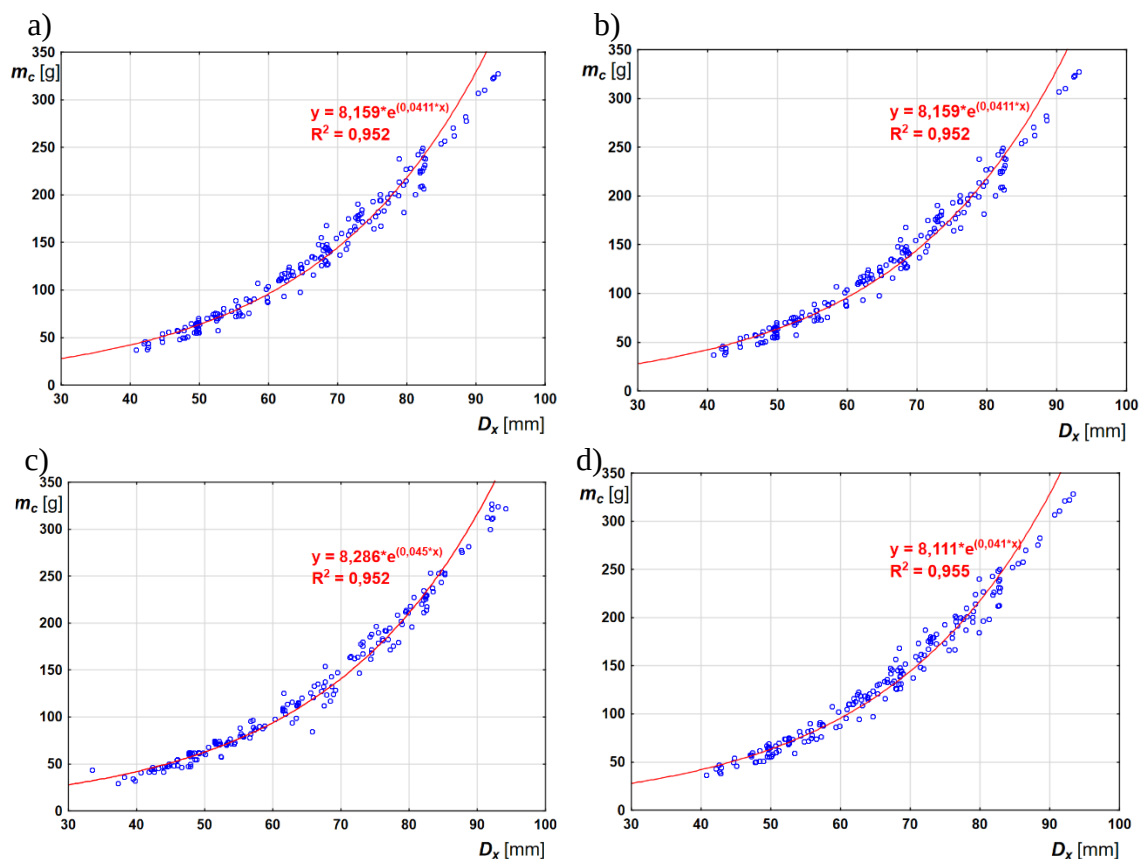
a) odmiana Wolska, b) odmiana Dormo, c) odmiana Centro, d) odmiana Armstrong

Na podstawie wyników badań wykazano, iż twardość cebuli maleje względem okresu jej przechowywania. Niniejszym analizując cebulę przechowywaną 12 miesięcy względem cebuli świeżej, obserwuje się dla powyższych odmian obniżenie ich twardości o wartość średnią równą 51,29%. Wyznaczone funkcje regresji pozwoliły określić twardości cebuli dla wybranego okresu przechowywania. Ostatni etap badań parametrów fizycznych cebuli obejmował pomiary jej masy, celem oceny czy występują istotne różnice pomiędzy wybranymi odmianami. Dla wyników badań przeprowadzono analizę statystyczną (tabela 4.4), w której masy zawarte są dla wielkości cebul mieszczące się zakresie od 40 do 100 mm.

Tabela 4.4. Analiza statystyczna masy cebuli z uwzględnieniem jej odmian

Parametr	Odmiana	Me	M	Min	Max	Q1	Q3	Rozstęp	SD
m_c [g]	Wolska	133,57	113,05	24,21	327,56	69,48	193,94	303,35	78,52
	Dormo	135,57	126,85	36,95	335,26	73,06	180,87	298,31	69,19
	Centro	133,69	114,11	29,39	326,95	70,63	190,93	297,56	77,33
	Armstrong	136,12	126,30	36,40	328,26	73,94	183,38	291,87	68,89

Cebule o średnicy podziałowej D_x w zakresie od 40 do 100 mm charakteryzują się masą w zakresie od 31,74 do 329,51 g, a średnia ich wartość mieści się w zakresie od 133,57 do 136,12 g. W ramach pracy przeprowadzono analizę rozkładu masy m_c badanych cebul względem jej średnicy podziałowej D_x . Wyznaczono funkcję regresji w postaci wielomianu, dzięki której możliwe będzie przewidywanie masy cebuli względem jej średnicy (rys. 4.8).



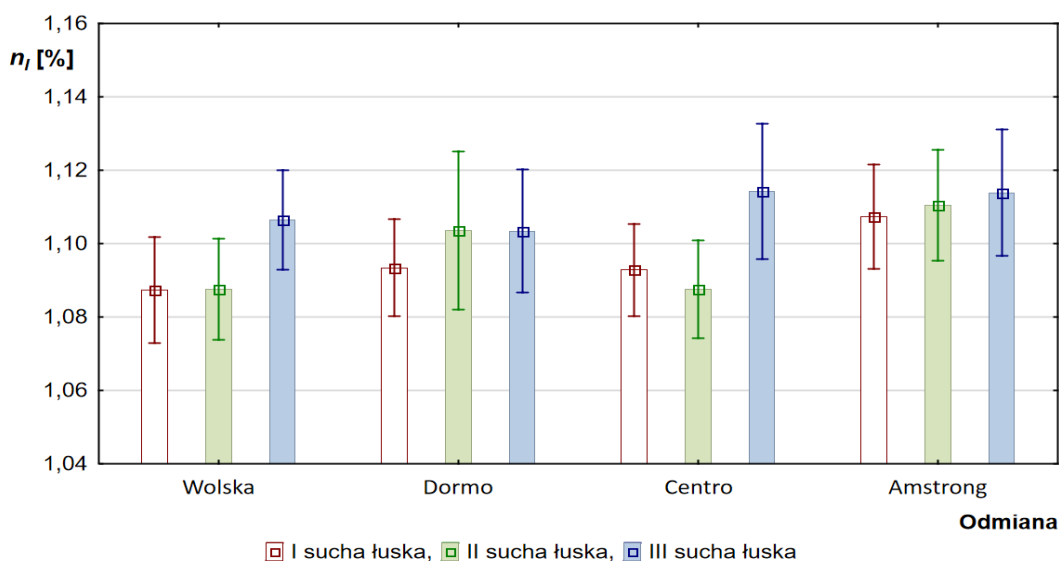
Rys. 4.8. Zależność masy cebuli od maksymalnej średnicy podziałowej D_x :

a) odmiana Wolska; b) odmiana Dormo, c) odmiana Centro, d) odmiana Armstrong

Na podstawie wyznaczonych regresji w postaci funkcji wykładniczych możliwe było z dużą dokładnością prognozowanie wartości masy cebuli nieobranej na podstawie jej średnicy podziałowej D_x zawartej w zakresie od 40 do 100 mm.

W kolejnym kroku na potrzeby oceny ilości odpadu suchej łuski z cebuli wykonano pomiary masy każdej jej pojedynczej łuski. W tym celu wybrano cebule wśród analizowanych odmian, które zawierały min. 3 suche łuski w cebuli. Badania wykonano przy użyciu wagi precyzyjnej Radwag PS 4500.R2.M z dokładnością pomiarową 0,01g. Zdejmowano ręcznie poszczególne łuski cebuli, które osobno ważono, rozpoczynając od łuski zewnętrznej (I sucha łuska, rys. 4.9.). Pozwoliło to określić procentową ilość suchej masy dla każdej łuski w stosunku do całkowitej masy cebuli. Ich wyniki umożliwiły

wprowadzanie korekt ilości odpadu w aplikacji obliczeniowej. Wyniki badań dla czterech wybranych odmian zestawiono na rys. 4.9.



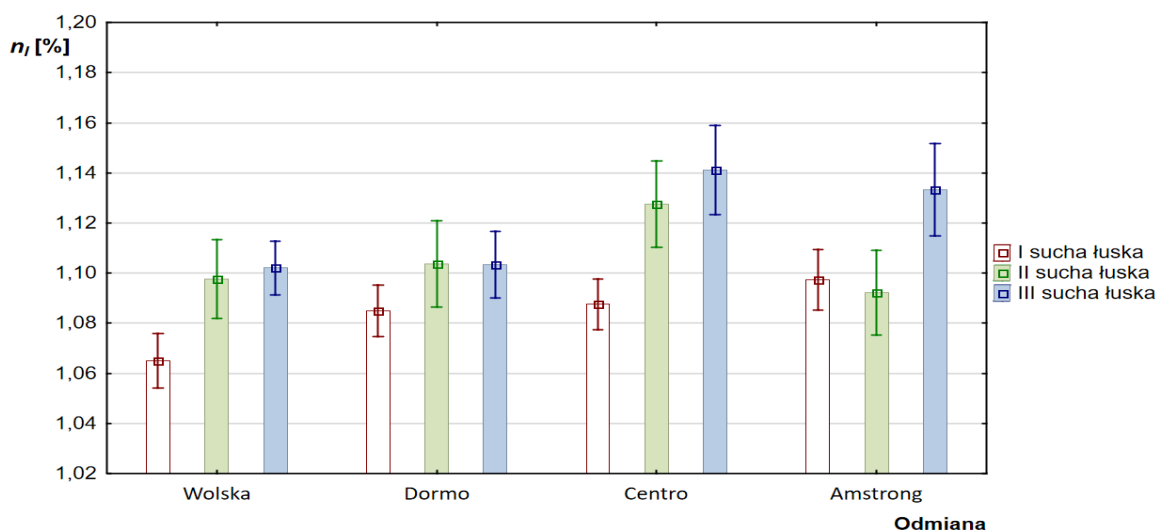
Rys. 4.9. Zawartość suchej masy w łusce cebuli względem jej odmiany

Wartość średnia suchej masy pojedynczej łuski waha się w przedziale od 1,06 do 1,14% masy cebuli. We wszystkich odmianach ilość suchej masy pierwszej łuski w cebuli była mniejsza. Może to być spowodowane jej uszkodzeniem, co skutkuje niepełne jej pokrycie suchą łuską na powierzchni cebuli. W odmianach Wolska oraz Centro ilość suchej masy w trzeciej łusce była większa od pozostałych, gdyż zawierała ona fragmenty łuski mokrej. Aby ocenić zmienność ilości suchej masy w poszczególnych łuskach cebuli przeprowadzono analizę statystyczną, których wyniki przedstawiono (tabela 4.5), względem wybranych odmian.

Tabela 4.5. Analiza statystyczna ilości suchej łuski w cebuli względem jej odmian

Odmiana	Warstwy	M	Min	Max	Q1	Q3	Rozstęp	SD	CV
Wolska	I	1,09	0,87	1,50	0,97	1,17	0,63	0,16	15,01
	II	1,09	0,89	1,50	0,97	1,20	0,61	0,16	14,35
	III	1,11	0,96	1,40	0,97	1,24	0,44	0,15	13,79
Dormo	I	1,09	0,89	1,43	0,99	1,19	0,54	0,15	13,68
	II	1,10	0,89	2,10	0,96	1,14	1,21	0,24	22,10
	III	1,10	0,89	1,64	0,98	1,19	0,75	0,19	17,10
Centro	I	1,09	0,91	1,47	1,01	1,16	0,56	0,14	13,00
	II	1,09	0,90	1,55	0,99	1,14	0,64	0,15	13,84
	III	1,11	0,91	1,66	0,98	1,13	0,75	0,21	18,75
Armstrong	I	1,11	0,87	1,44	0,98	1,22	0,57	0,16	14,49
	II	1,11	0,89	1,62	0,97	1,22	0,73	0,17	15,46
	III	1,11	0,90	1,61	0,96	1,20	0,70	0,19	17,48

Średnia ilość masy pojedynczej łuski w cebuli dla wybranych odmian mieści się w zakresie od 1,09 do 1,11%. Niniejszym, tak mała rozbieżność masy pomiędzy łuskami, pozwala stwierdzić, iż wpływ odmiany cebuli na masę łuski jest znikomy. Przeprowadzono zatem kolejne badania pod kątem oceny jej zmienności względem wielkości cebuli. Badania przeprowadzono dla grup cebuli obejmujący zakres ich wielkości od 40 do 100 mm (rys. 4.10).



Rys. 4.10. Zawartość suchej masy w łusce cebuli względem jej wielkości

Przedstawione wartości na powyższym wykresie wykazują małą rozbieżność masy łuski cebuli względem jej wielkości. Przeprowadzono również dogłębną analizę statystyczną celem określenia ich poziomu zmienności za pomocą współczynnika CV. Na jego podstawie stwierdza się słabą zmienność masy pojedynczych łusek cebuli względem jej wielkości (tabela 4.6).

Tabela 4.6. Analiza statystyczna masy suchej łuski w cebuli względem jej wielkości

Parametr	Liczba łuski	M	Min	Max	Q1	Q3	Rozstęp	SD	CV
D_x 40-59 [mm]	I	1,04	0,87	1,49	0,97	1,14	0,62	0,16	15,15
	II	1,14	0,96	2,07	0,97	1,12	1,10	0,32	27,99
	III	1,10	0,96	1,39	0,97	1,20	0,43	0,15	13,46
D_x 60-79 [mm]	I	1,07	0,96	1,30	0,97	1,17	0,34	0,12	11,04
	II	1,06	0,89	1,32	0,97	1,12	0,43	0,13	12,14
	III	1,08	0,96	1,30	0,97	1,21	0,34	0,13	12,48
D_x 80-100 [mm]	I	1,10	0,96	1,50	0,96	1,23	0,54	0,27	24,46
	II	1,14	0,96	1,20	1,08	1,20	0,24	0,12	10,51
	III	1,17	0,96	1,40	0,96	1,37	0,44	0,23	20,02

Zawartość suchej masy w poszczególnych łuskach cebuli charakteryzuje się słabą zmiennością poniżej 24,5% w odniesieniu do jej wielkości. Różnice ich wartości średnich wynoszą odpowiednio 0,1% masy cebul o średnicy od 40 do 59 mm, 0,02% dla średnicy od 60 do 79 mm oraz 0,07% dla średnicy od 80 do 100mm. Niniejszym, pozwala to stwierdzić, iż niezależnie od wielkości cebuli procentowa zawartość masy każdej łuski się istotnie nie zmienia.

Podsumowując wyniki badań parametrów fizycznych cebuli oraz ich wzajemnych zależności, potwierdzono wpływ maksymalnej średnicy podziałowej D_x na wszystkie analizowane parametry fizyczne cebuli za wyjątkiem twardości, której wartość ulega zmianie tylko względem okresu przechowywania. Przeprowadzone wyniki analiz korelacji zmiennych wykazały trzy istotne statystycznie zależności o dodatnim związku, pomiędzy maksymalną średnicą podziałową D_x a:

- minimalną średnicą podziałową D_y , $r_s = 1,00$; $p < 0,001$,
- masą m_0 , $r_s = 0,99$; $p < 0,001$,
- wysokością h_0 , $r_s = 0,90$; $p < 0,001$,

oraz jedną istotnie statystycznie ujemną zależność między okresem przechowywania T a:

- twardością H_0 , $r_s = -0,89$; $p < 0,001$.

Dodatkowo przeprowadzone badania pozwoliły wyznaczyć zmienność kształtu cebuli, która statystycznie istotnie zmienia się wraz ze wzrostem jej średnicy podziałowej D_x , przechodząc od elipsoidy wydłużonej do elipsoidy spłaszczonej. Wraz z wydłużeniem okresu przechowywania cebul maleje istotnie jej twardość. Najwyższą twardością wyróżniała się odmiana Dormo, a najniższą odmiana Wolska. W przypadku masy cebuli nie zaobserwowano istotnych różnic względem odmian.

Wobec powyższych zależności wyznaczono kluczowe parametry fizyczne cebul, które poddano analizie w badaniach wstępnych i zasadniczych:

a) średnica cebuli D_x :

- cebula mała: 40 – 59,9 mm,
- cebula średnia: 60 – 79,9 mm,
- cebula duża: 80 - 100 mm.

b) wartość średnia masy cebuli (m_c):

- cebula mała – 85,66 g,
- cebula średnia – 130,70 g,
- cebula duża – 201,70 g.

c) twardość H_0 , których wartość mieści się w zakresie od 5,1 do 13,72 kG/cm²,

d) ilość suchej łuski n_l – cebule pokryte w ilości od 1 do 3 łusek,

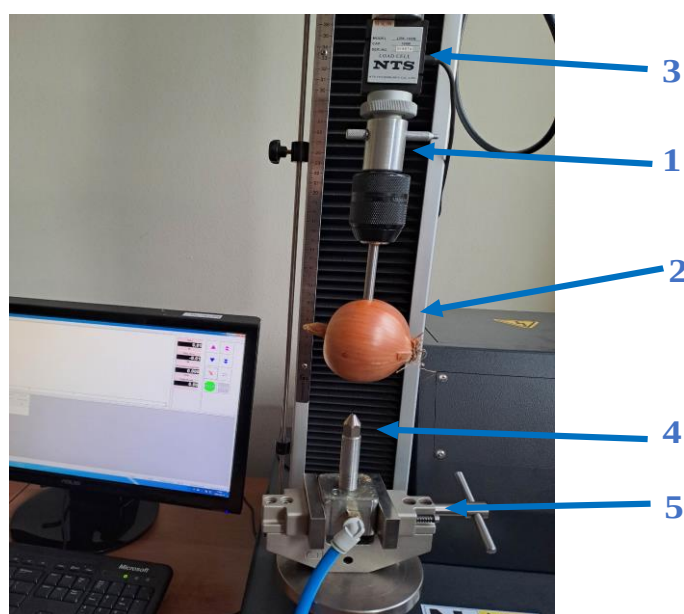
e) średnia ilość łuski w warstwie wynosi 1,09 % masy cebuli.

4.2. Określenie parametrów użytkowych dysz odmuchowych

4.2.1. Badania porównawcze dysz odmuchowych

W ramach badań wstępnych przeprowadzono analizy porównawcze parametrów użytkowych wybranych dysz. Porównano wyznaczone siły odmuchu i zużycia sprężonego powietrza względem ciśnienia zasilania oraz czasu odmuchu. Badania wykonano przy udziale maszyny wytrzymałościowej QC-508A2 firmy Cometech wykorzystując do pomiaru tensometryczny czujnik siły LRK – 100 N firmy NTS o zakresie 0-100 N i dokładności 0,01 N (rys. 4.11). Badania przeprowadzono przy użyciu sprężarki tłokowej D350 100W firmy Metabo i stacji przygotowania powietrza wyposażonej w urządzenie do pomiaru ciśnienia i zużycia sprężonego powietrza modelu SD 6500 firmy IFM. Odczyt i archiwizację parametrów procesowych przeprowadzono przy użyciu oprogramowania LR – Device firmy IFM.

Na maszynie wytrzymałościowej umieszczono w uchwycie głowicy pomiarowej cebulę i zamocowano dyszę odmuchową w dolnych szczękach urządzenia. Na podstawie analizy literaturowej dotyczącej parametrów użytkowych dostępnych na rynku maszyn obróbczych badania przeprowadzono dla pięciu wartości ciśnienia w przedziale od 4 do 12 bar oraz czterech wartości czasu dostępu sprężonego powietrza w przedziale od 0,3 do 1,2 s. Zdefiniowane progowe wartości ciśnienia wynikają z zakresu pracy dysz i instalacji przygotowania sprężonego powietrza. Natomiast czasy dostępu powietrza charakteryzują jednostkowe cykle odmuchu pojedynczej cebuli stosowane w maszynach przemysłowych.



Rys. 4.11. Badania siły odmuchu sprężonego powietrza:

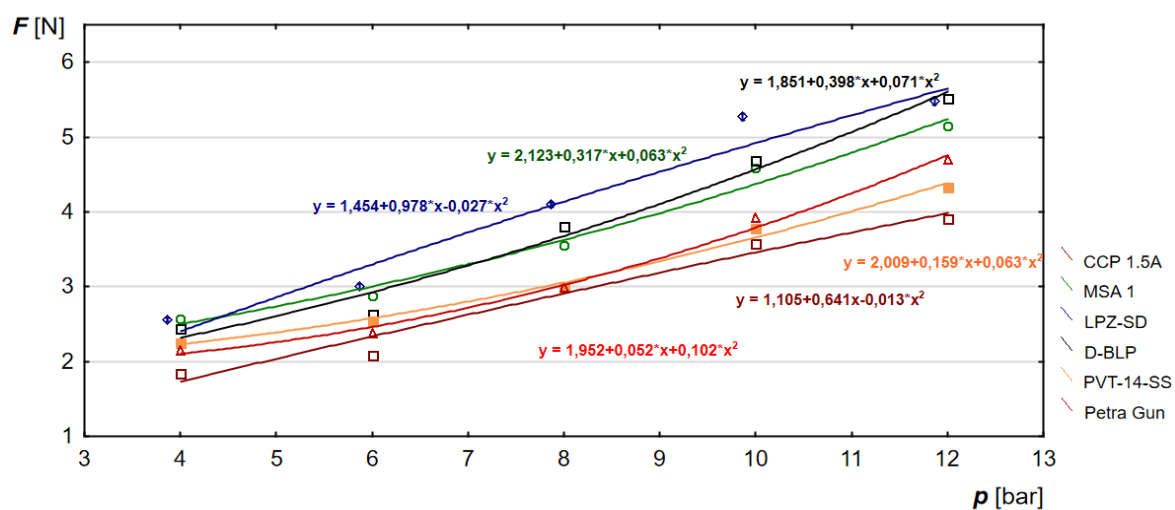
- 1) głowica pomiarowa, 2) uchwyt mocowania cebuli, 3) czujnik siły, 4) dysza odmuchowa

Do badań porównawczych wytypowano dysze odmuchowe obejmujące dyszę jednootworową CCP 1.5A, wielootworowe MSA 1 i LPZ-SD, dyszę Venturiego D-BLP, dyszę płaską PVT-14-SS oraz dyszę rotacyjną Petra GUN. Przeprowadzono badania siły odmuchu oraz zużycia sprężonego powietrza względem ciśnienia zasilania i czasu, a ich wyniki poddano analizie statystycznej (tabela 4.7).

Tabela 4.7. Analiza statystyczna parametrów wytypowanych dysz odmuchowych

Zmienna	Dysza	Me	M	Min	Max	Q1	Q3	Rozstęp	SD
F [N]	CCP 1.5A	2,884	2,970	1,690	3,980	2,060	3,595	2,290	0,832
	MSA 1	3,749	3,525	2,550	5,230	2,780	4,750	2,680	1,015
	LPZ-SD	4,082	4,075	2,490	5,610	2,945	5,345	3,120	1,204
	D-BLP	3,819	3,775	2,370	5,600	2,550	4,780	3,230	1,213
	PVT-14-SS	3,182	2,975	2,210	4,410	2,450	3,850	2,200	0,797
	PetraGUN	3,228	3,025	2,110	4,900	2,220	3,960	2,790	0,991
Q [m³]	CCP 1.5A	0,009	0,008	0,002	0,021	0,004	0,012	0,019	0,006
	MSA 1	0,017	0,013	0,004	0,044	0,009	0,023	0,041	0,011
	LPZ-SD	0,018	0,015	0,004	0,048	0,007	0,027	0,044	0,013
	D-BLP	0,015	0,012	0,003	0,041	0,007	0,020	0,038	0,010
	PVT-14-SS	0,012	0,012	0,005	0,024	0,009	0,015	0,019	0,005
	PetraGUN	0,016	0,015	0,007	0,032	0,012	0,019	0,026	0,006

Dla wyników badań wartości średnich siły odmuchu, wyznaczono funkcję dopasowania za pomocą regresji nieliniowej w postaci wielomianu (rys. 4.12). Wyznaczone krzywe pozwoliły ocenić w jaki sposób ciśnienie zasilania wpływa na wartość siły odmuchu.

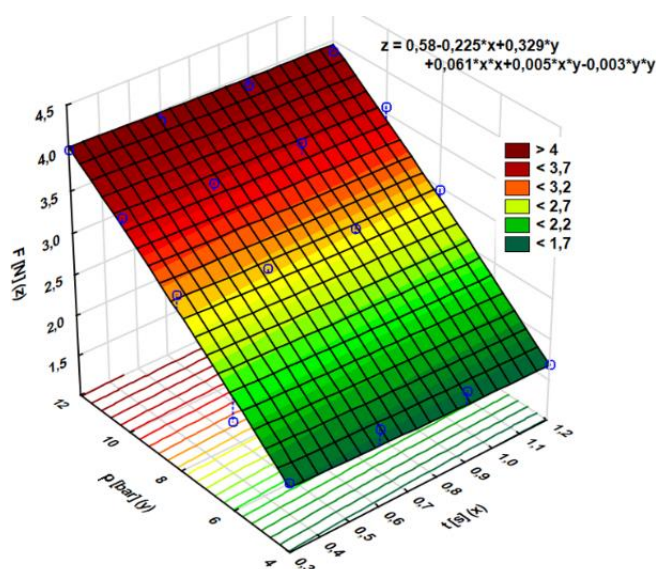


Rys. 4.12. Zależność siły odmuchu od ciśnienia dla wybranych dysz

Na podstawie danych zaprezentowanych na powyższym wykresie zaobserwowano, iż wartość siły odmuchu zwiększa się wraz ze wzrostem ciśnienia zasilania. Dla ciśnienia o wartości 12 bar największą wartość średnią siły reprezentuje dysza LPZ-SD osiągając 5,6 N, a najniższą CCP 1.5A o wartości 3,9 N.

Na podstawie analizy współczynników regresji przedstawionych na wykresie stwierdzono, iż rozrzut wyników siły odmuchu dla wybranych dysz zwiększa się wraz ze wzrostem ciśnienia.

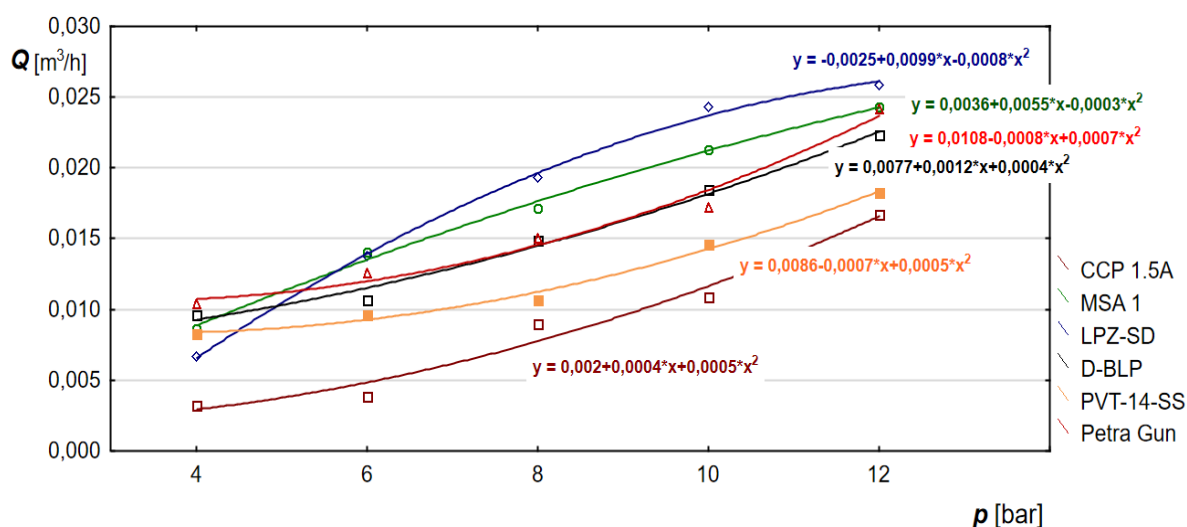
Przeprowadzono również badania wpływu czasu zasilania sprężonym powietrzem dyszy na wartość siły odmuchu w funkcji ciśnienia zasilania. Wyniki tych badań wykazały, iż czas odmuchu w zakresie od 0,3 do 1,2 s nie wpływa istotnie na wartość siły i zależność ta jest tożsama dla analizowanych dysz. Wyniki przedstawiono reprezentatywnie dla dyszy CCP 1.5A (rys. 4.13).



Rys. 4.13. Zależność siły odmuchu względem czasu odmuchu i ciśnienia zasilania dyszy CCP 1.5A

Uzyskane wyniki badań wskazują, że niezależnie od wartości ciśnienia średnia wartość siły nie jest istotnie zależna od czasu odmuchu. W przypadku stosowania odmuchu periodycznego (interwałowego), wiedza na temat powyższej zależności jest niezwykle istotna, gdyż w maszynach przemysłowych etap odmuchu suchej łuski jest najbardziej czasochłonny względem pozostałych etapów oczyszczania surowca. Korzystne jest zatem poszukiwanie określonych wartości siły względem ciśnienia ograniczając przy tym przedział czasowy odmuchu.

W kolejnym kroku prac podjęto działania pod kątem wyznaczenia zużycia powietrza względem jednej sztuki oczyszczanej cebuli. Analogicznie jak w przypadku wyników badań siły wyniki zużycia powietrza zestawiono graficznie na rys. 4.14.



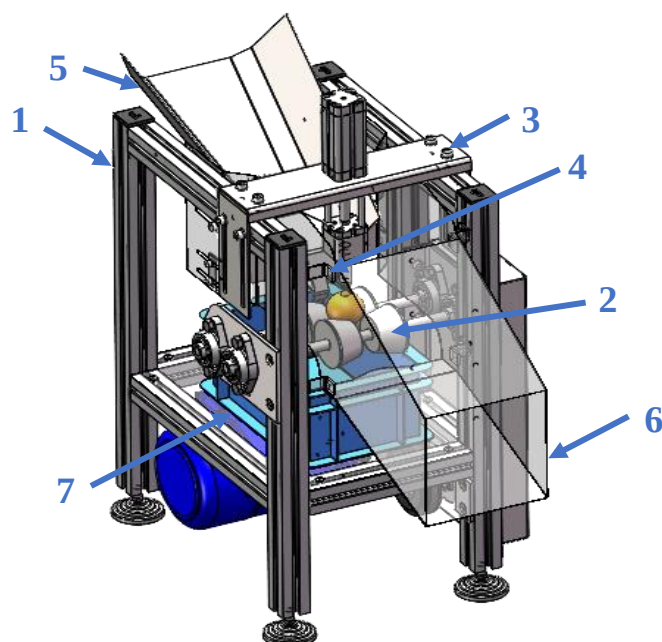
Rys. 4.14. Rozkład wartości średnich zużycia sprężonego powietrza w funkcji ciśnienia

Zilustrowane przebiegi wartości średnich wskazują, że zużycie powietrza istotnie wzrasta wraz ze wzrostem ciśnienia zasilania. Maksymalne wartości zużycia powietrza powstają przy maksymalnej wartości nastawy ciśnienia równej 12 bar, zużywając średnio $0,026 \text{ m}^3$ sprężonego powietrza (dysza LPZ-SD) na odmuch pojedynczej cebuli. Najmniejszą wartość zużycia wykazały dysze punktowe CCP 1.5A i rotacyjna PVT-14-SS osiągając wartość odpowiednio $0,017$ i $0,018 \text{ m}^3$ sprężonego powietrza na odmuchu pojedynczej cebuli.

4.3. Opracowanie stanowiska badawczego do odmuchu suchej łuski cebuli

W ramach pracy wykonano stanowisko badawcze – moduł odmuchu rolkowego do usuwania suchej łuski z cebuli. Opracowano wspomagany komputerowo w środowisku CAD 3D (*Computer-Aided Design*) wirtualny model konstrukcji (rys. 4.15) składający się z sześciu podstawowych podzespołów: ramy nośnej (1), układu rolkowego do obrotu cebuli (2), mechanizmu odmuchowego (3), zespołu wyrzutu cebuli (4), rynny wlotowej (5) oraz rynny wylotowej (6). Pod układem odmuchu zamocowano wymienny kosz (7) na suchą łuskę.

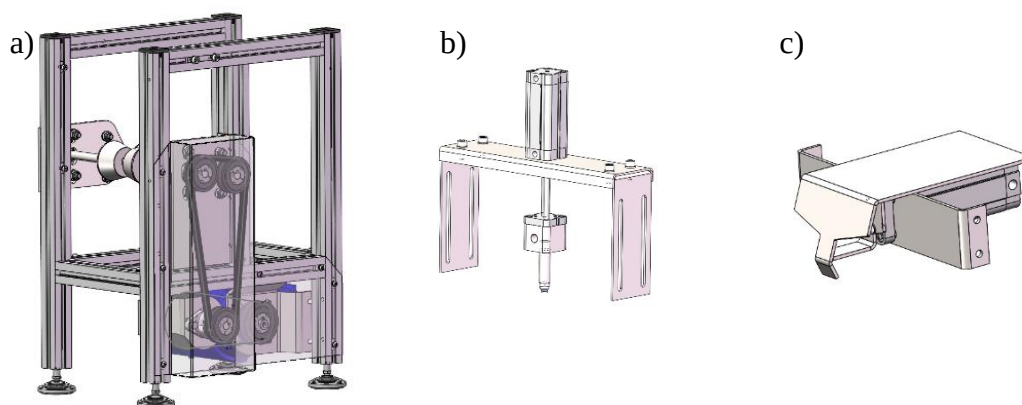
Mechanizm napędowy zasilany był silnikiem indukcyjnym o mocy $0,55 \text{ kW}$, a zastosowany układ przekładni pasowej umożliwił regulację prędkości obrotowej rolek. Wymiana kół o różnych średnicach podziałowych w zakresie od 63 do 125 mm, pozwoliła na uzyskanie prędkości obrotowej rolek w zakresie od 130 do 420 obr./min.



Rys. 4.15. Moduł odmuchu rolkowego:

- 1) rama nośna, 2) układ rolkowy, 3) mechanizm odmuchowy, 4) zespół wyrzutu cebuli, 5) rynna wlotowa, 6) rynna wylotowa, 7) kosz na odpady suchej łuski

Mechanizm odmuchowy (rys. 4.16) natomiast umożliwił wymianę badanych dysz odmuchowych, które mocowano do tłoka siłownika pneumatycznego, pozwalającego podczas odmuchu na przybliżenie ich do powierzchni cebuli. Zespół wypychacza odpowiadał za przesuwanie oczyszczonej cebuli bezpośrednio z rolek na rynnę wylotową, który składał się z płyty wypychacza mocowanej do siłownika pneumatycznego.



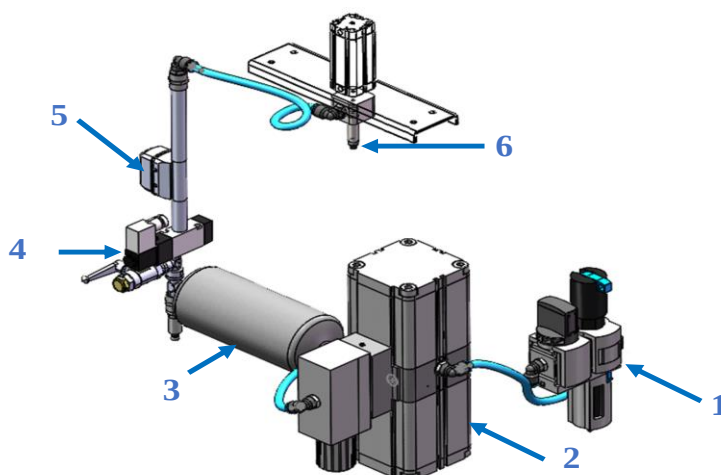
Rys. 4.16. Układy robocze stanowiska:

- a) układ obrotowy rolek, b) układ odmuchu, c) układ wypychacza

Powyższe układy powstały na bazie opracowanego schematu pneumatycznego do sterowania siłownikami wypychacza i przesuwu dyszy, a także do zasilania dyszy określoną dawką sprężonego powietrza. Układ pneumatyczny zawierał dwa niezależne źródła zasilania sprężonego powietrza, co umożliwiło pomiar ciśnienia zasilania dysz podczas odmuchu z wykluczeniem siłowników pneumatycznych. Sekcję siłowników

wyposażono w sprężarkę tłokową 248-50-2 firmy Adler o pojemności zbiornika 50 l i wydatku powietrza na poziomie 148 l/min, a sekcję układu odmuchowego w sprężarkę tłokową D350 100W firmy Metabo, o pojemności 90 l oraz wydatku powietrza na poziomie 250 l/min.

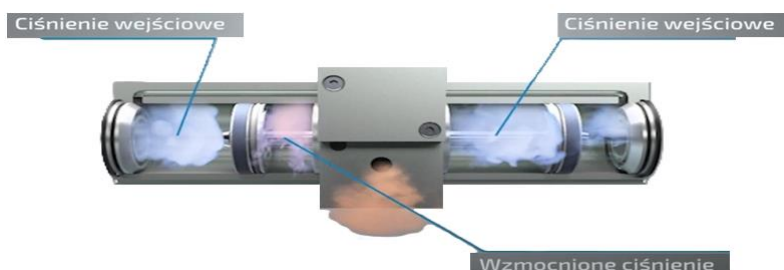
Ponadto dokonano doboru komponentów pneumatycznych, przedstawionych na rys. 4.17, które składają się ze stacji przygotowania powietrza (1), tłokowego zespołu sprężania powietrza (2), zbiornika buforowego (3), elektrozaworu zasilania dyszy w sprężone powietrze (4), urządzenia do pomiaru parametrów sprężonego powietrza (5) oraz wymiennej dyszy odmuchowej (6).



Rys. 4.17. Wirtualny model sekcji odmuchu:

- 1) stacja przygotowania powietrza, 2) tłokowy zespół sprężania powietrza, 3) zbiornik buforowy,
- 4) zawór elektromagnetyczny, 5) miernik sprężonego powietrza, 6) dysza odmuchowa

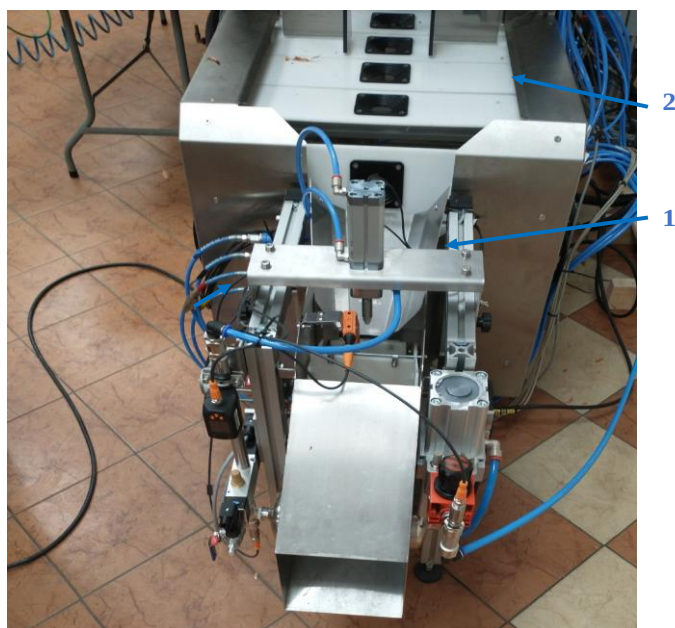
Sekcja odmuchu została wyposażona w szereg czujników pomiarowych do odczytu ciśnienia zasilania dysz, objętościowego natężenia przepływu oraz wydatku. Dodatkowo, układ został wyposażony w innowacyjny tłokowy zespół sprężania powietrza (rys. 4.18), umożliwiający multiplikację ciśnienia wejściowego w stosunku 2:1, co pozwala na osiągnięcie ciśnienia na wyjściu urządzenia 4 do 16 bar.



Rys. 4.18. Tłokowy zespół sprężania powietrza zaimplementowany na stanowisku badawczym (Metal Work)

Powyższe działania umożliwiły przeprowadzenie badań dotyczących wpływu ciśnienia na proces obróbki cebuli w jej szerszym zakresie. Wyniki uzyskanych badań na stanowisku pozwolą ocenić jego wpływ na efektywność oczyszczania oraz ilość powstałego odpadu. Bezpośrednio za układem sprężania powietrza zastosowano zbiornik buforowy o objętości 2 litrów, mający na celu utrzymanie stałego poziomu ciśnienia zasilania przy periodycznej pracy dyszy odmuchowej. Następnie zamontowano rozdzielacz elektromagnetyczny, umożliwiający automatyczne sterowanie przedziałami czasu otwarcia i zamknięcia dostępu sprężonego powietrza, co umożliwia pomiary parametrów sprężonego powietrza dla każdej analizowanej cebuli.

Fizyczny prototyp stanowiska do oczyszczania cebuli zaprojektowany i opracowany został w Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznańskim Instytucie Technologicznym w Poznaniu. Opracowane w ramach pracy stanowisko do odmuchu suchej łuski zostało zintegrowane ze stanowiskiem usuwania korzenia i szczyptoru wyposażonym w przenośnik łańcuchowy zawierający gniazda obróbcze cebuli (rys. 4.19). Po procesie usuwania korzenia i szczyptoru cebule cyklicznie w odpowiednich interwałach czasu podawane są do układu odmuchowego. Takie rozwiązanie gwarantuje powtarzalność przygotowywanych prób do badań wstępnych i zasadniczych.

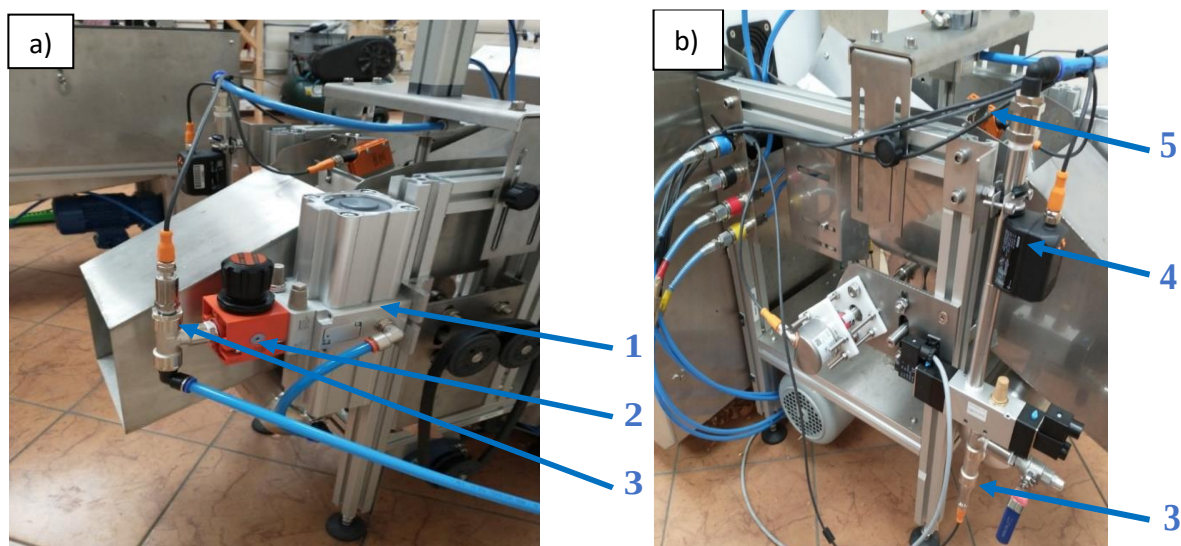


Rys. 4.19. Stanowisko do oczyszczania cebuli:

1) stanowisko odmuchu suchej łuski, 2) stanowisko usuwania korzenia i szczyptoru

Układ sekcji odmuchowej wraz z obrotowym systemem rolek, który wprawia w ruch odmuchiwaną cebulę, został oparty na istniejących rozwiązaniach wykorzystywanych w liniach do obróbki cebuli. Unikalnym elementem tego układu odmuchu (rys. 4.20) jest zastosowanie innowacyjnego tłokowego systemu sprężania powietrza (1) wyposażony w reduktor ciśnienia (2), co umożliwia badania przy ciśnieniu zasilania dysz do 12 barów. Ta wartość odpowiada maksymalnemu ciśnieniu generowanemu przez wyspecjalizowane

kompresory powietrza w przemyśle. Dla celów pomiarowych w układzie zastosowano także szereg czujników pracujących w systemie IO-Link firmy IFM, takich jak dwa czujniki ciśnienia PV7003 (3) oraz urządzenie do pomiaru natężenia przepływu oraz zużycia sprężonego powietrza SD6500 (4). Ponadto wykorzystano laserowy czujnik odległościowy 05D150 IO-Link IFM (5) do szacowania czasu przebywania cebuli na rolkach obrotowych.



Rys. 4.20. Wzmacniacz ciśnienia układu odmuchowego:
a) widok z prawej, b) widok z lewej (Metal Work)

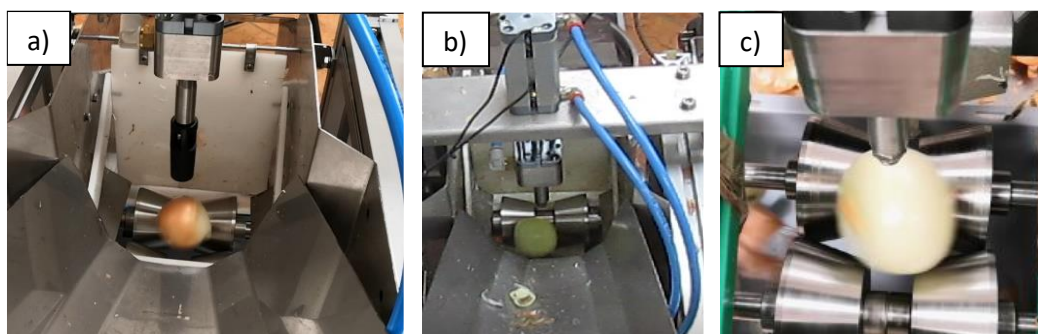
Na opracowanym stanowisku badawczym przeprowadzono badania wstępne i zasadnicze wykorzystując zależności wyznaczonych parametrów fizycznych cebul oraz parametrów procesowych odmuchu suchej łuski. Zastosowane czujniki pomiarowe posłużyły wyznaczaniu zakresów podstawowych parametrów procesowych, obejmujących ciśnienie zasilania, czas odmuchu oraz natężenie przepływu i zużycie sprężonego powietrza.

4.4. Badania wstępne procesu usuwania suchej łuski

4.4.1. Analiza efektywności oczyszczania wybranych dysz odmuchowych

Na stanowisku odmuchu suchej łuski przeprowadzono badania, które polegały na ocenie efektywności oczyszczania zależnie od wybranych dysz odmuchowych. Po procesie odmuchu każdorazowo cebule poddane zostały wizualnej ocenie jakości oczyszczenia, na podstawie wskaźnika *RTY*, wyznaczonego w rozdziale 2.1.1. Badania przeprowadzono przy ciśnieniu zasilania równym 8 bar oraz czasie odmuchu 1,2 s z wykorzystaniem 50 szt. cebul na każdą próbę (rys. 4.21).

Z uwagi na konstrukcje oraz różne długości wybranych dysz i wielkości cebuli w zakresie od 40 do 100 mm, każdorazowo dla danej dyszy dostosowano układ odmuchu, aby zachować stałą odległości pomiędzy dyszą a cebulą.



Rys. 4.21. Badania efektywności oczyszczania wybranych dysz odmuchowych:

a) dysza Venturiego D-BLP, b) dysza CCP 1.5A, c) dysza MSA 1

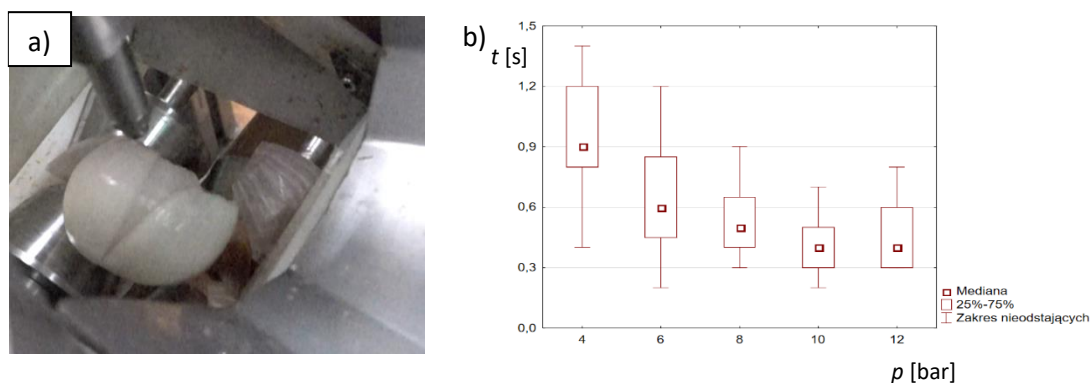
Wyniki badań efektywności oczyszczania wybranych dysz odmuchowych poddano analizie statystycznej (tabela 4.8). Największe wartości stopnia oczyszczenia wykazały dysze punktowe CCP 1.5A, MSA 1 i LPZ-SD. Pozwoliło to zidentyfikować związek między wysoką skutecznością oczyszczania a zastosowaniem dysz punktowych.

Tabela 4.8. Analiza statystyczna efektywności oczyszczania

Zmienna	Dysze	M	Min	Max	Q1	Q3	Rozstęp	SD
E_f [%]	CCP 1.5A	63,80	58	68	62	66	10	3,90
	MSA 1	56,40	50	62	54	60	12	4,77
	LPZ-SD	61,60	54	68	58	66	14	5,73
	D-BLP	35,20	30	40	32	38	10	4,15
	PVT-14-SS	23,60	16	28	20	28	12	5,37
	PetraGUN	38,80	32	46	36	42	14	5,40

Wśród dysz odmuchowych największą efektywnością oczyszczania równą 63,80% charakteryzowała się dysza CCP 1.5A. Ponadto na podstawie wyników opisanych w rozdziale 4.2.1, wykazuje ona najkorzystniejszy stosunek siły odmuchu do zużycia powietrza. W związku z powyższym dysza punktowa CCP 1.5A została wybrana do dalszych badań, w których wyznaczono jej parametry procesowe, obejmujące przebiegi natężenia przepływu dla wybranych nastaw ciśnienia i czasu dostępu sprężonego powietrza.

W pierwszej kolejności przeprowadzono badania celem określenia rzeczywistego czasu usuwania suchej łuski z cebuli przy nastawach ciśnienia zasilania w zakresie od 4 do 12 bar. Do badań wykorzystano aparat Sony Cyber-shot DSC-RX10 IV o matrycy umożliwiającej wykonywanie 1000 klatek/s. Na podstawie po klatkowej analizy zdjęć uzyskanych z nagrań, możliwe było określenie przedziałów czasu oderwania się łuski od cebuli od pojawienia się jej na rolkach obrotowych podczas jej odmuchu. Wyniki badań posłużyły do wyznaczenia zakresów czasu dostępu sprężonego powietrza do odmuchu pojedynczych cebul, regulowanego za pomocą zaworu elektromagnetycznego (4) opisanego na rys. 4.17. Dla wybranej dyszy CCP 1.5A wyniki przedstawiono na rys. 4.22 uwzględniając jej wartości graniczne w postaci kwartyli górnych (Q1) oraz dolnych (Q3).

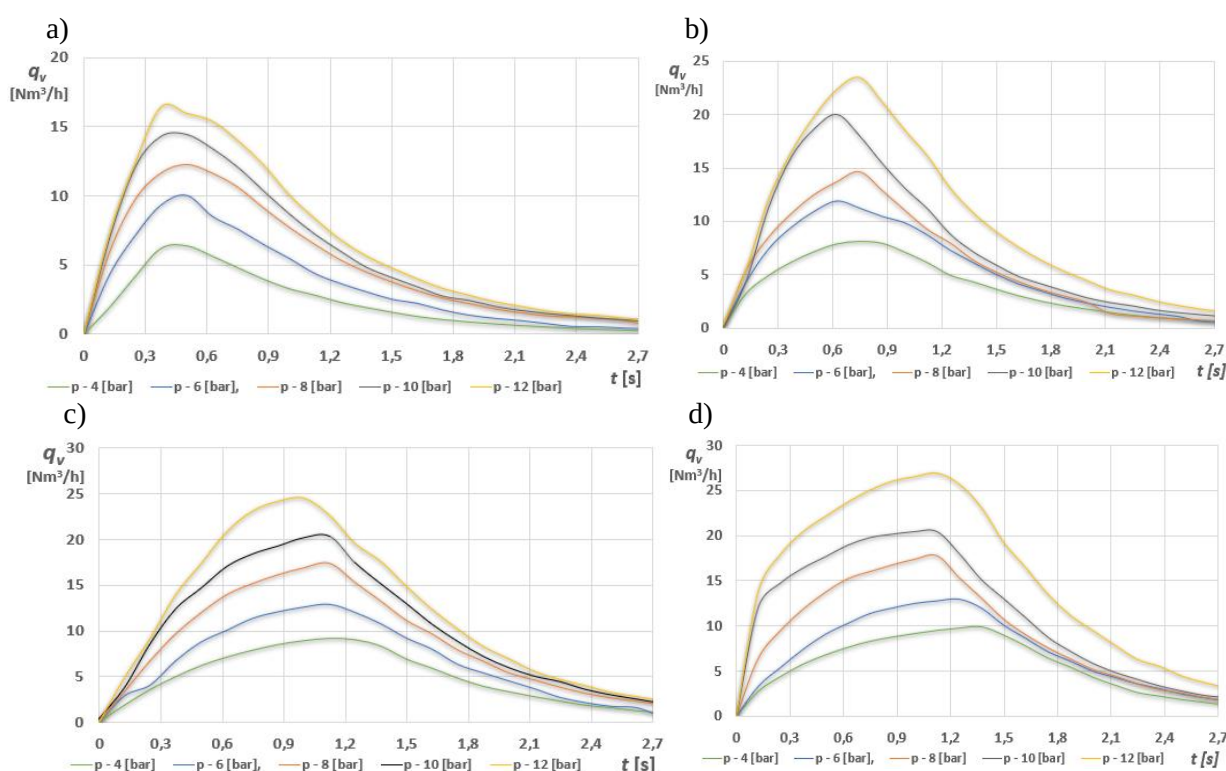


Rys. 4.22. Badania wyznaczania czasu oczyszczenia cebuli:

a) klatka obrazu z badań odmuchu , b) wyniki badań czasów oczyszczenia

Wyznaczenie wartości granicznych pozwoliło zaobserwować występowanie różnic czasu oczyszczania względem wartości ciśnienia zasilania, które mieściły się w zakresie od 0,3 do 1,2 s. Ponadto dla niższych nastaw ciśnienia wymagany jest większy przedział czasu odmuchu.

Z tego względu przeprowadzono badania odmuchu dla pojedynczej cebuli (jeden cykl odmuchu) w celu wyznaczenia rozkładów natężenia przepływu sprężonego powietrza przy zmiennej wartości czasu i ciśnienia zasilania (rys. 4.23).



Rys. 4.23. Rozkład natężenia przepływu powietrza względem czasu otwarcia zaworu:

a) czas 0,3 s, b) czas 0,6 s, c) czas 0,9 s, d) czas 1,2 s

Wyniki badań pozwalają na obserwację rozkładów natężenia przepływu, w których osiągnięto amplitudy w czasie, które pokrywają się zakresem uzyskanych kwartyli (rys. 4 22). Zaobserwowano również wzrost natężenia przepływu od ciśnienia zasilania. Ponadto uzyskane przebiegi wykazują, iż proces rzeczywistego odmuchu cebuli trwa dłużej niż czas dostępu sprężonego powietrza regulowanego zaworem elektromagnetycznym.

Z tego powodu wyznaczono zużycie sprężonego powietrza za pomocą urządzenia SD 6500 firmy IFM dla pojedynczych cykli odmuchu cebuli uwzględniając również przepływ powietrza po czasie zamknięcia jego dostępu. Ich wyniki zestawiono względem analizowanych zakresów ciśnienia zasilania i czasu (tabela 4.9).

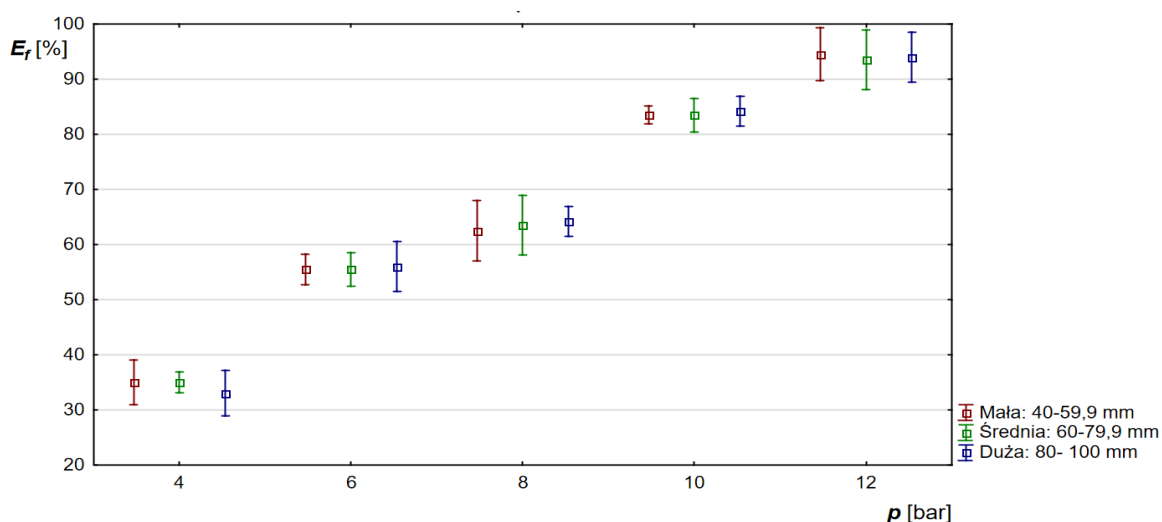
Tabela 4.9. Zużycie powietrza dla 1 taktu odmuchu, wyrażony [m³]

Parametr	p [bar]	t [s]			
		0,3 s	0,6 s	0,9 s	1,2 s
Q [m ³]	4	0,0019	0,0028	0,0036	0,0045
	6	0,0022	0,0036	0,0047	0,0056
	8	0,0028	0,0047	0,0064	0,0081
	10	0,0037	0,0059	0,0076	0,0087
	12	0,0044	0,0077	0,0097	0,0119

W pojedynczym cyklu procesu odmuchu wartość zużycia powietrza zwiększa się przy wyższych nastawach ciśnienia oraz dłuższym czasie dostępu powietrza. Z tego względu osiągnięto minimalną wartość zużycia powietrza równą 0,0019 m³ przy ciśnieniu zasilania równą 4 bar i czasie wynoszącym 0,3 s oraz maksymalną wartość równą 0,0119 m³ przy nastawach odpowiednio 12 bar i 1,2 s.

4.4.2. Wpływ wielkości cebuli na efektywność oczyszczania

W kolejnym etapie dokonano weryfikacji wpływu wielkości cebuli na efektywność oczyszczania. W tym celu przeprowadzono badania efektywności oczyszczania dla każdej z trzech grupy wielkości cebuli, określonej na podstawie pomiarów liniowych opisanych w rozdziale 4.1. Wyniki badań zestawiono względem ciśnienia zasilania w zakresie od 4 do 12 bar (rys. 4.24). Umożliwiło to na ocenę, czy wielkość cebuli wpływa istotnie na stopień jej oczyszczenia.



Rys. 4.24. Analiza efektywności oczyszczania cebuli względem jej wielkości

Dodatkowo przeprowadzono analizę statystyczną wyników badań (tabela 4.10), w której dla oczyszczanych trzech grup cebul wyznaczono współczynnik zmienności CV (*Coefficient of Variation*) efektywności oczyszczania względem ciśnienia zasilania. Ponadto, przeprowadzono analizę wariancji wieloczynnikowej ANOVA, aby sprawdzić, czy występują istotne różnice między efektywnością oczyszczania cebuli a jej wielkością, ustalone dla poziomu istotności $p < 0,05$.

Tabela 4.10. Analiza statystyczna skuteczności oczyszczania względem ciśnienia

Parametr	p [bar]	M	Min	Max	$Q1$	$Q3$	Rozstęp	SD	CV	Wynik testu statystycznego
E_f [%]	4	31,46	21,67	46,67	25,83	37,50	25,00	8,12	24,80	F(14, 45) = 0,92, $p = 0,539$
	6	47,81	36,67	56,67	44,17	52,50	20,00	5,70	11,92	
	8	58,44	48,33	71,67	51,67	64,17	23,33	7,71	13,19	
	10	72,50	55,00	91,67	59,17	81,67	36,67	12,90	17,79	
	12	93,85	85,00	100,00	89,17	98,33	15,00	5,26	5,60	

Wyniki badań analizy wariancji potwierdziły, iż wielkość cebuli nie wpływa istotnie na wartość efektywności podczas jej oczyszczania. Wykazano ponadto statystycznie słabą zmienność efektywności oczyszczania względem wielkości cebuli. Największą zmienność, wynoszącą poniżej 25%, zaobserwowano przy ciśnieniu 4 bar. Zmienność ta znacznie zmniejszyła się do wartości 5,6% przy ciśnieniu 12 bar. W związku z powyższym

potwierdzono, iż wielkość cebul nie wpływa istotnie na poziom efektywności jej oczyszczania i nie podjęto się działań w kierunku wyznaczenia jej wpływu na parametry eksploatacyjne podczas badań zasadniczych.

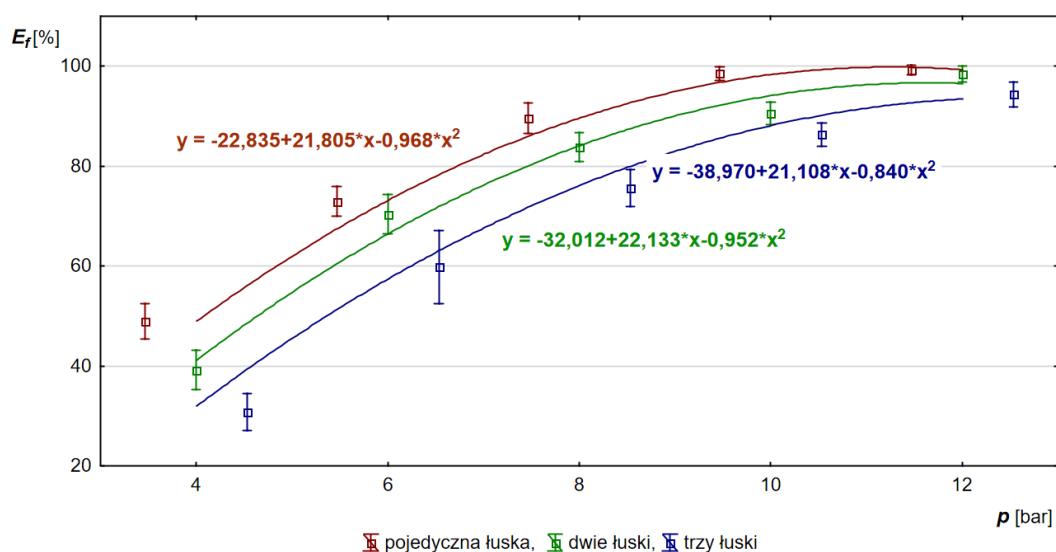
4.4.3. Wpływ ilości suchej łuski w cebuli na efektywność oczyszczania

Na stanowisku przeprowadzono badania dotyczące efektywności oczyszczania cebuli w zależności od ilości suchej łuski. Przygotowano cebule w ilości po 50 sztuk, które zawierały od jednej do trzech suchych łusek. Wyniki przedstawiono jako średnie wartości efektywności oczyszczania, dla których opracowano funkcję w postaci regresji wielomianowej, aby określić zmienność efektywności w zależności od ciśnienia zasilania (rys. 4.25). Ponadto, przeprowadzono analizę wariancji ANOVA, aby sprawdzić, czy występują istotne różnice między efektywnością oczyszczania cebuli a liczbą suchej łuski w cebuli.

Tabela 4.11. Analiza statystyczna efektywności oczyszczania cebuli względem ciśnienia zasilania

Parametr	p [bar]	Me	Min	Max	Q1	Q3	Rozstęp	SD	CV	Wynik testu statystycznego
E_f [%]	4	39,67	24	56	32	46	32	9,07	22,86	F (1,154)= 642,83; $p < 0,01$
	6	67,70	48	80	60	74	32	9,30	13,74	
	8	83,00	68	96	78	88	28	7,29	8,79	
	10	91,82	82	100	88	98	18	5,90	6,43	
	12	97,33	90	100	96	100	10	3,25	3,34	

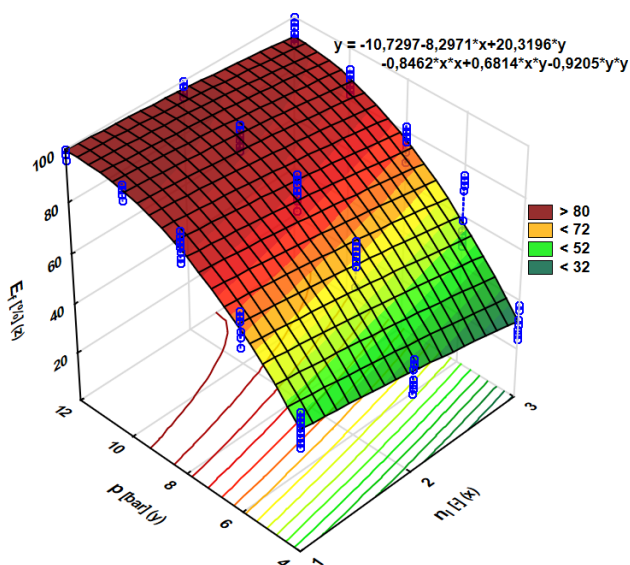
Na podstawie analizy statystycznej przedstawionej w tabeli 4.11 oraz wyników badań zaprezentowanych na rys. 4.25 wykazano, że efektywność oczyszczania zmniejsza się w zależności od liczby suchych łusek w cebuli.



Rys. 4.25. Wpływ ilości warstw na efektywność oczyszczania w funkcji ciśnienia

W przeprowadzonej analizie regresji zaobserwowano, że nachylenie dopasowania w postaci wielomianu jest podobne, a różnice w efektywności maleją wraz ze wzrostem ciśnienia zasilania. Największą zmienność efektywności, wynoszącą poniżej 23%, zaobserwowano przy ciśnieniu 4 bar. Zmienność ta znacznie spadła do wartości 3,34% przy ciśnieniu 12 bar.

W dalszym etapie podjęto działania mające na celu znalezienie jednej postaci ogólnej funkcji zależnej od ciśnienia zasilania oraz liczby suchych łusek, aby wprowadzić jedną funkcję aproksymującą do modelowego określania efektywności w programie aplikacyjnym (rys. 4.26).



Rys. 4.26. Wpływ liczby łusek oraz ciśnienia zasilania na efektywność oczyszczania

Przedstawiony na wykresie wpływ ilości łuski i ciśnienia zasilania na efektywność oczyszczania, pozwolił na wyznaczenie zależności powyższych zmiennych w postaci funkcji wielomianu drugiego stopnia:

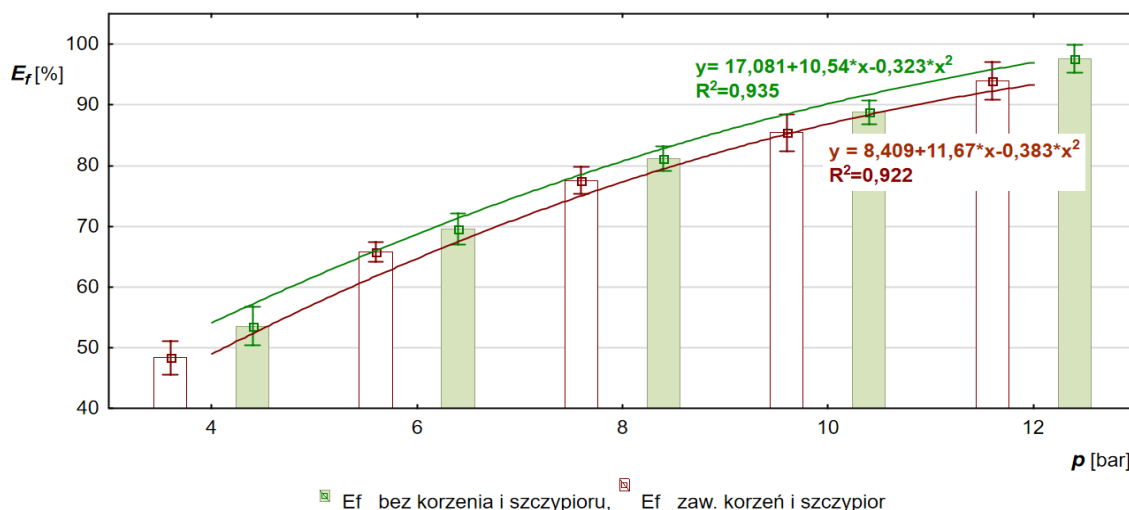
$$E_f(n_l, p) = -10,73 - 8,297n_l + 20,32p - 0,846n_l^2 + 0,681n_l p - 0,92 p^2 \quad (4.4.1)$$

Ogólna postać zależności powyższych zmiennych posłużyła jako funkcja korygująca poziom efektywności oczyszczania względem liczby łusek i ciśnienia zasilania. Ponadto, ta zależność została zaimplementowana w programie aplikacyjnym do generowania parametrów eksploatacyjnych procesu odmuchu.

4.4.4. Wpływ udziału korzenia i szczypioru na efektywność oczyszczania suchej łuski z cebuli

Ze względu na różnorodność metod oczyszczania suchej łuski w liniach obróbczych, możliwy jest odmuch cebuli zarówno z pozbawioną oraz zawierającą część korzeniową i szczypiorową. W związku z tym, konieczne jest zweryfikowanie wpływu ich udziału

na efektywność oczyszczania, aby umożliwić stosowanie aplikacji obliczeniowej w obu przypadkach. W tym celu przeprowadzono badania stanowiskowe, używając 50 cebul dla każdej próby badawczej, oceniając wpływ obecności części korzeniowej i szczypiorowej przy ciśnieniu zasilania w zakresie od 4 do 12 bar.



Rys. 4.27. Efektywność oczyszczenia względem udziału szczypioru i korzenia w cebuli

Na podstawie wyników badań (rys. 4.27) zaobserwowano, że przebiegi średnich wartości efektywności wykazują podobne nachylenia względem siebie. Dla cebuli pozbawionej szczypioru i korzenia osiągnięto większą efektywność w każdej wartości nastawy ciśnienia. W związku z tym wyznaczono krzywe dopasowania zmiennych w postaci wielomianu w funkcji ciśnienia, opierając się na regresji nieliniowej. Pozwoliło to na wprowadzenie korekty prognozowania efektywności w programie aplikacyjnym, uwzględniającej udział korzenia i szczypioru w procesie usuwania suchej łuski (tabela 4.12).

Tabela 4.12. Analiza statystyczna efektywności oczyszczania względem ciśnienia zasilania dla cebul z udziałem i bez udziału szczypioru i korzenia

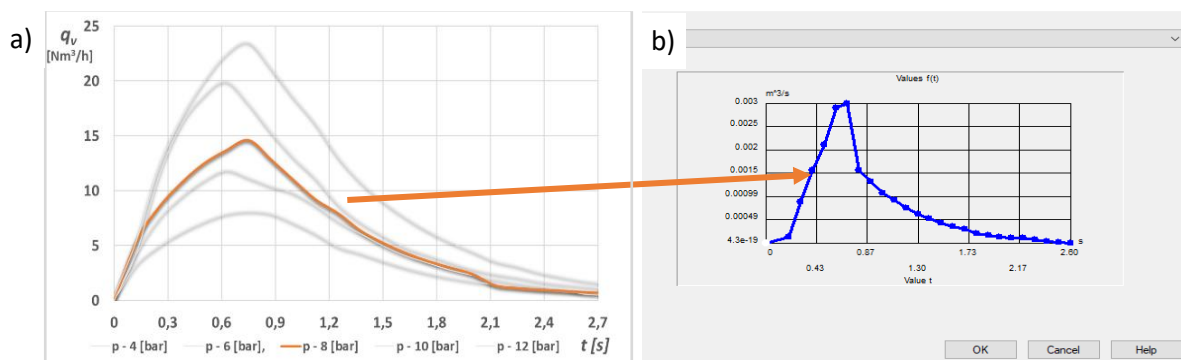
Parametr	p [bar]	Me	Min	Max	Q1	Q3	Rozstę p	SD	CV	Wynik testu statystycznego
E_f [%]	4	50,9	44	60	48	54	16	4,60	9,02	F (1,376) =2263,4; p<0,01
	6	67,6	62	74	65	70	12	3,31	4,89	
	8	78,8	72	84	76	82	12	3,55	4,51	
	10	87,1	78	92	84	90	14	3,86	4,44	
	12	95,8	88	100	92	100	12	4,15	4,33	

Wyniki badań analizy wariancji potwierdziły, iż udział szczypioru i korzenia istotnie wpływa na wartość efektywności podczas jej oczyszczania. Ponadto zaobserwowano, iż dla wyższych poziomów ciśnienia zmienność wobec jego poziomu efektywności maleje. Po mimo słabej zmienności dla określonych poziomów ciśnienia wykazano jej korzystną zależność dla cebul wstępnie obranych z korzenia i szczypioru.

4.4.5. Wpływ odległości dyszy od cebuli na prędkość strugi powietrza

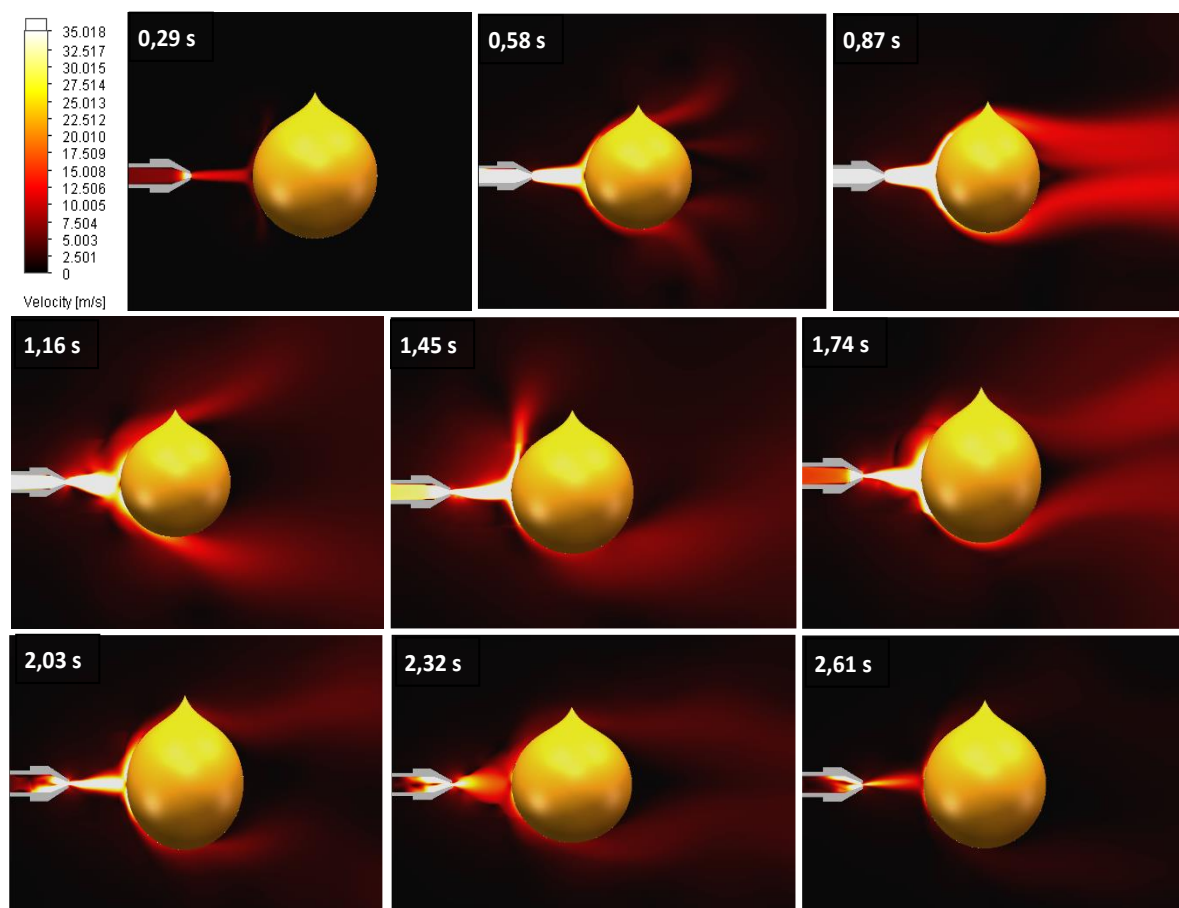
Celem wyznaczenia zależności prędkości odmuchu sprężonego powietrza od odległości mierzonej od wylotu dyszy do powierzchni cebuli, przeprowadzono symulacyjne badania przepływu powietrza z zastosowaniem metod numerycznych CFD (*Computational Fluid Dynamics*) [43]. Model dyszy odmuchowej oraz przestrzeń wokół zaprojektowanej cebuli poddano dyskretyzacji przy użyciu metody objętości skończonych (FMV – *Finite Volume Method*) [5,38]. W symulacji wykorzystano modele obliczeniowe RANS (*Reynolds-averaged Navier–Stokes equations*) [2], oparte o równania Naviera-Stokesa w postaci wektorowej. Umożliwiło to określenie profili prędkości w zależności od zmiennej wartości ciśnienia zasilania. Analizy komputerowe symulacji odmuchu przeprowadzono w programie Solid Works Flow Simulation, gdzie wykorzystano funkcję zmienności przepływu w czasie typu time-dependent.

Dla badanych przypadków obliczeniowych opracowano warunki brzegowe, opisane profilem natężenia przepływu na wlocie dyszy, który obejmował czas odmuchu wynoszący 2,6 s. Wartości te pozyskano z przebiegów natężenia przepływu sprężonego powietrza względem ciśnienia, wyznaczonych w rozdziale 4.4.1 i zaprezentowanych na rys. 4.23. Wprowadzone dane pozwoliły na wyznaczenie nowej modelowej krzywej, przedstawionej na rys. 4.28, gdzie na osi y umieszczono wartości natężenia przepływu, a na osi x wartości czasu odmuchu wynoszącego 2,6 s. Na rys. 4.29 przedstawiono reprezentatywny przykład procesu odmuchu pojedynczej cebuli dla ciśnienia zasilania wynoszącego 8 bar oraz czasu dostępności powietrza równego 0,6 s.



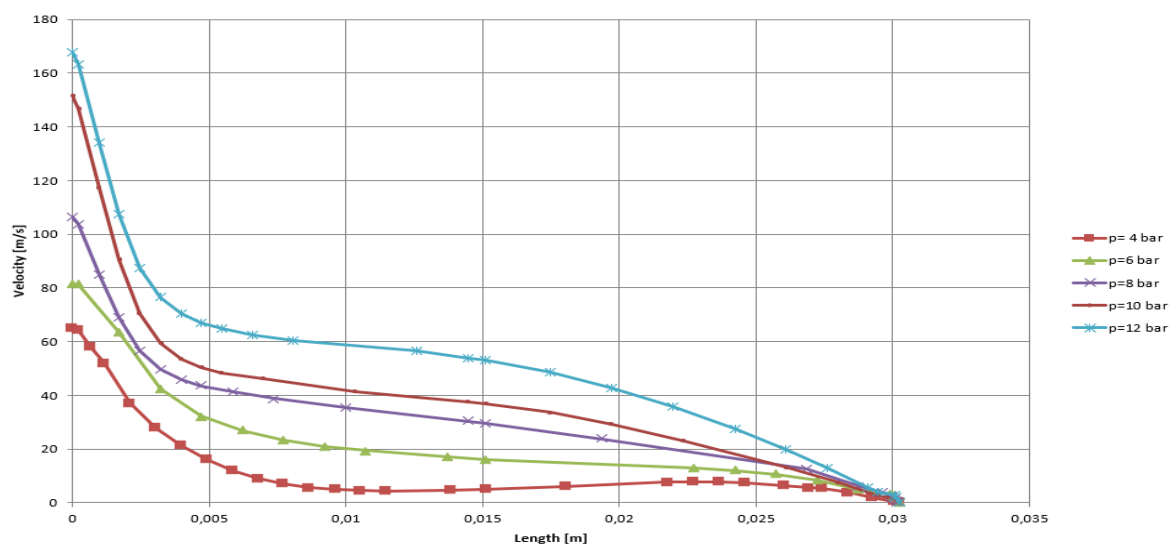
Rys. 4.28. Parametryzacja przepływu na wejściu dyszy odmuchowej

Badania symulacyjne zostały przeprowadzone w celu wizualizacji opływu sprężonego powietrza wokół cebuli, dla której w określonych interwałach czasowych wyznaczono rozkład prędkości powietrza (rys. 4.29). Całkowity czas określony w warunkach brzegowych został podzielony na równe przedziały czasowe, co odzwierciedla rzeczywiste warunki odmuchu w trakcie jednego cyklu oczyszczania pojedynczej cebuli. Podczas analizy symulacji, szczególną uwagę zwrócono na dynamikę przepływu powietrza, co pozwoliło na dokładne zaobserwowanie, jak zmienia się prędkość powietrza w trakcie trwania procesu.



Rys. 4.29. Wizualizacja rozkładu prędkości przepływu powietrza z krokiem $t_k=0,29$ s

Przeprowadzone analizy symulacyjne posłużyły wyznaczeniu rozkładu prędkości przepływu powietrza w funkcji ciśnienia. Wyznaczono profile prędkości powietrza mierzone w odcinku prostym wzdłuż osi dyszy, od jej wyjścia do powierzchni cebuli, których wyniki przedstawiono na rys. 4.30.



Rys. 4.30. Rozkład prędkości względem ciśnienia zasilania

Na podstawie powyższych wyników badań oraz wizualizacji zaobserwowano, iż prędkość strugi powietrza wychodzącej z dyszy maleje wraz ze wzrostem odległości. Zatem korzystne jest stosowanie dysz odmuchowych jak najbliżej odmuchiwanych cebul, co umożliwi uzyskanie większej wartości efektywności oczyszczenia. W przypadku powszechnie występujących cebul niesortowanych, ze względu na zróżnicowaną jej wielkość należy zachować odpowiednią odległość, aby nie powodować uszkodzeń mechanicznych cebuli podczas procesu odmuchu. Jednakże rozkład profili prędkości na wykresie pokazuje, iż dążenie do minimalizacji odległości dyszy od cebuli korzystnie wpływa na proces oczyszczenia cebul.

4.5. Analiza wyników badań wstępnych oraz wyznaczenie istotnych parametrów fizycznych cebuli

W ramach badań wstępnych przeprowadzono szereg analiz parametrów fizycznych cebuli dla czterech odmian: Wolska, Dormo, Centro oraz Armstrong. Analizy obejmowały średnicę podziałową, wysokość, twardość, masę oraz liczbę suchej łuski. Dzięki tym badaniom możliwe było wyznaczenie wzajemnych zależności pomiędzy parametrami, uwzględniając zmienność kształtu cebuli w zależności od jej wielkości oraz zmienność twardości w kontekście czasu przechowywania.

Na podstawie uzyskanych wyników zaobserwowano zmianę kształtu cebuli w zależności od średnicy podziałowej. Cebule o średnicy poniżej 80 mm charakteryzowały się kształtem elipsoidy wydłużonej, natomiast te o średnicy powyżej 80 mm przyjmowały bardziej kulisty kształt lub kształt elipsoidy spłaszczonej, osiągając współczynnik kulistości $Sc \geq 1$. Ze względu na kształt zbliżony do okręgu w przekroju poprzecznym, w dalszych pracach nie uwzględniano minimalnej średnicy podziałowej cebuli.

Na podstawie histogramów stwierdzono, że niezależnie od odmiany, najwyższą liczbę obserwacji objęto cebul mieszczących się w zakresie średnicy podziałowej od 40 do 100 mm, których średnia masa wynosiła od 85,66 do 201,70 g. Zaobserwowano również zmniejszenie twardości cebuli w miarę wydłużania się okresu ich przechowywania, osiągając wartości od 6,1 do 13,7 kG/cm².

W kolejnym kroku dokonano porównania parametrów użytkowych wytypowanych dysz odmuchowych. W badaniach uwzględniono ich siłę odmuchu, natężenie przepływu oraz zużycie powietrza względem zmiennych nastaw ciśnienia zasilnia oraz czasu dostępu sprężonego powietrza. Opracowane analizy statystyczne wyników badań wstępnych przeprowadzonych na maszynie wytrzymałościowej pozwoliły zaobserwować wzrost siły odmuchu względem ciśnienia zasilania, osiągając wartości średnie na poziomie od 1,69 N (dla dyszy CCP 1.5A) do 5,61 N (LPZ-SD) i zużycia powietrza w zakresie 0,017 m³ (CCP 1,5A) do 0,026 m³/h (D-BLP).

Przeprowadzono również dla wybranych dysz wstępne badania efektywności oczyszczania na opracowanym stanowisku badawczym. Wyniki badań wykazały istotną dodatnią zależność efektywności oczyszczania względem ciśnienia zasilania, których zakres wynosił odpowiednio od 28,08%, dla (4 bar, CCP 1.5A) do 87,8% (12 bar, CCP 1.5A). Ponadto wykazano wpływ ciśnienia na czas oczyszczania cebuli, co pozwoliło określić ich przedział w zakresie od 0,3 do 1,2 s.

W kolejnym kroku przeprowadzono szereg badań w celu oceny wpływu parametrów fizycznych cebuli na efektywność oczyszczania, uwzględniając wielkość cebuli, liczbę suchych łusek oraz udział korzenia i szczypioru w procesie odmuchu. W toku wykonanych badań na podstawie przeprowadzonych analiz statystycznych wykazano słaby wpływ wielkości cebuli na efektywność oczyszczania. Ponadto potwierdzono, iż liczba łusek w cebuli oraz obecność korzenia i szczypioru w procesie odmuchu wpływa na obniżenie efektywności oczyszczania. Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych wykazano, iż większa odległość dyszy od odmuchiwanej cebuli wpływa na zmniejszenie prędkości strugi sprężonego powietrza.

Reasumując w ramach podjętych badań wstępnych wyznaczono zakresy parametrów, które wykorzystano w badaniach zasadniczych, celem określenia ich wpływu na efektywność, ilość odpadu oraz zapotrzebowania na energię elektryczną:

- ciśnienie zasilania p : 4 – 12 bar,
- czas odmuchu t : 0,3 – 1,2 s,
- twardość cebul H_0 : 5,1 – 13,7 kG/cm²,
- okres przechowywania T : 0 – 12 m-c,
- dysza CCP 1,5 A o średnicy wylotowej 1,5 mm.

W ramach badań potwierdzono następujące zależności, których zmienność oraz wpływ poddany będzie ocenie w ramach badań zasadniczych:

- wartość średnicy podziałowej D_x powyżej 80 mm powoduje zmianę jej kształtu z elipsoidy wydłużonej do elipsoidy spłaszczonej,
- twardość cebul H_0 maleje wraz ze wzrostem okresu przechowywania T ,
- ciśnienie zasilania p wpływa silnie i dodatnio na poziom efektywności E_f ,
- wzrost ciśnienia zasilania p dysz odmuchowych powoduje wzrost siły F i natężenia przepływu q_v ,
- czas odmuchu t wpływa dodatnio i silnie na zużycie powietrza Q ,
- wykazano słabą zależność efektywności oczyszczania cebuli E_f od jej wielkości, opisaną średnicą podziałową D_x ,
- wzrost liczby suchych łusek n_l powoduje obniżenie efektywności E_f niezależnie od ciśnienia zasilania p ,
- cebule pozbawione korzenia i szczypioru podczas odmuchu wykazują wyższą efektywność oczyszczania względem cebul je zawierających,

- wytypowana dysza CCP 1.5A charakteryzuje się wysoką zależnością siły odmuchu i efektywności oczyszczania do zużycia powietrza i dlatego zastosowano ją w badaniach zasadniczych.

5. BADANIA ZASADNICZE ODMUCHU SUCHEJ ŁUSKI CEBULI, OBEJMUJĄCE WPŁYW CIŚNIENIA NA PARAMETRY EKSPLOATACYJNE PROCESU OCZYSZCZANIA CEBULI

5.1. Program badań zasadniczych odmuchu suchej łuski cebuli

Badania podstawowe zostały przeprowadzone na stanowisku badawczym w celu określenia parametrów eksploatacyjnych, takich jak ilość odpadu, skuteczność oczyszczania oraz zapotrzebowanie na energię elektryczną w odniesieniu do parametrów procesowych i fizycznych cebul. Wśród parametrów procesowych do badań wybrano ciśnienie zasilania, czas odmuchu, okres przechowywania, natężenie przechowywania oraz siłę odmuchu. W przypadku parametrów fizycznych cebul uwzględniono twardość cebul. Materiał badawczy pobierano z lokalnej uprawy z Gospodarstwa Rolnego Krzysztofa Korcza w Daszewicach w województwie wielkopolskim. W trakcie uprawy stosowano standardowe zabiegi agrotechniczne, takie jak nawadnianie i odchwaszczanie. Cebule były oczyszczone z kamieni, gleby oraz pozbawione zanieczyszczeń mikrobiologicznych (brak oznak pleśni na jej powierzchni). Do badań pobierano cebule w równych odstępach jej przechowywania przez okres 12 miesięcy, rozpoczynając od cebul świeżych, po 3, 6 i 9 miesiącach. Surowiec był przechowywany na pryzmie o wysokości do 3 m w zamkniętym pomieszczeniu z wentylacją grawitacyjną. Warunki przechowywania utrzymywano przy wilgotności względnej rzędu od 60 do 70% i temperaturze od 2 do 12°C. Czas realizacji badań od momentu pobrania partii cebuli od producenta nie przekraczał 4 godzin.

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem 100 sztuk cebul w każdej próbie, które przed procesem oczyszczania ważono za pomocą wagi laboratoryjnej RADWAG PS 4500\C\2. Przy użyciu penetrometru FT 327 firmy TR Turoni z głowicą pomiarową o średnicy 11,3 mm wyznaczono jej twardość. Cebule poddano procesowi oczyszczania z korzenia oraz szczypioru, a następnie procesowi odmuchu. Badania przeprowadzono dla zmiennych wartości ciśnienia zasilania w zakresie od 4 do 12 bar oraz czasu odmuchu w przedziale od 0,3 do 1,2 s. Zebrane dane zostały poddane analizie w celu określenia zależności parametrów eksploatacyjnych względem parametrów procesowych i fizycznych cebuli. Ponadto przeprowadzono ocenę jakościową oczyszczonej cebuli za pomocą wskaźnika *RTY*, na podstawie którego podejmowano decyzję, czy produkt finalny jest prawidłowo oczyszczony i nie zawiera części suchej łuski bądź przeznaczony jest do dalszego doczyszczania lub utylizacji. Na podstawie wskaźnika *RTY* wyznaczano efektywność oczyszczenia badanych cebul, które poddano analizie względem czasu odmuchu, okresu przechowywania i twardości w funkcji ciśnienia zasilania. Wyznaczono również efektywność oczyszczania względem natężenia przepływu oraz siły odmuchu.

W kolejnym kroku wyznaczono ilość odpadu zależną od tożsamyh parametrów jak w przypadku efektywności. W ostatnim kroku badań zasadniczych wyznaczono

zapotrzebowanie na energię układu odmuchowego zależnie od parametrów procesowych i fizycznych cebuli. Pozwoliło to na wyznaczenie zależności zapotrzebowania na energię w przeliczeniu na czas pracy układu, masę i pojedynczą sztukę oczyszczonej cebuli. Na podstawie powyższych wyników badań kluczowe było wyznaczenie tych zależności, które posłużą w aplikacji obliczeniowej do określenia kosztów procesu mechanicznego oczyszczania cebuli.

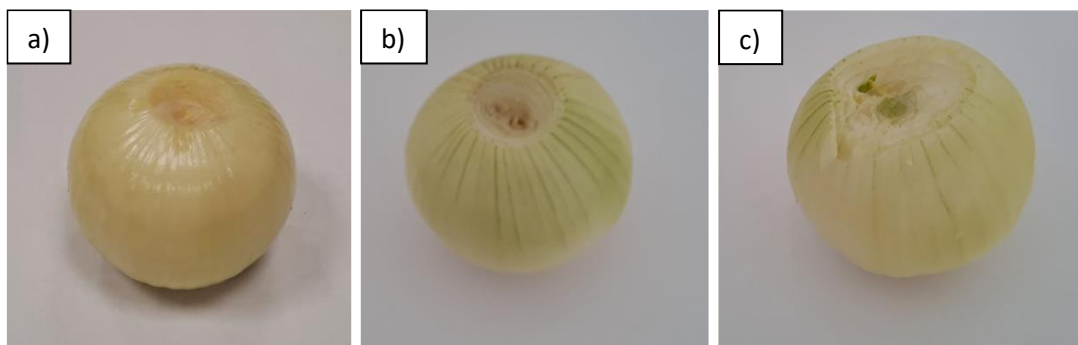
5.2. Badania zasadnicze oczyszczania cebuli

5.2.1. Ocena jakościowa cebuli oczyszczonej

Przeprowadzenie procedur oceny jakościowej cebuli odbywa się podczas badań zasadniczych dwuetapowo. Początkowo ocenie poddany jest surowiec w postaci cebuli przygotowywanej do procesu oczyszczania, który może zawierać uszkodzenia oraz zanieczyszczenia przyczyniające się do błędnej analizy efektywności oczyszczania. W następnym korku przeprowadzana jest ocena po procesie odmuchu suchej łuski, celem zdefiniowania poprawności wykonania eksperymentu przy zastosowaniu wizualnej analizy finalnego produktu. Ponadto w przypadku braku oceny wstępnej cebuli przed obróbką, ostateczny produkt może nie spełniać oczekiwań pod względem jakości i być niewłaściwy do dalszego przetwarzania. W przemyśle, etap oceny jakościowej przed przetwarzaniem cebuli odbywa się przede wszystkim na liniach sortowniczych, a po oczyszczeniu ocena prowadzona jest na rolkowym lub taśmowym stole inspekcyjnym.

Proces oceny jakościowej powinien obejmować analizę parametrów takich jak kształt, wielkość, twardość i ogólny stan cebuli. Dodatkowo, należy zwrócić uwagę na właściwości mechaniczne cebuli, aby uniknąć uszkodzeń podczas obróbki. Wprowadzanie surowca o odpowiedniej jakości do procesu oczyszczania jest korzystne dla osiągnięcia satysfakcjonującej jakości finalnego produktu. Doprecyzowując, ocena jakościowa cebuli przed i po zakończeniu procesu oczyszczania pozwala identyfikować ewentualne problemy, zoptymalizować parametry obróbki oraz minimalizować straty, co w rezultacie przekłada się na osiągnięcie wysokich standardów jakościowych produktu końcowego.

W celu określenia przydatności cebuli do dalszego przetwarzania po procesie mechanicznego oczyszczania, kluczowa jest analiza jakościowa finalnego produktu. Ocenę efektywności oczyszczania cebuli po procesie odmuchu, przeprowadzono przy użyciu wskaźnika *RTY* (opisanego w rozdziale 2.3.2). Analiza jakości cebuli po procesie odmuchu wskazuje na dalsze jej przeznaczenie, gdyż cebule zawierające elementy suchej łuski, zanieczyszczenia oraz wady wymagają ręcznego czyszczenia i są klasyfikowane jako produkty niezgodne. Kontrolę jakości przeprowadzono dla cebuli z całego okresu przechowywania, obejmując wszystkie etapy badań, w których wyszczególniono cebule bez widocznych niezgodności, oczyszczone w sposób prawidłowy i charakteryzujące się wysokimi walorami wizualnymi jako finalny produkt (rys. 5.1).

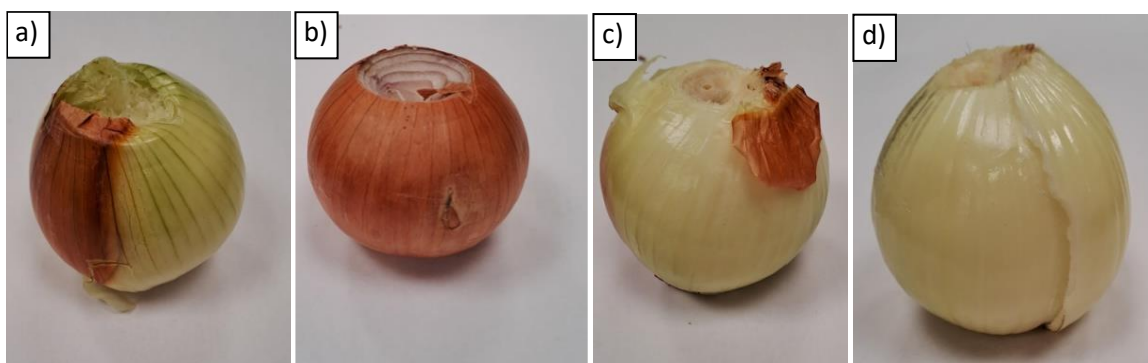


Rys. 5.1. Cebule prawidłowo oczyszczone:

- a) brak suchej łuski na powierzchni i w okolicy korzenia, b) brak suchej łuski na powierzchni i w okolicy szczypioru, c) dopuszczalne pęknięcia warstwy mokrej

Cebule zachowały gładką i czystą powierzchnię. Część cebul zawierała małe pęknięcia i oderwania zewnętrznej warstwy mokrej. Zarówno na powierzchni cebuli, jak i w okolicy wyciętego szczypioru i korzenia, nie zaobserwowano pozostałości w postaci suchej łuski. Pozbawione one zostały zanieczyszczeń i uszkodzeń mechanicznych, co przeciwdziałałoby procesowi gnicia. Powyższe wskaźniki definiują cebule jako gotowe do dalszego przetwarzania, bez konieczności doczyszczania ręcznego, określając je jako finalny produkt zgodny jakościowo.

W kolejnym etapie oceny jakości po procesie odmuchu podjęto działania ukierunkowane na wytypowanie cebul określonych błędem II rodzaju, które wymagałyby ręcznego doczyszczania, celem dopuszczenia ich do dalszego przetwarzania. W każdej próbie badań zasadniczych konieczna była ocena wizualna badanych cebul, których wyniki przedstawiono jako reprezentatywne przykłady otrzymanych cebul błędu II rodzaju (rys. 5.2).

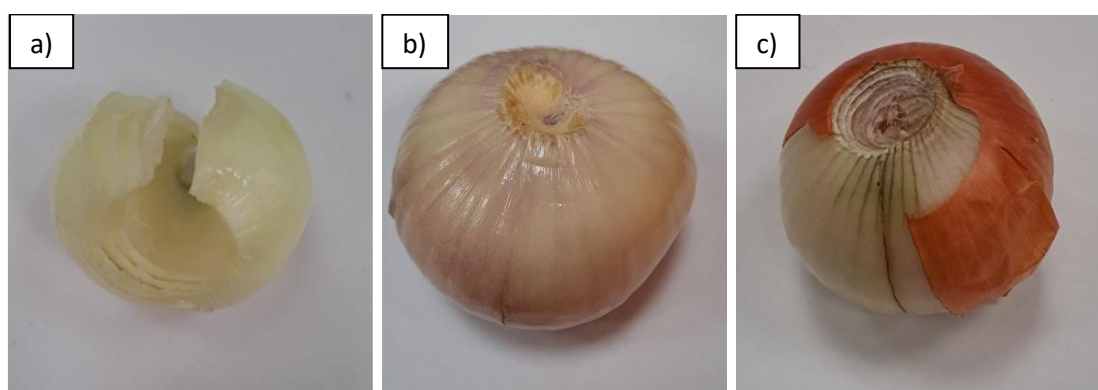


Rys. 5.2. Cebule wymagające doczyszczania:

- a) części suchej łuski na zewnętrznej warstwie, b) brak zdjętych warstw suchej łuski, c) pęknięcie warstwy mokrej, pozostałości suchej łuski, d) pęknięta zewnętrzna warstwa łuski mokrej

Cebule po procesie odmuchu nie zostały całkowicie pozbawione warstw zawierających suchą łuskę. Zaobserwowano cebule, które miały oderwania powierzchni zewnętrznej, zwłaszcza w okolicach szczypioru i korzenia wraz z elementami suchej łuski. Niemniej jednak wśród cebul nie stwierdzono uszkodzeń mechanicznych, takich jak trwałe wgniecenia wynikające z procesu. Występujące wady cebuli po procesie oczyszczania skutkują koniecznością ręcznego doczyszczania, jednak z punktu widzenia oceny procesu definiują je jako produkt niezgodny.

Ostatnią grupą cebul wytypowanych podczas badań, które zostały określone jako błąd I rodzaju, w przemyśle są przeznaczone do utylizacji z uwagi na powstałe poważne wady, uniemożliwiające ich usunięcie w celu uzyskania finalnego produktu bez niezgodności i przedstawiono wady powstałe po procesie odmuchu (rys. 5.3).



Rys. 5.3. Cebule przeznaczone do utylizacji:

a) uszkodzona cebula w procesie odmuchu , b) cebula ulegające gniciu, c) cebula ulegające gniciu od środka

Po procesie oczyszczania powstały cebule trwale uszkodzone, pozbawione części łodygowej, w której wszystkie warstwy uległy uszkodzeniu, tj. rozerwaniu. Wystąpiły również cebule, w których proces gnicia rozpoczął się przed procesem obróbki. Pomimo że te cebule zostały sklasyfikowane jako odpad, uwzględniono ich efektywność oczyszczenia z perspektywy procesowej, rozumianej jako cebule z usuniętą łuską jako zgodne (rys. 5.3, b, c).

Wyszczególniono cebule bez niezgodności produktowej, oczyszczone w sposób prawidłowy, określone błędem II rodzaju, wymagały doczyszczania oraz sklasyfikowane jako odpad określono błędem I rodzaju (tabela 5.1). Badania miały na celu ocenę wpływu ciśnienia i czasu odmuchu na jakość finalnego produktu, na podstawie którego definiowano jego zgodność. Przedstawione wyniki badań z uwzględnieniem ciśnienia zasilania, czasu odmuchu oraz wybranych odmian zaprezentowano w postaci wartości *RTY*, celem obserwacji wartości parametrów powodujących uszkodzenie odmuchiwaną cebuli.

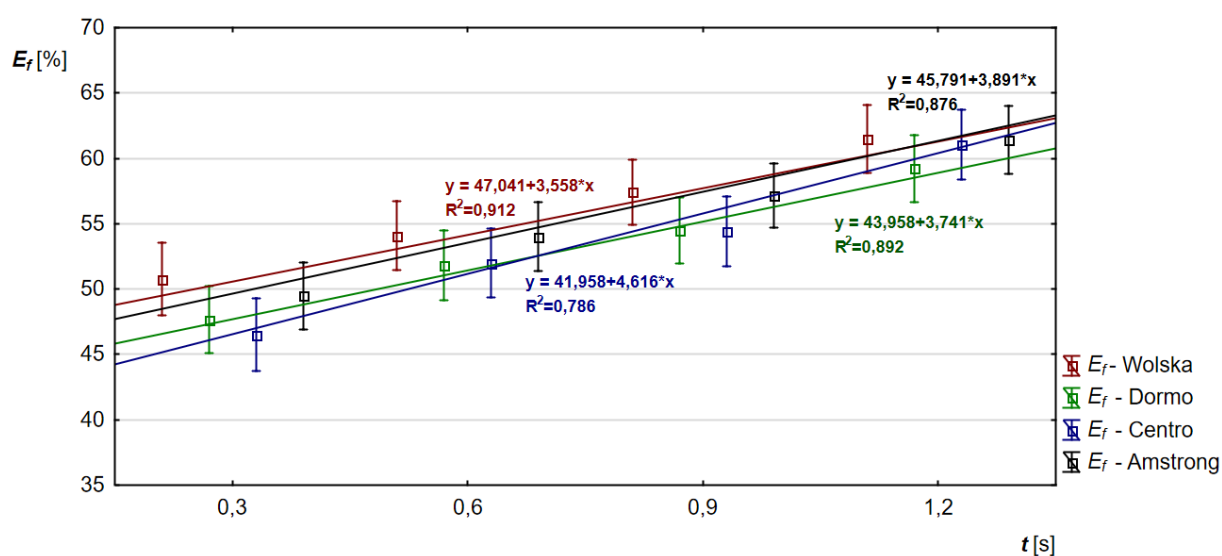
Tabela 5.1. Wskaźniki RTY [%] w funkcji ciśnienia zasilania i czasu odmuchu

Parametr		Odmiana	t [s]											
			0,3			0,6			0,9			1,2		
			Rodzaj błędu											
			0	II	I	0	II	I	0	II	I	0	II	I
p [bar]	4	Wolska	25	75	0	30	70	0	33	67	0	33	67	0
		Dormo	23	77	0	27	73	0	29	71	0	33	67	0
		Centro	20	80	0	26	74	0	26	74	0	27	73	0
		Armstrong	25	75	0	30	70	0	33	67	0	33	67	0
	6	Wolska	31	69	0	38	62	0	41	59	0	49	51	0
		Dormo	29	71	0	36	64	0	40	60	0	45	55	0
		Centro	27	73	0	34	66	0	37	63	0	49	51	0
		Armstrong	31	69	0	38	62	0	44	56	0	49	51	0
	8	Wolska	49	51	0	50	50	0	53	47	0	59	41	0
		Dormo	47	53	0	48	52	0	51	49	0	55	45	0
		Centro	43	57	0	49	51	0	50	50	0	61	39	0
		Armstrong	49	51	0	50	50	0	53	47	0	59	41	0
	10	Wolska	59	41	0	61	39	0	66	33	1	73	27	0
		Dormo	55	45	0	58	41	1	64	36	0	68	30	2
		Centro	58	42	0	61	37	2	69	30	1	77	23	0
		Armstrong	59	41	0	61	39	0	66	34	0	73	26	1
	12	Wolska	90	9	1	92	6	2	91	6	3	95	4	1
		Dormo	84	14	2	90	8	2	89	10	1	94	5	1
		Centro	86	13	1	90	9	1	90	8	2	93	6	1
		Armstrong	84	14	2	92	6	2	91	6	3	94	4	2

Niezależnie od odmian wzrost ciśnienia zasilania powoduje wzrost wartości procentowej cebul oczyszczonych prawidłowo, a zmniejsza się tym samym ilość cebul wymagających doczyszczenia (błąd rodzaju II). Wśród badanych cebul znikoma ich ilość została uszkodzona w procesie odmuchu (błąd rodzaju I), a wzrost jej wartości wykazano dla ciśnienia na poziomie od 10 do 12 bar.

5.2.2. Badania efektywności oczyszczania cebuli

W ramach badań przeprowadzono szczegółową analizę wpływu czasu odmuchu na efektywność oczyszczania cebuli. Do badań wykorzystano cztery odmiany cebuli: Wolska, Dormo, Centro oraz Armstrong. Każda odmiana była testowana przy czterech różnych ustawieniach czasu odmuchu, które wynosiły odpowiednio 0,3 sekundy, 0,6 sekundy, 0,9 sekundy i 1,2 sekundy. Przebieg doświadczenia polegał na określeniu efektywności oczyszczania dla każdej odmiany cebuli przy różnych czasach odmuchu. Uzyskane wyniki przedstawiono na wykresie (rys. 5.4), na którym zaprezentowano średnie wartości efektywności oczyszczania dla poszczególnych ustawień czasowych i zastosowano metodę regresji liniowej. Regresja liniowa pozwoliła na wyznaczenie funkcji dopasowania, która opisuje, jak zmienia się efektywność oczyszczania cebuli w zależności od czasu odmuchu.



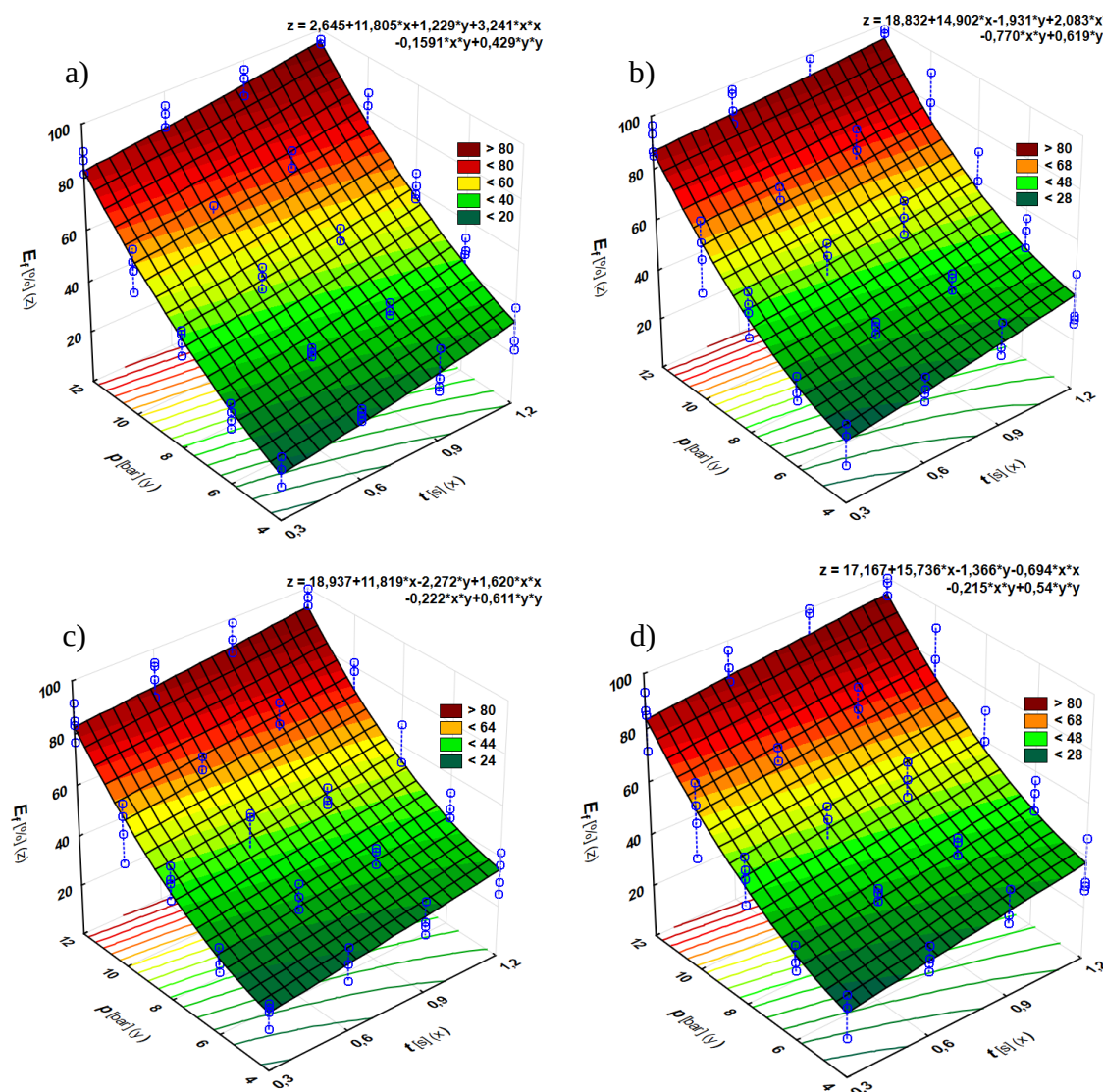
Rys. 5.4. Wpływ czasu odmuchu na poziom efektywności z uwzględnieniem odmian cebuli

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że efektywność oczyszczania cebuli wzrasta wraz z wydłużeniem czasu odmuchu dla wszystkich badanych odmian. Analiza wartości współczynników funkcji regresji wykazała, że różnice w wynikach zmniejszają się wraz ze wzrostem czasu. Ponadto przeprowadzono analizę statystyczną dotyczącą efektywności oczyszczania, co pozwoliło na określenie jej przedziałów względem czasu odmuchu (tabela 5.4).

Tabela 5.2. Analiza statystyczna efektywności oczyszczania względem czasu odmuchu

Parametr	t [s]	Me	Min	Max	Q1	Q3	Rozstęp	SD	CV
E_f [%]	0,3	47,72	13,91	91,07	27,64	64,08	77,17	23,84	49,98
	0,6	51,98	20,99	96,25	33,16	66,71	75,26	23,58	45,38
	0,9	55,07	25,05	98,33	37,22	74,27	73,28	22,74	41,33
	1,2	59,93	24,24	98,75	43,96	81,58	74,51	23,54	39,31

Ponadto, opracowano wyniki badań zależności efektywności oczyszczania od czasu odmuchu i ciśnienia zasilania, porównując je między poszczególnymi odmianami cebuli (rys. 5.5). Wyznaczono również ogólne zależności w postaci funkcji wielomianu drugiego stopnia, które pozwoliły prognozować efektywność oczyszczania w zależności od ustawień ciśnienia i czasu odmuchu. Dzięki temu można było dokładnie przewidzieć, jak zmiany tych parametrów wpłyną na proces oczyszczania, co było korzystne dla poprawy procesu obróbki.

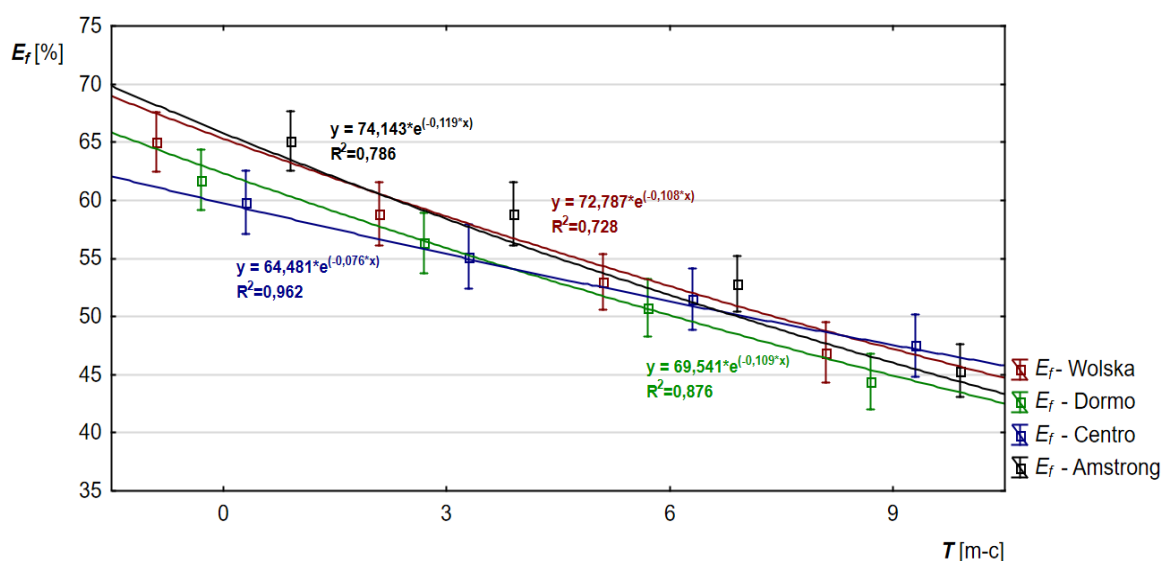


Rys. 5.5. Wpływ czasu odmuchu i ciśnienia na efektywność oczyszczania cebuli:
a) odmiana Wolska, b) odmiana Dormo, c) odmiana Centro, d) odmiana Armstrong

Badania wykazały, że pomiędzy zmiennymi, takimi jak ciśnienie i czas odmuchu a efektywnością oczyszczania cebuli istnieje dodatnia zależność. Zwiększenie ciśnienia i czasu w procesie odmuchu prowadzi do zwiększenia efektywności oczyszczania. Dodatkowo zaobserwowano, że efektywność oczyszczania jest silnie zależna od ciśnienia

zasilania, podczas gdy zależność od czasu odmuchu jest przeciętna. Zauważono także, że zmienność efektywności oczyszczania maleje przy wyższych wartościach czasu odmuchu. Na podstawie analizy statystycznej (tabela 5.4), stwierdzono, że wydłużenie czasu odmuchu przyczynia się do wzrostu efektywności o 10,33 p.p. przy ciśnieniu 4 bar oraz o 7,68 p.p. przy ciśnieniu 12 bar.

W kolejnym kroku przeprowadzono badania dotyczące wpływu okresu przechowywania cebuli na efektywność jej oczyszczania. Wyniki tych badań przedstawiono jako średnie wartości efektywności oczyszczania, dla których określono funkcje regresji wykładniczej, biorąc pod uwagę wybrane odmiany cebuli (rys. 5.6).



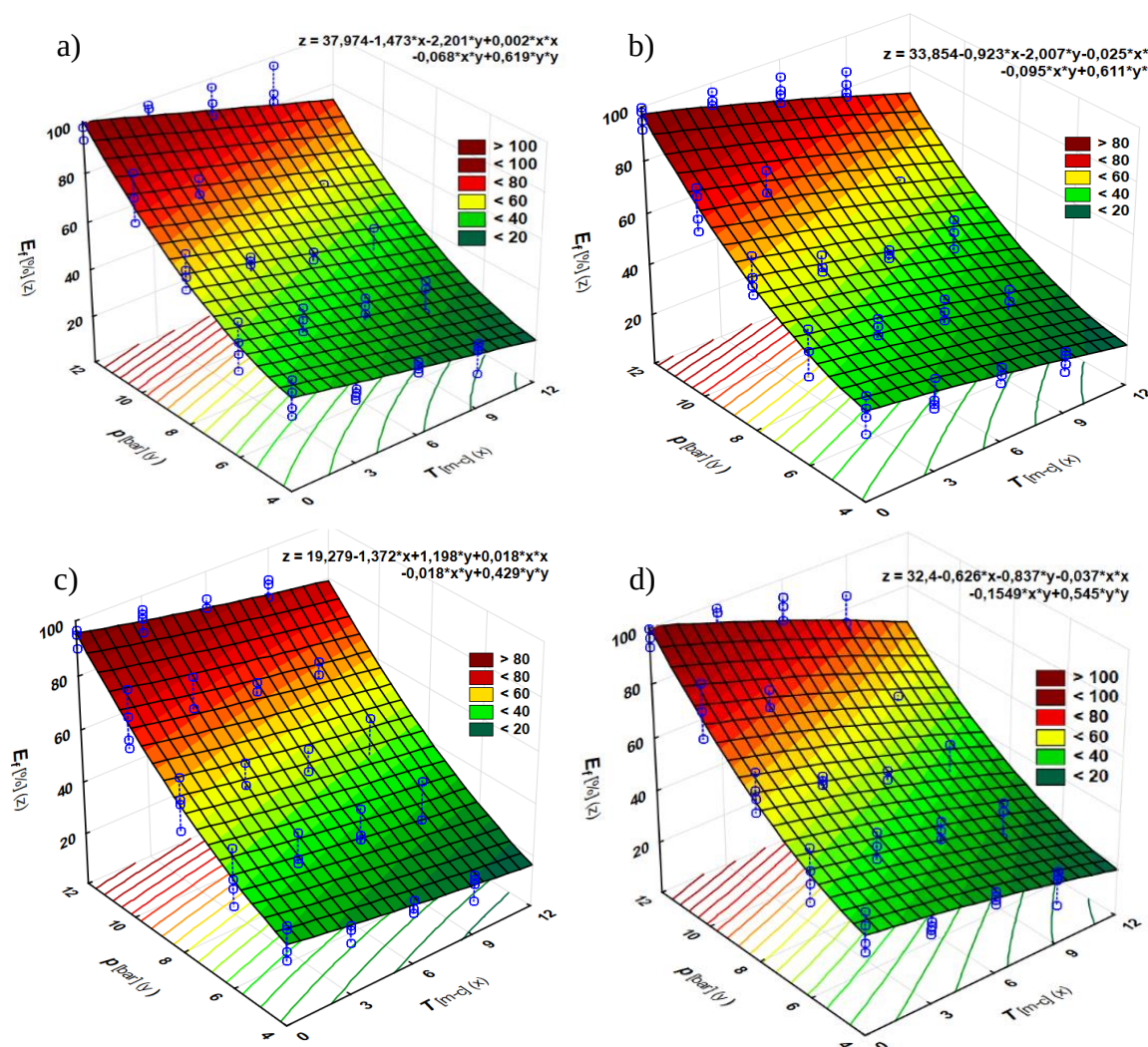
Rys. 5.6. Wpływ okresu przechowywania na poziom efektywności z uwzględnieniem odmian cebuli

Na podstawie wyników badań stwierdzono, że istnieje ujemna zależność między okresem przechowywania cebuli a efektywnością jej oczyszczania. W miarę wydłużania się okresu przechowywania, efektywność oczyszczania cebuli maleje. Ponadto, krzywe regresji wykazują zbliżoną zmienność efektywności dla różnych odmian cebuli, jednak w przypadku świeżej cebuli różnice w wynikach są większe. Zmienne te zestawiono w funkcji ciśnienia zasilania (rys. 5.7), dla których przeprowadzono analizę statystyczną zaprezentowaną w tabeli 5.3.

Tabela 5.3. Analiza statystyczna efektywności oczyszczania względem okresu przechowywania

Parametr	T [m-c]	Me	Min	Max	Q1	Q3	Rozstęp	SD	CV
E_f [%]	0-3	62,01	27,75	98,75	41,89	82,26	71,00	23,43	37,84
	3-6	55,79	24,02	96,41	34,83	74,70	72,39	23,72	42,56
	6-9	51,25	23,16	92,57	32,24	62,04	69,40	22,13	43,19
	9-12	45,64	13,91	88,83	26,49	56,95	74,92	22,84	50,04

Ponadto, opracowano wyniki badań zależności efektywności oczyszczania od okresu przechowywania i ciśnienia zasilania, porównując je między poszczególnymi odmianami cebuli (rys. 5.7). Wyznaczono również ogólne zależności w postaci funkcji wielomianu drugiego stopnia, które pozwoliły prognozować efektywność oczyszczania w zależności od jej okresu przechowywania oraz ciśnienia zasilania.



Rys. 5.7. Wpływ okresu przechowywania i ciśnienia zasilania na efektywność oczyszczania cebuli;
a) odmiana Wolska, b) odmiana Dormo, c) odmiana Centro, d) odmiana Armstrong

Przedstawione na rys. 5.7 wyniki badań wykazały, że pomiędzy okresem przechowywania cebuli a efektywnością oczyszczania cebuli istnieje ujemna zależność. Im dłużej przechowywane są cebule tym efektywność ich oczyszczania się zmniejsza, niezależnie od nastawy ciśnienia zasilania. Zauważono także, że zmienność efektywności oczyszczania zmniejsza się przy wyższych wartościach okresu przechowywania. Na podstawie analizy statystycznej (tabela 5.3), stwierdzono, że wydłużenie okresu przechowywania cebuli przyczynia się do zmniejszenia efektywności oczyszczania o 13,84 p.p. przy ciśnieniu 4 bar oraz o 10,37 p.p. przy ciśnieniu 12 bar.

Istotne różnice w efektywności oczyszczania cebuli wynikają ze zmiany jej twardości, która zależy od czasu przechowywania. Dlatego przed rozpoczęciem zasadniczych badań każdorazowo przeprowadzano pomiar twardości cebuli. Wyniki tych pomiarów zostały zestawione według różnych okresów ich pobierania oraz odmian cebuli. (tabela 5.4).

Tabela 5.4. Analiza statystyczna twardości cebuli przeznaczonej do badań zasadniczych

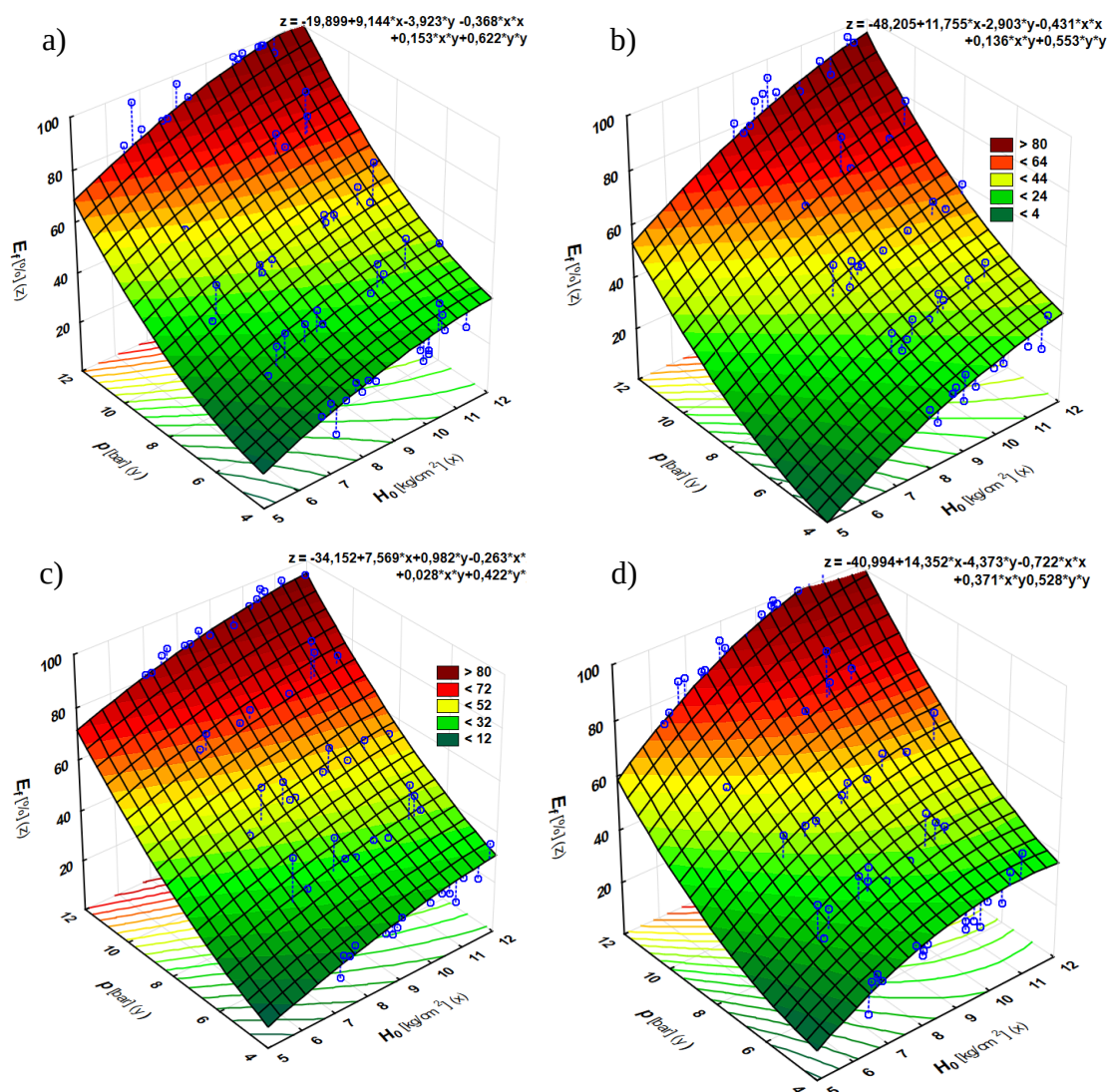
T [m-c]	Odmiana	M	Min	Max	Rozstęp	SD	CV
0-3	Wolska	11,13	10,30	12,42	2,12	0,62	5,61
	Dormo	12,58	11,58	13,64	2,06	0,66	5,29
	Centro	11,53	10,53	12,58	2,05	0,63	5,48
	Armstrong	10,37	9,48	11,32	1,84	0,55	5,33
3-6	Wolska	9,88	8,20	10,22	2,02	0,43	4,35
	Dormo	10,79	9,74	11,60	1,86	0,57	5,26
	Centro	10,17	9,56	10,93	1,37	0,42	4,17
	Armstrong	9,14	7,89	9,84	1,95	0,47	5,10
6-9	Wolska	8,00	7,65	8,44	0,79	0,24	2,96
	Dormo	9,14	8,60	9,94	1,34	0,41	4,49
	Centro	8,68	8,21	9,12	0,91	0,25	2,91
	Armstrong	7,85	7,42	8,41	0,99	0,24	3,10
9-12	Wolska	6,93	6,19	7,63	1,44	0,41	5,96
	Dormo	8,37	7,83	8,97	1,14	0,34	4,08
	Centro	7,08	5,20	7,69	2,49	0,73	10,32
	Armstrong	6,62	6,31	6,94	0,63	0,19	2,81

Przedstawione wyniki analizy statystycznej pozwoliły wyznaczyć twardość cebuli wynoszącą od 5,20 do 13,64 kG/cm² w okresie 12 miesięcy ich przechowywania. Cebule świeże i przechowywane do 3 miesięcy charakteryzują się wysoką twardością w zakresie od 10,30 do 13,64 kG/cm², a cebule przechowywane najdłużej cechują się twardością w zakresie 5,2 do 8,94 kG/cm².

Wykazano również słabą zmienność wyników twardości wśród badanych odmian. Opracowano w tym celu zależności efektywności oczyszczania od twardości cebuli dla poszczególnych poziomów ciśnienia zasilania sprężonego powietrza, dla których wyznaczono regresje funkcji wykładniczej dla wyszczególnionych odmian (rys. 5.8).

W zależności od okresu przechowywania, analiza efektywności oczyszczania w kontekście twardości cebuli dostarcza szerszego obrazu oceny jej jakości, co pozwala na precyzyjne definiowanie tego parametru. Dzięki temu eliminujemy potrzebę weryfikacji warunków przechowywania cebuli przez cały rok oraz ich ewentualnych zmian. Ta metoda

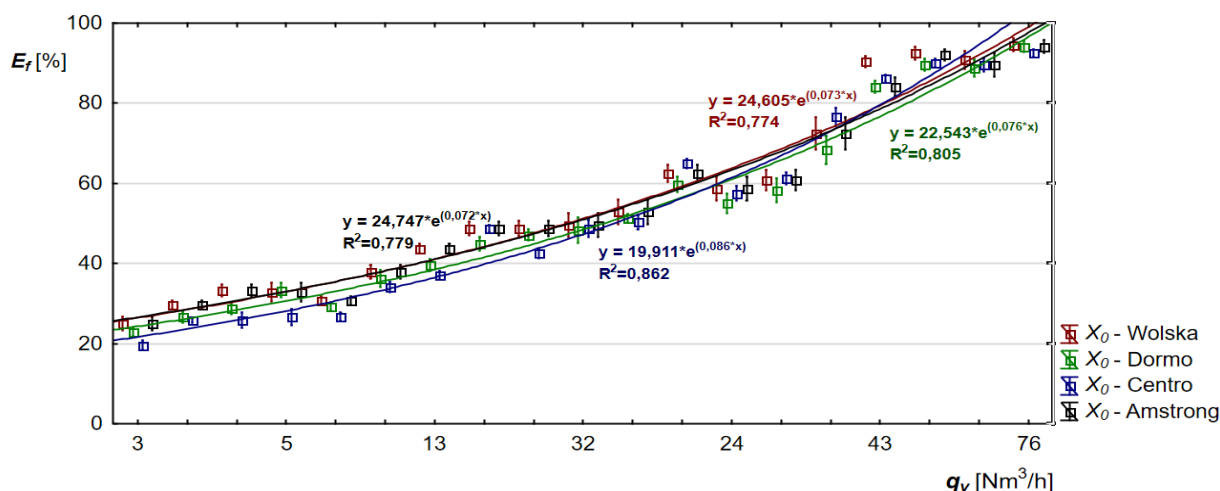
dotycząca oceny twardości cebuli jest znacznie prostsza i dokładniejsza niż opieranie się na okresie jej przechowywania.



Rys. 5.8. Wpływ twardości cebuli i ciśnienia zasilania na efektywność oczyszczania;
a) odmiana Wolska, b) odmiana Dormo, c) odmiana Centro, d) odmiana Armstrong

Przedstawione wyniki badań umożliwiły zaobserwowanie, że pomiędzy twardością cebuli i ciśnieniem zasilania a efektywnością oczyszczania cebuli istnieje dodatnia zależność. Im cebule charakteryzują się większą twardością tym efektywność ich oczyszczania również się zwiększa. Zauważono także, że zmienność efektywności oczyszczania dla wyższych wartości ciśnienia nie zmienia się istotnie w całym przedziale jej twardości cebuli.

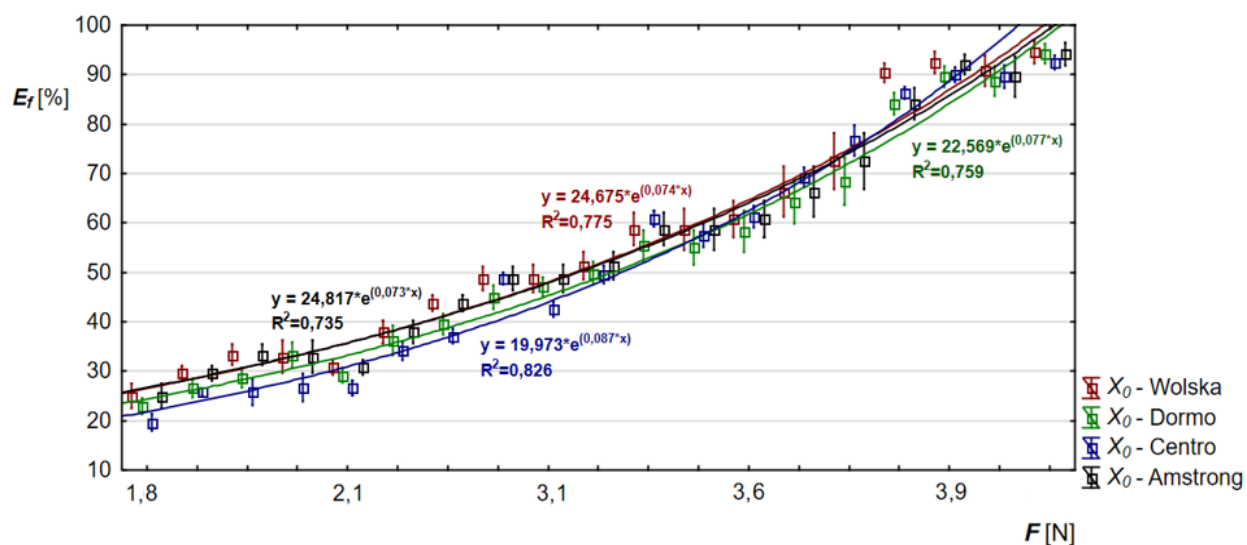
W kolejnym etapie przeprowadzono badania wpływu natężenia przepływu na efektywność oczyszczania, dla których wyznaczono funkcje regresji wykładniczej dla wybranych odmian cebuli (rys. 5.9).



Rys. 5.9. Wpływ natężenia przepływu na efektywność oczyszczania

Zaobserwowano dodatnią zależność efektywności oczyszczania od natężenia przepływu. Im większa jest wartość natężenia przepływu sprężonego powietrza tym efektywność oczyszczania wzrasta, a wyznaczone krzywe regresji w postaci wykładniczej charakteryzują się wysoką dokładnością dopasowania do wartości średnich wyników badań i zbliżoną zmiennością względem analizowanych odmian. Na podstawie nachylenia funkcji zaobserwowano, iż natężenie przepływu istotnie wpływa na efektywność oczyszczania cebuli, w której w zakresie od 3 do 76 Nm^3/h wartość średnia efektywności oczyszczania ulega zmianie w zakresie od 21 do 93%.

W ostatnim etapie przeprowadzono badania wpływu siły odmuchu na efektywność oczyszczania. Na wykresie (rys. 5.10) przedstawiono wyniki badań wpływu powyższych zmiennych względem analizowanych odmian. Wyznaczono funkcje regresji dla wartości średnich efektywności, celem obserwacji czy występują różnice wyników względem odmian.



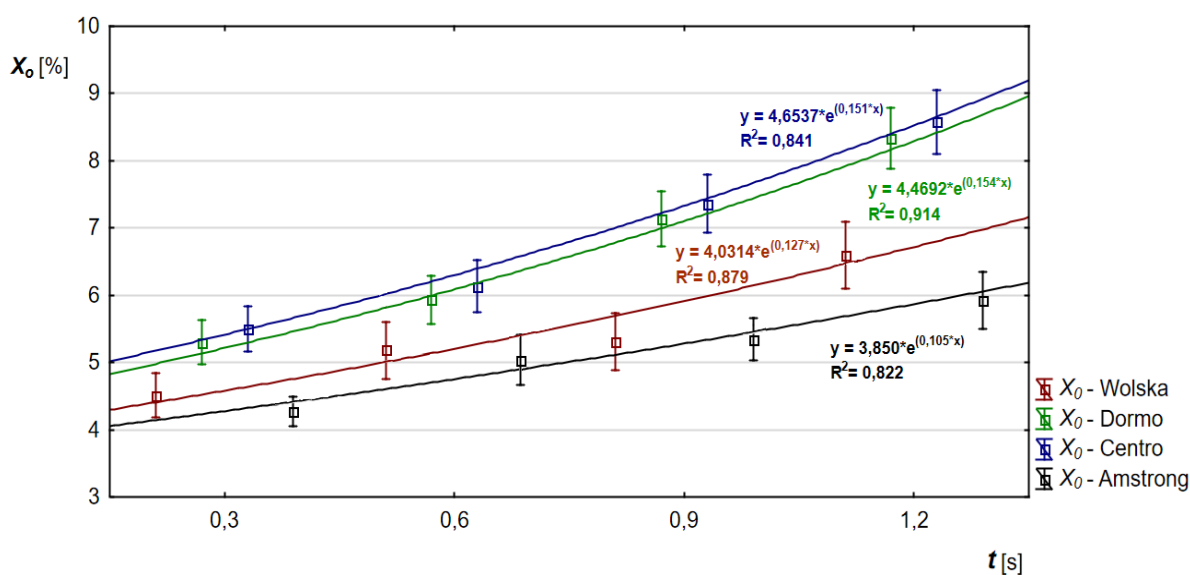
Rys. 5.10. Wpływ siły odmuchu na efektywność oczyszczania

Zaobserwowano, iż im wyższa jest wartość siły odmuchu tym efektywność oczyszczania cebuli zwiększa się. Ponadto krzywe regresji są do siebie zbliżone, co świadczy o słabym wpływie poszczególnej odmiany cebuli na zmianę efektywności. Natomiast siła odmuchu istotnie wpływa na efektywność oczyszczania cebuli, w której w zakresie od 1,8 do 4 N wartość średnia efektywności ulega zmianie w zakresie od 20 do 95%.

5.2.3. Badania ilości odpadu suchej łuski

W ramach badań zasadniczych dokonano oceny ilości odpadu w postaci suchej łuski z cebuli, uwzględniając zmienne parametry procesowe, takie jak ciśnienie zasilania, czas odmuchu, siła odmuchu, natężenie przepływu, twardość oraz okres przechowywania cebuli. W pierwszym etapie badań zbadano wpływ czasu odmuchu na ilość odpadu suchej łuski generowanej podczas procesu oczyszczania cebuli.

Średnie ilości odpadu przedstawione na wykresie (rys. 5.11) pozwoliły na wyznaczenie funkcji regresji w postaci wykładniczej, która posłużyła do oceny wpływu odmiany cebuli na ilość wytwarzanego odpadu.



Rys. 5.11. Wpływ czasu na wartość średnią ilości odpadu z uwzględnieniem odmian cebuli

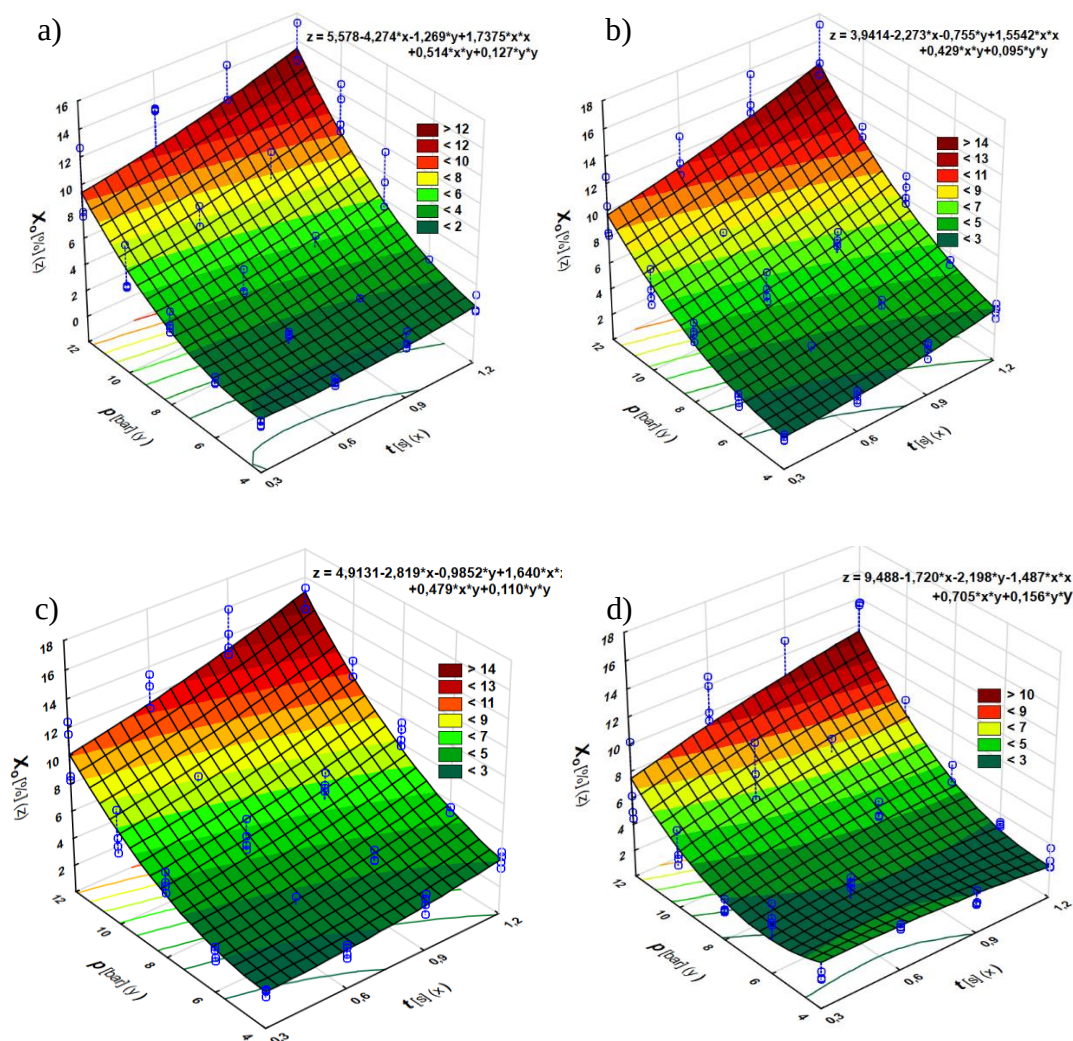
Zaobserwowano wzrost ilości odpadu w zależności od czasu trwania odmuchu. Dla odmiany Centro uzyskano najwyższe wartości odpadu, natomiast najniższe wartości odnotowano dla odmiany Armstrong. Na podstawie analizy współczynników funkcji regresji zauważono różne nachylenia dla wybranych odmian. Wraz ze zwiększeniem czasu odmuchu zmienność wyników dotyczących ilości odpadu również wzrasta.

Ponadto przeprowadzono analizę statystyczną, która umożliwiła określenie przedziałów ilości odpadu w odniesieniu do czasu odmuchu (tabela 5.5).

Tabela 5.5. Analiza statystyczna ilości odpadu względem czasu odmuchu

Parametr	t [s]	Me	Min	Max	Q1	Q3	Rozstęp	SD	CV
X_0 [%]	0,3	4,82	2,01	11,95	2,45	6,36	9,94	2,71	56,11
	0,6	5,83	2,08	13,15	3,09	7,88	11,07	3,45	59,33
	0,9	6,15	2,34	14,71	3,18	7,69	12,37	3,53	58,45
	1,2	7,47	2,73	16,21	3,70	10,31	13,48	4,13	56,32

Opracowano również wyniki badań zależności ilości odpadu od czasu odmuchu i ciśnienia zasilania, porównując je między poszczególnymi odmianami cebuli (rys. 5.16). Wyznaczono również ogólne zależności w postaci funkcji wielomianu drugiego stopnia, które pozwoliły prognozować ilość odpadu w zależności od powyższych zmiennych. Pozwala to na dokładne prognozowanie, jak zmiany tych parametrów wpłyną na ilość generowanego odpadu podczas odmuchu.

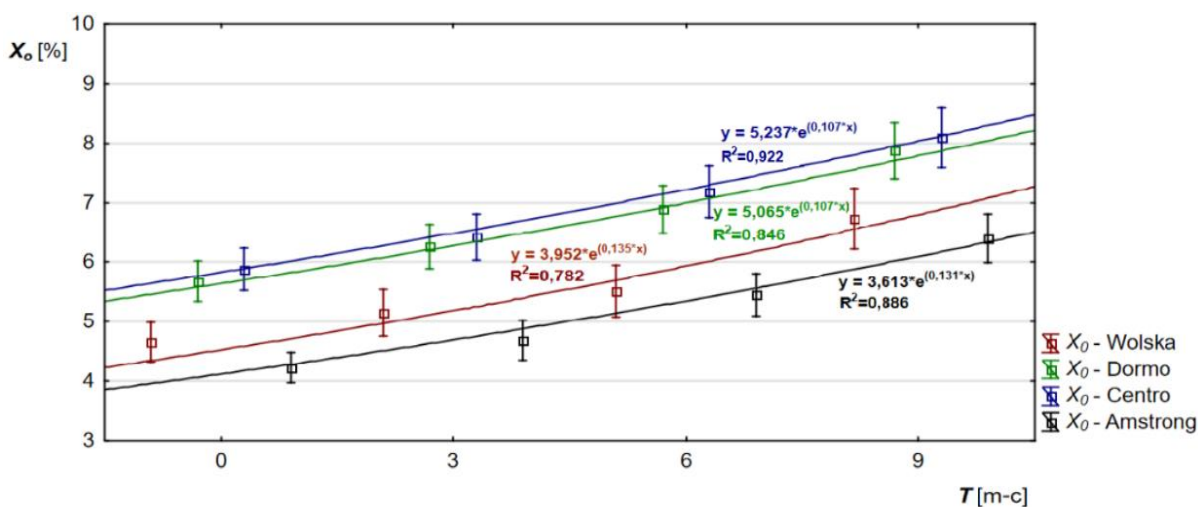


Rys. 5.12. Wpływ czasu odmuchu i ciśnienia zasilania na ilość odpadu:

a) odmiana Wolska, b) odmiana Dormo, c) odmiana Centro, d) odmiana Armstrong

Wyniki badań przedstawione na wykresach pozwoliły zaobserwować, że pomiędzy zmiennymi ciśnienia zasilania oraz czasu odmuchu a ilością powstającego odpadu z cebuli istnieje dodatnia zależność. Zwiększenie ciśnienia i czasu odmuchu w procesie odmuchu prowadzi do zwiększenia odpadu suchej łuski. Na podstawie analizy statystycznej (tabela 5.5), stwierdzono, że wydłużenie czasu odmuchu przyczynia się do wzrostu odpadu o 1,25 p.p. przy ciśnieniu 4 bar i wzrasta do 3,95 p.p. przy ciśnieniu 12 bar.

W kolejnym etapie przeprowadzono ocenę wpływu okresu przechowywania cebuli na ilość generowanego odpadu. Przedstawiono wyniki badań wartości średnich ilości odpadu (rys. 5.13), dla których wyznaczono funkcje regresji wykładniczej uwzględniające wybrane odmiany.



Rys. 5.13. Wpływ okresu przechowywania cebuli na ilość odpadu z uwzględnieniem jej odmian

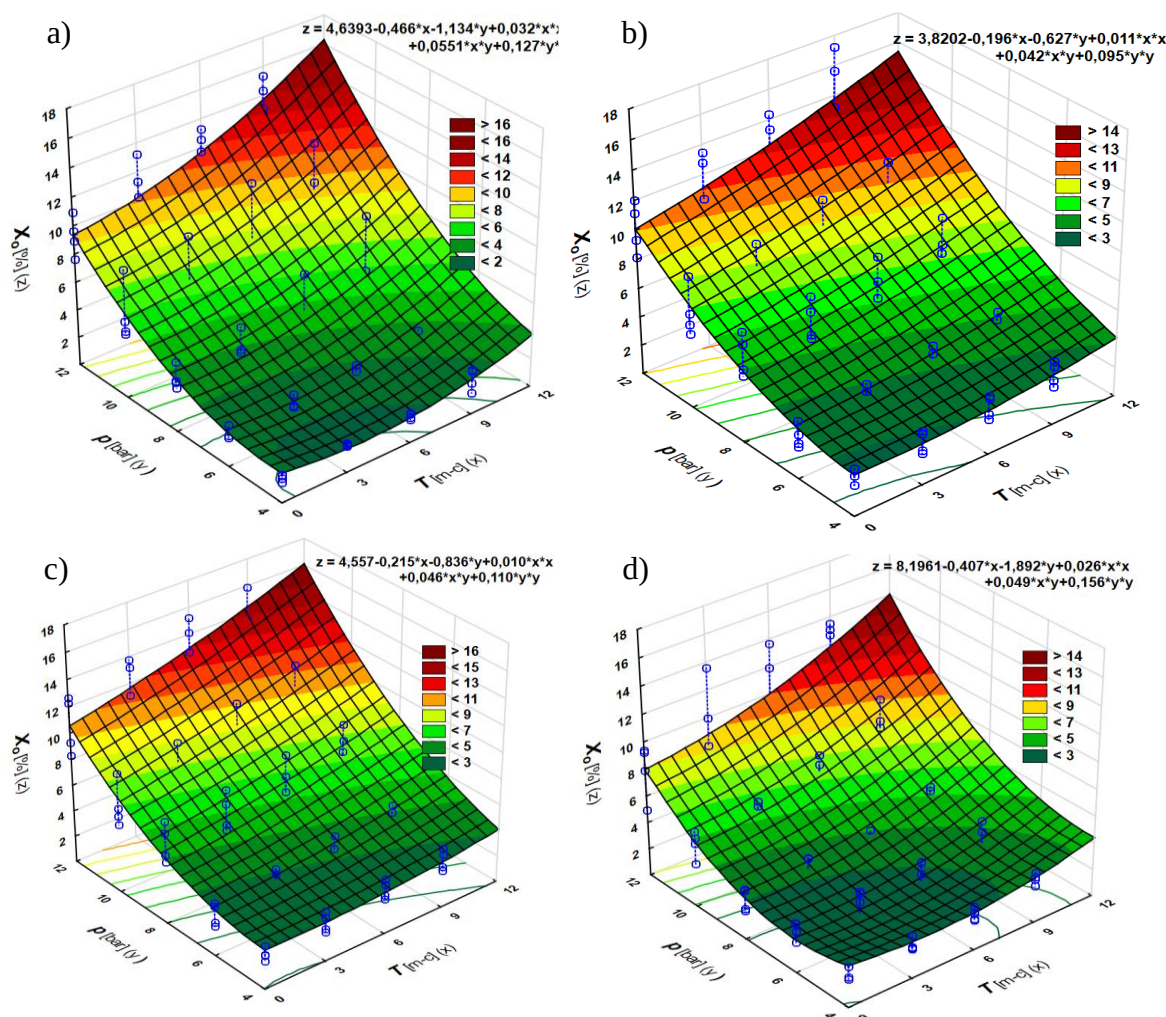
Na podstawie wyników badań stwierdzono, że istnieje dodatnia zależność między okresem przechowywania cebuli a generowanym odpadem w postaci suchej łuski. W miarę wydłużania się okresu przechowywania, ilość odpadu z cebuli wzrasta. Dodatkowo zaobserwowano, iż krzywe regresji wykazują zbliżoną zmienność ilości odpadu wśród analizowanych odmian. Zmienne te zestawiono również w funkcji ciśnienia zasilania (rys. 5.14), dla których przeprowadzono analizę statystyczną zaprezentowaną w tabeli 5.6.

Tabela 5.6. Analiza statystyczna efektywności oczyszczania względem okresu przechowywania

Parametr	T [m-c]	Me	Min	Max	Q1	Q3	Rozstęp	SD	CV
X_0 [%]	0-3	5,11	1,99	11,25	2,59	6,89	9,26	2,88	56,58
	3-6	5,63	2,14	13,50	2,93	7,31	11,37	3,31	59,49
	6-9	6,14	2,28	14,14	3,24	8,28	11,86	3,63	60,12
	9-12	7,38	2,46	16,15	3,83	10,44	13,70	4,21	57,20

Wyniki badań zależności ilości odpadu opracowane względem okresu przechowywania i ciśnienia zasilania, porównano pomiędzy poszczególnymi odmianami

cebuli (rys. 5.14). Wyznaczono również ogólne zależności w postaci funkcji wielomianu drugiego stopnia, które pozwoliły prognozować jak ilość generowanego odpadu z cebuli zależy od jej okresu przechowywania oraz ciśnienia zasilania. Umożliwia to przewidywanie, jak zmiany tych parametrów wpłyną na wielkość odpadu.



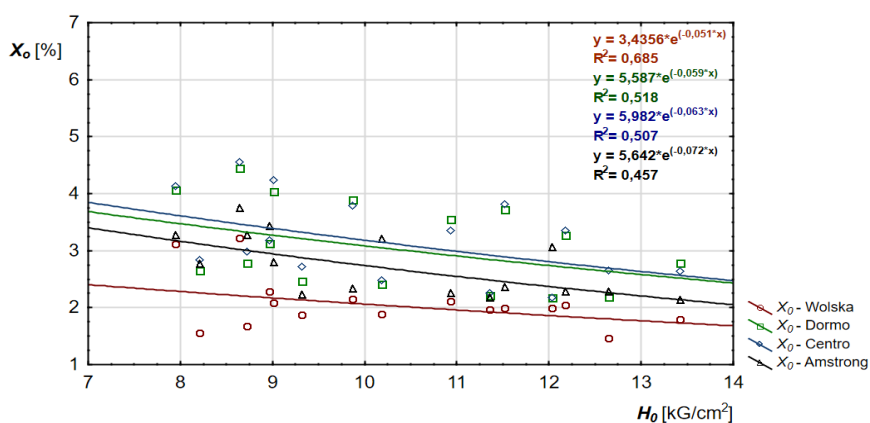
Rys. 5.14. Analiza ilości odpadu w funkcji okresu przechowywania i ciśnienia zasilania:

a) odmiana Wolska, b) odmiana Dormo, c) odmiana Centro, d) odmiana Armstrong

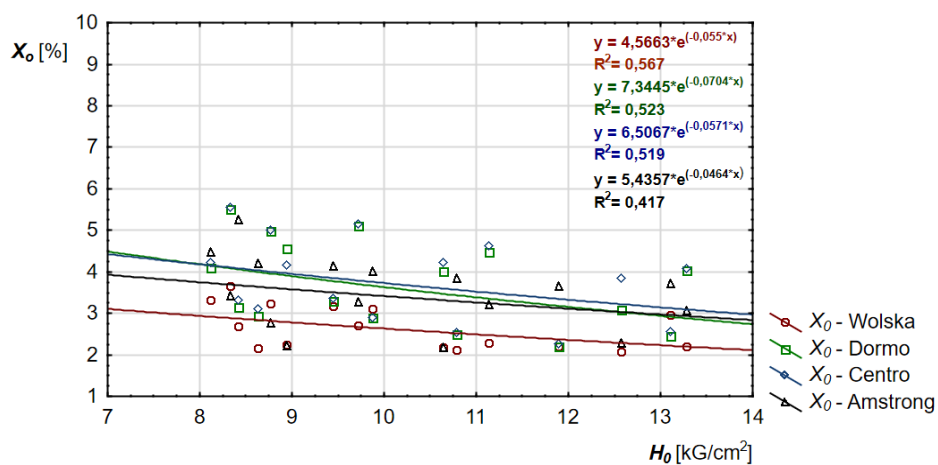
Wykazano, że pomiędzy zmiennymi, takimi jak ciśnienie zasilania i czas odmucho a efektywnością oczyszczania cebuli istnieje dodatnia zależność. Wyższe wartości ciśnienia zasilania powodują silniejszą zależność ilości odpadu od okresu przechowywania cebuli. Im wyższa jest wartość ciśnienia, tym większa jest zmienność ilości odpadu zależnie od okresu przechowywania. Ponadto, stwierdzono, że wydłużenie czasu odmucho przyczynia się do zwiększenia ilości odpadu z cebuli o 0,47 p.p. przy ciśnieniu 4 bar oraz do 4,9 p.p. przy ciśnieniu 12 bar.

Istota zmienności ilości odpadu względem okresu przechowywania wynika z zmiennej jej twardości oczyszczanych cebul, który wartość zmienia się od okresu przechowywania. W tym celu przeprowadzono badania dotyczące wpływu twardości na ilość generowanego

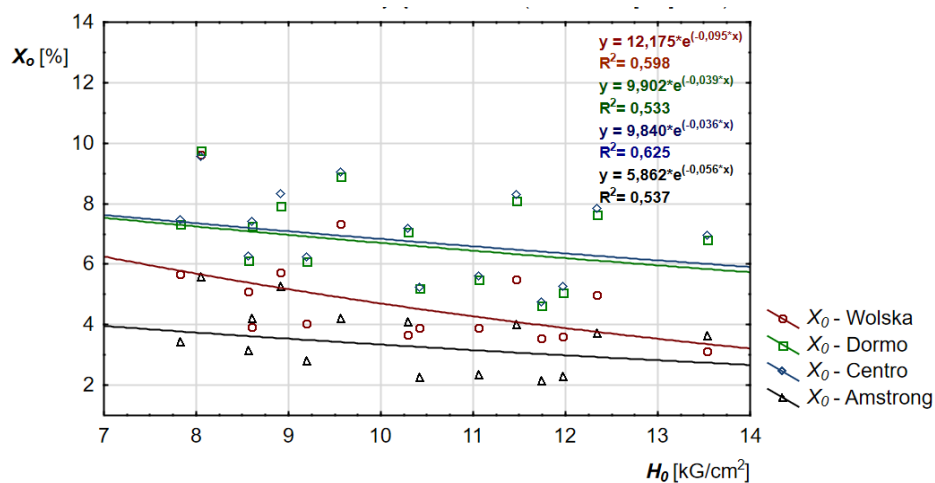
odpadu. Rozrzut wyników badań (rys. 5.15-5.19) zestawiono odrębnie dla poszczególnych nastaw ciśnienia zasilania w zakresie od 4 do 12 bar.



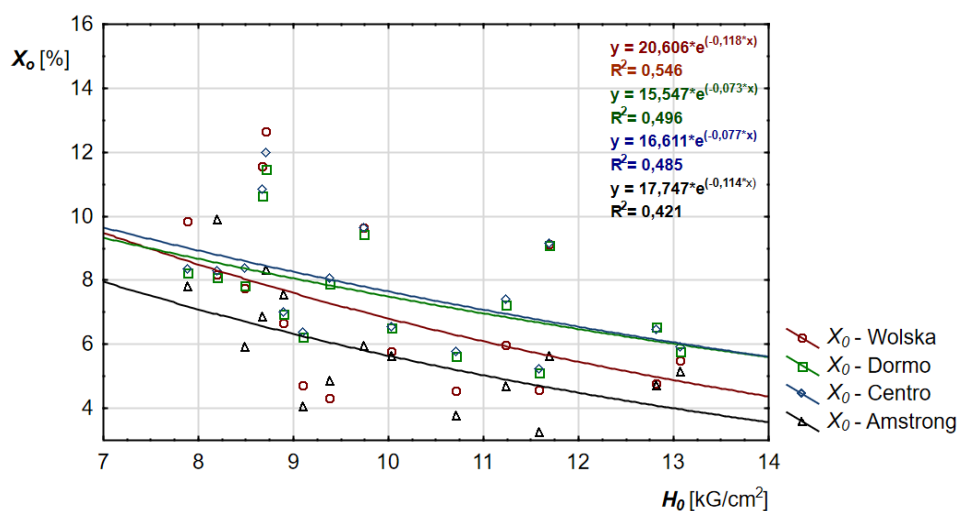
Rys. 5.15. Wpływ twardości cebuli na ilość odpadu przy ciśnieniu zasilania równym 4 bar



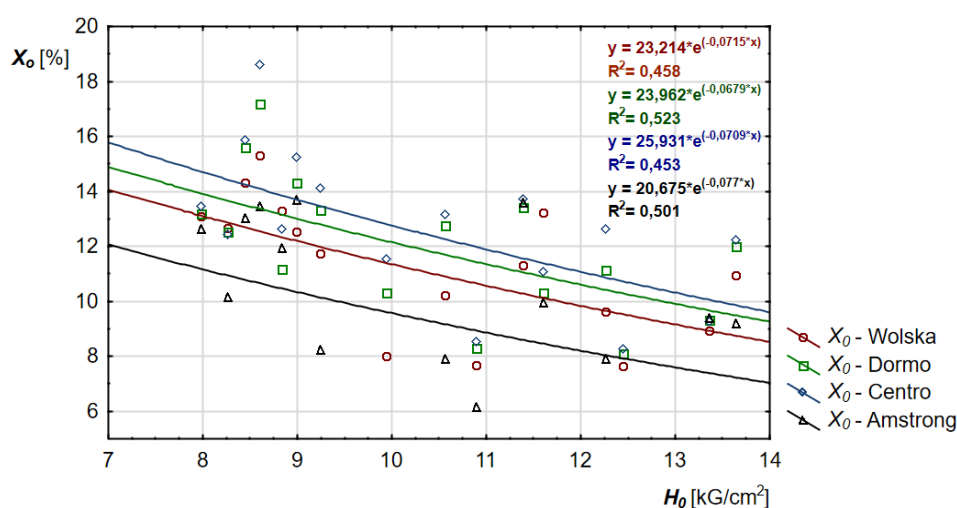
Rys. 5.16. Wpływ twardości cebuli na ilość odpadu przy ciśnieniu zasilania równym 6 bar



Rys. 5.17. Wpływ twardości cebuli na ilość odpadu przy ciśnieniu zasilania równym 8 bar



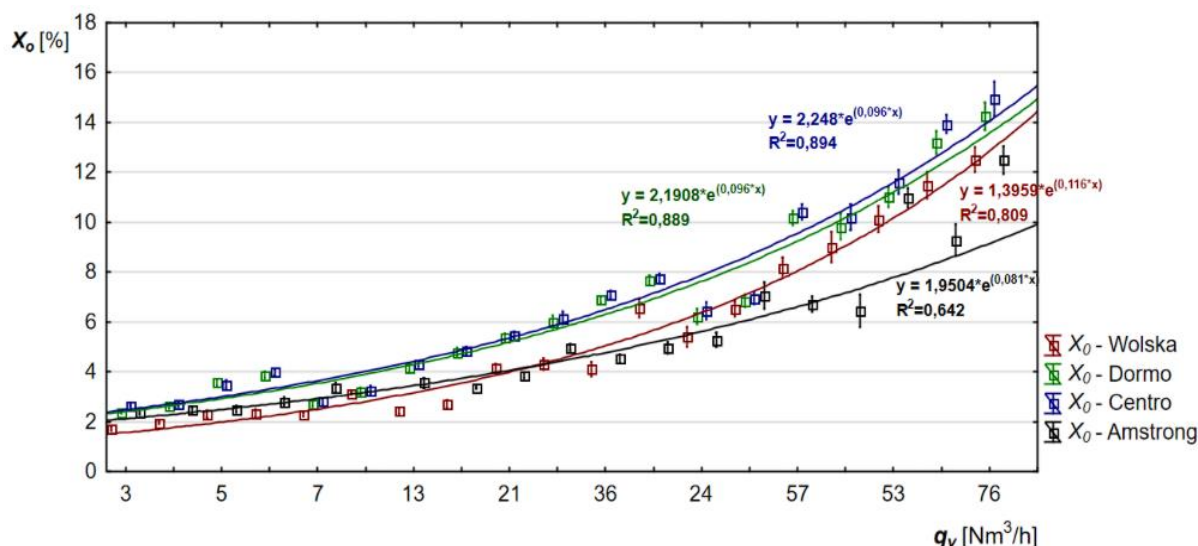
Rys. 5.18. Wpływ twardości cebuli na ilość odpadu przy ciśnieniu zasilania równym 10 bar



Rys. 5.19. Wpływ twardości cebuli na ilość odpadu przy ciśnieniu zasilania równym 12 bar

Na podstawie powyższych wyników zaobserwowano ujemną zależność pomiędzy ilością odpadu a twardością cebuli. Im cebule są twardsze tym generowana w procesie odmuchu ilość odpadu jest mniejsza. Na podstawie oceny funkcji regresji ilości odpadu względem ciśnienia zasilania zaobserwowano, iż wśród wybranych do badań odmian występują istotne różnice wyników badań. Szczególnie zauważalne jest dla odmiany Armstrong, których wyniki ilości odpadu są istotnie niższe od pozostałych.

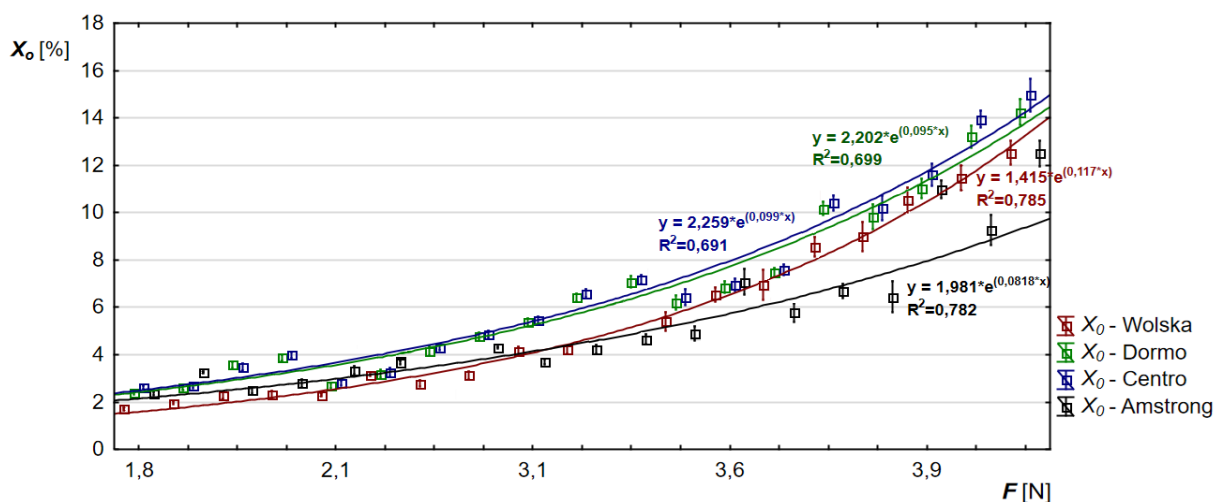
Analogicznie do oceny ciśnienia zasilania przeprowadzono analizę wpływu natężenia przepływu na ilość generowanego odpadu (rys. 5.20). Wyniki badań w postaci średnich wartości ilości odpadu zestawiono również w postaci funkcji regresji wykładniczej.



Rys. 5.20. Wpływ natężenia przepływu na ilość odpadu z uwzględnieniem odmian cebuli

Na rys. 5.20 zaobserwowano silną zależność wpływu natężenia przepływu na ilość powstającego odpadu z cebuli. Im większa jest wartość natężenia przepływu tym większy jest generowany odpad w postaci suchej łuski. Ponadto wyznaczone krzywe regresji wykładniczej charakteryzują się zbliżoną zmiennością względem analizowanych odmian.

W ostatnim kroku przeprowadzono badania wpływu siły odmuchu na ilość powstałego odpadu, w których wyniki badań uwzględniały analizowane odmiany (rys. 5.21). Dla wartości średnich ilości odpadu wyznaczono funkcje regresji, celem obserwacji jej zmienności względem wybranych odmian.



Rys. 5.21. Wpływ siły odmuchu na ilość odpadu z uwzględnieniem odmian cebuli

Analogicznie do natężenia przepływu większa wartość siły odmuchu przyczynia się do powstawania większej ilości odpadu. Dodatkowo krzywe regresji charakteryzują się również zbliżoną zmiennością siły pomiędzy odmianami. Zatem podczas badań oczyszczania cebuli uzyskano ilość odpadu w zakresie od 1,85 do 14,9% zależnie od siły odmuchu w przedziale od 1,8 do 4 N.

5.2.4. Badania nakładów energetycznych układu zasilania sprężonego powietrza

Badania miały na celu opracowanie zależności zapotrzebowania na energię elektryczną potrzebną do przygotowania sprężonego powietrza w odniesieniu do ciśnienia zasilania i czasu odmuchu podczas procesu usuwania suchej łuski. Pomiary przeprowadzono za pomocą opracowanego urządzenia do pomiaru energii, wykorzystując mierniki prądu trójfazowego Supla MEW-01 firmy Zamel. Podczas badań dokonano pomiaru energii procesu odmuchu pojedynczych cebul, uwzględniając różne ustawienia ciśnienia zasilania oraz czasu odmuchu (tabela 5.7).

Tabela 5.7. Zapotrzebowanie na energię U_{el1} [Wh] względem ciśnienia zasilania i czasu odmuchu

Zmienne		t [s]			
		0,3	0,6	0,9	1,2
p [bar]	4	0,75	1,10	1,41	1,76
	6	1,10	1,45	1,84	2,20
	8	1,25	1,76	2,59	2,94
	10	1,57	2,43	3,02	3,57
	12	1,88	3,02	3,80	4,67

Wyniki badań wykazały wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną podczas odmuchu pojedynczych cebul zależnie wartości ciśnienia oraz czasu jego trwania. Zjawisko to jest bezpośrednio związane z koniecznością przygotowania odpowiedniej objętości sprężonego powietrza do wymaganego ciśnienia i czasu trwania procesu. Przeprowadzone badania pozwoliły na wyznaczenie zapotrzebowania na energię elektryczną U_{el1} w zakresie od 0,75 do 4,67 Wh na jedną oczyszczaną cebulę. Wyniki te były kluczowe do oszacowania nakładów energetycznych w przeliczeniu na masową i ilościową wydajność procesu obróbki cebuli. Ze względu na periodyczny, a nie ciągły charakter procesu odmuchu pojedynczych cebul na stanowisku badawczym, określono zapotrzebowanie na energię elektryczną w przeliczeniu na godzinę pracy urządzenia, przy średniej wydajności stanowiska wynoszącej 1800 cebul na godzinę (tabela 5.8).

Tabela 5.8. Zapotrzebowanie na energię U_{el2} [Wh] względem ciśnienia zasilania i czasu odmuchu

Zmienne		t [s]			
		0,3	0,6	0,9	1,2
p [bar]	4	1381,18	2016,47	2581,18	3216,47
	6	2016,47	2651,76	3357,65	3992,94
	8	2298,82	3216,47	4698,82	5334,12
	10	2863,53	4416,47	5475,29	6463,53
	12	3428,24	5475,29	6887,06	8440,00

Uniwersalne podejście wyznaczania zapotrzebowania na energię elektryczną procesu odmuchu względem liczby oczyszczanych cebul stwarza przewagę nad pomiarem względem czasu pracy urządzenia, gdyż nie analizowane są przerwy pomiędzy taktami obróbki. Jest to niezwykle istotne przy obróbce periodycznej, powtarzalnych okresów oczyszczania pojedynczych cebul, lecz ta metoda nie sprawdzi się w procesie odmuchu ciągłego. Z uwagi na trudności w wyznaczaniu liczby cebul oczyszczanych w jednostce czasu w procesie ciągłym stosuje się metodę wyznaczania zapotrzebowania na energię w przeliczeniu na sumaryczną masę oczyszczanych cebul. Zatem na podstawie pomiarów jej masy, możliwe było wyznaczanie nakładów energetycznych w przeliczeniu na kilogram oczyszczonej cebuli (tabela 5.9).

W tym celu dokonano wyznaczenia zapotrzebowania na energię dla wartości średnich masy cebuli określonej w przedziałach ich wielkości:

- a) cebula mała 45 - 60 mm – 85,66 g,
- b) cebula średnia 60 - 75 mm – 130,70 g,
- c) cebula duża 75 - 90 mm – 201,70 g.

Tabela 5.9. Zapotrzebowanie na energię U_{el3} [Wh/kg] względem ciśnienia zasilania i czasu odmuchu

Wielkość cebuli	t [s]	p [bar]				
		4	6	8	10	12
mała	0,3	8,96	13,08	14,91	18,57	22,23
średnia		5,78	8,44	9,62	11,99	14,35
duża		3,80	5,55	6,33	7,89	9,44
mała	0,6	12,62	17,20	20,86	28,64	35,51
średnia		8,15	11,10	13,47	18,49	22,92
duża		5,36	7,30	8,86	12,16	15,08
mała	0,9	16,74	21,78	30,47	35,51	44,67
średnia		10,81	14,06	19,67	22,92	28,83
duża		7,11	9,25	12,94	15,08	18,97
mała	1,2	20,86	25,90	34,59	41,92	54,74
średnia		13,47	16,72	22,33	27,06	35,33
duża		8,86	11,00	14,69	17,80	23,25

Wyznaczone wartości energii U_{el3} w przeliczeniu na kilogram oczyszczonej cebuli wykazały mniejsze wartości dla większych cebul. W określonych przedziałach ciśnienia zasilania i czasu odmuchu zapotrzebowanie na energię wynosiło od 3,80 Wh/kg (dla małej cebuli, t=0,3s; p=4 bar) do 54,74 Wh/kg (dla małej cebuli, t=1,2 s; p=12 bar). Zmienność zapotrzebowania na energię w procesie oczyszczania kilograma cebuli jest więc bardzo duża, co prowadzi do znacznych kosztów procesu odmuchu. Wyniki tych badań będą wykorzystane w aplikacji obliczeniowej do wyznaczania nakładów energii na podstawie określonych parametrów procesowych (ciśnienia i czasu) oraz parametrów fizycznych oczyszczanych cebul (średnicy i masy).

5.3. Analiza i wnioski z eksperymentalnych badań zasadniczych

Na podstawie uzyskanych wyników badań zasadniczych określono wpływ zmiennych niezależnych (ciśnienia zasilania, czasu odmuchu, okresu przechowywania i związanej z nim twardości, natężenia przepływu oraz siły odmuchu) na zmienne zależne, obejmujące ilość generowanego odpadu, efektywność oczyszczania oraz zapotrzebowanie na energię elektryczną w procesie odmuchu suchej łuski z cebuli. Efektywność oczyszczania została określona na podstawie wskaźników jakościowych RTY , które umożliwiają definiowanie prawidłowo oczyszczonej cebuli na podstawie oceny wizualnej. Analiza wyników dotyczących ilości odpadu oraz efektywności potwierdziła, że kluczowym parametrem wyjściowym dla obu przypadków jest ciśnienie zasilania, które bezpośrednio wpływa na parametry procesu odmuchu.

W celu dokładnej analizy istotności między zmiennymi, przeprowadzono analizę korelacji według porządku rang Spearmana, uwzględniając przedział ufności poniżej $p = 0,05$ (tabela 5.10.). Przeprowadzona analiza pozwoliła wytypować zmienne zależne, które miały istotny wpływ na ilość odpadu oraz efektywność oczyszczania.

Tabela 5.10. Związek pomiędzy analizowanymi zmiennymi badań zasadniczych

Zmienne	p [bar]	T [m-c]	t [s]	H_0 [kg/cm ²]	F [N]	q_v [Nm ³ /h]	X_0 [%]	E_f [%]
p [bar]	-	$r_s = 0,00$; $p = 1,00$	$r_s = 0,00$; $p = 1,00$	$r_s = 0,00$; $p = 0,89$	$r_s = 0,98$; $p < 0,001$	$r_s = 0,94$; $p < 0,001$	$r_s = 0,99$; $p < 0,001$	$r_s = 0,91$; $p < 0,001$
T [m-c]	$r_s = 0,00$; $p = 1,00$	-	$r_s = 0,00$; $p = 1,00$	$r_s = -0,91$; $p < 0,001$	$r_s = 0,00$; $p = 1,00$	$r_s = 0,91$; $p < 0,001$	$r_s = 0,94$; $p < 0,001$	$r_s = -0,28$; $p < 0,001$
t [s]	$r_s = 0,00$; $p = 1,00$	$r_s = 0,00$; $p = 1,00$	-	$r_s = 0,00$; $p = 0,84$	$r_s = -0,09$; $p = 0,66$	$r_s = 0,31$; $p < 0,001$	$r_s = 0,24$; $p < 0,001$	$r_s = 0,20$; $p < 0,001$
H_0 [kg/cm ²]	$r_s = 0,00$; $p = 0,89$	$r_s = -0,91$; $p < 0,001$	$r_s = 0,00$; $p = 1,00$	-	$r_s = 0,00$; $p = 0,87$	$r_s = 0,00$; $p = 0,96$	$r_s = -0,12$; $p = 0,002$	$r_s = 0,23$; $p < 0,001$
F [N]	$r_s = 0,98$; $p < 0,001$	$r_s = 0,00$; $p = 1,00$		$r_s = 0,00$; $p = 0,87$	-	$r_s = 0,89$; $p < 0,001$	$r_s = 0,81$; $p < 0,001$	$r_s = 0,89$; $p < 0,001$
q_v [Nm ³ /h]	$r_s = 0,94$; $p < 0,001$	$r_s = 0,00$; $p = 1,00$	$r_s = 0,31$; $p < 0,001$	$r_s = 0,00$; $p = 0,96$	$r_s = 0,89$; $p < 0,001$	-	$r_s = 0,88$; $p < 0,001$	$r_s = 0,91$; $p < 0,001$
X_0 [%]	$r_s = 0,85$; $p < 0,001$	$r_s = 0,21$; $p < 0,001$	$r_s = 0,24$; $p < 0,001$	$r_s = -0,12$; $p = 0,002$	$r_s = 0,81$; $p < 0,001$	$r_s = 0,88$; $p < 0,001$	-	$r_s = 0,75$; $p < 0,001$
E_f [%]	$r_s = 0,91$; $p < 0,001$	$r_s = -0,28$; $p < 0,001$	$r_s = 0,20$; $p < 0,001$	$r_s = 0,23$; $p < 0,001$	$r_s = 0,89$; $p < 0,001$	$r_s = 0,91$; $p < 0,001$	$r_s = 0,75$; $p < 0,001$	-

Na podstawie analizy korelacji zmiennych zaobserwowano istotne statystycznie silne dodatnie związki pomiędzy ilością odpadu i efektywnością oczyszczania a ciśnieniem zasilania, natężeniem przepływu oraz siłą odmuchu. Wzrost wartości ciśnienia zasilania i natężenia przepływu sprężonego powietrza powoduje wzrost siły odmuchu, co przekłada się na zwiększenie efektywności oczyszczania oraz jednocześnie zwiększenie ilości generowanego odpadu. Jednocześnie zaobserwowano słabszą zależność pomiędzy ilością odpadu i efektywnością oczyszczania a twardością oraz czasem odmuchu, przy czym wszystkie te relacje mieszczą się w przedziale ufności $p < 0,05$. Im większa jest twardość

cebuli, tym wyższa efektywność oczyszczania, co jednocześnie prowadzi do zmniejszenia ilości odpadu, co jest korzystne w procesie obróbki cebuli. Natomiast wzrost czasu odmuchu powoduje minimalnie większy odpad oraz nieznaczny wzrost efektywności oczyszczania.

Na podstawie przeprowadzonych badań zasadniczych na stanowisku wyznaczono dodatni związek pomiędzy ilością odpadu i efektywnością oczyszczania a:

- ciśnieniem zasilania dla X_0 ($r_s = 0,99$; $p < 0,01$) i E_f ($r_s = 0,91$; $p < 0,01$),
- natężeniem przepływu dla X_0 ($r_s = 0,88$; $p < 0,01$) i E_f ($r_s = 0,89$; $p < 0,01$),
- siłą odmuchu dla X_0 ($r_s = 0,81$; $p < 0,01$) i E_f ($r_s = 0,89$; $p < 0,01$),
- czasem odmuchu dla X_0 ($r_s = 0,24$; $p < 0,01$) i E_f ($r_s = 0,23$; $p < 0,01$),
- twardością cebuli dla E_f ($r_s = 0,23$; $p < 0,01$),

oraz ujemny związek pomiędzy ilością opadu a:

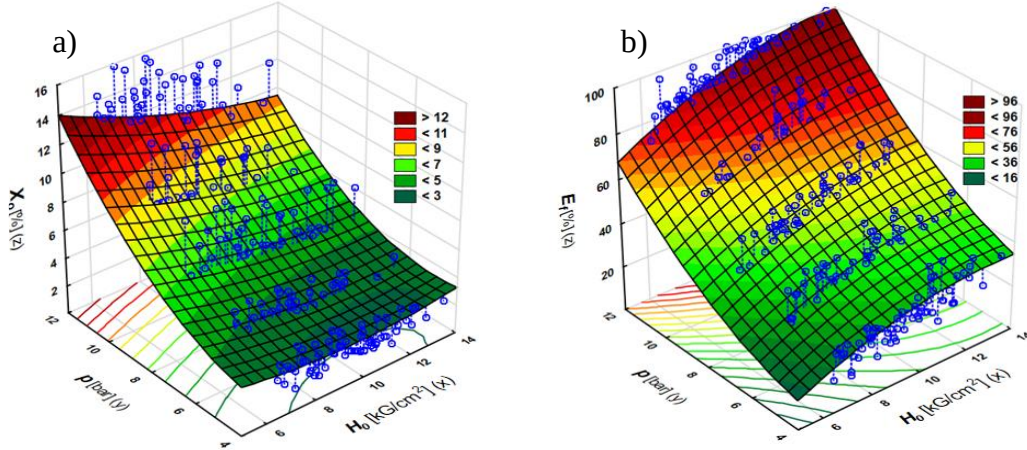
- twardością cebuli dla X_0 ($r_s = -0,12$; $p < 0,01$).

Spośród analizowanych zmiennych to wytypowany w rozprawie doktorskiej parametr ciśnienia zasilania charakteryzuje się największym wpływem na ilość powstającego odpadu ($r_s = 0,99$; $p < 0,01$) oraz efektywność oczyszczania ($r_s = 0,91$; $p < 0,01$). Niniejszym, powyższe wyniki badań potwierdzają przyjęte w rozprawie hipotezy pracy.

Przedstawione wyniki badań posłużyły do określenia ogólnych zależności parametrów eksploatacyjnych od parametrów fizycznych cebuli oraz parametrów procesu odmuchu suchej łuski, co umożliwi opracowanie modeli obliczeniowych dla aplikacji. Na podstawie uzyskanych wyników zaobserwowano również dodatnią istotną statystycznie zależność między ilością powstającego odpadu a efektywnością oczyszczania ($r_s = 0,75$; $p < 0,01$). To sugeruje, że nie jest możliwe jednoczesne zwiększenie efektywności oczyszczania przy jednoczesnej redukcji ilości odpadu, co wynika z natury procesu obróbki cebuli. W związku z tym należy dążyć do optymalizacji wybranych wartości zmiennych w zależności od oczekiwanych rezultatów procesu oczyszczania cebuli.

5.4. Wyznaczenie parametrów cebuli wpływających na proces jej oczyszczenia

Na podstawie wyników badań wstępnych, zasadniczych oraz analiz statystycznych, zidentyfikowano kluczowe parametry procesu oczyszczania cebuli, takie jak efektywność oczyszczania, zapotrzebowanie na energię elektryczną oraz ilość odpadu. Wśród statystycznie istotnych zmiennych wpływających na stopień oczyszczenia wyróżniono ciśnienie zasilania, natężenie przepływu oraz siłę odmuchu. Ważnym aspektem w badaniach okazało się również uwzględnienie twardości cebuli, która jest związana z okresem i warunkami jej przechowywania. Wyznaczanie twardości przy użyciu ręcznego penetrometru pozwala wyeliminować konieczność oceny w kontekście okresu jej przechowywania. W oparciu o powyższe zmienne opracowano nowe modele predykcyjne, które eliminują potrzebę uwzględniania odmian i okresu przechowywania cebuli (rys. 5.22).



Rys. 5.22. Wpływ twardości cebuli oraz ciśnienia zasilania na parametry eksploatacyjne:
a) ilość odpadu, b) efektywność oczyszczania

Dla powyższych zmiennych, w zależności od twardości cebuli H_0 [kg/cm²] i ciśnienia zasilania p [bar], możliwe jest określenie prognozowania ilości odpadu oraz efektywności oczyszczania cebuli przy użyciu opracowanych modeli predykcyjnych:

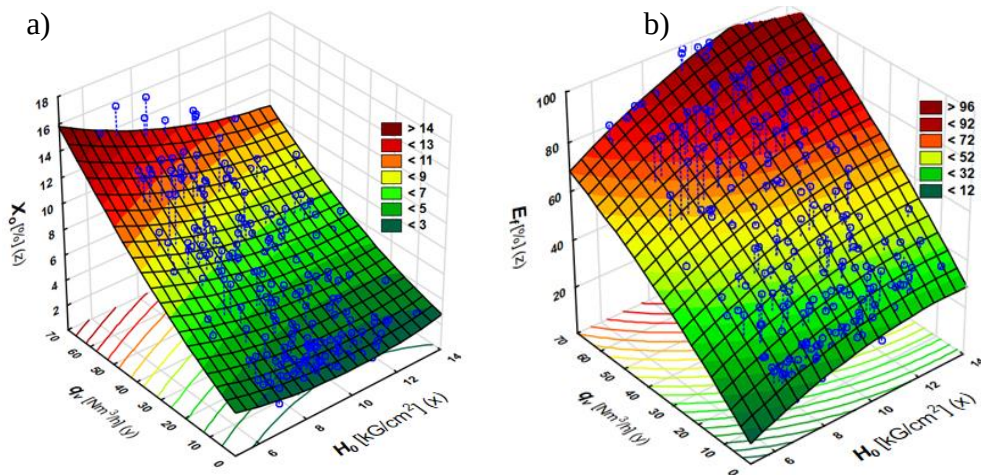
$$X_0(H_0, p) = 5,181 - 0,364H_0 - 0,361p + 0,031H_0^2 - 0,061H_0p + 0,124p^2 \quad [\%] \quad (5.4.1)$$

$$E_f(H_0, p) = -19,934 + 7,943H_0 - 2,574p - 0,326H_0^2 + 0,157H_0p + 0,538p^2 \quad [\%] \quad (5.4.2)$$

Na podstawie wartości natężenia przepływu q_v [Nm³/h] i twardości cebuli H_0 [kg/cm²], możliwe jest prognozowanie ilości odpadu i efektywności oczyszczania za pomocą równania, których zależność przedstawiono na Rys. 5.23:

$$X_0(H_0, q_v) = 6,913 - 0,958H_0 + 0,161q_v + 0,048H_0^2 - 0,007H_0q_v + 0,001q_v^2 \quad [\%] \quad (5.4.3)$$

$$E_f(H_0, q_v) = 22,536 + 7,644H_0 - 1,012q_v - 0,284H_0^2 + 0,026H_0q_v + 0,004q_v^2 \quad [\%] \quad (5.4.4)$$

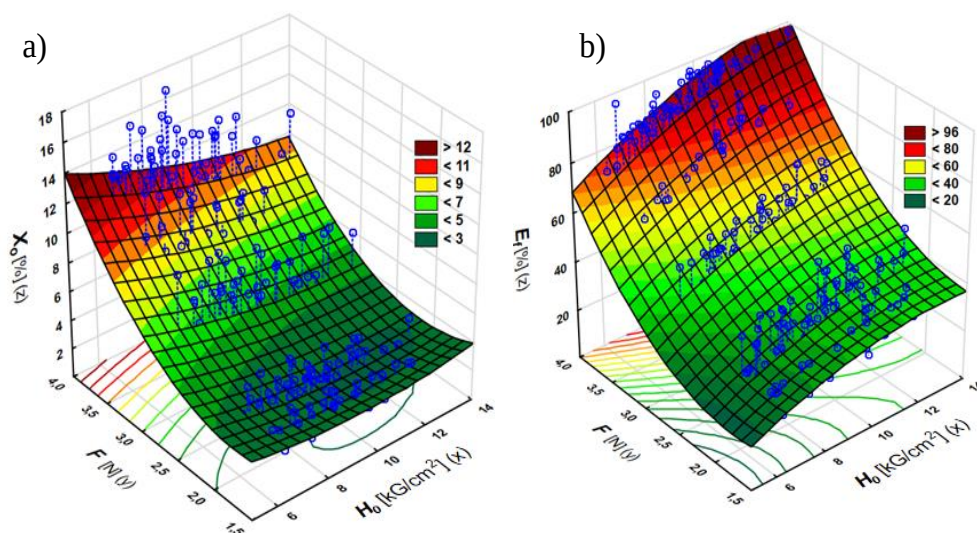


Rys. 5.23. Wpływ twardości cebuli oraz natężenia przepływu na parametry eksploatacyjne:
a) ilość odpadu, b) efektywność oczyszczania

W przypadku braku dostępnych parametrów ciśnienia oraz natężenia przepływu istnieje możliwość prognozowania ilości odpadu w postaci zmiennej wartości siły odmuchu F [N] względem mierzonych twardości cebul H_0 [kG/cm²], co opisano równaniem i przedstawiono na rys. 5.24:

$$X_0(H_0, F_0) = 10,645 - 0,36H_0 - 5,777F_0 + 0,033H_0^2 - 0,186H_0F_0 + 1,943F_0^2 \quad [\%] \quad (5.4.5)$$

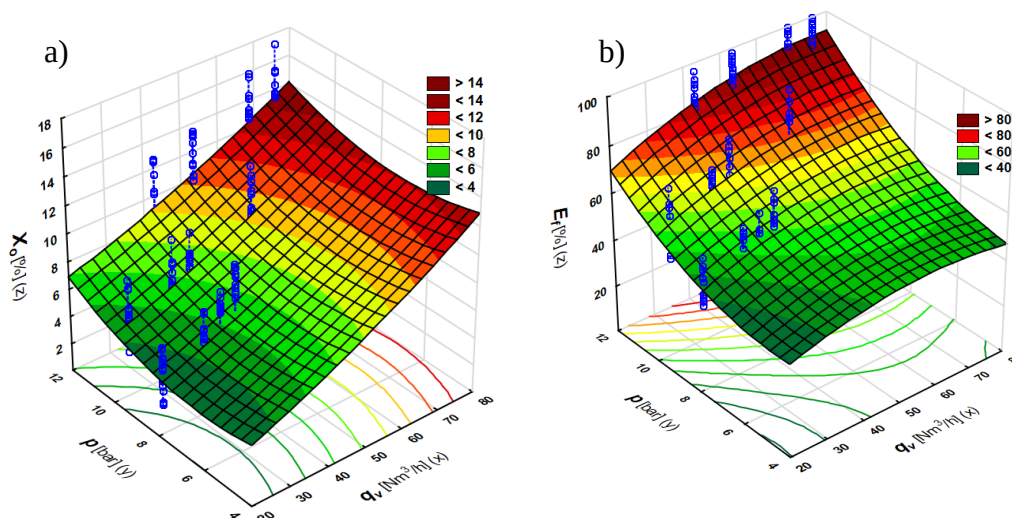
$$E_f(H_0, F_0) = 24,978 + 6,573H_0 - 40,962F_0 - 0,293H_0^2 + 0,705H_0F_0 + 10,478F_0^2 \quad [\%] \quad (5.4.6)$$



Rys. 5.24. Wpływ twardości cebuli oraz siły odmuchu na parametry eksploatacyjne:
a) ilość odpadu, b) efektywność oczyszczania

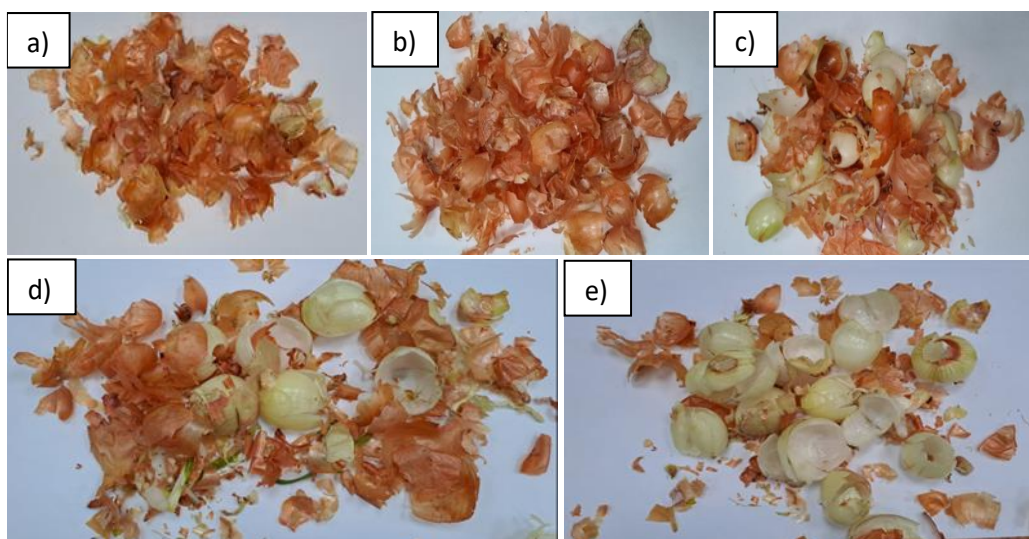
5.5. Omówienie wyników badań zasadniczych

W trakcie kompleksowych badań dotyczących odmuchu suchej łuski cebuli na stanowisku badawczym przeprowadzono szczegółowe analizy wpływu różnych parametrów procesowych oraz fizycznych cebuli na ilość generowanego odpadu i efektywność procesu oczyszczania. Na podstawie tych analiz, wraz z dokładnym opisem statystycznym, udało się wyodrębnić kluczowe zmienne parametry procesowe i fizyczne cebul, mające wpływ na mechaniczną obróbkę surowca. Analiza korelacji Spearmana wykazała istotne statystycznie silne zależności między ciśnieniem zasilania, natężeniem przepływu powietrza i siłą odmuchu a efektywnością oczyszczania i ilością odpadu. Pozwoliło to na sformułowanie zależności tych parametrów, na podstawie których opracowano modele predykcyjne, umożliwiające prognozowanie oczekiwanych wartości ilości odpadu oraz efektywności oczyszczania. Te zależności zmiennych przedstawiono w postaci funkcji wykładniczej trzech zmiennych $X_0(q_v, p)$ i $E_f(q_v, p)$ (rys. 5.25), pozwalając na klarowne zobrazowanie wpływu nastaw głównych parametrów na proces oczyszczania cebuli.



Rys. 5.25. Wpływ natężenia przepływu powietrza i ciśnienia zasilania na parametry eksploatacyjne:
a) ilość odpadu, b) efektywność oczyszczania

Wartości powyższych zależności zmiennych zależnych (E_f i X_0) od zmiennych niezależnych (p i q_v) miały korzystny wpływ na poprawę efektów procesu oczyszczania cebuli. Dodatkowo zmienne takie jak ciśnienie i natężenie przepływu umożliwiły precyzyjne określenie zapotrzebowania na energię elektryczną procesu odmuchu. Ze względu na naturę procesu oczyszczania, polegającą na generowaniu odpadu w wyniku usuwania zewnętrznych łusek, konieczna jest szczególna kontrola wartości ciśnienia zasilania. Wyższe nastawy ciśnienia mogą prowadzić do znacznego wzrostu ilości odpadu (rys. 5.26). Aby zdiagnozować przyczyny powstawania nadmiernych ilości odpadu, przeprowadzono wizualną analizę jego zawartości osobno dla każdej nastawy ciśnienia w ramach badań zasadniczych.

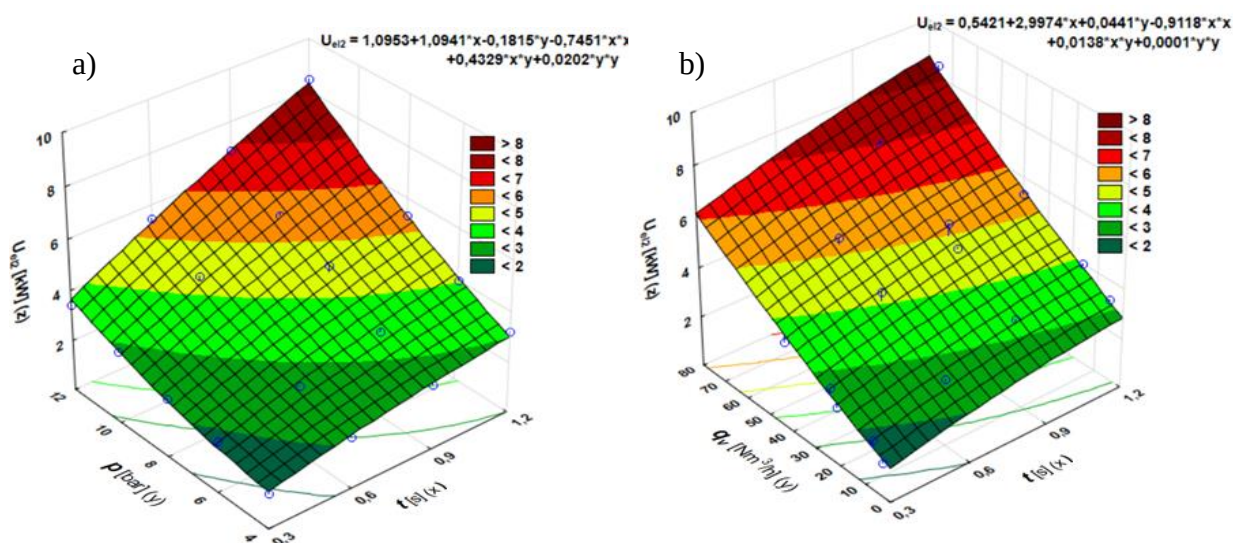


Rys. 5.26. Odpad suchej łuski w procesie odmuchu dla jednej próby badań:

- a) ciśnienie odmuchu 4 bar, b) ciśnienie odmuchu 6 bar, c) ciśnienie odmuchu 8 bar,
d) ciśnienie odmuchu 10 bar, e) ciśnienie odmuchu 12 bar

Zestawienie powstałego odpadu wykazuje różnice w jej zawartości, zwłaszcza określone w przedziale ciśnienia od 8 do 12 bar, w którym zauważalny jest większy udział łuski mokrej. W przedziale ciśnienia od 4 do 6 bar nie zaobserwowano udziału warstw mokrych w stosunku do suchej łuski.

Aby zredukować ilość odpadu, kluczowe jest właściwe dobranie statystycznie istotnych parametrów, które bezpośrednio wpływają na wysoką efektywność procesu oczyszczania. Na podstawie opracowanych modeli predykcyjnych możliwe jest ustalenie zmiennych niezależnych, które definiują proces dążący do minimalizacji odpadu, jednocześnie przy minimalnej zmianie efektywności oczyszczania oraz przy jednoczesnym zachowaniu korzystnych nakładów energetycznych. W tym kontekście opracowano zależności ilustrujące wpływ ciśnienia i natężenia przepływu powietrza na zapotrzebowanie na energię elektryczną U_{el2} (rys. 5.27).



Rys. 5.27. Wpływ parametrów procesowych na wartość energii elektrycznej U_{el2} :

- a) ciśnienia, b) natężenia przepływu

Na wartość zapotrzebowania na energię w procesie odmuchu silnie wpływają ciśnienie zasilania, natężenie przepływu oraz czas odmuchu. Przy maksymalnym ciśnieniu równym 12 bar zapotrzebowanie na energię waha się w zakresie od 3,8 do 8,38 kW, w zależności od nastaw czasu w przedziale od 0,3 do 1,2 s. Natomiast przy maksymalnym natężeniu przepływu wynoszącym 80 m³/h wartość zapotrzebowania na energię wynosi od 6,1 do 8,74 kW.

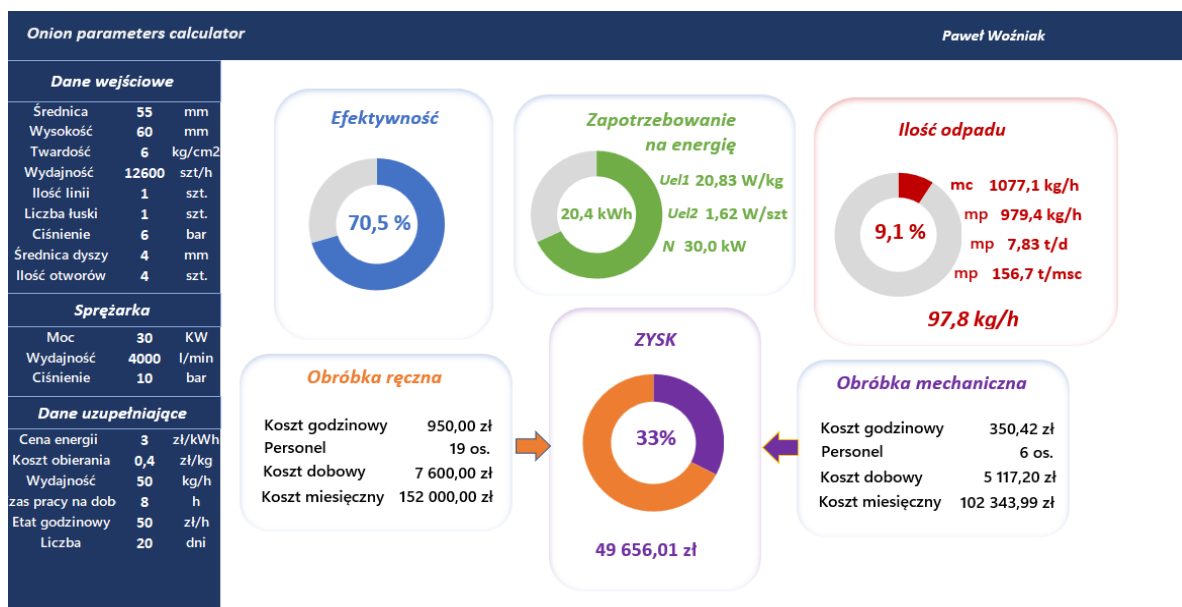
6. OPRACOWANIE APLIKACJI OBLICZENIOWEJ DO GENEROWANIA PARAMETRÓW EKSPLOATACYJNYCH W PROCESIE OCZYSZCZANIA CEBULI

6.1. Opracowanie programu aplikacyjnego

Aplikacja obliczeniowa służy do wyznaczania podstawowych parametrów eksploatacyjnych procesu odmuchu. Wprowadzenie parametrów fizycznych cebuli oraz parametrów procesowych umożliwia określenie efektywności oczyszczania oraz ilości odpadu, korzystając z zaimplementowanych modeli predykcyjnych opracowanych podczas badań zasadniczych.

W aplikacji obliczeniowej (rys. 6.1) po lewej stronie należy wprowadzić dane wejściowe dotyczące parametrów fizycznych cebuli, takich jak średnica, wysokość i twardość. Następnie wprowadza się parametry procesowe, obejmujące ciśnienie zasilania, wydajność oczyszczania, ilość i średnicę otworu wylotowego dyszy oraz dane dotyczące źródła zasilania sprężonego powietrza. Na podstawie danych z tabliczki znamionowej sprężarki należy wprowadzić dane dotyczące mocy, przepływu oraz ciśnienia sprężonego powietrza. Te parametry służą do wyznaczenia zapotrzebowania energetycznego na sprężanie powietrza w układzie odmuchującym.

Dodatkowo istnieje możliwość wprowadzenia danych uzupełniających, takich jak cena energii, koszty oraz wydajność obróbki ręcznej, a także czasy pracy, co pozwala na ocenę ich wpływu na całkowity koszt obróbki.

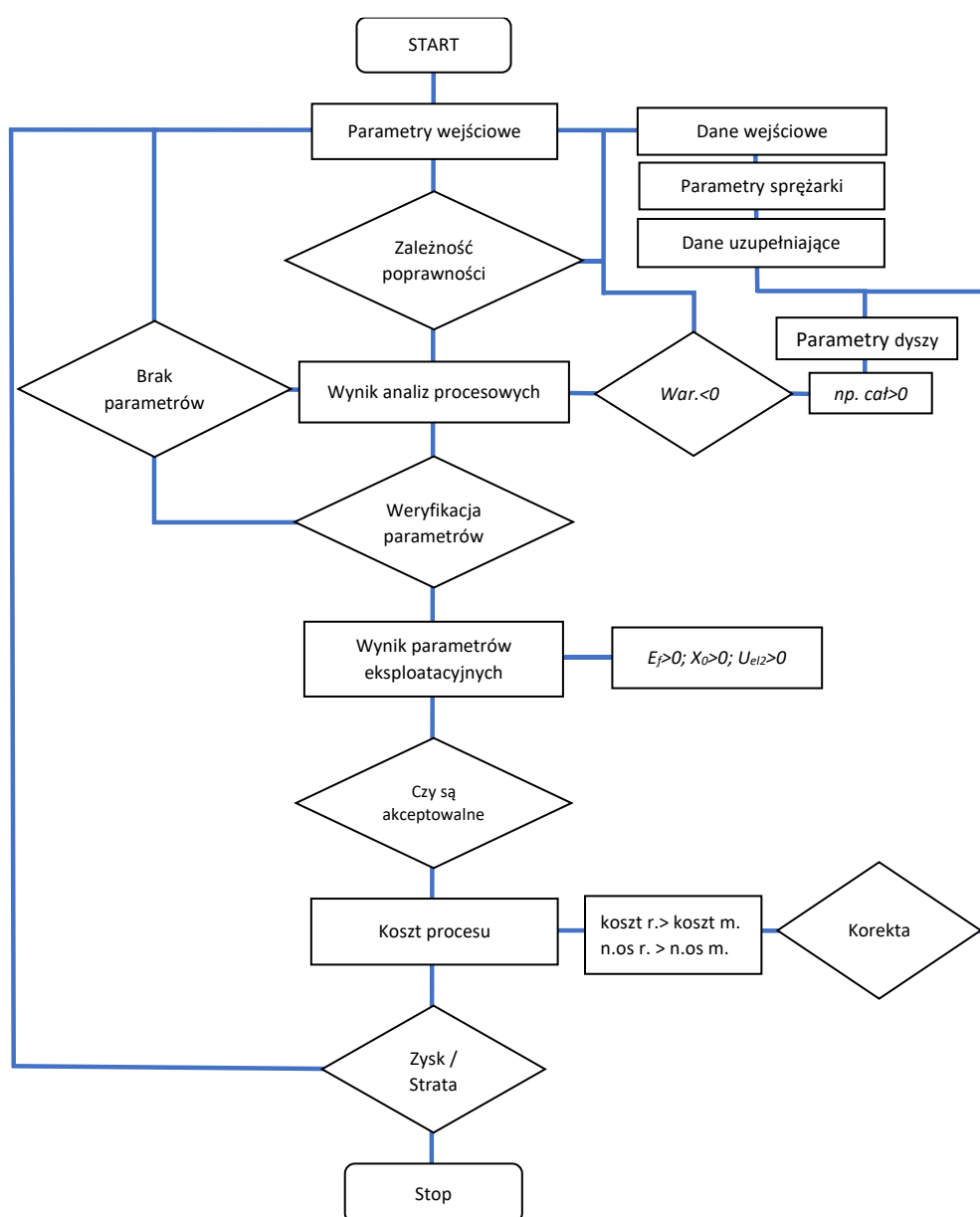


Rys. 6.1. Wygląd zewnętrzny aplikacji wdrożeniowej

Ponadto aplikacja, oprócz określenia podstawowych parametrów eksploatacyjnych, takich jak efektywność i ilość odpadu, umożliwia również oszacowanie zużycia sprężonego

powietrza. To z kolei pozwala na wyznaczenie nakładów energetycznych układu odmuchu. Na podstawie tych danych możliwe jest określenie mocy zalecanej sprężarki dla zadanych parametrów natężenia przepływu powietrza oraz ciśnienia zasilania.

Jest to szczególnie istotne w kontekście poszukiwania odpowiednich parametrów użytkowych sprężarki, co ma na celu jej dobór do opracowywanych nowych urządzeń. W początkowej fazie planowania i tworzenia nowych technologii mechanicznego oczyszczania cebuli kluczowe jest pozyskanie informacji na temat kosztów procesu oczyszczania. W związku z tym aplikacja została wzbogacona o funkcjonalność, która pozwala na porównanie efektywności procesu mechanicznego oczyszczania z obróbką ręczną. Struktura programu została określona na podstawie opracowanego uprzednio algorytmu sterowania aplikacją (rys. 6.2).



Rys. 6.2. Algorytm działania programu aplikacyjnego

Algorytm został wykorzystany do oceny, czy na danym poziomie wprowadzania zmiennych parametrów wsadowych uzyskane parametry wyjściowe są akceptowalne oraz czy konieczne jest wprowadzenie poszczególnych korekt w zależności od metody obróbki surowca. Możliwość modyfikacji i odpowiedniego doboru parametrów procesowych pozwala na osiągnięcie oczekiwanych parametrów eksploatacyjnych, co jest szczególnie praktyczne w przypadku już istniejących urządzeń, które umożliwiają w ograniczonym zakresie wprowadzenie zmian w tych nastawach.

Ponadto aplikacja została poddana wieloetapowym testom w celu walidacji poprawności jej działania, obejmujące testy jednostkowe, testy integracyjne oraz testy akceptacyjne. Na podstawie tych testów wprowadzono niezbędne korekty. Wszystkie etapy walidacji miały na celu zapewnienie niezawodności aplikacji oraz spełnienie oczekiwań użytkowników maszyn wykorzystujących oddech sprężonego powietrza.

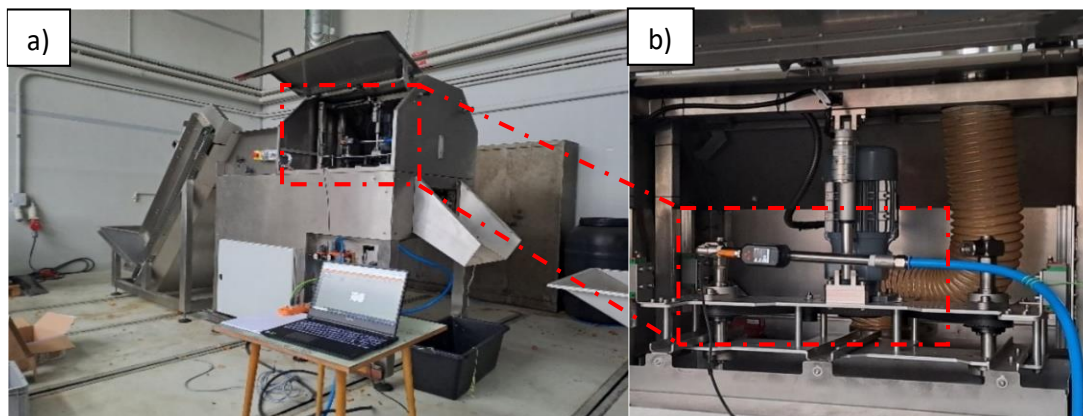
6.2. Testy aplikacji z udziałem przemysłowej linii do obróbki cebuli

Badania eksploatacyjne z wykorzystaniem aplikacji wdrożeniowej przeprowadzono na przemysłowej linii do mechanicznego oczyszczania cebuli opracowanej w Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznańskim Instytucie Technologicznym (rys. 6.3). Linia składała się z trzech głównych urządzeń, w której pierwszy człon przeznaczony był do usuwania suchej łuski z cebuli, drugi umożliwił usunięcie szczypioru i korzenia oraz trzeci stół inspekcyjny, na którym przeprowadzano ocenę jakości oczyszczania wraz z ręcznym doczyszczaniem wadliwych cebul. Linia umożliwiła obróbkę cebuli w zakresie od 10 400 do 16 800 sztuk na godzinę jej pracy, co przekłada się na jej wydajność w zakresie od 1,36 do 3,2 tony na godzinę zależnie od wielkości oczyszczanych cebul.



Rys. 6.3. Przemysłowa linia do obróbki cebuli: 1) moduł usuwania suchej łuski, 2) moduł wycinania szczypioru i korzenia, 3) moduł doczyszczania ręcznego

Badania eksploatacyjne w ramach realizacji doktoratu zostały przeprowadzone na pierwszym członie linii technologicznej, którym jest urządzenie do usuwania suchej łuski. W tym procesie przed odmuchem przeprowadza się nacięcie suchej łuski. W celu wyznaczenia zużycia sprężonego powietrza, natężenia przepływu oraz ciśnienia zasilania w układzie odmuchowym, przed zestawem dysz zainstalowano urządzenie pomiarowe SD9500 firmy IFM. (rys. 6.4).



Rys. 6.4. Umieszczenie urządzenia do pomiaru parametrów procesowych sprężonego powietrza

Badania eksploatacyjne przeprowadzono w firmie Stanek Sp. z o.o. W miejscowości Chelmiczki, która jest jednym z czołowych producentów cebuli obranej w Polsce. Testy zostały wykonane przy użyciu linii przemysłowej opracowanej przez Łukasiewicz – PIT (rys. 6.4). Głównym celem badań było zastosowanie procesów technologicznych w aplikacji do generowania parametrów eksploatacyjnych.

Testy obejmowały obróbkę cebuli w standardowym cyklu produkcyjnym firmy, przy wydajności przetwarzania cebuli wynoszącej od 1000 do 1500 kg/h. W tym celu do układu zasilania dysz odmuchowych podłączono dwa kompresory śrubowe, których łączna moc wynosiła 30 kW, a objętościowe natężenie przepływu osiągało poziom 4000 l/min.

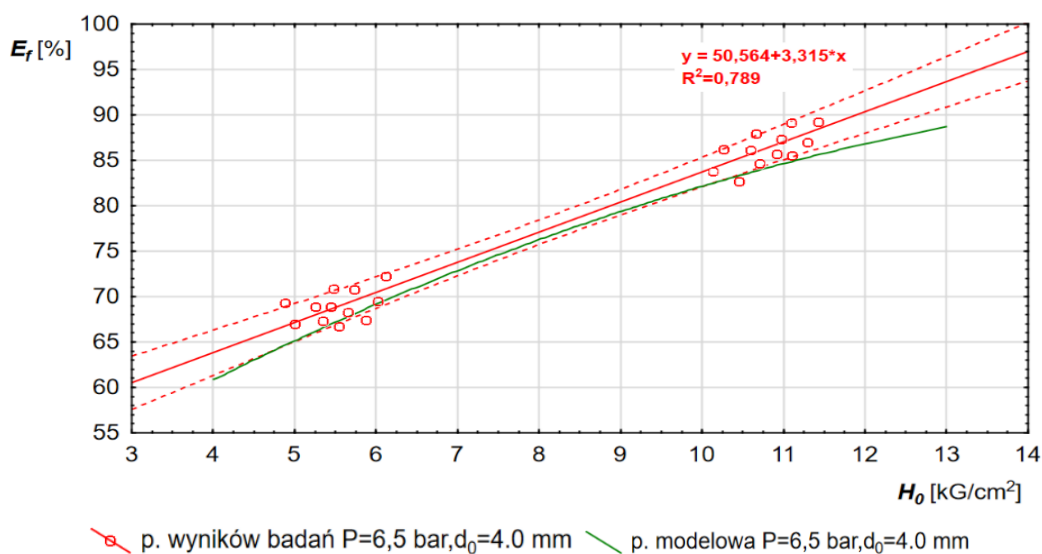


Rys. 6.5. Badania eksploatacyjne w firmie produkcyjnej Stanek Sp. z o.o.

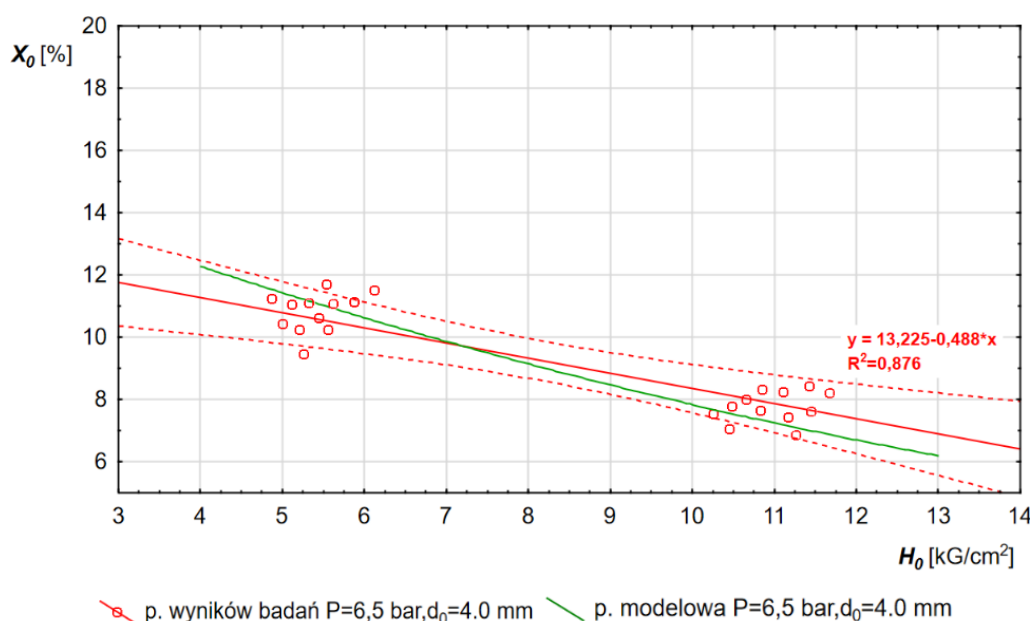
W badaniach wykorzystano 2,5 tony świeżej cebuli, która została bezpośrednio dostarczona z pól uprawnych, bez okresu przechowywania, charakteryzującej się średnią twardością wynoszącą 11,4 kG/cm². Dodatkowo, użyto 2,5 tony cebuli sezonowanej przez okres 11 miesięcy, której średnia twardość wyniosła 5,6 kG/cm². W celu analizy przeprowadzono modelowanie w aplikacji, uwzględniając odpowiednie parametry procesowe, które stanowiły wytyczne dla poniższych zależności:

- ciśnienie zasilania dysz: 6,5 bar,
- wydajność przetwarzania: 12600 szt./h,
- moc sprężarki śrubowej: 30 kW,
- natężenie przepływu: 240 m³/h,
- średnica wylotu dyszy: 4,0 mm,
- ilość dysz 2 szt.,
- ilość warstw łuski: 2 szt..

Przeprowadzone badania eksploatacyjne oraz analizy modelowe z wykorzystaniem aplikacji obliczeniowej pozwoliły na weryfikację dopasowania funkcji regresji, która została ustalona na podstawie wyników dotyczących ilości odpadu oraz efektywności oczyszczania w warunkach dużej wydajności przetwarzania surowca. Rezultaty tych badań zostały przedstawione na rysunkach (rys. 6.6 i 6.7). W oparciu o tożsame warunki brzegowe parametrów procesowych, określono modelową zależność ilości odpadu od zmiennej twardości cebuli w zakresie od 4 do 13 kG/cm², co zostało oznaczone kolorem zielonym. Wyniki pomiarów parametrów eksploatacyjnych zaprezentowano w postaci zbioru wartości, dla których wyznaczono linię trendu na podstawie analizy regresji liniowej przy poziomie ufności $p < 0,05$, oznaczonej kolorem czerwonym.



Rys. 6.6. Weryfikacja modeli obliczeniowych aplikacji z wynikami badań eksploatacyjnych efektywności w funkcji twardości cebuli



Rys. 6.7. Weryfikacja modeli obliczeniowych aplikacji z wynikami badań eksploatacyjnych ilości odpadu w funkcji twardości cebuli

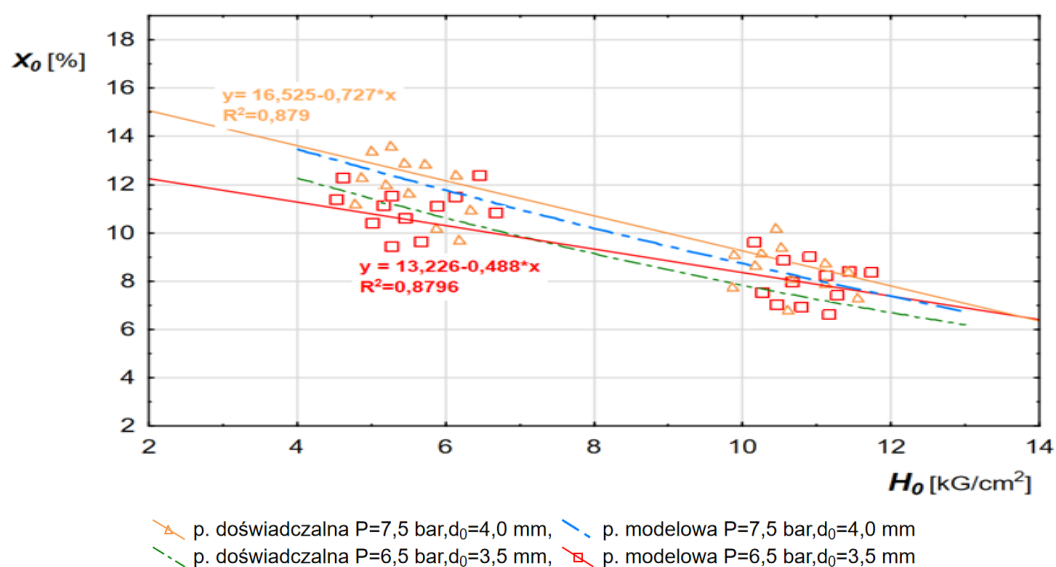
Analiza powyższych wykresów wskazuje, że model matematyczny dość dobrze odwzorowuje wyniki badań doświadczalnych dotyczące wysokowydajnego przetwarzania cebuli, zarówno w kontekście efektywności oczyszczania, jak i ilości odpadu. Dla dwóch skrajnych poziomów twardości cebuli zauważono zbliżone rozbieżności między wynikami badań, co sugeruje, że przebieg wyników nie różni się znacząco od linii regresji, która opisuje dane pomiarowe. W związku z tym przeprowadzono ocenę stopnia dopasowania modelu do wyników eksperymentalnych i modelowych (tabela 6.1).

Tabela 6.1. Porównanie R^2 dla wyznaczonej funkcji regresji liniowej i postaci modelowej

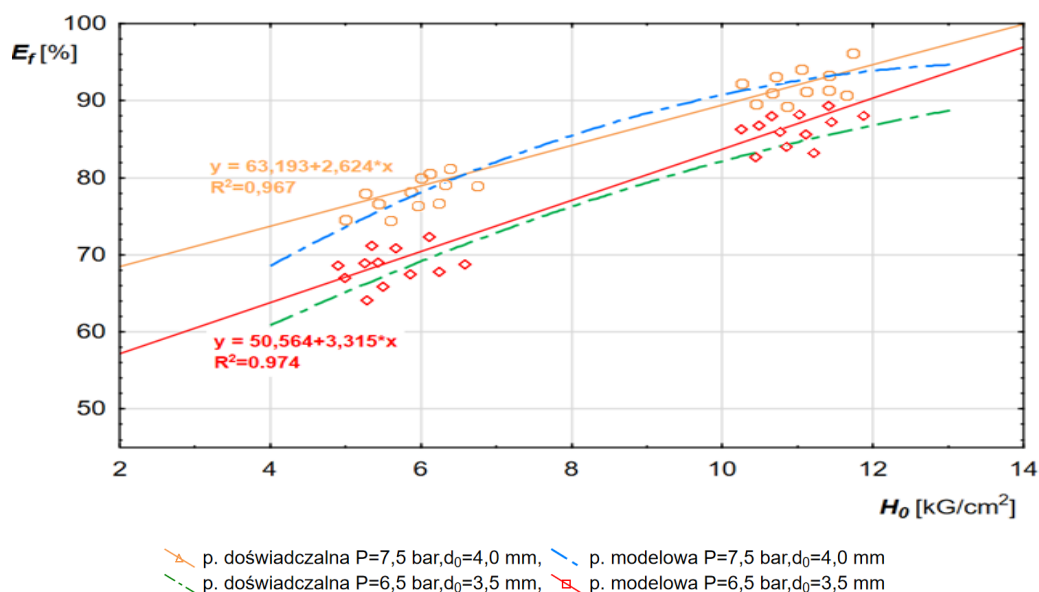
	Efektywność	Ilość odpadu
Współczynnik determinacji R^2	0,960	0,729

Dodatkowo przeprowadzono badania modelowe i doświadczalne w celu zwiększenia efektywności oczyszczania cebuli poprzez zaproponowanie nowych ustawień uzyskanych za pomocą aplikacji obliczeniowej. Przy zachowaniu stałych parametrów źródła zasilania sprężonego powietrza, takich jak moc sprężarki i natężenie przepływu, dokonano zmiany średnicy wylotowej dyszy z 4 mm na 3,5 mm, co umożliwiło osiągnięcie wyższego ciśnienia zasilania, wynoszącego od 6,5 do 7,5 bar. Wyznaczono nowe krzywe modelowe dla identycznych wartości twardości cebuli (rys. 6.8 i 6.9). Następnie przeprowadzono badania doświadczalne dla nowych zmiennych, aby zweryfikować założenia modelu oraz ocenić wpływ modyfikacji parametrów na efektywność oczyszczania i ilość generowanego odpadu.

Dodatkowo przeprowadzono badania modelowe i doświadczalne celem zwiększenia efektywności oczyszczania cebuli poprzez zaproponowanie nowych nastaw uzyskanych z aplikacji obliczeniowej. W związku ze stałymi parametrami źródła zasilania sprężonego powietrza, tj. mocy sprężarki i natężenia przepływu, dokonano zmian średnicy wylotowej dyszy z 4 na 3,5 mm, co pozwoliło na osiągnięcie wyższego ciśnienia zasilania z 6,5 do 7,5 bar. Wyznaczono krzywe postaci modelowej dla tożsamy wartości twardości cebuli (rys. 6.8 i 15). Następnie dla nowych zmiennych przeprowadzono badania doświadczalne, aby zweryfikować założenia postaci modelowych oraz ocenić wpływ zmiany parametrów nastaw na efektywność oczyszczania i ilość powstałego odpadu.



Rys. 6.8. Porównanie wyników badań oraz postaci modelowych ilości odpadu w funkcji twardości



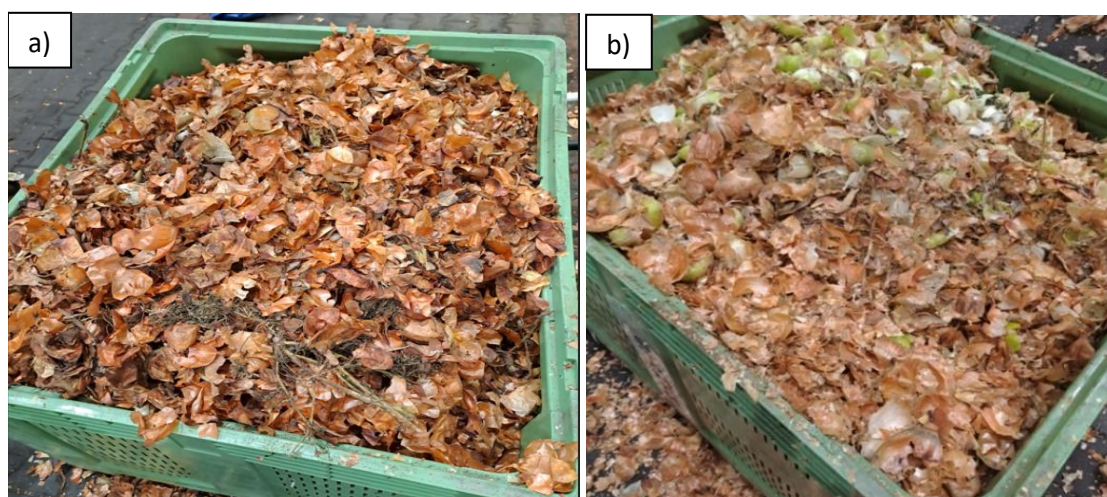
Rys. 6.9. Porównanie wyników badań oraz postaci modelowych efektywności w funkcji twardości

Na podstawie powyższych wykresów zauważono, że modyfikacje parametrów procesowych przyczyniły się do zwiększenia efektywności oczyszczania o 9,8 p.p. oraz wzrostu ilości odpadu o 3,5 p.p. dla średniej twardości wynoszącej 5,6 kG/cm². Z kolei w przypadku średniej twardości równej 11,4 kG/cm², efektywność oczyszczania wzrosła o 7,4 p.p., a ilość odpadu zwiększyła się o 1,2 p.p.. Wpływ wyższej efektywności wynikającej ze zmian parametrów ciśnienia zasilania przedstawiono na rys. 6.10.



Rys. 6.10. Efektywność oczyszczania cebuli: a) $p = 6,5$ bar, b) $p = 7,5$ bar

Wzrost wartości ciśnienia, zwłaszcza w przypadku cebuli świeżej, prowadzi do obecności w odpadzie mokrej łuski (rys. 6.11). To niepożądany skutek zwiększenia ciśnienia zasilania. Dlatego po modyfikacji nastaw parametru ciśnienia zasilania z 6,5 do 7,5 bar w przeprowadzonych badaniach uzyskano nieznacznie większą ilość odpadu suchej łuski.



Rys. 6.11. Zawartość odpadu poprodukcyjnego:

a) sucha łuska cebuli dla $p = 6,5$ bar, b) sucha i mokra łuska cebuli dla $p = 7,5$ bar

6.3. Podsumowanie badań eksploatacyjnych

W celu modelowego prognozowania parametrów eksploatacyjnych, takich jak ilość odpadu suchej łuski, efektywność oczyszczania oraz zapotrzebowanie na energię w procesie oczyszczania cebuli, opracowano w pracy aplikację wdrożeniową. Modele obliczeniowe wykorzystane w aplikacji bazują na zależnościach pomiędzy parametrami procesowymi a fizycznymi właściwościami cebuli, które zostały określone w poprzednich rozdziałach w ramach badań zasadniczych. Wprowadzony nowy algorytm działania umożliwił również ocenę opłacalności procesu mechanicznego przetwarzania surowca w porównaniu do kosztów związanych z obróbką ręczną. W tym celu przeprowadzono testy mające na celu ocenę stopnia dokładności dopasowania wyników badań modelowych do rzeczywistych danych uzyskanych z przemysłowej linii do obróbki cebuli opracowanej przez Łukasiewicz – PIT.

Badania weryfikacyjne odbyły się w dwóch etapach. Pierwszy etap polegał na przeprowadzeniu wysokowydajnych badań w celu oceny dopasowania wyników dotyczących ilości odpadu oraz efektywności oczyszczania w zależności od ciśnienia zasilania dysz odmuchowych w zakresie od 4 do 10 bar. Następnie, w drugim kroku, przeprowadzono badania po wprowadzeniu zmian zgodnie z zaleceniami z aplikacji obliczeniowej. W obu przypadkach wyznaczono krzywe regresji liniowej, aby porównać ich zmienność. Wyniki analiz wykazały, że wzrost ciśnienia oraz zmniejszenie średnicy wylotowej dysz odmuchowych przyczyniły się do zwiększenia efektywności oczyszczania o odpowiednio 9,8 p.p. i 7,2 p.p. dla średnich twardości wynoszących 5,6 i 11,4 kG/cm², przy minimalnym wzroście ilości odpadu wynoszącym 3,5 p.p. i 1,2 p.p..

7. ANALIZA RYNKU POD KĄTEM WDROŻENIA APLIKACJI OBLICZENIOWEJ W PRZEDSIĘBIORSTWACH PRZETWÓRSTWA WARZYWNEGO

7.1. Użyteczność aplikacji obliczeniowej na rynku maszyn dostępnych i nowooprocowanych

Prognozowanie przydatności aplikacji na rynku maszyn dostępnych i nowooprocowanych to kluczowy proces, który może być realizowany za pomocą różnorodnych metod analizy rynku oraz oceny technologicznej istniejących rozwiązań. Analiza trendów rynkowych odgrywa istotną rolę w określeniu przydatności zastosowań aplikacji. Przez przegląd aktualnych trendów w branży przetwórstwa maszyn i nowych technologii, można lepiej zrozumieć preferencje oraz oczekiwania klientów, a także przewidzieć ewentualne przyszłe kierunki rozwoju. W praktyce, rosnące zapotrzebowanie na zrównoważone technologie oraz automatyzację maszyn zgodne z tendencją przemysłu 4.0 mogą mieć pozytywny wpływ na przydatność aplikacji w branży.

Kolejnym istotnym krokiem jest analiza konkurencyjności na rynku lokalnym i globalnym, która polega na dokładnej analizie istniejących aplikacji konkurencyjnych lub podobnych. Pozwala to zidentyfikować zarówno mocne strony, jak i słabości rozwiązań konkurencyjnych, oraz nisze rynkowe, które mogą być wykorzystane przez nową aplikację. Dodatkowo, ocena strategii marketingowych i cenowych konkurentów umożliwia opracowanie bardziej efektywnych strategii wejścia na rynek.

Badanie potrzeb klientów stanowi równie istotny element w ocenie przydatności aplikacji na rynku. Obejmuje ono przeprowadzenie badań ankietowych, wywiadów z klientami oraz analizę opinii użytkowników, co pozwala na lepsze zrozumienie rzeczywistych potrzeb i oczekiwań klientów wobec aplikacji. Dzięki temu możliwe jest dostosowanie funkcjonalności i cech aplikacji do konkretnych potrzeb rynkowych oraz zwiększenie jej atrakcyjności dla producentów i operatorów maszyn przetwórczych.

Ważne jest dokładne przeanalizowanie zalet nowej aplikacji w porównaniu z konkurencyjnymi produktami, co pozwala na identyfikację unikalnych wartości dodanych, mogących przyciągnąć potencjalnych użytkowników. Przykładowymi zaletami mogą być nowoczesny interfejs użytkownika, prostota obsługi oraz intuicyjność, co znacząco zwiększa atrakcyjność aplikacji dla użytkowników. Kolejnym etapem jest przeprowadzanie dogłębnej analizy dostępnych technologii nie tylko w kontekście aplikacji, lecz także maszyn do przetwórstwa cebuli. Na przykład, wykorzystanie technologii chmury obliczeniowej może zwiększyć skalowalność i elastyczność aplikacji, podczas gdy integracja z systemem zarządzania bazami danych może poprawić wydajność przetwarzania i gromadzenia nowych danych. W tym celu korzystne jest prowadzenie ciągłych testów aplikacji w warunkach laboratoryjnych lub eksperymentalnych na liniach obróbczych. Pozwala to na identyfikację i poprawę ewentualnych niedoskonałości

oraz zapewnienie jej wysokiej funkcjonalności i użyteczności. Testowanie u użytkowników zróżnicowanych pod względem technologicznym maszyn może dostarczyć cennych informacji zwrotnych na temat interakcji użytkownika z interfejsem aplikacji oraz sugestii dotyczących ewentualnych ulepszeń.

Nieodłącznym jest również prognozowanie przychodów i opracowanie modeli biznesowych technologii przetwarzania cebuli, co pozwala na ocenę potencjału finansowego oraz rentowności przedsięwzięcia. W zależności od strategii biznesowej przetwórstwa, możliwe jest wdrożenie jej do sprzedaży jednorazowej lub subskrypcji, obejmującej dochody z ulepszeń zastosowanych w procesie.

Powyższe kroki są istotne dla zapewnienia skutecznego wdrożenia aplikacji na rynek maszyn i maszyn nowo opracowanych oraz zwiększenia szans na sukces i zadowolenie klientów, co przekłada się bezpośrednio na wzrost konkurencyjności przedsiębiorstw.

7.2. Możliwości i perspektywy rynkowe dystrybucji aplikacji

Możliwości i perspektywy rynkowe dystrybucji aplikacji są wszechstronne, obejmując różnorodne kanały i strategie, które mogą być dostosowane do różnych metod obróbki cebuli stosowanych w zakładach przetwórstwa spożywczego. Istnieje możliwość opracowania wersji aplikacji dla nowych platform dystrybucji, takich jak popularne App Store dla systemu iOS, Google Play dla systemu Android lub Microsoft Store dla systemu Windows. Taka dystrybucja zapewnia łatwy dostęp do aplikacji dla użytkowników końcowych na całym świecie. Wdrożenie strategii marketingowych, takich jak reklamy w mediach społecznościowych, kampanie e-mail marketingowe czy pozycjonowanie w wyszukiwarkach umożliwia efektywne promowanie aplikacji, zwiększając jej rozpoznawalność i zainteresowanie wśród grup docelowych. Dodatkowo, współpraca z partnerami biznesowymi poprzez nawiązanie partnerstw z firmami i instytucjami z branży przetwórstwa spożywczego, może przyczynić się do rozszerzenia zasięgu aplikacji oraz budowy zaufania za sprawą rekomendacji partnerów. Partnerstwa te otwierają również możliwość wspólnego rozwoju projektów i innowacyjnych rozwiązań, które mogą podnieść wartość aplikacji.

Możliwość bezpośredniej sprzedaży aplikacji klientom korporacyjnym, zainteresowanym wykorzystaniem aplikacji w celach biznesowych, może okazać się szczególnie korzystna ze względu na jej uniwersalność i możliwość dotarcia do profesjonalnych użytkowników. Oferowanie modelu subskrypcji, w którym użytkownicy płacą regularną opłatę za dostęp do aplikacji lub dodatkowe funkcje, zapewnia stabilne źródło przychodów, co umożliwia planowanie długoterminowego rozwoju i utrzymanie rentowności aplikacji. Budowanie ekosystemu wokół aplikacji poprzez integrację z innymi narzędziami, usługami lub platformami, pozwala na tworzenie dodatkowej wartości dla użytkowników i tworzenie synergii z partnerami biznesowymi, co zwiększa atrakcyjność aplikacji na rynku.

Rozwój aplikacji w kierunku gromadzenia i analizy danych, w tym możliwość personalizacji na podstawie danych użytkowników maszyn obróbczych oraz dostarczanie spersonalizowanych rekomendacji, może przyczynić się do zwiększenia zaangażowania użytkowników i budowania trwałych relacji z nimi. Te różnorodne strategie dystrybucji pozwalają na elastyczne dostosowanie aplikacji do różnych potrzeb użytkowników maszyn do przetwarzania surowca i warunków rynkowych, co przekłada się bezpośrednio na maksymalizację jej sukcesu i rentowności.

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy przedstawiono problematykę identyfikacji kluczowych parametrów procesowych i fizycznych cebuli mających bezpośredni wpływ na proces w kontekście jej efektywności oczyszczania, powstałej ilości odpadu warstw wierzchnich cebuli oraz jakości oczyszczania. Zagadnienie to jest istotne z punktu widzenia wydajności i opłacalności mechanicznego przetwórstwa cebul. Na potrzeby unowocześnienia i optymalizacji pracy linii i urządzeń do obróbki cebuli stanowią one podstawowe wytyczne do opracowywania nowych wysoko wydajnych maszyn przetwórczych. Wobec powyższych zagadnień sformułowanym celem naukowym był dobór parametrów oczyszczania cebuli wpływających korzystnie na zapotrzebowanie na energię, efektywność oraz jakości obieranego produktu. Cel ten zrealizowano za pomocą następujących zadań częściowych:

- przeprowadzono analizę odmian cebuli, okresów ich wegetacji i warunków ich przechowywania oraz dokonano przeglądu technologii i metod usuwania suchej łuski oraz szczypioru i korzenia;
- dokonano identyfikacji głównych parametrów fizycznych cebuli oraz przeprowadzono pomiary wybranych parametrów mających wpływ na oczyszczanie cebuli;
- przeprowadzono analizę parametrów eksploatacyjnych, obejmujących jakość i efektywność oczyszczania, zapotrzebowanie na energię oraz ilość odpadu;
- opracowano stanowisko do odmuchu suchej łuski z cebuli wyposażonej w szereg czujników do pomiarów kluczowych parametrów procesowych;
- opracowano zależności parametrów eksploatacyjnych od parametrów procesowych i fizycznych cebuli w ramach badań eksperymentalnych;
- opracowano aplikację do generowania parametrów eksploatacyjnych procesu usuwania suchej łuski z cebuli;
- przeprowadzono badania eksploatacyjne na podstawie wytycznych aplikacji na przemysłowej linii do mechanicznej obróbki cebuli;

W literaturze przedmiotu nie znaleziono informacji na temat wpływu parametrów procesowych na efektywność oczyszczania, ilość powstałego odpadu, zapotrzebowania na energię procesu oraz jakość obórki surowca oraz nie znaleziono dostępnych programów do analitycznego wyznaczania powyższych zmiennych. W tym celu dokonano z wykorzystaniem opracowanego stanowiska badawczego, identyfikacji oraz analizy parametrów procesowych i fizycznych korzystnych dla oczyszczania cebuli. Zebrane dane pomiarowe oraz uzyskane wyniki badań eksperymentalnych pozwoliły określić zależności wpływu badanych parametrów na wartość efektywności i ilości odpadu w procesie odmuchu suchej łuski. Posłużyły one jako modele obliczeniowe do opracowanej w pracy aplikacji do wyznaczania parametrów eksploatacyjnych, którą szczegółowo zweryfikowano

w warunkach przemysłowych. Badania przeprowadzone w firmie Stanek Sp. z o.o., wykazały zgodność aplikacji z eksperymentem dla efektywności na poziomie 96 % i ilości odpadu na poziomie 73 %. Na tej podstawie potwierdzono skuteczność działania aplikacji oraz jej gotowość wdrożeniową.

8.1. Odniesienie do hipotezy i celu pracy

W pracy sformułowano następujące hipotezy:

- 1. Właściwości cebuli mają wpływ na parametry eksploatacyjne mechanicznego jej oczyszczania.**
- 2. Parametry procesu oczyszczania cebuli mają wpływ na efektywność, zapotrzebowanie na energię oraz jakość obieranego produktu.**

W związku z powyższym przeprowadzono analizę wpływu wybranych parametrów procesowych i fizycznych cebuli na parametry eksploatacyjne procesu mechanicznego jej oczyszczania. W tym celu wykonano szereg badań oraz eksperymentalnych, mających na celu opracowanie programu aplikacyjnego do modelowego generowania parametrów efektywności, zapotrzebowania na energię oraz ilości odpadu. Zaproponowane modele obliczeniowe opracowano na podstawie zależności wygenerowanych z wyników badań zasadniczych. Następnie skonfrontowano wyznaczone krzywe modelowe, reprezentujące wyniki parametrów eksploatacyjnych zależnych od zmiennych takich jak ciśnienie zasilania oraz twardość, z rzeczywistymi wynikami badań eksploatacyjnych przeprowadzonych w warunkach produkcyjnych.

W efekcie potwierdzono realizację postawionych w pracy celów. Uzyskano wysoki stopień dopasowania pomiędzy wspomnianymi parametrami. Wyniki badań aplikacyjnych mogą być zatem korzystnie wykorzystywane zarówno w opracowywanych oraz istniejących maszynach do usuwania suchej łuski za pomocą sprężonego powietrza.

8.2. Wnioski poznawcze

W celu udowodnienia postawionej tezy w pracy, zaproponowano weryfikację opracowanej metody wyznaczania parametrów eksploatacyjnych (efektywność oczyszczania, ilość odpadu, zapotrzebowanie na energię), na podstawie parametrów fizycznych obieranych cebul i proponowanych parametrów procesowych maszyn i urządzeń obróbczych, za pomocą aplikacji wdrożeniowej. W pierwszym etapie przeprowadzono pomiary parametrów fizycznych i mechanicznych cebuli różnych odmian, aby wyznaczyć ich wielkość, masę, twardość i inne istotne informacje mogące wpłynąć na stopień oczyszczenia. Na podstawie cech morfologicznych opracowano stanowisko laboratoryjne do badań prób jednostkowych usuwania suchej łuski. Powstały fizyczny prototyp stanowił odzwierciedlenie linii technologicznej procesu odmuchu suchej łuski. Na tym stanowisku przeprowadzono badania wstępne w celu wytypowania kluczowych parametrów

użytkowych mających wpływ na efektywność i ilość odpadu. Następnie, na podstawie badań, wyznaczono parametry eksploatacyjne i przeprowadzono szereg analiz statystycznych, w tym korelacji rang Spearmana, w celu oceny siły zależności wpływu parametrów fizycznych i procesowych na parametry eksploatacyjne. Potwierdza to założenia hipotez, iż właściwości cebuli oraz parametry procesowe mają bezpośredni wpływ na parametry eksploatacyjne mechanicznego oczyszczania. Wyniki analiz potwierdziły silną zależność efektywności oczyszczania, zapotrzebowania na energię oraz ilości odpadu od ciśnienia zasilania pneumatycznego układu dysz odmuchujących suchą łuskę z cebuli.

W dalszej części, wyniki badań stanowiskowych i analiz statystycznych posłużyły do opracowania modeli obliczeniowych, na bazie których powstała aplikacja wdrożeniowa. Aby zweryfikować jej dokładność, przeprowadzono jej walidację podczas badań eksploatacyjnych na przemysłowej linii do obróbki cebuli o wysokiej wydajności oczyszczania surowca. Podczas symulacji wprowadzono korekty wartości zmiennych w aplikacji w celu poprawy jej skuteczności działania. Wyniki obu analiz potwierdziły jej skuteczność oraz przydatność do określania parametrów definiujących opłacalność procesu. Pozwala to na szerokie wykorzystanie jej w praktyce, co w efekcie potwierdza realizację celu zasadniczego oraz związanych z nim celów pośrednich.

Szczególną korzyścią z użycia tej metody szacowania parametrów eksploatacyjnych jest jej prostota, gdyż nie wymaga specjalistycznego oprogramowania, a istnieje możliwość jej rozbudowy. W związku z powyższym, zdaniem autora, zaimplementowane parametry fizyczne cebuli oraz parametry procesowe metody oczyszczania są wystarczające dla osiągnięcia oczekiwanych parametrów eksploatacyjnych, definiujących wskaźniki opłacalności procesu, co potwierdza jej przydatność w praktyce.

8.3. Wnioski uytylitarne

Aplikacja wdrożeniowa, która jest przedmiotem analizy, ma kluczowe znaczenie dla oceny opłacalności oczyszczania mechanicznego cebuli. Poprzez umożliwienie dokładnej analizy kosztów i korzyści z tego procesu, pozwala to na podejmowanie świadomych decyzji inżynierskich i biznesowych, co przekłada się na bardziej efektywne zarządzanie zasobami i zwiększenie rentowności przetwarzania surowca na rynku.

Wsparcie w podejmowaniu decyzji przy projektowaniu nowych maszyn i usprawnianiu istniejących urządzeń przetwórstwa spożywczego to kolejny istotny aspekt aplikacji. Dzięki możliwości wielokryterialnej optymalizacji procesu kontroli jakości, uwzględniającej efektywność kosztową, aplikacja przyczynia się do doskonalenia technologii produkcji, co może skutkować zmniejszeniem strat i zwiększeniem wydajności.

Uniwersalny charakter aplikacji sprawia, że może być ona stosowana w różnych rodzajach technologii obróbki surowca oraz przy różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych maszyn wykorzystujących sprężone powietrze. To otwiera możliwość wykorzystania

aplikacji w różnych branżach i zakładach przemysłowych i przekłada się na większą elastyczność oraz adaptacyjność w procesach produkcyjnych.

Aplikacja umożliwia również rozwój i wdrażanie nowych parametrów procesowych oraz fizycznych parametrów cebuli nowo opracowanych odmian. Dzięki temu producenci mogą dostosowywać procesy produkcyjne do zmieniających się warunków rynkowych i potrzeb klientów, co pozwala na utrzymanie konkurencyjności oraz dostosowanie się do dynamicznie zmieniającego się otoczenia biznesowego.

8.4. Propozycja dalszych prac

Osiągnięcie założonych celów w ramach niniejszej rozprawy stanowi jedynie początek w rozwiązywaniu kompleksowej problematyki związanej z wyznaczaniem parametrów eksploatacyjnych z parametrów fizycznych cebul i procesowych maszyn do ich obróbki. Istnieje wiele kolejnych kroków, które mogą być podjęte w celu dalszego udoskonalenia opracowanej metody oraz polepszenia warunków obróbki. Jednym z kluczowych zadań może być poszukiwanie nowych odmian cebul o specyficznych właściwościach, które mogą wpłynąć na opłacalność ich obróbki. Nowe odmiany cebul mogą otworzyć drogę do optymalizacji procesów produkcyjnych oraz poprawy wydajności maszyn.

Kolejnym krokiem w kierunku poprawy warunków obróbki może być opracowanie aplikacji zaimplementowanej w sterownikach maszyn do obróbki, zwłaszcza dla maszyn nowo opracowywanych. Poprzez wykorzystanie kamer do analizy obrazu cebuli oraz algorytmów identyfikacji obrazu, możliwe byłoby automatyczne dostosowanie parametrów procesowych urządzeń, co prowadziłoby do poprawy ich efektywności. Taka metoda charakteryzowałaby się prostotą obsługi, co mogłoby znacznie ułatwić pracę operatorów maszyn.

Dopełnieniem prac może być wyposażenie maszyn w kamery 3D oraz opracowanie algorytmów identyfikacji ilości odpadu na podstawie analizy objętościowej spadającej łuski z układu obróbczego. Implementacja danych w sterownikach maszyn umożliwiłaby wprowadzanie korekt, mających na celu redukcję odpadu, co minimalizowałoby straty podczas procesu odmuchu. Takie działania pozwoliłyby na precyzyjny rozdział cebuli na łuskę suchą i moką, co z kolei mogłoby znacznie rozszerzyć jej potencjalne zastosowania, zwiększając elastyczność i wykorzystanie jej w różnych obszarach przetwórstwa.

Podsumowując, istnieje wiele możliwości dalszego rozwoju i doskonalenia opracowanej metody oraz procesów obróbki cebuli, które mogą przyczynić się do efektywniejszej produkcji oraz zwiększenia opłacalności i elastyczności w wykorzystaniu tego surowca.

LITERATURA

1. Adnan, N.H. Design and Development of a Portable Onion Peeler Machine. Ph.D. Thesis, Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia: Johor, Malaysia. 2010.
2. Alfonsi G.: Reynolds-Averaged Navier–Stokes Equations for Turbulence Modeling
3. Ambrose D. C. P.: Engineering Properties of Peeled and Unpeeled Multiplier Onion Central Instt. of Agrl. Engg., Regional Centre, Coimbatore, India, ISSN: 2347-4688, Vol. 8, No.(3) 2020,
4. Amer Essa A.H., Gamea G.R.: Physical and mechanical properties of bulb onions. 2002, Research Gate [dostęp: 29.05.2021]
5. Atmaca M. i inni: CFD analysis of jet flows ejected from different nozzles. International Journal of Low-Carbon Technologies, 00, 1–6 2021
6. Badania statystyczne Głównego Urzędu Statystycznego: <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/rolnictwo-lesnictwo/uprawy-rolne-i-ogrodnicze/wynikowy-szacunek-glownych-ziemiplodow-rolnych-i-ogrodniczych-w-2021-roku,5,20.html>
7. Badełek E., Kosson R., Adamicki F., Maciorowski R. Wpływ odmiany i warunków przechowywania na zawartość wybranych składników w cebuli, Zeszyty Naukowe Instytutu Ogrodnictwa 2016,24: 19-31
8. Bahnasawy, A.H.; El-Haddad, Z.A.; El-Ansary, M.Y.; Sorour, H.M. Physical and mechanical properties of some Egyptian onion cultivars. *J. Food Eng.* 2004, 62, 255–261.
9. Baloch R.A. i inni: Economic Analysis of Onion (*Allium cepa* L.) Production and Marketing in District Awaran, Balochistan. Journal of Economics and Sustainable Development, Vol.5, No.24, 2014
10. Batiha, G.E.S.; Beshbishy, A.M.; Ikram, M.; Mulla, Z.S.; Abd El-Hack, M.; Taha, A.E.; Algammal, A.M.; Elewa, Y.H.A. The Pharmacological Activity, Biochemical Properties, and Pharmacokinetics of the Major Natural Polyphenolic Flavonoid: Quercetin. *Foods* 2020, 9, 374.
11. Benitez V., Molla E., Martin-Cabrejas M., Aguilera Y., Andreu F., Cools K., Terry L., Esteban R. 2011. Characterization of industrial onion wastes (*Allium cepa* L.): dietary fibre and bioactive compounds. *Plant Foods Human Nutrition*. 66. 48-57.
12. Benito-Roman, O.; Alonso-Riano, P.; Díaz de Cerio, E.; Sanz, M.T.; Beltran, S. Semi-continuous hydrolysis of onion peel wastes with subcritical water: Pectin recovery and oligomers identification. *J. Environ. Chem. Eng.* 2022, 10, 107439.
13. Bębnowy układ odmuchu łuski z cebuli: <https://mp-engineering.co.uk/onion-peelers/> [dostęp: 16.06.2022]
14. Bieńczak, A.; Dembicki, D.; Woźniak, P.; Ignasiak, Ł.; Obidziński, S. Analysis of mechanical properties of common onions. *J. Res. Appl. Agric. Eng.* 2017, 62
15. Bochat A., Zastempowski M. Wachowicz M.: Cutting Tests of the Outer Layer of Material Using Onion as an Example. *Materials* 14(9), 2021
16. Broszura interpretacyjna do normy handlowej na cebulę zawartej w rozporządzeniu Komisji (WE) nr 1508/2001 z dnia 24 lipca 2001 r. [dostęp: 22.06.2022]
17. Chakraborty A.J., *Allium cepa: A Treasure of Bioactive Phytochemicals with Prospective Health Benefits*, Evid Based Complement Alternat Med, 2022
18. Chakraborty A.J., i inni, *Allium cepa: A Treasure of Bioactive Phytochemicals with Prospective Health Benefits*, Evid Based Complement Alternat Med, 2022
19. Choi, I.S.; Cho, E.J.; Moon, J.-H.; Bae, H.-J. Onion peel waste as a valorization resource for the by-products quercetin and biosugar. *Food Chem.* 2015, 188, 537–542.

20. Choroby cebuli: <https://www.warzywapolowe.pl/fuzaryjna-zgnilizna-cebuli-wystepowanie-objawy-chorobowe-mozliwosci-minimalizacji-strat/> [dostęp:22.06.2023]
21. Chronologue A. all. Biological control of soil-borne phytopathogenic fungi through onion waste composting: implications for circular economy perspective, *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol.20, Issue 4, 2023
22. Dabhi M., Patel N. Physical and Mechanical Properties of Talaja Red Onion Cultivar, *Bioprocess Engineering*,1(4): 110-114, 2017
23. Dane statystyczne uprawy cebuli w UE: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php> [dostęp: 12.02.2024]
24. De Laurentiis, V.; Corrado, S.; Sala, S. Quantifying household waste of fresh fruit and vegetables in the EU. *Waste Manag.* 2018, 77, 238–251.
25. Desh R.C., Choudhary H.: Improved varieties of onion. 2015, Research Gate (access 29.05.2021)
26. El-Ghobashy, H.; Bhansawi, A.; Ali, S.A.; Afify, M.T.; Emara, Z. Development and evaluation of an onion peeling machine. *Misr J. Agric. Eng.* 2012, 29, 663–682.
27. Fernandes, A.; Gois, A.; Mendes, F.; Perestrelo, R.; Medina, S.; Câmara, J.S. Typicality Assessment of Onions (*Allium cepa*) from Different Geographical Regions Based on the Volatile Signature and Chemometric Tools. *Foods* 2020, 9, 375.
28. Ghaffari, H.; Marghoub, N.; Sheikh-Darabadi, M.S.; Hakimi, A.; Abbasi, F. Physical properties of three Iranian onion varieties. *Int. Res. J. Appl. Basic Sci.* 2013, 7, 587–593.
29. Ghanem, T.H.; Badr, M.M.; Nagy, K.S.; Darwish, E.A. Evaluation of performance of an onion peeling machine. *Process Eng.* 2020, 37, 95–106.
30. González-de-Peredo A.V. i inni, Flavonol Composition and Antioxidant Activity of Onions (*Allium cepa* L.) Based on the Development of New Analytical Ultrasound-Assisted Extraction Methods, *Antioxidants (Basel)*, 10(2), 2021
31. Grzegorzewska M., Badełek E.: „Straty w czasie przechowywania cebuli, marchwi i kapusty głowiastej białej”, Instytut Warzywnictwa im. Emila Chroboczka w Skierniewicach, Skierniewice, 2010
32. Guiné, R.P.F.; Barroca, M.J. Influence of freeze-drying treatment on the texture of mushrooms and onions. *Croat. J. Food Sci. Technol.* 2016, 3, 26–31.
33. Hanci F., Gokce A. F.: Comparasion of different metods to determination of bulb dry skin color in onion. 1. International GAP Agriculture and Livestock Congress, Şanlıurfa-Turkey, 2018
34. Hedgez, L.J.; Lister, C. The nutritional attributes of *Allium* species. In *Crop & Food R. Conf. Rep.* ., 2007, 1814.
35. Hegazy R., i inni: Development of onion peeling machine suitable for small-scale agricultural industries. *Fresenius Environmental Bulletin* 2020
36. Hole, C.C.; Drew, R.L.; Gray, D. Humidity and mechanical properties of onion peels. *Postharvest Biol. Technol.* 2000, 19, 229–237.
37. <https://foodfakty.pl/rynek-cebuli-w-polsce-perspektywy-na-sezon-2020-21>
38. Jeon J., Kim S. J.: FVM Network to Reduce Computational Cost of CFD Simulation,2021
39. Jeżowiecka – Kabsch K., Szewczyk H.: *Mechanika Płynów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, ISBN 83-7085-597-0200, 2001
40. Jin J., Ma Y., Ouyang L., Gu X. Improved Rolled Throughput Yield: A Novel Method for Performance Measurement, *IEMI 2014*, China, 175-179
41. Kate, A.E.; Pawar, D.A.; Chakraborty, S.K.; Gorepatti, K. Development and evaluation of onion bulb descaler for removal and collection of surface dry peel. *J. Food Sci. Technol.* 2022, 59, 2448–2459.

42. Kaveri. G., Thirupathi. V. Studies on geometrical and physical properties oh co 4 onion bulb (*Allium Cepa Lvar. aggregation don.*), International Journal of Recent Scientific Research., Vol. 6, Issue, 3, pp.2897-2902, 2015
43. Khan S. A. i inni: CFD analysis of compressible flows in a convergent-divergent nozzle. Materials Today: Proceedings 2021
44. Khan, M.; Ahmad, N.; Lu, K.; Sun, Z.; Wei, C.; Zheng, X.; Yang, R. Nitrogen-doped carbon derived from onion waste as anode material for high performance sodium-ion battery. *Solid State Ionics* 2020, *346*, 115223.
45. Kim, H.M.; Song, Y.; Wi, S.G.; Baea, H.-J. Production of D-tagatose and bioethanol from onion waste by an integrating bioprocess. *J. Biotech.* 2017, *260*, 84–90.
46. Kumar P., i inni: Effect of Levels of Spacing and Varieties on Growth of Onion (*Allium cepa L*) Int.J.Curr. Microbiol. App.Sci 10(03), 2021
47. Kumawat, L.; Raheman, H. Determination of engineering properties of onion crop required for designing an onion harvester. *Cogent Eng.* 2023, *10*, 2191404.
48. Maghfurah, F.; Effendi, R.; Aini, M.N. Design of Onion Epidermis Peeling and Onion Smoothing Machine with Rubber Friction Method Application. *J. Polimesin* 2020, *18*, 39–46.
49. Martínez, A.R.; Paz, J.F.; Ares, L.A. Evaluation of local onion lines from northwest Spain. *Span. J. Agric. Res.* 2005, *3*, 90–97.
50. Maurya S. K. i inni: Effect of Spacing and Varieties on Quality Parameters of Rabi Onion (*Allium cepa L.*). Ind. J. Pure App. Biosci., 7(5), 2019
51. Mieszkalski L.: Matematyczne modelowanie kształtu główki cebuli cukrowej (*Allium cepa L.*) za pomocą równań parametrycznych. Postępy techniki przetwórstwa spożywczego 2/2015, s. 68-71
52. Mieszkalski, L. Bezier curves in modelling the shapes of biological objects. *Agric. For. Eng.* 2014, *64*, 117–128.
53. Mohamad, N.S.; Sulaiman, R.; Lai, M.; Hussain, N. Comparison between conventional and alternative peeling methods on peeling efficiencies of Malaysian “Chok Anan” mango (*Mangifera indica L.*) fruit. *Int. Food Res. J.* 2017, *24*, 1934–1940.
54. Munir, M.T.; Kheirkhah, H.; Baroutian, S.; Quek, S.Y.; Young, B.R. Subcritical Water Extraction of Bioactive Compounds from Waste Onion Peel. *J. Clean. Prod.* 2018, *183*, 487–494.
55. Nadulski R., Guz T.: Wpływ niektórych parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych na proces cięcia warzyw. Inżynieria Rolnicza, 2001,Nr 10 (30). s. 253-258.
56. Naik, R.; Annamali, S.J.K.; Ambrose, D.C.P. Development of batch type multiplier onion peeler. In Proceedings of the Inter. Agri. Eng. Conf. 2007
57. Nor N.H. M.: Design and Development of Shallots Skin Peeler Machine. Journal of Industry, Engineering and Innovation, Vol. 1 No. 2, Malaysia,2019
58. Norma Branżowa BN -878165-31pt. Cebula krojona zamrożona.
59. Obidziński S. Joka M., Bieńczak A., Jadwisieńczak K. Test of the proces of post-production onion waste pelleting, Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering”, Vol. (62)2, 2017
60. Obidziński S., Kowczyk-Sadowy M., Joka M., Jadwisieńczak K.: Densification and Fuel Properties of Onion Husks. Energies,. vol. 12, Switzerland, 2019
61. Osman, N.A.; Muhamood, A.N.; Ramli, A. The development and evaluation of onion peeling machine for SMEs industry. Politeknik & Kolej Komuniti. *J. Eng. Technol.* 2020, *5*, 10–13.

62. Piechowiak T., Józefczyk R., Balawejder M. Przetwarzanie odpadu z produkcji cebuli w żywność funkcjonalną, *Polish Journal for Sustainable Development* T. 24 cz. 1, 2020
63. Pragayaashree M.M., Kailappan R., Kennedy J. Z.: Mechanical properties of onion seeds (*Allium cepa* variety aggregatum L.) under compression loading. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, 2015, IJAEB: 8(2): 477-487
64. Prodromidis, P.; Mourtzinis, I.; Biliaderis, C.G.; Moschakis, T. Stability of natural food colorants derived from onion leaf wastes. *Food Chem.* 2022, 386, 132750.
65. Ravichandran, P.; Anbu, C.; Kumar, R.S.; Sakthivel, A.; Thenralarasu, S. Design and fabrication of automatic onion peeling and cutting machine. *Int. J. Sci. Technol. Res.* 2019, 8, 2067–2070.
66. Rewolwerowy układ odmuchu łuski z cebuli: <https://theequipmentbutler.com/product/sormac-onion-peeler/> [dostęp: 16.06.2022]
67. Rolkowy transport cebuli: <https://machinerymakeslifebetter.myshopify.com/products/industrial-onion-peeler?variant=43094433595635> [dostęp: 28.05.2022]
68. Rosli M.F. i inni.: Analysis of onion peeler machine using ansys simulation analysis AIP Conference Proceedings 2291, 020107, 2020
69. ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (WE) NR 1508/2001 z dnia 24 lipca 2001 ustanawiające normę handlową dla cebuli i zmieniające rozporządzenie (EWG) nr 2213/83 (Dz.U. L 200 z 25.7.2001, str. 14)
70. Sadowska I. Metody ananlizej energochłonności w Polsce, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* Nr 33, 2013
71. Saghaei A., Najafi H., Noorossana R., Enhanced Rolled Throughput Yield: A new six sigma-based performance measure, *Int. J. Production Economics*, 2012, 140, 368-37
72. Sampaio Soares G.A., Dietary habits and *Helicobacter pylori* infection: is there an association?, *Therapeutic Advances in Gastroenterology*, Vol. 16, 2023
73. Setyowati, A., L.; Dwijayanti, D.; Sultan, M. Related factors of carpal tunnel syndrome (CTS) among onion peel peeler worker at Segiri Samarinda, east Kalimantan. *J. Fak. Kesehat. Masy. Univ. Ahmad Daulan* 2015, 9, 125–132.
74. Sharma K., Mahato N., Nile S.H., Leeb E.T, Lee Y.R., Economical and environmentally-friendly approaches for usage of onion (*Allium cepa* L.) waste, *Foods and Fuction* Vol. 8, 2016
75. Strivastava, A.; VanEe, G.; Ledebuhr, R.; Welch, D.; Wang, L. Design and development of an onion peeling machine. *Appl. Eng. Agric.* 1997, 13, 167–173
76. Swaminathan C., i inni: Bulb Orientation at Sowing Influences Germination and Yield in Onion (*Allium cepa* L) *Indian Horticulture Journal* 10(3/4): 56-60 July-Dec, 2020
77. Ślimakowy układ odmuchu suchej łuski z cebuli: <https://onionmachine.pl/> [dostęp: 16.06.2022]
78. Technologia pionowa oczyszczania, dostępne na <https://foodautomation.com.au/services/finis/>, [dostęp: 22.08.2023]
79. Technologia pozioma oczyszczania, dostępne na <https://www.jbtc.com/foodtech/products-and-solutions/products/peelers-corers-decorers/magnetic-onion-peeler/>, [dostęp: 22.08.2023]
80. Tereshkin, O.; Horielkov, D.; Dmytrevskyi, D.; Chervonyi, V. The study of influence of the process of mechanical additional peeling on the surface onion layer at combined process of peeling. *EUREKA Life Sci.* 2016, 6, 24–30.

81. Thivya, P.; Bhosale, Y.K.; Anandakumar, S.; Hema, V.; Sinija, V.R. Study on the characteristics of gluten/alginate-cellulose/onion waste extracts composite film and its food packaging application. *Food Chem.* 2022, 390, 133221.
82. Wala K., Kuczyńska M., Zdrojewicz Z., Onion – an underrated source of therapeutic benefits, *Borgis - Medycyna Rodzinna*, Vol. 1, 2019
83. Wang, L. *Performance Testing of an Onion Peeling Machine Using Response Surface Methodology*; Michigan State University: East Lansing, MI, USA, 1993.
84. Wojdalski J., Drózd B., Efektywność energetyczna zakładów przemysłu spożywczego. *Zarys problematyki i podstawowe definicje*, *Inżynieria Przetwórstwa Spożywczego*, 3, 2012
85. Woźniak P., Bieńczak A., Ignasiak Ł., Dembicki D., Obidziński S., Analysis of mechanical properties of common onions, *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, Vol. (62)2, 2017
86. Woźniak P., Bieńczak A., Kiczek T., Gaszek K., Analiza technologii mechanicznego oczyszczania cebuli w maszynach przemysłowych, *Technika Rolnicza, Ogrodnicza, Leśna*, Vol. 2, 2022
87. Woźniak P., i inni: Opracowanie innowacyjnej technologii podnoszącej jakość oczyszczania cebuli wraz z uwzględnieniem zagospodarowania odpadów poprodukcyjnych, *Biblioteka Łukasiewicz_PIT 6\ZS\2021*
88. Woźniak, P.; Bieńczak, A.; Kiczek, T.; Gaszek, K. Analysis of the technology of mechanical onion cleaning in industrial machines. *Agric. Hortic. For. Tech.* 2022, 2, 53–60.
89. Woźniak, P.; Nosal, S.; Bieńczak, A. Analysis of technology and machining devices for peeling onion in the food industry. *MATEC Web Conf.* 2021, 343, 01006.
90. Yalcin H., Kavuncuoglu H.: Physical, chemical and bioactive properties of onion (*Allium cepa* L.) seed and seed oil. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 2014, 87, 87 – 92
91. Zawisławski M., Metoda projektowania i modernizacji maszyn oraz układów przepływowych z zastosowaniem numerycznej mechaniki płynów, *Autoreferat*, *Politechnika Wrocławska*, s. 15, 2018
92. Zgnilizna cebuli: <https://www.sodr.pl/main/aktualnosci/Choroby-w-przechowywaniu-warzyw-czesc-2.-Cebulowe/idn:2210> [dostęp: 22.06.2023]
93. Zhang X., He Z., Shi L., Process Quality Metrics for Mechanical and Electrical Production Lin, *ICAE Procedia Engineering* 24, 2011, China, 6 – 11
94. ZHAO di J. inni: Study on Characteristics of Pneumatic Nozzle and Blowing System. *Materials Science and Engineering* 382, 2018

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 2.1. Budowa morfologiczna główki cebuli:	14
Rys. 2.2. Zgnilizna główki cebuli [20,92]: a) poszczególnych warstw mokrych cebuli, b) wewnątrz cebuli, c) na zewnątrz cebuli.....	16
Rys. 2.3. Uszkodzenia mechaniczne cebuli [20,92]: a) uderzenie w okolice korzenia, b) zniszczenie warstw cebuli, c) zniszczenie korzenia	16
Rys. 2.4. Wady kształtu główki cebuli [16]: a) zgrubiały szczypior, b) zrosnięta główki cebuli, c) łuska wewnątrz warstw mokrych cebuli.....	17
Rys. 2.5. Deformacja kształtu cebuli [16]: a) zniekształcenia powierzchni cebuli, b) zrosnięte warstwy mokre cebuli, c) zniekształcenia łodygi	17
Rys. 2.6. Odbarwienia łuski suchej cebuli [16]: a) plamy na suchej łusce, b) odbarwienia łuski, c) odbarwienia wewnętrznych warstw łuski.....	17
Rys. 2.7. Uszkodzenia łuski na powierzchni cebuli [16]: a) pęknięcia łuski, b) braki części łuski c) brak łuski na połowie powierzchni cebuli	18
Rys. 2.8. Technologie obróbki cebuli:.....	19
Rys. 2.9. Usuwanie suchej łuski z cebuli zawierającej szczypior i korzeń	20
Rys. 2.10. Usuwanie suchej łuski z cebuli pozbawionej korzenia i szczypioru.....	20
Rys. 2.11. Metody obrotu cebuli w ciągu technologicznym linii: a) na taśmie [78], b) rewolwerowy [66], c) bębnowy [13]	21
Rys. 2.12. Metody obrotu cebuli w postaci odrębnych urządzeń linii: a) wieloślismakowy [77], b) ślimakowy [13], c) rolkowy [67]	21
Rys. 2.13. Dysze punktowe: a) CCP 1.5A (Ikeuchi) ,b) SD-BLP (Landefield), c) MSA 1 (Euspray), d) LPZ-SD (Festo)	22
Rys. 2.14. Dysze płaskostrumieniowe: a) PVT-14-SS (Pneumat), b) Seri DJPS (MOS Pneumatics), c) C0301-001-0047 (Ebmia).....	22
Rys. 2.15. Dysze specjalne: a) dysza Venturiego D-BLP (firma Air-Com), b) dysza Lavala (firma MOS Technics), c) dysza Coanda (firma MOS Technics).....	23
Rys. 2.16. Dysze rotacyjne uderzeniowe: a) PetraGUN firma (Mos pneumatics), b) RT-18-A (Mos technics)	23
Rys. 2.17. Metodyka działania procesu kontroli oceny jakościowej przetwarzanej cebuli	26
Rys. 3.1. Etapy postępowania prac badawczych	30
Rys. 4.1. Pomiar liniowe główki cebuli	31
Rys. 4.2. Kształt cebuli: a) elipsoida wydłużona, b) kulisty, c) elipsoida spłaszczona.....	32
Rys. 4.3. Rozrzut cebul o średnicach podziałowych D_x , D_y : a) odmiana Wolska; b) odmiana Dormo, c) odmiana Centro, d) odmiana Armstrong.....	35
Rys. 4.4. Histogram wystąpień odmian cebuli o średnicy podziałowej cebuli	35
Rys. 4.5. Rozkład maksymalnej średnicy D_x od wysokości cebuli h_0 : a) odmiana Wolska; b) odmiana Dormo, c) odmiana Centro, d) odmiana Armstrong	36

Rys. 4.6. Rozrzut współczynnika kulistości S_c od maksymalnej średnicy podziałowej D_x :	
a) odmiana Wolska, b) odmiana Dormo, c) odmiana Centro, d) odmiana Armstrong	37
Rys. 4.7. Rozkład twardości cebuli w czasie przechowywania: a) odmiana Wolska, b)	
odmiana Dormo, c) odmiana Centro, d) odmiana Armstrong.....	38
Rys. 4.8. Zależność masy cebuli od maksymalnej średnicy podziałowej D_x : a) odmiana	
Wolska; b) odmiana Dormo, c) odmiana Centro, d) odmiana Armstrong	39
Rys. 4.9. Zawartość suchej masy w łusce cebuli względem jej odmiany	40
Rys. 4.10. Zawartość suchej masy w łusce cebuli względem jej wielkości	41
Rys. 4.11. Badania siły odmuchu sprężonego powietrza: 1) głowica pomiarowa, 2)	
uchwyt mocowania cebuli, 3)czujnik siły, 4) dysza odmuchowa	43
Rys. 4.12. Zależność siły odmuchu od ciśnienia dla wybranych dysz.....	44
Rys. 4.13. Zależność siły odmuchu względem czasu odmuchu i ciśnienia zasilania dyszy	
CCP 1.5A.....	45
Rys. 4.14. Rozkład wartości średnich zużycia sprężonego powietrza w funkcji ciśnienia.	46
Rys. 4.15. Moduł odmuchu rolkowego:	47
Rys. 4.16. Układy robocze stanowiska: a) układ obrotowy rolek, b) układ odmuchu, c)	
układ wypychacza.....	47
Rys. 4.17. Wirtualny model sekcji odmuchu: 1) stacja przygotowania powietrza, 2)	
tłokowy zespół sprężania powietrza, 3) zbiornik buforowy, 4) zawór	
elektromagnetyczny, 5) miernik sprężonego powietrza, 6) dysza odmuchowa	48
Rys. 4.18. Tłokowy zespół sprężania powietrza zaimplementowany na stanowisku	
badawczym (firma Metal Work)	48
Rys. 4.19. Stanowisko do oczyszczania cebuli: 1) stanowisko odmuchu suchej łuski, 2)	
stanowisko usuwania korzenia i szczypioru.....	49
Rys. 4.20. Wzmacniacz ciśnienia układu odmuchowego: a) widok z prawej, b) widok	
z lewej (firmy Metal Work).....	50
Rys. 4.21. Badania efektywności oczyszczania wybranych dysz odmuchowych:.....	51
Rys. 4.22. Badania wyznaczania czasu oczyszczenia cebuli: a) klatka obrazu z badań	
odmuchu , b) wyniki badań czasów oczyszczenia	52
Rys. 4.23. Rozkład natężenia przepływu powietrza względem czasu otwarcia zaworu: a)	
czas 0,3 s, b) czas 0,6 s, c) czas 0,9 s, d) czas 1,2 s.....	52
Rys. 4.24. Analiza efektywności oczyszczania cebuli względem jej wielkości.....	54
Rys. 4.25. Wpływ ilości warstw na efektywność oczyszczania w funkcji ciśnienia	55
Rys. 4.26. Wpływ liczby łusek oraz ciśnienia zasilania na efektywność oczyszczania.....	56
Rys. 4.27. Efektywność oczyszczenia względem udziału szczypioru i korzenia w cebuli.	57
Rys. 4.28. Parametryzacja przepływu na wejściu dyszy odmuchowej	58
Rys. 4.29. Wizualizacja rozkładu prędkości przepływu powietrza z krokiem $t_k=0,29$ s....	59
Rys. 4.30. Rozkład prędkości względem ciśnienia zasilania	59
Rys. 5.1. Cebule prawidłowo oczyszczone:	65

Rys. 5.2. Cebule wymagające doczyszczania:	65
Rys. 5.3. Cebule przeznaczone do utylizacji: a) uszkodzona cebula w procesie odmuchu, b) cebula ulegające gniciu, c) cebula ulegające gniciu od środka	66
Rys. 5.4. Wpływ czasu odmuchu na poziom efektywności z uwzględnieniem odmian cebuli	68
Rys. 5.5. Wpływ czasu odmuchu i ciśnienia na efektywność oczyszczania cebuli:	69
Rys. 5.6. Wpływ okresu przechowywania na poziom efektywności z uwzględnieniem odmian cebuli	70
Rys. 5.7. Wpływ okresu przechowywania i ciśnienia zasilania na efektywność oczyszczania cebuli;	71
Rys. 5.8. Wpływ twardości cebuli i ciśnienia zasilania na efektywność oczyszczania;	73
Rys. 5.9. Wpływ natężenia przepływu na efektywność oczyszczania	74
Rys. 5.10. Wpływ siły odmuchu na efektywność oczyszczania	74
Rys. 5.11. Wpływ czasu na wartość średnią ilości odpadu z uwzględnieniem odmian cebuli	75
Rys. 5.12. Wpływ czasu odmuchu i ciśnienia zasilania na ilość odpadu: a) odmiana Wolska, b) odmiana Dormo, c) odmiana Centro, d) odmiana Armstrong	76
Rys. 5.13. Wpływ okresu przechowywania cebuli na ilość odpadu z uwzględnieniem jej odmian	77
Rys. 5.14. Analiza ilości odpadu w funkcji okresu przechowywania i ciśnienia zasilania: a) odmiana Wolska, b) odmiana Dormo, c) odmiana Centro, d) odmiana Armstrong	78
Rys. 5.15. Wpływ twardości cebuli na ilość odpadu przy ciśnieniu zasilania równym 4 bar	79
Rys. 5.16. Wpływ twardości cebuli na ilość odpadu przy ciśnieniu zasilania równym 6 bar	79
Rys. 5.17. Wpływ twardości cebuli na ilość odpadu przy ciśnieniu zasilania równym 8 bar	79
Rys. 5.18. Wpływ twardości cebuli na ilość odpadu przy ciśnieniu zasilania równym 10 bar	80
Rys. 5.19. Wpływ twardości cebuli na ilość odpadu przy ciśnieniu zasilania równym 12 bar	80
Rys. 5.20. Wpływ natężenia przepływu na ilość odpadu z uwzględnieniem odmian cebuli	81
Rys. 5.21. Wpływ siły odmuchu na ilość odpadu z uwzględnieniem odmian cebuli	81
Rys. 5.22. Wpływ twardości cebuli oraz ciśnienia zasilania na parametry eksploatacyjne: a) ilość odpadu, b) efektywność oczyszczania	86
Rys. 5.23. Wpływ twardości cebuli oraz natężenia przepływu na parametry eksploatacyjne: a) ilość odpadu, b) efektywność oczyszczania	86

Rys. 5.24. Wpływ twardości cebuli oraz siły odmuchu na parametry eksploatacyjne: a) ilość odpadu, b) efektywność oczyszczania	87
Rys. 5.25. Wpływ natężenia przepływu powietrza i ciśnienia zasilania na parametry eksploatacyjne: a) ilość odpadu, b) efektywność oczyszczania	88
Rys. 5.26. Odpad suchej łuski w procesie odmuchu dla jednej próby badań:.....	89
Rys. 5.27. Wpływ parametrów procesowych na wartość energii elektrycznej U_{el2} :.....	89
Rys. 6.1. Wygląd zewnętrzny aplikacji wdrożeniowej	90
Rys. 6.2. Algorytm działania programu aplikacyjnego	91
Rys. 6.3. Przemysłowa linia do obróbki cebuli: 1) moduł usuwania suchej łuski, 2) moduł wycinania szczypioru i korzenia, 3) moduł doczyszczania ręcznego	92
Rys. 6.4. Umieszczenie urządzenia do pomiaru parametrów procesowych sprężonego powietrza	93
Rys. 6.5. Badania eksploatacyjne w firmie produkcyjnej Stanek Sp. z o.o.	93
Rys. 6.6. Weryfikacja modeli obliczeniowych aplikacji z wynikami badań eksploatacyjnych efektywności w funkcji twardości cebuli.....	94
Rys. 6.7. Weryfikacja modeli obliczeniowych aplikacji z wynikami badań eksploatacyjnych	95
Rys. 6.8. Porównanie wyników badań oraz postaci modelowych ilości odpadu w funkcji twardości.....	96
Rys. 6.9. Porównanie wyników badań oraz postaci modelowych efektywności w funkcji twardości.....	96
Rys. 6.10. Efektywność oczyszczania cebuli: a) $p = 6,5$ bar, b) $p = 7,5$ bar	97
Rys. 6.11. Zawartość odpadu poprodukcyjnego:	97

SPIIS TABEL

Tabela 2.1. Wykaz zawartości składników odżywczych w cebuli zwyczajnej [82]	11
Tabela 4.1 Związek pomiędzy analizowanymi zmiennymi parametrów fizycznych cebul	33
Tabela 4.2 Analiza statystyczna parametrów liniowych cebuli względem jej wybranych odmian	34
Tabela 4.3. Analiza statystyczna twardości cebuli z uwzględnieniem jej odmian.....	37
Tabela 4.4. Analiza statystyczna masy cebuli z uwzględnieniem jej odmian.....	38
Tabela 4.5. Analiza statystyczna ilości suchej łuski w cebuli względem jej odmian.....	40
Tabela 4.6. Analiza statystyczna masy suchej łuski w cebuli względem jej wielkości	41
Tabela 4.7. Analiza statystyczna parametrów wytypowanych dysz odmuchowych.....	44
Tabela 4.8. Analiza statystyczna efektywności oczyszczania	51
Tabela 4.9. Zużycie powietrza dla 1 taktu odmuchu, wyrażony [m^3]	53
Tabela 4.10. Analiza statystyczna skuteczności oczyszczania względem ciśnienia	54
Tabela 4.11. Analiza statystyczna efektywności oczyszczania cebuli względem ciśnienia zasilania	55
Tabela 4.12. Analiza statystyczna efektywności oczyszczania względem ciśnienia zasilania dla cebul z udziałem i bez udziału szczypioru i korzenia.....	57
Tabela 5.1. Wskaźniki RTY [%] w funkcji ciśnienia zasilania i czasu odmuchu	67
Tabela 5.2. Analiza statystyczna efektywności oczyszczania względem czasu odmuchu..	68
Tabela 5.3. Analiza statystyczna efektywności oczyszczania względem okresu przechowywania	70
Tabela 5.4. Analiza statystyczna twardości cebuli przeznaczonej do badań zasadniczych	72
Tabela 5.5. Analiza statystyczna ilości odpadu względem czasu odmuchu.....	76
Tabela 5.6. Analiza statystyczna efektywności oczyszczania względem okresu przechowywania	77
Tabela 5.7. Zapotrzebowanie na energię U_{el1} [Wh] względem ciśnienia zasilania i czasu odmuchu	82
Tabela 5.8. Zapotrzebowanie na energię U_{el2} [Wh] względem ciśnienia zasilania i czasu odmuchu	82
Tabela 5.9. Zapotrzebowanie na energię U_{el3} [Wh/kg] względem ciśnienia zasilania i czasu odmuchu	83
Tabela 5.10. Związek pomiędzy analizowanymi zmiennymi badań zasadniczych	84
Tabela 6.1. Porównanie R^2 dla wyznaczonej funkcji regresji liniowej i postaci modelowej	95

ABSTRACT

The impact of air pressure in the onion blowing system on energy consumption and process efficiency, as well as product quality

The study investigates the impact of air pressure on the operational parameters of the process used to blow off dry onion skins. Key parameters considered include cleaning efficiency, energy demand, and the amount of waste produced in the form of dry onion skins. It was found that the process parameters recommended by machine manufacturers do not align with the varied physical characteristics of onions. Additionally, there is a lack of knowledge in the literature regarding their impact on operational parameters, leading to a preference for manual processing over mechanical methods due to reduced profitability.

In the first part of the study, a review of industrial cleaning technologies was conducted, focusing on methods and tools for removing dry onion skins. A literature analysis was also performed to assess cleaning efficiency and its determination based on quality indicators of cleaned onions.

Research was conducted on selected physical parameters of onions that are crucial for cleaning, and the process parameters significantly affecting processing were identified. Comparative studies were carried out for selected blowing nozzles to determine their blowing force and air consumption, aiming to select a representative nozzle for preliminary and main research. Virtual models of the station for blowing off dry onion skins and the air supply system for the nozzles were developed. A physical prototype, equipped with several sensors for measuring supply pressure, flow rate, and compressed air consumption, was constructed.

Tests were conducted on the station to assess the impact of onion size, the number of dry skin layers, and the presence of roots and tops on cleaning efficiency. Preliminary research results established the ranges of supply pressure parameters, blowing time and force, flow rate, and the hardness and storage period of onions, which will inform the operational parameters for the main research.

Furthermore, main research was conducted on the station to assess cleaning efficiency, waste amount, and energy demand of the process concerning the parameters obtained in the preliminary research. Experiments were conducted for blowing nozzle supply pressure ranging from 4 to 12 bar. The research results were presented as predictive models, defining the relationships between efficiency, waste amount, supply pressure, onion hardness, flow rate, and blowing force and time.

Based on these relationships, a computational application was developed to generate operational parameters concerning the variable physical parameters of onions and the process parameters of processing machines. The accuracy of the developed computational models was validated during tests on the onion cleaning line. The experiments were conducted during the cleaning of onions at Stanek ltd, confirming the accuracy of the computational application.

The results of the study were summarized in a comprehensive conclusion, which also outlined directions for future research.