

**ZESZYTY NAUKOWE
AKADEMII ROLNICZEJ
WE WROCŁAWIU**

NR 512

ROZPRAWY CCXXIX

FRANCISZEK MOLENDOWSKI

**ENERGY CONSUMED IN THE DISINTEGRATION
PROCESS OF RAW PLANT MATERIAL
ON THE EXAMPLE OF CORN COB PITH**

INSTITUTE OF AGRICULTURAL ENGINEERING



WROCŁAW 2005

FRANCISZEK MOLENDOWSKI

**ENERGOCHŁONNOŚĆ PROCESU
ROZDRABNIANIA SUROWCÓW ROŚLINNYCH
NA PRZYKŁADZIE RDZENI KOLB KUKURYDZY**

INSTYTUT INŻYNIERII ROLNICZEJ



WROCŁAW 2005

Opiniodawca

prof. dr hab. inż. Józef Grochowicz

Redaktor merytoryczny

prof. dr hab. inż. Zofia Spiak

Opracowanie redakcyjne i korekta

Janina Szydłowska

Łamanie

Alina Gebel

Projekt okładki

Grażyna Kwiatkowska

© Copyright by Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Wrocław 2005

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany ani rozpowszechniany
za pomocą urządzeń elektronicznych, nagrywających i innych
bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich

ISSN 0867-7964

ISSN 0867-1427

WYDAWNICTWO AKADEMII ROLNICZEJ WE WROCŁAWIU

Redaktor naczelny – J e r z y S o b o t a

ul. Sopocka 23, 50-344 Wrocław, tel./fax (071) 328-12-77

e-mail: wyd@ozi.ar.wroc.pl

Nakład: 100 + 16 egz. Ark. druk. 5,0

Druk i oprawa: F.P.H. „Elma”

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	7
1. WSTĘP I CEL PRACY	11
1.1. Analiza aktualnego stanu badanych zagadnień na podstawie literatury	11
1.2. Cel pracy	17
2. TEORIE PROCESU ROZDRABNIANIA ORAZ PRZYJĘCIE TEORII DO OPISU ROZDRABNIANIA RDZENI KOLB KUKURYDZY	19
2.1. Teoria Rittingera.....	19
2.2. Teoria Kicka	20
2.3. Teoria Bonda	20
2.4. Równanie Walkera oraz Charlesa.....	21
2.5. Równanie Holmesa.....	22
2.6. Teoria Stadlera	22
2.7. Teoria Hermana.....	22
2.8. Teoria Rebindera	23
2.9. Równanie Mielnikowa.....	23
2.10. Teoria Bracha	24
2.11. Uzasadnienie doboru teorii do opisu procesu rozdrabniania rdzeni kolb kukurydzy.....	26
3. PROPONOWANY MODEL MATEMATYCZNY.....	28
3.1. Przyjęcie modelu procesu rozdrabniania	28
3.2. Podstawowe założenia i opis modelu matematycznego	29
4. WERYFIKACJA PROPONOWANEGO MODELU MATEMATYCZNEGO. 34	
4.1. Zakres i metody badań.....	34
4.1.1. Metoda przygotowania materiału do badań właściwości fizycznych..	34
4.1.2. Metoda wyznaczenia zastępczego wymiaru rdzeni kolb.....	35
4.1.3. Metoda pomiarów w statycznej próbie ściskania	36
4.1.4. Metoda pomiaru gęstości rdzenia.....	36
4.1.5. Metodyka badań parametrów procesu rozdrabniania rdzeni kolb w rozdrabniaczu.....	37
4.1.6. Współczynnik pracy rozdrabniania	38

4.1.7. Współczynnik przyrostu powierzchni po jednorazowym skruszeniu próbki rdzenia kolby kukurydzy	38
4.2. Wyniki badań i ich omówienie	39
4.2.1. Właściwości fizyczne rdzeni kolb	39
4.2.2. Parametry procesu rozdrabniania rdzeni kolb w rozdrabniaczu H-111/2	48
4.2.3. Współczynnik pracy rozdrabniania	55
4.2.4. Współczynnik przyrostu powierzchni po jednorazowym skruszeniu próbki rdzenia kolby kukurydzy	55
4.3. Wyniki obliczeń symulacyjnych i ich porównanie z wynikami pomiarów ...	55
5. PODSUMOWANIE	70
6. WNIOSKI	72
7. PIŚMIENNICTWO	73

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- a – współczynnik Rebintera [-],
 a_a – współczynnik przyrostu powierzchni po jednorazowym skruszeniu [-],
 B – przyrost powierzchni jednostki masy materiału po osiągnięciu założonego stopnia rozdrobnienia materiału [$m^2 \cdot Mg^{-1}$],
 B_1 – przyrost powierzchni po jednorazowym skruszeniu materiału [$m^2 \cdot Mg^{-1}$],
 b_k – procentowy udział masy cząstek k-tej klasy wymiarowej w rozdrobnionej masie [%],
 c – wykładnik potęgowy w równaniu Charlesa,
 C – energia potrzebna do jednorazowego skruszenia jednostki masy materiału zgodnie z teorią Kicka [$MJ \cdot Mg^{-1}$],
 C_b – energia odkształcenia niszczącego [J],
 C_L – współczynnik uwzględniający straty nakładu pracy rozdrabniania [-],
 C_v – współczynniki proporcjonalności pracy jednostkowej [$J \cdot kg^{-1}$],
 C_s – stały współczynnik [$J \cdot kg^{-1}$],
 C_o – energia rozdrabniania określona przy znanej średnicy próbki materiału [$MJ \cdot Mg^{-1}$],
 d – wymiar liniowy cząstek po rozdrobnieniu [m],
 d_a – wymiar cząstki, przy której określano energię jednorazowego skruszenia [mm],
 d_b – wymiar cząstek rozdrobnionego materiału w procesie mielenia materiału [mm],
 dd – średnica w $\frac{1}{3}$ długości rdzenia, mierząc od nasady [m],
 dg – średnica u wierzchołka rdzenia [m],
 d_k – zastępczy wymiar k-tej klasy wymiarowej rozdrobnionych rdzeni [mm],
 d_{max} – wymiary liniowe największych cząstek po rozdrobnieniu [mm],
 do – średnica u nasady rdzenia [m],
 d_{pd}, d_{pc}, d_{pg} – średnica próbki strefy dolnej, centralnej i górnej rdzenia [m],
 ds – średnica w $\frac{2}{3}$ długości rdzenia mierząc od nasady [m],
 d_{sr} – średnia wielkość cząstki produktu [mm],
 d_{sw} – średni ważony zastępczy wymiar cząstki rdzeni po ich rozdrobnieniu [mm],
 d_{sr} – średni ważony zastępczy wymiar cząstki po rozdrobnieniu [mm],
 d_{80} – wymiar otworu sita, przez które przechodzi 80% produktu [mm],
 D – wymiary liniowe ciała przed rozdrobnieniem [m],
 D_e – średni zastępczy wymiar cząstki materiału przed rozdrobnieniem [mm],
 D_{rl} – średni zastępczy wymiar rdzeni kolb mieszańca KLG 2210 [mm],
 D_{ek} – średni zastępczy wymiar rdzeni kolb mieszańca Kosmo [mm],

D_k – średnia arytmetyczna wymiarów oczek sit ograniczających k-tą klasę wymiarową cząstek przed rozdrobieniem [mm],
 D_{max} – wymiary liniowe największych cząstek materiału przed rozdrobieniem [mm],
 D_{sr} – średnia wielkość cząstek nadawy [mm],
 D_{80} – wymiar otworu sita, przez które przechodzi 80% materiału przed rozdrobieniem [mm],
 E – moduł sprężystości [MPa],
 E_{BM} – nakłady energii w procesie mielenia [MJ],
 E_{BR} – energia rozdrabniania jednostki masy według teorii Bracha [$\text{MJ}\cdot\text{Mg}^{-1}$],
 E_{BRI} – energia rozdrabniania jednostki masy materiału [MJ],
 E_{BO} – energia rozdrabniania według teorii Bonda [$\text{kWh}\cdot\text{Mg}^{-1}$],
 E_c – energia rozdrabniania materiału [MJ],
 E_{CH} – energia rozdrabniania wyznaczona z równania Charlesa [J],
 E_E – jednostkowe nakłady energii elektrycznej [$\text{kWh}\cdot\text{Mg}^{-1}$],
 E_H – energia rozdrabniania według teorii Hermana [MJ],
 E_K – energia rozdrabniania według teorii Kicka [MJ],
 E_M – energia rozdrabniania według teorii Mielnikowa [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$],
 E_o – energia potrzebna do wytworzenia jednostki przyrostu powierzchni [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$],
 E_r – względny moduł sprężystości rdzenia kolby [MPa],
 $E_{r(d)}$, $E_{r(c)}$, $E_{r(g)}$ – względny moduł sprężystości strefy dolnej, centralnej i górnej rdzenia [MPa],
 E_R – energia rozdrabniania cząstki materiału według teorii Rittingera [J],
 E_{RB} – energia rozdrabniania jednostki masy rdzeni kolb [$\text{MJ}\cdot\text{Mg}^{-1}$],
 E_{RE} – energia rozdrabniania jednostki masy materiału według teorii Rebintera [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$],
 E_{RM} – energia rozdrabniania jednostki masy rdzeni kolb [$\text{MJ}\cdot\text{Mg}^{-1}$],
 E_{RRB} – energia jednostkowa rozdrabniania rdzeni kolb [$\text{MJ}\cdot\text{Mg}^{-1}$],
 E_{RRM} – energia rozdrabniania rdzeni kolb [$\text{MJ}\cdot\text{Mg}^{-1}$],
 E_w – energia rozdrabniania jednostki masy materiału wyznaczona z równania Walkera [J],
 E_S – energia rozdrabniania według teorii Stadlera [MJ],
 E_1 – energia deformacji urządzenia rozdrabniającego i ciała przed jego skruszeniem [J],
 E_2 – energia deformacji ciała zgodnie z teorią Kicka [J],
 E_3 – energia potrzebna do wytworzenia nowej powierzchni zgodnie z teorią Rittingera [J],
 E_{IK} – energia potrzebna do jednorazowego skruszenia jednostki masy materiału [$\text{MJ}\cdot\text{Mg}^{-1}$],
 $f(x)$ – wymiar cząstek materiału, wynikający ze stopnia jego rozdrobienia [mm],
 F_g – górna wartość siły ściskającej [MN],
 F_N – siła niszcząca próbkę rdzenia kolby [MN],
 F_o – powierzchnia cząstek w jednostce masy materiału [$\text{m}^2\cdot\text{Mg}^{-1}$],
 G – masa rozdrabnianego materiału [Mg],
 G_g – ciężar rozdrabnianego materiału [N],
 hd , hc , hg – długość strefy dolnej, centralnej i górnej rdzenia kolby [mm],
 k – klasa wymiarowa grupy cząstek w rozdrobionej masie,
 K_{ch} – stała zależna od właściwości materiału w równaniu Charlesa,

K_d, K_c, K_g – współczynnik pracy rozdrabniania dla części dolnej, centralnej i górnej rdzenia [-],
 K_{dk}, K_{ck}, K_{gk} – współczynnik pracy rozdrabniania dla części dolnej, centralnej i górnej rdzenia mieszanka KOSMO [-],
 K_{dl}, K_{cl}, K_{gl} – współczynnik pracy rozdrabniania dla części dolnej, centralnej i górnej rdzenia mieszanka KLG 2210 [-],
 K_o – współczynnik wynikający z właściwości wytrzymałościowych i podatności do rozdrobnienia materiału [-],
 K_R – energia potrzebna do wytworzenia jednostki przyrostu powierzchni według Rittingera [$J \cdot m^{-2}$],
 K_{RR} – współczynnik zależny od rodzaju rozdrabnianego materiału w równaniu Hermana [m^2],
 K_w – stała zależna od właściwości materiału w równaniu Walkera,
 l_p – długość próbki [m],
 Lu – praca rozdrabniania w rozdrabniaczu [MJ],
 Lr – długość rdzenia [m],
 m – wykładnik potęgowej funkcji określającej wzrost energii jednorazowego rozdrabniania [-],
 m_p – masa rozdrobnionej próbki [Mg],
 m_y – liczba cykli deformacji [-],
 n – liczba klas wymiarowych po rozdrobnieniu [-],
 n_g – graniczny stopień rozdrabniania [-],
 n_i – stopień rozdrobnienia materiału [-],
 n_{sr} – średni stopień rozdrabniania [-],
 n_{swr} – średni ważony stopień rozdrobnienia rdzeni kolb [-],
 n_{80} – 80% stopień rozdrabniania [-],
 p – wykładnik potęgowej w równaniu Walkera,
 P_o – moc pobierana przez silnik rozdrabniacza bez obciążenia [kWh],
 P_c – moc pobierana przez silnik rozdrabniacza podczas rozdrabniania próbki rdzeni [kWh],
 P_u – moc użyteczna zużywana na proces rozdrabniania rdzeni [kWh],
 R – wskaźnik wielokrotności powtórzeń energii w procesie mielenia,
 s – długość odcinka taśmy podczas zapisu przez rejestrator [mm],
 t_r – czas rozdrabniania próbki rdzeni kolb [h],
 W_i – („work index”) wskaźnik pracy rozdrabniania Bonda [$kWh \cdot Mg^{-1}$],
 u – wykładnik wyznaczony przez Holmesa [-],
 Z – wskaźnik wielokrotności powtórzeń pracy rozdrabniania wyznaczany w oparciu o przyrost powierzchni po jednorazowym skruszeniu [-],
 v – prędkość przesuwu taśmy rejestratora [$mm \cdot s^{-1}$],
 V – objętość ciała [m^3],
 Vr – objętość rdzenia [m^3],
 V_s – średnia wartość objętości cząstki przed rozdrobnieniem [m^3],
 V_d, V_c, V_g – objętości strefy dolnej, centralnej i górnej rdzenia [m^3],
 y – współczynnik uwzględniający różnicę wymiarów cząstek [-],
 Δl – odkształcenie wzdłużne próbki [m],

ΔF – przyrost powstałej powierzchni w procesie rozdrabniania [m^2],
 ΔF_v – przyrost powierzchni odniesiony do jednostki objętości materiału [m^{-1}],
 α_r – współczynnik przyrostu powierzchni po jednorazowym skruszeniu rdzenia kolby [-],
 α_i – współczynnik przyrostu powierzchni po jednorazowym rozdrobieniu materiału [-],
 η_p – sprawność przekładni klinowej [-],
 η_l – sprawność łożyska rozdrabniacza [-],
 η_s – sprawność silnika elektrycznego określano w zależności od średniej wartości jego obciążenia [-],
 ρ – gęstości materiału [$\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$],
 ρ_r – gęstość rdzenia kolby [$\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$],
 $\rho_{r(d)}, \rho_{r(c)}, \rho_{r(g)}$ – gęstość strefy dolnej, centralnej i górnej rdzenia [$\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$],
 σ – naprężenia ściskające [MPa],
 σ_c – naprężenia ściskające niszczące [MPa],
 σ_r – naprężenia ściskające niszczące rdzeń kolby [MPa],
 $\sigma_{r(d)}, \sigma_{r(c)}, \sigma_{r(g)}$ – naprężenia niszczące w strefie dolnej, centralnej i górnej rdzenia [MPa].

1. WSTĘP I CEL PRACY

1.1. Analiza aktualnego stanu badanych zagadnień na podstawie literatury

Rozdrabnianie surowców pochodzenia roślinnego należy do jednej z najbardziej energochłonnych i ważniejszych operacji w technologii produkcji pasz (Bogdanowicz i in. 1984, Dubas i Michalski 1991, Daccord in. 1995, Grochowicz 1993, 1996, Grochowicz i in. 1994, Laskowski i Łysiak 1997b, Łysiak i Laskowski 1999, 2003, Milewski 2004, Michalski 1990, 1997, Molendowski i Bieniek 1995, Opielak 1996, Romański 1999, Romański i Niemiec 2000, Szewczyk i Molendowski 1985, 1986, Szewczyk 1995). Z danych zawartych w pracy Bogdanowicza i innych (1984) wynika, że energia potrzebna do rozdrabniania kolb kukurydzy może osiągnąć wartość nawet do 35% całości nakładów energii na produkcję pasz w formie rozdrobnionych kolb. Zawiaślak (1997) stwierdza, że w produkcji mieszanek sypkich około 70% całości nakładów energii zużywa się na proces rozdrabniania. Michalski (1997) zaś uważa, że straty paszy uzyskiwanej z kolb kukurydzy, wynoszące od 12% do 15%, wynikają między innymi z gorszego rozdrobnienia surowca.

Należy tu dodać, że praktycznie we wszystkich technologiach produkcji pasz z surowca roślinnego występuje proces jego udarowego rozdrabniania.

Dokładny opis procesu udarowego rozdrabniania jest skomplikowany, gdyż jego przebieg uzależniony jest od wielu czynników. Grochowicz (1996) w swej pracy stwierdza, że czynniki wywierające wpływ na proces rozdrabniania, niezależnie od typu rozdrabniacza, można podzielić na:

- mechaniczno-konstrukcyjne (np. rodzaj zespołu roboczego, parametry kinematyczne, wielkość szczeliny roboczej, sposób wprowadzania surowca i odbioru rozdrobnionego produktu);
- technologiczno-eksploatacyjne (stopień zużycia elementów roboczych, wykorzystywanie czynników zmiennych, jak regulacja intensywności podawania czy wymiana części w zespole roboczym, np. sit o otworach odpowiednich do uzyskania wymaganego stopnia rozdrobnienia surowca);
- wynikające z właściwości fizycznych surowców (wilgotność, rozkład granulometryczny surowca, właściwości wytrzymałościowe i podatność na rozdrabnianie).

Wpływ czynników mechaniczno-konstrukcyjnych maszyny rozdrabniającej na parametry procesu rozdrabniania był przedmiotem licznych badań (Bieliński 1993, Bogdanowicz i in. 1984, Chwiej 1986a,b, Dmitrewski 1978, Flizikowski 1990, Flizikowski

i in. 1992, Golec i in. 1983, Grochowicz 1980, 1996, Grochowicz i Laskowski 1977, Grochowicz i in. 1977, Korpysz 1992, Mielnikow 1967, Opielak 1984, 1990, Romański 1988).

W procesie rozdrabniania (Grochowicz 1996), prędkość obwodowa bijaków rozdrabniacza powinna być dostosowana do rodzaju surowca. Przyjmuje, że zakres optymalnych prędkości obwodowych zawiera się w granicach od 60 do 80 m·s⁻¹. Dmitrewski (1978) uważa, że minimalne nakłady energii jednostkowej rozdrabniania kolb kukurydzy uzyskuje się przy prędkości obwodowej bijaków rozdrabniacza wynoszącej 65 m·s⁻¹. Po przekroczeniu tej wartości nakłady energii rozdrabniania wzrastają. Wydajność rozdrabniacza rośnie początkowo wraz ze zwiększaniem się prędkości obwodowej bijaków, a następnie po uzyskaniu maksymalnej wartości (przy prędkości wynoszącej 70 m·s⁻¹), zaczyna powoli spadać lub też pozostaje stała niezależna od prędkości. Zjawisko to tłumaczone jest tym, że z chwilą, gdy siła z jaką oddziałuje bijak na surowiec osiągnie wartość obciążenia niszczącego, dalsze jej zwiększanie pozostaje już bez wpływu na intensywność rozdrabniania. Baumgard (1973) jest zdania, że istnieje pewna graniczna prędkość uderzenia, poniżej której ciało nie ulega rozdrobnieniu. Bezpośredni pomiar tej prędkości nie jest możliwy, dlatego też wyznaczenie prędkości granicznej wymaga przyjęcia wartości umownej.

Dmitrewski (1978) podaje, że zmniejszenie grubości bijaków z 8 mm do 3 mm powoduje obniżenie nakładów energii na rozdrabnianie kukurydzy o 15%, przy czym grubość bijaków nie może być nadmiernie zmniejszona, ponieważ warunkuje ona ich odporność na zużycie. Do rozdrabniania kolb kukurydzy zaleca się (Grochowicz 1996) stosowanie bijaków o grubości od 8 do 10 mm, i długość od 100 do 180 mm. Najkorzystniejszym rozmieszczeniem bijaków o grubości 3 mm jest zainstalowanie 15 sztuk na każde 100 mm długości wirnika. Odnośnie szczeliny roboczej rozdrabniacza udarowego Grochowicz (1996) stwierdza, że optymalna jej wielkość zależy od wielu czynników, a przede wszystkim od właściwości fizycznych surowca. Dla większości surowców, typu ziarna zbóż, za optymalną należy uznać szczelinę 8 mm. Geometryczne charakterystyki sit rozdrabniacza (średnica i kształt otworów, kąt opasania, grubość, współczynnik przeswitu itp.) wpływają na wydajność operacji przesiewania. Intensywność przesiewania zależy od jednostkowego obciążenia sita, wyrażonego w kg przesiewu na każdy m² jego powierzchni. Stosowany jest również inny wskaźnik, charakteryzujący warunki przesiewania, a mianowicie wielkość powierzchni sita przypadającą na jednostkę zainstalowanej mocy silnika, który dla większości rozdrabniaczy wynosi od 64,5 do 77,5 cm² na 1 kW (Grochowicz 1996).

Baumgard (1973) uważa, że wydajność jest proporcjonalna do wymiarów komory rozdrabniania, a w szczególności do powierzchni sita, która z kolei jest zależna od średnicy i długości wirnika oraz kąta opasania.

Z przedstawionej powyżej analizy wynika, że w literaturze zostały przedstawione zagadnienia obejmujące wpływ poszczególnych czynników mechaniczno-konstrukcyjnych na kształtowanie się energochłonności i jakości rozdrabniania surowca roślinnego oraz dotyczące szczegółowych rozwiązań konstrukcji udarowego rozdrabniacza i jego wpływu na parametry procesu rozdrabniania. Można przyjąć założenie, że przy konstrukcji rozdrabniacza została wykorzystana dotychczasowa wiedza dotycząca tej tematyki, dlatego też możliwości zmniejszenia nakładów energii i poprawienia jakości

rozdrabnianego surowca roślinnego w rozdrabniaczu udarowym, przez zmianę jego parametrów mechaniczno-konstrukcyjnych, są aktualnie ograniczone.

Analizując wyniki badań dotyczących wpływu czynników technologiczno-eksploatacyjnych na parametry procesu rozdrabniania (Ajayi i in. 1997, Dmitrewski 1978, Grochowicz 1996, Gross 1970, Wolff i in. 1990, Vervoorn i in. 1990), można stwierdzić, że najniższe nakłady energii na rozdrabnianie jednostki masy surowca uzyskuje się przy maksymalnym obciążeniu silnika rozdrabniacza, z jednoczesnym zapewnieniem równomiernego dozowania surowca do rozdrabniacza. Nakłady energii niezbędnej do rozdrabniania surowca wzrastają w miarę zużywania się atakującej krawędzi bijaków i krawędzi otworów sita rozdrabniacza.

Wymaganą w technologii produkcji pasz z surowca roślinnego jakoś jego rozdrabniania uzyskuje się przez wymianę w rozdrabniaczu udarowym sita o odpowiednich wymiarach jego otworów (lub też eliminując go z rozdrabniacza). Grochowicz (1996) stwierdza, że z uwagi na trudne warunki przesiewania, zwykle stosuje się sita z otworami nieco większymi niż wymagana średnica cząstek rozdrobnionego materiału. Zwiększa to wydajność rozdrabniania, ale wynikiem takiego postępowania jest obecność w rozdrobnionym materiale pewnej ilości cząstek o wymiarze większym niż założono.

Zawiślak (1997) przeprowadził badania wpływu wymiarów otworów sita rozdrabniacza udarowego na wartość energii niezbędnej do rozdrobnienia masy jednostkowej ziaren zbóż oraz określił geometryczną średnią ważoną wielkość cząstki po rozdrobnieniu. Stwierdza istotny wpływ wymiarów otworów sita na energochłonność i geometryczną średnią ważoną wielkość cząstki. Nakłady energii rozdrabniania ziarna pszenicy zmieniają się od wartości $7,67 \text{ kWh}\cdot\text{Mg}^{-1}$ do $3,57 \text{ kWh}\cdot\text{Mg}^{-1}$, żyta od $10,14 \text{ kWh}\cdot\text{Mg}^{-1}$ do $4,05 \text{ kWh}\cdot\text{Mg}^{-1}$ – dla średnicy otworów sita wynoszącej odpowiednio 4 mm i 11 mm, ziarna kukurydzy od wartości $6,87 \text{ kWh}\cdot\text{Mg}^{-1}$ do $3,57 \text{ kWh}\cdot\text{Mg}^{-1}$, ziarna owsa od $20,31 \text{ kWh}\cdot\text{Mg}^{-1}$ do $12,86 \text{ kWh}\cdot\text{Mg}^{-1}$ i jęczmienia od $12,86 \text{ kWh}\cdot\text{Mg}^{-1}$ do $4,62 \text{ kWh}\cdot\text{Mg}^{-1}$ – dla średnicy otworów sita wynoszącej odpowiednio 5 mm i 11 mm. Istotne zróżnicowanie energochłonności procesu rozdrabniania w zależności od wymiarów otworów sita rozdrabniacza udarowego, stwierdzili, odnośnie ziarna jęczmienia, żyta oraz nasion roślin strączkowych, Łysiak i Laskowski (1999), nasion łubinu Andrejko i inni (1997) oraz ziarna pszenicy, kukurydzy i nasion łubinu Opielak (1996). Opielak (1996) odnośnie rozdrabniania ziarna kukurydzy stwierdzili, między innymi, że przy średnicy otworów sita 4, 3 i 2 mm stopień rozdrobnienia wynosi odpowiednio – 10,9, 12,2 i 18,2 a nakłady energii – 23,43, 60,65, 78,97 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Na podstawie przedstawionego powyżej przeglądu literatury można stwierdzić, że dotychczasowe badania obejmowały głównie określenie wartości energii jednostkowej udarowego rozdrabniania surowca roślinnego, w zależności od wymiarów otworów sita rozdrabniacza.

Natomiast istotną informacją dla oceny procesu rozdrabniania jest określenie wielkości nakładów energii potrzebnej do rozdrabniania surowca roślinnego, w celu uzyskania takiego stopnia jego rozdrobnienia i składu granulometrycznego rozdrobnionej masy, który jest wymagany w technologii produkcji pasz z kolb kukurydzy, dla uzyskania odpowiedniej jej jakości (Michalski 1987, 1997). Wynika to z tego, że każda grupa zwierząt ze względu na odmienną budowę przewodu pokarmowego wymaga innego stopnia rozdrobnienia surowców i składu granulometrycznego cząstek znajdujących się

w paszy (Bogdanowicz i in. 1984, Daccord i in. 1995, Dubas i Michalski 1991, Grochowicz 1996, Gross 1970, Michalski 1979, 1980, Podkówka 1981, 1983). Michalski (1997) przeprowadził badania dotyczące wpływu składu granulometrycznego cząstek w paszy wykonanej z rozdrobnionych kolb kukurydzy na przyrostyienne i zużycie paszy w tuczu trzody chlewnej. W pracy stwierdzono, że uzyskuje się większe przyrostyienne tuczu i mniejsze zużycie paszy z kolb kukurydzy stosując pasze o wyższym stopniu rozdrobnienia. Jednakże, aby uzyskać pasze o wyższym stopniu rozdrobnienia należy ponieść zwiększone nakłady energii jednostkowej na rozdrabnianie. Stwierdził, że uzyskiwane większe przyrostyienne tuczu i mniejsze zużycie przy karmieniu paszą z kolb kukurydzy, o wyższym stopniu rozdrobnienia, w pełni rekompensują zwiększone nakłady energii poniesione na drobniejsze rozdrobnienie paszy.

Jak wcześniej sygnalizowano, wpływ na energochłonność i jakość procesu rozdrabniania mają właściwości fizyczne surowca. W pracach naukowych, dotyczących tej problematyki badano przede wszystkim wpływ wilgotności materiału na wartość nakładów energii potrzebnej do jego rozdrobnienia. (Andrejko i in. 1997, Dubas i Michalski 1991, Dziki i Laskowski 2003, Golec i Zawiślak 1980, Golec i Kwiatkowski 1982, Janiak i Laskowski 1993, Laskowski i Łysiak 1997a i b, Łysiak 1998, Łysiak i Laskowski 1999, Opielak 1993, 1996, Opielak i Komsta 2001, Romański i Niemiec 2000, Zawiślak 1997). Zawiślak (1997) przeprowadził badania wpływu wilgotności ziaren zbóż na wartość energii niezbędnej do jego rozdrobnienia. Stwierdził, że stosując w rozdrabniaczu sito o wymiarach otworów 3 mm, zmianie wilgotności ziarna od 13,5% do 20% odpowiada wzrost nakładów energii rozdrabniania ziarna pszenicy – od 4,22 kWh·Mg⁻¹ do 7,58 kWh·Mg⁻¹, jęczmienia – od 6,57 kWh·Mg⁻¹ do 12,05 kWh·Mg⁻¹ i ziarna kukurydzy – od 4,34 kWh·Mg⁻¹ do 5,65 kWh·Mg⁻¹. Łysiak, Laskowski (1999) przedstawiają wyniki badań nakładów energii na rozdrabnianie masy jednostkowej ziaren jęczmienia, żyta oraz nasion roślin strączkowych w zależności od wilgotności. W ww. pracy stwierdzono, że przy zastosowaniu w rozdrabniaczu sita o wymiarach otworów 1 mm zmianie wilgotności ziarna od 10% do 18% odpowiada wzrost nakładów energii na rozdrabnianie jęczmienia od 40 kWh·Mg⁻¹ do 64 kWh·Mg⁻¹, żyta od 29 kWh·Mg⁻¹ do 41 kWh·Mg⁻¹ i nasion roślin strączkowych od 35 kWh·Mg⁻¹ do 75 kWh·Mg⁻¹. Stwierdzono również, że energochłonność rozdrabniania ziarna żyta i nasion roślin strączkowych wzrasta wraz z wilgotnością według funkcji opisanej wielomianem stopnia drugiego, a w przypadku ziarna jęczmienia funkcja ta przyjmuje postać prostoliniową. Wysłano wniosek, że wpływ wilgotności na energochłonność procesu rozdrabniania badanych surowców jest tym większy, im większy jest stopień rozdrobnienia materiału. Dla nasion roślin strączkowych przyrost energochłonności w zależności od wilgotności jest większy niż w przypadku badanych odmian jęczmienia i żyta. Istotny wpływ wilgotności nasion łubinu na energochłonność procesu udarowego rozdrabniania stwierdził Andrejko i inni (1997), a w przypadku ziaren pszenicy i nasion łubinu Opielak (1996).

W literaturze dotyczącej technologii produkcji pasz z kukurydzy w formie rozdrobnionych kolb podkreśla się występujący istotny problem wzrostu wielkości nakładów energii rozdrabniania kolb w zależności od zmian wilgotności materiału w miarę dojrzewania rośliny (Bogdanowicz i in. 1984, Dubas i in. 1991, Daccord i in. 1995, Michalski. 1988, 1990, 1997). Należy tu dodać, że podczas rozdrabniania kolb rozdrabniamy dwa ich składniki, to znaczy ziarno oraz rdzeń.

Chociaż rdzeń nie jest pierwotnym produktem rośliny kukurydzy, to jest on oczywistym składnikiem morfologicznym kolby, jej właściwości fizycznych i składu chemicznego (Anazodo 1981, 1984, Anazodo i Chikwendu 1983, Bogdanowicz i in. 1984, Bruździak 1988, Mosz i Bieniek 1983, 1986, Molendowski 1996, 1998, 2001).

Skład chemiczny kolby, ziarna i rdzenia kolby kukurydzy był przedmiotem licznych badań (Bogdanowicz i in. 1984, Bruździak 1988, Dubas i Michalski 1991, Michalski 1979, 1980, 1987, 1988, 1990, 1997, Podkówa 1981, 1983, Seghal i Brown 1965).

Michalski (1990) stwierdza, że zawartość suchej masy w kolbie jest pochodna wilgotności ziarna oraz rdzenia, a zawartość suchej masy w rdzeniach kolbowych jest mniejsza o 20–30%.

Michalski (1997) stwierdził, że w okresie pierwszych 35-40 dni po zapłodnieniu intensywnie rozwija się rdzeń, ale później jego masa może się obniżyć, w wyniku oddawania składników do ziarna.

Dlatego też zachodzące wraz z dojrzewaniem zmiany w strukturze kolb, jak również proces przemieszczania składników powodują, że skład chemiczny kolb i rdzeni różni się zasadniczo w poszczególnych fazach dojrzałości rośliny (Bogdanowicz i in. 1984, Bruździak 1988, Michalski 1990, 1997). Bruździak (1988) przeprowadził szczegółowe badania zmian składu chemicznego poszczególnych części rośliny kukurydzy. Odnośnie zmian składu chemicznego rdzeni kolb stwierdził, że w zależności od stadium rozwoju rośliny w suchej masie zmienia się zawartość: białka ogólnego od 6,7% do 4,5%, włókna surowego od 23,1% do 34,5%, tłuszczu surowego od 1,43% do 0,71%, związków bezazotowych wyciągowych od 66,4% do 57,1%, azotu od 1,07% do 0,72%, fosforu od 0,54% do 0,31%, potasu 0,6% do 1,08%, wapnia od 0,08% do 0,11% i magnezu od 0,14% do 0,06%. Natomiast sucha masa rdzeni w procesie dojrzewania rośliny zmienia się od 25,7% do 37,5%. Stwierdza również, że rdzenie kolbowe posiadają dużą wartość energetyczną 1 kg suchej masy wynoszącą około 0,6 jednostki owianej.

Można stwierdzić, że rdzeń kolby ma duże znaczenie w technologii produkcji pasz z kukurydzy oraz procesu rozdrabniania kolb przy uwzględnieniu faktu, że ziarno kukurydzy jest najłatwiej rozdrabniającym się ziarnem spośród zbóż, a energochłonność jego rozdrabniania została już określona (Bogdanowicz i in. 1984, Grochowicz 1996, Opiełak 1996, Zawiślak 1997).

W przypadku wystąpienia zwiększonej energochłonności rozdrabniania kolb, zmniejsza się wydajność rozdrabniacza, co powoduje wydłużenie się czasu wykonywania kiszonki i negatywnie wpływa na jej jakość. Aby zmniejszyć energochłonność rozdrabniania kolb i zwiększyć wydajność rozdrabniacza (dla zachowania ciągłości pracy maszyn pracujących w linii technologicznej oraz skrócenia czasu wykonywania kiszonki) zmniejsza się stopień rozdrobnienia paszy przez zastosowanie sita o większych wymiarach jego otworów lub eliminuje się go z rozdrabniacza. W konsekwencji w kiszonce występują frakcje cząstek rdzenia kolby o wymiarach większych niż dopuszczalne, co negatywnie wpływa na jakość uzyskanej paszy (Bogdanowicz i in. 1984, Dubas i in. 1991, Michalski 1990, 1997).

W analizowanym procesie rozdrabnianie jest wynikiem powstania w danym ośrodku naprężeń przekraczających granicę wytrzymałości, dlatego też przyjęto założenie, że właściwości wytrzymałościowe tych ośrodków wpływają między innymi na energochłonność procesu. Można więc przypuszczać, że wzrost energochłonności procesu

rozdrabniania kolb w technologii produkcji pasz z kukurydzy spowodowany był zmianą właściwości fizycznych rdzenia kolby w trakcie dojrzewania rośliny, charakteryzujący się obniżaniem wilgotności rdzenia.

Dotychczasowe zainteresowanie właściwościami fizycznymi rośliny kukurydzy skupiało się na badaniu cech mechanicznych łodygi (Frontczak i Bieniek 1985, Frontczak i Molendowski 1987, Mosz 1986), kolby (Frontczak i Bieniek 1987a, b, 1988, Frontczak i Molendowski 1990, Mosz 1987, Mosz i Bieniek 1982, 1983) a przede wszystkim ziarna (Frontczak 1987, Mosz i Bieniek 1986, Mosz 1987). Natomiast jak dotąd niewiele jest prac mających za cel określenie właściwości fizycznych rdzenia kolby kukurydzy mieszańców uprawianych w kraju (Molendowski 1996, 1998, 1999, 2001).

W wielu pracach stwierdza się (Anazodo 1981, 1983, Molendowski 1998, 1999), że aby obiektywnie scharakteryzować właściwości fizyczne rdzenia kolby należy je określić w szerokim zakresie jego wilgotności, obejmującym wilgotność występującą w terminach zbioru i pozbiorowej obróbki kukurydzy.

Termin zbioru kukurydzy uzależniony jest od wielu czynników, takich jak: warunki pogodowe w danym roku, możliwość realizacji zbioru i kiszzenia, ryzyko niedogrzewania, sposoby zbioru, warunki agrotechniczne, cechy odmianowe (Anazodo i Noris 1981, Bogdanowicz i in. 1984, Dubas i Michalski 1991, Michalski 1980, 1987). Michalski (1997) stwierdza, że termin zbioru, mimo uznania jego znaczącej roli, nie znalazł jak dotąd należytego odzwierciedlenia w pracach badawczych. Dlatego w praktyce zbiór kukurydzy realizowany jest w różnych stadiach dojrzałości rośliny. W dostępnej literaturze nie przedstawiono dotychczas wyników badań obrazujących zmiany wielkości właściwości fizycznych rdzenia, w miarę dojrzewania rośliny i obniżania się wilgotności rdzenia, na podstawie których można by scharakteryzować proces rozdrabniania rdzeni kolb kukurydzy. W literaturze obcojęzycznej (Anazodo i Noris 1981, Anazodo 1983, 1984, Anazodo i Chikwendu 1983) określono lokalną zmienność właściwości mechanicznych rdzenia, czyli potraktowano tematykę wycinkowo. Nie ma też dowodów na porównywalność tych danych z krajowymi, ponieważ cechy mieszańców i warunki ich wegetacji różnią się znacznie od polskich.

Określenie właściwości fizycznych surowca roślinnego nie daje podstaw do technicznie użytecznego opisu procesu jego rozdrabniania. Nie pozwala też ustalić technicznie wiarygodnych zależności pomiędzy nakładami energii niezbędnej do jego rozdrobnienia (w celu uzyskania założonego stopnia rozdrobnienia materiału), a właściwościami charakteryzującymi jego odporność na rozdrabnianie. Związek pomiędzy analizowanymi zależnościami, opisują teorie rozdrabniania (Austin 1973, Brach 1962, 1965, 1966, Bond 1962, Grzelak 1965, 1967, Hague 1991, Lowrison 1979, Opiełak 1996, Prasher 1987, Sokołowski 1977, 1979, 1981, 1990).

Problem przedstawia się następująco. Rdzenie kolb wprowadzamy do udarowego rozdrabniacza, gdzie pod działaniem sił i przy wydatkowaniu energii ulegają rozdrobnieniu, a następnie opuszczają maszynę w postaci cząstek. Teoria rozdrabniania powinna określić związek pomiędzy wartością energii niezbędnej do rozdrobnienia rdzeni kolb na założony stopień ich rozdrobnienia, a właściwościami charakteryzującymi ich odporność na rozdrabnianie.

Większość istniejących teorii rozdrabniania ma charakter teorii wytrzymałościowych (Austin 1973, Brach 1965, 1968, Bond 1962, Prasher 1987, Sokołowski 1990).

Można zaliczyć do nich teorie i hipotezy, w których energia (praca) rozdrabniania materiału E_c może być określona funkcją:

$$E_c = K_o f(x) \text{ [J]} \quad (1)$$

gdzie:

E_c – energia (praca) rozdrabniania materiału [J],

K_o – wartość wynikająca z właściwości wytrzymałościowych materiału,

$f(x)$ – wymiar cząstek materiału.

We wzorze tym energia rozdrabniania (E_c) oznacza pracę jaką należy wykonać, aby spowodować rozdrobnienie. Jest ona sumą zarówno energii koniecznej do podziału ciała (utworzenie nowych powierzchni, propagacji szczelin, zniszczenia struktury cząstki), jak i energii odkształceń sprężystych, tworzenie zarodków nowych szczelin, straty związane z tarciem wewnętrznym i inne straty towarzyszące rozdrabnianiu i objawiających się głównie w postaci energii cieplnej rozpraszanej do otoczenia i podnoszącej temperaturę ciała.

K_o jest wartością wynikającą z właściwości wytrzymałościowych i podatności na rozdrobnienie materiału, a $f(x)$ jest funkcją wymiaru cząstek materiału, wynikającą ze stopnia jego rozdrobnienia.

Przedstawione powyżej argumenty uzasadniają przyjęcie hipotezy, że istnieje zależność pomiędzy wybranymi właściwościami fizycznymi surowca roślinnego, a jakością procesu jego udarowego rozdrabniania (szczególnie energią jednostkową niezbędną do jego rozdrobnienia, na założony stopień rozdrobnienia i skład granulometryczny rozdrobnionej masy). Wartości liczbowe ww. właściwości ulegają zmianom wraz z obniżaniem się wilgotności rdzenia kolby kukurydzy, a zmiany te istotnie determinują wartość energii. Szczegółowa analiza wpływu właściwości fizycznych surowca roślinnego na nakłady energii jednostkowej potrzebnej do jego rozdrabniania możliwa jest do przeprowadzenia w oparciu o wytrzymałościową teorię rozdrabniania.

Konsekwencją przyjętej hipotezy będzie opracowanie modeli matematycznych, opisujących skomplikowane zjawisko rozdrabniania surowca roślinnego w stopniu, który przyczyni się do wzrostu wiedzy naukowej i utylitarnej. Pozwoli on również na teoretyczne wyznaczenie nakładów energii, potrzebnej do rozdrabniania surowca, na wymagany w technologii produkcji pasz stopień jego rozdrobnienia. Przedstawiony problem należy uznać w świetle znanego piśmiennictwa nie tylko jako poznawczy, ale głównie istotny dla praktyki rolniczej.

1.2. Cel pracy

Doskonalenie technologii produkcji pasz z surowca roślinnego wymaga stałych badań, określających związki zachodzące pomiędzy czynnikami wpływającymi na proces rozdrabniania, a energochłonnością oraz jakością procesu rozdrabniania charakteryzowaną między innymi: stopniem rozdrobnienia, składem granulometrycznym cząstek w rozdrobnionej masie i średnim ważonym zastępczym wymiarem cząstki po rozdrobnieniu.

Istotną informacją dla oceny procesu rozdrabniania jest określenie nakładów energii na rozdrabnianie surowca roślinnego, w celu uzyskania takiego stopnia jego rozdrobnienia i składu granulometrycznego rozdrobnionej masy, który jest wymagany w technologii produkcji pasz, dla uzyskania odpowiedniej ich jakości.

Zważywszy, iż ważność analizowanych zagadnień jest niepodważalna dla praktyki rolniczej, uzasadnione zatem wydaje się prowadzenie badań w celu określenia zależności energochłonności procesu rozdrabniania udarowego surowca roślinnego od stopnia jego rozdrobnienia i składu granulometrycznego cząstek w rozdrobnionej masie.

W praktyce rolniczej często odstępuje się od uzyskania wymaganego stopnia rozdrobnienia surowca z powodu nadmiernie wysokich nakładów energii niezbędnej do jego rozdrabniania. Jednakże w literaturze dotyczącej technologii produkcji pasz z kukurydzy, w formie rozdrobnionych kolb, podkreśla się istotny problem wartości energii potrzebnej do ich rozdrabniania. Energia ta może osiągnąć wartość nawet do 35% całości nakładów energii na produkcję pasz w formie rozdrobnionych kolb.

Dlatego też słuszne wydaje się stwierdzenie, że rozpoznanie procesu rozdrabniania rdzeni kolb kukurydzy (szczególnie przyczyn i zakresu zmian nakładów energii na rozdrabnianie), ma nie tylko znaczenie poznawcze, ale przede wszystkim praktyczne. Taka informacja umożliwi również aktualizację danych o nakładach energii niezbędnej do rozdrobnienia rdzeni kolb. Na ich podstawie możliwe jest planowanie i optymalizacja technologii produkcji pasz z kukurydzy.

Przeprowadzona analiza problemu procesu udarowego rozdrabniania surowca roślinnego, przytoczone wyżej argumenty i postawiona hipoteza spowodowały, że cel pracy sformułowano następująco:

- **przeprowadzenie analizy teorii rozdrabniania i dobór najwłaściwszej teorii oraz jej modyfikacja do opisu procesu rozdrabniania surowca roślinnego;**
 - **opracowanie (w oparciu o wytrzymałościową teorię rozdrabniania) modelu matematycznego, opisującego związek pomiędzy energią rozdrabniania surowca roślinnego, a wybranymi jego właściwościami fizycznymi, stopniem rozdrobnienia i składem granulometrycznym cząstek w rozdrobnionej masie;**
 - **obliczenia symulacyjne energii rozdrabniania surowca roślinnego w oparciu o opracowany model matematyczny;**
 - **przeprowadzenie weryfikacji doświadczalnej opracowanego modelu.**
- Przyjęte do realizacji zadania wymagają wyznaczenia i przeanalizowania:**
- **zmienności właściwości fizycznych rdzenia kolby wybranych mieszańców kukurydzy, w celu uzyskania bazy danych do teoretycznego wyznaczania energii rozdrabniania, według opracowanego modelu matematycznego,**
 - **parametrów procesu rozdrabniania rdzeni kolb wybranych mieszańców kukurydzy w rozdrabniaczu udarowym, w celu uzyskania bazy danych do teoretycznego wyznaczania energii rozdrabniania, według opracowanego modelu matematycznego oraz jego weryfikacji.**

2. TEORIE PROCESU ROZDRABNIANIA ORAZ PRZYJĘCIE TEORII DO OPISU ROZDRABNIANIA RDZENI KOLB KUKURYDZY

Większość istniejących teorii rozdrabniania ma charakter teorii wytrzymałościowych (Austin 1973, Bond 1962, Brach 1965, 1968, Prasher 1987, Sokołowski 1990).

Istnieją jednakże teorie, które za podstawę ustalenia energii rozdrabniania przyjmują inne właściwości materiału, jak np. teoria Djinguezhiana, przyjmująca stałą termodynamiczną (Brach 1965).

Do podstawowych teorii wytrzymałościowych należą teorie: Rittingera, Kicka i Bonda.

Oprócz nich istnieją także ich modyfikacje dokonane przez Stadlera, Kirpiczewa, Rebintera i Bracha oraz wywodzące się z tych teorii wzory Walkera (Charlesa), Mielnikowa, Holmesa, Hermana.

2.1. Teoria Rittingera

Teoria powierzchniowa Rittingera (Brach 1960, Sokołowski 1990) przyjęła swą nazwę od postawionej przez Rittingera hipotezy, według której energia E_R potrzebna do rozdrobnienia cząstki materiału jest proporcjonalna do powierzchni wytworzonej w czasie procesu rozdrabniania.

Tę zasadę ująć można w następujący wzór:

$$E_R = K_R \cdot \Delta F \text{ [J]} \quad (2)$$

gdzie :

K_R – energia potrzebna do wytworzenia jednostki przyrostu powierzchni [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$],

ΔF – przyrost powstałej powierzchni w procesie rozdrabniania [m^2].

Do określenia wielkości energii rozdrabniania konieczna jest znajomość współczynnika K_R , czyli energii przypadającej na jednostkę przyrostu powierzchni. Dotychczas wyznaczono niewielką liczbę tych współczynników, na skutek wielkich trudności w ich określaniu (Brach 1962, Sokołowski 1990). Energię rozdrabniania przypadającą na jednostkę przyrostu powierzchni określa się w specjalistycznych maszynach, na podstawie pomiaru energii potrzebnej do uzyskania danego stopnia rozdrobnienia.

Sokołowski (1990) stwierdza, że istnieje wiele przykładów potwierdzających teorię Rittingera w praktyce przemysłowej i badaniach, choć są również takie, których wyniki stoją w sprzeczności z tą teorią. Przyrost powierzchni wymaga dostarczenia energii dla pokrycia zwiększonej energii powierzchniowych ciała i tę właściwość teoria Rittingera

wykorzystuje. Jest to jednak tylko część zjawisk występujących w procesie rozdrabniania, które wpływają w sposób istotny na energię rozdrabniania. Dlatego też nie zawsze występuje zgodność teorii Rittingera z wynikami doświadczalnymi.

2.2. Teoria Kicka

Teoria ta oparta jest (Brach 1960, Sokołowski, 1990) na założeniu, że energia zużyta na odkształcenie ciała jest proporcjonalna do jego objętości.

Analitycznym ujęciem teorii Kicka jest wyrażenie:

$$E_K = \frac{\sigma_c^2}{2E} \cdot V \quad [\text{MJ}] \quad (3)$$

gdzie:

E_K – energia rozdrabniania według teorii Kicka [MJ],

σ_c – naprężenia niszczące [MPa],

E – moduł sprężystości [MPa],

V – objętość ciała [m^3].

Kick wyszedł z założenia, iż odkształcenie bryły materiału powstaje pod działaniem sił zewnętrznych, które wywołują naprężenia w badanym materiale. Gdy naprężenia te wzrosną do granicy wytrzymałości na zgniatanie, wówczas bryła ulega rozdrobnieniu. Zatem energia włożona w rozdrabnianie bryły zużyta zostaje tylko na jego odkształcenie.

Z przedstawionego wyżej wzoru wynika, że praca odkształcenia jest proporcjonalna do objętości ciała, w granicach ważności prawa Hooke'a, czyli dla naprężeń nie przekraczających granicy sprężystości dla danego ciała. W rzeczywistości jednak, przy rozdrabnianiu cząstki materiału, naprężenia przekraczają nie tylko granicę sprężystości, ale również granicę wytrzymałości na ściskanie. Można, z niewielkim błędem, przyjąć energię odkształcenia jako energię rozdrabniania, zastępując naprężenia σ przez granicę wytrzymałości na ściskanie (naprężenia niszczące σ_c).

Brach (1962) stwierdza, że Kick nie mówi w swej pracy o rozdrabnianiu, a więc o doprowadzeniu brył od pewnej wielkości do cząstek o innej wielkości, lecz o jednorazowym skruszeniu przez uderzenie lub zgniot.

Sokołowski (1990) stwierdza, że teoria Kicka znajduje potwierdzenie doświadczalne dla cząstek (brył) o większych wymiarach.

2.3. Teoria Bonda

Bond (Brach 1962, 1968, Sokołowski 1990), na podstawie wielu doświadczeń ustalił zależność, którą nazwał trzecią teorią rozdrabniania. Wychodząc z założenia, że skoro energia rozdrabniania, według Kicka, jest proporcjonalna do D^3 wymiarów liniowych ciała, a według Rittingera do D^2 , Bond zakłada, że powinna być proporcjonalna do średniej wartości wykładnika, a więc do $D^{3/2}$.

Wzór na energię rozdrabniania Bonda (E_{BO}), przedstawia się następująco:

$$E_{BO} = 10 W_i \left(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}} \right) \quad [\text{kWh} \cdot \text{Mg}^{-1}] \quad (4)$$

gdzie:

D – wymiary liniowe ciała przed rozdrobnieniem [m],

d – wymiary liniowe cząstki po rozdrobnieniu [m],

W_i – („work index”) wskaźnik pracy rozdrabniania [$\text{kWh} \cdot \text{Mg}^{-1}$].

Teoria Bonda, poparta ustalonymi w trakcie badań laboratoryjnych wskaźnikiem pracy rozdrabniania W_i (dla różnych materiałów), jest najbardziej znaną i rozpowszechnioną w praktyce inżynierskiej. Wskaźnik W_i (Brach 1962, Sokołowski 1990) można zdefiniować jako energię rozdrabniania jednostki masy danego ciała od wymiaru nieskończenie dużego do wymiaru 100 μm .

Sokołowski (1990) stwierdza, iż należy przyjąć jako szczególnie istotne, że W_i nie jest wyznaczane bezpośrednio, ale że jego obliczanie odbywa się na podstawie testów opracowanych dla ściśle określonych urządzeń rozdrabniających i według zależności, których forma, ustalona doświadczalnie, zależy od urządzenia oraz od sposobu postępowania z próbkami materiału.

2.4. Równanie Walkera oraz Charlesa

Uogólnienia podstawowych teorii rozdrabniania (Brach 1962, 1968, Sokołowski 1990), dokonali Walker a następnie Charles. Wzór na energię rozdrabniania Walkera można przedstawić w następującej postaci:

$$E_w = K_w \cdot \left(\frac{1}{d^{p-1}} - \frac{1}{D^{p-1}} \right) \quad [\text{J}] \quad (5)$$

gdzie:

E_w – energia rozdrabniania jednostki masy ciała według równania Walkera [J],

K_w – stała zależna od właściwości materiału odpowiadająca poszczególnym teoriom ujętym w równaniu Walkera,

p – wykładnik potęgowy.

Podstawiając za p wartość 2 – uzyskujemy zależność wynikającą z teorii Rittingera, a podstawiając 1,5 – zależność Bonda.

Charles opierając się na równaniu Walkera (Sokołowski 1990) i przyjmując rozdrabnianie od wymiaru nieskończenie dużego określił energię rozdrabniania (E_{CH}) dla cząstek po rozdrobnieniu o wymiarze d wzorem w następującej postaci:

$$E_{CH} = K_{ch} \cdot \left(\frac{1}{d^c} \right) \quad [\text{J}] \quad (6)$$

gdzie:

K_{ch} – stała zależna od właściwości materiału,

c – wykładnik potęgowy.

2.5. Równanie Holmesa

Holmes zaproponował, aby w równaniu Bonda zastąpić wykładnik 0,5 przez wykładnik „u”, o wartościach zawierających się w przedziale od 0 do 1, i wyznaczył wartości tego wykładnika dla kilkunastu materiałów. Wyznaczone przez Holmesa doświadczalnie wykładniki „u” oscylują w granicach 0,25–0,75 (Sokołowski 1990).

Badania przeprowadzone przez Holmesa wykazały, że zaproponowana przez Bonda stała wartość wykładnika wynosząca 0,5 nie zawsze znajduje praktyczne potwierdzenie w określaniu nakładów energii na rozdrabnianie materiału.

2.6. Teoria Stadlera

Stadler (Sokołowski 1990) rozwijając teorię Kicka, zauważył, że stopień rozdrobnienia rośnie zgodnie z postępem geometrycznym 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 itd., a energia zaś rośnie według postępu arytmetycznego: 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 itd.

Badając współzależność obu szeregów stwierdził, że logarytm dziesiętny ze stopnia rozdrobnienia (n_i) (stosunek wielkości wymiarów liniowych cząstek (nadawy) przed (D) i po (d) rozdrobnieniu (produkt)) w przybliżeniu jest proporcjonalny do odpowiedniej ilości energii. Tak więc podstawiając odpowiednie wielkości można napisać wzór na pracę (E_s) rozdrabniania w postaci:

$$E_s = \frac{\sigma_c^2}{2E} \cdot V \cdot 10 \log n_i \quad [\text{MJ}] \quad (7)$$

Jednakże teoria Stadlera wynikająca z własnych badań procesu rozdrabniania wybranych materiałów, na podstawie których zostało sformułowane wyżej przedstawione równanie, nie znalazła szerszego zastosowania w praktyce.

2.7. Teoria Hermana

Herman (Sokołowski 1990) korzystając z teorii Rittingera przedstawił wzór na pracę rozdrabniania (E_H) w zmodyfikowanej postaci:

$$E_H = K_{RR} \cdot G_g \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right) [\text{J}] \quad (8)$$

gdzie:

K_{RR} – współczynnik zależny od rodzaju rozdrabnianego materiału [m^2],

G_g – ciężar rozdrabnianego materiału [N].

2.8. Teoria Rebindera

Rebinder dzieli energię rozdrabniania materiałów E_{RE} na kilka składników (Brach 1965):

$$E_{RE} = E_1 + E_2 + E_3 = E_1 + m_y C_b + E_o \cdot \Delta F \cdot a \quad [J] \quad (9)$$

gdzie:

E_1 – energia deformacji urządzenia rozdrabniającego i ciała przed jego skruszeniem [J],

E_2 – energia deformacji ciała rozdrabnianego zgodnie z teorią Kicka [J],

E_3 – energia potrzebna do wytworzenia nowej powierzchni zgodnie z teorią Rittingera [J],

m_y – liczba cykli deformacji,

C_b – energia odkształcenia niszczącego [J],

E_o – energia potrzebna do wytworzenia jednostki przyrostu powierzchni [$J \cdot m^{-2}$],

ΔF – przyrost powierzchni [m^2],

a – współczynnik Rebindera.

Brach (1965) stwierdza, że wobec braku wartości szczegółowych wskaźników m oraz E_o nie można wykorzystać wzorów Rebindera, niemniej jednak uznaje, że wytyczono tu nową drogę. W tym kierunku, w pewnym zakresie, podąża rozumowanie Bondy, według którego w pierwszym etapie rozdrabniania energia jest proporcjonalna do objętości, zaś w drugim etapie proporcjonalna do powierzchni.

2.9. Równanie Mielnikowa

Mielnikow (1967) przedstawił wzór na określenie energii potrzebnej do rozdrobnienia materiału, opierając się na rozwiniętej formie równania Rebindera. Analitycznym ujęciem wzoru Mielnikowa na energię rozdrabniania jednostki masy (E_M) jest następujące wyrażenie:

$$E_M = C_L \cdot (C_v \cdot l_g \cdot n_i^3 + C_s \cdot (n_i - 1)) \quad [J \cdot kg^{-1}] \quad (10)$$

gdzie:

C_L – współczynnik uwzględniający straty nakładu pracy rozdrabniania, uwarunkowane niejednorodnością materiału, a także zasadę oddziaływania części roboczych rozdrabniacza na materiał [-],

C_v – współczynnik proporcjonalności mający wymiar pracy jednostkowej [$J \cdot kg^{-1}$],

C_s – stały współczynnik [$J \cdot kg^{-1}$].

Mielnikow dokonał pewnych założeń i określił warunki, przy których z wiadomym stopniem przybliżenia, można stosować jego równanie przy badaniu procesów rozdrabniania. Wobec braku wartości szczegółowych wskaźników C_L , C_v , i C_s nie można jednak wykorzystać wzorów Mielnikowa w praktyce.

2.10. Teoria Bracha

Brach (Brach 1962, 1968) sformułował najnowszą teorię rozdrabniania, nazwaną „teorią wielokrotności pracy kruszenia”. Istotą teorii jest przyjęcie zasady, że energię jednorazowego kruszenia należy powtórzyć, aby uzyskać założony stopień rozdrobnienia.

Nowa teoria wynika z następującego rozumowania (Brach 1962, 1968). Energię (E_R) potrzebną do rozdrobnienia jednostki masy materiału, przy danym stopniu rozdrobnienia, oblicza się na podstawie teorii Rittingera, ze wzoru, który po przekształceniach i przyjęciu aktualnie stosowanych jednostek miary przyjmuje następującą postać:

$$E_R = K_R \cdot \frac{6}{\rho} \cdot \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right) = K_R \cdot \frac{6}{n_i \cdot d \cdot \rho} \cdot (n_i - 1) = \frac{6}{d \cdot \rho} \left(1 - \frac{1}{n_i} \right) K_R = K_R \cdot B \quad [\text{MJ} \cdot \text{Mg}^{-1}] \quad (11)$$

gdzie:

B – przyrost powierzchni jednostki masy materiału po osiągnięciu stopnia rozdrobnienia n_i [$\text{m}^2 \cdot \text{Mg}^{-1}$],

ρ – gęstość materiału [$\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$].

Przy czym powierzchnia cząstek (F_o) w jednostce masy materiału wynosi:

$$F_o = \frac{6}{D \cdot \rho} = \frac{6}{n_i \cdot d \cdot \rho} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{Mg}^{-1}] \quad (12)$$

Energia potrzebna do jednorazowego skruszenia jednostki masy (E_{IK}) zgodnie z teorią Kicka i obowiązującymi prawami wytrzymałości materiałów, przy określonych złożeniach jest wartością stałą i wynosi C . Można więc przyjąć, że:

$$E_{IK} = C = K_R \cdot B_1 \quad [\text{MJ} \cdot \text{Mg}^{-1}] \quad (13)$$

gdzie:

B_1 – przyrost powierzchni po jednorazowym skruszeniu określony następującą zależnością:

$$B_1 = \alpha_i F_o = \frac{\alpha_i \cdot 6}{n_i \cdot d \cdot \rho} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{Mg}^{-1}] \quad (14)$$

gdzie:

α_i – współczynnik przyrostu powierzchni po jednorazowym rozdrobnieniu materiału.

Podstawiając wartość K_R ze wzoru (13) do wzoru (11) otrzymuje się:

$$E_{BR} = C \cdot B \cdot B_1^{-1} = C \cdot Z \quad [\text{MJ} \cdot \text{Mg}^{-1}] \quad (15)$$

gdzie:

E_{BR} – energia rozdrabniania jednostki masy według teorii Bracha [$\text{MJ} \cdot \text{Mg}^{-1}$],

Z – wskaźnik wielokrotności powtórzeń rozdrabniania w oparciu o przyrost powierzchni po jednorazowym skruszeniu.

Energia (E_{BRI}) rozdrabniania jednostki masy materiału (G) wyniesie:

$$E_{BRI} = C \cdot Z \cdot G \text{ [MJ]} \quad (16)$$

gdzie:

E_{BRI} – energia rozdrabniania jednostki masy materiału [MJ],

G – jednostka masy materiału rozdrabnianego [Mg].

Podstawiając odpowiednie wartości za B i B_l ze wzorów (11) i (14) otrzymuje się wskaźnik wielokrotności pracy kruszenia (Z) ujęty następującą formułą:

$$Z = \frac{1}{\alpha_i} \cdot (n_i - 1) \quad (17)$$

Analitycznym ujęciem powyżej określonej energii C przypadającej na jednostkę masy materiału (według Kicka), po zastosowaniu aktualnie stosowanych jednostek miary, jest wyrażenie:

$$C = \frac{\sigma_c^2}{2E \cdot \rho} \text{ [MJ} \cdot \text{Mg}^{-1}] \quad (18)$$

Podstawiając odpowiednie wartości za Z i C ze wzorów (17) i (18) otrzymuje się wyrażenia na energię rozdrabniania masy materiału przy kruszeniu:

$$E_{BR} = \frac{\sigma_c^2}{2E \cdot \rho \cdot \alpha_i} (n_i - 1) \text{ [MJ} \cdot \text{Mg}^{-1}] \quad (19)$$

Wzory (16), (17) i (19) stanowią treść nowej teorii „wielokrotności pracy kruszenia” Bracha (Brach 1962, 1968). W powyższych wzorach C – oznacza energię kruszenia, zgodnie z teorią Kicka, dającą się ustalić w maszynach wytrzymałościowych, a Z – wielokrotność powtórzenia tej energii, określoną z przyrostu powierzchni, po jednorazowym skruszeniu. Przedstawione powyżej wzory proponowane są do opisu rozdrabniania w procesie kruszenia.

Rozdrabnianie dzieli się na kruszenie, jeżeli wymiary cząstek po rozdrobnieniu przekraczają 1 mm, i mielenie, gdy wymiary cząstek są mniejsze (Sokołowski 1990).

W oparciu o przedstawione wyżej założenia Brach opracował wyrażenie na energię rozdrabniania w procesie mielenia w następującej postaci:

$$E_{BM} = C_o \cdot y \cdot R \cdot G \text{ [MJ]} \quad (20)$$

gdzie:

E_{BM} – nakłady energii w procesie mielenia [MJ],

C_o – energia określona przy znanej średnicy próbki materiału [MJ · Mg⁻¹],

y – współczynnik uwzględniający różnicę wymiarów cząstek d_a , przy których określano energię jednorazowego skruszenia C_o i cząstek rozdrobnionego materiału d_b ,

$$y = \left(\frac{d_a}{d_b} \right)^m \quad (21)$$

m – wykładnik potęgowy funkcji określającej wzrost energii jednorazowego rozdrabniania w miarę zmniejszania się wymiarów cząstek,

R – wskaźnik wielokrotności powtórzeń energii przy mieleniu określony wyrażeniem:

$$R = \frac{n_i^m - 1}{a^m - 1} \quad (22)$$

gdzie: a_a – współczynnik przyrostu powierzchni po jednorazowym kruszeniu.

2.11. Uzasadnienie doboru teorii do opisu procesu rozdrabniania rdzeni kolb kukurydzy

Teoria rozdrabniania powinna opisać związek pomiędzy ilością energii niezbędnej do rozdrobnienia rdzeni kolb na założony stopień ich rozdrobnienia, a właściwościami charakteryzującymi ich odporność na rozdrabnianie.

Brach (1962) stwierdza, że większość dotychczasowych autorów stara się łączyć lub porównywać teorie Rittingera i Kicka. Dodaje też, że teoria Bonda różni się od teorii Rittingera w zasadzie tylko zmianą wykładnika potęgowego. Stwierdza również, że Kick nie zajmuje się rozdrabnianiem, lecz odkształcaniem materiałów pod wpływem jednorazowego uderzenia lub ściskania, w wyniku którego ciało pęka na kilka części. Dalszym rozdrabnianiem Kick już się nie zajmuje. Oczywiście jest, że w celu dalszego rozdrobnienia należy czynność uderzenia lub zgniotu powtórzyć wielokrotnie, aż do uzyskania właściwego stopnia rozdrobnienia. Brach (1962) stwierdza, że teorie: Kicka i Rittingera wprowadzają duże uproszczenia i rozpatrują proces rozdrabniania jednostronnie. W rzeczywistości energia, w wyniku której następuje rozdrabnianie cząstek materiału, nie jest zużywana jedynie na wywołanie odkształcenia sprężystego materiału (jak głosi teoria objętościowa), ani wytworzenie nowych powierzchni (jak głosi teoria powierzchniowa).

Zanim nastąpi rozdrobnienie materiału występuje kolejno odkształcenie sprężyste, odkształcenie trwałe (plastyczne) i dopiero po przekroczeniu granicy wytrzymałości materiał się rozpada i tworzą się nowe powierzchnie. Zatem nie jedna, ale obie teorie jednocześnie powinny w rzeczywistości rozwiązać problem, jakim jest określenie w sposób teoretyczny energii (pracy) potrzebnej do rozdrabniania danego materiału, z uwzględnieniemżądanego stopnia rozdrabniania.

Dlatego, żadnemu z licznych późniejszych badaczy, mimo starań i stosowania coraz to nowszych metod badań, nie udało się potwierdzić całkowitej słuszności wcześniejszych teorii. Brak praktycznego potwierdzenia słuszności wspomnianych teorii spowodował, że twierdzenia z nich wynikające często przyjmowano jako hipotezy.

Badania w dziedzinie rozdrabniania (Brach 1960, Sokołowski 1990) wykazały, że w procesie rozdrabniania część energii zużywa się na wytwarzanie ciepła, a część energii na właściwe rozdrabnianie materiału. Liczne prace doświadczalne udowodniły, że

obie teorie w pewnych przypadkach są słuszne i mogą być wykorzystywane do określenia nakładów energii na rozdrabnianie. Energia rozdrabniania określona na podstawie teorii powierzchniowej wykazuje dość dużą zgodność z wynikami doświadczalnymi, przy rozdrabnianiu drobnym i mieleniu; podczas gdy nakłady energii określone zgodnie z teorią objętościową znajdują doświadczalne potwierdzenie przy rozdrabnianiu grubym i średnim. Stwierdzono również, że teoria objętościowa w większym stopniu odzwierciedla warunki pracy przy rozdrabnianiu materiałów w maszynach działających głównie przez zgniatanie lub uderzanie, zaś teoria powierzchniowa – przy rozdrabnianiu materiałów w maszynach działających na zasadzie ścierania.

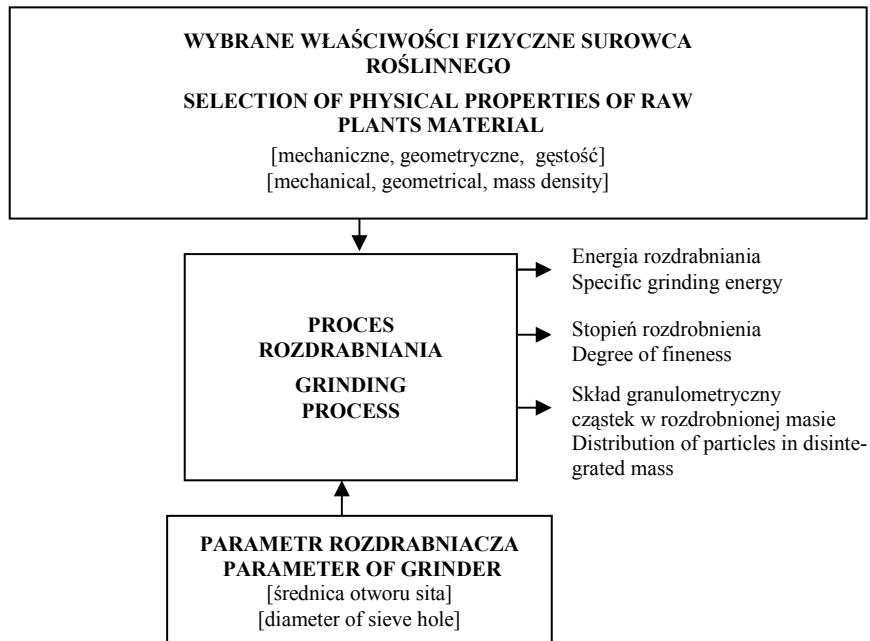
Podsumowując, można stwierdzić na podstawie przeprowadzonej analizy teorii rozdrabniania, że określenie w drodze teoretycznej, energii (pracy) potrzebnej do rozdrabniania rdzeni kolb z uwzględnieniem żadanego stopnia rozdrabniania, można rozwiązać przez zastosowanie równocześnie teorii Kicka i Rittingera. Aktualnie jedną z ważniejszych propozycji, spełniającą przedstawione wyżej wymagania, jest teoria Bracha, która obejmuje zarówno teorię Kicka i Rittingera oraz wprowadza współczynnik wielokrotności pracy kruszenia, który nie występuje w pozostałych analizowanych teoriach. Dlatego też do opisu procesu rozdrabniania rdzeni kolb w procesie kruszenia postanowiono zastosować teorię Bracha i wynikające z niej równanie (19).

3. PROPONOWANY MODEL MATEMATYCZNY

3.1. Przyjęcie modelu procesu rozdrabniania

Podstawowym celem proponowanego modelu jest logiczny, kompletny i zwięzły opis matematyczny jednego z najistotniejszych problemów procesu udarowego rozdrabniania, jakim są nakłady energii na rozdrabnianie surowca roślinnego do żądanej wielkości stopnia jego rozdrobnienia.

Na podstawie przeprowadzonej analizy problemu procesu rozdrabniania przyjęto założenie badawcze, że w procesie udarowego rozdrabniania surowca roślinnego istnieje zależność pomiędzy jakością procesu rozdrabniania (charakteryzowaną przez: jednostkowe nakłady energii na rozdrabnianie, stopień rozdrobnienia, skład granulometryczny cząstek w rozdrobnionej masie), a wybranymi właściwościami fizycznymi rozdrabnianego materiału i parametrami urządzenia rozdrabniającego (wymiarem otworów sita). Do dalszych rozważań przyjęto następujący modelowy przebieg badanego procesu (rys. 1):



Rys. 1. Modelowy przebieg procesu rozdrabniania
Fig. 1. Accepted model of grinding process

3.2. Podstawowe założenia i opis modelu matematycznego

Rozdrabnianie polega na podziale ciała stałego na części o mniejszych wymiarach. Można to uzyskać między innymi przez mechaniczne działanie na ciało stałe przez uderzanie. Działając w procesie tym na ciało stałe przez uderzanie powodujemy przekroczenie wytrzymałości materiału i w rezultacie podział tego ciała na mniejsze części.

Na podstawie przeprowadzonej analizy procesu rozdrabniania, przyjęto założenie, że energię jednorazowego podziału surowca roślinnego w wyniku uderzenia należy powtórzyć, aby w rezultacie otrzymać całkowitą energię rozdrabniania, potrzebną do uzyskaniażądanego stopnia jego rozdrobnienia (zgodnie z teorią Bracha).

Założenie to spełnia równanie (Brach 1962), którego analitycznym ujęciem jest wyrażenie:

$$E_{BR} = \frac{\sigma_c^2}{2E \cdot \rho \cdot \alpha_i} (n_i - 1) [\text{MJ} \cdot \text{Mg}^{-1}] \quad (23)$$

Powyższy wzór (23) opisuje zależności pomiędzy energią konieczną do rozdrabniania (pracą rozdrabniania) (E_{BR}), a skutkiem tego procesu w formie zmniejszenia wymiarów cząstek, określanym stopniem rozdrabniania (n_i) (stosunkiem wielkości wymiarów liniowych cząstek (nadawy) przed (D) i po (d) rozdrobnieniu (produkt)), oraz właściwościami fizycznymi materiału rozdrabnianego. Jednakże z tych wszystkich wielkości nie ma zdecydowanego zalecenia co do metody określania wymiarów cząstek przed (D) i po (d) rozdrobnieniu w celu obliczania stopnia rozdrobnienia (Brach 1962, Sokołowski 1990). Do podstawowego sposobu pomiaru wymiarów cząstek jest przesiewanie (Grochowicz 1996, Sokołowski 1990). Próbkę materiału przesiewana jest przez kilka, ułożonych w stos sit o stopniowo zmniejszających się wymiarach oczek. Określany jest udział w próbce cząstek przechodzących przez oczka sita poprzedzającego i zatrzymujących się na sicie następnym. Wymiarami cząstek są zwykle średnie arytmetyczne wartości wymiarów oczek sit ograniczających frakcję cząstek.

Dlatego konieczne jest przyjęcie metody wyznaczania wymiaru cząstki do obliczania wartości stopnia rozdrobnienia, który najlepiej charakteryzowałby efekt procesu rozdrabniania.

80% stopień rozdrabniania (n_{80}) jest to stosunek wymiaru otworu sita, przez które przechodzi 80% nadawy (D_{80}) do wymiaru otworu sita, przez które przechodzi 80% produktu (d_{80}). Jest to najprostsza metoda określenia stopnia rozdrobnienia (Sokołowski 1990), jednakże mniej dokładna od innych. Wadą tego sposobu określania stopnia rozdrobnienia jest nieuwzględnienie zróżnicowania pomiędzy wymiarami cząstek w rozdrobnionej masie (składu granulometrycznego), stąd też założono, że niedokładnie charakteryzuje proces rozdrabniania.

Graniczny stopień rozdrabniania (n_g) jest to stosunek średnich wymiarów liniowych największych cząstek nadawy (D_{max}) do największych średnich wymiarów liniowych cząstek produktu (d_{max}). Stopień rozdrabniania graniczny jest szybki i łatwy do określenia, ze względu jednak na operowanie wielkością maksymalnych cząstek materiału założono, że nie odzwierciedla dostatecznie jakościowej strony procesu rozdrabniania.

Średni stopień rozdrabniania (n_{sr}) jest to stosunek średniej wielkości cząstki nadawy (D_{sr}) do średniej wielkości cząstki produktu (d_{sw}). Wyznaczenie średniej wielkości cząstki, najczęściej opiera się na danych składu granulometrycznego cząstek w materiale.

Średni stopień rozdrobnienia charakteryzuje skład granulometryczny cząstek w rozdrabnianej masie, lecz nie ujmuje ilościowego zróżnicowania masy cząstek pomiędzy poszczególnymi klasami wymiarowymi, dlatego założono, że niedostatecznie dokładnie charakteryzuje proces rozdrabniania.

Średni ważony stopień rozdrobnienia (n_{sw}) zdefiniowano jako stosunek średniego zastępczego wymiaru cząstki przed rozdrobnieniem (D_e) do średniego ważonego zastępczego wymiaru cząstki po ich rozdrobnieniu (d_{sw}).

Średni zastępczy wymiar cząstki przed rozdrobnieniem (D_e) najczęściej oblicza się z ich średniej wartości objętości (V_s) według wzoru:

$$D_e = \sqrt[3]{V_s} \quad [\text{mm}] \quad (24)$$

Na podstawie uzyskanych danych o składzie granulometrycznym cząstek w rozdrobnionej masie wyznacza się średni ważony zastępczy wymiar cząstki (d_{sw}) po dokonanym rozdrobnieniu ze wzoru:

$$d_{sw} = \sum_{k=1}^{k=n} \frac{b_k \cdot d_k}{100} \quad [\text{mm}] \quad (25)$$

gdzie:

b_k – procentowy udział masy cząstek k-tej klasy wymiarowej w rozdrobnionej masie [%],

d_k – zastępczy wymiar k-tej klasy wymiarowej [mm],

n – liczba klas.

Określając w ten sposób stopień rozdrobnienia uzyskujemy informację o ilości produktu występującego w określonej klasie wymiarowej o danych wymiarach. Informacja taka jest podstawową przy ocenie procesu rozdrabniania oraz wskazuje jaką wartość należy wprowadzić do wzoru (23), aby określić energię rozdrabniania jednostki masy rdzeni kolb kukurydzy.

Współczynnik przyrostu powierzchni, postanowiono wyznaczyć z przyrostu powierzchni po jednorazowym zniszczeniu próbki rdzeni poddanej próbie ściskania (zgodnie z teorią Bracha) i oznaczono – α_r .

Podstawiając do wzoru (23) odpowiednio oznaczenia, przyjęte dla rdzenia kolby, otrzymamy równanie energii rozdrabniania (E_{RB}) ujęte następującą formułą:

$$E_{RB} = \frac{\sigma_r^2}{2E_r \cdot \rho_r \cdot \alpha_r} (n_{swr} - 1) [\text{MJ} \cdot \text{Mg}^{-1}] \quad (26)$$

gdzie:

E_{RB} – energia rozdrabniania jednostki masy rdzeni kolb [$\text{MJ} \cdot \text{Mg}^{-1}$],

σ_r – naprężenia ściskające niszczące rdzeń kolby [MPa],

E_r – względny moduł sprężystości rdzenia kolby [MPa],

ρ_r – gęstość rdzenia kolby [$\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$],

α_r – współczynnik przyrostu powierzchni po jednorazowym skruszeniu próbki rdzenia kolby [-],

n_{swr} – średni ważony stopień rozdrobnienia rdzeni kolb [-].

Równanie (26) stanowi model matematyczny energii rozdrabniania jednostki masy rdzeni kolb kukurydzy uwzględniający: właściwości fizyczne rdzeni kolb, współczynnik przyrostu powierzchni po jednorazowym skruszeniu i średni ważony stopień rozdrobnienia.

Można stwierdzić, iż spośród przedstawionych stopni rozdrobnienia najdokładniej charakteryzuje efekt rozdrabniania średni ważony stopień rozdrobnienia. Należy jednak tu dodać, że przy obliczaniu energii rozdrabniania na podstawie średniego ważonego stopienia rozdrobnienia nie uwzględnia się różnicy nakładów energii na powstałe podczas rozdrabniania poszczególne frakcje cząstek występujące w rozdrobnionej masie. Dlatego też założono, że wyniki obliczeń można uznać jedynie za przybliżone.

Przedstawione powyżej argumenty uzasadniają postawienie następującej hipotezy: energia niezbędna do rozdrabniania jednostki masy surowca roślinnego jest równa sumie energii wydatkowanej na powstałe w procesie rozdrabniania frakcje cząstek. W związku z tym obliczanie tej energii na podstawie stopnia rozdrobnienia (jak dokonywano tego dotychczas według równania Bracha) nie ma uzasadnienia, a jej wielkość można obliczać na podstawie parametrów składu granulometrycznego cząstek (procentowy udział masy cząstek określonej klasy wymiarowej i jej zastępczy wymiar) w rozdrobnionej masie, modyfikując w tym celu równanie Bracha.

Na podstawie przedstawionych powyżej rozważań możliwe jest obliczanie energii rozdrabniania jednostki masy rdzeni kolb (E_{RM}) podstawiając do wzoru (26) za średni ważony stopień rozdrobnienia (n_{swr}) zastępczy wymiar klasy wymiarowej (d_k) i jej procentowy udział w rozdrobnionej masie (b_k). Uzyskamy w ten sposób energię rozdrabniania jako ważoną sumę energii rozdrabniania użytą na powstałe w procesie rozdrabniania frakcje cząstek według następującego równania:

$$E_{RM} = \sum_{k=1}^{k=n} \frac{b_k}{100} \left(\frac{D_e}{d_k} - 1 \right) \frac{\sigma_r^2}{2E_r \cdot \rho_r \cdot \alpha_r} [\text{MJ} \cdot \text{Mg}^{-1}] \quad (27)$$

Równanie (27) stanowi model matematyczny energii rozdrabniania jednostki masy rdzeni kolb kukurydzy ujmujący: właściwości fizyczne rdzeni kolb, współczynnika przyrostu powierzchni po jednorazowym skruszeniu i parametry składu granulometrycznego cząstek w rozdrobnionej masie.

Dotychczasowe badania właściwości fizycznych rdzeni kolb (Anazodo 1983, 1984, Molendowski 1998, 1999), wskazują, że możliwe jest zróżnicowanie właściwości w obrębie rdzenia. W celu uwzględnienia możliwej zmienności analizowanych właściwości w obrębie rdzenia (zgodnie z wynikami uzyskanymi w badaniach prowadzonych wcześniej przez autora (Molendowski 1998, 1999, 2001) oraz innych autorów (Anazodo 1983, 1984)) badania przeprowadza się przeciętnie w trzech strefach pomiarowych, różniących się położeniem w rdzeniu. Właściwości rdzenia określa się na próbkach pobranych z trzech stref rdzenia, dzieląc go na trzy równe części, wzdłuż jego długości. Zaczynając od nasady, tę część rdzenia przyjęto jako dolną, następnie centralną i górną. Wartości naprężeń niszczących rdzenia w strefie dolnej oznaczono symbolem – $\sigma_{r(d)}$, względnego modułu sprężystości – $E_{r(d)}$ i gęstość – $\rho_{r(d)}$. Odpowiednio dla części centralnej $\sigma_{r(c)}$, $E_{r(c)}$, $\rho_{r(c)}$ i górnej $\sigma_{r(g)}$, $E_{r(g)}$, $\rho_{r(g)}$ rdzenia.

W celu określenia średniej ważonej pracy rozdrabniania rdzenia kolby wprowadzono współczynnik pracy rozdrabniania części dolnej (K_d), centralnej (K_c) i górnej (K_g) określony stosunkiem objętości poszczególnych stref rdzenia do jego objętości.

Podstawiając do wzoru (26) i (27) przedstawione powyżej przyjęte oznaczenia równanie energii rozdrabniania rdzeni kolb (E_{RRB}) i (E_{RRM}) przyjmie następującą postać:

$$E_{RRB} = [n_{swr} - 1] \frac{1}{\alpha_r} \left[\frac{\sigma_{r(d)}^2}{2E_{r(d)} \cdot \rho_{r(d)}} \cdot K_d + \frac{\sigma_{r(c)}^2}{2E_{r(c)} \cdot \rho_{r(c)}} \cdot K_c + \frac{\sigma_{r(g)}^2}{2E_{r(g)} \cdot \rho_{r(g)}} \cdot K_g \right] \quad [\text{MJ} \cdot \text{Mg}^{-1}] \quad (28)$$

Równanie (28) stanowi model matematyczny energii rozdrabniania jednostki masy rdzeni kolb kukurydzy uwzględniający: właściwości fizyczne rdzeni kolby z uwzględnieniem możliwej ich zmienności w obrębie rdzenia, współczynnika przyrostu powierzchni po jednorazowym skruszeniu i średni ważony stopień rozdrobnienia.

Jeśli uwzględnić skład granulometryczny rozdrobnionej masy, to wzór (28) przyjmie postać:

$$E_{RRM} = \sum_{k=1}^{k=n} \frac{b_k}{100} \left[\frac{D_e}{d_k} - 1 \right] \frac{1}{\alpha_r} \left[\frac{\sigma_{r(d)}^2}{2E_{r(d)} \cdot \rho_{r(d)}} \cdot K_d + \frac{\sigma_{r(c)}^2}{2E_{r(c)} \cdot \rho_{r(c)}} \cdot K_c + \frac{\sigma_{r(g)}^2}{2E_{r(g)} \cdot \rho_{r(g)}} \cdot K_g \right] \quad [\text{MJ} \cdot \text{Mg}^{-1}] \quad (29)$$

Równanie (29) stanowi model matematyczny energii rozdrabniania jednostki masy rdzeni kolb kukurydzy uwzględniający: właściwości fizyczne rdzeni kolb z uwzględnieniem możliwej ich zmienności w obrębie rdzenia, współczynnika przyrostu powierzchni po jednorazowym skruszeniu i parametrów składu granulometrycznego cząstek w rozdrobnionej masie.

4. WERYFIKACJA PROPONOWANEGO MODELU MATEMATYCZNEGO

Chcąc wyznaczyć, na podstawie proponowanego modelu matematycznego, wartość energii potrzebnej do rozdrabniania rdzeni kolb kukurydzy w dowolnym stadium dojrzałości rośliny (charakteryzowanym wilgotnością rdzenia), konieczne jest określenie parametrów procesu rozdrabniania rdzeni w rozdrabniaczu udarowym oraz zmian wartości cech fizycznych rdzenia ujętych w równaniu (28) i (29).

Na podstawie przeprowadzonej analizy problemu procesu udarowego rozdrabniania można stwierdzić, że aktualnie do najważniejszych czynników wywierających wpływ na proces udarowego rozdrabniania rdzeni kolb kukurydzy, a szczególnie decydujących o energii niezbędnej do ich rozdrabniania na założony stopień rozdrobnienia i skład granulometryczny rozdrobnionej masy, należą właściwości fizyczne rdzenia.

Można więc stwierdzić, że punktem wyjścia do analizy procesu rozdrabniania rdzeni kolb kukurydzy jest określenie właściwości fizycznych rdzeni, charakteryzujących ich odporność na rozdrabnianie.

Zawarta w literaturze wiedza na temat właściwości fizycznych rdzeni kolb i parametrów procesu rozdrabniania jest niewystarczająca do pełnego scharakteryzowania ich jako przedmiotu oddziaływania na energochłonność rozdrabniania.

Zważywszy, iż ważność właściwości fizycznych rdzenia jest niepodważalna dla praktyki rolniczej, uzasadnione zatem wydaje się prowadzenie badań w celu bliższego poznania zmienności tych właściwości, z uwzględnieniem procesu dojrzewania rośliny, charakteryzującym się obniżaniem wilgotności rdzenia.

4.1. Zakres i metody badań

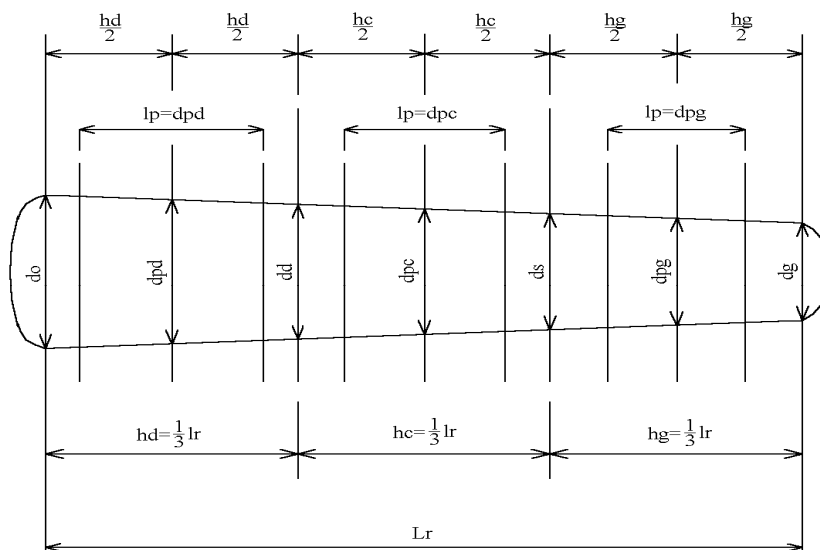
4.1.1. Metoda przygotowania materiału do badań właściwości fizycznych

Materiał do badań pochodził z plantacji Wieloobiektowej Stacji Hodowli Roślin w Kobierzycach. Badania prowadzono na dwóch botanicznych odmianach kukurydzy zwanych później mieszańcami: KLG 2210 i KOSMO.

O wyborze mieszańców zdecydowało duże zróżnicowanie wartości cech fizycznych pomiędzy nimi, które stwierdzono na podstawie badań wstępnych.

Kolby o charakterystycznych wymiarach i kształtach dla danego mieszańca pobierano do badań bezpośrednio z plantacji. W celu uzyskania rdzeni, kolby odziarniano.

Aby określić zakres zmian wartości cech fizycznych rdzenia w funkcji jego wilgotności, badania rozpoczęto przy wilgotności rdzenia wynoszącej około 65%. W miarę dojrzewania roślin pobierano z plantacji kolby, w celu otrzymania punktów pomiarowych w możliwie małych odstępach wilgotności. Przy wilgotności od 25% do 15% materiał dosuszano sztucznie. Aby określić zmienności rozkładu badanych właściwości fizycznych w rdzeniu, próbki pobierano z trzech stref rdzenia (rys. 2), dzieląc go na trzy równe części wzdłuż jego długości i zaczynając od nasady. Poszczególne części oznaczono (strefą) jako: hd – dolna, hc – centralna i hg – górna. Próbki wycinano specjalnym przyrządem, zapewniającym zachowanie równoległości powierzchni czołowych.



Rys. 2. Miejsce określania wymiarów rdzenia i pobierania próbek do badań
Fig. 2. Places to determine the dimensions of corn pith and sample collection for testing

Wymiary próbek dobrano doświadczalnie, tak aby ograniczyć niepożądane zjawiska występujące podczas próby ściskania (wyboczenie). Miejsce określania wymiarów rdzenia i pobierania próbek do badań przedstawiono na rysunku 2. Wartość badanej cechy fizycznej określano na próbce liczącej 360 rdzeni kolb. Wilgotność rdzenia określano zgodnie z Polską Normą: PN-86/A-74011.

4.1.2. Metoda wyznaczenia zastępczego wymiaru rdzeni kolb

W celu wyznaczenia stopnia rozdrobnienia rdzeni kolb należało określić ich zastępczy wymiar. Zastępczy średni wymiar rdzenia kolby (D_e) określono według równania (24).

Objętość rdzeni obliczano na podstawie równania stożka ściętego (dane do obliczeń według rys. 2).

4.1.3. Metoda pomiarów w statycznej próbie ściskania

Styczną próbę ściskania próbek rdzenia kolby kukurydzy przeprowadzono w laboratorium Agrofizyki Instytutu Inżynierii Rolniczej AR we Wrocławiu, na maszynie wytrzymałościowej Instron 5566, z głowicą pomiarową o zakresie do 10 kN. Szybkość przemieszczania belki pomiarowej ustalono na poziomie $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Na podstawie uzyskanych wyników w próbie ściskania określono wytrzymałość na ściskanie próbek rdzeni mieszańca KOSMO i KLG 2210 (charakteryzowaną naprężeniami niszczącymi σ_r) oraz względny moduł sprężystości E_r w zakresie odkształceń sprężystych. Próbkę ścisano między dwoma równoległymi płytami. Granicę wytrzymałości próbki na ściskanie pobrano z trzech stref rdzenia kolby (rys. 2), w próbie statycznego osiowego ściskania, określono jako stosunek siły niszczącej do przekroju początkowego próbki. Wartość naprężeń niszczących σ_r próbkę obliczano na podstawie następującego wzoru:

$$\sigma_r = \frac{4F_N}{\pi \cdot d_p^2} \quad [\text{MPa}] \quad (30)$$

gdzie:

F_N – siła niszcząca [MN],

d_p – średnica próbki [m].

Wartość modułu wyznaczono zgodnie z koncepcją umownego modułu siecznego (Bzowska-Bakalarz 1994) dla sił ściskających wyznaczonych doświadczalnie i określonych wartością górną tej siły. Umowny moduł sprężystości E_r obliczono z pochylenia krzywej „siła-odkształcenie” w zakresie sił, przy których nie przejawia się nieliniowość tej krzywej, występująca w pobliżu granicy wytrzymałości biologicznej (punkt pęknięcia).

Względny moduł sprężystości obliczono ze wzoru:

$$E_r = \frac{4l_p}{\pi \cdot d_p^2} \cdot \frac{F_g}{\Delta l} \quad [\text{MPa}] \quad (31)$$

gdzie:

F_g – górna wartość siły ściskającej [MN],

d_p – średnica próbki [m],

l_p – długość próbki [m],

Δl – odkształcenie wzdłużne [m].

4.1.4. Metoda pomiaru gęstości rdzenia

Gęstość poszczególnych części rdzenia określono z ilorazu masy części rdzenia (określonej przez ważenie) do jej objętości obliczonej na podstawie równania stożka ściętego.

4.1.5. Metodyka badań parametrów procesu rozdrabniania rdzeni kolb w rozdrabniaczu

Do rozdrabniania rdzeni kolb kukurydzy użyto rozdrabniacza H-111/2. Rozdrabniacz ten stosowany jest do rozdrabniania kolb w technologii produkcji pasz z kukurydzy. Badania energochłonności i jakości procesu rozdrabniania rdzeni kolb w rozdrabniaczu H-111/2 przeprowadzono dla pięciu wybranych poziomów wilgotności rdzeni, z zastosowaniem zespołu rozdrabniającego listwowego (listwa o grubości 7 mm a jej prędkość obwodowa wynosiła $61 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) i pięciu wielkości otworów sita rozdrabniacza wynoszących 3 mm; 5 mm; 7 mm; 10 mm i 55 mm. Badania powtarzano trzykrotnie dla każdego z 25 punktów pomiarowych.

Pracę wydatkowaną na rozdrobnienie rdzeni kolb w rozdrabniaczu określono w oparciu o pomiar poboru mocy z sieci elektrycznej na rejestratorze VATREC. Dla każdej rozdrabnianej próbki przeprowadzono pomiar i zapis poboru mocy pobieranej przez rozdrabniacz: bez obciążenia (P_o) i podczas rozdrabniania próbki (P_c).

Moc użyteczną (P_u), przeznaczoną na właściwy proces rozdrabniania próbki stanowi różnica:

$$P_u = P_c - P_o \quad [\text{kW}] \quad (32)$$

Po analizie wykresów przebiegu zmian mocy wyliczono pracę rozdrabniania (L_u):

$$L_u = P_u \cdot \frac{s}{v} \cdot 10^3 \quad [\text{MJ}] \quad (33)$$

gdzie:

s – długość odcinka taśmy rejestratora z zarejestrowanym przebiegiem zmian poboru mocy [mm],

v – prędkość przesuwu taśmy rejestratora [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$],

Jednostkowe nakłady energii elektrycznej na rozdrabnianie (E_E) określono z zależności:

$$E_E = \frac{L_u}{m_p} \cdot \eta_p \cdot \eta_i \cdot \eta_s \quad [\text{MJ}\cdot\text{Mg}^{-1}] \quad (34)$$

gdzie:

m_p – masa rozdrobnionej próbki [Mg],

η_p – sprawność przekładni klinowej – przyjęto 0,95,

η_i – sprawność łożyska rozdrabniacza – przyjęto 0,97,

η_s – sprawność silnika elektrycznego określano w zależności od średniej wartości jego obciążenia.

Masę rozdrabnianych próbek dobrano kierując się wielkością średniego czasu rozdrabniania. Z tych też względów przyjęto masę próbek $m_p = 0,012$ Mg. Dawki rdzeni odważano na wadze elektronicznej WPT 3/6, z dokładnością do 2 g. Wilgotność rozdrabnianych rdzeni oznaczono metodą suszarkową według PN-86/A-74011. Próbkę, każda o masie po 100 g, odważano z dokładnością do 0,2 g na wadze elektronicznej WPT3/6 i suszono w suszarce w temperaturze 403 K w czasie 60 minut.

W celu określenia składu granulometrycznego rozdrobnionych rdzeni wykonano analizę sitową. W tym celu cały rozdrobniony materiał mieszano bardzo dokładnie, a następnie pobierano losowo reprezentacyjną próbkę z różnych miejsc. Próbkę o masie 1,5 kg odważano na wadze WPT 3/6 z dokładnością do 0,2 g. Frakcjonowanie przeprowadzono przy użyciu sit o wymiarach otworów: 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 15, 20 mm. W ten sposób uzyskano następujące zastępcze wymiary (d_k) klasy wymiarowej wynoszące: 0,5; 1,5; 2,5; 3,5; 5; 7; 9; 12,5; 17,5; 20 mm. Przy frakcjonowaniu stosowano jednakową wielkość skoku kosza sitowego oraz równy czas trwania separacji, wynoszący 20 min. Odsiewanie poszczególnych frakcji cząstek przeprowadzono na wstrząsarce laboratoryjnej przystosowanej do tego rodzaju pracy. Zawartość rozdrobnionych rdzeni kolb na poszczególnych sitach ważono na wadze elektronicznej z dokładnością do 0,2 g oraz określono ich procentowy udział (b_k) w masie próbki.

Na podstawie uzyskanych danych o składzie granulometrycznym rozdrobnionej masy wyznaczono średni ważony zastępczy wymiar cząstki po dokonanych rozdrobnieniu.

4.1.6. Współczynnik pracy rozdrabniania

Współczynnik pracy rozdrabniania części dolnej (K_d), centralnej (K_c) i górnej (K_g) rdzenia został określony stosunkiem objętości strefy dolnej – V_d , centralnej – V_c i górnej V_g rdzenia do jego objętości V_r .

4.1.7. Współczynnik przyrostu powierzchni po jednorazowym skruszeniu próbki rdzenia kolby kukurydzy

Powierzchnie wytworzone po dokonaniu jednorazowego działania niszczącego próbkę rdzenia do pierwszych pęknięć określono jako stosunek nowo powstałej powierzchni po dokonanych zniszczeniu próbki, do jej powierzchni początkowej.

4.2. Wyniki badań i ich omówienie

4.2.1. Właściwości fizyczne rdzeni kolb

W celu wyznaczenia (według opracowanego modelu matematycznego) energii rozdrobnienia rdzeni kolb kukurydzy w dowolnym stadium dojrzałości rośliny (charakteryzowanym wilgotnością rdzenia), konieczne było określenie zmian wartości cech fizycznych (ujętych w równaniu (28) i (29)) rdzeni kolb (przebiegających w trakcie dojrzewania rośliny) oraz opisanie tego przebiegu formułą matematyczną.

4.2.1.1. Wyniki uzyskane w statycznej próbie ściskania

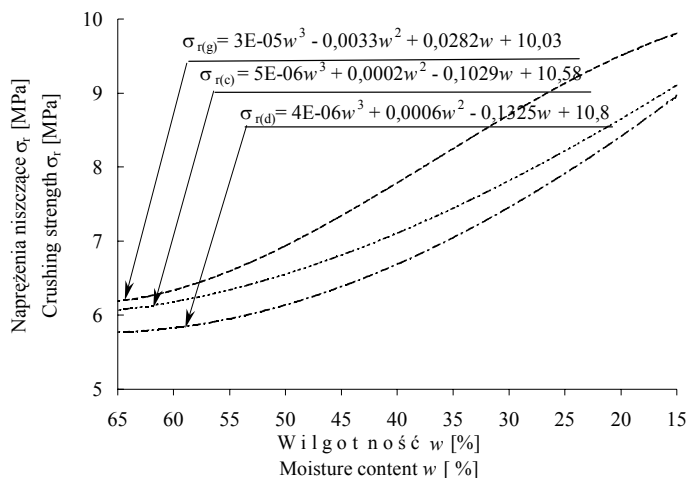
4.2.1.1.1. Wytrzymałość na ściskanie

Granice wytrzymałości biologicznej na ściskanie określają naprężenia niszczące. Wartość naprężeń niszczących jest podstawą jakościowej klasyfikacji surowca roślinnego, ze względu na jej ścisły związek z nakładami energii do jego rozdrabniania. Wartość naprężeń niszczących wpływa na wzrost nakładów energii (według równania (28) i (29)) z kwadratem jej wartości.

Wyniki badań dotyczące wpływu wilgotności rdzenia (w) na wartość naprężeń niszczących przedstawiono na rysunku 3 – dla mieszańca kukurydzy KOSMO, a na rysunku 4 – dla mieszańca KLG 2210. Umieszczono tam matematyczny opis przebiegu zmian analizowanych zależności.

Wyznaczone wartości naprężeń niszczących poddano analizie statystycznej i wyznaczono krzywe regresji trzeciego stopnia o wysokich współczynnikach determinacji (wartość $R^2 = 0,96 \div 0,98$ na poziomie istotności $\alpha = 0,05$).

Z przedstawionych na rysunku 3 i 4 krzywych wynika, że najwyższe przebiegi uzyskiwano dla części górnej rdzenia, a najniższe dla części dolnej, w analizowanym zakresie wilgotności. Analizując różnice w wartości naprężeń niszczących pomiędzy badanymi strefami rdzenia mieszańca KOSMO (rys. 3) stwierdzono, że dla próbki ze strefy środkowej były one wyższe o 4,3% od tych ze strefy dolnej (przy wilgotności 65%). W miarę obniżania się wilgotności rdzenia wzrastały one do 5,9% (przy wilgotności 44%), następnie zmniejszały się i przy wilgotności 15% wyniosły 2,2%. Wartości naprężeń, dla strefy górnej rdzenia, w porównaniu do środkowej były wyższe o 3,3% (przy wilgotności 65%). W miarę obniżania się jego wilgotności wzrastały do 12% (wilgotność 30%), następnie zmniejszały się i przy wilgotności 15% wyniosły 6%.



Rys. 3. Przebieg zmian wartości naprężeń niszczących próbkę pobraną ze strefy górnej $\sigma_{r(g)}$, środkowej $\sigma_{r(c)}$ i dolnej $\sigma_{r(d)}$ rdzenia w zależności od jego wilgotności dla mieszańca kukurydzy KOSMO

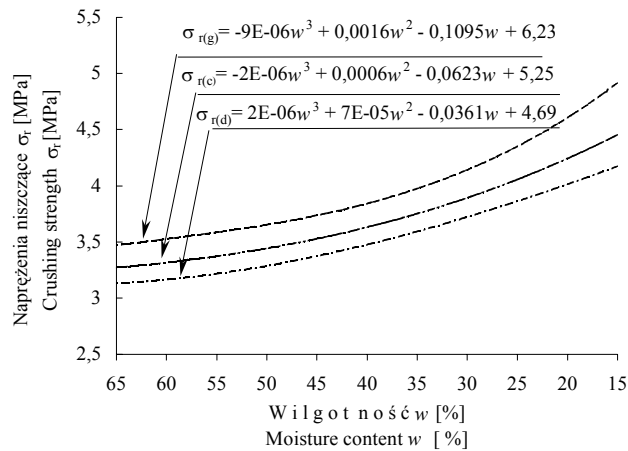
Fig. 3. Courses of changes in crushing strength of corn samples from the tip-end $\sigma_{r(g)}$, mid-section $\sigma_{r(c)}$ and but-end $\sigma_{r(d)}$, depending on moisture content of corn KOSMO hybrid

Odnosnie rdzeni mieszańca KLG 2210 (rys. 4) stwierdzono, że wartości naprężeń niszczących dla strefy środkowej były wyższe o 4,1% od tych ze strefy dolnej (przy wilgotności 65%). W miarę obniżania się wilgotności wzrosły one do 6,5% (przy wilgotności 15%). Wartości naprężeń dla strefy górnej w porównaniu do środkowej były wyższe o 5,2% (przy wilgotności 65%) i w miarę obniżania się jego wilgotności wzrosły do 10,6% (przy wilgotności 15%).

Przedstawiona powyżej analiza wyników badań pozwala wnioskować, że w celu określenia charakterystyki wytrzymałościowej rdzenia należy uwzględnić możliwe różnicowanie wartości naprężeń niszczących w jego części górnej, środkowej i dolnej.

Przystępując do analizy wpływu wilgotności na wartość naprężeń zwrócono szczególną uwagę na szybkość narastania ich wartości w miarę obniżania się wilgotności rdzenia w trakcie dojrzewania kukurydzy. Jest to istotna informacja dla oceny energii rozdrabniania, ponieważ według opracowanego równania (28) i (29), opisującego wpływ parametrów wytrzymałościowych na wielkość energii niezbędnej do rozdrabniania surowca roślinnego, wyższa wartość naprężeń niszczących wpływa na wzrost energii ich rozdrabniania.

Na podstawie przedstawionych na rysunku 3 i 4 wyników badań można stwierdzić, że zwiększa się wytrzymałość na ściskanie rdzenia wraz z obniżaniem się jego wilgotności.



Rys. 4. Przebieg zmian wartości naprężeń niszczących próbkę pobraną ze strefy górnej $\sigma_{r(g)}$, środkowej $\sigma_{r(c)}$ i dolnej $\sigma_{r(d)}$ rdzenia w zależności od jego wilgotności dla mieszańca kukurydzy KLG 2210

Fig. 4. Courses of changes in crushing strength of corn samples from the tip-end $\sigma_{r(g)}$, mid-section $\sigma_{r(c)}$ and but-end $\sigma_{r(d)}$, depending on moisture content of corn KLG 2210 hybrid

Zmiana wilgotności rdzenia mieszańca KOSMO z 65% do 15% wpływa na wzrost wartości naprężeń niszczących próbki ze strefy górnej od 6,2 MPa do 9,77 MPa, środkowej od 6,05 MPa do 9,13 MPa i dolnej od 5,77 MPa do 8,89 MPa. Wartość naprężeń wzrasta w badanym zakresie wilgotności dla próbki z części górnej o 58%, środkowej o 51% i dolnej o 54%.

Zmiana wilgotności rdzenia mieszańca KLG 2210 z 65% do 15% wpływa na wzrost wartości naprężeń niszczących próbki ze strefy górnej od 3,44 MPa do 4,93 MPa, środkowej od 3,26 MPa do 4,46 MPa i dolnej od 3,13 MPa do 4,18 MPa. Wartość naprężeń wzrasta w badanym zakresie wilgotności dla próbki z części górnej o 43%, środkowej o 37% i dolnej o 34%.

Analizując różnicę wartości naprężeń niszczących rdzeń badanych mieszańców, można stwierdzić, że mieszaniec KOSMO charakteryzuje się wyższą wytrzymałością na ściskanie niż KLG 2210. Zróżnicowanie wartości naprężeń niszczących rdzeń pomiędzy mieszańcami wzrasta w miarę obniżania się jego wilgotności. Wartość naprężeń niszczących próbkę rdzenia mieszańca KOSMO w porównaniu do KLG 2210 jest wyższa w jego części dolnej przy wilgotności 65% o 84%. Wraz z obniżaniem się wilgotności do 15% wzrasta do 113%. Różnica ta dla próbek z części środkowej wynosi odpowiednio od 86% do 105% i górnej od 80% do 98%.

Na podstawie przedstawionych wyników badań i ich analizy można wnioskować, że na wartość, jak również na przebieg zmian wartości naprężeń niszczących, wraz ze zmianą wilgotności rdzenia w trakcie dojrzewania rośliny, ma wpływ czynnik odmianowy. Wskazuje to na konieczność poszukiwania optymalnych parametrów wytrzymałościowych rdzenia kolby w pracach hodowlanych, zmierzających do uzyskania mieszańca kukurydzy z rdzeniem o możliwie niskich jego właściwościach wytrzymałościowych. Blisko dwukrotnie wyższe wartości naprężeń niszczących rdzenia mieszańca KOSMO niż KLG 2210 sugerują, że będzie on charakteryzował się wyższymi nakładami energii na rozdrabnianie jego rdzeni.

Przedstawione powyżej wyniki badań w zakresie różnicy wartości naprężeń niszczących próbkę rdzenia pomiędzy mieszańcami upoważniają do wnioskowania, że wytrzymałość na ściskanie jest cechą odmianową kukurydzy.

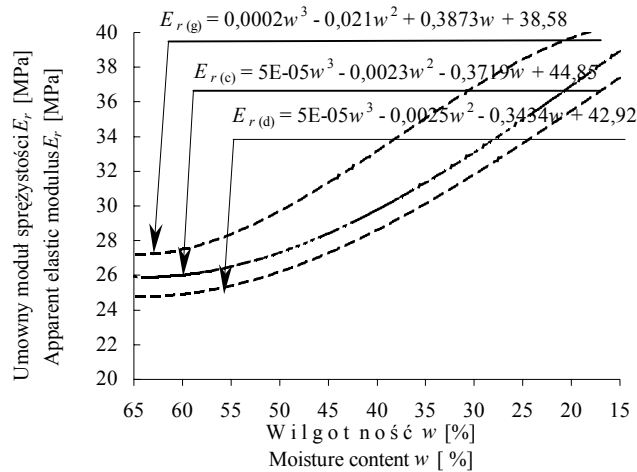
4.2.1.1.2. Względny moduł sprężystości

Podczas próby ściskania próbki rdzenia kolby przebieg zależności „naprężenia-odkształcenie” jest podobny do przebiegu tej zależności dla ciał sprężystych. Dzięki temu z wystarczającym przybliżeniem można obliczyć umowny moduł sprężystości określający zależność naprężenia od odkształcenia (wzór (31)). Wartość modułu sprężystości jest podstawą jakościowej oceny surowca roślinnego, ponieważ według opracowanego równania (28) i (29), wyższa wartość modułu wpływa na zmniejszenie wartości nakładów energii na rozdrabnianie.

Wyniki badań wpływu zmian poziomu wilgotności rdzenia (w) na wartość modułu sprężystości części górnej, środkowej i dolnej (rys. 2) rdzenia mieszańca kukurydzy KOSMO przedstawiono na rysunku 5, a mieszańca KLG 2210 na rysunku 6.

Określone wartości względnego modułu sprężystości poddano analizie statystycznej i wyznaczono krzywe regresji trzeciego stopnia, o wysokich współczynnikach determinacji (wartość $R^2 = 0,94 \div 0,98$ na poziomie istotności $\alpha = 0,05$), opisujące wpływ wilgotności na wartość względnego modułu sprężystości.

Analizując różnice wartości względnego modułu sprężystości, pomiędzy badanymi strefami rdzenia mieszańca KOSMO (rys. 5) stwierdzono, że jego wartości dla próbki strefy środkowej w porównaniu do dolnej były wyższe o 4,5% (przy wilgotności 65%) i w miarę obniżania się jego wilgotności zmniejszyły się do 3,4% (wilgotność 50%), następnie wzrastały i przy wilgotności 15% wyniosły 5,4%.



Rys. 5. Przebieg zmian wartości względnego modułu sprężystości próbki pobranej ze strefy górnej $E_{r(g)}$, środkowej $E_{r(c)}$ i dolnej $E_{r(d)}$ rdzenia w zależności od jego wilgotności dla mieszańca kukurydzy KOSMO

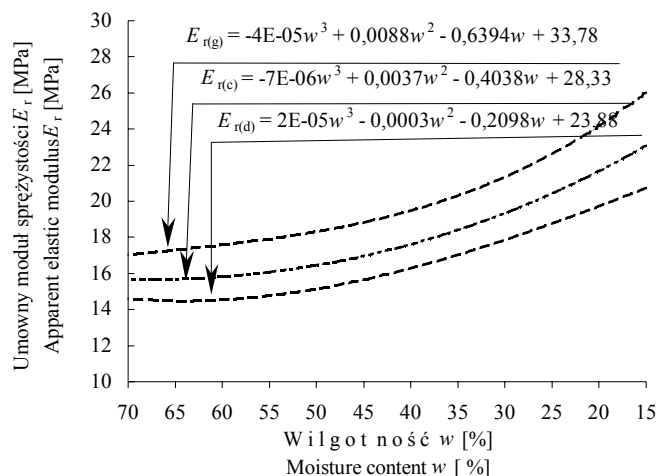
Fig. 5. Courses of changes in apparent elastic modulus of corn samples from the tip-end $E_{r(g)}$, mid-section $E_{r(c)}$ and but-end $E_{r(d)}$, depending on moisture content of corn KOSMO hybrid

Różnice wartości modułu pomiędzy próbką ze strefy środkowej, a górnej mają inny przebieg niż dolnej i centralnej. Wartości modułu dla próbki strefy górnej w porównaniu do środkowej były wyższe o 4,5% (przy wilgotności 65%) i w miarę obniżania się wilgotności wzrosły do 12,5% (wilgotność 38%), następnie zmniejszały się i przy wilgotności 15% wyniosły 4,1%.

W przypadku rdzeni mieszańca KLG 2210 (rys. 6), wartości modułu dla próbki strefy środkowej były wyższe o 9% od tych ze strefy dolnej (przy wilgotności 65%) i w miarę obniżania się jego wilgotności wzrosły do 11,3% (przy wilgotności 15%). Wartości modułu dla próbki strefy górnej, w porównaniu do środkowej, były wyższe o 16,6% (przy wilgotności 65%) i w miarę obniżania się jego wilgotności zmniejszyły się do 12,8% (przy wilgotności 15%).

Przedstawiona powyżej analiza wyników badań pozwala wnioskować, że przy wyznaczaniu energii rozdrabniania rdzeni kolb, należy uwzględnić różnice wartości względnego modułu sprężystości w jego części górnej, środkowej i dolnej.

Przystępując do analizy wpływu wilgotności na wartość względnego modułu sprężystości zwrócono szczególną uwagę na szybkość narastania jego wartości, w miarę obniżania się wilgotności rdzenia. Jest to istotna informacja dla oceny energii rozdrabniania rdzeni, ponieważ wyższa wartość modułu wpływa na obniżenie nakładów energii ich rozdrabniania.



Rys. 6. Przebieg zmian wartości względnego modułu sprężystości próbki pobranej ze strefy górnej $E_{r(g)}$, środkowej $E_{r(c)}$ i dolnej $E_{r(d)}$ rdzenia w zależności od jego wilgotności dla mieszańca kukurydzy KLG 2210

Fig. 6. Courses of changes in apparent elastic modulus of corn samples from the tip-end $E_{r(g)}$, mid-section $E_{r(c)}$ and but-end $E_{r(d)}$, depending on moisture content of corn KLG 2210 hybrid

Na podstawie przedstawionych na rysunku 5 i 6 wyników badań dotyczących wpływu zmian wilgotności rdzenia na wartość modułu sprężystości rdzenia badanych mieszańców można stwierdzić, że wraz z obniżaniem się jego wilgotności wzrasta wartość modułu.

Zmiana wilgotności rdzenia mieszańca KOSMO z 65% do 15% wpływa na wzrost wartości względnego modułu sprężystości próbki ze strefy górnej od 27,2 MPa do 40,3 MPa, środkowej od 26,1 MPa do 38,9 MPa i dolnej od 25 MPa do 36,9 MPa. Wartość modułu wzrasta w badanym zakresie wilgotności dla próbki z części górnej i dolnej o 48%, a środkowej o 49%.

Zmiana wilgotności rdzenia mieszańca KLG 2210 z 65% do 15% wpływa na wzrost wartości modułu sprężystości próbki ze strefy górnej od 18,4 MPa do 26 MPa, środkowej od 15,8 MPa do 23,1 MPa i dolnej od 14,5 MPa do 20,7 MPa. Wartość modułu wzrasta w badanym zakresie wilgotności dla próbki z części górnej o 41%, środkowej 46% i dolnej o 43%.

Różnice w wartości modułu sprężystości rdzenia pomiędzy badanymi mieszańcami, pozwalają stwierdzić, że rdzeń mieszańca KOSMO charakteryzuje się wyższą wartością modułu niż KLG 2210. Wartość modułu rdzenia mieszańca KOSMO w porównaniu z KLG 2210 jest wyższa w jego części dolnej przy wilgotności 65% o 72% i wraz z obniżaniem się wilgotności do 15% wzrasta do około 80%. Różnica ta dla próbek z części środkowej wynosi odpowiednio od 65% do około 70% i górnej od 48% do 72% (przy wilgotności 26%), a następnie zmniejsza się do 55% (przy wilgotności 15%).

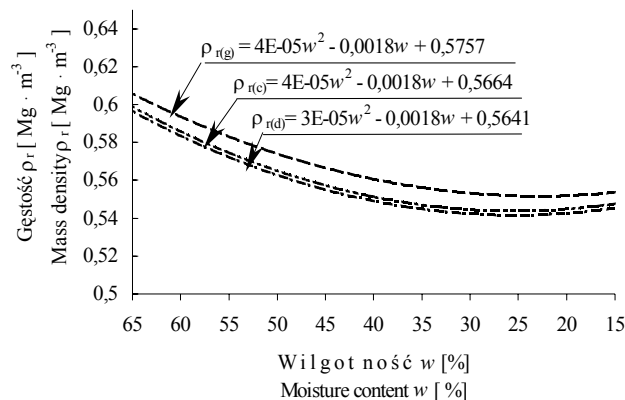
Wyższe wartości modułu sprężystości (od 55% do 80%) rdzenia mieszańca KOSMO niż KLG 2210 wpływają na zmniejszenie nakładów energii na rozdrabnianie jego rdzeni. Przedstawione powyżej wyniki badań dotyczące różnicy w wartościach modułu rdzenia analizowanych mieszańców upoważniają do wnioskowania, że względny moduł sprężystości jest cechą odmianową kukurydzy.

4.2.1.2. Gęstość rdzenia

Gęstość surowca roślinnego jest podstawą jakościowej oceny surowca roślinnego, ponieważ według opracowanego równania (28) i (29), wyższa wartość liczbową gęstości surowca wpływa na zmniejszenie wartości nakładów energii na rozdrabnianie.

Określone gęstości rdzenia poddano analizie statystycznej i wyznaczono krzywe regresji drugiego stopnia o wysokich współczynnikach determinacji (wartość $R^2 = 0,96 \div 0,98$ na poziomie istotności $\alpha = 0,05$), opisujące wpływ wilgotności na zmianę gęstości rdzenia. Otrzymane wyniki badań przedstawiono w formie krzywych na rysunkach, na których podano również matematyczny opis przebiegu zmian analizowanych zależności.

Wyniki badań wpływu wilgotności rdzenia na jego gęstość strefy górnej, środkowej i dolnej przedstawiono dla mieszańca kukurydzy KOSMO na rysunku 7, a dla mieszańca KLG 2210 na rysunku 8. Analizując zróżnicowanie gęstości pomiędzy badanymi strefami rdzenia mieszańca KOSMO (rys. 7) stwierdzono, że dla strefy środkowej w porównaniu z dolną była ona wyższa od 0,33% do 0,36% w badanym zakresie wilgotności. Gęstość strefy górnej rdzenia w porównaniu do środkowej była wyższa o 0,33% (przy wilgotności 65%), a w miarę obniżania się jego wilgotności wzrosła do 1,64% (przy wilgotności 15%).



Rys. 7. Przebieg zmian gęstości strefy górnej $\rho_{r(g)}$, środkowej $\rho_{r(c)}$ i dolnej $\rho_{r(d)}$ rdzenia w zależności od jego wilgotności dla mieszańca kukurydzy KOSMO

Fig. 7. Courses of changes in mass density of corn samples from the tip-end $\rho_{r(g)}$, mid-section $\rho_{r(c)}$ and but-end $\rho_{r(d)}$, depending on moisture content of corn KOSMO hybrid

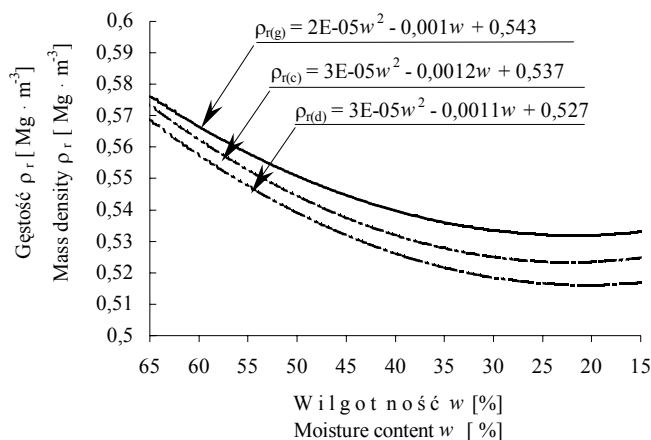
Odnośnie gęstości rdzenia mieszańca KLG 2210 (rys. 8), stwierdzono, że dla strefy środkowej była ona wyższa o 0,40% (przy wilgotności 65%) od tej ze strefy dolnej. W miarę obniżania się jego wilgotności wzrosła do 1,79% (przy wilgotności 15%). Gęstość strefy górnej rdzenia w porównaniu do środkowej była wyższa o 0,40% (przy wilgotności 65%) i w miarę obniżania się jego wilgotności wzrosła do 1,12% (przy wilgotności 15%).

Przedstawiona powyżej analiza wyników badań pozwala stwierdzić, że różnice gęstości rdzenia w jego części górnej, środkowej i dolnej zawierają się w przedziale od 0,33% do 1,79%.

Na podstawie przedstawionych na rysunku 7 i 8 wyników badań dotyczących wpływu zmian wilgotności rdzenia na gęstość rdzenia badanych mieszańców można stwierdzić, że wraz z obniżaniem się jego wilgotności wzrasta gęstość.

Zmiana wilgotności rdzenia mieszańca KOSMO z 65% do 15% wpływa na zmniejszenie gęstości próbki ze strefy górnej o 7,5%, środkowej 8,6% i dolnej o 8,7% a mieszańca KLG 2210 odpowiednio o 6,1%, 5,6% i o 4,3%.

Zmniejszająca się gęstość rdzeni, wraz z obniżaniem się ich wilgotności, wpłynie na zwiększanie nakładów energii niezbędnej do ich rozdrobnienia.



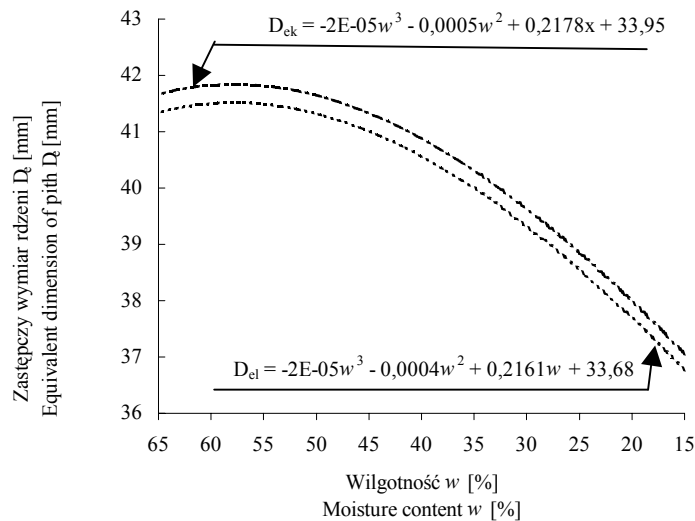
Rys. 8. Przebieg zmian gęstości strefy górnej $\rho_{r(g)}$, środkowej $\rho_{r(c)}$ i dolnej $\rho_{r(d)}$ rdzenia w zależności od jego wilgotności dla mieszańca kukurydzy KLG 2210

Fig. 8. Courses of changes in mass density of corn samples from the tip-end $\rho_{r(g)}$, mid-section $\rho_{r(c)}$ and but-end $\rho_{r(d)}$, depending on moisture content of corn KLG 2210 hybrid

4.2.1.3. Zastępczy wymiar rdzenia kolby kukurydzy

Średni zastępczy wymiar rdzenia kolb kukurydzy jest podstawą jakościowej oceny surowca roślinnego, ponieważ według opracowanego równania (28) i (29), wyższy wymiar wpływa na wzrost wartości nakładów energii na rozdrabnianie.

Wyznaczone średnie zastępcze wymiary rdzeni poddano analizie statystycznej i wyznaczono krzywe regresji trzeciego stopnia o wysokich współczynnikach determinacji (wartość $R^2 = 0,97 \div 0,99$ na poziomie istotności $\alpha = 0,05$), które opisują wpływ wilgotności na zmianę zastępczego wymiaru rdzenia. Otrzymane wyniki badań przedstawiono w formie krzywych na rysunku 9, gdzie podano również matematyczny opis przebiegu zmian analizowanej zależności.



Rys. 9. Wpływ zmian wilgotności rdzenia na wartość średniego zastępczego wymiaru rdzenia kolby. D_{ek} – mieszańiec KOSMO, D_{el} – mieszańiec KLG 2210

Fig. 9. Effect of change moisture content of corn cob pith on mean value equivalent dimension of cob pith. D_{ek} – KOSMO hybrid, D_{el} – KLG 2210 hybrid

Na podstawie przedstawionych na rysunku 9 wyników badań, można stwierdzić, że średni zastępczy wymiar rdzenia badanych mieszańców ma podobny przebieg, przy czym krzywa dla mieszańca KOSMO jest położona wyżej niż KLG 2210. Średni zastępczy wymiar rdzenia badanych mieszańców (w zakresie wilgotności od 65% do 40%) utrzymuje się w przybliżeniu na stałym poziomie. Przy zmniejszeniu się wilgotności rdzenia o 25%, w analizowanym zakresie wilgotności, średni zastępczy wymiar rdzenia kolb mieszańca KOSMO zmniejsza się o 0,73 mm, to jest o 1,8%, a rdzenia mieszańca KLG 2210 o 0,7 mm – to jest o 1,7%. Największą intensywność zmniejszania się zastępczego wymiaru rdzenia stwierdzono w przedziale wilgotności od 40% do 15%. Przy zmniejszeniu się wilgotności rdzenia o 25%, w analizowanym zakresie wilgotności, średnia wartość zastępczego wymiaru rdzenia kolby mieszańca KOSMO zmniejsza się o 3,98 mm, to jest o 9,7%, a rdzenia mieszańca KLG 2210 o 3,95 mm, to jest o 9,7%. Pozwala to stwierdzić, że w analizowanym zakresie wilgotności można oczekiwać znaczącego wpływu zmian wymiarów rdzeni na stopień ich rozdrobnienia i wartość nakładów energii na rozdrabnianie.

4.2.2. Parametry procesu rozdrabniania rdzeni kolb w rozdrabniaczu H-111/2

W przyjętym modelu procesu rozdrabniania surowca roślinnego założono, że istnieje związek pomiędzy wymiarami otworów sita rozdrabniacza i stanem wilgotnościowym materiału, a energochłonnością i jakością procesu rozdrabniania.

Przeprowadzono badania składu granulometrycznego cząstek rozdrobnionych rdzeni kolb w rozdrabniaczu H-111/2, aby uzyskać dane, mówiące o tym jakich ilości produktu należy się spodziewać w określonej klasie wymiarowej rozdrobnionej masy, w zależności od wymiarów otworów sita rozdrabniacza. Informacja taka jest bardzo istotna z punktu widzenia oceny procesu rozdrabniania, a określone wartości parametrów składu granulometrycznego cząstek należy wprowadzić do opracowanego modelu (równanie (29)), aby określić energię rozdrabniania rdzeni kolb. Na podstawie danych o parametrach składu granulometrycznego, uzyskanych w procesie rozdrabniania rdzeni, obliczono również wartość średniego ważonego zastępczego wymiaru cząstki rozdrobnionej masy (d_{sw}) i średniego ważonego stopnia rozdrobnienia (n_{sw}). Wyniki badań eksperymentalnych posłużyły do weryfikacji modelu matematycznego energii rozdrabniania rdzeni kolb (równanie (28) i (29)).

Uzyskane wyniki badań przedstawiono w tabeli 1 – dla mieszańca KOSMO i tabeli 2 – dla mieszańca KLG 2210. W tabelach przedstawiono średnie wartości parametrów procesu rozdrabniania rdzeni kolb z trzech powtórzeń, które uzyskano przy zastosowaniu sita o określonym wymiarze jego otworów.

Wyniki badań wpływu wilgotności rdzeni kolb na wartość parametrów składu granulometrycznego cząstek rozdrobnionych rdzeni kolb i średni ważony zastępczy wymiar cząstek po rozdrobnieniu poddano analizie statystycznej. Na tej podstawie wyznaczono proste regresje, które charakteryzowały się niskimi wartościami współczynnika korelacji „ r ” analizowanych zależności (wartość r niższa od 0,049 na poziomie istotności $\alpha = 0,05$). Uzyskane wyniki analizy statystycznej pozwalają stwierdzić, że wartość parametrów składu granulometrycznego cząstek i średni ważony zastępczy wymiar cząstki po rozdrobnieniu rdzeni kolb w rozdrabniaczu udarowym nie są znacząco zależne od wilgotności rozdrabnianego materiału. Można również wnioskować, że jeżeli średni ważony zastępczy wymiar cząstki po rozdrobnieniu rdzeni kolb w rozdrabniaczu udarowym nie jest znacząco zależny od wilgotności rozdrabnianego materiału, to parametr ten nie będzie znacząco oddziaływał na wielkość stopnia rozdrobnienia rdzeni wraz ze zmianą ich wilgotności.

Analizując uzyskany skład granulometryczny cząstek rozdrobnionych rdzeni badanych mieszańców, przy zastosowaniu w rozdrabniaczu H-111/2 sit o wymiarze otworów 3, 5 i 7 mm, można stwierdzić, że największy udział w rozdrobnionej masie mają cząstki klasy wymiarowej o zastępczym wymiarze 0,5 mm. Stanowią one średnio w rozdrobnionej masie procentowy udział wynoszący odpowiednio 62,8%; 44,1% i 38,1% dla rdzeni mieszańca KOSMO i 62,8%, 45,2%, 38,4% dla KLG 2210. Masa cząstek pozostałych klas wymiarowych stanowi zdecydowanie niższy procentowy udział w rozdrobnionej masie. Można, zatem stwierdzić, że cząstki klasy wymiarowej 0,5 mm będą istotnie oddziaływały na nakłady energii rozdrabniania rdzeni kolb w rozdrabniaczu, przy stosowaniu sit o podanych wyżej wymiarach otworów.

Przy użyciu sita z otworami o wymiarach 10 mm największy udział procentowy w rozdrobnionej masie stanowią cząstki klasy wymiarowej o zastępczym wymiarze 3,5 mm i 5 mm, (który wynosi średnio dla badanych mieszańców 27,5% i 20,3%). Przy użyciu sita z otworami o wymiarach 55 mm największy procentowy udział w rozdrobnionej masie (27%) stanowią cząstki klasy o zastępczym wymiarze 7 mm.

Na podstawie uzyskanych wyników badań parametrów składu granulometrycznego cząstek rozdrobnionych rdzeni w rozdrabniaczu H-111/2, można stwierdzić, że udział w rozdrobnionej masie cząstek klasy o zastępczym wymiarze 0,5 mm i 1,5 mm zmniejsza się w miarę zwiększania się wymiarów otworów sita. Udział masy cząstek tych klas w masie próbki rdzeni mieszańca KOSMO zmniejszał się odpowiednio od wartości 62,7% i 26,8% przy otworach sita 3 mm; do 8,6% i 9,4% – dla sita o otworach 10 mm. Cząstki o tych wymiarach nie występują w rozdrobnionej masie przy stosowaniu w rozdrabniaczu sita o otworach 55 mm. Cząstki klasy o zastępczym wymiarze 2,5 mm wystąpiły przy wszystkich próbach, a jej udział w rozdrobnionej masie rdzeni mieszańca KOSMO zawierał się w przedziale od 2,0% (wymiar otworów 5 mm) do 10,3% (wymiar otworów 55 mm).

Z przedstawionych w tabelach 1 i 2 wyników badań dotyczących średniego ważonego zastępczego wymiaru cząstki rozdrobnionej masy rdzeni kolb wynika, że jego wartość nie jest uzależniona od mieszańca kukurydzy, natomiast wartość ta zwiększa się wraz ze wzrostem wymiarów otworów sita.

Uzyskane wyniki badań pozwalają wysunąć wnioski stwierdzające, że stosując w rozdrabniaczu uniwersalnym sita o wymiarach 3, 5, 7, 10 i 55 mm uzyskamy średni ważony zastępczy wymiar cząstki rozdrobnionej masy rdzeni kolb, wynoszące w przybliżeniu odpowiednio 0,976 mm, 1,48 mm, 2,13 mm, 3,97 mm i 7,82 mm. Z przedstawionych w tabelach 1 i 2 wyników badań średniego ważonego stopnia rozdrobnienia można stwierdzić, że jego wartość zmienia się wraz ze zmianą wilgotności i wymiarów otworów sita.

Tabela 1
Table 1

Wyniki badań procesu rozdrabniania rdzeni kolb mieszanecka kukurydzy KOSMO w rozdrabniaczu H-11/2 (D_d – średnica otworów sita rozdrabniacza [mm], w – wilgotność rdzeni [%], d_{50} – zastępczy ważony wymiar cząstki po rozdrobieniu [mm], n_{50} – średni ważony stopień rozdrobienia, E_E – nakłady energii elektrycznej na rozdrabnianie [MJ·Mg⁻¹])

Results of testing the process of corn cob pith disintegration for corn variety KOSMO in H-11/2 a grinder (D_d – diameter of screen hole of a grinder [mm], d_{50} – equivalent dimension particle after grinding [mm], n_{50} – mean weighing degree of fineness, E_E – electrical energy consumed for grinding [MJ·Mg⁻¹])

Lp. Nb	D_d [mm]	w [%]	Zastępczy wymiar klasy ziarnowej rozdrobionych rdzeni kolb [mm] Equivalent dimension of particle size grade of disintegrated cob pith [mm]																d_{50} [mm]	n_{50} [-]	E_E [MJ·Mg ⁻¹]
			Udział masy cząstek klasy ziarnowej w masie próbki [%] Percentages of particle size grade in mass per sample [%]																		
			0,5	1,5	2,5	3,5	5	7	9	10	11	12	13	14	15	16	17,5	20			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17,5	20	0,976	42,8	205	
		58,1	62,7	27	10,3													0,976	42,8	205	
1	3	50,3	62,3	27,2	10,5													0,982	42,66	225	
		42,4	62,7	27,4	9,9													0,972	42,1	244	
		24,2	63,2	26,3	10,5													0,973	39,55	283	
2	Srednio Average	16,6	62,9	26,5	10,6													0,977	38,26	290	
		62,8	26,9	10,4														0,976	-	-	
3	5	57,5	44,1	24,9	20	11												1,479	28,25	159	
		50,8	43,6	25	21	10,4												1,482	28,15	172	
		40,6	44,6	24,2	20,4	10,8												1,474	27,79	188	
		24,3	44,7	25,2	17,9	12,2												1,476	26,1	208	
		17,2	43,7	24,8	20,7	10,8												1,486	25,25	223	
4	Srednio Average	44,1	24,8	20	11,0													1,479	-	-	
		58,9	38	15	11	24	12											2,13	19,62	127	
		51	38,5	14	11,4	23,6	12,5											2,139	19,55	143	
5	7	41,5	39	13,5	12	23	12,5											2,127	19,3	156	
		25,9	37,8	14	13,2	22,4	12,6											2,143	18,12	182	
		17,5	37	16	12	23,5	11,5											2,122	17,54	186	

Tabela 1 cd.
Table 1 conti.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
6	Srednio Average	38,1	14,5	11,9	23,3	12,2							2,132	-	-
7		57	7	9	18	29	20	10	7				3,965	10,54	50,9
		51,9	9	12	15	26	21	9	8				3,910	10,5	56,4
		40,5	10	10	16	26	19	9	10				3,990	10,37	61
		25,5	9	9	16	27	21	11	7				3,975	9,74	70
8	Srednio Average	17,5	8	7	18	30	20	10	7				3,975	9,42	71
		8,6	9,4	16,6	27,6	20,2	9,8	7,8					3,963	-	-
		58,9		10	12,1	15	27	17	9	6	3,9	7,799	5,35	19	
9		50,3		11	12	14	27	16,2	9,3	7,5	3	7,818	5,33	21	
		41,9		9	13,8	15,5	26,1	17,5	8,3	5,8	4	7,737	5,26	23	
		24,2		11	11,5	14	27,1	16	9,3	7,8	3,3	7,902	4,94	26	
		16,5		10,9	12,3	13,8	27	16,2	9,2	7,5	3,1	7,823	4,78	27	
10	Srednio Average	10,4	12,3	14,5	26,8	16,6	9	6,9	3,5	7,816	-	-	-	-	

Tabela 2
Table 2

Wyniki badań procesu rozdrabniania rdzeni kolb mieszańca kukurydzy KLG 2210 w rozdrabniaczu H-11/2 (D_d – średnica otworów sita rozdrabniacza [mm], w – wilgotność rdzeni [%]), d_{50} – zastępczy ważony wymiar cząstki po rozdrobnieniu [mm], n_{50} – średni ważony stopień rozdrobnienia, E_E – nakłady energii elektrycznej na rozdrabnianie [$\text{MJ} \cdot \text{Mg}^{-1}$])

Results of testing the process of corn cob pith disintegration for corn variety KLG 2210 in H-11/2 a grinder (D_d – diameter of screen hole of a grinder [mm], d_{50} – equivalent dimension particle after grinding [mm], n_{50} – mean weighing degree of fineness, E_E – electrical energy consumed for grinding [$\text{MJ} \cdot \text{Mg}^{-1}$])

Lp. Nb	D_d [mm]	w [%]	Zastępczy wymiar klasy ziarnowej rozdrobnionych rdzeni kolb [mm] Equivalent dimension of particle size grade of disintegrated cob pith [mm]													d_{50} [mm]	n_{50} [-]	E_E [$\text{MJ} \cdot \text{Mg}^{-1}$]
			Udział masy cząstek klasy ziarnowej w masie próbki [%] Percentages of particle size grade in mass per sample [%]															
			0,5	1,5	2,5	3,5	5	7	9	10	11	12	13	20				
1	3	58,3	62,4	27,1	10,5										0,981	42,47	16	
		50,8	63,3	26	10,7										0,974	42,32	109	
		41,6	62,9	26,7	10,4										0,975	41,78	114	
2	Srednio Average	23,3	62,7	27,3	10										0,973	39,24	121	
		17	62,9	26,4	10,7										0,978	38	122	
		62,8	26,7	10,5											0,976	-	-	
3	5	58	44,9	23,1	20	12									1,491	28,03	80	
		50,5	45,5	24	20	12,5									1,475	28	84	
		42,8	45,3	23,7	19	12									1,477	27,57	87	
4	Srednio Average	23,5	44,7	25,2	17,9	12,2									1,476	25,9	93	
		15,5	45,4	24,1	18	12,5									1,476	25,06	93	
		45,2	24	19	12,2										1,479	-	-	
5	7	57,1	38,7	14,3	10,7	23,4	12,9								2,139	19,46	65	
		49,2	39,4	13,9	10,4	22,8	13,5								2,138	19,39	69	
		42,3	38,2	16	9	23,8	13								2,139	19,15	72	
5	7	25,1	37,5	15,5	11,7	22,7	12,6								2,137	17,98	76	
		16,9	38,3	15	11,7	23,7	11,3								2,103	17,4	78	

Tabela 2 cd.
Table 2 conti.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
6	Srednio Average	56,2	38,4	14,9	10,7	23,3	12,7						2,131		
			8	9	19	27	20	11	6				3,905	10,46	26
			9	11	15	27	20	9	9				3,97	10,42	27
			11	10	14	26	19	12	8				3,975	10,29	28
7	Srednio Average	25	9	9	16	26	22	11	7				3,99	9,66	32
			8	7	17	31	21	10	6				3,945	9,35	30
			9	9,2	16,2	27,4	20,4	10,6	7,2				3,957		
			10,1	12,3	15	26,4	17	9,8	6,2	3,2	7,761	5,35	19		
9	Srednio Average	49,1	11	12,4	13,6	27,3	15,9	15,9	9,3	7,5	3	7,806	5,33	21	
			9	13,7	15,2	26,2	17,6	8	6	4,3	7,792	5,26	23		
			11	11,3	14,2	26,9	16	9,3	7,9	3,4	7,928	4,94	26		
			11	12,3	13,9	27	16,2	9,3	7,3	3	7,788	4,78	27		
10	Srednio Average	16,5													
			10,4	12,4	14,4	26,8	16,5	9,1	7	3,4	7,815				

Przy zastosowaniu w rozdrabniaczu H-111/2 sita o wymiarach otworów wynoszących 3 mm, stopień rozdrobnienia rdzeni kolb mieszańca KOSMO zmienia się od wartości 42,8 (przy wilgotności rdzeni 58,1%) do 38,3 (przy wilgotności 16,6%). Stopień rozdrobnienia rdzeni kolb mieszańca KLG 2210 zmienia się od wartości 42,47 (przy wilgotności rdzeni 58,3%) do 38 (przy wilgotności 17%). W miarę zwiększania się wymiarów otworów sita stopień rozdrobnienia zmniejsza się. Przy stosowaniu sit o otworach 55 mm stopień rozdrobnienia rdzeni mieszańca KOSMO waha się od 5,4 (przy wilgotności 58,5%) do 4,8 (przy wilgotności 16,5%), a mieszańca KLG 2210 od 5,3 (przy wilgotności 57,5%) do 4,74 (przy wilgotności 16,5%).

Uzyskane wyniki badań (tab. 1 i 2) pozwalają stwierdzić, że zmniejszenie wilgotności rdzeni badanych mieszańców, w analizowanym zakresie ich wilgotności, wpłynie na obniżenie wartości średniego ważonego stopnia rozdrobnienia w przybliżeniu o 10,5%.

Podsumowując, można stwierdzić, że zarówno mieszaniec KOSMO, jak i KLG 2210 charakteryzują się zbliżonymi wartościami parametrów składu granulometrycznego cząstek rozdrobnionych rdzeni w rozdrabniaczu H-111/2 i uzyskanym stopniem rozdrobnienia oraz średnim ważonym zastępczym wymiarem cząstki. Średni ważony zastępczy wymiar cząstki po rozdrobnieniu rdzeni kolb w rozdrabniaczu udarowym nie jest znacząco zależny od wilgotności rozdrabnianego materiału. Parametr ten nie wpływa znacząco na wielkość stopnia rozdrobnienia rdzeni. Na zmianę wielkości stopnia rozdrobnienia wpływa wartość zastępczego wymiaru rdzenia, zmieniająca się wraz ze zmniejszaniem się jego wilgotności. Z przedstawionych w tabelach 1 i 2 wyników badań nakładów energii rozdrabniania określonych w eksperymencie można stwierdzić, że jej wartość zmienia się wraz ze zmianą wilgotności i wymiarów otworów sita. Przy zastosowaniu w rozdrabniaczu H-111/2 sita o wymiarach otworów wynoszących 3 mm, nakłady energii rozdrabniania rdzeni kolb mieszańca KOSMO wzrastają od wartości 205 MJ (przy wilgotności rdzeni 58,1%) do 290 MJ (przy wilgotności 16,6%), a rdzeni kolb mieszańca KLG 2210 wzrastają od wartości 104 MJ (przy wilgotności rdzeni 58,3%) do 122 MJ (przy wilgotności 17%). W miarę zwiększania się wymiarów otworów sita wartość nakładów energii zmniejsza się. Przy stosowaniu sit o otworach 55 mm energia rozdrobnienia rdzeni mieszańca KOSMO waha się od 19 MJ (przy wilgotności 58,5%) do 27 MJ (przy wilgotności 16,5%) a mieszańca KLG 2210 waha się od 9,8 MJ (przy wilgotności 57,5%) do 11,1 MJ (przy wilgotności 16,5%).

Uzyskane wyniki (tab. 1 i 2) pozwalają stwierdzić, że obniżanie się wilgotności rdzenia w badanym zakresie ich wilgotności wpływa na wzrost wartości nakładów energii rozdrabniania w rozdrabniaczu rdzeni mieszańca KOSMO od 31,7% (sito o otworach 7 mm) do 22,2% (sito o otworach 55 mm) a mieszańca KLG 2210 od 16,7% (sito o otworach 7 mm) do 11,7% (sito o otworach 55 mm). Niższe przyrosty wartości energii rozdrabniania w zależności od zmian wilgotności rdzeni mieszańca KLG 2210 (od 15% do 10,5%) w porównaniu z rdzeniami mieszańca KOSMO należy upatrywać w mniejszym wzroście wartości ich cech fizycznych wraz z obniżaniem się wilgotności.

Analizując różnicę wartości energii rozdrabniania rdzeni w rozdrabniaczu, można stwierdzić, że mieszaniec KOSMO charakteryzuje się większymi jej nakładami, w przybliżeniu od 49% (sito o otworach 7 mm, wilgotność rdzeni – 58,9%) do 58% (sito o otworach 55 mm, wilgotność rdzeni – 16,5%) w porównaniu do KLG 2210 (sito o otworach 7 mm, wilgotność – 57,1% i sito o otworach 55 mm, wilgotność – 15,5%).

Tak istotne zróżnicowanie nakładów energii rozdrabniania rdzeni, określonego w eksperymencie pomiędzy analizowanymi mieszancami, wynika ze zróżnicowania wartości cech fizycznych rdzenia mieszańca KOSMO i KLG 2210.

4.2.3. Współczynnik pracy rozdrabniania

Współczynnik pracy rozdrabniania rdzenia dla części dolnej (K_d), centralnej (K_c) i górnej (K_g) określono w celu obliczenia wartości średniej ważonej pracy rozdrabniania.

Wartość współczynnika pracy rozdrabniania rdzeni mieszańca KOSMO wynosi dla części dolnej (K_{dk}) – 0,413, środkowej (K_{ck}) – 0,328 i górnej (K_{gk}) – 0,259. Dla mieszańca KLG 2210 w części dolnej wynosi (K_{dl}) – 0,414, środkowej (K_{cl}) – 0,328 i górnej (K_{gl}) – 0,258. Nie stwierdzono wpływu stanu wilgotnościowego rdzenia kolby, w analizowanym zakresie jego wilgotności, na wartość współczynnika pracy rozdrabniania.

4.2.4. Współczynnik przyrostu powierzchni po jednorazowym skruszeniu próbki rdzenia kolby kukurydzy

Współczynnik przyrostu powierzchni (α_r), po dokonanych jednorazowym zniszczeniu próbki rdzeni kolb, charakteryzuje wielkość pracy jednorazowego rozdrabniania surowca roślinnego, którą należy powtórzyć, aby otrzymać całkowitą pracę kruszenia potrzebną do uzyskania stopnia rozdrabniania materiału (zgodnie z teorią Bracha).

Próbki rdzeni kolb zbliżone kształtem do walca poddane statycznemu ścisnieniu pomiędzy dwoma płytami pękają na dwie części. Wartość współczynnika przyrostu nowo powstałej powierzchni po dokonanych zgnieceniu próbki rdzenia wynosi 0,425.

4.3. Wyniki obliczeń symulacyjnych i ich porównanie z wynikami pomiarów

Opracowane modele matematyczne umożliwiają wyznaczenie energii rozdrabniania rdzeni kolb kukurydzy na podstawie wartości cech fizycznych rdzenia, współczynnika przyrostu powierzchni po jednorazowym skruszeniu i średniego ważonego stopnia rozdrobnienia (według równania (28)) oraz parametrów składu granulometrycznego cząstek w rozdrobnionej masie (według równanie (29)). Obliczenia symulacyjne energii rozdrabniania przeprowadzono w oparciu o sformułowany model matematyczny (równanie (28) i (29)) dla rdzeni kolb mieszańca kukurydzy KOSMO i KLG 2210, na podstawie bazy danych uzyskanej w wyniku przeprowadzonych badań własnych. W ramach cyklu doświadczeń mających na celu weryfikację proponowanych modeli matematycznych przeprowadzono badania energochłonności i jakości procesu rozdrabniania rdzeni kolb mie-

szańca KOSMO i KLG 2210 w rozdrabniaczu udarowym H-111-1. W eksperymentach stosowano zmienne wymiary otworów sita rozdrabniacza i rdzenie o różnej wilgotności.

Uzyskane w obliczeniach symulacyjnych (według równania (28) i (29)) i w eksperymentach przebiegi zmian energii rozdrabniania rdzeni kolb mieszańca KOSMO, w zależności od średniego ważonego stopnia ich rozdrobnienia dla badanych wilgotności rdzeni, przedstawiono w formie wykresu na rysunkach 10, 11, 12, 13, 14. Analogiczną zależność dla rdzeni mieszańca KLG 2210 przedstawiono na rysunkach 16, 17, 18, 19, 20.

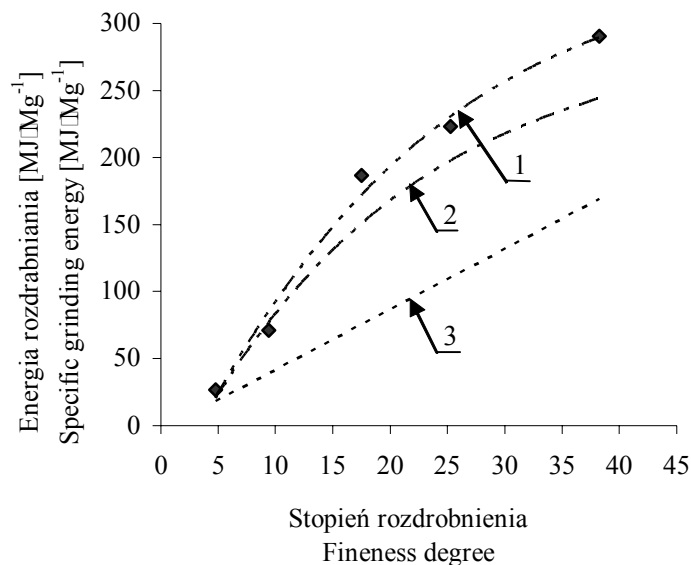
W wyniku takiego przedstawienia wyników symulacyjnych i eksperymentalnych otrzymano graficzne porównanie przebiegów teoretycznych i doświadczalnych.

Analizując przedstawione na rysunkach (10–14 i 16–20) przebiegi energii rozdrabniania rdzeni kolb w zależności od średniego ważonego stopnia ich rozdrobnienia można stwierdzić, że zależności te uzyskane w drodze eksperymentu i obliczone według modelu (równanie (29)), na podstawie parametrów składu granulometrycznego cząstek w rozdrobnionej masie, charakteryzują się przebiegiem krzywoliniowym.

Obliczone według modelu (równanie (28)), na podstawie średniego ważonego stopnia rozdrobnienia, charakteryzują się przebiegiem prostoliniowym.

Należy tu zauważyć, że charakter przebiegu energii rozdrabniania uzyskanej w drodze eksperymentu jest bardzo podobny do przebiegu zależności symulacyjnych obliczonych na podstawie zaproponowanego równania (29) i nie wykazuje zbieżności z obliczonymi na podstawie równania (28).

Analizując różnice wartości nakładów energii na rozdrabnianie rdzeni kolb mieszańca KOSMO o wilgotności $17\pm 1\%$ (rys. 10) pomiędzy uzyskanymi w eksperymencie, a obliczonymi według równania (29) stwierdzono, że są one niższe od 6,3% (stopień rozdrobnienia 4,8) do 15,6% (stopień rozdrobnienia 38,3). Natomiast obliczone według równania (28) są niższe od 36,1% (stopień rozdrobnienia 4,8) do 59,9% (stopień rozdrobnienia 25,3).



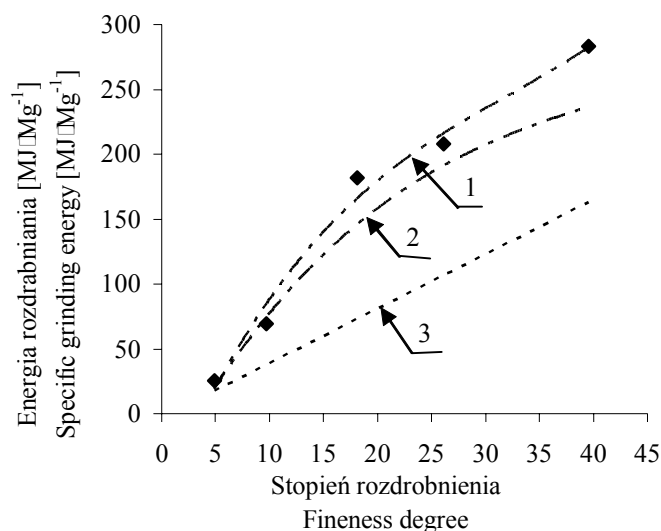
Rys. 10. Teoretyczne i doświadczalne zależności energii rozdrabniania od średniego ważonego stopnia rozdrobnienia rdzeni kolb o wilgotności $17\pm 1\%$ dla mieszańca KOSMO. 1 – wyniki eksperymentu; 2 – obliczone według równania (29); 3 – obliczone według równania (28)

Fig. 10. Theoretical and experimental dependencies of specific grinding energy versus mean weighing fineness degree of corn cob pith at mean moisture content of $17\pm 1\%$ for KOSMO hybrid. 1 – experimental results; 2 – calculated by elaborated formula (29); 3 – calculated by formula (28)

Zbliżony charakter do przedstawionego powyżej, w zakresie różnic wartości energii rozdrabniania rdzeni kolb tego mieszańca, stwierdzono w przypadku pozostałych badanych poziomów ich wilgotności (rys. 11–14).

Różnica wartości energii rozdrabniania określonej w eksperymencie w stosunku do obliczonej według równania (29) przy wilgotności rdzeni tego mieszańca wynoszącej $25\pm 1,5\%$ (rys. 11), $41\pm 1,5\%$ (rys. 12), $51\pm 1\%$ (rys. 13), $58\pm 1\%$ (rys. 14) zawierała się odpowiednio w przedziale 4,7–16,3%, 6,9–16%, 5,1–16% i 5,6–15,3%.

Odpowiednio do obliczonej według równania (28) wynosiła 34,9% - 60,1% (rys. 11), 36,1–60% (rys. 12), 34,8–59,5% (rys. 13), 35,1–58,1% (rys. 14).



Rys. 11. Teoretyczne i doświadczalne zależności energii rozdrabniania od średniego ważonego stopnia rozdrobnienia rdzeni kolb o wilgotności $25\pm 1,5\%$ dla mieszańca KOSMO. 1 – wyniki eksperymentalne; 2 – obliczone według równania (29); 3 – obliczone według równania (28)

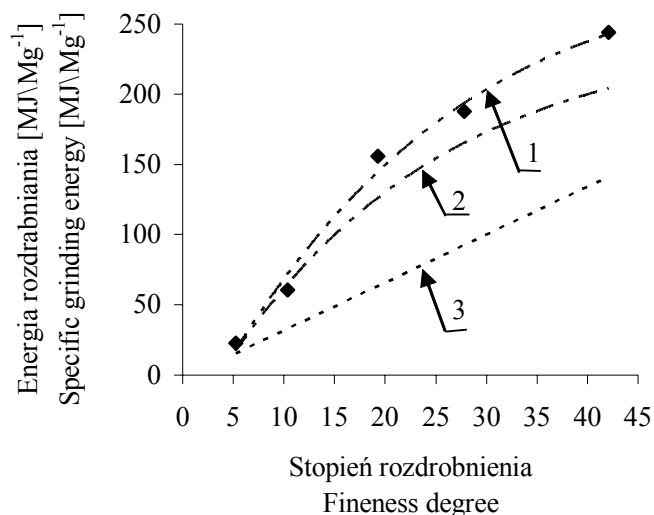
Fig. 11. Theoretical and experimental dependencies of specific grinding energy versus mean weighing fineness degree of corn cob pith at mean moisture content of $25\pm 1,5\%$ for KOSMO hybrid. 1 – experimental results; 2 – calculated by elaborated formula (29); 3 – calculated by formula (28)

Analizując różnice wartości energii rozdrabniania rdzeni kolb mieszańca KLG 2210 o wilgotności $16\pm 1\%$ (rys. 16) pomiędzy uzyskanymi w eksperymencie, a obliczonymi według równania (29) stwierdzono, że są one niższe od 4,6% (stopień rozdrobnienia 4,7) do 15,7% (stopień rozdrobnienia 38). Natomiast obliczone według równania (28) są niższe od 35% (stopień rozdrobnienia 4,8) do 59,6% (stopień rozdrobnienia 17,4).

Zbliżony charakter do przedstawionego powyżej w zakresie różnic wartości energii rozdrabniania rdzeni kolb tego mieszańca stwierdzono w przypadku pozostałych badanych poziomów ich wilgotności (rys. 17–20).

Różnica energii rozdrabniania określonej w eksperymencie w stosunku do obliczonej według równania (29) przy wilgotności rdzeni tego mieszańca wynoszącej $24\pm 1,5\%$ (rys. 17), $42\pm 1\%$ (rys. 18), $50\pm 1\%$ (rys. 19), $57\pm 1,5\%$ (rys. 20) zawierała się odpowiednio w przedziale 5,6–16%, 4,5–16,3%, 5,6–15,6% i 7,3–16%.

Odpowiednio do obliczonej według równania (28) wynosiła 35,5–60% (rys. 17), 34,5–60% (rys. 18), 35,2–59,3% (rys. 19), 36,4–58,8% (rys. 20).



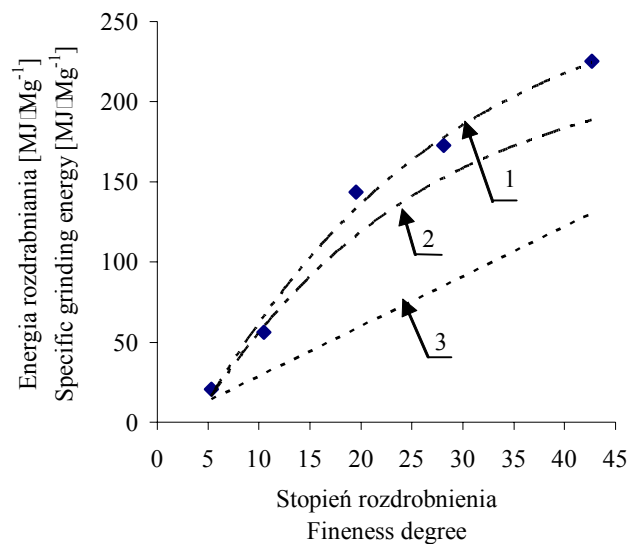
Rys. 12. Teoretyczne i doświadczalne zależności energii rozdrabniania od średniego ważonego stopnia rozdrobnienia rdzeni kolb o wilgotności $41,5 \pm 1,5\%$ dla mieszańca KOSMO. 1 – wyniki eksperymentu; 2 – obliczone według równania (29); 3 – obliczone według równania (28)

Fig. 12. Theoretical and experimental dependencies of specific grinding energy versus mean weighing fineness degree of corn cob pith at mean moisture content of $41,5 \pm 1,5\%$ for KOSMO hybrid. 1 – experimental results; 2 – calculated by elaborated formula (29); 3 – calculated by formula (28)

Z przedstawionej powyżej analizy wyników wypływa wniosek, że różnice pomiędzy wartościami teoretycznymi, wyznaczonymi na podstawie równania (28), i eksperymentalnymi dotyczącymi nakładów energii rozdrabniania rdzeni badanych mieszańców zawierają się w przedziale od 34,5% do 60,1%, co upoważnia do stwierdzenia, że model (równanie (28)) ten z niewystarczającą dokładnością opisuje badane zależności.

Dlatego też dalszą analizę wyników badanych zależności postanowiono przeprowadzić dla danych uzyskanych z eksperymentu i obliczonych według proponowanego modelu, (równanie (29)), który lepiej opisuje analizowane zależności niż równania (28).

Na podstawie uzyskanych wyników badań eksperymentalnych i modelowych (równanie (29)) dotyczących zależności energii rozdrabniania od średniego ważonego stopnia rozdrobnienia można stwierdzić, że szybkość narastania jej wartości jest zróżnicowana w badanym zakresie stopnia rozdrobnienia.

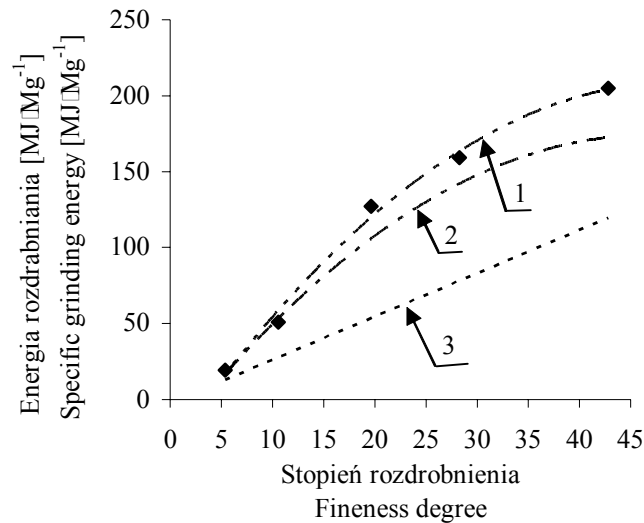


Rys. 13. Teoretyczne i doświadczalne zależności energii rozdrabniania od stopnia rozdrabniania rdzeni kolb o wilgotności $51\pm 1\%$ dla mieszańca KOSMO. 1 – wyniki eksperymentu; 2 – obliczone według równania (29); 3 – obliczone według równania (28)

Fig. 13. Theoretical and experimental dependencies of specific grinding energy versus mean weighing fineness degree of corn cob pith at mean moisture content of $51\pm 1\%$ for KOSMO hybrid. 1 – experimental results; 2 – calculated by elaborated formula (29); 3 – calculated by formula (28)

Analizując przedstawione na rysunkach (10–14) przebiegi zmian wartości energii rozdrabniania dla różnych wilgotności rdzeni kolb mieszańca KOSMO (na przykład przy ich wilgotności wynoszącej $17\pm 1\%$ (rys. 10) można stwierdzić, że zmianie stopnia rozdrabniania w przedziale od 4,8 do 17,5 (czyli o 12,7) odpowiada wzrost wartości energii rozdrabniania określony w eksperymencie o $159 \text{ MJ}\cdot\text{Mg}^{-1}$, a obliczony według modelu (równanie (29)) o $137 \text{ MJ}\cdot\text{Mg}^{-1}$. Przy stopniu rozdrabniania w zakresie od 17,5 do 38,3 (czyli o 20,8) wzrost jest istotnie mniejszy i wynosi odpowiednio $104 \text{ MJ}\cdot\text{Mg}^{-1}$ i $83 \text{ MJ}\cdot\text{Mg}^{-1}$.

Zbliżony charakter przebiegu zmian do przedstawionego powyżej, dotyczący energii rozdrabniania w zależności od stopnia rozdrabniania rdzeni kolb mieszańca KOSMO stwierdzono w przypadku pozostałych badanych poziomów wilgotności rdzeni (rys. 11–14).

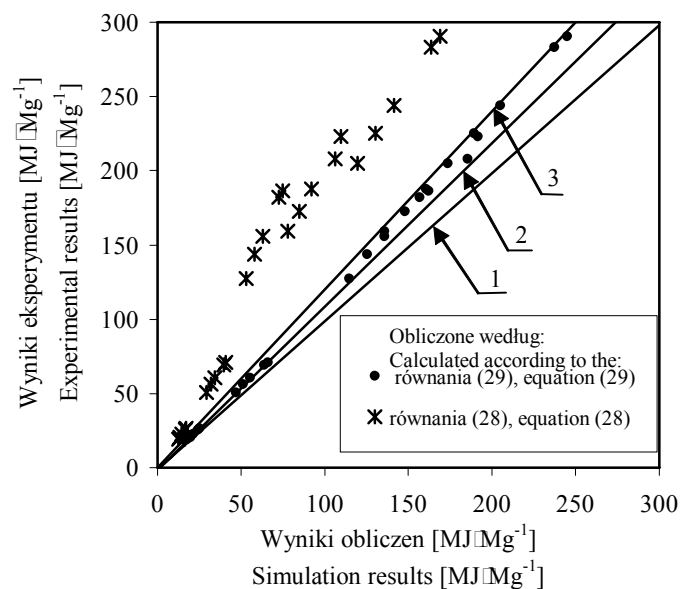


Rys. 14. Teoretyczne i doświadczalne zależności energii rozdrabniania od stopnia rozdrobnienia rdzeni kolb o wilgotności $58\pm 1\%$ dla mieszańca KOSMO. 1 – wyniki eksperymentu; 2 – obliczone według równania (29); 3 – obliczone według równania (28)

Fig. 14. Theoretical and experimental dependencies of specific grinding energy versus mean weighing fineness degree of corn cob pith at mean moisture content of $58\pm 1\%$ for KOSMO hybrid. 1 – experimental results; 2 – calculated by elaborated formula (29); 3 – calculated by formula (28)

Podobnym przebiegiem zmian nakładów energii na rozdrabnianie w zależności od stopnia rozdrobnienia (jak w przypadku rdzeni mieszańca KOSMO) charakteryzują się rdzenie mieszańca KLG 2210. Przy wilgotności rdzeni tego mieszańca wynoszącej $16\pm 1\%$ (rys. 16), można stwierdzić, że zmianie stopnia rozdrobnienia w przedziale od 4,7 do 17,4 (czyli o 12,7) odpowiada wzrost wartości energii określony w eksperymencie o $67 \text{ MJ}\cdot\text{Mg}^{-1}$ a obliczony według modelu (równanie (29)) o $58 \text{ MJ}\cdot\text{Mg}^{-1}$. Przy stopniu rozdrobnienia w zakresie od 17,4 do 38 (czyli o 20,6) wzrost jest istotnie mniejszy i wynosi odpowiednio $44 \text{ MJ}\cdot\text{Mg}^{-1}$ i $35 \text{ MJ}\cdot\text{Mg}^{-1}$.

Zbliżony charakter przebiegu zmian nakładów energii na rozdrabnianie w zależności od stopnia rozdrobnienia rdzeni kolb mieszańca KLG 2210 uzyskano w przypadku pozostałych badanych poziomów wilgotności rdzeni (rys. 17–20).

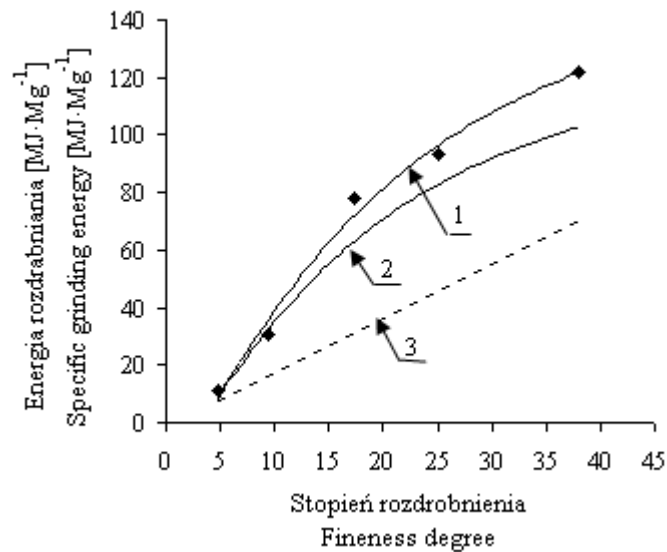


Rys. 15. Wynik weryfikacji zmian wartości energii rozdrabniania, obliczonego w oparciu o opracowany model matematyczny (równanie (29) i (28)). Rdzenie kolb kukurydzy mieszańca KOSMO o wilgotności w zakresie 16–59%. 1 – prosta korelacji; 2 – przedział błędu +10% wyników symulacji względem eksperymentu; 3 – przedział błędu +20% wyników symulacji względem eksperymentu

Fig. 15. Results of verification of average change in specific grinding energy, calculated on the basis of mathematical model (equation (28), and (29)). The corn cob pith KOSMO hybrid with moisture content of 16–59%. 1 – correlation curve; 2 – +10% deviation range of theoretical and experimental results; 3 – +20% deviation range of theoretical and experimental results

Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych i modelowych upoważniają do stwierdzenia, że przebieg zmian wartości energii rozdrabniania rdzeni kolb w zależności od średniego ważonego stopnia ich rozdrobnienia, jest zróżnicowany w zakresie stopnia rozdrobnienia od około 5 do 20 oraz od około 20 do 43.

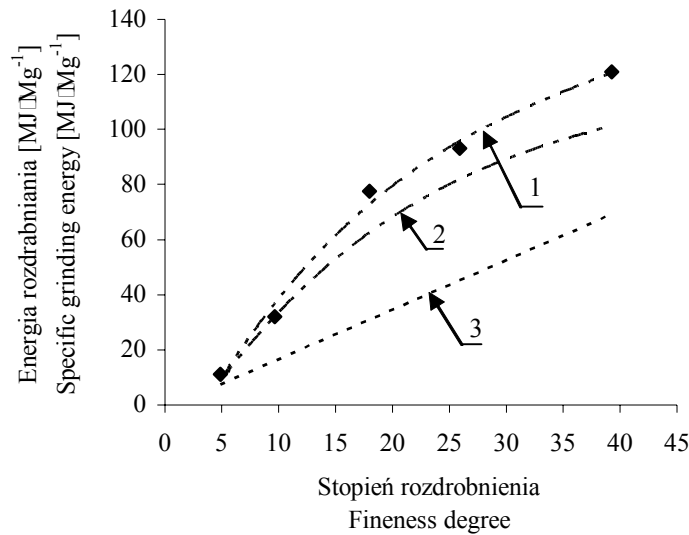
Występujące mniejsze przyrosty wartości energii, przy wyższym stopniu rozdrobnienia (w zakresie od około 20 do 43), należy tłumaczyć tym, że pod wpływem pierwszych uderzeń listwy rozdrabniacza rdzeń rozpada się na cząstki o mniejszych wymiarach. Dalszy proces rozdrabniania przebiega wewnątrz powstałej po uderzeniu grupy cząstek aż do uzyskania odpowiedniego stopnia ich rozdrobnienia. Można więc przypuszczać, że wydatek energetyczny związany z dalszym podziałem cząstek jest mniejszy, z powodu osłabienia odporności na rozdrabnianie cząstek, w wyniku powstania w nich mikropęknięć, w początkowej fazie rozdrobnienia.



Rys. 16. Teoretyczne i doświadczalne zależności energii rozdrabniania od stopnia rozdrabniania rdzeni kolb o wilgotności $16\pm 1\%$ dla mieszańca KLG 2210. 1 – wyniki eksperymentu; 2 – obliczone według opracowanego równania (29); 3 – obliczone według równania (28)

Fig. 16. Theoretical and experimental dependencies of specific grinding energy versus mean weighing fineness degree of corn cob pith at mean moisture content of $16\pm 1\%$ for KLG 2210 hybrid. 1 – experimental results; 2 – calculated by elaborated formula (29); 3 – calculated by formula (28)

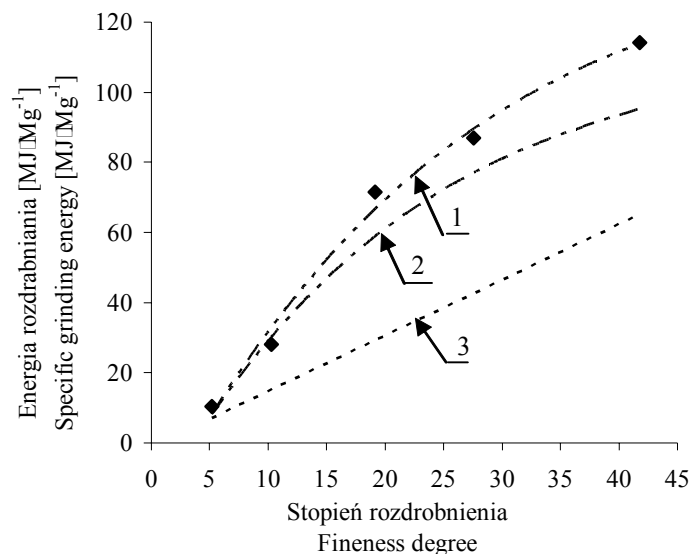
Występujące mniejsze przyrosty wartości energii (rys. 10–15 i 16–20), przy wyższym stopniu rozdrabniania (w zakresie od około 20 do 43), należy tłumaczyć tym, że w rozdrobnionej masie występuje duży udział procentowy cząstek klasy wymiarowej o najniższym zastępczym wymiarze 0,5 mm (wynosi on od 62,7% do 38%). Cząstka ta wpływa głównie na wielkość obliczanego według opracowanego równania (29) nakładu energii na rozdrabnianie rdzeni kolb, a powstała ona w wyniku rozdrabniania przebiegającego wewnątrz powstałej po pierwszym uderzeniu grupy cząstek. Przy mniejszym stopniu rozdrabniania w rozdrobnionej masie występuje większa liczba frakcji cząstek o dużym zróżnicowaniu ich wymiarów, czyli można przypuszczać, że wewnątrz grupy cząstek proces rozdrabniania przebiegał w mniejszym stopniu.



Rys.17. Teoretyczne i doświadczalne zależności energii rozdrabniania od stopnia rozdrobnienia rdzeni kolb o średniej wilgotności $24 \pm 1,5\%$ dla mieszańca KLG 2210. 1 – wyniki eksperymentu; 2 – obliczone według opracowanego równania (29); 3 – obliczone według równania (28)

Fig.17. Theoretical and experimental dependencies of specific grinding energy versus mean weighing fineness degree of corn cob pith at mean moisture content of $24 \pm 1,5\%$ for KLG 2210 hybrid. 1 – experimental results; 2 – calculated by elaborated formula (29); 3 – calculated by formula (28)

W miarę zwiększania się wymiarów otworów sita stosowanego w rozdrabniaczu, zróżnicowanie pomiędzy zastępczym wymiarem cząstek poszczególnych klas wymiarowych rozdrobnionej masy zwiększa się. Przy stosowaniu w rozdrabniaczu sita o wymiarach 55 mm, w rozdrobnionej masie występują cząstki klasy o zastępczym wymiarze od 20 mm do 2,5 mm. Można przypuszczać, że ten czynnik wpłynął na zachowanie proporcjonalności pomiędzy nakładami energii, a stopniem rozdrobnienia przy jego wartościach w zakresie od 5 do 20.



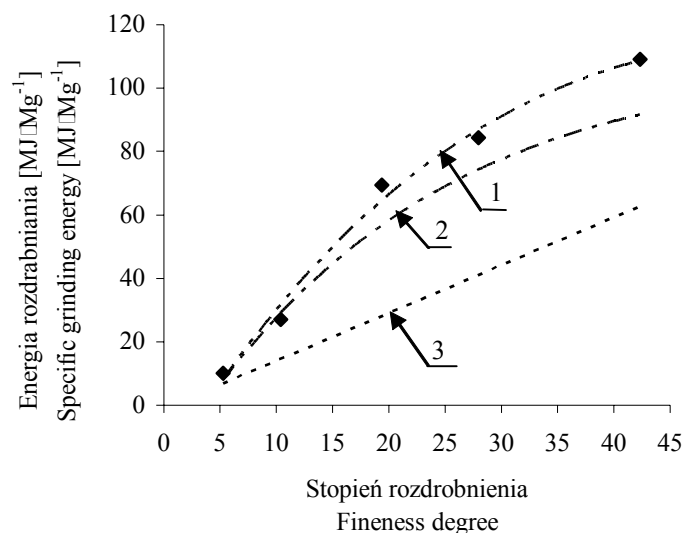
Rys. 18. Teoretyczne i doświadczalne zależności energii rozdrabniania od stopnia rozdrobnienia rdzeni kolb o wilgotności $42\pm 1\%$ dla mieszańca KLG 2210. 1 – wyniki eksperymentu; 2 – obliczone według opracowanego równania (29); 3 – obliczone według równania (28)

Fig. 18. Theoretical and experimental dependencies of specific grinding energy versus mean weighing fineness degree of corn cob pith at mean moisture content of $42\pm 1\%$ for KLG 2210 hybrid. 1 – experimental results; 2 – calculated by elaborated formula (29); 3 – calculated by formula (28)

Można również stwierdzić pewną zgodność uzyskanych wyników modelowych i eksperymentalnych z teorią Stadlera, według której stopień rozdrobnienia rośnie zgodnie z postępem geometrycznym, a energia rośnie w przybliżeniu według postępu arytmetycznego. Stadler poszukiwał matematycznego opisu procesu rozdrabniania, który tę właściwość procesu by ujmował, lecz zaproponowane równanie (7), jak wcześniej zauważono, nie znalazło szerszego potwierdzenia w praktyce. Należy w tym miejscu podkreślić, że tę właściwość procesu rozdrabniania wykazuje zaproponowany model matematyczny (równanie (29)) obliczania energii rozdrabniania na podstawie parametrów składu granulometrycznego cząstek w rozdrobnionej masie.

Na rysunku 15 przedstawiono wyniki weryfikacji zmian wartości energii rozdrabniania rdzeni kolb mieszańca KOSMO, a na rysunku 21 mieszańca KLG 2210.

Największe różnice pomiędzy wartościami teoretycznymi i eksperymentalnymi energii rozdrabniania rdzeni badanych mieszańców obserwuje się przy wyższym stopniu ich rozdrobnienia, uzyskanym przy zastosowaniu w rozdrabniaczu sita o wymiarach oczek: 3 i 5 mm. W tym przypadku maksymalny błąd względny mieścił się w granicach do 20% wartości rzeczywistej (rys. 15 i 21).

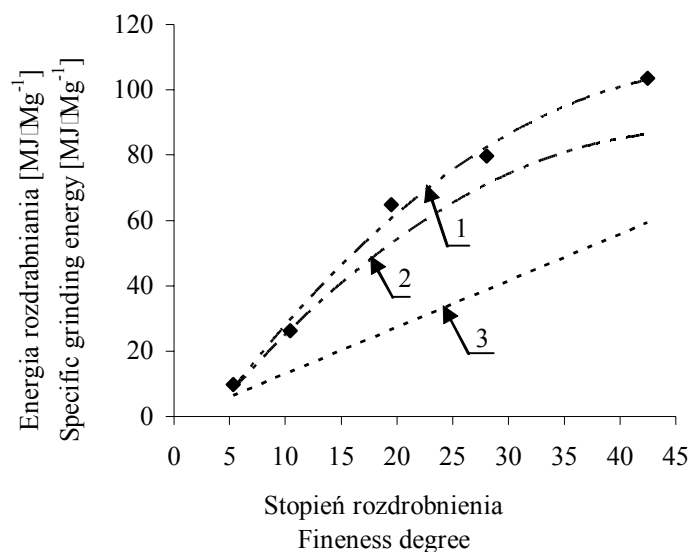


Rys.19. Teoretyczne i doświadczalne zależności energii rozdrabniania od stopnia rozdrabniania rdzeni kolb o średniej wilgotności $50\pm 1\%$ dla mieszańca KLG 2210. 1 – wyniki eksperymentu; 2 – obliczone według równania (29); 3 – obliczone według równania (28)

Fig.19. Theoretical and experimental dependencies of specific grinding energy versus mean weighing fineness degree of corn cob pith at mean moisture content of $50\pm 1\%$ for KLG 2210 hybrid. 1 – experimental results; 2 – calculated by elaborate formula (29); 3 – calculated by formula (28)

W miarę zmniejszania się stopnia rozdrabniania, przez stosowanie w rozdrabniaczu sit o większych wymiarach ich otworów, różnice pomiędzy wartościami teoretycznymi i eksperymentalnymi energii rozdrabniania zmniejszyły się. Przy najmniejszym stopniu ich rozdrabniania (około 5) maksymalny błąd względny mieścił się w granicach do 10% wartości rzeczywistej.

Przeprowadzona analiza upoważnia do stwierdzenia, że opracowany model matematyczny (równanie (29)) tym lepiej opisuje nakłady energii rozdrabniania rdzeni kolb, im mniejszy jest stopień ich rozdrabniania. Porównanie wartości nakładów energii na rozdrabnianie rdzeni kolb kukurydzy uzyskanych z obliczeń symulacyjnych oraz uzyskanych z badań eksperymentalnych wskazuje ich dobrą zgodność (rys. 10–14 i 15–20).



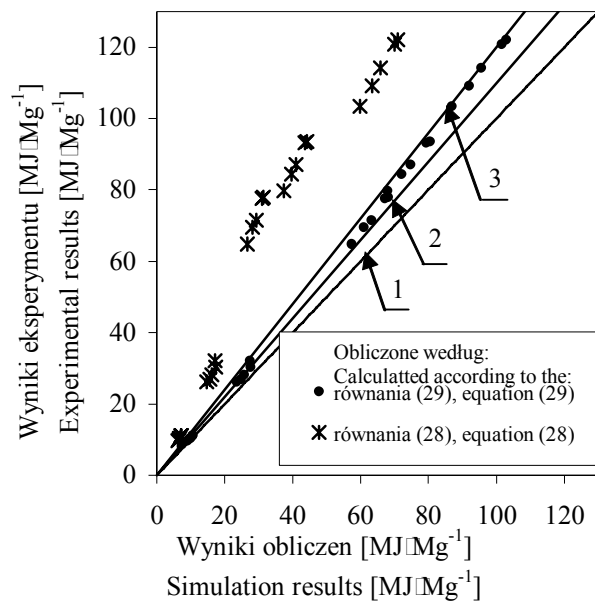
Rys. 20. Teoretyczne i doświadczalne zależności energii rozdrabniania od stopnia rozdrabniania rdzeni kolb o średniej wilgotności $57 \pm 1,5\%$ dla mieszańca KLG 2210. 1 – wyniki eksperymentu; 2 – obliczone według równania (29); 3 – obliczone według równania (28)

Fig. 20. Theoretical and experimental dependencies of specific grinding energy versus mean weighing fineness degree of corn cob pith for mean moisture content of $57 \pm 1,5\%$ for KLG 2210 hybrid. 1 – experimental results; 2 – calculated by elaborated formula (29); 3 – calculated by formula (28)

Z wystarczającą dokładnością (do 20%) równanie (29) opisuje jeden z najistotniejszych problemów procesu rozdrabniania. Jest nim zagadnienie energii potrzebnej do rozdrabniania materiału roślinnego, jakim jest rdzeń kolby kukurydzy, do żądanej wielkości stopnia jego rozdrabniania.

Wyniki przedstawione powyżej pozwalają stwierdzić przydatność sformułowanego modelu (równanie (29)) do przewidywania wartości nakładów energii na rozdrabnianie surowca roślinnego do założonego stopnia jego rozdrabniania.

Dobra zgodność wyników teoretycznych z eksperymentalnymi pozwala pozytywnie ocenić możliwość określania nakładów energii na rozdrabnianie na podstawie właściwości fizycznych materiału roślinnego, w celu osiągnięcia żądanego stopnia jego rozdrabniania.



Rys. 21. Wynik weryfikacji zmian energii rozdrabniania, obliczonej w oparciu o opracowany model matematyczny (równanie (28) i (29)). Rdzenie kolby kukurydzy mieszańca KLG 2210 o wilgotności w zakresie 15,5–58,5%. 1 - prosta korelacji; 2 – przedział błędu +10% wyników symulacji względem eksperymentu; 3 – przedział błędu +20% wyników symulacji względem eksperymentu

Fig. 21. Results of verification of average change in specific grinding energy, calculated on the basis of mathematical model (equations (28) and (29)). The corn cob pith KLG 2210 hybrid with mean moisture content of 15,5–58,5%. 1 – correlation curve; 2 – +10% deviation range of theoretical and experimental results; 3 – +20% deviation range of theoretical and experimental results

Należy również zauważyć, że jeżeli w technologii produkcji ziarna siewnego lub paszowego problemem jest energochłonność rozdrabniania samych rdzeni kolb kukurydzy, to w technologii produkcji pasz z kolb rozdrabniamy dwa ich składniki, to znaczy ziarno i rdzeń.

Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych dotyczących nakładów energii niezbędnej do rozdrabniania rdzeni kolb kukurydzy umożliwiają również porównanie jej wielkości z energochłonnością rozdrabniania ziarna i rdzeni kolby kukurydzy.

Z badań przeprowadzonych przez Opielaka (1996), a dotyczących nakładów energii na rozdrabnianie ziarna kukurydzy wynika, że na rozdrabnienie 1 tony ziarna kukurydzy w rozdrabniaczu bijakowym, przy wymiarach otworów sita wynoszących 3 oraz 4 mm nakłady energii wynoszą odpowiednio 60,65 i 23,43 MJ·Mg⁻¹. Z badań przeprowadzonych przez Zawisłaka (1997) wynika, że nakłady energii na rozdrabnienie 1 tony ziarna kukurydzy, przy otworach sita rozdrabniacza bijakowego o wymiarach 5, 7 i 10 mm, wynoszą odpowiednio 24, 8, 19,7, 18,9 MJ·Mg⁻¹.

Natomiast nakłady energii na rozdrobienie 1 tony rdzeni kolb mieszańca KOSMO w rozdrabniaczu bijakowym dla wymiaru otworu jego sita wynoszącym 3, 5, 7 i 10 mm wynoszą odpowiednio 290, 223, 186 i 71 MJ·Mg⁻¹ a mieszańca KLG 2210 odpowiednio 122, 93, 78 i 30 MJ·Mg⁻¹.

Na podstawie przedstawionych powyżej wyników można stwierdzić, że nakłady energii na rozdrabnianie rdzeni kolb mogą być blisko dziesięciokrotnie wyższe niż na rozdrabnianie ziarna. Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych nakładów energii na rozdrabnianie rdzeni kolb kukurydzy, potwierdziły przypuszczenie o istotnie wyższych nakładach energii na rozdrabnianie rdzeni niż ziarna kukurydzy.

Dlatego też można stwierdzić, że nakłady energii niezbędne do rozdrobnienia rdzeni kolb istotnie będą wpływały na energochłonność produkcji pasz z kukurydzy.

5. PODSUMOWANIE

W pracy przyjęto za cel opis matematyczny jednego z najistotniejszych problemów procesu udarowego rozdrabniania jakim jest energochłonność rozdrobnienia surowca roślinnego do żądanej wielkości stopnia jego rozdrobnienia. Przewidywanie energii rozdrabniania surowca roślinnego jest podstawą racjonalnego projektowania i właściwego doboru maszyn rozdrabniających, jak również optymalizacji technologii produkcji pasz z surowca roślinnego.

Przeprowadzono analizę teorii opisujących skomplikowany problem, jaki stanowi energochłonność procesu rozdrabniania surowca roślinnego. W oparciu o teorię rozdrabniania zaproponowano do opisu procesu udarowego rozdrabniania surowca roślinnego modele matematyczne określania energii rozdrabniania jednostki masy rdzeni kolb kukurydzy w zależności od: właściwości fizycznych rdzenia kolby (z uwzględnieniem możliwej ich zmienności w obrębie rdzenia), współczynnika przyrostu powierzchni po jednorazowym skruszeniu i średniego ważonego stopnia rozdrobnienia lub też parametrów składu granulometrycznego cząstek w rozdrobnionej masie.

Wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych wykazały, że zaproponowany model matematyczny obliczania energii rozdrabniania na podstawie parametrów składu granulometrycznego cząstek w rozdrobnionej masie, opisuje dokładniej jej wielkość, niż jak dokonywano tego dotychczas na podstawie stopnia rozdrobnienia, według równania Bracha.

Porównując przebiegi symulacyjne z eksperymentalnymi stwierdzono dobrą zgodność modelu matematycznego (uwzględniającego parametry składu cząstek w rozdrobnionej masie) z wynikami doświadczeń zarówno, jeżeli chodzi o różnicę bezwzględnych wartości wielkości energii rozdrabniania, jak i o charakter przebiegu poszczególnych krzywych.

Najistotniejszym spostrzeżeniem dotyczącym przebiegu zmian wartości energii rozdrabniania w zależności od średniego ważonego stopnia rozdrobnienia jest stwierdzenie wyraźnego zróżnicowania przyrostu energii w przedziale niższych wartości stopnia rozdrobnienia i wyższych. Potwierdzają to wyniki wszystkich przeprowadzonych symulacji i eksperymentów.

Charakterystyczne jest to, że dla wszystkich określonych zależności nakładów energii od stopnia rozdrobnienia, krzywe doświadczalne układają się powyżej krzywych symulacyjnych. Powyższe stwierdzenie prowadzi do wniosku, że proponowany model matematyczny, w przebadanym zakresie stopnia rozdrobnienia, daje zaniżone wartości symulacyjne nakładów energii na rozdrabnianie, w stosunku do wartości eksperymentalnych.

Występujące rozbieżności należy tłumaczyć tym, że podczas procesu rozdrabniania w rozdrabniaczu udarowym występują dodatkowo nakłady energii, które nie są związa-

ne z procesem podziału rdzeni. Wiązą się one z przemieszczaniem się cząstek wewnątrz komory rozdrabniania, tarciami pomiędzy cząstkami i tarciami cząstek o elementy robocze rozdrabniacza. Objawia się to głównie w postaci energii cieplnej rozpraszanej do otoczenia i podnoszącej temperaturę rozdrobnionej masy. Im stopień rozdrobnienia jest wyższy, tym czas przebywania rdzeni w komorze rozdrabniania jest dłuższy, co przypuszczalnie wpływa na mniejszą zgodność wyników obliczeń symulacyjnych z eksperymentalnymi.

Maksymalny błąd względny mieścił się jednak w granicach do 20% wartości rzeczywistej, dlatego zgodność modelu z doświadczalną weryfikacją, można uznać za całkowicie zadowalającą.

Osobnym zagadnieniem są przeprowadzone badania właściwości fizycznych rdzeni kolb kukurydzy. Na podstawie wyników badań przedstawionych w niniejszej pracy, można stwierdzić, że dotychczas w dostępnej literaturze nie poddawano analizie zmian wartości cech fizycznych rdzenia kolby kukurydzy dla tak szerokiego zakresu wilgotności. Przyjęty w pracy zakres zmian wilgotności rdzenia obejmuje zarówno wilgotność występującą w procesie zbioru, jak i w pozbiorowej obróbce kukurydzy. Wartość cech fizycznych określono w odstępach kilku procent wilgotności rdzenia, pobierając rdzenie do badań w miarę obniżania się ich wilgotności w trakcie dojrzewania rośliny. Pozwala to na wprowadzenie pojęcia okresowej wartości parametru fizycznego rdzenia i ustalenie jego wartości dla rdzenia w dowolnej fazie dojrzałości rośliny na podstawie równań matematycznych.

Można zatem stwierdzić, że aby obiektywnie scharakteryzować właściwości rdzenia kolby, należy określić wartości jego cech fizycznych w szerokim zakresie wilgotności. Właśnie w taki sposób ujęto to w niniejszej pracy. Takie ujęcie tematu potwierdza trafność przyjętej metodyki badań oraz przedstawionej hipotezy o zmienności właściwości rdzenia wraz z obniżaniem się jego wilgotności w trakcie dojrzewania rośliny.

Przedstawione wyniki badań dotyczące różnicy wartości parametrów mechanicznych rdzenia pomiędzy mieszaniami upoważniają do wnioskowania, że właściwości mechaniczne są cechą odmianową kukurydzy. Wskazuje to na konieczność poszukiwania optymalnych właściwości fizycznych rdzenia kolby w pracach hodowlanych, zmierzających do uzyskania mieszańca kukurydzy z rdzeniem o najbardziej korzystnych jego właściwościach. Ma to na celu minimalizację nakładów energii w procesie rozdrabniania, jak również polepszenia parametrów pracy maszyn rozdrabniających. Wyższe wartości parametrów mechanicznych rdzenia mieszańca KOSMO niż KLG 2210 spowodowały, że charakteryzował się on wyższymi nakładami energii niezbędnej do rozdrobnienia rdzeni.

6. WNIOSKI

1. Opracowany model matematyczny (równanie (29)) opisuje z zadowalającą dokładnością związek pomiędzy energią rozdrabniania jednostki masy surowca roślinnego, jakim jest rdzeń kolby kukurydzy a: jego właściwościami fizycznymi, parametrami składu granulometrycznego cząstek w rozdrobnionej masie i średnim ważonym stopniem rozdrobnienia. Potwierdza to dobra zgodność (do 20%) wyników symulacyjnych, uzyskanych na podstawie zaproponowanego modelu, z wynikami eksperymentów weryfikacyjnych.

2. Zaproponowany model matematyczny (równanie (29)) określania energii rozdrabniania rdzeni kolb, na podstawie składu granulometrycznego cząstek w rozdrobnionej masie, dokładniej opisuje jednostkowy nakład energii na rozdrabnianie niż na podstawie średniego ważonego stopnia rozdrobnienia (równanie (28)), zgodnie z równaniem proponowanym przez Bracha.

3. W procesie dojrzewania rośliny i obniżania się wilgotności rdzenia, można prognozować, zgodnie z wynikami symulacji i eksperymentu, że wpływ właściwości fizycznych rdzenia na wielkość nakładów energii na rozdrabnianie będzie wzrastał w miarę zmniejszania się wilgotności rdzeni i średniego ważonego stopnia ich rozdrobnienia.

4. Możliwości zmniejszenia energochłonności produkcji pasz z kukurydzy należy upatrywać przede wszystkim w poprawie właściwości fizycznych rdzenia, wpływających na wielkość energii rozdrabniania. Stosując opracowany model matematyczny i metodykę badań właściwości fizycznych rdzenia, można prognozować nakłady energii na rozdrabnianie rdzeni nowo hodowanych mieszańców kukurydzy.

5. Obliczenia symulacyjne dokonane według równania (29), a potwierdzone przez wyniki przeprowadzonych doświadczeń, wykazały zróżnicowaną intensywność narastania energii rozdrabniania rdzeni kolb w miarę wzrostu średniego ważonego stopnia ich rozdrobnienia. Wyższe przyrosty wartości energii rozdrabniania stwierdzono przy niższym stopniu rozdrobnienia oraz niższe przy wyższym.

6. Opracowane modele matematyczne energii rozdrabniania mogą stanowić podstawę do dalszych badań związanych z procesem rozdrabniania innych materiałów pochodzenia roślinnego.

7. PIŚMIENNICTWO

- Ajayi O. A., Clarke B., 1997. High Velocity Impact of Maize Kernels. *J. Agric. Engeng Res.*, 67, 97–104.
- Anazodo U.G.N. Noris E. R., 1981. Effects of Genetic and Cultural Practices on the Mechanical Properties of Corn Cobs. *Transactions of the ASAE*, pp. 97–107.
- Anazodo U.G.N., 1983. Mechanical Properties of the Corn Cob Under Quasi-Static Radial Compression. *Transactions of the ASAE*, pp. 1222–1229.
- Anazodo U.G.N., Chikwendu S. C., 1983. Poisson's Ratio and Elastic Modulus of Radially Compressed Biomaterials – I: Small Deformation Approximation. *Transactions of the ASAE*, pp. 923–927.
- Anazodo U.G.N., 1984. Poisson's Ratio and Elastic Modulus of Radially Compressed Biomaterials-II: Large Deformation Approximation. *Transactions of the ASAE*, pp. 1563–1571.
- Andrejko D., Lysiak G., Panasiewicz M., Rydzak L., 1997. Energochłonność procesu rozdrabniania nasion łubinu. *Biuletyn Inform. Przem. Pasz.* nr 4, 5–6.
- Austin L. G., 1973. A commentary on the Kick, Bond and Rittinger laws of grinding. *Powder Technology*, nb. 7.
- Baumgart S., 1973. Zum Vergleich Zerkleinerungsergebnissen der Einzelkorn-zerkleinerung bei verschiedenen Beanspruchungsarten. *Powder Technology* nr 8, 107–115.
- Bieliński M., 1993. Systematyka rozwiązań konstrukcyjnych rozdrabniaczy według właściwości rozdrabnianych materiałów. *Mat. konf. III ICCE'93 Internacionale Conference on Crumblers Enginneering*, Bydgoszcz, 144–153.
- Bogdanowicz J., Bieniek J., Molendowski F., Mosz J., Szewczyk A., 1984. Badania technologii zbioru i konserwacji kolb kukurydzy z przeznaczeniem na pasze. Ocena ekonomiczna, energetyczna i żywieniowa produkcji suszu i kiszonki z kolb kukurydzy. *Wydawnictwa IBMER Warszawa*, 186 s.
- Bond F. C., 1962. *Crushing and grinding calculation Allis-Chalmers*. *British Chemical Engineering*.
- Brach I., 1962. O teoriach rozdrabniania minerałów. *Przegląd Mechaniczny* nr 14, 421–426.
- Brach I., 1963. *Podstawowe problemy w procesach rozdrabniania minerałów*. Ośrodek Wydawniczy Warszawa, IOMB.
- Brach I., 1965. Hipoteza wielokrotności pracy kruszenia w procesach rozdrabniania ciał kruchych i jej dalsze rozwinięcia. *Przegląd Mechaniczny* nr 3, 65–69.
- Brach I., 1966. Zastosowanie kruszarek walcowych jako młynów. *Przegląd Mechaniczny* nr 16, 65–69.

- Brach I., 1968. Praca rozdrabniania ciał kruchych. *Przegląd Mechaniczny* nr 15, 429–434
- Bruździak M., 1988. Dynamika narastania masy i gromadzenia składników pokarmowych w częściach nadziemnych roślin oraz wpływ niektórych czynników agrotechnicznych na plonowanie kukurydzy. Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu. Rozprawy habil. nr 70, s. 57.
- Bzowska-Bakalarz M., 1994. Właściwości mechaniczne korzeni buraków cukrowych. Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Lublinie. Rozprawy habil. nr 166.
- Chwiej M., 1986a. Opracowanie analityczne elementów roboczych rozdrabniarki bijakowej w aspekcie wydajności i zużycia energii. *Rocz. Nauk Rol.*, T.76, z.3, Warszawa.
- Chwiej M., 1986b. Próba doboru podstawowych wielkości konstrukcyjnych rozdrabniarki bijakowej w aspekcie wydajności i zużycia energii. *Rocz. Nauk. Rol. PAN*, t. 76 z.3 Warszawa.
- Daccord R., Arigo Y., Vogel R., 1995. Nahrwert von Maissilage. *Agrar Forschung* 9, 397–400.
- Dmitrewski I., 1978. Teoria i konstrukcja maszyn rolniczych. PWRiL, Warszawa.
- Dubas A., Michalski T., 1991. Wpływ rozdrobnienia roślin kukurydzy zbieranej w różnych fazach dojrzałości na cechy ilościowe i jakościowe kiszonki. Cz. I. Plony i jakość surowca. PTPN, Prace Kom. Nauk Rol. i Nauk Leśnych. T. LXXI, 11–19.
- Dziki D., Laskowski J., 2003. Wpływ cech geometrycznych ziarna pszenicy na właściwości mechaniczne i podatność na rozdrabnianie. *Acta Agrophysica*, 2(4), 735–742.
- Flizikowski J., 1990. Badania i podstawy konstrukcyjne wielotarczowych rozdrabniaczy nasion. Rozprawy ART. Bydgoszcz.
- Flizikowski J., Kwidzyński M., Zalewski W., 1992. Dobór cech konstrukcyjnych wielotarczowych rozdrabniaczy materiałów ziarnistych. *Mat. Konf. Maszyny w procesach rozdrabniania materiałów rolno-spożywczych. ATR Bydgoszcz*, 140–145.
- Frontczak J., Bieniek J., 1985. Wyznaczanie wytrzymałości na zginanie łodyg kukurydzy oraz określanie wielkości sił wiązania kolb z łodygą i okryw liściowych z kolbą. *Zesz. Nauk. AR Wrocław, Rol. XLIII* nr 156, 52–71.
- Frontczak J., Bieniek J., 1987a. Badanie sił wiążących ziarno kukurydzy z rdzeniem kolbowym. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. Z.* 316, Warszawa, 25–35.
- Frontczak J., Bieniek J., 1987b. Określenie cech geometrycznych ziarna i kolb wybranych mieszańców kukurydzy. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. Z.* 320, 71–79.
- Frontczak J., Molendowski F., 1987. Badania siły i pracy cięcia przy statycznym cięciu łodyg kukurydzy mieszańca BEKO-210. *Mat. Konf. Agromech '87 Nitra*, 139–143.
- Frontczak J., 1987. Metody określania i analiza cech fizycznych ziarna kukurydzy. Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, (praca habilitacyjna).
- Frontczak J., Bieniek J., 1988. Badanie podatności na odziarnianie mieszańców kukurydzy Kb-270 i Beko-210 metodą uderzenia listwą cepową o kolbę. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. Z.* 351, 107–113.

- Frontczak J., Molendowski F., 1990. Badanie sił i pracy przy przecinaniu kolb kukurydzy. Zesz. Nauk. AR Wroc., Mechanizacja Rolnictwa I, nr 183, 31–35.
- Golec S., Zawiślak K., 1980. Badania nad wpływem wilgotności surowców zbożowych na skład granulometryczny śruty otrzymanej w wyniku rozdrabniania. Biuletyn Inform. Przem. Pasz. nr 4, 7–9.
- Golec S., Kwiatkowski M., 1982. Badania nad wpływem wilgotności surowców zbożowych na wydajność i energochłonność procesu rozdrabniania. Biul. Inform. Przem. Pasz. nr 1–2, 32–39.
- Golec S., Kwiatkowski M., Zawiślak K., 1983. Wpływ dwustopniowego rozdrabniania na energochłonność procesu i jakość otrzymywanych śrut. Biuletyn Inform. Przem. Pasz. nr 1, 28–38.
- Grochowicz J., Laskowski J., Czapki A., Sroka K., 1977. Wpływ niektórych parametrów konstrukcyjnych na proces roboczy rozdrabniaczy bijakowych. Przegląd Zbożowo-Młynarski, nr 7, 7–9.
- Grochowicz J., Laskowski J., 1978. Analiza czynników wpływających na parametry pracy rozdrabniaczy bijakowych. Biul. Inform. Przem. Pasz. nr 1, 4–6.
- Grochowicz J., 1980. Wpływ niektórych czynników na proces rozdrabniania surowców rozdrabniaczami bijakowymi. Zesz. Probl. Post. Nauk. Rol. nr 225, 209–217.
- Grochowicz J., 1993. Analiza możliwości ograniczenia zużycia energii w zakładach przemysłu paszowego. Biul. Inf. Przem. Pasz. nr 4, 55–61.
- Grochowicz J., Nadulski R., Bilanski W., 1994. Influence of some mechanical properties of seed on energy requirement for their comminution. *Int. Agrophysics*, vol. 8, no 2, 231–234.
- Grochowicz J., 1996. *Technologia produkcji mieszanek paszowych*. PWRiL, Warszawa.
- Gross F., 1970. Einfluss des Erntezeitpunktes auf den Futterwert von Maisgarfutter. Mais eine Pflanze mit Zukunft. *Das Wirtschaftseigene Futter* 4: 306–336.
- Grzelak E., 1965. Nowy wzór na obliczanie mocy maszyn rozdrabniających. *Przegląd Mechaniczny* nr 14, 420–423.
- Grzelak E., 1967. Wpływ kształtu bryły i sposobu zgniatania na stopień rozdrobnienia i pracę jednostkową. *Przegląd Mechaniczny* nr 2, 34–37.
- Hague E., 1991. Application of size reduction theory to roller mill design and operation. *Cereal Foods World*, 40 (1), 30–31.
- Janiak G., Laskowski J., 1993. Właściwości wytrzymałościowe ziaren pszenicy w aspekcie procesu rozdrabniania. *Mat. Konf. III ICCE 93 International Conference on Crumbles Engineering*, Bydgoszcz, s. 120–126.
- Laskowski J., Łysiak G., 1997a. Relationships Between Resistance Characteristics of Barley Kernels and Energy Consumption During Grinding on Hammer Mill. *International Agrophysics* vol. 11, 265–271.
- Laskowski J., Łysiak G., 1997b. Badania właściwości wytrzymałościowych oraz procesu rozdrabniania nasion roślin strączkowych. *Problemy Techniki Rolniczej i Leśnej. IV Międzynarodowa Konferencja Naukowa. SGGW, Warszawa*, 206–171.
- Lowrison G.C., 1979. *Crushing and grinding*. Butterworths. London-Boston.
- Łysiak G., 1998. Wpływ właściwości fizycznych surowców roślinnych na przebieg procesu rozdrabniania. *Wydawnictwa AR Lublin*.

- Łysiak G., Laskowski J., 1999. Analiza energochłonności rozdrabniania ziarna zbóż i nasion roślin strąkowych. *Inżynieria Rolnicza* nr 5, 187–193.
- Łysiak G., Laskowski J., 2003. Wpływ prędkości bijaków na energochłonność rozdrabniania nasion bobiku. *Acta Agrophysica*, 2(4), 815–821.
- Michalski T., 1979. Metody oceny plonu kukurydzy oraz jego wartości pokarmowej. *Biuletyn IHAR* 136: 111–123.
- Michalski T., 1980. Wpływ obsady roślin, wczesności odmian oraz terminu zbioru na plony i wartość pastewną kukurydzy kiszonkowej. *Rocz. AR w Poznaniu. Rozprawy nauk.* 104.
- Michalski T., 1987. Wpływ wysokości cięcia przy zbiorze na plony i wartość pastewną kiszonki z kukurydzy. *Rocz. AR Poznań, CLXXXVI*: 62–73.
- Michalski T., 1988. Plony i wartość pastewna kukurydzy zbieranej na kiszonkę w późnych stadiach dojrzałości. *PTPN, Prace Kom. Nauk Rol. i Nauk Leśnych.* t. LXV, 149–158.
- Michalski T., 1990. Wpływ stopnia dojrzałości i struktury kolb kukurydzy na plony i jakość uzyskanej z nich kiszonki. *Rocz. AR w Poznaniu, Rozpr. nauk.* nr 94.
- Michalski T., 1997. Wartość pastewna plonów kukurydzy w zależności od sposobów i terminów zbiorów. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* nr 450, 117–133.
- Milewski G., 2004. Kukurydziany bum nie słabnie. *Agro Serwis* nr 4, 6–7.
- Mielnikow S.W., 1967. Osnowanija dla projektowania mołotkowych drobiłok. *Maszinstrojenije-Mechanika.* Moskwa.
- Molendowski F., Bieniek J., 1995. Badania technologii produkcji pasz w formie rozdrobnionych kolb kukurydzy z zastosowaniem kombajnu BIZON Z-058. *Zesz. Nauk. AR Wroc., Mech. Rol. II.*, 55–62.
- Molendowski F. 1996. Ocena zmienności cech geometrycznych rdzeni kolb i kolb kukurydzy wybranych mieszańców. *Zesz. Nauk. AR Wroc., Mech. Rol. IV,* nr 302, 169–173.
- Molendowski F., 1998. Ocena zmienności sił i naprężeń cięcia rdzeni kolb kukurydzy. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* nr 454, 243–248.
- Molendowski F., 1999. Ocena istotności zmian wartości naprężenia niszczącego próbki rdzenia kolby kukurydzy w próbie promieniowego ściskania. *Inżynieria Rolnicza*, nr 5, 191–198.
- Molendowski F., 2001. Ocena zmienności jednostkowego oporu cięcia rdzeni kolb kukurydzy. *Inżynieria Rolnicza* nr 12, 219–224.
- Mosz J., Bieniek J., 1982. Ocena pracy nowoczesnych linii technologicznych do pozbiorowej obróbki kolb kukurydzy. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* nr 298, Warszawa, 85–91.
- Mosz J., Bieniek J., 1983. Technologia i technika zbioru oraz pozbiorowej obróbki kukurydzy nasiennej. *Post. Nauk Rol.*, nr 3, 65–82.
- Mosz J., Bieniek J., 1986. Badania nad określeniem wielkości siły wiązania ziarna z rdzeniem kolbowym kukurydzy. *Rocz. Nauk Rol. T 77-C-1,* Warszawa, 61–69.
- Mosz J., 1986. Określenie wytrzymałości rośliny kukurydzy na łamanie. Wielkość siły wiązania kolby z rośliną i okryw liściowych z kolbą. *Roczniki Nauk Rolniczych.* tom 77, seria C, 175–179.

- Mosz J., 1987. Zastosowanie metody udarowej do oceny podatności na odziarnianie różnych mieszańców kukurydzy. Zesz. Nauk. AR Wroc., nr 133, 134–137.
- Korpysz K., 1992. Wpływ parametrów roboczych gniotownika na energochłonność jednostkową procesu rozdrabniania jęczmienia. Mat. Konf. Maszyny w procesach rozdrabniania materiałów rolno-spożywczych. ATR Bydgoszcz, 48–53.
- Opielak M., 1984. Badanie wpływu elementu rozdrabniającego na energochłonność procesu rozdrabniania. II Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techn. Budowa i Eksploatacja Maszyn Przemysłu Spożywczego, Lublin, 153–154.
- Opielak M., 1990. Badanie wpływu kształtu elementu rozdrabniającego na jakość i energochłonność procesu rozdrabniania. V Konf. Naukowo-Techn. Budowa i eksploatacja maszyn w przemyśle spożywczym, 198–199.
- Opielak M., 1993. Badanie zależności energochłonności od wilgotności materiału i wielkości szczeliny roboczej w młynku żarnowym. Mat. Konf. Budowa i eksploatacja w przemyśle spożywczym, 551–558.
- Opielak M., 1995. Rozdrabnianie materiałów w przemyśle rolno-spożywczym. Badanie zależności pomiędzy parametrami procesu. Wydawnictwa Politechniki Lubelskiej.
- Opielak M., Komsta H., 2001. Badanie wpływu wilgotności ziarna pszenicy na wydajność rozdrabniacza żarnowego i stopień rozdrobnienia materiału. Inżynieria Rolnicza nr 9, 187–192.
- Podkówa W., 1981. Kukurydza w żywieniu zwierząt. WOPR Zarzeczewo, 57.
- Podkówa W., 1983. Wartość pokarmowa kolb kukurydzianych. Międzyn. Czasop. Rol. 6, 69–74.
- Prasher C.L., 1987. *Crushing and Grinding. Process Handbook*. London.
- Romański L. 1998. Wpływ konstrukcji gniotownika na efekty jego pracy. Zesz. Probl. Post. Nauk. Rol. Z 454, 371–377
- Romański L., 1999. Badania rozdrabniaczy dwuwalcowych w aspekcie zużycia energii i zawartości frakcji pylistej w śrucie. Inż. Rol. nr 5, 361–365.
- Romański L., Niemiec A., 2000. Badanie wpływu wilgotności ziarna wybranych gatunków zbóż na energię rozdrabniania w gniotowniku modelowym. Inż. Rol. nr 9, 255–259.
- Seghal S. M., Brown W. L., 1965. Cob morphology and its relation to combine harvesting in maize. *Iowa State Journal of Science* 39(3).
- Sokołowski M., 1977. O hipotezie wielokrotności pracy kruszenia nieco inaczej. *Mechanizacja Budownictwa* nr 9, 19–23.
- Sokołowski M., 1979. Energetycznie równoważne ziarno w procesie rozdrabniania minerałów. *Mechanizacja Budownictwa* nr 1, 34–39.
- Sokołowski M., 1981. Sprawność energetyczna procesu rozdrabniania udarowego. *Wydawnictwa Instytutu Mechanizacji Budownictwa*, Warszawa.
- Sokołowski M., 1990. Energetyczny opis rozdrabniania. *Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego*, Warszawa.
- Szewczyk A., Molendowski F., 1985. Ocena maszyn stosowanych do zbioru i przygotowania kolb kukurydzy na paszę, Zesz. Nauk. AR Wroc., Rol. XLIII, nr 156, 146–153.

- Szewczyk A., Molendowski F., 1986. Produkcja pasz z kolb kukurydzy. *Mech. Rol.*, nr 2-3, 1986, 17-20.
- Szewczyk A. 1995. Ocena energochłonności produkcji CCM. *Problemy Inżynierii Rolniczej AR we Wrocławiu. Mech. Rol.* nr 4, 123-129.
- Wollf Th., Pahl M. H., 1990. Cold-Grinding of Spices in Impact Mills. 7th European Symposium on Comminution, 68-77.
- Zawiślak K. 1997. Technika rozdrabniania a wymagania jakościowe stawiane produktom. *Pasze Przemysłowe*, nr 6/7, 22-27.
- Vervoorn P. M.M., Hoeksman J. G., 1990. Particle Impact Testing. 7th European Symposium on Comminution, 195-210.

ENERGY CONSUMED IN THE DISINTEGRATION PROCESS OF RAW PLANT MATERIAL ON THE EXAMPLE OF CORN COB PITH

S u m m a r y

A mathematical description of the percussive disintegration process, connected with the energy consumed in the disintegration process of raw plant material to a required rate of fineness is presented.

The analysis of disintegration theory was conducted of which the most suitable proved to be Brach's theory. The theory was modified assuming that calculation of disintegration energy based on the degree of fineness had no justification. The magnitude of fineness can be calculated based on the parameters of granulometric composition of grain in disintegrated mass.

The mathematical models for describing the percussive disintegration process of plant materials are suggested. They were used to describe the disintegration energy of mass unit of corn cob pith depending on physical properties of corn, surface coefficient after a single corn cob crushing, mean weighed degree of fineness, and the parameters of grain composition in disintegrated mass.

The simulated and experimental results show that the proposed mathematical model for calculating the disintegration energy describes the energy consumed better than it has been done so far, according to Brach's theory.

The comparison of simulation and experimental curves shows that a mathematical model is in agreement with the experimental results, both in respect to the differences in absolute values for disintegration rate and the curves plotted.

The results of physical properties of corn cob pith are also presented in this research paper. The physical properties were specified at decreasing moisture content of corn cob pith, throughout maturation of the plants. This allowed me to introduce a concept of periodic value of corn cob pith physical parameter and its determination for the corn cob pith at different stages of plant maturity, using mathematical equations.

As has been found, the impact of physical properties of corn cob pith on energy consumed for grain disintegration, increased with the decreasing moisture content and weighted disintegration rate.