



**AKADEMIA GÓRNICZO - HUTNICZA  
im. Stanisława Staszica  
w KRAKOWIE**

**Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki**

**Katedra Systemów Wytwarzania**

**mgr inż. Michał Bembenek**

## **PRACA DOKTORSKA**

***Badania wpływu kształtu powierzchni roboczej  
walców na efekty pracy prasy walcowej***

**Promotor pracy:**

**dr hab. inż. Marek Hryniewicz, prof. AGH**

**KRAKÓW 2010**

Niniejszym, składam serdeczne  
podziękowania mojemu promotorowi,  
Panu dr. hab. inż. Markowi Hryniewiczowi, prof. AGH  
za niezmierną życzliwość, wyrozumiałość, poświęcony  
czas oraz cenne dyskusje, które pomogły  
mi w realizacji tej pracy.

## SPIS TREŚCI

<b>Wykaz ważniejszych oznaczeń.....</b>	<b>5</b>
<b>1. Wstęp.....</b>	<b>6</b>
<b>2. Stan wiedzy w zakresie scalania materiałów drobnoziarnistych w prasie walcowej i rozwoju jej konstrukcji .....</b>	<b>8</b>
2.1. Znaczenie, badania i doskonalenie procesu scalania materiałów drobnoziarnistych w prasie walcowej.....	8
2.2. Doskonalenie konstrukcji pras walcowych.....	17
2.3. Podstawowe kształty powierzchni roboczej elementów formujących.....	24
2.4. Wnioski wynikające z analizy literatury.....	27
2.5. Wybór materiałów do badań.....	28
<b>3. Cel i zakres pracy.....</b>	<b>31</b>
<b>4. Badania procesu brykietowania koncentratu miedzi w prasie walcowej.....</b>	<b>33</b>
4.1. Opis instalacji doświadczalnej.....	33
4.2. Metodyka badań.....	38
4.2.1. Charakterystyka materiałów użytych do badań.....	38
4.2.2. Przygotowanie materiału do brykietowania.....	39
4.2.3. Badanie wilgotności materiału.....	39
4.2.4. Przebieg procesu brykietowania.....	40
4.2.5. Pomiar poboru mocy prądu przez silnik układu napędowego prasy walcowej.....	41
4.2.6. Badanie wytrzymałości brykietów na zrzut.....	41
4.2.7. Badanie wytrzymałości brykietów na ściskanie.....	42
4.3. Badania eksperymentalne procesu brykietowania koncentratu miedzi w prasie walcowej z grawitacyjnym układem podawania materiału.....	42
4.3.1. Program badań eksperymentalnych.....	42
4.3.2. Wyniki badań eksperymentalnych.....	44
4.3.3. Wnioski.....	48
4.4. Badania eksperymentalne procesu brykietowania koncentratu miedzi w prasie walcowej z wymuszonym podawaniem materiału.....	48
4.4.1. Program badań eksperymentalnych.....	48
4.4.2. Wyniki badań eksperymentalnych.....	50
4.4.3. Wnioski.....	53
4.5. Badania symulacyjne wpływu objętości brykietów na wartość nacisku jednostkowego w procesie brykietowania koncentratu miedzi.....	54
4.5.1. Wprowadzenie.....	54
4.5.2. Program symulacji komputerowej procesu brykietowania w prasie walcowej.....	54
4.5.3. Wyznaczenie zmienności jednostkowego oporu zagęszczania.....	58
4.5.4. Określenie zmienności współczynnika tarcia zewnętrznego.....	61
4.5.5. Dobór geometrii powierzchni roboczej elementów formujących prasy.....	64
4.5.6. Wyniki badań symulacyjnych.....	65
4.5.7. Wnioski.....	71

<b>5. Badania procesu scalania wodorotlenku wapnia w prasie walcowej.....</b>	<b>72</b>
5.1. Wprowadzenie .....	72
5.2. Metodyka badań.....	72
5.2.1. Charakterystyka materiałów użytych do badań .....	72
5.2.2. Przygotowanie materiału do scalania.....	72
5.2.3. Przebieg procesu scalania .....	72
5.2.4. Badanie podatności scalonego materiału na granulowanie dwustopniowe .....	74
5.3. Badania eksperymentalne procesu brykietowania wodorotlenku wapnia w prasie walcowej .....	75
5.3.1. Program badań eksperymentalnych .....	75
5.3.2. Wyniki badań eksperymentalnych.....	76
5.3.3. Wnioski.....	89
5.4. Badania eksperymentalne procesu kawałkowania wodorotlenku wapnia w prasie walcowej .....	90
5.4.1. Program badań eksperymentalnych .....	90
5.4.2. Wyniki badań eksperymentalnych.....	92
5.4.3. Wnioski.....	103
<b>6. Metoda doboru elementów formujących prasy walcowej.....</b>	<b>105</b>
<b>Podsumowanie i wnioski końcowe.....</b>	<b>109</b>
<b>Spis literatury .....</b>	<b>112</b>
<b>Załączniki .....</b>	<b>121</b>

---

## Wykaz ważniejszych oznaczeń

$a$	– szerokość szczeliny między walcami w rzeczywistym układzie zagęszczania
$B$	– szerokość walców w rzeczywistym układzie zagęszczania
$e$	– szerokość szczeliny między walcami w zastępczym układzie zagęszczania
$e_o$	– dopuszczalny błąd szacunku średniej
$C, D, E, F, G, K$	– współczynniki równania regresji
$h$	– wysokość słupa materiału
$H_p$	– wysokość początkowa zagęszczanego materiału
$h_y$	– odległość między walcami na poziomie kąta $\alpha_y$
$K$	– wytrzymałość brykietów na zrzut
$M_{s(max)}$	– maksymalna wartość momentu skręcającego w trakcie rozruchu stanowiska pod obciążeniem
$M_{s(sr)}$	– średnia wartość momentu skręcającego w ruchu ustalonym pod obciążeniem
$N$	– wartość siły nacisku wywieranej na przeciwpróbkę
$p$	– nacisk jednostkowy wywierany na brykietowany materiał
$R$	– rzeczywisty promień walców
$R_o$	– promień walców w zastępczym układzie zagęszczania
$R_T$	– ramię siły tarcia
$s$	– stopień zagęszczenia
$t_y$	– jednostkowa siła tarcia
$V$	– objętość brykietu
$v_w$	– prędkość obwodowa walców
$w$	– wilgotność
$x$	– przemieszczenie stempla
$\alpha_o$	– kąt chwytu
$\alpha_y$	– kąt zagęszczenia
$\beta$	– kąt określający strefę rozprężania brykietów
$\beta_y$	– kąt rozprężenia brykietów
$\gamma_w$	– kąt określający początek strefy podawania materiału
$\varphi$	– kąt pochylenia linii śrubowej
$\vartheta$	– jednostkowy opór zagęszczania
$\mu_k$	– współczynnik kinetycznego tarcia zewnętrznego
$\mu_s$	– współczynnik statycznego tarcia zewnętrznego
$\sigma_y$	– średnie naprężenie normalne

---

## 1. Wstęp

Scalanie materiałów sypkich odgrywa ważną rolę w wielu gałęziach przemysłu. Biorąc pod uwagę sposób, w jaki materiał doprowadzany jest do postaci kawałkowej wyróżnia się: spiekanie, aglomerację ciśnieniową, aglomerację nawarstwiającą (grudkowanie) oraz granulację dwustopniową (w języku angielskim zwaną *dry granulation*) [7, 35, 38, 40, 41, 42, 47, 48, 50, 53, 74, 75, 91, 92, 112, 120, 136]. Spiekanie jest metodą termiczną zbrylania o małym stopniu skomplikowania. Niestety na ogół jest ono uciążliwe dla otoczenia, a w dodatku nie może być stosowane w przypadku niektórych materiałów m.in. paliw oraz takich, których prażenie powoduje niepożądaną zmianę składu chemicznego [112]. Grudkowanie natomiast wymaga dużego stopnia rozdrobnienia materiału, a także dodatkowo utrzymania jego wilgotności na stałym poziomie. Najczęściej odpowiednią wytrzymałość mechaniczną grudek uzyskuje się poprzez zastosowanie środka wiążącego [39, 92, 107, 112]. Niejednokrotnie wymagane jest także ich suszenie lub prażenie. Alternatywną metodą scalania materiałów sypkich nazwanych dalej materiałami drobnoziarnistymi jest aglomeracja ciśnieniowa. Polega ona na wywieraniu nacisku na materiał, wskutek czego następuje wzajemne zbliżanie ziaren oraz powstawanie, bądź wzmacnianie wiązań o różnym charakterze. Efektem procesu aglomeracji ciśnieniowej jest tworzenie zwartych kształtek o stosunkowo małej porowatości oraz określonej wytrzymałości mechanicznej, których wymiary mogą być nawet do kilku tysięcy razy większe w porównaniu z ziarnami materiału wyjściowego. Spośród znanych urządzeń używanych do realizacji procesu aglomeracji ciśnieniowej wyróżnia się: prasy stemplowe, ślimakowe, granulatory z rolkami zagęszczającymi oraz prasy walcowe. Trzy pierwsze typy maszyn stosowane są z powodzeniem do brykietowania materiałów pochodzenia roślinnego, które trudno scala się [37, 47, 48]. Ponadto prasy stemplowe umożliwiają realizację wysokich nacisków. Posiadają jednak pewne wady wynikające m.in. z cyklicznego charakteru pracy. Większa jest energochłonność procesu oraz mniejsza jest wydajność tych brykietarek. Ponadto intensywnie zużywają się ich elementy formujące. Natomiast w prasach walcowych z powodzeniem scala się przede wszystkim drobnoziarniste materiały mineralne oraz odpady poprodukcyjne [22, 28, 69, 119]. Maszyny te odznaczają się ciągłym charakterem pracy, co umożliwia uzyskanie dużych wydajności przy relatywnie małym zapotrzebowaniu energii. Dlatego

---

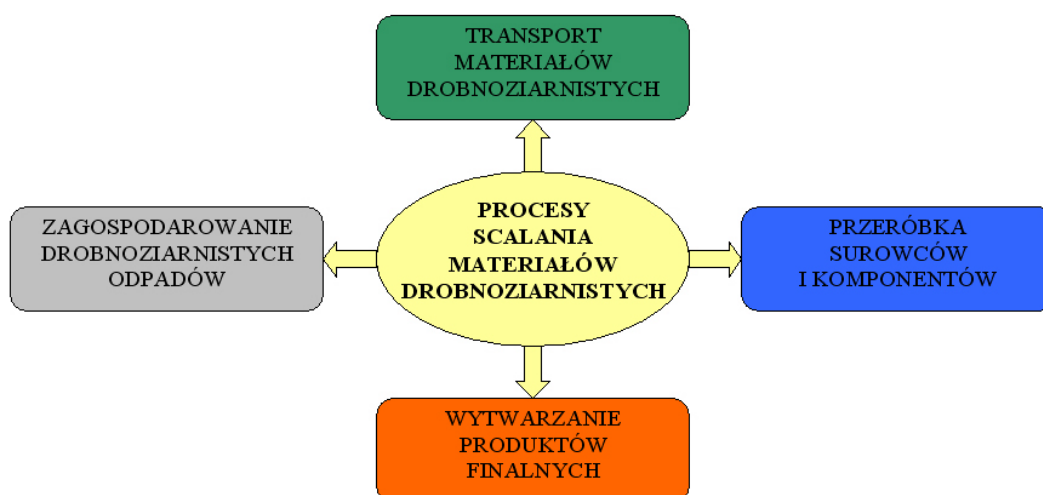
cieszą się one dużym zainteresowaniem. Najczęściej stosuje się prasy dwuwalcowe. Znane są także inne rozwiązania np. prasy jednowalcowe [13]. Z uwagi na zróżnicowane właściwości materiałów drobnoziarnistych spełnienie wymagań stawianych kształtkom wiąże się z doбором prawidłowej konfiguracji i odpowiednich cech konstrukcyjnych układu zagęszczania prasy walcowej [29, 53, 54, 87, 95]. Istotne znaczenie ma m.in. dobór kształtu powierzchni roboczej walców. Z analizy dostępnej literatury wynika, że nie ma jednoznacznych wskazówek dotyczących jego wyboru w zależności od cech materiału drobnoziarnistego oraz jego przeznaczenia po scaleniu. Obecnie odbywa się to w sposób niejednoznaczny, niejednokrotnie oparty na intuicji. Istnieje zatem potrzeba przeprowadzenia badań wpływu powierzchni roboczej walców na efekty pracy prasy walcowej. Ich wyniki poszerzą obecny stan wiedzy i umożliwią opracowanie metody doboru kształtu i geometrycznych cech konstrukcyjnych powierzchni roboczych elementów formujących prasy walcowej.

---

## 2. Stan wiedzy w zakresie scalania materiałów drobnoziarnistych w prasie walcowej i rozwoju jej konstrukcji

### 2.1. Znaczenie, badania i doskonalenie procesu scalania materiałów drobnoziarnistych w prasie walcowej

Aglomeracja ciśnieniowa materiałów drobnoziarnistych, realizowana przy pomocy prasy walcowej, często występuje w szeroko pojętych procesach produkcyjnych. Wynika to z ich potrzeb lub korzyści jakie płyną z nadania materiałowi sypkiemu postaci kawałkowej. Na rysunku 2.1 przedstawiono najważniejsze obszary stosowania aglomeracji ciśnieniowej.



**Rys. 2.1.** Schemat obrazujący obszary stosowania aglomeracji ciśnieniowej materiałów drobnoziarnistych

Scalanie materiałów drobnoziarnistych służy m.in. efektywniejszemu wykorzystaniu środków transportu oraz składowisk. Ze względu na specyficzny charakter materiałów sypkich ich przemieszczanie, a także składowanie niejednokrotnie wiąże się z potrzebą pokonania pewnych trudności. Na przykład transport materiałów mających tendencję do pylenia jest operacją uciążliwą, a czasami nawet niebezpieczną dla otoczenia [4, 93]. Można w takim przypadku stosować brykietowanie, które umożliwi efektywniejsze wykorzystanie środka transportu [94] oraz ułatwi składowanie materiałów. Dotyczy to szczególnie takich przypadków, gdy kolejne operacje technologiczne nie wymagają materiału w formie drobnoziarnistej, bądź niezbędna jest jego postać kawałkowa charakteryzująca się odpowiednio wysoką wytrzymałością mechaniczną. Reprezentatywny przykład stanowi podziarno, które powstaje w procesie

---

wytwarzania kamienia wapiennego w piecach obrotowych. Aktywny charakter tlenku wapnia wymaga przeciwdziałania pyleniu jego drobnej frakcji podczas załadunku i transportu. Dlatego oddziela się ją od wytworzonego wapna palonego. Podziarno wapna palonego powinno zostać scalone. Badania prowadzone w tym zakresie zarówno w Polsce jak i w innych krajach [11, 52, 93] wykazały możliwość wytworzenia w prasie walcowej trwałych brykietów z drobnej frakcji wapna palonego. Wyniki badań wdrożono do praktyki przemysłowej. Z doświadczeń kilku firm wiadomo, że brykiety są bezpieczne dla otoczenia i wygodne do transportu, co decyduje o tym, że nie ma problemów z ich dystrybucją.

W elektrocieplowniach występują problemy związane ze składowaniem oraz zagospodarowaniem popiołów lotnych, pochodzących z odpylania gazów odlotowych. Są one magazynowane na składowiskach lub dostarczane do odbiorców, którzy je wykorzystują, stosując np. jako wypełniacze materiałów budowlanych. Ze względu na dużą pylistość tego typu popiołów przed transportem są one zwilżane. Jednak w przypadku deponowania ich na składowiskach dodana woda szybko wyparowuje, co ułatwia ich roznoszenie przez czynniki atmosferyczne. Dlatego coraz częściej popioły poddaje się grudkowaniu. Prowadzone badania wykazały, że alternatywną metodą ich scalania, która ułatwia transport oraz zapobiega pyleniu tego odpadu jest brykietowanie w prasie walcowej wyposażonej w gładkie pierścienie formujące [4].

Specyfika niektórych procesów technologicznych często narzuca kształt oraz rozmiar komponentów wsadowych. Ma to miejsce np. w polskim hutnictwie miedzi. Wydobyta ruda miedzi po rozdrobnieniu i wzbogaceniu stanowi koncentrat, który posiada charakter drobnoziarnisty. Podawany jest on do pieców szybowych służących do wytopu kamienia miedziowego, po uprzednim nadaniu mu formy kawałkowej [10, 43, 63] poprzez brykietowanie z użyciem płynnego ługu posulfitowego jako lepiszcza [13, 72]. Badania, które przez szereg lat prowadzono w ośrodkach krajowych miały na celu doskonalenie, intensyfikację oraz poprawę efektywności ekonomicznej procesu brykietowania koncentratu rudy miedzi. Obecnie huty borykają się z problemem zmniejszającej się podaży ługu posulfitowego oraz pogarszającą się jego jakością. Toteż w ostatnich latach w AGH podjęto prace nad modyfikacją struktury płynnego ługu posulfitowego [123, 126] oraz dokonano oceny możliwości zmiany jego stanu skupienia z postaci płynnej na stałą [123]. Natomiast w innych ośrodkach badano wpływ dodatku wybranych środków powierzchniowo czynnych na właściwości wiążące ługu posulfitowego [131], a także poszukiwano substytutu tego lepiszcza w procesie

---

brykietowania koncentratu rudy miedzi. W badaniach eksperymentalnych stosowano m.in. środek wiążący otrzymany na bazie skrobi [89, 137]. W warunkach przemysłowych, podczas przygotowywania koncentratu miedzi do brykietowania, dodaje się do niego składniki w postaci koksiku, odpadu z instalacji odsiarczania spalin oraz pyłu szybowego [43, 126]. Mają one pozytywny wpływ na przebieg procesu wytopu kamienia miedziowego w piecu szybowym. Umożliwia to także zagospodarowanie odpadów hutniczych powstających w produkcji miedzi. Jednak skutkiem tego, jak i coraz większego stopnia rozdrobnienia koncentratu rudy miedzi jest pogarszająca się jakość brykietów. W związku z tym, prowadzone są także badania w celu określenia najkorzystniejszej struktury mieszanki poddawanej brykietowaniu w prasie walcowej [126].

Prasy walcowe mają również szerokie zastosowanie w przemyśle farmaceutycznym [91]. Duży stopień rozdrobnienia materiałów, służących jako wypełniacze lub nośniki leków, mała gęstość usypowa i związana z tym konieczność uzyskania wysokich stopni zagęszczenia decydują o tym, że nie nadają się one w stanie wyjściowym do tabletkowania [53]. Poddaje się więc je procesowi dwustopniowej granulacji przez scalanie, najczęściej w prasach walcowych, a następnie rozdrabnianie. W ten sposób otrzymuje się półprodukt o większej gęstości usypowej i mniejszym wymaganym stopniu zagęszczenia podczas tabletkowania. Zastosowanie tak przygotowanego komponentu pozwala na zmniejszenie skoku stempla roboczego tabletkarki. Ułatwia to także przepływ materiału, np. przy jego dozowaniu oraz w znacznym stopniu ogranicza pylenie [2, 41, 135]. Badania prowadzone w Niemczech, a także w Belgii na węglanie magnezu [41] oraz mikonazolu [128] wykazały, że wraz ze wzrostem stopnia zagęszczenia scalonego materiału, z którego uzyskuje się granulaty, maleje wytrzymałość na ściskanie wytworzonych z niego tabletek. Podobny wniosek wynika z eksperymentów prowadzonych na ibuprofenie. Dowiodły one, że granulaty, które mają być poddane aglomeracji ciśnieniowej, powinny być wytwarzane z materiału scalonego przy stosunkowo niedużych naciskach jednostkowych [117]. Natomiast w przypadku badań przeprowadzonych na mieszaninie celulozy mikrokrystalicznej oraz teofiliny stwierdzono, że wytrzymałość mechaniczna tabletek otrzymanych z materiału wyjściowego jest wyższa od wytrzymałości tabletek wykonanych z granulatu i maleje wraz ze wzrostem średniej średnicy jego ziarna [50]. Podejmowano również próby wielokrotnego zbrylania materiału w prasie walcowej. Jego znaczące zagęszczenie obserwowano tylko do drugiego scalenia. Wykazano również, że wraz ze wzrostem

---

ilości przejść materiału przez strefę zagęszczania pogarsza się jego podatność na tabletkowanie [9]. Dowiedziono także, że rozbudowana struktura ziaren i wynikający z tego wzrost powierzchni właściwej nadawy powodują zwiększenie wytrzymałości mechanicznej tabletek [41]. Duży wpływ na jakość wytworzonego granulatu ma dobór właściwego lepiszcza i jego ilość. Ważne jest także zapewnienie odpowiedniej wilgotności materiału w celu ułatwienia rozprowadzenia lepiszcza, co zmniejsza ilość podziarna oraz poprawia wytrzymałość mechaniczną wytworzonego granulatu [78]. W przypadku niektórych materiałów farmaceutycznych nie ma konieczności stosowania środka wiążącego [127]. Eksperymenty prowadzone w USA wykazały dodatkową zaletę dwustopniowej granulacji. Dzięki jej stosowaniu można w większym stopniu ujednostynić strukturę leków, szczególnie tych, które zawierają komponenty trudno rozpuszczalne w wodzie np. naproksen, nifedipinę oraz karbamazepinę, bez potrzeby scalania ich na gorąco, bądź przy użyciu rozpuszczalnika [114]. Oprócz właściwości fizyko-chemicznych materiału wpływ na wytrzymałość mechaniczną granulatu mają również parametry procesu scalania [2, 128, 134] m.in.: prędkość obwodowa walców oraz wielkość szczeliny między nimi [134]. Jednak badania prowadzone w Danii na węglanie wapnia pochodzącym z różnych źródeł dowiodły, że w przypadku niektórych materiałów ich cechy mają większy wpływ na jakość granulatu niż odpowiednio dobrane parametry procesu scalania [2].

Dwustopniową granulację stosuje się także coraz częściej do wytwarzania produktu finalnego. Tak jest np. w przypadku niektórych nawozów sztucznych. Pylisty charakter komponentów, z których wytwarza się nawozy często nie pozwala na ich bezpośrednie używanie w produkcji rolnej. Dlatego odpowiednio przygotowanym mieszankom nadaje się postać wyprasek lub brykietów, a następnie rozdrabnia je dla uzyskania ściśle określonej frakcji ziarnowej [40, 79, 92]. W zależności od zapotrzebowania tego typu granulatu może być wytwarzany w zintegrowanych urządzeniach scalająco-kruszących np. produkcji amerykańskiej lub niemieckiej [12, 110] bądź w przypadku konieczności uzyskania dużych wydajności, w liniach technologicznych, oferowanych m.in. przez firmy niemieckie [3, 118]. W ten sam sposób można także scalać niektóre pofiltracyjne odpady przemysłu chemicznego, nadające się do nawożenia gleby [122]. Dwustopniowa granulacja jest nowym procesem, szczególnie w odniesieniu do innych materiałów aniżeli stosowane w przemyśle farmaceutycznym i dlatego podlega ona ciągłemu doskonaleniu. Na przykład badania prowadzone w AGH wykazały, że w przypadku scalania nawozów

---

wieloskładnikowych w prasie walcowej wyposażonej w pierścienie gładkie lub umożliwiające wytwarzanie brykietów w kształcie siodła, wraz ze wzrostem prędkości obrotowej walców maleje jednostkowe zapotrzebowanie energii oraz wartość nacisku jednostkowego [79]. Natomiast eksperymenty prowadzone w Rosji na nawozach fosforowo-potasowych stanowiły podstawę do określenia wpływu wilgotności oraz gęstości wytworzonych wyprasek na ich wytrzymałość mechaniczną [92].

Nowym produktem, który stanowi interesującą ofertę dla przemysłu energetycznego jest wysokopowierzchniowy sorbent wapniowy do palenisk fluidalnych [42, 58, 108]. Materiałem wyjściowym do jego produkcji jest pylisty wodorotlenek wapnia. Po dodaniu do niego wody i starannym jej rozproszaniu scala się go, a następnie rozdrabnia i poddaje klasyfikacji w celu uzyskania odpowiedniej granulacji. Otrzymany metodą dwustopniowej granulacji drobnoziarnisty sorbent wapniowy charakteryzuje się rozbudowaną teksturą, co wiąże się ze znacznym zwiększeniem jego powierzchni właściwej w porównaniu z materiałem wyjściowym. Z uwagi na to, że wodorotlenek wapnia należy do grupy materiałów trudnych do scalania, prowadzone w ostatnich latach badania dotyczyły przede wszystkim doskonalenia metody jego brykietowania [54, 57]. Skoncentrowano się na doborze odpowiedniej konfiguracji i geometrycznych cech konstrukcyjnych układu zagęszczania prasy walcowej. Wykazano m.in., że wodorotlenek wapnia nie może być wstępnie zagęszczany i podawany w strefę brykietowania prasy przy pomocy zasilacza ślimakowego [42].

Produktem finalnym, który może nabrać dużego znaczenia w obliczu kryzysu energetycznego jest także brykietowany węgiel brunatny. Spośród znanych paliw kopalnianych przez długi okres czasu w prasach walcowych brykietowano przede wszystkim miał węgla kamiennego, w odróżnieniu od węgla brunatnego. Dopiero w połowie lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku w AGH podjęto działania, mające na celu opracowanie energooszczędnej i wydajnej technologii scalania węgla brunatnego w prasach walcowych. Ze względów ekonomicznych zasadnym było wyeliminowanie lepiszcza [24, 25]. Udało się to dzięki zastosowaniu niekonwencjonalnego kształtu wgłębień formujących, pozwalających na wytworzenie brykietów bez płaszczyzny podziału [24, 25]. Wykazano, że rodzaj węgla brunatnego, jego pochodzenie, a także wilgotność mają istotny wpływ na przebieg procesu brykietowania [25]. Badania prowadzono w laboratoryjnej prasie walcowej wyposażonej w zasilacz grawitacyjny oraz ślimakowy. Stosowanie w prasie wymuszonego zasilania za pomocą ślimaka spowodowało wzrost maksymalnej wartości nacisku jednostkowego w porównaniu

---

z zasypem grawitacyjnym. Umożliwiło to rozszerzenie zakresu wilgotności węgla brunatnych, z których otrzymuje się brykiety o zadowalającej jakości.

Scalanie materiałów drobnoziarnistych może także służyć poprawie efektywności ekonomicznej procesu wytwarzania. Dotyczy to np. produkcji szkła. Poszukiwanie możliwości obniżenia kosztów jego wytwarzania doprowadziło do powstania koncepcji wprowadzania zbrylonego wsadu do agregatu topliwego, nazywanego także wanną szklarską. Zostało to podyktowane tym, że kawałkowy zestaw szklarski, po podaniu go do zbiornika buforowego, może zostać ogrzany ciepłem odpadowym poprzez kierowanie do niego gorących spalin. W przypadku stosowania takiego rozwiązania ilość energii potrzebnej do wytopu szkła jest mniejsza i w ten sposób skraca się także czas przebiegu tego procesu. Ponadto w wyniku nadania zestawowi szklarskiemu postaci kawałkowej eliminuje się pylenie oraz niepożądaną segregację ziaren podczas jego transportu z zestawialni do zbiornika. Badania prowadzone w AGH wykazały, że w prasie walcowej można otrzymać brykiety z zestawów o określonym składzie oraz wilgotności, stanowiące pełnowartościowy wsad do agregatów topliwych [124].

Scalanie materiałów drobnoziarnistych odgrywa ważną rolę w zagospodarowaniu drobnej frakcji odpadów poprodukcyjnych. Wiąże się to z racjonalnym wykorzystaniem bazy surowcowej i zasobów energii oraz spełnianiem wymagań w zakresie ochrony środowiska [7, 11, 18, 23, 59, 74, 101, 122]. Szczególnie dużo drobnoziarnistych odpadów metalonośnych powstaje w hutnictwie. Z przeprowadzonych badań laboratoryjnych oraz doświadczeń uzyskanych w skali przemysłowej wynika, że większość z nich po odpowiednim przygotowaniu, a następnie scaleniu może być z powodzeniem stosowana w różnych procesach technologicznych [7, 22, 51, 60, 69, 76,]. Panuje powszechna opinia, że najlepszą metodą aglomeracji tych materiałów odpadowych jest brykietowanie w prasie walcowej, najczęściej z użyciem lepiszcza [1, 18, 31, 69, 76]. Brykiety z odpadów żelazonośnych odznaczające się odpowiednią wytrzymałością mechaniczną mogą stanowić komponent wsadu wielkopieczowego i/lub pieców stalowniczych [115]. Przykład stanowi zendra hutnicza będąca odpadem powstającym podczas walcownia stali. Składa się ona głównie z tlenków żelaza. Można z zendry i pyłów żelazonośnych [33] lub z zendry i odpadu z taśmowej maszyny rozlewniczej [32] wytworzyć w prasie walcowej odpowiednie brykiety stosując jako lepiszcze melasę cukrową. Według opisu patentowego USA możliwe jest również wytworzenie brykietów składających się

---

wyłącznie z pyłów żelazonośnych. Wymaga to jednak scalania wsadu na gorąco w temperaturze 500°C, a następnie suszenia produktów scalania w temperaturze ok. 130°C [132]. Do tlenkowych odpadów żelazonośnych należą również szlamy konwertorowe powstające podczas mokrego oczyszczania gazów pochodzących z konwertora. Ze względu na zawartość cynku nie powinny one stanowić wsadu do wielkiego pieca, natomiast mogą być z powodzeniem utylizowane w piecach stalowniczych np. konwertorowych, stanowiąc jednocześnie substytut złomu [21, 61, 74]. Szlamy konwertorowe wymagają jednak wcześniejszego odwodnienia w prasie filtracyjnej, tak by ich wilgotność nie przekraczała 15%. W takiej formie można je z powodzeniem brykietować stosując lepsze dwuskładnikowe w postaci melasy oraz wapna palonego, którego zastosowanie pozwala na wyeliminowanie procesu suszenia mieszanki. W celu zmniejszenia zużycia surówki w procesach stalowniczych do składu podstawowego nadawy przygotowanej do brykietowania można dodawać addytyw egzotermiczny, np. koksik lub miął węgla. Prowadzone w kraju badania wykazały, że z odpowiednio przygotowanej mieszanki zawierającej szlamy konwertorowe oraz dodatek egzotermiczny możliwe jest wytworzenie brykietów o takiej wytrzymałości mechanicznej, która wymagana jest dla komponentów wsadu pieców stalowniczych. Istnieje jednak konieczność sezonowania mieszanki do brykietowania oraz brykietów przez okres nie krótszy niż 24h [61]. Proces sezonowania brykietów można skrócić poprzez suszenie ich np. ciepłem odpadowym. Pozytywnym rezultatem zakończyły się również badania procesu brykietowania w prasie walcowej szczególnie uciążliwego odpadu żelazonośnego, jaki stanowią zaolejone mułki zgorzelinowe. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że korzystnie jest poddawać scalaniu mieszankę składającą się z zaolejonych mułków zgorzelinowych, wapna (palonego, hydratyzowanego bądź pokarbidowego) i melasy [21]. Prowadzone badania metalurgiczne udowodniły, że brykiety wytworzone zarówno ze szlamów konwertorowych jak i mułków zgorzelinowych nie ulegają rozpadowi w wysokiej temperaturze. Ich wartość metalurgiczna w zakresie składu chemicznego jest wystarczająca, a wydzielające się gazowe składniki węglowodorowe nie stanowią zagrożenia dla środowiska naturalnego [28, 69, 76]. Innymi odpadami, które mogą być utylizowane na drodze brykietowania są wielkopieczowe pyły manganowe. Z mieszaniny manganowego pyłu wielkopieczowego, odpadu z maszyny odlewniczej oraz melasy można w prasie walcowej wytworzyć brykiety, które po okresie 24 godzin uzyskują wysoką wytrzymałość mechaniczną, nie kruszą się podczas transportu,

---

są ekologiczne i mogą stanowić pełnowartościowy komponent wsadu wielkopieczowego w procesie wytapiania surówek odlewniczych [34].

W procesach otrzymywania i przetwarzania metali powstają również duże ilości materiałów odpadowych o niskiej zawartości cynku, do których należą: szlamy z ocynkowni ogniowych, szlamy hutnicze z elektrolizy cynku oraz pyły z elektrostalowni. Zagospodarowanie tych odpadów polega na wytworzeniu z nich w procesie przewalowym surowego tlenku cynku, a następnie jego zbrykietowaniu. W takiej postaci może on stanowić komponent uzupełniający wsad pieca szybowego do wytopu cynku i ołowiu [23, 44, 76]. Znana jest metoda brykietowania tlenku cynku na gorąco, po podgrzaniu go do temperatury 550 – 800°C [6]. Ten sposób scalania materiału drobnoziarnistego jest energochłonny i wymaga stosowania drogiej prasy walcowej o skomplikowanej budowie i wysokich kosztach eksploatacji. Ponadto brykiety mają tendencję do rozpadania się po upływie kilku dni. Dlatego podjęto badania procesu brykietowania tlenku cynku na zimno. Wykazały one, że uzyskanie z tlenku cynku brykietów o wymaganej wytrzymałości mechanicznej jest możliwe dzięki stosowaniu odpowiedniego lepiszcza w postaci ługu posiarczynowego [23, 22] bądź melasy [76]. Niezbędna jest także zmiana kształtu wgłębień formujących. Na podstawie wyników badań opracowano założenia do procesu brykietowania tlenku cynku na zimno oraz koncepcję stosownej linii technologicznej [23, 22].

W przypadku przygotowania do zagospodarowania gąbki kadmowej, będącej odpadem powstającym podczas wytwarzania cynku metodą hydroelektrometalurgiczną [26], niezbędne jest jej odwodnienie i odpowietrzenie przed procesem brykietowania. W takiej postaci nadaje się ona do brykietowania w prasie walcowej. Wskazane jest, aby gąbka kadmowa posiadała postać granul o średnicy nie mniejszej aniżeli 1 [mm], a jej wilgotność nie przekraczała 22% [59]. Otrzymane brykiety mogą być stosowane jako wsad do pieca elektrycznego, w którym następuje ich topienie połączone z destylacją kadmu. Ze względu na potrzebę odprowadzenia dużej ilości wody podczas brykietowania gąbki kadmowej korzystne jest pionowe usytuowanie walców w układzie zagęszczania prasy [22, 26].

Odpady przemysłu łożyskowego, powstające podczas szlifowania elementów łożysk tocznych, ze względu na znaczną zawartość chromu zalicza się do niebezpiecznych materiałów odpadowych. Najkorzystniejszym sposobem utylizacji tego typu szlamów poszlifierskich jest usunięcie z nich emulsji, poddanie brykietowaniu, a następnie wykorzystanie brykietów jako komponentu wsadu pieców stalowniczych [90].

---

Prowadzone w kraju badania udowodniły, że możliwe jest wytworzenie w prasie walcowej brykietów z odpadów przemysłu łożyskowego zawierających dodatek lepiszcza dwuskładnikowego w postaci melasy oraz wapna hydratyzowanego [7, 55, 60]. Wymaganą wytrzymałość mechaniczną brykiety osiągały po ok. 100 godzinach sezonowania. Próby wykonane w skali laboratoryjnej potwierdziły ich pełną przydatność w procesie metalurgicznym [7, 60, 116]. Wyniki badań posłużyły do opracowania koncepcji dwóch linii technologicznych do brykietowania odpadów poszlifierskich, różniących się stopniem złożoności [60]. Mają one charakter uniwersalny i mogą być wykorzystane do scalania także innych rodzajów odpadów poszlifierskich.

Podczas wytwarzania wełny mineralnej oraz produkowania z niej wyrobów powstają pewne ilości odpadów związane np. z formowaniem produktu, jego cięciem czy pakowaniem. Zagospodarowanie ich w procesie wytwarzania wełny mineralnej wiąże się z koniecznością ich zagęszczenia i scalenia [66]. Badania prowadzone w kraju wykazały, że możliwe jest uzyskanie w prasie walcowej trwałych i wytrzymałych mechanicznie brykietów oraz wyprasek zarówno z mokrej jak i z suchej odpadowej wełny szklanej. Podobnie jak w poprzednich przypadkach znaczącą rolę odgrywa dobór właściwego lepiszcza oraz odpowiednie przygotowanie materiału do brykietowania. Na podstawie badań przeprowadzonych w skali laboratoryjnej, opracowano założenia do procesu scalania odpadowej wełny szklanej oraz koncepcję linii technologicznej do jej kompaktowania [70].

Podczas procesu oczyszczania ścieków komunalnych powstają duże ilości osadów, które zgodnie z obowiązującym prawodawstwem mogą być zagospodarowane na drodze termicznej [19]. Wymaga to jednak np. w przypadku spalania lub współspalania tego rodzaju odpadów w paleniskach rusztowych doprowadzenia ich do postaci kawałkowej [99, 105]. Osady ściekowe są mocno uwodnione, dlatego z uwagi na potrzebę ograniczenia energii cieplnej dla potrzeb ich odwadniania oraz konieczność zapewnienia higienizacji i biostabilizacji, wskazane jest stosowanie wapna palonego jako lepiszcza [104]. Wiąże ono wodę tworząc wodorotlenek, a dodatkowo wydziela energię, powodując częściowe odparowywanie wody. Prowadzone badania wykazały, że w prasie walcowej przy zastosowaniu zasypu zarówno grawitacyjnego [99, 101] jak i wymuszonego [106] z mieszanki osadów ściekowych z dodatkiem wapna palonego [62, 99, 101, 106] można otrzymać wytrzymałe mechanicznie brykiety, a także wypraski. Próbom brykietowania poddano również mieszanki osadów ściekowych,

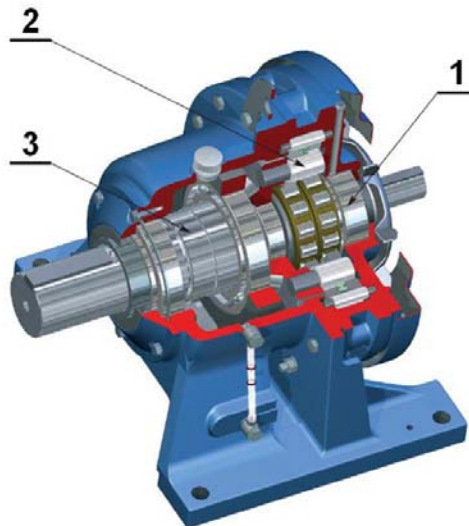
---

odpadowego wapna palonego oraz miału węgla kamiennego dla podwyższenia wartości opałowej brykietów. Wykazały one, że wraz ze wzrostem udziału miału węgla kamiennego następuje spadek wytrzymałości mechanicznej brykietów [101]. W celu pełnego zbilansowania energetycznego procesu spalania osadów ściekowych, przeprowadzono również badania mające na celu wyznaczenie zapotrzebowania energii podczas ich scalania w prasie walcowej [80].

Z przeprowadzonej analizy wynika, że brykietowanie materiałów drobnoziarnistych w prasie walcowej odgrywa istotną rolę w procesach produkcyjnych. Prowadzone są intensywne badania, których celem jest doskonalenie procesu scalania różnych materiałów drobnoziarnistych. Poszukuje się także nowych możliwości stosowania tego procesu.

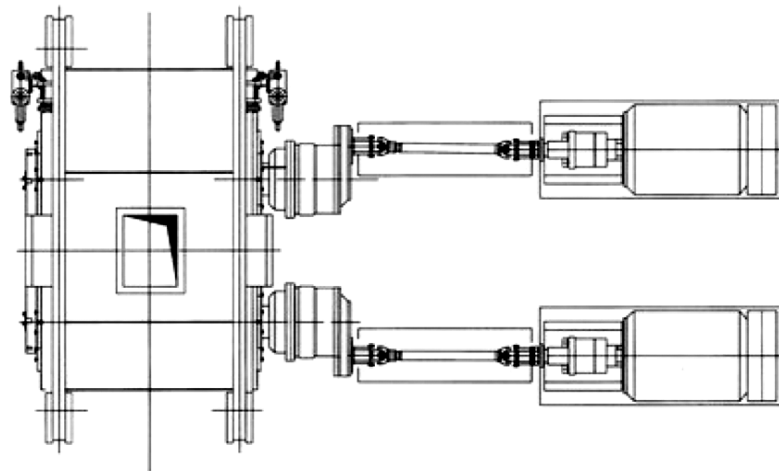
## **2.2. Doskonalenie konstrukcji pras walcowych**

Dążenie do osiągnięcia wyższych wydajności maszyn, konieczność zmniejszenia kosztów ich eksploatacji, nadążanie za aktualnymi trendami, a także potrzeba scalania materiałów trudnych do brykietowania stymulują rozwój konstrukcji pras walcowych. Z uwagi na konkurencję między ośrodkami badawczymi oraz producentami brykietarek w publikowanych artykułach przedstawia się tylko wybrane problemy i rozwiązania techniczne. Na podstawie analizy literatury można stwierdzić, że prowadzone są prace mające na celu udoskonalenie układu napędowego prasy. Wynika to stąd, że klasyczne przekładnie walcowe, z racji konieczności przeniesienia dużego momentu obrotowego, posiadają z reguły większe gabaryty aniżeli klatka walców roboczych [64, 67, 109, 133]. Rzuca to negatywnie na zwartość konstrukcji prasy i utrudnia jej montaż i demontaż. Dlatego poszukuje się innych rozwiązań. Prace prowadzone w AGH ukierunkowane są na zastosowanie w układzie napędowym prasy walcowej przekładni cykloidalnej [5, 64], której schemat przedstawiono na rysunku 2.2. Tego typu przekładnia charakteryzuje się możliwością uzyskania dużego przełożenia na jednym stopniu, małymi gabarytami oraz odpornością na chwilowe przeciążenia sięgające do 500% momentu nominalnego. Koncepcję tą sprawdzono w warunkach laboratoryjnych, a pozytywne wyniki badań stanowiły podstawę do opracowania założeń do modernizacji napędu prasy przemysłowej [68]. Należy zaznaczyć, że z uwagi na ograniczoną moc nominalną przekładni cykloidalnej może być ona stosowana w napędzie pras walcowych małej i średniej wielkości.



**Rys. 2.2.** Schemat przekładni cykloidalnej firmy „Sumitomo”: 1 – wał wejściowy, 2 – zespół redukujący obroty, 3 – wał wyjściowy [111]

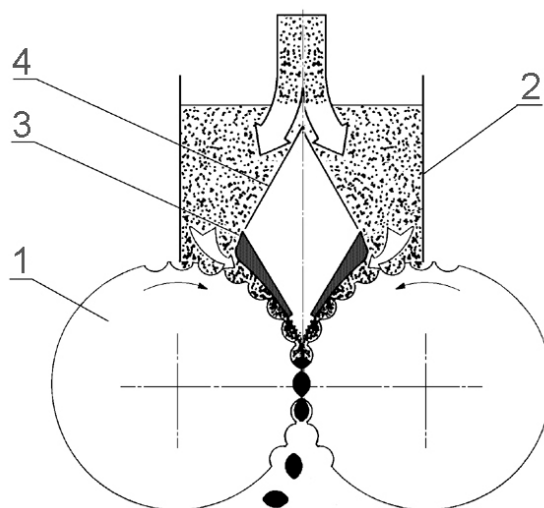
Innym rozwiązaniem proponowanym przez niemiecką firmę Köppern jest zastosowanie dwóch osobnych przekładni planetarnych do przekazywania momentu obrotowego z synchronizacją obrotów walców względem siebie, realizowaną na drodze elektronicznej [46]. Schemat obrazujący prasę walcową z takim napędem przedstawiono na rysunku 2.3. Układ synchronizacji obrotów walców stosowany jest również w rozwiązaniach konstrukcyjnych maszyn produkcji amerykańskiej. Wiąże się to jednak z pewnymi problemami [12], szczególnie w przypadku, gdy istotne znaczenie ma zachowanie odpowiedniego położenia względem siebie wgłębień leżących na przeciwległych walcach.



**Rys. 2.3.** Schemat prasy walcowej firmy Köppern o dwóch oddzielnych napędach głównych walców [46]

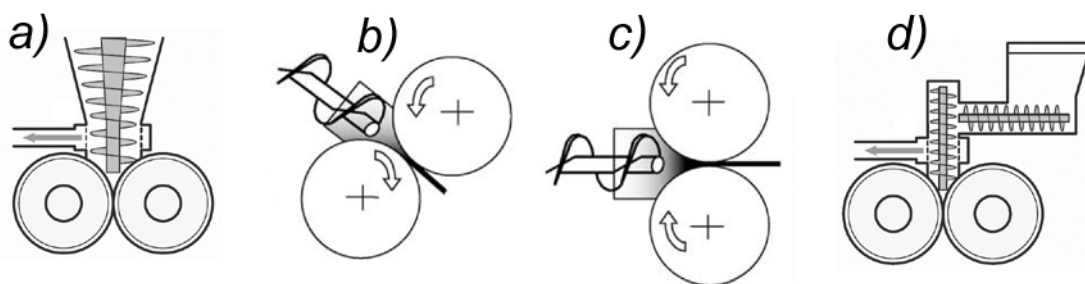
---

Podstawowym zespołem roboczym prasy walcowej jest jej układ zagęszczania. Prawidłowy dobór jego konfiguracji i cech konstrukcyjnych stanowi zagadnienie złożone, zazwyczaj wymagające przeprowadzenia badań eksperymentalnych [15, 29, 53, 54, 71, 95]. Odpowiednia konfiguracja układu zagęszczania determinuje niezakłócony przepływ materiału, uzyskanie jego odpowiedniego stopnia zagęszczania, a przede wszystkim wpływa na jakość produktu oraz wydajność procesu [13, 14, 16, 36, 45, 53, 54, 87, 88, 95]. Dozowanie nadawy w strefę zagęszczania prasy może odbywać się w sposób grawitacyjny lub wymuszony, w zależności od budowy urządzenia zasilającego [45, 81, 91, 109, 118, 130]. Badania prowadzone w kraju skupiły się głównie na rozwoju konstrukcji zasilaczy umożliwiających wstępne zagęszczenie materiału [81, 83, 84, 85, 86, 95, 102, 103]. Oryginalne rozwiązanie stanowi zasilacz zbieżno-kanalowy (rys. 2.4). Na podstawie wyników badań



**Rys. 2.4.** Schemat zasilacza zbieżnokanałowego: 1 – pierścienie formujące, 2 – zasyp, 3 – elementy zagęszczające, 4 – kłapy rozdzielające przepływającą nadawę [82]

laboratoryjnych [81, 86] określono m.in. wpływ: stopnia wstępnego zagęszczania w kanale zasilacza, wysokości szczeliny wlotowej do kanału oraz prędkości obrotowej walców na jakość brykietów, a także zapotrzebowanie energii [85]. Opracowano również metodę kształtowania geometrii kanałów zagęszczających tego rodzaju zasilacza [83, 84]. Do podajników nadawy, które w sposób wymuszony dostarczają materiał w strefę zagęszczania zalicza się także zasilacz ślimakowy. Jego usytuowanie w stosunku do walców roboczych może być różne [14, 45, 109], co pokazano schematycznie na rysunku 2.5. Ślimak w układzie zagęszczania może pełnić funkcje

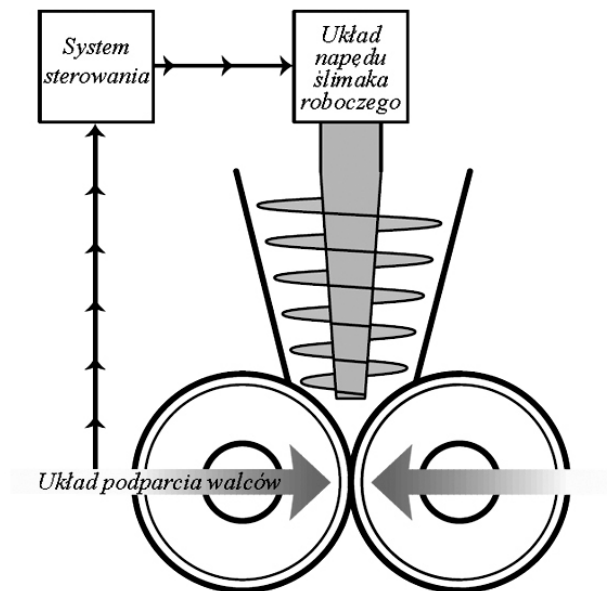


**Rys. 2.5.** Usytuowanie ślimaków względem walców formujących: a) pionowe [109] b) skośne [45], c) poziome [45] d) poziomo-pionowe (dwa elementy robocze) [109]

typowo transportowe, a także oprócz tego wstępnie zagęszczać materiał. Prowadzone w kraju eksperymenty pozwoliły na ocenę wpływu podstawowych geometrycznych cech konstrukcyjnych elementu roboczego zasilacza ślimakowego takich jak: zbieżność, skok oraz wewnętrzny kąt pochylenia linii śrubowej na skuteczność podawania materiału drobnoziarnistego w strefę zagęszczania prasy walcowej, jakość brykietów [97, 102, 103] oraz obciążenia ślimaka [98, 100]. Badania wykazały także, że zastosowanie zasilacza ślimakowego w zespole prasy walcowej umożliwia zwiększenie kąta chwytu od kilku do kilkudziesięciu procent w porównaniu z zasilaczem grawitacyjnym [95], co powoduje wzrost nacisku wywieranego na scalany materiał. Uwagę poświęcono również procedurze postępowania przy określaniu geometrycznych cech konstrukcyjnych ślimaka dla określonego rodzaju materiału oraz wielkości prasy [102]. Eksperymenty prowadzone we Francji udowodniły natomiast, że podczas scalania różnych materiałów przy użyciu zasilacza ślimakowego i gładkich walców, gęstość wypraski zmienia się cyklicznie wraz z obrotami elementu roboczego. Wynika to ze zmiany nacisku spowodowanej geometrią końca uzwojenia ślimaka [45, 130]. Nowością w konstrukcji zasilaczy ślimakowych jest wprowadzony przez firmy Fitzpatrick oraz K.R. Komarek Inc., system próżniowego odpowietrzania nadawy, który pokazano schematycznie na rysunkach 2.5a oraz 2.5d [109]. Poprawia on odgazowywanie materiału w strefie zagęszczania, przez co wpływa na zwiększenie stopnia zagęszczenia scalonego produktu. Zastosowanie zasilacza ślimakowego w prasie walcowej daje możliwość wpływu w sposób zamierzony na wartość nacisku jednostkowego wywieranego na zagęszczany materiał. Zachowanie jego stałej wartości, zapewnia stabilizację procesu, dzięki czemu możliwe jest utrzymanie wytrzymałości mechanicznej scalonego materiału na jednakowym poziomie. Podczas brykietowania materiału bardzo często zdarza się, że podawane partie nadawy różnią się od siebie

---

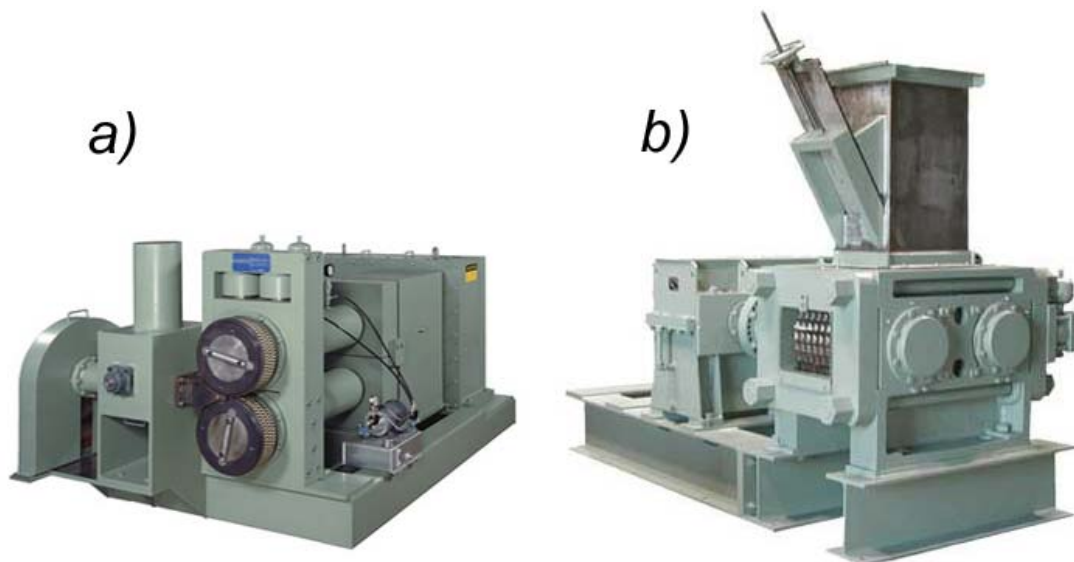
właściami fizycznymi np. wilgotnością, składem ziarnowym itp. Wywołuje to niepożądaną zmianę własności wytrzymałościowych scalonego produktu. Dlatego w nowoczesnych prasach dąży się do stabilizacji procesu poprzez regulację nacisku wywieranego na walce lub szerokości szczeliny między nimi [17, 109, 119]. Na rysunku 2.6 przedstawiono przykład układu stabilizacji obciążenia walców.



**Rys. 2.6.** Schemat układu stabilizacji obciążenia walców [109]

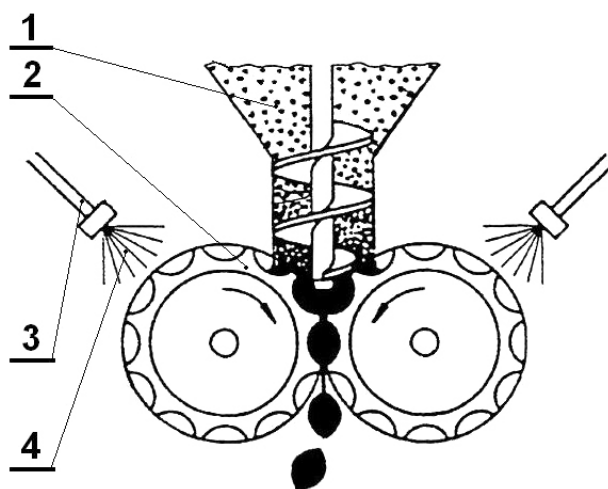
Innym podstawowym elementem układu zagęszczania są walce formujące. Zazwyczaj w prasach walcowych ich ułożenie względem siebie jest poziome (rys. 2.7b). Rzadziej występują inne przypadki, np. w prasach o małej wydajności walce mogą być usytuowane pionowo (rys. 2.7a). Istotną rolę z punktu widzenia efektów procesu brykietowania odgrywa kształt ich powierzchni roboczej [27]. Ma on także wpływ na intensywność zużywania się walców, która jest jednym z istotnych czynników kształtujących koszty eksploatacji prasy. Poszukiwanie metod zwiększania trwałości elementów formujących prasy walcowej jest przedmiotem badań. Na podstawie dotychczas opublikowanych wyników stwierdzono, że poprawę istniejącego stanu można uzyskać poprzez dobór odpowiednich gatunków stali [20, 72, 73, 125], a także w wyniku stosowania nowoczesnych technologii wytwarzania elementów formujących oraz wprowadzenia ich regeneracji [8, 30].

Poważnym problemem, który można napotkać podczas eksploatacji pras walcowych są trudności z opuszczaniem wgłębień formujących przez brykiety.



**Rys. 2.7.** Prasy walcowe firmy „K. R. Komarek Inc.” z układem walców: a) pionowym, b) poziomym

Najczęściej związane jest to z nieprawidłowo dobranym składem oraz wilgotnością mieszanki poddawanej scalaniu. Może to także wynikać ze złej podatności materiału na brykietowanie. Zapobiega się temu niekorzystnemu zjawisku dzięki nanoszeniu specjalnymi dyszami na powierzchnię roboczą walców niewielkiej warstwy środków zwilżających, uzyskanych m.in. na bazie wody oraz grafitu (rys. 2.8). Powoduje to zmniejszenie sił wzajemnego oddziaływania pomiędzy scalonym materiałem, a powierzchnią walców, co sprzyja wypadaniu brykietów z wgłębień formujących [129]. Pożądany efekt można także uzyskać w wyniku zmiany kształtu powierzchni roboczej walców, na co do tej pory nie zwrócono uwagi w literaturze.



**Rys. 2.8.** Schemat układu zagęszczania prasy walcowej z nawilżaniem powierzchni roboczej walców: 1 – zasilacz ślimakowy, 2 – walec roboczy, 3 – dysza spryskująca powierzchnię roboczą walca, 4 – наносzony środek zwilżający [129]

---

Potrzeba brykietowania coraz większej ilości materiałów drobnoziarnistych przyczyniła się do powstania idei prasy uniwersalnej. Na podstawie doświadczeń eksploatacyjnych, a także wyników badań laboratoryjnych oraz symulacyjnych procesu brykietowania materiałów o zróżnicowanych właściwościach opracowano w kraju koncepcję wielowariantowej prasy walcowej, potocznie zwanej modułową. Przewidziano w niej możliwości wymiennego stosowania modułu napędowego, zespołu zasilającego oraz pierścieni formujących o zróżnicowanym kształcie powierzchni roboczej. Przedstawiono także metodę doboru konfiguracji układu zagęszczania brykieciarki oraz odpowiedniego modułu napędowego [65, 67].

Rozwój procesu dwustopniowej granulacji przyczynił się również do powstania zintegrowanych zespołów scalająco-kruszących (rys. 2.9), gdzie w jednym urządzeniu z pylistego materiału poprzez operacje scalania, a następnie bezpośredniego kruszenia



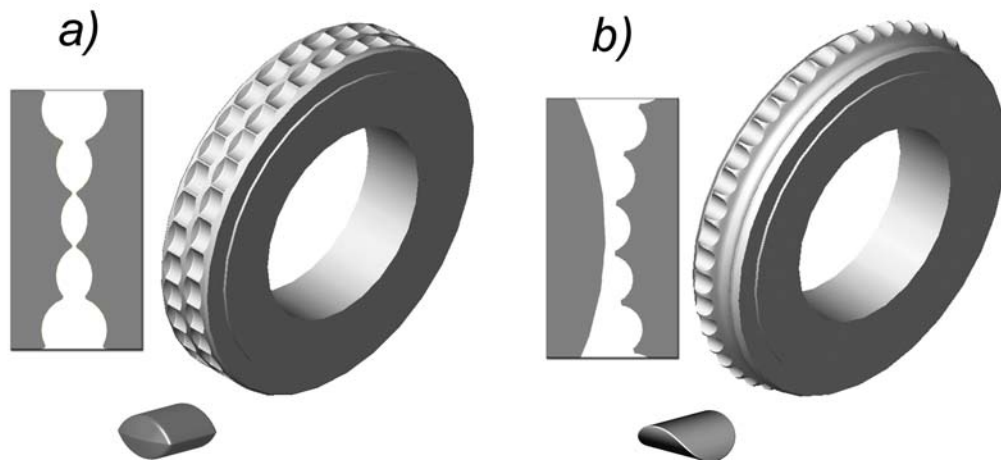
**Rys. 2.9.** Urządzenie scalająco-kruszące Pharmapaktor C250 firmy Hosokawa Bepex GmbH [110]

otrzymuje się granulaty o określonej frakcji ziarnowej [12, 110]. Zaletą tych maszyn są przede wszystkim stosunkowo niewielkie gabaryty oraz fakt, że operacje scalania i kruszenia odbywają się w jednym urządzeniu. Ich wadą jest to, że posiadają stosunkowo niewielkie wydajności.

---

### 2.3. Podstawowe kształty powierzchni roboczej elementów formujących

Z przedstawionej analizy literatury wynika, że nie prezentuje się w niej zagadnień związanych z kształtem powierzchni roboczej elementów formujących. Ma on istotne znaczenie dla przebiegu procesu scalania materiału oraz jego efektów, a także wpływa na koszt eksploatacji prasy walcowej. Najbardziej rozpowszechniony kształt powierzchni roboczej służy do wytwarzania brykietów z płaszczyzną podziału (rys. 2.10a, 2.11a). Spotyka się również jego odmianę, w której (rys. 2.11b) dolna strefa wgłębień formujących jest płytsza od strefy środkowej i górnej, a uzyskane brykiety posiadają kształt kropli. Taki profil służy wydłużeniu okresu eksploatacji elementów formujących i powoduje zwiększenie nacisku jednostkowego, co m.in. przeciwdziała rozwarstwianiu się brykietów w płaszczyźnie podziału [120, 138] (rys. 2.12). Temu niekorzystnemu zjawisku można również zapobiec poprzez stosowanie walców z inną geometrią powierzchni roboczej, która umożliwi wytwarzanie brykietów w kształcie siodła (rys. 2.10b). Jak wynika z przeglądu literatury [24, 35, 42, 52, 55, 62, 66, 79, 87, 104] badania z użyciem tego typu elementów formujących prowadzone są przede wszystkim w AGH. Charakteryzują się one tym, że na ich powierzchni roboczej

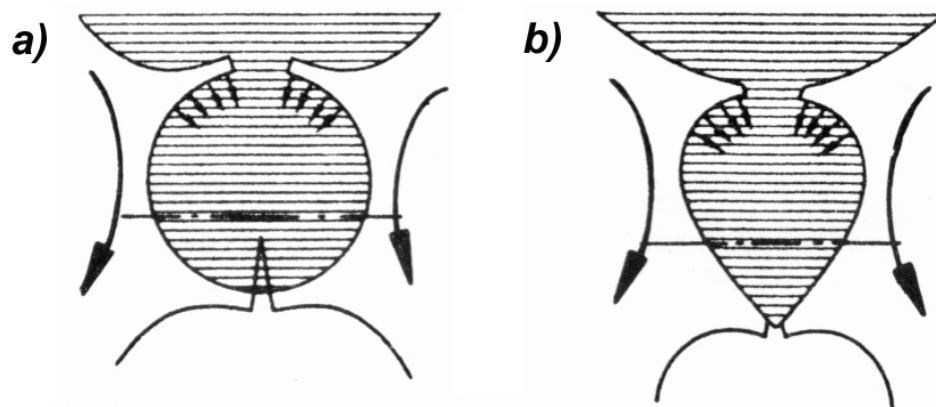


**Rys. 2.10.** Przykłady elementów formujących prasy walcowej umożliwiających wytwarzanie brykietów: a) w kształcie kropli, b) w kształcie siodła

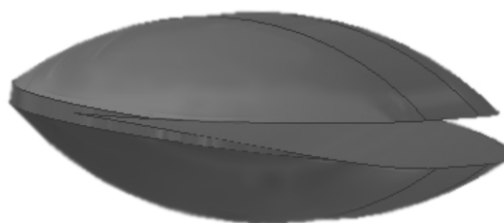
wykonane są na przemian obwodowe rowki oraz wręby. Profil poprzeczny rowka i wręby posiada taki sam kształt. Pierścienie usytuowane są w ten sposób, że rowki i wręby znajdują się naprzeciw siebie, tworząc dwudzielną formę. Istnieje pogląd, że ten kształt powierzchni roboczej walców sprzyja scalaniu materiałów trudnych do brykietowania w prasie walcowej, gdyż umożliwia uzyskiwanie wysokich wartości

---

nacisku jednostkowego w procesie brykietowania. Rzutuje to jednak na intensywność zużywania się elementów formujących, które są mniej trwałe w porównaniu z klasycznym rozwiązaniem.



**Rys. 2.11.** Dwa rodzaje wgłębień formujących do wytwarzania brykietów z płaszczyzną podziału: a) klasyczny, b) z wypłaszczeniem dolnej części [120]

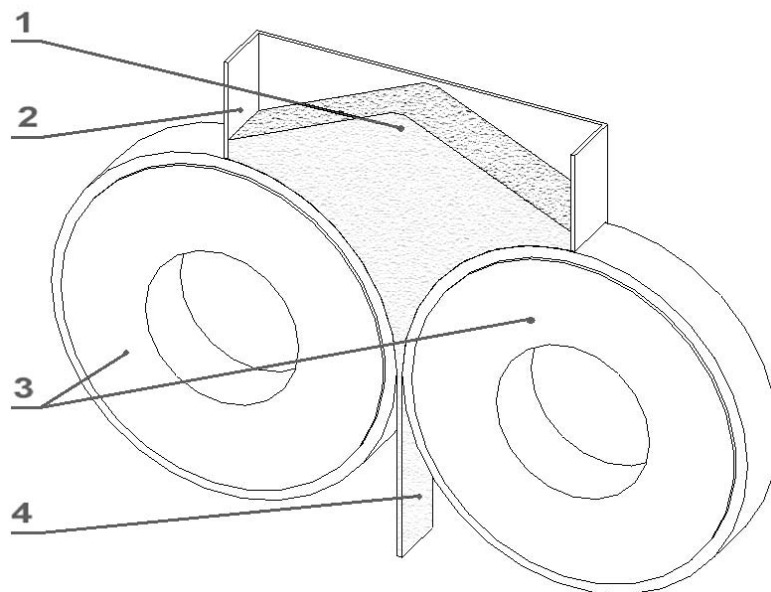


**Rys. 2.12.** Schemat pękania brykietów w kształcie kropli w płaszczyźnie podziału [138]

Przedstawione powyżej powierzchnie robocze walców używane są do klasycznego brykietowania. Podczas tego procesu materiał scalany jest w celu doprowadzenia go do formy kawałkowej o powtarzalnym kształcie i podobnych wymiarach. W takiej postaci stosowany jest on w określonych procesach. Drugą grupę stanowią materiały, których kształt po scalaniu nie jest istotny, a powinien jedynie charakteryzować się zwartą litą strukturą lub większym wymiarem ziaren oraz wyższą ich gęstością niż w formie wyjściowej. Obserwuje się wyraźny wzrost zainteresowania tego typu scalaniem, wynikający przede wszystkim z rozwoju granulacji dwustopniowej [41, 42, 50, 53, 91, 136]. Dążąc do obniżenia jej kosztów duży nacisk kładzie się na minimalizację nakładów finansowych na operację zbrylania materiałów drobnoziarnistych. W tym celu stosuje się m.in. elementy robocze z gładką powierzchnią. Są one najprostsze do wykonania. Niewątpliwą zaletą takich walców jest

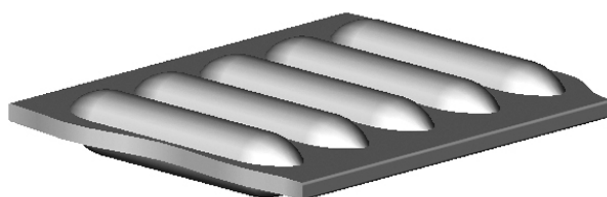
---

dłuższy czas ich eksploatacji oraz łatwy sposób regeneracji. Zastosowanie takiej powierzchni roboczej umożliwia nadanie scalanemu materiałowi postaci płaskiej wypraski (rys. 2.13). Jej szerokość odpowiada szerokości walców, natomiast grubość jest w przybliżeniu równa wielkości szczeliny pomiędzy nimi. W prasach stosuje się także walce z poprzecznymi rowkami. Umożliwiają one otrzymywanie wypraski z dwustronnymi wypukłościami (rys. 2.14), najczęściej symetrycznie rozmieszczonymi po obydwu stronach pasma.



**Rys. 2.13.** Schemat układu zagęszczania prasy walcowej z walcami o gładkiej powierzchni roboczej: 1 – nadawca, 2 – zasyp, 3 – pierścienie formujące o gładkiej powierzchni roboczej, 4 – wypraska

W dostępnych publikacjach nie przedstawiono wyników badań wpływu kształtu powierzchni roboczej walców na przebieg procesu brykietowania. Brakuje zatem wiedzy niezbędnej do doboru właściwych elementów formujących. Ponadto analiza literatury naukowej, technicznej, a także ofert producentów brykietarek wykazała, że w układach zagęszczania pras walcowych stosuje się walce o identycznym kształcie powierzchni roboczej. Z teoretycznego punktu widzenia może być ona zróżnicowana.



**Rys. 2.14.** Przykład wypraski z dwustronnymi wypukłościami

---

W takim przypadku układ zagęszczania będzie posiadał charakter asymetryczny. Może to być korzystne z punktu widzenia złożoności konstrukcji oraz kosztów eksploatacji prasy. Z uwagi na brak doświadczeń w tym zakresie rozstrzygnięcie tej kwestii wymaga podjęcia odpowiednich prac.

## **2.4. Wnioski wynikające z analizy literatury**

Z przeprowadzonej analizy literatury dotyczącej scalania materiałów drobnoziarnistych w prasie walcowej wynikają, podane poniżej wnioski.

1. Scalanie realizowane w prasie walcowej odgrywa ważną rolę w szeroko pojętych procesach produkcyjnych, ponieważ taki sposób zbrylania różnych materiałów drobnoziarnistych może służyć:
  - ułatwieniu ich transportu oraz zmniejszeniu jego kosztów,
  - przygotowaniu pozwalającym na ich wykorzystanie w określonych procesach produkcyjnych,
  - nadaniu im postaci służącej poprawie efektywności ekonomicznej niektórych procesów technologicznych,
  - wytworzeniu produktów finalnych,
  - przygotowaniu do zagospodarowania, jeżeli stanowią one odpady.
2. Duże znaczenie brykietowania we współczesnej technice stanowi inspirację do prowadzenia intensywnych badań, których wyniki służą doskonaleniu procesu oraz konstrukcji prasy, a także umożliwiają określenie nowych możliwości stosowania tej metody scalania.
3. Większość publikacji związanych ze scalaniem materiałów drobnoziarnistych w prasie walcowej dotyczy zagadnień procesowych, natomiast znacznie mniej opracowań poświęconych jest konstrukcji maszyny.
4. Niewystarczający jest stan wiedzy dotyczącej doboru kształtu powierzchni roboczej walców, który ma wpływ na przebieg procesu scalania oraz koszty eksploatacji prasy.
5. Istnieje potrzeba prowadzenia prac badawczych w zakresie wpływu kształtu powierzchni roboczej walców na przebieg procesu scalania w prasie walcowej oraz jego efekty, z uwzględnieniem niesymetrycznego układu zagęszczania.

---

## 2.5. Wybór materiałów do badań

Przeprowadzona analiza literatury posłużyła nie tylko przeglądowi zagadnień z zakresu: badań i doskonalenia procesu scalania oraz konstrukcji pras walcowych, ale także pomogła w wytypowaniu materiałów, które powinny zostać wykorzystane w badaniach własnych. Założono, że do przeprowadzenia eksperymentów zostaną wytypowane dwa ośrodki ziarniste o różnych właściwościach fizykochemicznych. Podczas wyboru materiałów modelowych uwzględniono również potrzebę utylitarnego znaczenia wyników badań. Biorąc pod uwagę:

- charakterystykę zagęszczenia,
- korzystny przedział wilgotności, przy której scala się dany materiał,
- zmienność współczynnika tarcia zewnętrznego w funkcji nacisku jednostkowego,
- rozkład granulometryczny,
- zastosowanie oraz aktualną potrzebę wykorzystania materiału w formie kawałkowej,

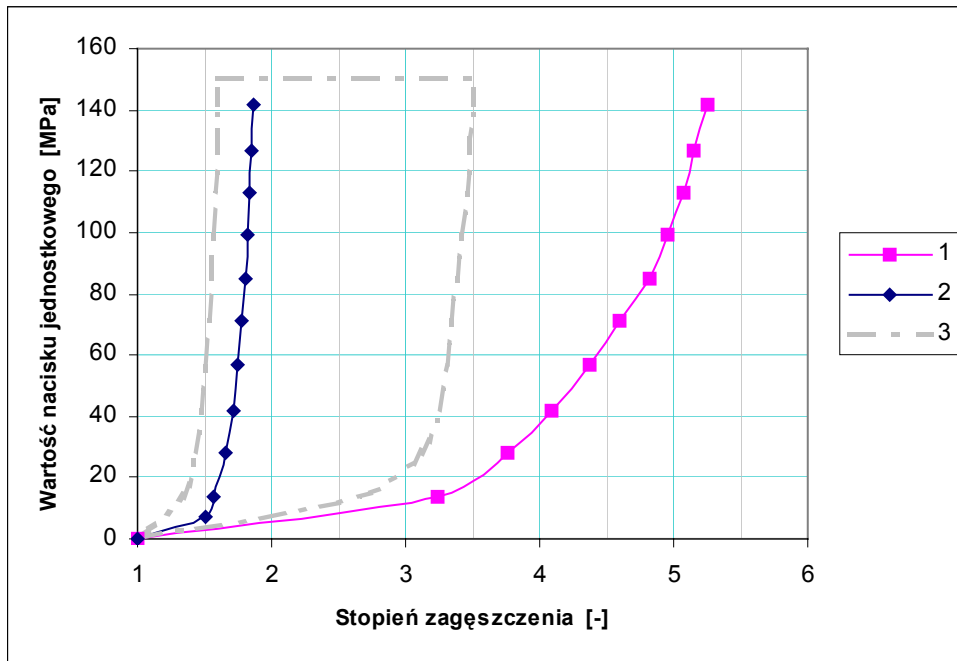
do badań laboratoryjnych postanowiono użyć dwóch materiałów:

- koncentratu rudy miedzi,
- wodorotlenku wapnia.

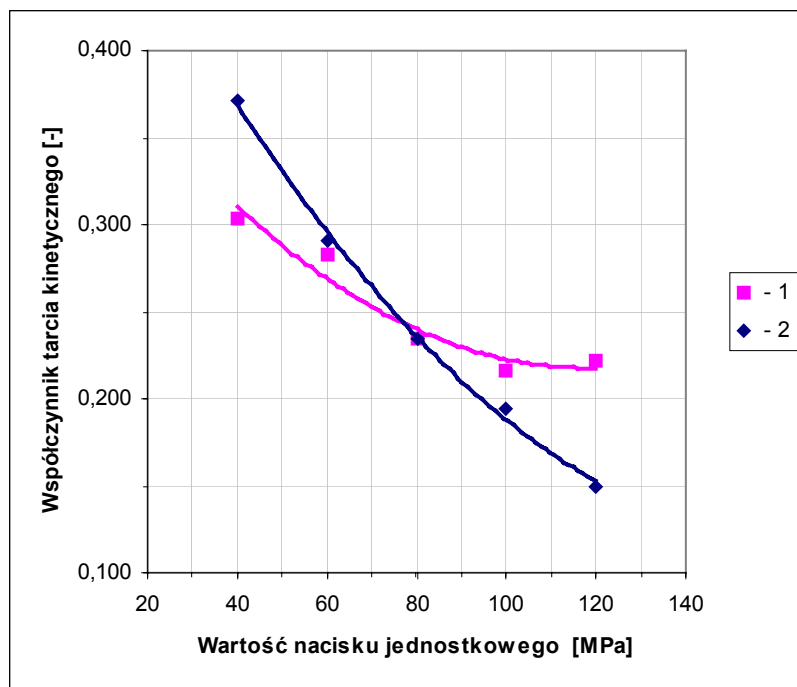
Są to ośrodki sypkie, których własności znacznie różnią się od siebie. Jak wynika z rysunków 2.15 oraz 2.16 posiadają one zróżnicowaną charakterystykę zagęszczania oraz inny charakter zmian współczynnika tarcia zewnętrznego. Natomiast obydwa materiały posiadają bimodalny rozkład granulometryczny [42, 113]. Korzystna wilgotność przygotowanego do scalania w prasie walcowej koncentratu rudy miedzi z dodatkiem ługu posulfitowego zawiera się w przedziale  $w \in [4,0\%; 4,5\%]$  [13, 126]. Natomiast w przypadku wodorotlenku wapnia jest ona inna i waha się w granicach  $w \in [14,9\%; 18,4\%]$  [42, 52, 53, 54, 58].

Zgodnie z założeniem wybór powyższych materiałów do badań został podyktowany również chęcią utylitarnego wykorzystania ich wyników. Koncentrat miedzi w formie kawałkowej jest komponentem wsadowym do wytopu kamienia miedziowego w piecach szybowych. Polskie huty miedzi borykają się obecnie z problemem pogarszania się jakości brykietów, spowodowanym coraz większym stopniem rozdrobnienia koncentratu. Istnieje zatem potrzeba doskonalenia procesu brykietowania tego surowca w odniesieniu do warunków panujących w hutach krajowych. Pylisty

wodorotlenek wapnia jest natomiast materiałem wyjściowym do produkcji wysokopowierzchniowego sorbentu wapniowego do palenisk fluidalnych. Otrzymany



**Rys. 2.15.** Charakterystyki zagęszczania: 1 – wodorotlenek wapnia z dodatkiem 17,5% wody ( $w = 14,9\%$ ) [42]; 2 – mieszanka koncentratu rudy miedzi z dodatkiem 11% ługu posulfitowego ( $w = 4,0\%$ ); 3 – materiały zazwyczaj scalane w prasach walcowych



**Rys. 2.16.** Zależność współczynnika kinetycznego tarcia zewnętrznego od wartości nacisku jednostkowego: 1 – wodorotlenek wapnia z dodatkiem 17,5% wody ( $w = 14,9\%$ ) [42]; 2 – mieszanka koncentratu rudy miedzi z dodatkiem 11% ługu posulfitowego ( $w = 4,0\%$ )

---

metodą dwustopniowej granulacji drobnoziarnisty sorbent charakteryzuje się rozbudowaną teksturą oraz wysoką powierzchnią właściwą i stanowi interesującą ofertę np. dla przemysłu energetycznego [42, 54, 58]. Wodorotlenek wapnia należy do grupy materiałów trudnych do scalania w prasie walcowej. Wyniki badań procesu jego zbrylania będą miały znaczenie poznawcze oraz użytkowe. Koncentrat miedzi jest przykładem materiału drobnoziarnistego, który wymaga brykietowania. Gabaryty brykietów oraz ich wytrzymałość mechaniczna determinowana jest wymaganiami procesu wytopu kamienia miedziowego w piecu szybowym. Natomiast wodorotlenek wapnia należy do grupy materiałów, których kształt po scaleniu nie odgrywa istotnej roli. Zróżnicowane wymagania stawiane wybranym materiałom po scaleniu oraz różne ich przeznaczenie zdecydowały o potrzebie wyraźnego rozgraniczenia badań prowadzonych z użyciem wodorotlenku wapnia oraz koncentratu miedzi.

---

### 3. Cel i zakres pracy

Celem niniejszej pracy jest:

- uzyskanie wiedzy nt. wpływu kształtu powierzchni roboczej walców na wytrzymałość mechaniczną produktu wytworzonego w prasie walcowej oraz zapotrzebowanie energii,
- dokonanie na drodze eksperymentalnej oceny możliwości scalania materiału drobnoziarnistego w prasie walcowej z niesymetrycznym układem zagęszczania,
- opracowanie metody doboru elementów formujących prasy walcowej.

Założono, że rezultaty pracy powinny mieć znaczenie poznawcze oraz użytkowe.

Dla osiągnięcia założonego celu należało:

- opracować metodykę badań korzystając z dotychczasowych doświadczeń,
- przeprowadzić badania eksperymentalne procesu brykietowania koncentratu miedzi w prasie laboratoryjnej dla 2 podstawowych kształtów powierzchni roboczej walców umożliwiających otrzymywanie brykietów z płaszczyzną podziału oraz bez niej,
- rozszerzyć bazę danych i przygotować program komputerowy do zrealizowania badań symulacyjnych procesu brykietowania koncentratu miedzi w prasie walcowej,
- wykonać badania symulacyjne w celu uzupełnienia wiedzy o procesie brykietowania materiału w prasie wyposażonej w elementy formujące, które umożliwiają otrzymywanie brykietów z płaszczyzną podziału oraz bez niej,
- przeprowadzić badania eksperymentalne procesu brykietowania wodorotlenku wapnia w prasie laboratoryjnej dla 2 podstawowych kształtów powierzchni roboczej walców umożliwiających otrzymywanie brykietów z płaszczyzną podziału oraz bez niej,

- 
- przeprowadzić badania eksperymentalne procesu kawałkowania wodorotlenku wapnia w prasie laboratoryjnej dla kształtów powierzchni roboczej walców, umożliwiających otrzymywanie wyprasek w symetrycznym oraz niesymetrycznym układzie zagęszczania,
  - dokonać analizy wyników badań i sformułować wnioski o charakterze poznawczym oraz zalecenia mające znaczenie utylitarne.

---

## 4. Badania procesu brykietowania koncentratu miedzi w prasie walcowej

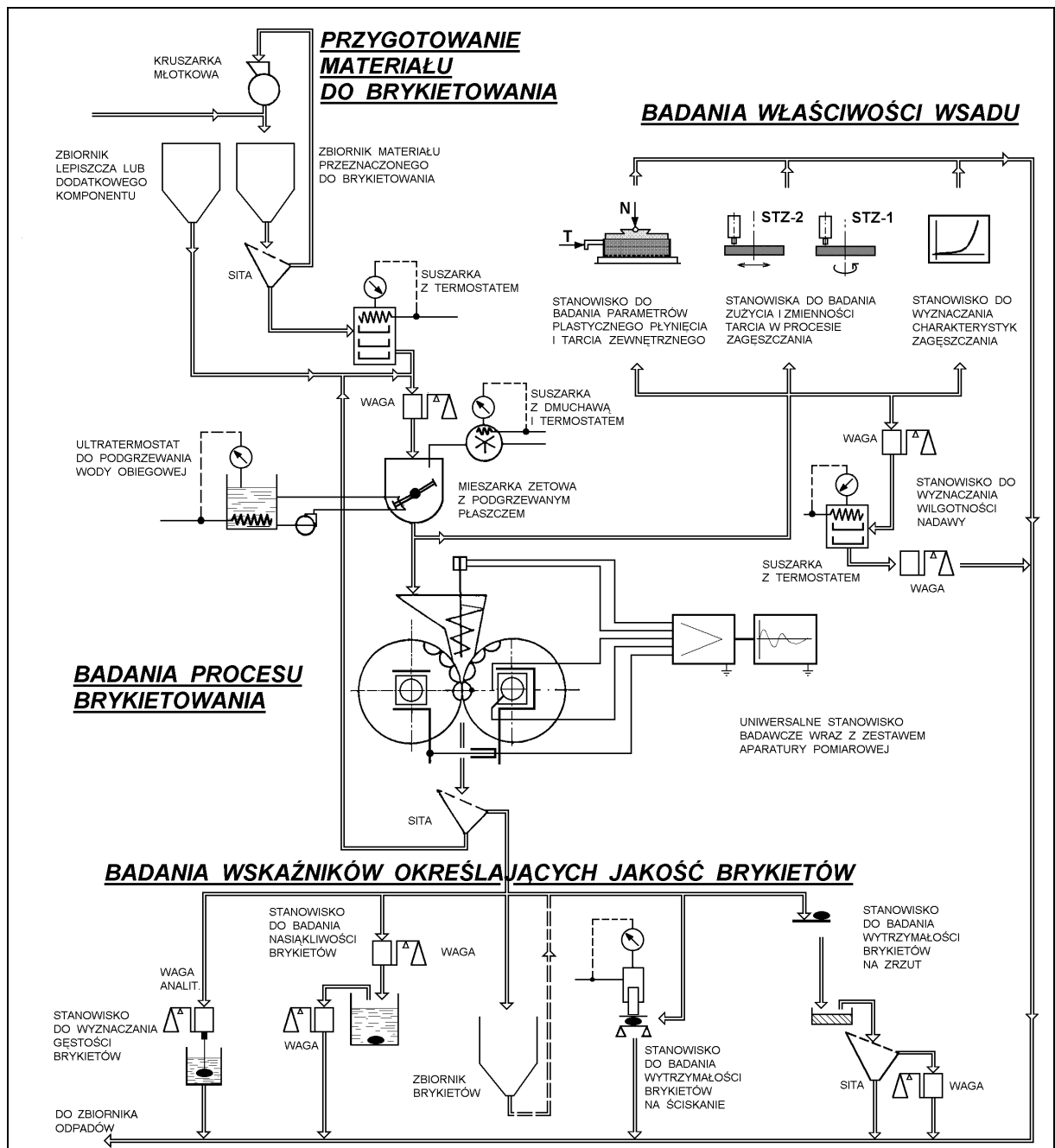
### 4.1. Opis instalacji doświadczalnej

Badania eksperymentalne procesu scalania materiałów drobnoziarnistych w prasie walcowej przeprowadzono przy pomocy urządzeń, wchodzących w skład instalacji laboratoryjnej, do badań procesu scalania materiałów drobnoziarnistych, której schemat przedstawiono na rysunku 4.1. Jej kompleksowy charakter umożliwia: odpowiednie przygotowanie materiału drobnoziarnistego, określenie jego właściwości, przeprowadzenie badań procesu scalania materiału oraz wyznaczenie na drodze eksperymentalnej wskaźników jakości brykietów oraz wyprasek. Istotnym stanowiskiem badawczym instalacji jest laboratoryjna prasa walcowa oznaczona symbolem LPW 450, której widok ogólny pokazano na rysunku 4.2. Składa się ona z następujących zespołów:

- napędu głównego prasy walcowej,
- elektronicznego układu regulacji prędkości obrotowej silnika,
- klatki walców formujących wraz z zasilaczem,
- układu hydraulicznego docisku walca przesuwnego,
- układu pomiarowego.

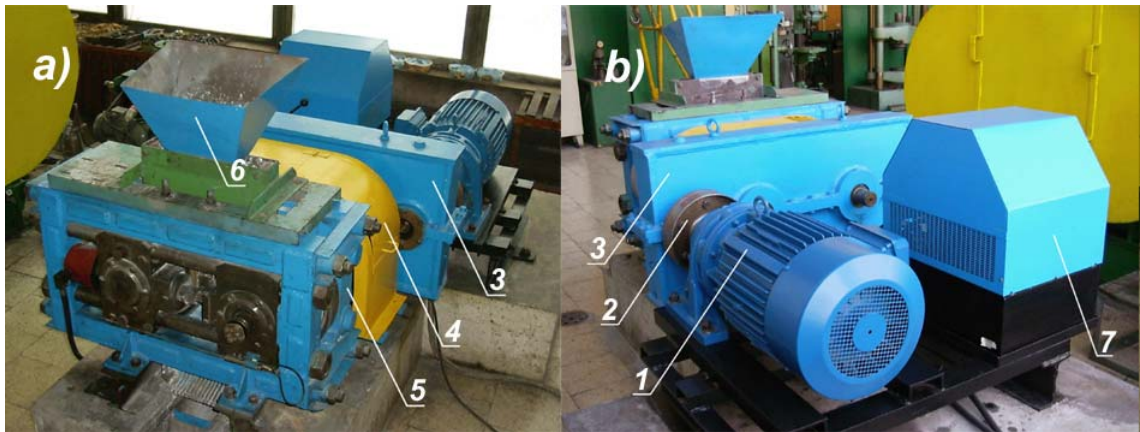
Napęd główny prasy walcowej LPW 450 stanowi motoreduktor serii Drive 6000 typ CHHMS 30-6170-15/T F180MG/4 składający się z silnika asynchronicznego o mocy  $P_S = 22,0$  [kW] i obrotach znamionowych  $n_s = 1470$  [ $\text{min}^{-1}$ ] (przy 50 [Hz]) oraz przekładni cykloidalnej o przełożeniu  $i = 15$  [-]. Jest ona połączona za pośrednictwem sprzęgła podatnego z klatką walców zębatach o przełożeniu całkowitym  $i = 6,43$  [-], w której ostatni stopień ma przełożenie  $i = 1$  [-] i służy do rozdzielenia momentu obrotowego pomiędzy walce robocze. Na czopach wałów wyjściowych klatki walców zębatach zamontowane są sprzęgła Oldham'a, z których jedno posiada sprzęgło cierne, umożliwiające w razie potrzeby korektę położenia względem siebie przeciwległych wgłębień formujących.

Do elektronicznego układu regulacji prędkości obrotowej silnika należy przemiennik częstotliwości Mitsubishi Electronic model FR 540 30K EC oraz filtr FFR-A540-95A-SF100. Układ ten umożliwia płynną regulację wartości prędkości obwodowej walców w zakresie  $0,1 \div 0,5$  [m/s].



**Rys. 4.1.** Schemat instalacji doświadczalnej do badań procesu scalania materiałów drobnziarnistych [75]






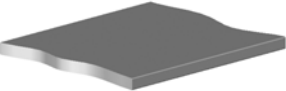
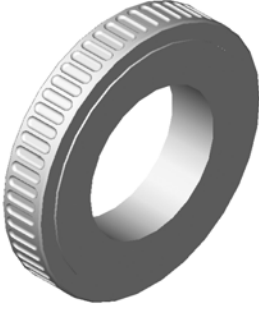
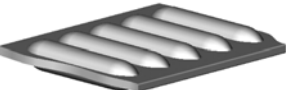
W skład klatki walców formujących wchodzi zamknięty stojak, w którym znajdują się ułożyskowane tocznie dwa walce: nieprzesuwny i przesuwny. Na walcach zamontowane są pierścienie formujące. Podzespół walca przesuwnego podparty jest dwoma siłownikami nurnikowymi. Dwa wały wyjściowe klatki walców zębatach połączone są z wałami walców formujących przy pomocy sprzęgieł Oldham'a. Dzięki temu rozwiązaniu możliwe jest przemieszczenie się walca przesuwnego prasy



**Rys. 4.2.** Laboratoryjna prasa walcowa LPW 450: a) widok od strony klatki walców formujących, b) widok od strony napędu: 1 – motoreduktor z przekładnią typu „CYCLO”, 2 – sprzęgło podatne, 3 – klatka walców zębatach, 4 – obudowa sprzęgieł Oldham’a i sprzęgła ciernego, 5 – klatka walców formujących, 6 – zasilacz grawitacyjny, 7 – źródło hydrauliczne podparcia walca przesuwne

w przypadku przekroczenia założonego maksymalnego obciążenia. W zależności od własności scalanego materiału, może być on podawany w strefę zagęszczania przy pomocy zasilacza grawitacyjnego lub w sposób wymuszony. W tabeli 4.1 przedstawiono rodzaje pierścieni, które stosowano podczas badań laboratoryjnych. Pierwsze z nich umożliwiają uzyskanie brykietów z płaszczyzną podziału, których formę często utożsamia się z kształtem kropli. Natomiast drugi komplet pierścieni formujących służy do wytwarzania brykietów w kształcie siodła, charakteryzujących się brakiem płaszczyzny podziału. Powstają one w warunkach korzystniejszych aniżeli brykiety w kształcie kropli, a także łatwiej opuszczają wgłębienia formujące. Zastosowanie trzeciej pary pierścieni, umożliwia nadanie scalanemu materiałowi postaci płaskiej wypraski. Jej szerokość odpowiada szerokości walców, natomiast grubość jest w przybliżeniu równa wielkości szczeliny pomiędzy nimi. Ostatni komplet pierścieni w tabeli 4.1 służy do wytwarzania pasma materiału powiększonego obustronnie o poprzeczne wypukłości, powstałe w wyniku wykonania na ich powierzchni roboczej wrębów w kształcie poprzecznych rowków. Możliwe jest również zestawienie jednego pierścienia gładkiego, a drugiego z wrębami. Taka konfiguracja elementów formujących stanowi tzw. niesymetryczny układ zagęszczania, w którym uzyskuje się wypraski z jednostronnymi wypukłościami.

**Tabela 4.1.** Charakterystyka podstawowych zestawów pierścieni formujących prasy LPW 450

L p.	Typ pierścieni	Kształt powierzchni formującej	Objętość scalonego materiału [cm <sup>3</sup> ]	Ilość wgłębień formujących	Kształt scalonego materiału
1.	do wytwarzania brykietów z płaszczyzną podziału		13 cm <sup>3</sup>	72	
2.	do wytwarzania brykietów bez płaszczyzny podziału		6,5 cm <sup>3</sup>	90	
3.	do wytwarzania płaskiego pasma		--	--	
4.	do wytwarzania pasma z wypukłościami		Objętość wgłębienia 4,3 cm <sup>3</sup>	60	

Układ hydrauliczny docisku walca przesuwnego posiada typowy charakter i umożliwia elastyczne podparcie walca przesuwnego siłą o wartości 0÷220 [kN]. Pozwala to na realizację określonego nacisku jednostkowego w procesie brykietowania,

---

a także płynne zwiększanie szerokości szczeliny między walcami w przypadku przekroczenia założonego maksymalnego obciążenia.

Układ pomiarowy prasy walcowej LPW 450 składa się z następujących torów pomiarowych:

a) wartości nacisku wywieranego przez zagęszczany materiał drobnoziarnisty na środkową część dna wgłębienia formującego; w skład toru pomiarowego wchodzi:

- czujnik tensometryczny,
- wzmacniacz tensometryczny MTG 232 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik,

b) przemieszczenia walca przesuwne; w skład toru pomiarowego wchodzi:

- indukcyjny czujnik przemieszczeń PTx20,
- przyrząd z falą nośną PE-102 firmy Peltron.

W badaniach z użyciem wodorotlenku wapnia istniała potrzeba określenia podatności scalonego materiału na granulowanie. Wymagało to jego rozdrobnienia, co realizowano za pomocą laboratoryjnej kruszarki młotkowej o średnicy komory kruszenia 0,2 [m], którą przedstawiono na rysunku 4.3. Jej elementem rozdrabniającym



**Rys. 4.3.** Laboratoryjna kruszarka młotkowa wraz z widokiem komory roboczej

są 4 młotki osadzone przegubowo na wirniku, zamocowane wewnątrz korpusu wyłożonego płytami odbojowymi. Materiałem na płyty jest twarde i odporne na ścieranie staliwo. Podczas badań w dolnej przestrzeni komory kruszarki zainstalowano ruszt o prześwicie 3 [mm]. Układ napędowy kruszarki stanowi silnik prądu zmiennego typ DMK 2/4 RC/S o mocy  $P_s = 1,6$  [kW] i obrotach znamionowych  $n_s = 1430$  [ $\text{min}^{-1}$ ] (przy 50 [Hz]) wraz z przemiennikiem częstotliwości. Moment obrotowy z silnika przenoszony jest za pomocą przekładni pasowej o przełożeniu  $i = 1$  [-] bezpośrednio na wirnik. Poprzez przemiennik częstotliwości istnieje możliwość zmiany wartości prędkości obwodowej młotków w zakresie od 0 do 17,4 [m/s].

## 4.2. Metodyka badań

### 4.2.1. Charakterystyka materiałów użytych do badań

Do badań brykietowania rudy miedzi użyto mieszanki składającej się z koncentratu pochodzącego z 3 kopalń. Komponenty wyjściowe zostały dostarczone z HM „Głogów” i dodatkowo opatrzone podanymi poniżej informacjami:

- koncentrat z Kopalni „Lubin” - 24.08.2007 zmiana III,
- koncentrat z Kopalni „Polkowice” - 25.08.2007 zmiana III,
- koncentrat z kopalni „Rudna” - 24.08.2007 zmiana II,

Wyniki badań ich wilgotności i gęstości nasypowej, a także mieszanki koncentratów rudy miedzi użytej do brykietowania podano w tabeli 4.2.

**Tabela 4.2.** Wyniki badań wilgotności i gęstości nasypowej mieszanki koncentratów rudy miedzi użytej do brykietowania oraz jej składników [126]

Lp.	Materiał	Wilgotność [%]	Gęstość nasypowa [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]
1.	Koncentrat miedzi „Lubin”	7,45	1,07
2.	Koncentrat miedzi „Polkowice”	7,15	1,31
3.	Koncentrat miedzi „Rudna”	7,35	1,15
4.	Mieszanka koncentratów miedzi	~8	1,18

Stosowanym w eksperymentach lepiszczem był ług posulfitowy, który wykorzystuje się obecnie do brykietowania koncentratów rudy miedzi w warunkach przemysłowych. Został on również dostarczony z HM „Głogów” i oznaczony symbolem „do produkcji” z dnia 29.08.2007 zmiana I. Gęstość ługu przy temperaturze

---

otoczenia  $t = 20^{\circ}\text{C}$  wynosiła  $1,27 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ , zawartość suchej masy  $49,4\%$  natomiast lepkość dynamiczna w temperaturze  $t = 60^{\circ}\text{C}$  stanowiła  $62,1 \text{ [cP]}$ .

#### **4.2.2. Przygotowanie materiału do brykietowania**

Do badań laboratoryjnych wykorzystywano mieszankę koncentratu rudy miedzi o składzie i własnościach odpowiadających materiałowi stosowanemu w hutach krajowych. W pierwszym etapie jej przygotowania, zestawiano koncentraty poszczególnych rud miedzi odpowiednio w ilościach masowych:

- „Polkowice”  $45\%$ ,
- „Rudna”  $40\%$ ,
- „Lubin”  $15\%$ ,

tak, aby łączna ich masa wynosiła ok.  $150 \text{ [kg]}$ . Następnie dokładnie mieszano je w laboratoryjnej mieszarce zetowej, a także ze względu na sposób przechowywania koncentratów nie chroniący ich w pełni przed utratą wilgoci, dodawano wodę. Czas mieszania wynosił ok.  $1 \text{ godziny}$ , po czym wyznaczano wilgotność mieszanki. Procedurę dodawania wody oraz uśredniania powtarzano do momentu osiągnięcia przez nią wilgotności ok.  $8\%$ , a więc takiej, która występuje w warunkach przemysłowych. Do każdej przeprowadzonej laboratoryjnej próby brykietowania z partii wcześniej przygotowanej mieszanki koncentratu rud miedzi pobierano  $10 \text{ [kg]}$  materiału, dodawano  $11\%$  ługu posulfitowego w odniesieniu do jego masy, a następnie mieszano oraz suszono przez okres ok.  $2 \text{ godzin}$  do czasu osiągnięcia wilgotności, zawierającej się w przedziale  $w \in [3,75\%; 5,25\%]$ . Proces ten prowadzono w laboratoryjnej mieszarce zetowej średniej wielkości z podgrzewanym płaszczem wodnym. W celu uproszczenia opisu badań oraz ich wyników odpowiednio przygotowaną mieszankę koncentratu rudy miedzi w dalszej części pracy nazwano „koncentratem miedzi”.

#### **4.2.3. Badanie wilgotności materiału**

Oznaczanie wilgotności prowadzono metodą wagową zgodnie z normą PN-80/G-04511. Próbkę przygotowanej do brykietowania mieszanki suszono w suszarce SPT-200 w temperaturze  $105^{\circ}\text{C}$ , do uzyskania jej stałej masy, sprawdzając jej ubytek na elektronicznej wadze kamertonowej marki Vibra typ AJH 420 CE. Wilgotność nadawy obliczano z następującego wzoru:

---

$$w = \frac{m_w - m_s}{m_w} \cdot 100\%$$

gdzie:

w - wilgotność mieszanki [%],

$m_w$  - masa próbki przed suszeniem [g],

$m_s$  - masa próbki po suszeniu [g].

Za reprezentatywną uznano średnią wilgotność z 2 oznaczeń.

#### 4.2.4. Przebieg procesu brykietowania

Przygotowany do brykietowania koncentrat miedzi z ługiem posulfitowym wg sposobu przedstawionego w punkcie 4.2.2 dozowano w strefę zagęszczania prasy walcowej. W pierwszym etapie badań stosowano zasyp grawitacyjny, a następnie wymuszony, gdzie elementem roboczym był ślimak walcowy o średnicy zewnętrznej  $D_z = 70$  [mm], skoku  $S = 60$  [mm], oraz kącie pochylenia linii śrubowej  $\varphi = 44^\circ$ . Jego prędkość obrotowa wynosiła odpowiednio 78, 85, 90 [ $\text{min}^{-1}$ ]. Brykietując koncentrat miedzi z ługiem posulfitowym wykorzystano dwa typy pierścieni formujących umożliwiające wytwarzanie brykietów:

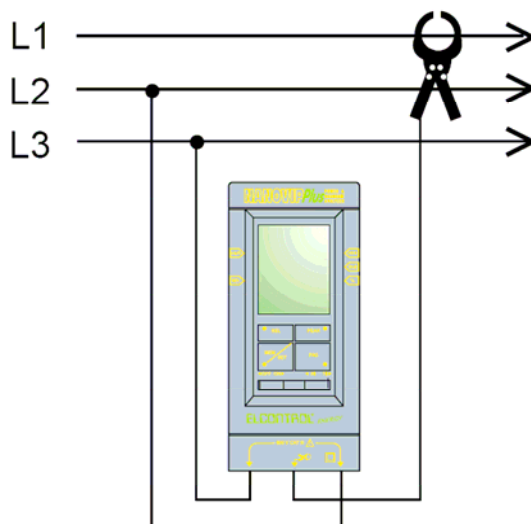
- w kształcie kropli o wymiarach 40x30x20 [mm] i objętości ok. 13 [ $\text{cm}^3$ ] zapewniających zachowanie geometrycznej skali podobieństwa w odniesieniu do pras przemysłowych stosowanych w HM Głogów,
- w kształcie siodła o wymiarach 31x30x13 [mm] i objętości ok. 6,5 [ $\text{cm}^3$ ] uznanych na podstawie dotychczasowych doświadczeń jako korzystne dla prasy laboratoryjnej o średnicy walców 450 [mm].

Przygotowany materiał brykietowano w prasie LPW 450 z zachowaniem szerokości szczeliny między walcami a  $\approx 1,5$  [mm], przy wartości prędkości obwodowej walców  $v_w = 0,15$  [m/s], zapewniającej prawidłową współpracę brykietarki z zasilaczem ślimakowym. Podczas prób mierzono wartość nacisku jednostkowego wywieranego na dno wgłębienia formującego, szerokość szczeliny między walcami, oraz pobór mocy prądu elektrycznego przez silnik układu napędowego prasy. Wytworzone brykiety gromadziły się w pojemniku umieszczonym pod prasą, skąd pobierano je losowo do badań. Bezpośrednio po próbie określano ich wytrzymałość na zrzut oraz ściskanie.

---

#### 4.2.5. Pomiar poboru mocy prądu przez silnik układu napędowego prasy walcowej

Podczas badań procesu scalania materiałów drobnoziarnistych mierzono moc czynną prądu elektrycznego pobieranego przez silnik napędu głównego prasy oraz zasilający go przemiennik częstotliwości. Pomiary wykonywano uniwersalnym analizatorem parametrów sieci elektrycznych z analizą harmoniczną Nanovip Plus, który podłączono do układu napędowego wg rysunku 4.4. Akwizycji danych dokonywano przy pomocy przenośnego komputera klasy PC, z częstotliwością próbkowania 0,5 [Hz]. Za moc czynną prądu elektrycznego pobieraną przez układ napędu głównego prasy uznano średnią z 7 najwyższych wskazań (załącznik 2) przy odrzuceniu 3 maksymalnych odczytów.



**Rys. 4.4.** Sposób podłączenia uniwersalnego analizatora parametrów sieci elektrycznych z analizą harmoniczną Nanovip Plus podczas pomiarów poboru mocy czynnej przez układ napędowy prasy walcowej LPW 450: L1, L2, L3 – poszczególne fazy prądu 3-fazowego

#### 4.2.6. Badanie wytrzymałości brykietów na zrzut

Z uwagi na brak stosownej normy wytrzymałość brykietów na zrzut określano według metodyki opracowanej w Katedrze Systemów Wytwarzania AGH (KSW AGH). Zgodnie z nią pobierano losowo 10 brykietów, a następnie jednocześnie zrzucano je z wysokości 2,0 [m] na płytę stalową o grubości 120 [mm]. Czynność powtarzano trzykrotnie dla każdej partii brykietów, a następnie przesiewano je przez sito 18 x 18 [mm]. Wytrzymałość brykietów na zrzut obliczano z podanego wzoru:

---

$$K = \frac{B_z}{B} \cdot 100\%$$

gdzie:

K - wytrzymałość brykietów na zrzut [%],

B - masa 10 brykietów przed zrzutami [g],

B<sub>z</sub> - masa pozostających na sicie brykietów [g].

Z wcześniej przeprowadzonych badań w laboratorium scalania materiałów drobnoziarnistych KSW AGH wynika, że w tym przypadku niezbędne jest wykonanie 3 pomiarów [13, 82, 96]. Określono to za pomocą metody badania dobroci ciągu pseudolosowego [49], korzystając z testu t-Studenta przy założeniu, że wartości rozpatrywanych wielkości mają rozkłady normalne, a dopuszczalny błąd szacunku średniej  $e_0 = 5\%$ .

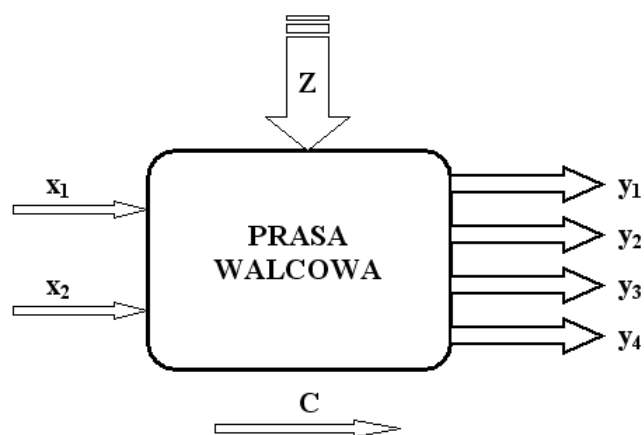
#### **4.2.7. Badanie wytrzymałości brykietów na ściskanie**

Przyjęto, że miarę wytrzymałości brykietu na ściskanie stanowi wartość siły niszczącej go w próbie jednoosiowego ściskania pomiędzy dwoma płaskimi równoległymi powierzchniami. Określano ją przy pomocy maszyny wytrzymałościowej Zwick 1120. Zgodnie z założeniami przedstawionymi w pkt. 4.2.6 określono, że z każdej partii scalonego materiału, badaniom należy poddać 10 losowo wybranych brykietów. Za reprezentatywną dla danej próby uznano średnią z pomiarów, przy czym dwie skrajne wartości siły odrzucano.

### **4.3. Badania eksperymentalne procesu brykietowania koncentratu miedzi w prasie walcowej z grawitacyjnym układem podawania materiału**

#### **4.3.1. Program badań eksperymentalnych**

Na podstawie analizy wyników badań [13, 126] brykietowania koncentratu miedzi w prasie walcowej z zasypem grawitacyjnym przyjęto model obiektu badań, który przedstawiono na rysunku 4.5.



**Rys. 4.5.** Schemat przyjętego modelu obiektu badań w przypadku grawitacyjnego podawania materiału w strefę zagęszczania prasy

W przypadku eksperymentów realizowanych w prasie walcowej LPW 450 wyposażonej w zasyp grawitacyjny zbiór wielkości wejściowych tworzą następujące czynniki:

- $x_1$  – rodzaj powierzchni roboczej walców,
- $x_2$  – wilgotność mieszanki przygotowanej do brykietowania,
- czynniki ustalone podczas badań, które tworzą podzbiór C,
- czynniki zakłócające, tworzące podzbiór Z.

Natomiast w zbiorze czynników wyjściowych wyróżnia się:

- $y_1$  – wytrzymałość brykietów na zrzut,
- $y_2$  – wytrzymałość brykietów na ściskanie,
- $y_3$  – wartość nacisku jednostkowego w procesie brykietowania,
- $y_4$  – pobór mocy prądu elektrycznego przez układ napędowy prasy LPW 450.

Przed przystąpieniem do badań, kierując się kryterium maksymalnej informatywności zdecydowano, że zostaną one wykonane wg planu statystycznego zdeterminowanego kompletnego różnowartościowego PS/DK–V [121]. Jednak podczas wykonywania eksperymentów okazało się, że ze względu na specyfikę pomiaru wilgotności przygotowanej do brykietowania mieszanki, trudno jest uzyskać jej powtarzalność dla kolejnych partii koncentratu miedzi. W tym przypadku problem stwarza długi czas pomiaru, który przeciętnie wynosi ok. 24 godziny, co uniemożliwia wyznaczanie na bieżąco momentu zakończenia procesu suszenia materiału. Podjęto próby wyznaczenia wilgotności nadawy tzw. metodą „szybką”, jednak pomiary te były obarczone dużym błędem w porównaniu z metodą klasyczną. Wyznaczenie w sposób eksperymentalny czasu suszenia mieszanki do założonej wilgotności, również zakończyło się niepowodzeniem. Przygotowując więc materiał do scalania kierowano się głównie

---

zdołym doświadczeniem. Jego wilgotność określano wstępnie z pewnym przybliżeniem na podstawie obserwacji zjawisk zachodzących podczas suszenia połączonego z mieszaniem. Dokładna wilgotność brykietowanego koncentratu miedzi znana była dopiero średnio po okresie doby od czasu wykonania próby. Dlatego zdecydowano się na przeprowadzenie badań eksperymentalnych dla określonego przedziału wilgotności materiału  $w \in [3,75\%, 5,25\%]$ , a nie wartości ściśle zdeterminowanych. Podczas badań starano się jednocześnie wykonywać eksperymenty tak, by względna różnica wilgotności dwóch sąsiednich prób, prowadzonych w danym układzie zagęszczania wyniosła ok.  $\Delta w = 0,3\%$ . Planując badania procesu brykietowania koncentratu miedzi w prasie walcowej LPW 450 z zasypem grawitacyjnym, uściślono czynniki niezależne:

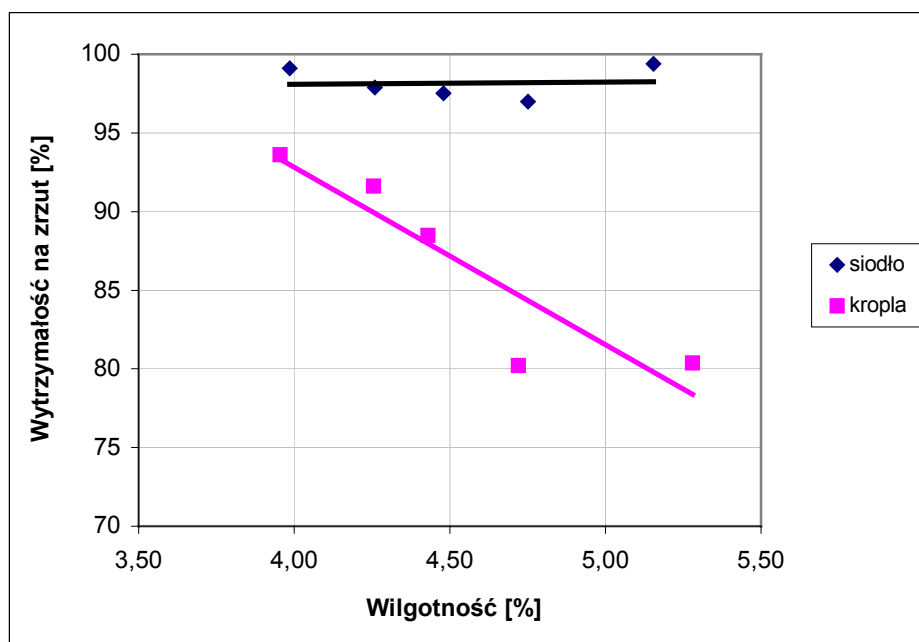
- rodzaj powierzchni roboczej walców:
  - $x_{11}$  – umożliwiająca wytwarzanie brykietów w kształcie siodła,
  - $x_{12}$  – umożliwiająca wytwarzanie brykietów w kształcie kropli,
- wilgotność mieszanki przygotowanej do brykietowania:
  - $x_2$  –  $[3,75\%; 5,25\%]$ .

#### 4.3.2. Wyniki badań eksperymentalnych

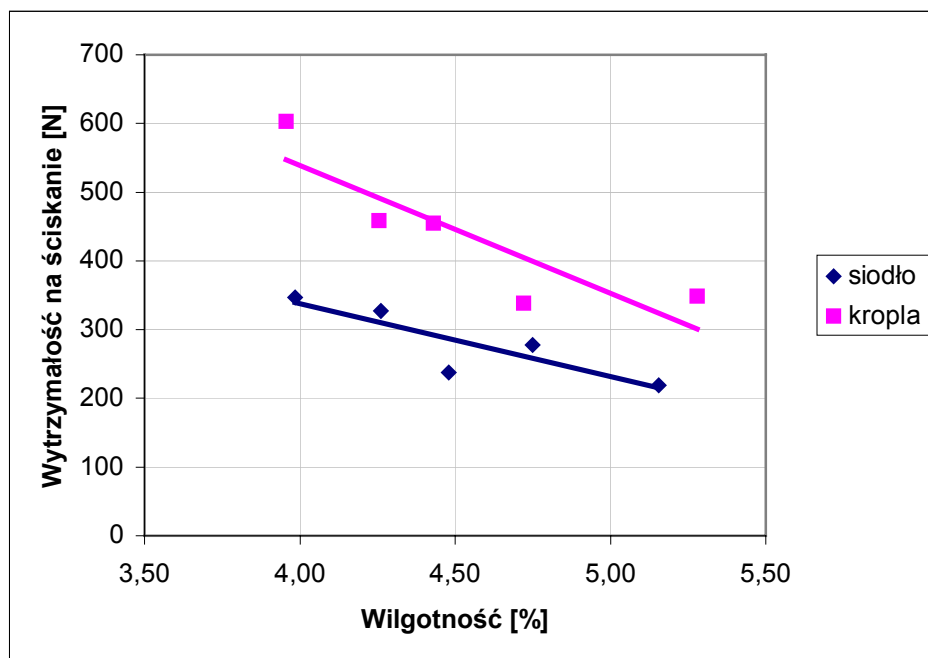
Badania eksperymentalne brykietowania koncentratu miedzi w prasie LPW 450 z zasypem grawitacyjnym prowadzono wg planu zamieszczonego w pkt. 4.3.1. Bezpośrednio po scaleniu wytworzone brykiety poddawano próbom wytrzymałości na zrzut oraz na ściskanie zgodnie z metodyką zawartą w punktach 4.2.6 oraz 4.2.7. Uzyskane wyniki przedstawiono poniżej na rysunkach 4.6 oraz 4.7. Podczas przeprowadzania każdego eksperymentu mierzono również moc prądu elektrycznego pobieraną przez silnik układu napędowego prasy LPW 450, co zilustrowano na rysunku 4.9, a następnie obliczano jednostkowe zapotrzebowanie energii podczas brykietowania koncentratu miedzi (rys. 4.10). Mierzono również nacisk jednostkowy wywierany na dno wgłębienia formującego. Wyniki uśrednione z 3 pomiarów pokazano na rysunku 4.8.

Wyniki przeprowadzonych eksperymentów dowodzą, że kształt powierzchni roboczej elementów formujących, stosowanych w badaniach ma znaczący wpływ na własności mechaniczne brykietów oraz pobór mocy układu napędowego prasy.

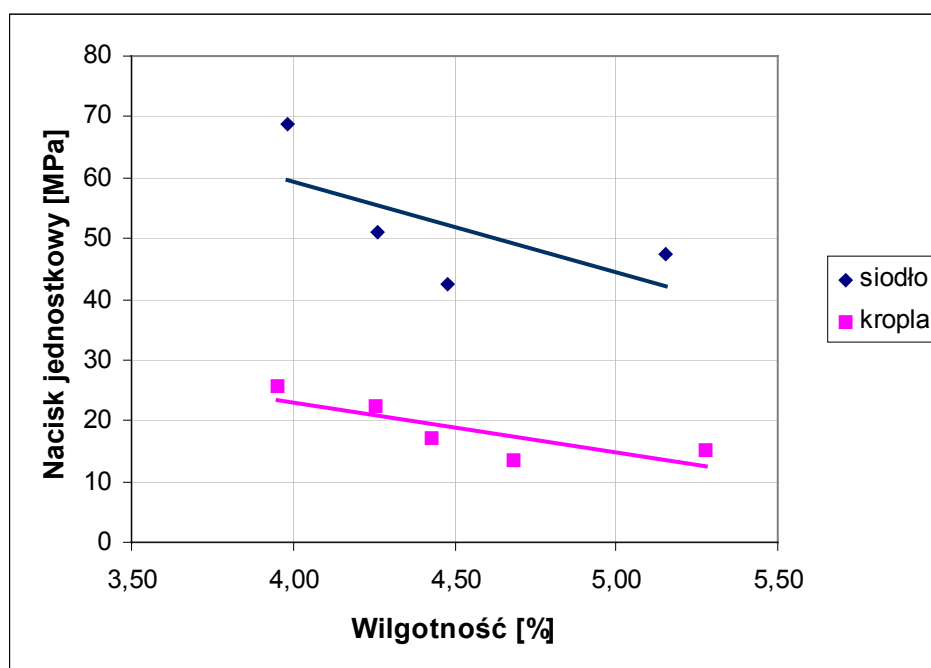
Wzrost wilgotności nadawy w przypadku brykietów w kształcie kropli powoduje zmniejszenie ich wytrzymałości na zrzut. Nie obserwuje się natomiast jej wpływu na wytrzymałość na zrzut brykietów w kształcie siodła. Wzrost wilgotności nadawy powoduje również znaczne zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie obu rodzajów brykietów, która jest średnio ok. 70% wyższa dla brykietów w kształcie kropli wynikającego z ich większego przekroju poprzecznego. Stosowanie powierzchni roboczej umożliwiającej wytwarzanie brykietów w formie siodła, powoduje prawie 2,5-krotny wzrost jednostkowego zapotrzebowania energii w porównaniu z przypadkiem stosowania walców z wgłębieniami umożliwiającymi wytworzenie brykietów w kształcie kropli. Nacisk jednostkowy wywierany na dno wgłębienia formującego jest ok. 190% wyższy w przypadku wytwarzania brykietów w kształcie siodła. W celu szerszego określenia wpływu nacisku jednostkowego na wytrzymałość brykietów w kształcie kropli wskazane jest przeprowadzenie badań brykietowania koncentratu miedzi w prasie walcowej z wymuszonym podawaniem materiału.



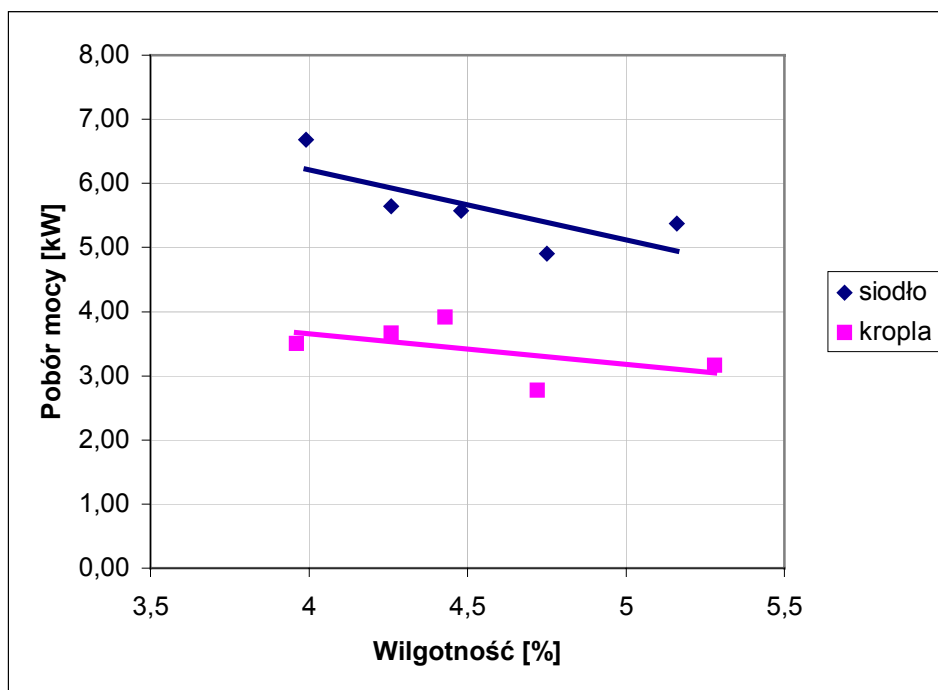
**Rys. 4.6.** Wpływ wilgotności nadawy na wytrzymałość brykietów na zrzut wytworzonych z koncentratu miedzi w prasie LPW 450 z zasypem grawitacyjnym



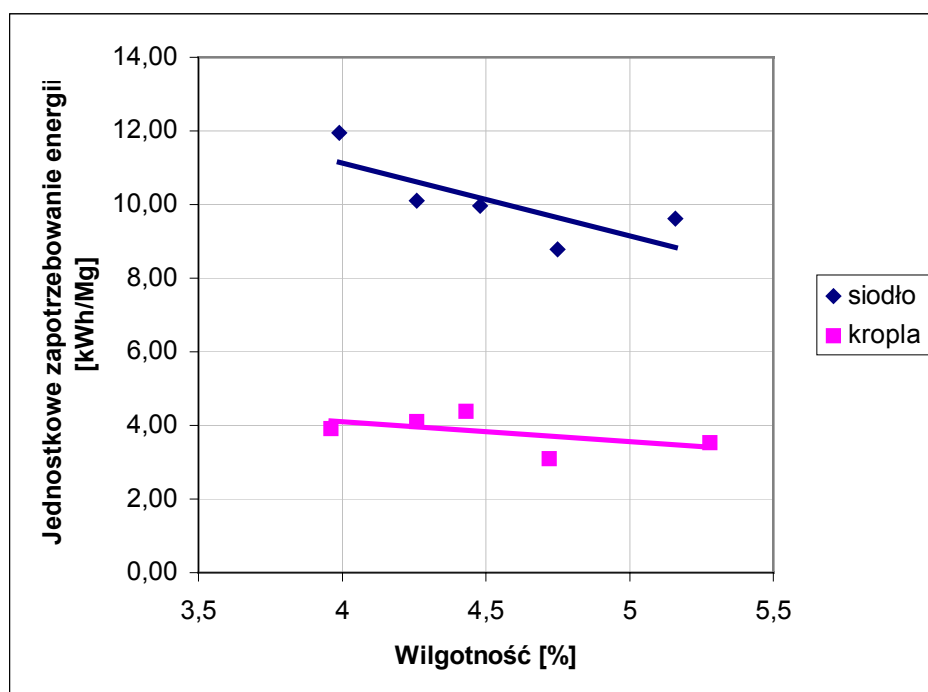
**Rys. 4.7.** Wpływ wilgotności nadawy na wytrzymałość brykietów na ściskanie wytworzonych z koncentratu miedzi w prasie LPW 450 z zasypem grawitacyjnym



**Rys. 4.8.** Wpływ wilgotności nadawy na nacisk jednostkowy wywierany na dno wgłębienia formującego podczas brykietowania koncentratu miedzi w prasie walcowej LPW 450 z zasypem grawitacyjnym



**Rys. 4.9.** Wpływ wilgotności nadawy na pobór mocy silnika napędu głównego prasy walcowej LPW 450 z zasypem grawitacyjnym podczas brykietowania koncentratu miedzi



**Rys. 4.10.** Wpływ wilgotności nadawy na zapotrzebowanie energii podczas brykietowania koncentratu miedzi w prasie walcowej LPW 450 z zasypem grawitacyjnym

---

### 4.3.3. Wnioski

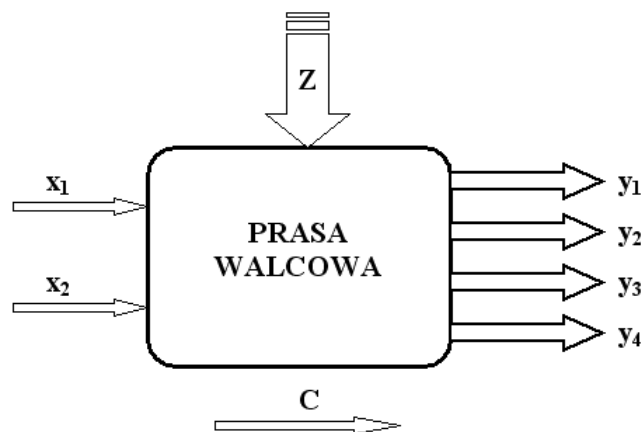
Na podstawie analizy wyników badań procesu brykietowania koncentratu miedzi w laboratoryjnej prasie walcowej LPW 450 z zasypem grawitacyjnym, uzyskanych dla wielkości wejściowych zawierających się w założonych przedziałach sformułowano podane poniżej wnioski:

- Zgodnie z przewidywaniami wzrost wilgotności nadawy powoduje pogorszenie się jakości brykietów, co wynika ze spadku wartości nacisku jednostkowego, posiadającego charakter wynikowy.
- Kształt powierzchni roboczej elementów formujących, stosowanych w badaniach ma znaczący wpływ na własności mechaniczne brykietów oraz pobór mocy układu napędowego prasy.
- Wzrost wilgotności nadawy powoduje znaczne zmniejszenie wytrzymałości na zrzut brykietów w kształcie kropli, która jest mniejsza w porównaniu z wytrzymałością brykietów w formie siodła.
- Wyższą wytrzymałością na ściskanie charakteryzują się natomiast brykiety w kształcie kropli, co wynika z ich większego przekroju poprzecznego.
- Stosowanie powierzchni roboczej umożliwiającej wytwarzanie brykietów w formie siodła, powoduje prawie 2,5-krotny wzrost jednostkowego zapotrzebowania energii w porównaniu z przypadkiem stosowania walców z wgłębieniami umożliwiającymi wytworzenie brykietów w kształcie kropli.
- W celu szerszego określenia wpływu nacisku jednostkowego na wytrzymałość brykietów w kształcie kropli należy przeprowadzić badania brykietowania koncentratu miedzi w prasie walcowej z wymuszonym podawaniem materiału.

## 4.4. Badania eksperymentalne procesu brykietowania koncentratu miedzi w prasie walcowej z wymuszonym podawaniem materiału

### 4.4.1. Program badań eksperymentalnych

Na podstawie analizy wyników badań [13] procesu brykietowania koncentratu miedzi w prasie walcowej z zasypem wymuszonym przyjęto model obiektu badań, który przedstawiono na rysunku 4.11.



**Rys. 4.11.** Schemat przyjętego modelu obiektu badań w przypadku wymuszonego podawania materiału w strefę zagęszczania prasy

W przypadku eksperymentów realizowanych w prasie walcowej LPW 450 wyposażonej w zasilacz ślimakowy zbiór wielkości wejściowych tworzą następujące czynniki:

- $x_1$  – prędkość obrotowa ślimaka,
- $x_2$  – wilgotność mieszanki przygotowanej do brykietowania,
- czynniki ustalone podczas badań, które tworzą podzbiór C,
- czynniki zakłócające, tworzące podzbiór Z.

Natomiast w zbiorze czynników wyjściowych wyróżnia się:

- $y_1$  – wytrzymałość brykietów na zrzut,
- $y_2$  – wytrzymałość brykietów na ściskanie,
- $y_3$  – wartość nacisku jednostkowego w procesie brykietowania,
- $y_4$  – pobór mocy prądu elektrycznego przez układ napędowy prasy LPW 450.

Podobnie jak w poprzednim przypadku przed przystąpieniem do badań, kierując się kryterium maksymalnej informatywności zdecydowano, że zostaną one wykonane wg planu statystycznego zdeterminowanego kompletnego różnowartościowego PS/DK–V [121]. Jednak z przyczyn już omówionych założono, że tak jak w pkt. 4.3.1 parametr  $x_2$ , czyli wilgotność mieszanki przygotowanej do brykietowania nie będzie przyjmował wartości ściśle zdeterminowanych, a jedynie zawierał się w przedziale  $w \in [3,75\%; 5,25\%]$ . Przeprowadzenie kolejnych eksperymentów wymagało przebudowy układu zagęszczania prasy LPW 450 polegającej na zastąpieniu zasobnika grawitacyjnego zasilaczem ślimakowym. Planując badania eksperymentalne uściślono czynniki niezależne:

- prędkość obrotowa ślimaka:
  - $x_{21} \quad - \quad 78 \text{ [min}^{-1}\text{]},$

---

$x_{22}$  – 85 [min<sup>-1</sup>],

$x_{23}$  – 90 [min<sup>-1</sup>],

- wilgotność mieszanki przygotowanej do brykietowania:

$x_3$  – [3,75%; 5,25%].

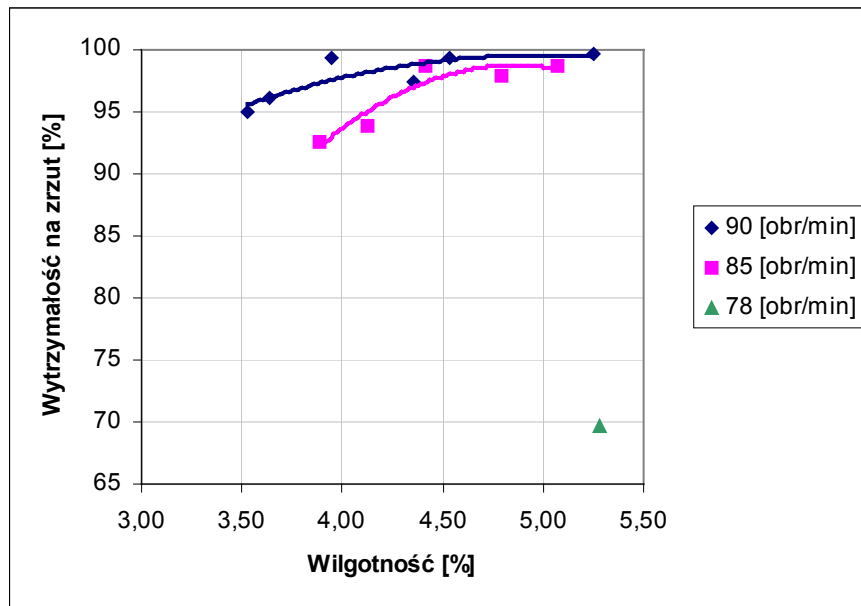
Po przeprowadzeniu pierwszego eksperymentu przy prędkości obrotowej ślimaka wynoszącej 78 [min<sup>-1</sup>] zauważono, że brykiety są wyraźnie niedogęszczone. Powodowało to znaczące obniżenie ich własności wytrzymałościowych. Dlatego zrezygnowano z prowadzenia dalszych badań przy tej prędkości obrotowej ślimaka.

#### 4.4.2. Wyniki badań eksperymentalnych

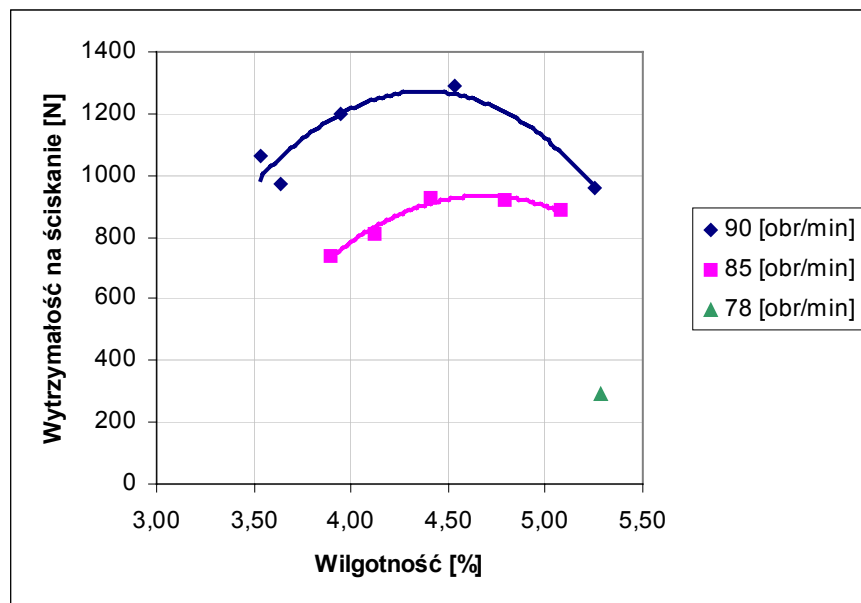
Badania eksperymentalne brykietowania koncentratu miedzi w prasie LPW 450 z zasypem wymuszonym prowadzono wg planu zamieszczonego w pkt. 4.4.1. Bezpośrednio po scaleniu wytworzone brykiety poddawano próbom wytrzymałości na zrzut oraz na ściskanie zgodnie z metodyką zawartą w punktach 4.2.6 oraz 4.2.7. Uzyskane wyniki przedstawiono poniżej na rysunkach 4.12 oraz 4.13. Podczas przeprowadzania każdego eksperymentu mierzono również moc prądu elektrycznego pobieraną przez silnik układu napędowego prasy LPW 450, co zilustrowano na rysunku 4.15, a następnie obliczano jednostkowe zapotrzebowanie energii podczas brykietowania koncentratu miedzi (rys. 4.16). Mierzono również nacisk jednostkowy wywierany na dno wgłębienia formującego, a wyniki pomiarów pokazano na rysunku 4.14.

Wyniki przeprowadzonych eksperymentów dowodzą, że zastosowanie wymuszonego podawania materiału, realizowanego za pomocą zasilacza ślimakowego, powoduje wzrost wytrzymałości brykietów w kształcie kropli w porównaniu z zasypem grawitacyjnym. Wynika to przede wszystkim ze zwiększenia nacisku jednostkowego. W badanym zakresie wartości przy wzroście prędkości obrotowej ślimaka obserwuje się poprawę wytrzymałości mechanicznej scalonego produktu. Jak wykazano eksperymentalnie prędkość obrotowa ślimaka wynosząca 78 [min<sup>-1</sup>] jest zbyt niska dla zastosowanego układu zagęszczania, ponieważ zbrylony materiał jest wyraźnie niedogęszczone. Natomiast przy wartościach prędkości wynoszących odpowiednio 85 oraz 90 [min<sup>-1</sup>] brykiety wytworzone z koncentratu miedzi o wilgotności powyżej 4,5% posiadają wytrzymałość na zrzut bliską 100%. Najwyższą wytrzymałość na ściskanie otrzymano przy wilgotności nadawy ok. 4,5%. W przypadku powierzchni

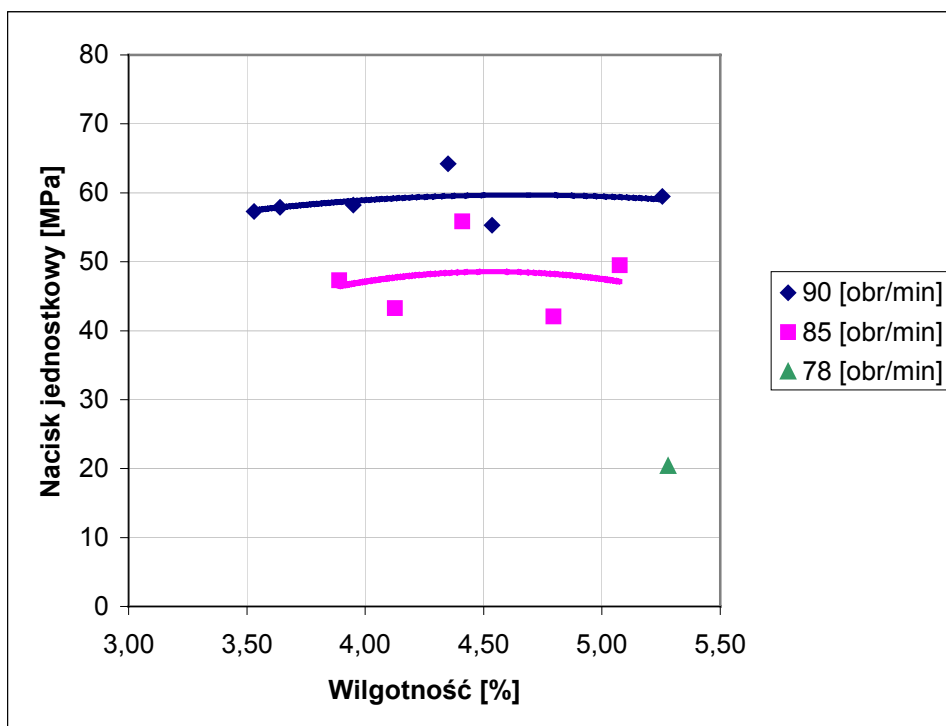
roboczej umożliwiającej wytwarzanie brykietów w kształcie kropli zastosowanie zasilacza ślimakowego zmniejsza wpływ wilgotności nadawy na wartość nacisku jednostkowego lecz powoduje zwiększenie o ok. 60% mocy pobieranej przez układ napędowy w porównaniu ze stosowaniem grawitacyjnego zasypu materiału.



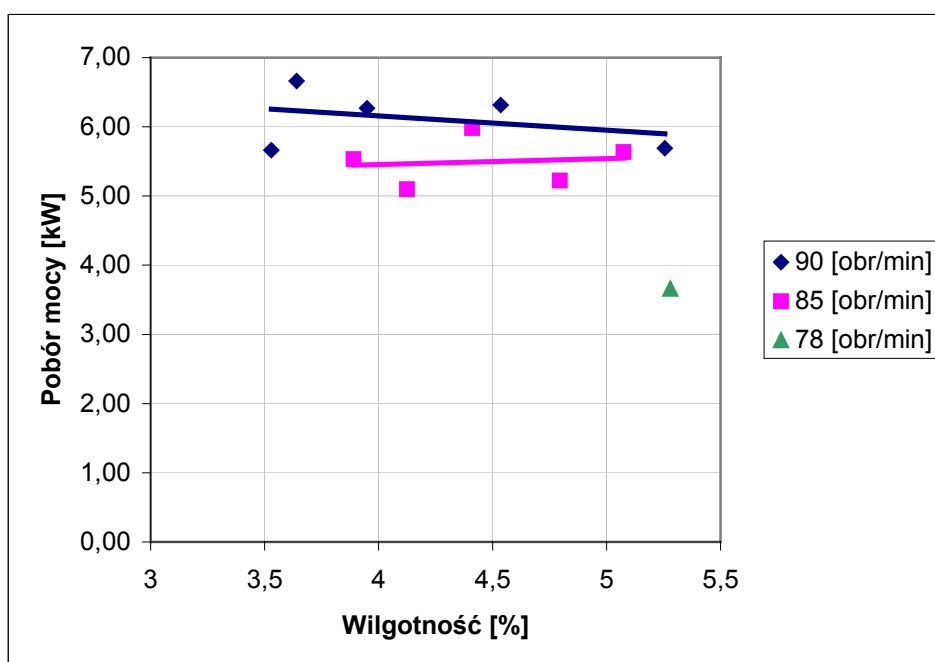
**Rys. 4.12.** Wpływ prędkości obrotowej ślimaka na wytrzymałość brykietów na zrzut wytworzonych w prasie walcowej LPW 450 z koncentratu miedzi o różnej wilgotności – brykiety w kształcie kropli



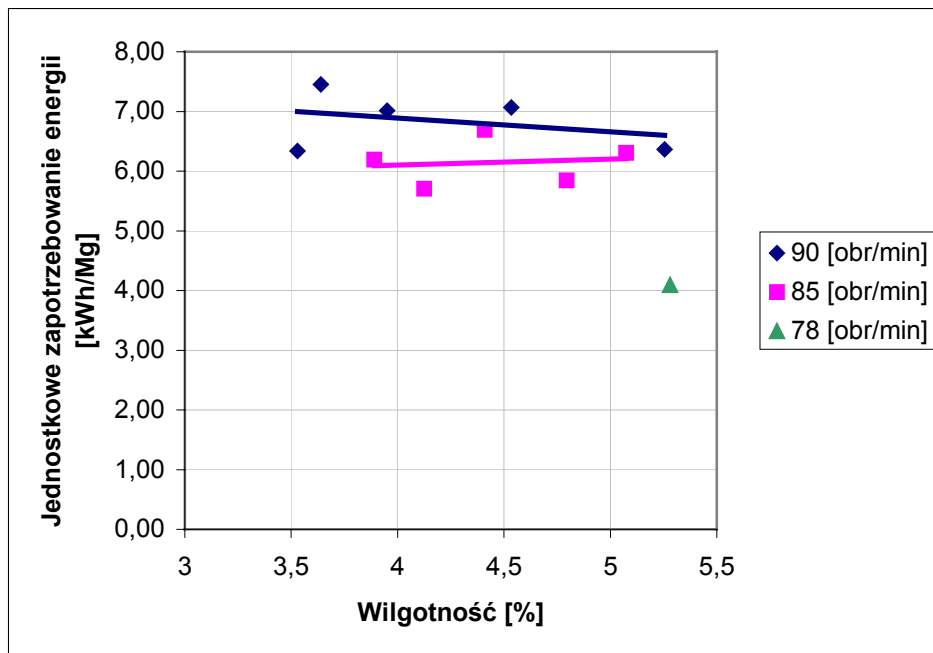
**Rys. 4.13.** Wpływ prędkości obrotowej ślimaka na wytrzymałość brykietów na ściskanie wytworzonych w prasie walcowej LPW 450 z koncentratu miedzi o różnej wilgotności – brykiety w kształcie kropli



**Rys. 4.14.** Wpływ prędkości obrotowej ślimaka na wartość nacisku jednostkowego wywieranego na dno wgłębienia formującego podczas brykietowania w prasie walcowej LPW 450 koncentratu miedzi o różnej wilgotności – brykiety w kształcie kropki



**Rys. 4.15.** Wpływ prędkości obrotowej ślimaka na pobór mocy napędu głównego podczas brykietowania w prasie walcowej LPW 450 koncentratu miedzi o różnej wilgotności – brykiety w kształcie kropki



**Rys. 4.16.** Wpływ prędkości obrotowej ślimaka na zapotrzebowanie energii podczas brykietowania w prasie walcowej LPW 450 koncentratu miedzi o różnej wilgotności – brykiety w kształcie kropli

#### 4.4.3. Wnioski

Na podstawie analizy wyników badań procesu brykietowania koncentratu miedzi w laboratoryjnej prasie walcowej LPW 450 z zastosowaniem zasypu wymuszonego, uzyskanych dla wielkości wejściowych zawierających się w założonych przedziałach sformułowano następujące wnioski:

- Zastosowanie zasilacza ślimakowego w znacznym stopniu poprawia własności wytrzymałościowe brykietów w kształcie kropli w porównaniu z zasypem grawitacyjnym, co wynika przede wszystkim ze zwiększenia nacisku jednostkowego.
- W badanym zakresie wartości prędkości obrotowej ślimaka jej wzrost powoduje zwiększenie wytrzymałości mechanicznej brykietów.
- Brykiety w kształcie kropli uzyskane z koncentratu miedzi o wilgotności powyżej 4,5% posiadają wytrzymałość na zrzut bliską 100%.
- Najwyższą wytrzymałość brykietów na ściskanie otrzymuje się przy wilgotności nadawy ok. 4,5%.
- Zastosowanie zasilacza ślimakowego zmniejsza wpływ wilgotności nadawy na wartość nacisku jednostkowego, a także moc pobieraną przez układ napędowy.

---

## **4.5. Badania symulacyjne wpływu objętości brykietów na wartość nacisku jednostkowego w procesie brykietowania koncentratu miedzi**

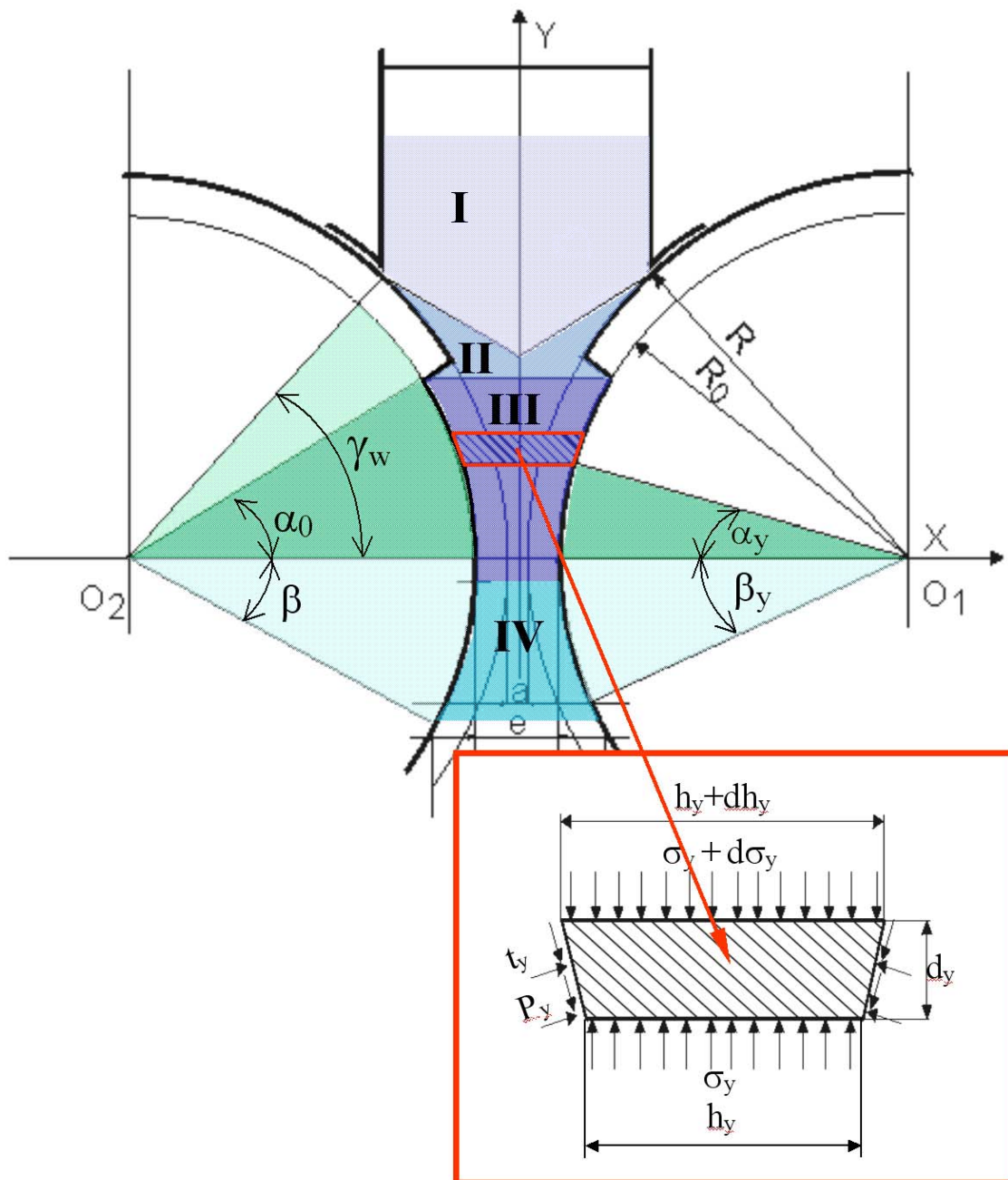
### **4.5.1. Wprowadzenie**

W prowadzonych pracach eksperymentalnych, które opisano powyżej uwagę skoncentrowano głównie na wykonaniu badań porównawczych brykietowania koncentratu miedzi w układach zagęszczania o dwóch różnych powierzchniach roboczych walców. Pierwszy z nich umożliwia uzyskanie brykietów w kształcie kropli, drugi natomiast w formie siodła. Różnią się one objętością, która wpływa na charakter zmian wartości nacisku jednostkowego w procesie brykietowania w prasie walcowej z zasilaniem grawitacyjnym. W tym przypadku jest on parametrem wynikowym i zależy od geometrycznych cech konstrukcyjnych układu zagęszczania oraz właściwości brykietowanego materiału. Nacisk jednostkowy w znacznym stopniu decyduje o gęstości i wytrzymałości mechanicznej brykietów. Zasadnym, więc byłoby wykonanie eksperymentów z wykorzystaniem walców z wgłębieniami określonego kształtu, różniącymi się objętością. Przeprowadzenie kolejnych serii takich badań laboratoryjnych wiązałoby się z wysokimi nakładami finansowymi i wymagało dużo czasu. Wynika to przede wszystkim z konstrukcji prasy laboratoryjnej, w której zmiana kształtu powierzchni roboczej walców następuje poprzez wymianę całych pierścieni formujących. Ze względu na wysoki koszt wykonania dodatkowych kilku par pierścieni, zdecydowano się na uzupełnienie badań laboratoryjnych eksperymentami symulacyjnymi prowadzonymi przy pomocy istniejącego programu symulacji procesu brykietowania materiału droбноziarnistego w prasie walcowej [75]. Umożliwia on określenie przebiegu wartości nacisku jednostkowego wywieranego na brykiet w środkowej strefie wgłębienia formującego, który można porównywać z charakterystyką czasową tego nacisku zarejestrowaną podczas badań eksperymentalnych.

### **4.5.2. Program symulacji komputerowej procesu brykietowania w prasie walcowej**

Program symulacyjny opiera się na modelu matematycznym procesu brykietowania materiału droбноziarnistego [75]. Opracowując model przyjęto pewne uproszczenia m.in. dokonano idealizacji układu zagęszczania prasy (rys. 4.17),

polegającej na zastąpieniu brykietowania walcowaniem ośrodka sypkiego w zastępczym układzie zagęszczania.



**Rys. 4.17.** Schemat idealizacji układu zagęszczania prasy walcowej: I – zasyp, II – podawanie, III – zagęszczanie, IV – ekspansja zwrotna [75],  $\alpha_0$  – kąt chwytu,  $\alpha_y$  – kąt zagęszczenia,  $\beta$  – kąt określający strefę rozprężania brykietów,  $\beta_y$  – kąt rozprężenia brykietów,  $\gamma_w$  – kąt określający początek strefy podawania materiału,  $\sigma_y$  – średnie naprężenie normalne,  $a$  – szerokość szczeliny między walcami w rzeczywistym układzie zagęszczania,  $e$  – szerokość szczeliny między walcami w zastępczym układzie zagęszczania,  $h_y$  – odległość między walcami na poziomie kąta  $\alpha_y$ ,  $t_y$  – jednostkowa siła tarcia,  $p_y$  – nacisk jednostkowy wywierany na brykietowany materiał,  $R_0$  – promień walców w zastępczym układzie zagęszczania,  $R$  – rzeczywisty promień walców

---

Model matematyczny procesu brykietowania materiału drobnoziarnistego w prasie walcowej stanowi układ równań i ogólnych postaci formuł empirycznych, które podano poniżej:

$$\frac{dp_y}{dh_y} + p_y \frac{\mu \operatorname{ctg}(\alpha_o / 2)}{h_y} = \frac{\vartheta}{h_y} + \frac{d\vartheta}{dh_y} \quad (4.1)$$

$$\vartheta = Cs^D w^E \quad (4.2)$$

$$\mu = Fs + Gw + K \quad (4.3)$$

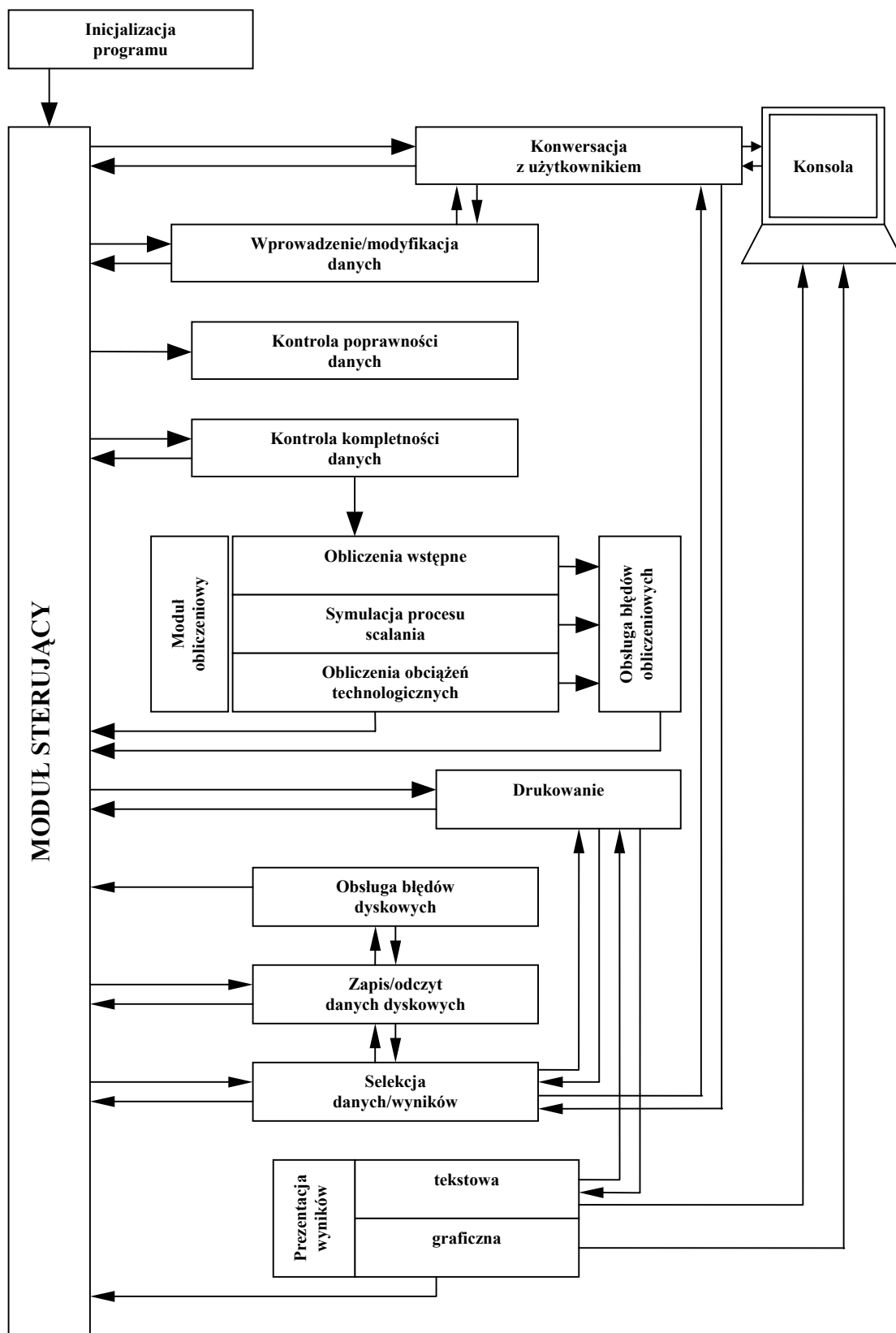
$$p_y = p_{\max} \left[ 1 - \left( \frac{\beta_y}{\beta} \right)^2 \right] \quad (4.4)$$

gdzie:

- $\mu$  – współczynnik tarcia [-],
- $\vartheta$  – jednostkowy opór zagęszczania [MPa],
- C, D, E, F, G, K – współczynniki równania regresji,
- s – stopień zagęszczenia [-],
- w – wilgotność [%],
- $p_{\max}$  – maksymalna wartość nacisku jednostkowego [MPa].

Równanie (4.1) określa zależność pomiędzy naciskiem jednostkowym, wywieranym na ośrodek zagęszczany w środkowej strefie wgłębienia formującego, geometrią zastępczego układu zagęszczania oraz właściwościami brykietowanego materiału. Formuła empiryczna (4.2) wyraża zmienność jednostkowego oporu zagęszczania  $\vartheta$ . Zdefiniowano go jako zmienną zależną od stopnia zagęszczenia oraz wilgotności brykietowanego materiału, stanowiącą wartość nacisku jednostkowego w określonej fazie zagęszczania materiału w cylindrycznej matrycy zamkniętej, przy zachowaniu porównywalnego stosunku wysokości brykietu do jego wymiaru poprzecznego. W procesie brykietowania zmienia się także współczynnik tarcia zewnętrznego, co uwzględniono w formule empirycznej (4.3). Równanie (4.4) umożliwia wyznaczenie przebiegu nacisku jednostkowego w strefie odprężania brykietów. Postać tego równania przyjęto na podstawie wyników badań eksperymentalnych, które prowadzono dla kilku drobnoziarnistych odpadów przemysłowych o zróżnicowanych właściwościach [75].

Schemat blokowy programu symulacji procesu brykietowania w prasie walcowej przedstawiono na rysunku 4.18 [75]. Obsługiwany jest on w środowisku



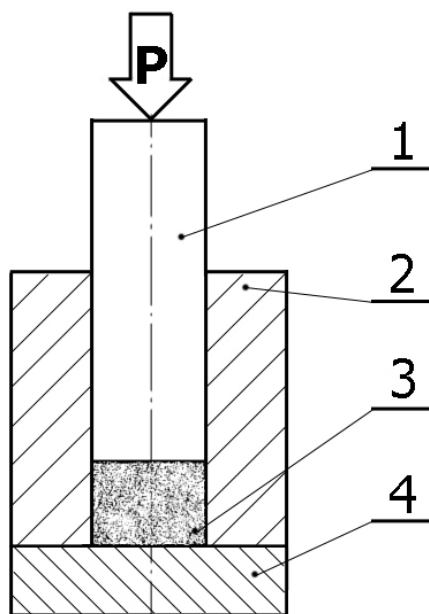
Rys. 4.18. Schemat blokowy programu symulacji komputerowej procesu scalania w prasie walcowej [75]

---

Windows na komputerze klasy PC. Program komputerowy posiada duże możliwości operacyjne. Oprócz symulacji procesu brykietowania materiału w prasie walcowej umożliwia on także obliczanie obciążeń wywieranych na układ zagęszczania brykieciarki. Program jest z powodzeniem używany w badaniach symulacyjnych oraz w praktyce projektowej [75]. Pewną jego niedoskonałością jest to, że z powodu idealizacji układu zagęszczania prasy nie można w badaniach symulacyjnych uwzględnić zjawisk zachodzących we wgłębieniach formujących. Przeprowadzenie badań symulacyjnych procesu brykietowania określonego materiału wymaga znajomości zmienności jego jednostkowego oporu zagęszczania oraz współczynnika tarcia zewnętrznego. Z uwagi na brak tych zależności dla koncentratu miedzi, konieczne było wykonanie odpowiednich badań eksperymentalnych.

#### **4.5.3. Wyznaczenie zmienności jednostkowego oporu zagęszczania**

Badania zmienności jednostkowego oporu zagęszczania koncentratu miedzi przeprowadzono przy użyciu prasy ZDM-1 oraz cylindrycznej matrycy zamkniętej o średnicy wewnętrznej  $\varnothing 30$  [mm]. Stosowano opracowaną wcześniej metodykę [75], używając do badań mieszanek, które poddawane były brykietowaniu w prasie walcowej. Wilgotność zagęszczonego materiału zawierała się w granicach od 3,74 do 4,59%. W sposób eksperymentalny wyznaczono ilość materiału tak, aby po wywarciu na niego maksymalnego nacisku wysokość otrzymanego brykietu w postaci walca odpowiadała w przybliżeniu  $2/3$  jego średnicy. Przygotowany do brykietowania koncentrat miedzi wsypywano do cylindrycznej matrycy zamkniętej (rys. 4.19), a następnie poprzez stempel wywierano na niego nacisk, który stopniowo zwiększano. Wartość nacisku jednostkowego zmieniała się od 0 do 142 [MPa]. Wartość prędkości posuwu stempla wynosiła 6 [mm/min]. Korzystając z systemu pomiarowego z akwizycją danych rejestrowano jednocześnie w sposób ciągły wartość nacisku wywieranego na stempel oraz jego przesunięcie względem początkowej wysokości zagęszczanej próbki. W ten sposób uzyskano charakterystyki zagęszczania koncentratu miedzi dla określonych wilgotności. Po wyjęciu brykietu z matrycy mierzono jego wysokość suwmiarką oraz ważono go na elektronicznej wadze kamertonowej marki Vibra typ AJH 420 CE. Dla każdej wilgotności mieszanki pomiar przeprowadzono trzykrotnie.



**Rys. 4.19.** Schemat matrycy do wyznaczania jednostkowego oporu zagęszczania materiału: 1 – stempel, 2 – matryca, 3 – materiał droбноziarnisty, 4 – podstawa matrycy

Stopień zagęszczenia mieszanki dla zadanej wartości nacisku obliczono przy pomocy zależności, uwzględniając wysokość początkową próbki.

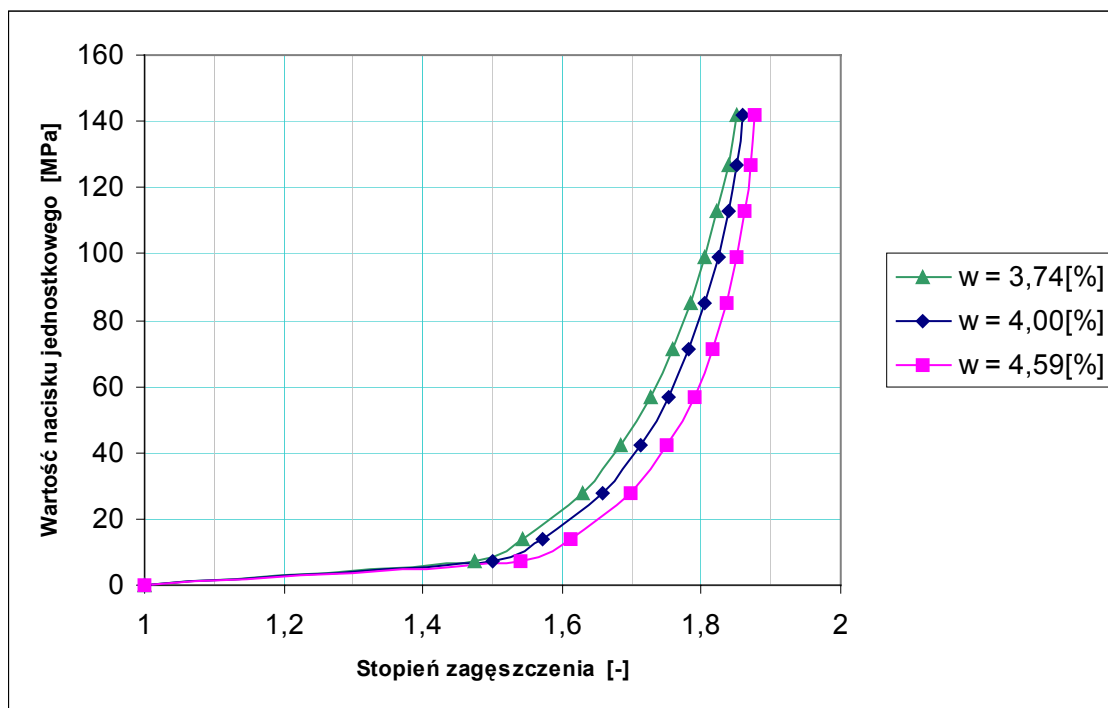
$$S = \frac{H_p}{H_p - x} \quad (4.5)$$

gdzie:

- $H_p$  – wysokość początkowa zagęszczanego materiału,
- $x$  – przemieszczenie stempla.

Wyniki pomiarów i obliczeń zamieszczono na rysunku 4.20. Posłużyły one do wyznaczenia współczynników równania regresji C, D oraz E równania (4.2), wyrażającego zmienność jednostkowego oporu zagęszczania. Równanie regresji wyznaczono przy pomocy programu Statistica 8.0, stosując metodę najmniejszych kwadratów. Po uwzględnieniu wartości współczynników (tab. 4.3), formuła empiryczna (4.2) przyjmuje następującą postać:

$$\vartheta = 0,13165 s^{14,68478} w^{-1,55615}$$



Rys. 4.20. Charakterystyki zagęszczania koncentratu miedzi dla różnych wilgotności nadawy

Tabela 4.3. Wyniki obliczeń współczynników C, D oraz E równania regresji wyrażającego zmienność jednostkowego oporu zagęszczania podczas brykietowania koncentratu miedzi

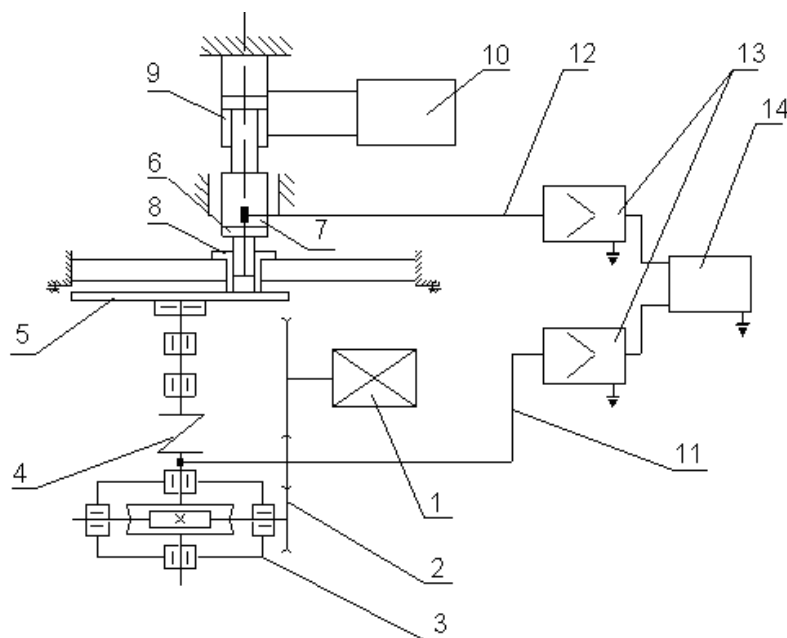
Model: $\theta = C \cdot (s^{**D}) \cdot (w^{**E})$ (Arkusz3)						
Zmn. zal. : $\theta$						
Poziom ufności: 95.0% ( $\alpha = 0.050$ )						
	Ocena	Błąd stand.	Wart. t df = 30	poziom p	Doln. uf Granica	Górn. uf Granica
C	0,13165	0,036748	3,5824	0,001186	0,05660	0,20669
D	14,68478	0,461344	31,8304	0,000000	13,74259	15,62697
E	-1,55615	0,124493	-12,4999	0,000000	-1,81040	-1,30191

Po wyznaczeniu zmienności jednostkowego oporu zagęszczania określono również minimalną wartość nacisku jednostkowego niezbędną do scalenia materiału. Obserwując brykiety scalone w matrycy zamkniętej przy różnych naciskach jednostkowych zauważono, że uzyskanie zwartej litej struktury materiału wymaga zapewnienia wartości nacisku jednostkowego, która nie powinna być mniejsza aniżeli 25 [MPa].

#### 4.5.4. Określenie zmienności współczynnika tarcia zewnętrznego

Eksperymenty mające na celu wyznaczenie zmienności współczynnika tarcia zewnętrznego w procesie brykietowania koncentratu miedzi prowadzono na stanowisku laboratoryjnym oznaczonym symbolem STZ-1M, znajdującym się w laboratorium KSW AGH, w oparciu o wcześniej opracowaną metodykę [75]. Umożliwia ono odtworzenie zjawisk powierzchniowych, zachodzących podczas brykietowania na granicy: zagęszczany materiał – powierzchnia robocza walca. W przypadku wyznaczania zmienności współczynnika tarcia zewnętrznego dla koncentratu miedzi próbkę stanowił walcowy brykiet wytworzony w matrycy zamkniętej o średnicy  $\varnothing 20$  [mm] i wysokości ok.  $h = 1/4d$ , czyli 5 [mm]. Natomiast przeciwpróbką była tarcza ze stali 18 HGT o twardości 55 HRC, ponieważ z tego tworzywa konstrukcyjnego wykonuje się pierścienie formujące pras walcowych stosowanych w hutnictwie miedzi.

Stanowisko STZ-1M przedstawione schematycznie na rysunku 4.21 składa się z dwóch głównych podzespołów: napędu tarczy oraz układu docisku stempla. Układ napędowy umożliwia uzyskanie prędkości obrotowej tarczy  $n = 10,5$  [ $\text{min}^{-1}$ ], co odpowiada prędkości liniowej  $v = 0,0438$  [m/s] dla średniej wartości promienia



**Rys. 4.21.** Schemat stanowiska laboratoryjnego STZ-1M do badania tarcia oraz zużycia w procesie brykietowania materiałów drobnoziarnistych: 1 – silnik prądu zmiennego, 2 – przekładnia pasowa, 3 – przekładnia ślimakowa, 4 – sprzęgło podatne, 5 – tarcza stalowa (przeciwpróbka), 6 – stempel, 7 – tensometryczny przetwornik siły nacisku, 8 – matryca, 9 – siłownik hydrauliczny, 10 – źródło hydrauliczne, 11 – tor pomiarowy wartości momentu skracającego, 12 – tor pomiarowy wartości siły nacisku, 13 – wzmacniacz pomiarowy, 14 – komputer PC [75]

---

$R_T = 0,039$  [m]. Docisk stempla realizowany jest poprzez układ hydrauliczny, zapewniający uzyskanie na powierzchni jego kontaktu z zagęszczanym materiałem wartości nacisku jednostkowego w zakresie 0 – 170 [MPa].

Stanowisko badawcze wyposażone jest w tor pomiarowy, umożliwiający rejestrację momentu skręcającego na wale tarczy (5), mierzonego za pomocą klasycznego układu tensometrycznego. Sygnał z układu pomiarowego przekazywany jest poprzez wzmacniacz pomiarowy MGT 232C firmy Hottinger Baldwin Messtechnik do komputerowego systemu akwizycji danych.

Określoną wartość siły nacisku wywieranej na stempel uzyskiwano dzięki zmianie ciśnienia w układzie hydraulicznym, posługując się odpowiednią charakterystyką. Wyznaczenie jakościowego i ilościowego charakteru zmian współczynników: statycznego i kinetycznego tarcia zewnętrznego pary ciernej stal - koncentrat miedzi przeprowadzono dla materiałów o wilgotności 3,74; 4,00 oraz 4,59%.

Na podstawie wyników badań obliczono współczynniki statycznego oraz kinetycznego tarcia zewnętrznego, posługując się podanymi poniżej zależnościami (4.6) oraz (4.7):

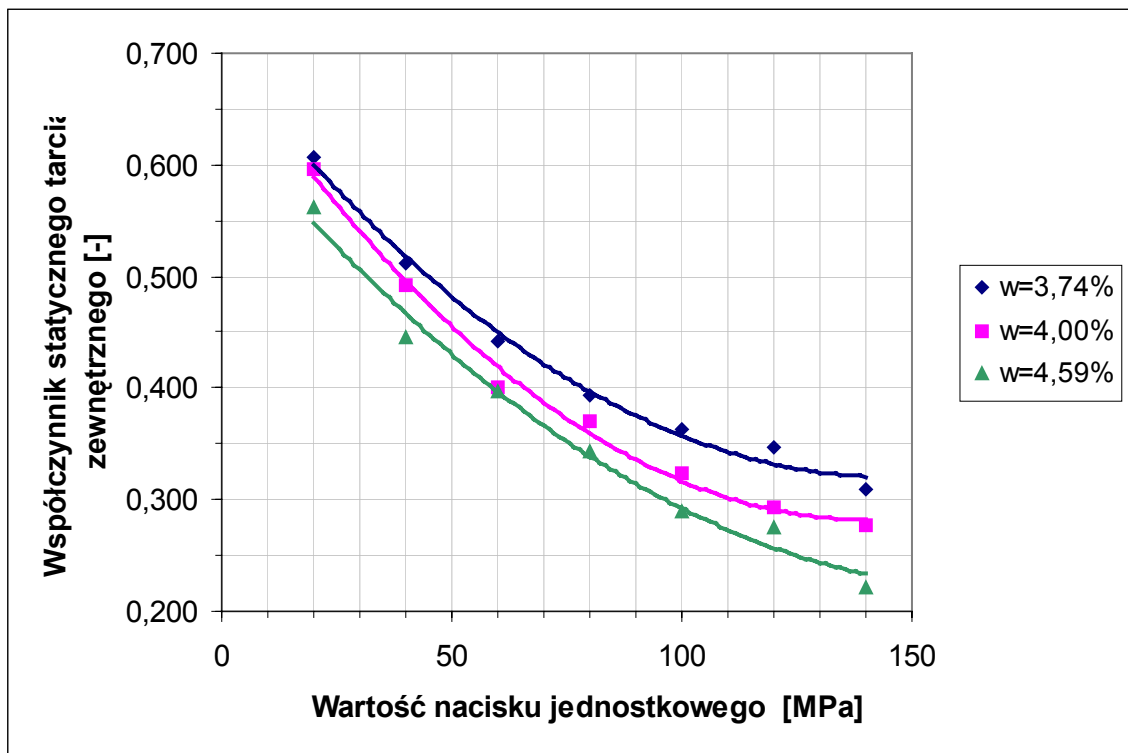
$$\mu_s = \frac{M_{s(\max)}}{NR_T} \quad (4.6)$$

$$\mu_k = \frac{M_{s(sr)}}{NR_T} \quad (4.7)$$

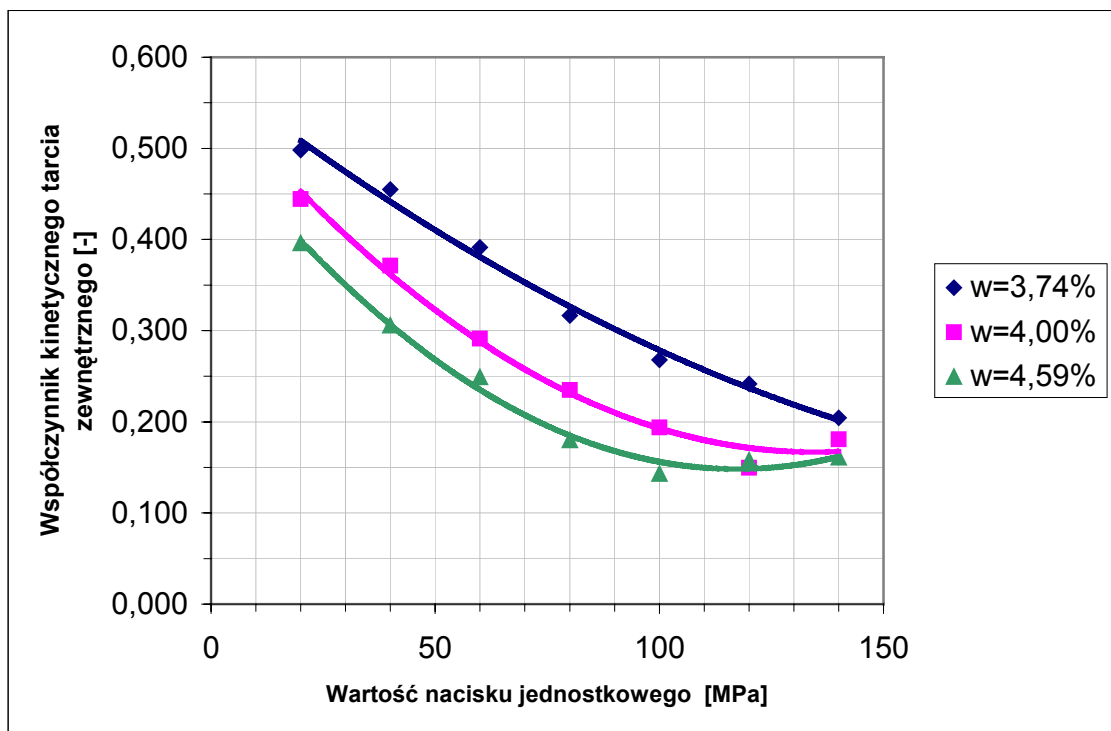
gdzie:

- $\mu_s$  – współczynnik statycznego tarcia zewnętrznego,
- $\mu_k$  – współczynnik kinetycznego tarcia zewnętrznego,
- $M_{s(\max)}$  – maksymalna wartość momentu skręcającego w trakcie rozruchu stanowiska pod obciążeniem,
- $M_{s(sr)}$  – średnia wartość momentu skręcającego w ruchu ustalonym pod obciążeniem (500 punktów pomiarowych),
- $N$  – wartość siły nacisku wywieranej na przeciwpróbkę,
- $R_T$  – ramię siły tarcia ( $R_T = 0,039$  [m]).

Wyniki badań wpływu nacisku jednostkowego oraz wilgotności koncentratu miedzi na współczynniki statycznego oraz kinetycznego tarcia zewnętrznego przedstawiono na rysunkach 4.22 oraz 4.23. Wynika z nich, że oba współczynniki tarcia



Rys. 4.22. Zależność współczynnika statycznego tarcia zewnętrznego od wartości nacisku jednostkowego w procesie brykietowania koncentratu miedzi



Rys. 4.23. Zależność współczynnika kinetycznego tarcia zewnętrznego od wartości nacisku jednostkowego w procesie brykietowania koncentratu miedzi

zewnątrznego, pary ciernej koncentrat miedzi – stal 18HGT dla wszystkich badanych próbek maleją wraz ze wzrostem nacisku jednostkowego. Stwierdzono również, że podobny wpływ ma wilgotność koncentratu miedzi. Jej wzrost powoduje zmniejszenie współczynników tarcia zewnętrznego. Najwyższe wartości współczynników statycznego oraz kinetycznego tarcia zewnętrznego występują przy wilgotności względnej materiału 3,74% oraz nacisku 20 [MPa].

Wyniki przeprowadzonych badań posłużyły do wyznaczenia współczynników równania regresji (4.3), opisującego zmienność współczynnika kinetycznego tarcia zewnętrznego. Równanie regresji wyznaczono przy pomocy programu Statistica 8.0, stosując metodę najmniejszych kwadratów. Po uwzględnieniu wartości współczynników (tab. 4.4), formuła empiryczna (4.3) przyjmuje następującą postać:

$$\mu_k = -1,35629s - 0,08215w + 3,01968$$

**Tabela 4.4.** Wyniki obliczeń współczynników F, G oraz K równania regresji opisującego zmienność współczynnika kinetycznego tarcia zewnętrznego

Model: $m_{i\_kin}=(F*s)+(G*w)+K$ (Tar_kin_statistica)						
Zmn. zal. : $m_{i\_kin}$						
Poziom ufności: 95.0% ( alfa=0.050)						
	Ocena	Błąd stand.	Wart. t df = 15	poziom p	Doln. uf Granica	Górn. uf Granica
F	-1,35629	0,087172	-15,5588	0,000000	-1,54209	-1,17048
G	-0,08215	0,018151	-4,5262	0,000402	-0,12084	-0,04347
K	3,01968	0,167717	18,0047	0,000000	2,66220	3,37716

#### 4.5.5. Dobór geometrii powierzchni roboczej elementów formujących prasy

Przeprowadzenie eksperymentów symulacyjnych poprzedzono doбором kilkunastu wariantów geometrii powierzchni roboczej dwóch rodzajów elementów formujących laboratoryjnej prasy walcowej. Założono, że ze względu na konieczność zachowania stałej szerokości walców formujących, szerokość brykietów nie może ulec zmianie. Zdecydowano się także na zachowanie stałego ilorazu długości oraz głębokości wgłębienia, wynikającego z wieloletnich doświadczeń. Dobór geometrii

powierzchni roboczej elementów formujących prasy walcowej determinuje kształt oraz objętość brykietu. Uwzględniając wyniki badań laboratoryjnych, w przypadku wgłębień umożliwiających otrzymywanie brykietów z płaszczyzną podziału zdecydowano się na zmniejszenie ich objętości. Pozwoli to na uzyskanie większej wartości nacisku jednostkowego. Przeciwnie natomiast postąpiono w przypadku wgłębień bez płaszczyzny podziału. Korzystając z programu SolidWorks 2006 zamodelowano poszczególne brykiety i wyznaczono ich teoretyczną objętość. Wyniki przeprowadzonych rozważań oraz obliczeń przedstawiono w tabeli 4.5.

**Tabela 4.5.** Charakterystyka elementów formujących prasy LPW 450 uwzględnionych w badaniach symulacyjnych

Lp.	Rodzaj elementów formujących	Wymiary wgłębienia [mm]	Teoretyczna objętość brykietu [cm <sup>3</sup> ]	Sumaryczna ilość wgłębień formujących	Wydajność prasy LPW 450 przy prędkości obwodowej walców 0,15 [m/s] [Mg/h]
1.	do wytwarzania brykietów w kształcie kropli	40x30x10	13,20	72	0,908
2.		38x30x9,5	11,92	74	0,843
3.		36x30x9	10,70	80	0,818
4.		34x30x8,5	9,55	84	0,767
5.		32x30x8	8,46	90	0,728
6.		30x30x7,5	7,44	96	0,682
7.		28x30x7	6,48	102	0,632
8.	do wytwarzania brykietów w kształcie siodła	31x30x13	6,40	90	0,550
9.		33x30x14	7,52	86	0,618
10.		35x30x15	8,74	80	0,668
11.		37x30x16	9,88	76	0,717
12.		39x30x17	11,10	72	0,767

#### 4.5.6. Wyniki badań symulacyjnych

Eksperymenty symulacyjne prowadzono przy następujących założeniach:

- średnica walców  $2R = 450$  [mm],
- szerokość walców  $B = 76$  [mm],

- wysokość słupa materiału podawanego grawitacyjnie  $h = 0,5$  [m],
- szerokość szczeliny pomiędzy walcami  $a \approx 1,5$  [mm],
- kąt określający strefę sprężystego rozprężania brykietu  $\beta = 3,0^\circ$ .

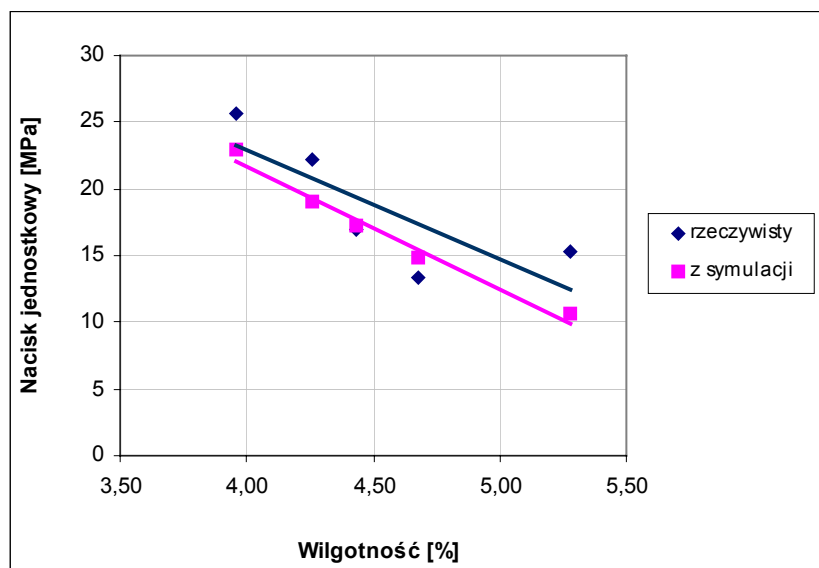
Pierwszym etapem badań symulacyjnych, było określenie kąta chwytu. Na podstawie metody przedstawionej w publikacji [77] wyznaczono jego oczekiwane wartości, które wynoszą odpowiednio:

- $\alpha_0 = 8,4^\circ$  dla pierścieni formujących z powierzchnią roboczą umożliwiającą wytwarzanie brykietów z płaszczyzną podziału,
- $\alpha_0 = 7,4^\circ$  dla pierścieni formujących z powierzchnią roboczą umożliwiającą wytwarzanie brykietów bez płaszczyzny podziału.

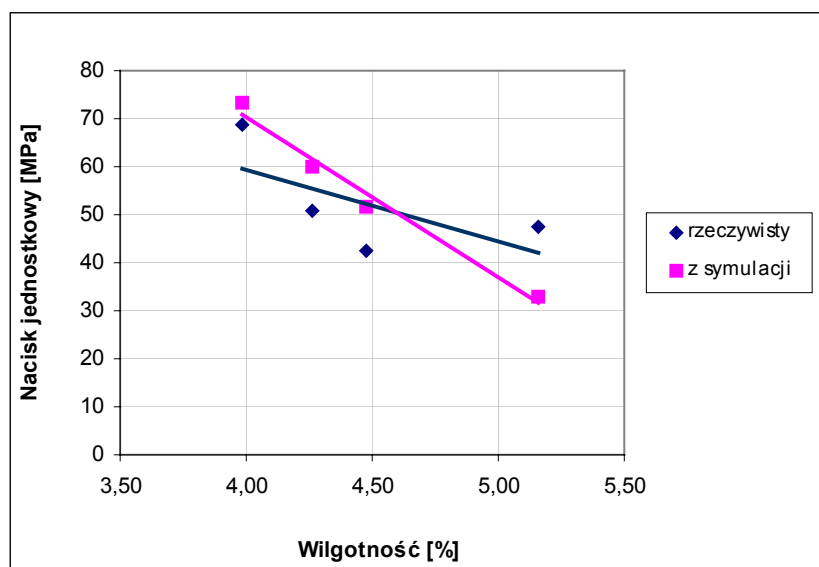
Kolejnym etapem było przeprowadzenie badań symulacyjnych procesu brykietowania koncentratu miedzi dla dwóch rodzajów powierzchni roboczej walców o objętości wgłębień stosowanych w próbach laboratoryjnych z zachowaniem wilgotności materiału użytego w eksperymentach. Porównanie maksymalnych wartości nacisku jednostkowego otrzymanego w badaniach laboratoryjnych realizowanych w prasie LPW 450 oraz podczas eksperymentów symulacyjnych przedstawiono w tabeli 4.6 oraz na rysunkach 4.24 i 4.25.

**Tabela 4.6.** Porównanie maksymalnych wartości nacisku jednostkowego uzyskanych w badaniach laboratoryjnych oraz w eksperymentach symulacyjnych

Rodzaj elementów formujących	Wilgotność nadawy [%]	Maksymalna wartość nacisku jednostkowego (badania laboratoryjne) [MPa]			Średnia maksymalna wartość nacisku jednostkowego (badania laboratoryjne) [MPa]	Maksymalna wartość nacisku jednostkowego (badania symulacyjne) [MPa]
do wytwarzania brykietów w kształcie kropli	3,96	28,5	25,3	23,0	25,6	23,0
	4,26	26,1	19,6	21,2	22,3	19,1
	4,43	18,9	18,7	13,4	17,0	17,2
	4,68	12,6	14,4	13,0	13,4	14,8
	5,28	17,3	13,2	---	15,2	10,6
do wytwarzania brykietów w kształcie siodła	3,99	80,0	65,5	60,8	68,8	73,3
	4,26	59,7	57,5	35,5	50,9	60,2
	4,48	47,5	44,9	35,4	42,6	51,6
	5,16	59,3	52,2	30,6	47,4	33,0



**Rys. 4.24.** Porównanie maksymalnych wartości nacisku jednostkowego uzyskanych podczas badań laboratoryjnych oraz symulacyjnych procesu brykietowania koncentratu miedzi o zróżnicowanej wilgotności dla brykietów w kształcie kropli o objętości ok. 13 [cm<sup>3</sup>]

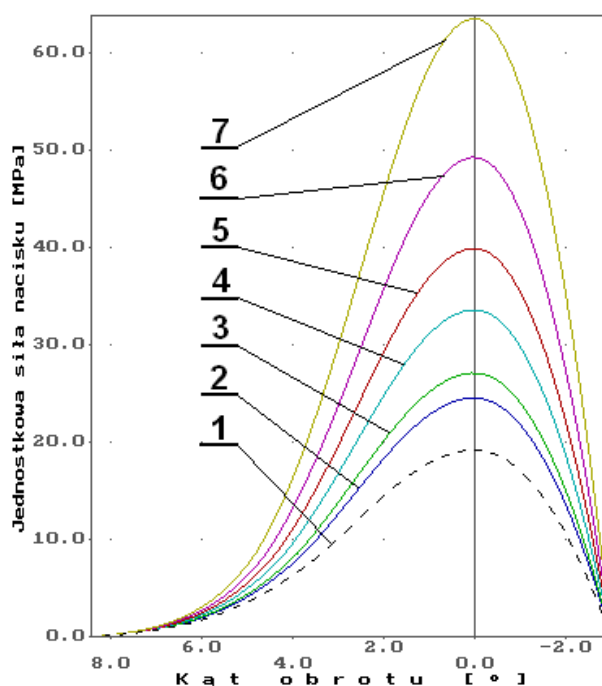


**Rys. 4.25.** Porównanie maksymalnych wartości nacisku jednostkowego uzyskanych podczas badań laboratoryjnych oraz symulacyjnych procesu brykietowania koncentratu miedzi o zróżnicowanej wilgotności dla brykietów w kształcie siodła i objętości ok. 6,5 [cm<sup>3</sup>]

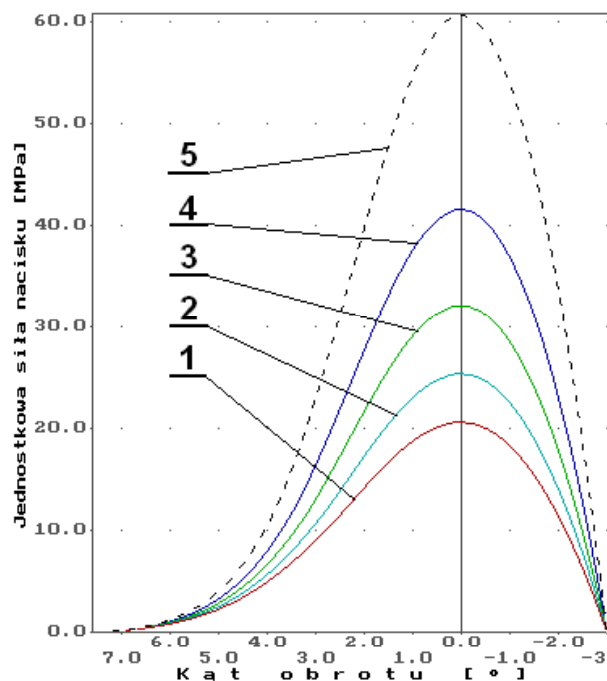
Na podstawie analizy wyników badań stwierdzono, że dostateczną zgodność teorii z rzeczywistą sytuacją fizyczną uzyskano dla wilgotności koncentratu miedzi zawierającej się w wyznaczonym wcześniej korzystnym przedziale tzn.  $w \in [4,0\%; 4,5\%]$ . W przypadku stosowania powierzchni roboczej walców

umożliwiającej wytwarzanie brykietów w kształcie kropli średnia różnica pomiędzy maksymalnymi wartościami nacisku jednostkowego uzyskanymi w badaniach laboratoryjnych oraz eksperymentach symulacyjnych wynosi ok. 9%. Natomiast dla brykietów w formie siodła jest ona nieco większa, ponieważ osiąga ok. 15%.

Ostatnim etapem badań symulacyjnych było określenie przebiegu wartości nacisku jednostkowego dla dobranych geometrii powierzchni roboczej walców. Założono, że eksperymenty symulacyjne zostaną przeprowadzone dla wilgotności nadawy będącej średnią arytmetyczną kresu dolnego oraz górnego podanego powyżej przedziału tj. 4,25%. Wyniki badań zilustrowano na rysunkach 4.26 i 4.27. Natomiast w tabeli 4.7 zestawiono wybrane cechy elementów formujących prasy oraz związane z nimi maksymalne wartości nacisku jednostkowego. Na rysunku 4.28 pokazano zależność wpływu kształtu powierzchni roboczej walców oraz objętości brykietu na maksymalną wartość nacisku jednostkowego.



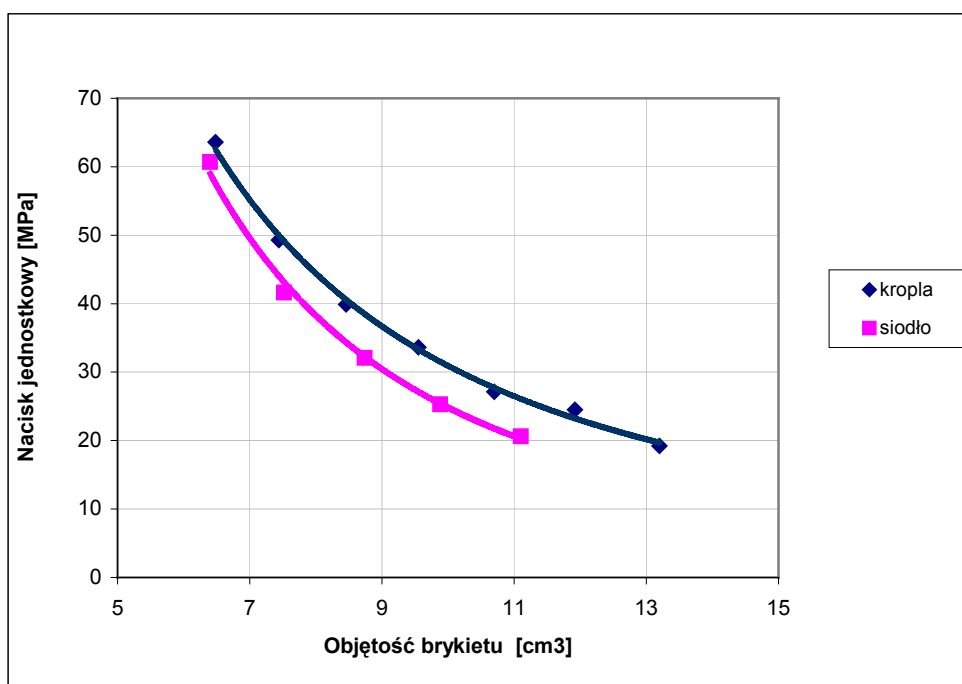
**Rys. 4.26.** Przebieg nacisku jednostkowego podczas symulacji procesu brykietowania mieszanki koncentratów miedzi w prasie walcowej LPW 450 z powierzchnią roboczą umożliwiającą otrzymywanie brykietów z płaszczyzną podziału o wymiarach: 1 - 40x30x20 [mm]; 2 - 38x30x19 [mm]; 3 - 36x30x18 [mm]; 4 - 34x30x17 [mm]; 5 - 32x30x16 [mm]; 6 - 30x30x15 [mm]; 7 - 28x30x14 [mm]



**Rys. 4.27.** Przebieg nacisku jednostkowego podczas symulacji procesu brykietowania mieszanki koncentratów miedzi w prasie walcowej LPW 450 z powierzchnią roboczą umożliwiającą otrzymywanie brykietów bez płaszczyzny podziału o wymiarach: 1- 39x30x17 [mm]; 2 - 37x30x16 [mm]; 3 - 35x30x15 [mm]; 4 - 33x30x14 [mm]; 5 - 31x30x13 [mm]

**Tabela 4.7.** Wpływ geometrii oraz objętości wgłębień na maksymalną wartość nacisku jednostkowego podczas symulacji procesu brykietowania koncentratu miedzi w prasie walcowej LPW 450

Lp.	Rodzaj elementów formujących	Wymiary wgłębienia [mm]	Objętość brykietu [cm <sup>3</sup> ]	Maksymalna wartość nacisku jednostkowego [MPa]
1.	do wytwarzania brykietów w kształcie kropli	40x30x10	13,20	19,2
2.		38x30x9,5	11,92	24,5
3.		36x30x9	10,70	27,1
4.		34x30x8,5	9,55	33,6
5.		32x30x8	8,46	39,9
6.		30x30x7,5	7,44	49,3
7.		28x30x7	6,48	63,6
8.	do wytwarzania brykietów w kształcie siodła	31x30x13	6,40	60,7
9.		33x30x14	7,52	41,6
10.		35x30x15	8,74	32,1
11.		37x30x16	9,88	25,3
12.		39x30x17	11,10	20,6



**Rys. 4.28.** Wpływ rodzaju powierzchni roboczej walców oraz objętości brykietu na maksymalną wartość nacisku jednostkowego podczas brykietowania koncentratu miedzi w prasie walcowej LPW 450

Na podstawie analizy wyników badań symulacyjnych stwierdzono, że zaobserwowany wcześniej wzrost maksymalnej wartości nacisku jednostkowego, podczas wytwarzania brykietów bez płaszczyzny podziału [72], wynika z mniejszej ich objętości w porównaniu z brykietami w kształcie kropli. Przy zachowaniu tej samej wilgotności koncentratu miedzi i porównywalnej objętości wgłębień formujących zawierającej się w przedziale  $V \in [6,5 \text{ cm}^3; 11,0 \text{ cm}^3]$  maksymalna wartość nacisku jednostkowego jest wyższa średnio o ok. 19% dla powierzchni roboczej walców umożliwiającej wytwarzanie brykietów z płaszczyzną podziału. Różnica między maksymalnymi wartościami nacisku jednostkowego rośnie wraz ze wzrostem objętości wgłębień. Natomiast odmienny kształt powierzchni roboczej walców posiada inne zalety. Brykiety formowane są w korzystniejszych warunkach, nie posiadają płaszczyzny symetrii i nie mają tendencji do rozdzielania się na połowy w przypadku scalania materiałów trudnych do brykietowania [75]. Ponadto brykiety łatwiej opuszczają wgłębienia formujące.

---

#### 4.5.7. Wnioski

Na podstawie analizy wyników badań symulacyjnych oraz laboratoryjnych procesu brykietowania koncentratu miedzi w prasie walcowej LPW 450 sformułowano podane poniżej wnioski:

- Zadowalającą zbieżność maksymalnych wartości nacisku jednostkowego określonych w sposób teoretyczny oraz eksperymentalny uzyskano dla wilgotności koncentratu miedzi zawierającej się w korzystnym przedziale tzn.  $w \in [4,0\%; 4,5\%]$ .
- Wzrost objętości brykietów powoduje spadek maksymalnej wartości nacisku jednostkowego.
- Przy tej samej wilgotności materiału i porównywalnej objętości wgłębień zawierającej się w przedziale  $V \in [6,5 \text{ cm}^3; 11,0 \text{ cm}^3]$  maksymalna wartość nacisku jednostkowego jest wyższa średnio o ok. 19% dla powierzchni roboczej walców umożliwiającej wytwarzanie brykietów z płaszczyzną podziału, przy czym różnica między maksymalnymi wartościami nacisku jednostkowego rośnie wraz ze wzrostem objętości wgłębień.
- W przypadku brykietowania koncentratu miedzi w warunkach laboratoryjnych istnieje możliwość zwiększenia objętości brykietów w kształcie siodła do ok.  $8,7 \text{ [cm}^3]$  tzn. o 34% bez znaczącej utraty ich wytrzymałości mechanicznej.
- W warunkach laboratoryjnych korzystne jest zmniejszenie objętości brykietów w kształcie kropli do ok.  $9,6 \text{ [cm}^3]$  i wymiarów ok.  $34 \times 30 \times 17 \text{ [mm]}$  w celu polepszenia ich własności wytrzymałościowych.

---

## **5. Badania procesu scalania wodorotlenku wapnia w prasie walcowej**

### **5.1. Wprowadzenie**

Z uwagi na znaczenie poznawcze i użytkowe wyników badań zdecydowano się na przeprowadzenie prób brykietowania oraz kawałkowania wodorotlenku wapnia. Jak już wcześniej wspomniano (pkt. 2.3.) brykietowanie jest takim procesem scalania, który służy nadaniu materiałowi pylistemu lub drobnoziarnistemu formy posiadającej powtarzalny kształt i podobne wymiary. Natomiast pod pojęciem kawałkowania rozumie się aglomerację ciśnieniową mającą na celu uzyskanie zbrylonego materiału o zwartej strukturze i nieregularnym kształcie.

### **5.2. Metodyka badań**

#### **5.2.1. Charakterystyka materiałów użytych do badań**

Do badań brykietowania oraz kawałkowania użyto wodorotlenku wapnia pochodzącego z jednej partii, który został wyprodukowany w Zakładach Przemysłu Wapienniczego Trzuskawica S.A. zgodnie z normą PN-EN 459-1:2003. Jego wilgotność wyjściowa wynosiła ok. 0,2%, gęstość nasypowa 0,47 [g/cm<sup>3</sup>], natomiast średnia średnica ziarna 19,9 [μm]. Jako lepiszcze stosowano wodę destylowaną.

#### **5.2.2. Przygotowanie materiału do scalania**

Przygotowanie wodorotlenku wapnia do scalania polegało na odważeniu 5 [kg] materiału, oraz dodaniu do niego wody destylowanej w ilości 17,5; 20,0 lub 22,5% w odniesieniu do masy wodorotlenku. W celu równomiernego jej rozproszczenia materiał poddawano mieszaniu w laboratoryjnej mieszarce zetowej średniej wielkości. Jednorodność nadawy uzyskiwano po ok. 25 minutach uśredniania.

#### **5.2.3. Przebieg procesu scalania**

Podczas brykietowania wodorotlenku wapnia podobnie jak w przypadku koncentratu miedzi wykorzystano dwa typy powierzchni roboczej walców umożliwiające wytwarzanie brykietów:

- 
- w kształcie kropli o wymiarach 40x30x20 [mm] i objętości ok. 13 [cm<sup>3</sup>],
  - w kształcie siodła o wymiarach 31x30x13 [mm] i objętości ok. 6,5 [cm<sup>3</sup>].

Badania procesu kawałkowania wyżej wymienionego materiału prowadzono natomiast przy użyciu pierścieni formujących z powierzchnią roboczą umożliwiającą otrzymanie:

- wyprasek z dwustronnymi poprzecznymi wypukłościami o wymiarach 52x18x4 [mm] i objętości wgłębienia ok. 4,3 [cm<sup>3</sup>] (tab. 4.1),
- wyprasek z jednostronnymi poprzecznymi wypukłościami o wymiarach 52x18x4 [mm] i objętości wgłębienia ok. 2,2 [cm<sup>3</sup>] (tab. 4.1).

Zrezygnowano ze stosowania gładkiej powierzchni roboczej, gdyż eksperymenty z użyciem tego typu walców zostały przeprowadzone w ramach pracy [42].

Podczas badań szerokość szczeliny między walcami wynosiła:

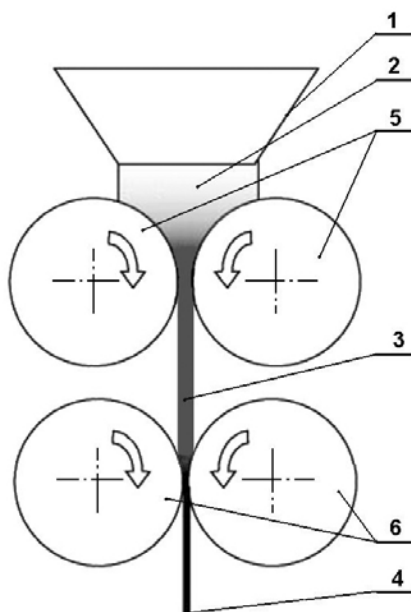
- dla brykietowania  $a \approx 1,5$  [mm],
- dla kawałkowania w układzie umożliwiającym otrzymywanie wyprasek z dwustronnymi poprzecznymi wypukłościami  $a \approx 3$  [mm],
- dla kawałkowania w układzie umożliwiającym otrzymywanie wyprasek z jednostronnymi poprzecznymi wypukłościami  $a \approx 5$  [mm].

Wielkość szczeliny podczas badań kawałkowania wodorotlenku wapnia w prasie walcowej została dobrana tak, aby wydajność obydwu układów zagęszczania była taka sama. Eksperymenty prowadzono przy wartości prędkości obwodowej walców formujących wynoszącej odpowiednio 0,1; 0,2; oraz 0,3 [m/s].

Przygotowany do scalania wodorotlenek wapnia dozowano w strefę zagęszczania laboratoryjnej prasy walcowej LPW 450. Brykieciarkę wyposażono w zasyp grawitacyjny. Z uwagi na to, że scalany wodorotlenek wapnia:

- wymaga dużego stopnia zagęszczenia, jak wynika z rys. 2.15 - znacznie wyższego niż większość materiałów poddawanych zbrylaniu w prasach walcowych,
- nie może być wstępnie zagęszczany przy pomocy zasilacza ślimakowego [42],

zdecydowano się zatem na dwukrotne jego podawanie w strefę zagęszczania prasy. Odwzorowano w ten sposób koncepcję prasy, wyposażonej w dwa komplety walców pracujące w tzw. układzie posobnym. Istotę jej działania przedstawiono na rysunku 5.1. Zadaniem pierwszej pary walców jest wstępne zagęszczenie materiału, natomiast drugiej - nadanie mu formy ostatecznej. W przypadku wstępnego zagęszczania kształt



**Rys. 5.1.** Schemat układu zagęszczania prasy wyposażonej w dwa zestawy walców pracujące w tzw. układzie posobnym: 1 – zasyp, 2 – nadawa, 3 – materiał zagęszczony, 4 – materiał scalony, 5 – para walców wstępnie zagęszczających materiał, 6 – para walców formujących

scalonego materiału nie jest istotny. Dlatego w warunkach przemysłowych, w celu zmniejszenia kosztów eksploatacji prasy walce wstępnie zagęszczające mogą stanowić wyeksploatowane elementy formujące prasy. Z tego powodu zdecydowano się na prowadzenie badań procesu scalania wodorotlenku wapnia wykorzystując, identyczny kształt powierzchni roboczej zarówno przy pierwszym, jaki i drugim przejściu materiału przez strefę zagęszczania.

Uzyskane podczas badań brykiety oraz wypraski sezonowano przez 24 godzin w temperaturze otoczenia ( $t \approx 21^\circ\text{C}$ ). Po tym okresie brykiety poddawano próbie na ściskanie, rzut oraz oceniano ich podatność na granulowanie dwustopniowe. Natomiast wypraski badano tylko pod kątem ich podatności na granulowanie dwustopniowe.

#### **5.2.4. Badanie podatności scalonego materiału na granulowanie dwustopniowe**

Próba podatności na granulowanie dwustopniowe polegała na odważeniu 500 [g] scalonego materiału na wadze WS-23, skruszeniu go w laboratoryjnej kruszarce młotkowej (rys. 4.3) przy prędkościach uderzenia młotka 5,7; 8,5; 11,4; 14,2 oraz 17,4 [m/s], a następnie wyznaczeniu wychodu, rozumianego jako zawartość klasy

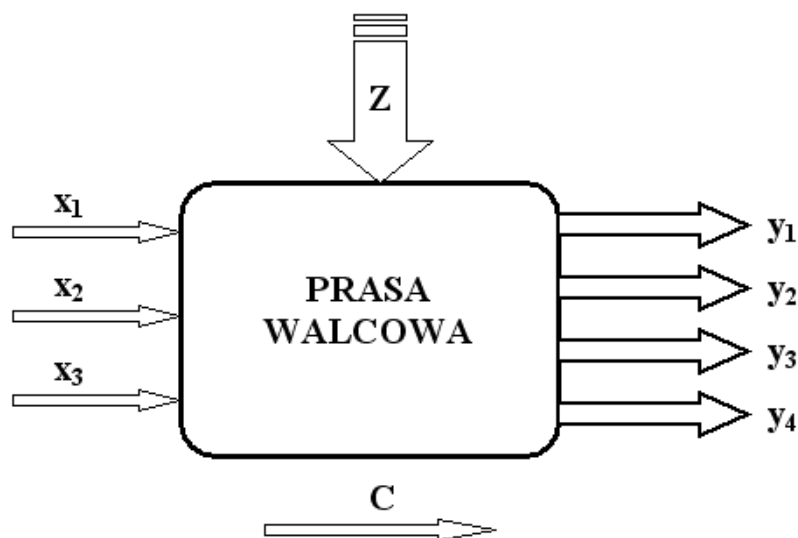
---

ziarnowej 0,63 – 2,0 [mm] w skruszonym produkcie. Wybór frakcji ziarnowej został podyktowany rozmiarem ziarna, jakim powinien charakteryzować się wytworzony z wodorotlenku wapnia metodą granulacji dwustopniowej wysokopowierzchniowy sorbent wapniowy [42, 56, 58, 108].

### 5.3. Badania eksperymentalne procesu brykietowania wodorotlenku wapnia w prasie walcowej

#### 5.3.1. Program badań eksperymentalnych

Na podstawie analizy wyników badań [42, 53, 54, 58, 108] procesu brykietowania wodorotlenku wapnia w prasie walcowej przyjęto model obiektu badań, który przedstawiono na rysunku 5.2.



**Rys. 5.2.** Schemat przyjętego modelu obiektu badań w przypadku brykietowania wodorotlenku wapnia w prasie walcowej

W przypadku eksperymentów brykietowania realizowanych w prasie walcowej LPW 450 zbiór wielkości wejściowych tworzą następujące czynniki:

- $x_1$  – rodzaj powierzchni roboczej walców,
- $x_2$  – wartość prędkości obwodowej walców formujących,
- $x_3$  – dodatek wody,
- czynniki ustalone podczas badań, które tworzą podzbiór C,
- czynniki zakłócające, tworzące podzbiór Z.

Natomiast w zbiorze czynników wyjściowych wyróżnia się:

- $y_1$  – wytrzymałość brykietów na zrzut,

- 
- $y_2$  – wytrzymałość brykietów na ściskanie,  
 $y_3$  – pobór mocy prądu elektrycznego przez układ napędowy prasy LPW 450,  
 $y_4$  – podatność scalonego materiału na granulowanie dwustopniowe.

Przed przystąpieniem do badań, kierując się kryterium maksymalnej informatywności zdecydowano, że zostaną one wykonane wg planu statystycznego zdeterminowanego kompletnego różnowartościowego PS/DK–V [121]. Planując badania procesu brykietowania wodorotlenku wapnia w prasie walcowej LPW 450 uściślono czynniki niezależne:

- rodzaj powierzchni roboczej walców:
  - $x_{11}$  – umożliwiająca wytwarzanie brykietów w kształcie siodła,
  - $x_{12}$  – umożliwiająca wytwarzanie brykietów w kształcie kropli,
- wartość prędkości obwodowej walców formujących:
  - $x_{21}$  – 0,1 [m/s],
  - $x_{22}$  – 0,2 [m/s],
  - $x_{23}$  – 0,3 [m/s],
- dodatek wody:
  - $x_{31}$  – 17,5% (w = 14,9%),
  - $x_{32}$  – 20,0% (w = 16,7%),
  - $x_{33}$  – 22,5% (w = 18,4%).

### 5.3.2. Wyniki badań eksperymentalnych

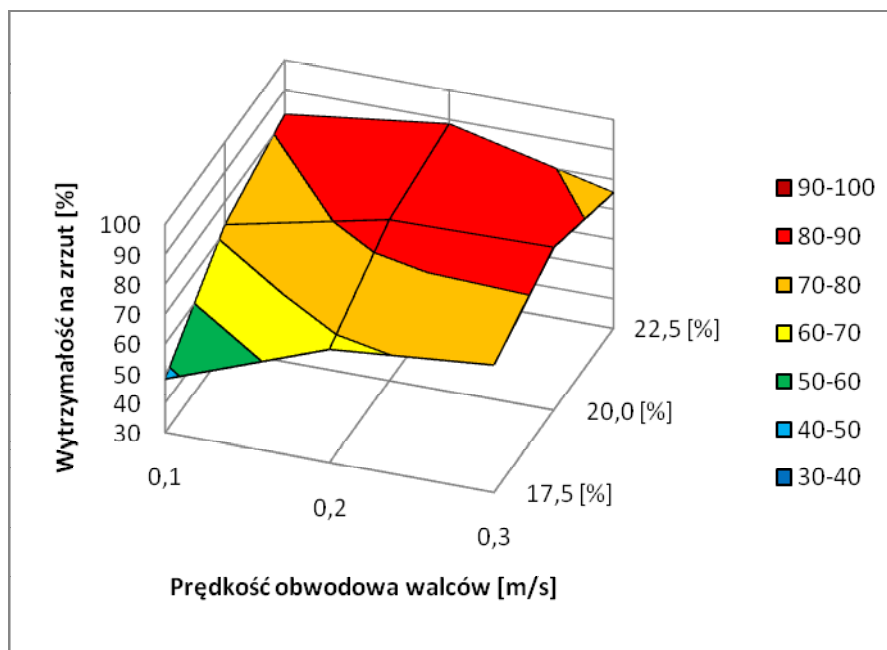
Badania eksperymentalne brykietowania wodorotlenku wapnia w prasie LPW 450 prowadzono wg planu zamieszczonego w pkt. 5.3.1. Materiał scalano dwukrotnie z przyczyn wymienionych w pkt. 5.2.3. Podczas przeprowadzania każdego eksperymentu mierzono moc prądu elektrycznego pobieraną przez silnik układu napędowego prasy LPW 450, co zilustrowano na rysunkach od 5.7 do 5.12, a następnie obliczano jednostkowe zapotrzebowanie energii podczas brykietowania wodorotlenku wapnia (rys. 5.13 do 5.18). Po okresie 24 h sezonowania wytworzone brykiety poddawano próbom wytrzymałości na zrzut oraz na ściskanie zgodnie z metodyką zawartą w punktach 4.2.6 oraz 4.2.7. Uzyskane wyniki przedstawiono na kolejnych rysunkach od 5.3 do 5.6. Badano również podatność scalonego materiału na wytwarzanie z niego granulatu, a otrzymane rezultaty pokazano w formie graficznej na rys. 5.19 do 5.24.

---

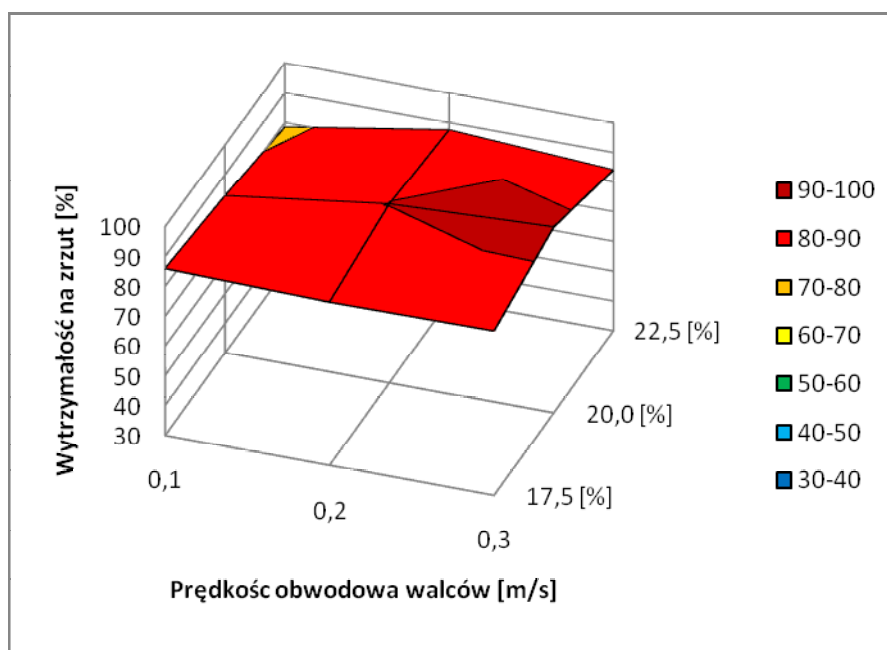
Wyniki przeprowadzonych eksperymentów dowodzą, że kształt powierzchni roboczej elementów formujących, stosowanych w badaniach brykietowania, ma znaczący wpływ na pobór mocy układu napędowego prasy i własności mechaniczne brykietów. Wiąże się to także z podatnością brykietów na wytwarzanie z nich granulatu w procesie rozdrabniania. Stwierdzono, że różny jest charakter wpływu prędkości obwodowej walców oraz dodatku ilości wody do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  na własności mechaniczne scalonego materiału. W przypadku brykietów posiadających formę kropli wzrost prędkości obwodowej walców oraz wilgotności wodorotlenku wapnia powoduje zwiększenie wytrzymałości brykietów na zrzut. Natomiast wymienione parametry nie wpływają na nią w sposób znaczący w przypadku brykietów w kształcie siodła. Przeprowadzone badania wytrzymałości na ściskanie obu rodzajów brykietów dowiodły, że zmniejsza się ona wraz ze zwiększaniem wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Próby laboratoryjne wykazały również, że dla powierzchni roboczej walców umożliwiającej wytwarzanie brykietów w formie siodła jednostkowe zapotrzebowanie energii podczas pierwszego zagęszczania wodorotlenku wapnia jest ok. 3-krotnie wyższe niż w przypadku stosowania walców dających brykiety w kształcie kropli. Podczas drugiego przejścia materiału wzrost ten jest nawet 5-krotny. Eksperymenty, których celem było określenie podatności na rozdrabnianie brykietów bez płaszczyzny podziału udowodniły, że wraz ze wzrostem prędkości uderzenia rośnie wychód przyjętej frakcji ziarnowej. Przeciwną tendencję zaobserwowano dla brykietów z płaszczyzną podziału. W badanych przypadkach nie stwierdzono znaczącego wpływu prędkości scalania wodorotlenku wapnia na jego podatność na granulowanie dwustopniowe. Najlepsze efekty uzyskano poddając rozdrabnianiu z prędkością uderzenia 17,4 [m/s] brykiety w kształcie siodła, otrzymane przy prędkości obwodowej walców 0,1 [m/s] i dużym całkowitym jednostkowym zapotrzebowaniu energii sięgającym 28,8 [kWh/Mg]. Maksymalny wychód przyjętej frakcji ziarnowej 0,63 – 2,0 [mm] osiągnął 55,4%. Natomiast dla brykietów z płaszczyzną podziału najwyższy wychód wyniósł 54%. Otrzymano go rozdrabniając z prędkością uderzenia 8,5 [m/s] brykiety wytworzone przy prędkości obwodowej walców 0,2 [m/s]. Całkowite jednostkowe zapotrzebowanie energii przy wytwarzaniu tej partii brykietów wynosiło 9,4 [kWh/Mg] i było ok. trzykrotnie niższe niż w przypadku brykietów w kształcie siodła, z których po rozdrobnieniu otrzymano największy wychód przyjętej klasy ziarnowej. Przedstawione efekty uzyskano dla różnej ilości wody dodawanej do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . W pierwszym przypadku stanowiła ona

---

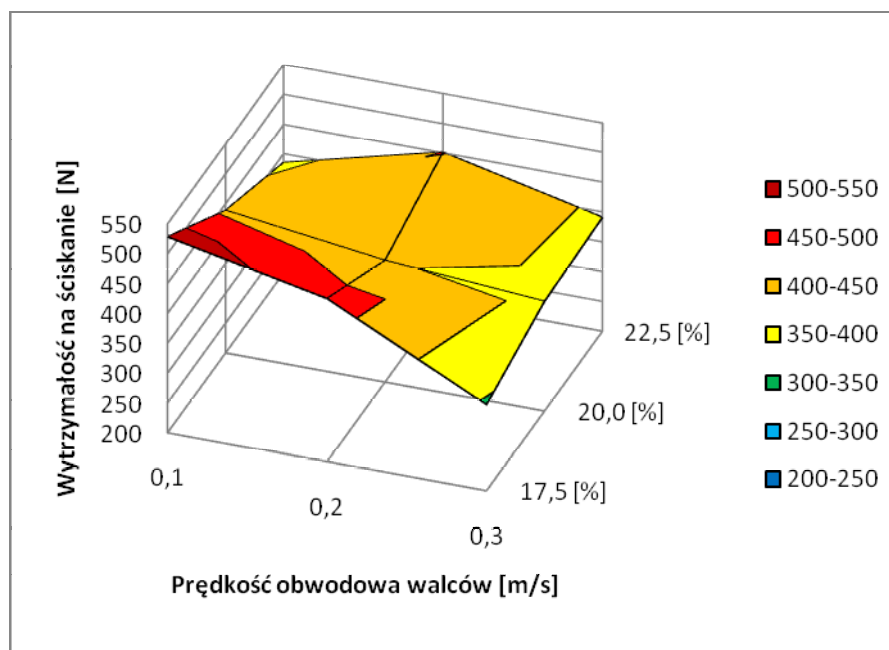
20% masy wodorotlenku, natomiast w drugim 22,5%. Należy podkreślić, że granulacja dwustopniowa jest takim procesem aglomeracji, w którym nie powstają odpady, ponieważ podziarno i nadziarno zawracane jest do scalania.



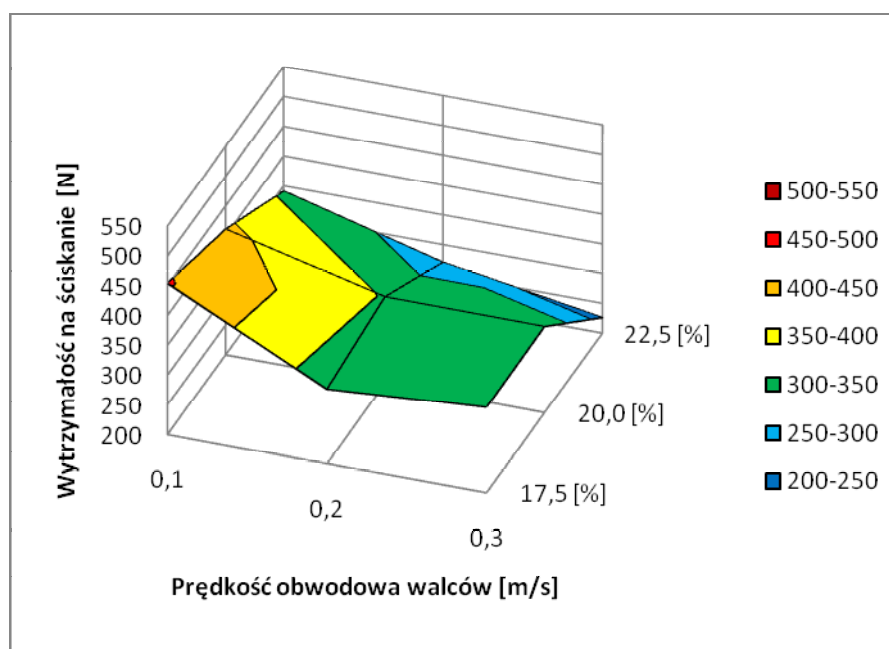
**Rys. 5.3.** Zależność wytrzymałości brykietów na zrzut od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca(OH)}_2$  - brykiety w kształcie kropli poddane sezonowaniu



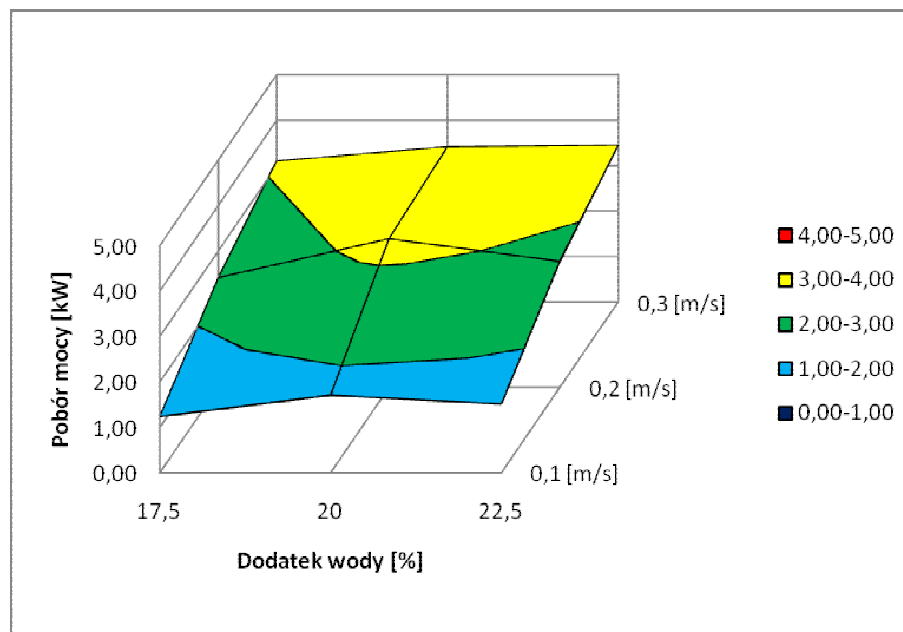
**Rys. 5.4.** Zależność wytrzymałości brykietów na zrzut od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca(OH)}_2$  - brykiety w kształcie siodła poddane sezonowaniu



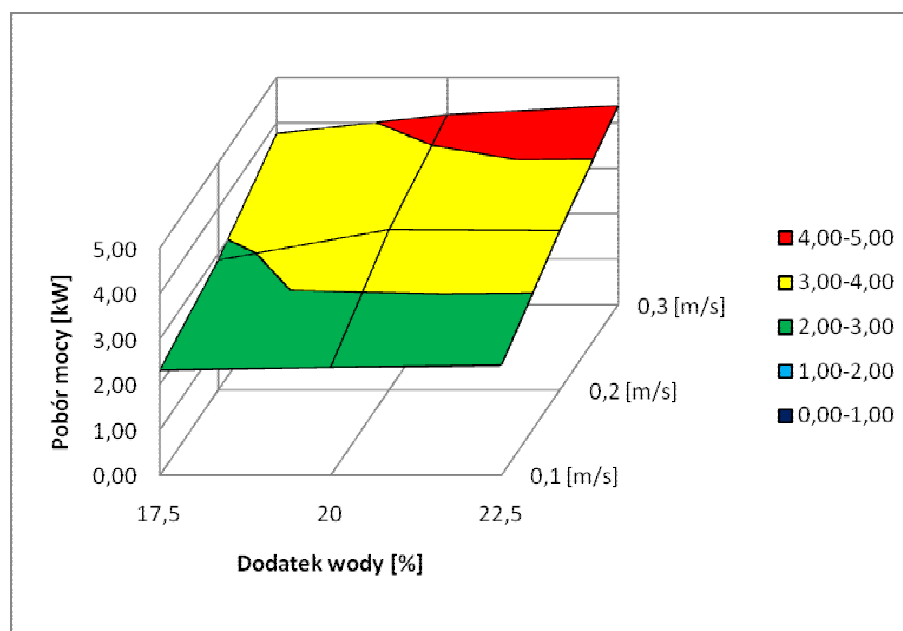
**Rys. 5.5.** Zależność wytrzymałości brykietów na ściskanie od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca(OH)}_2$  - brykiety w kształcie kropli poddane sezonowaniu



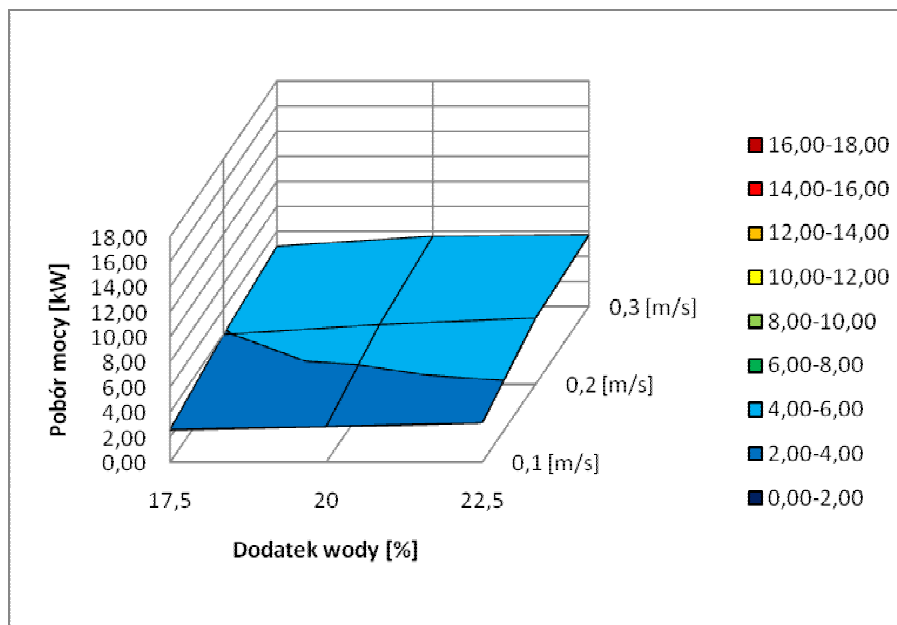
**Rys. 5.6.** Zależność wytrzymałości brykietów na ściskanie od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca(OH)}_2$  - brykiety w kształcie siódła poddane sezonowaniu



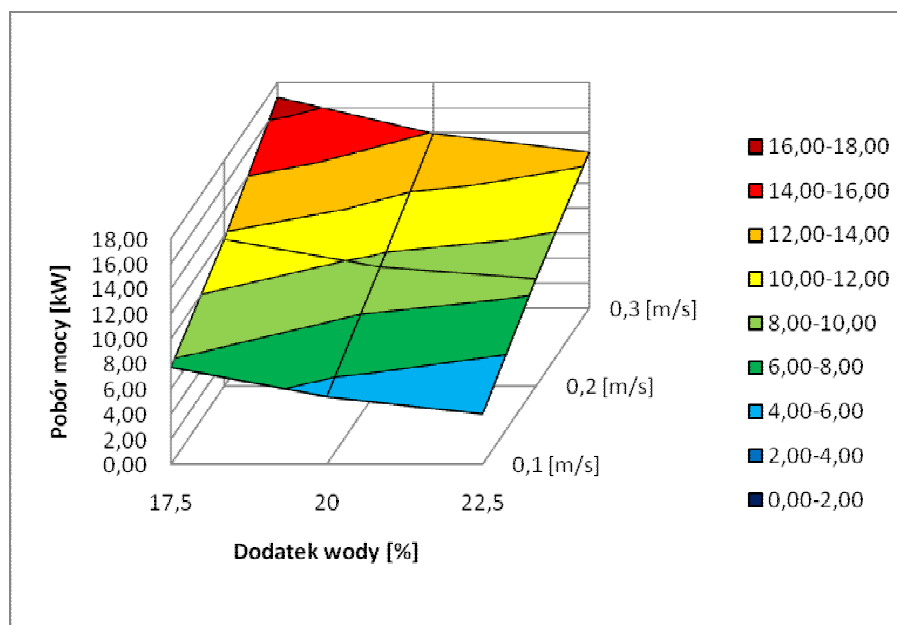
**Rys. 5.7.** Zależność poboru mocy napędu głównego brykociarki od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - brykiety w kształcie kropli, I przejście



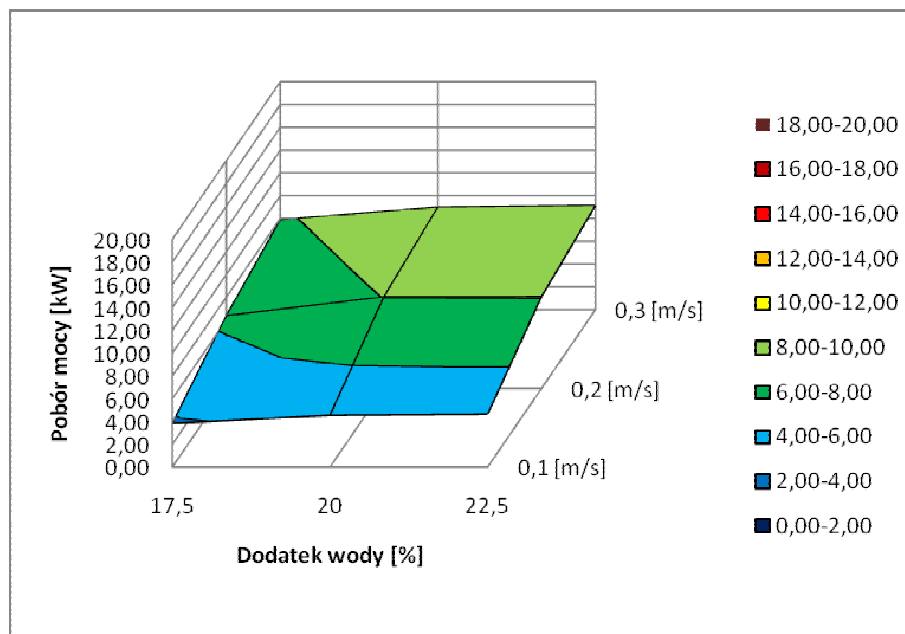
**Rys. 5.8.** Zależność poboru mocy napędu głównego brykociarki od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - brykiety w kształcie siodła, I przejście



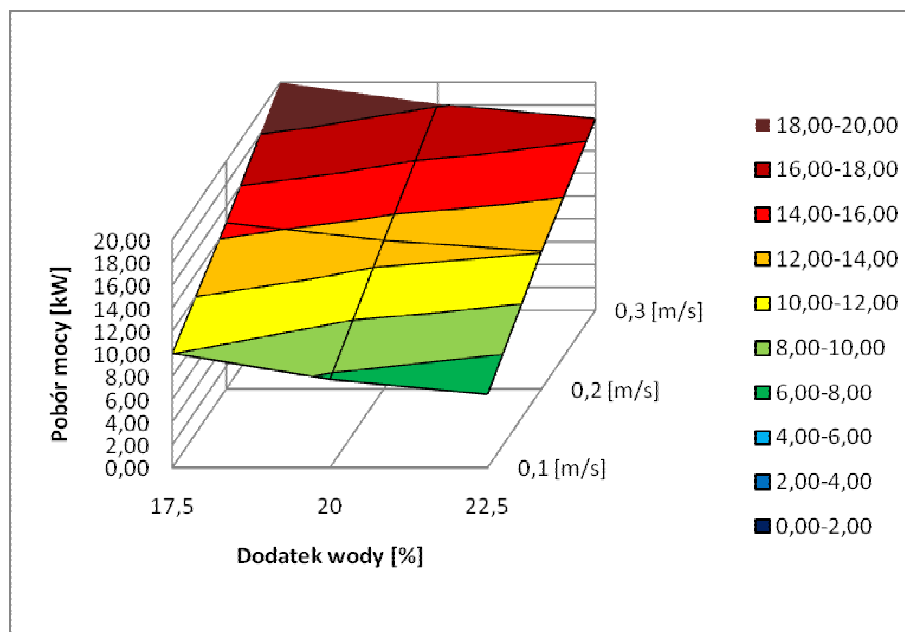
**Rys. 5.9.** Zależność poboru mocy napędu głównego brykociarki od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do Ca(OH)<sub>2</sub> - brykiety w kształcie kropli, II przejście



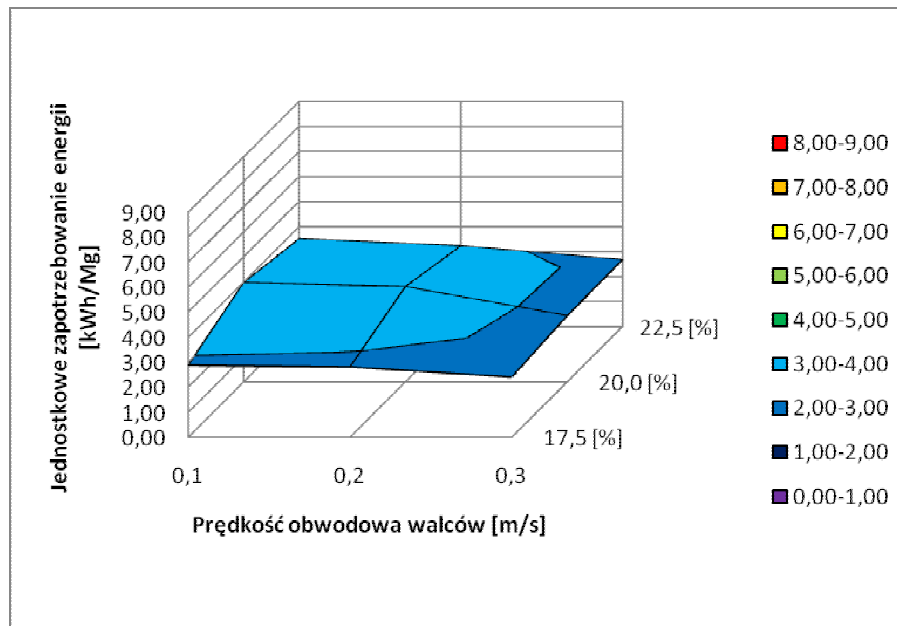
**Rys. 5.10.** Zależność poboru mocy napędu głównego brykociarki od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do Ca(OH)<sub>2</sub> - brykiety w kształcie siodła, II przejście



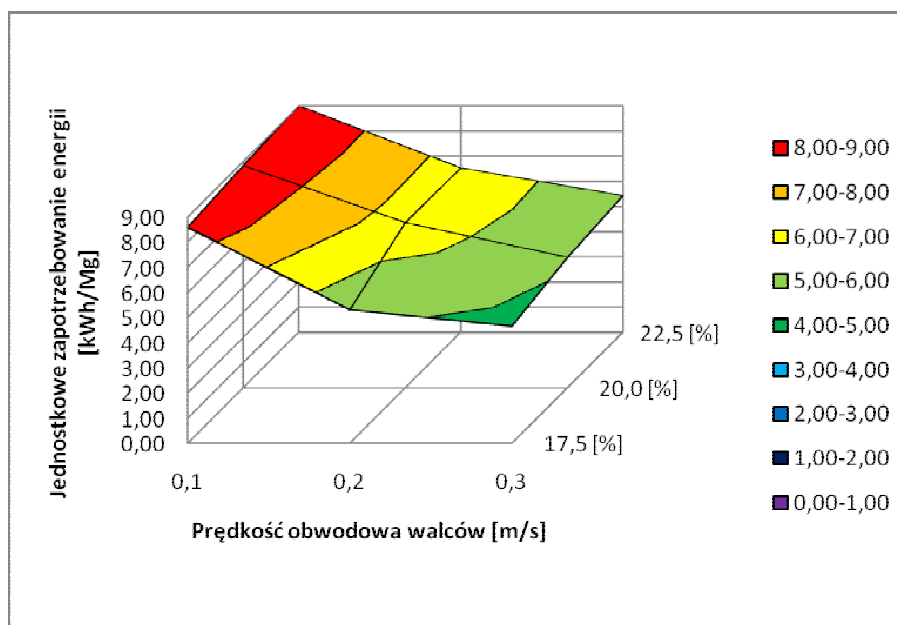
**Rys. 5.11.** Zależność całkowitego poboru mocy napędu głównego brykieciarki od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca(OH)}_2$  - brykiety w kształcie kropli uzyskane w wyniku dwukrotnego zagęszczania materiału



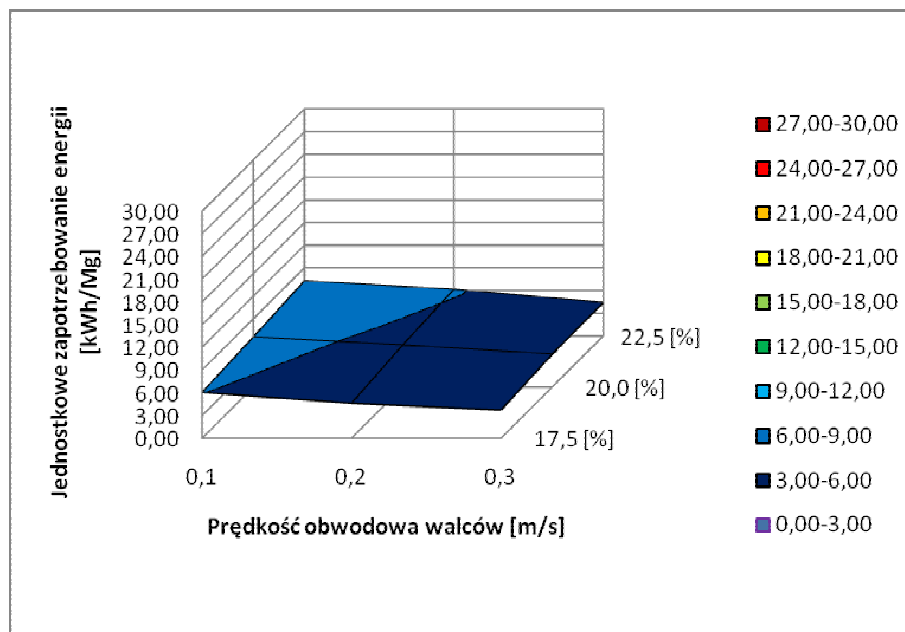
**Rys. 5.12.** Zależność całkowitego poboru mocy napędu głównego brykieciarki od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca(OH)}_2$  - brykiety w kształcie siódła uzyskane w wyniku dwukrotnego zagęszczania materiału



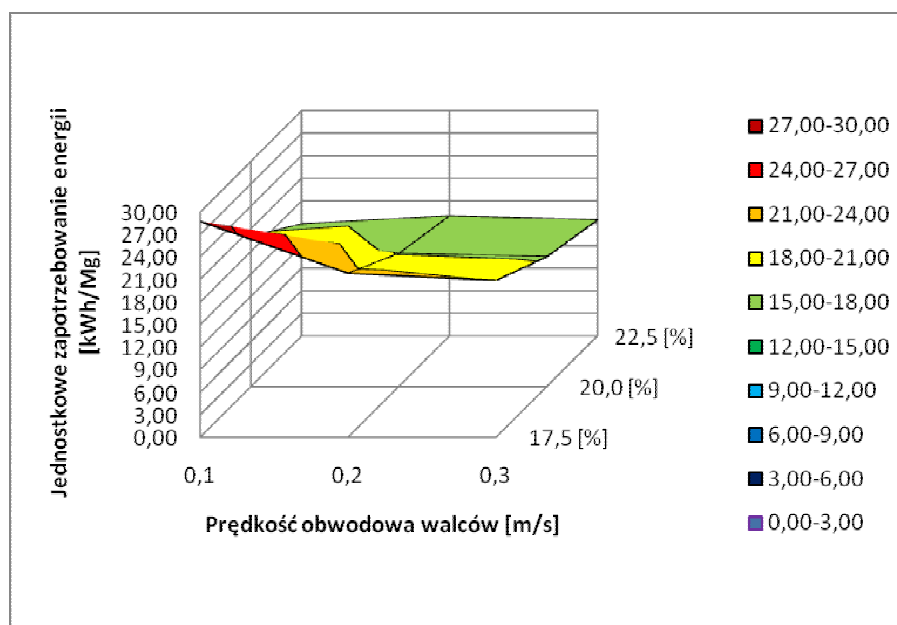
**Rys. 5.13.** Zależność jednostkowego zapotrzebowania energii od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – brykiety w kształcie kropli, I przejście



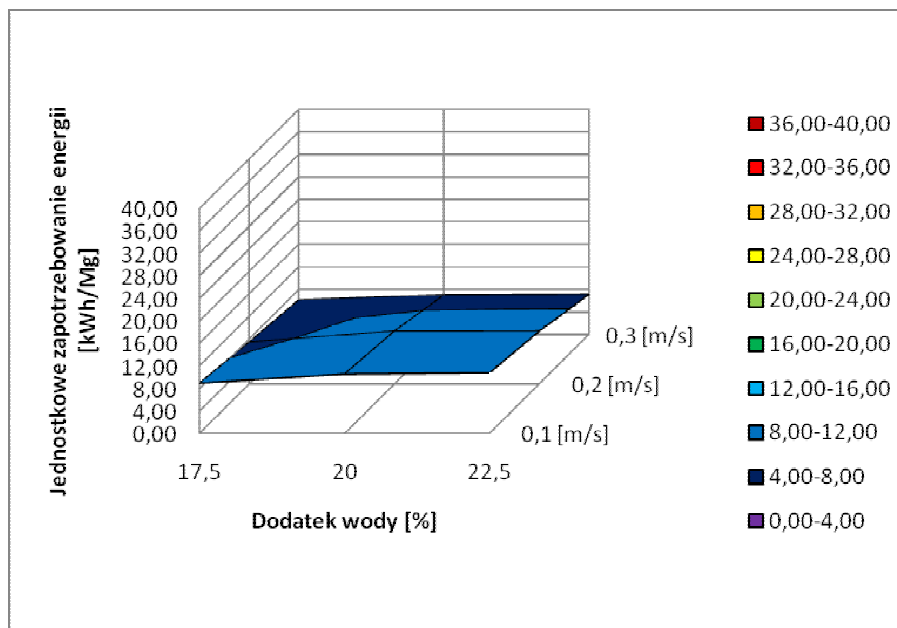
**Rys. 5.14.** Zależność jednostkowego zapotrzebowania energii od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – brykiety w kształcie siodła, I przejście



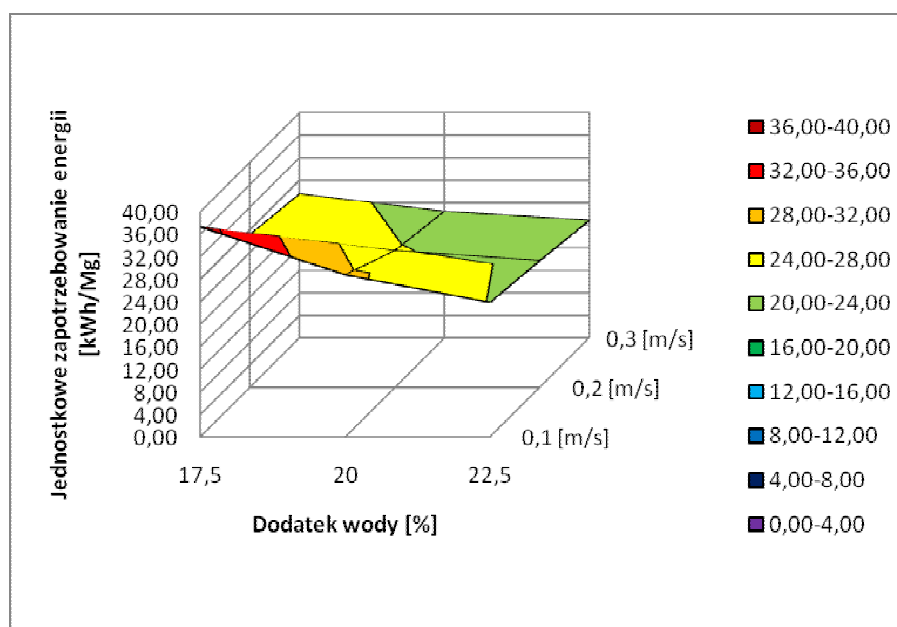
**Rys. 5.15.** Zależność jednostkowego zapotrzebowania energii od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – brykiety w kształcie kropli, II przejście



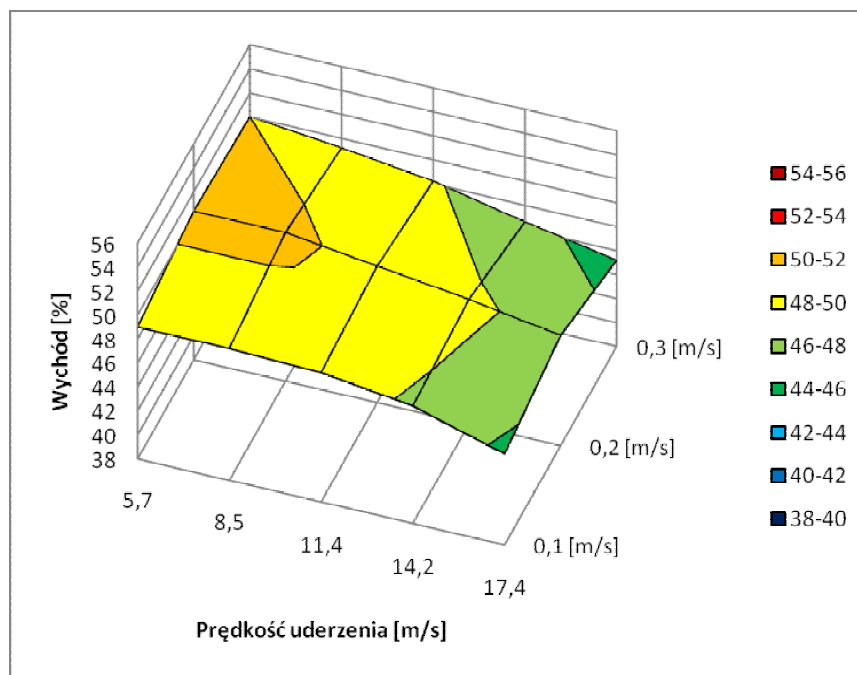
**Rys. 5.16.** Zależność jednostkowego zapotrzebowania energii od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – brykiety w kształcie siodła, II przejście



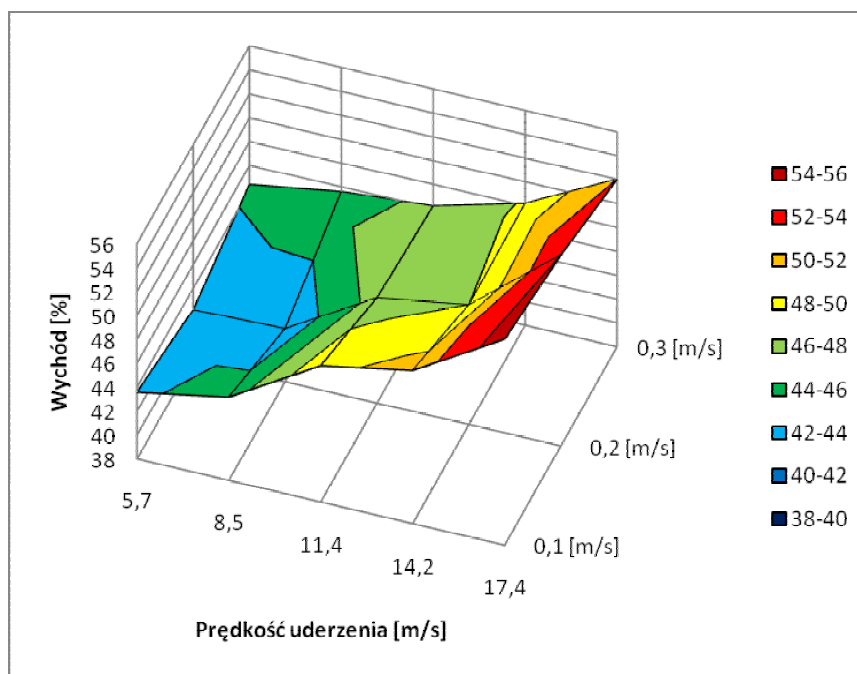
**Rys. 5.17.** Zależność całkowitego jednostkowego zapotrzebowania energii od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – brykiety w kształcie kropli uzyskane w wyniku dwukrotnego zagęszczania materiału



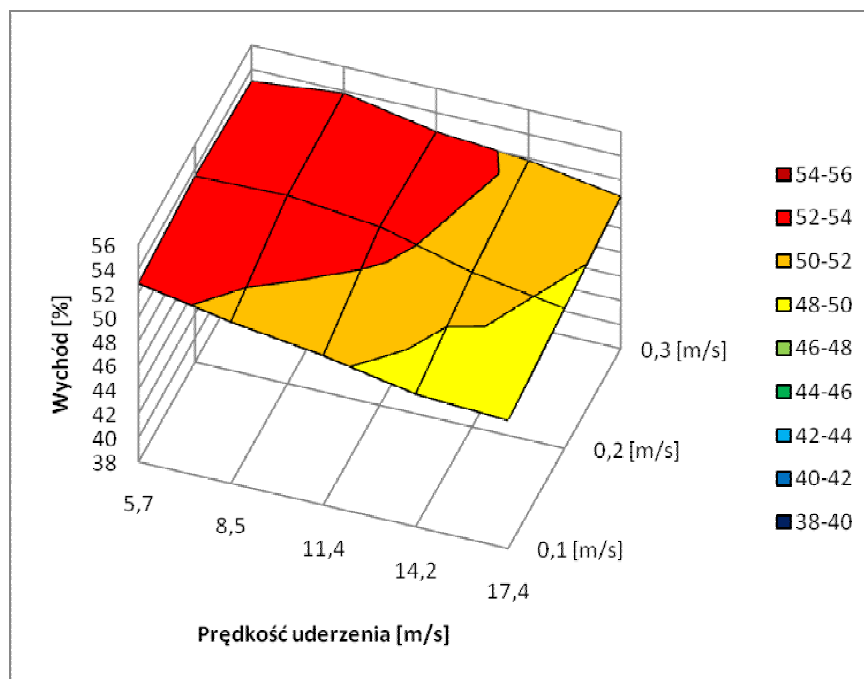
**Rys. 5.18.** Zależność całkowitego jednostkowego zapotrzebowania energii od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – brykiety w kształcie siodła uzyskane w wyniku dwukrotnego zagęszczania materiału



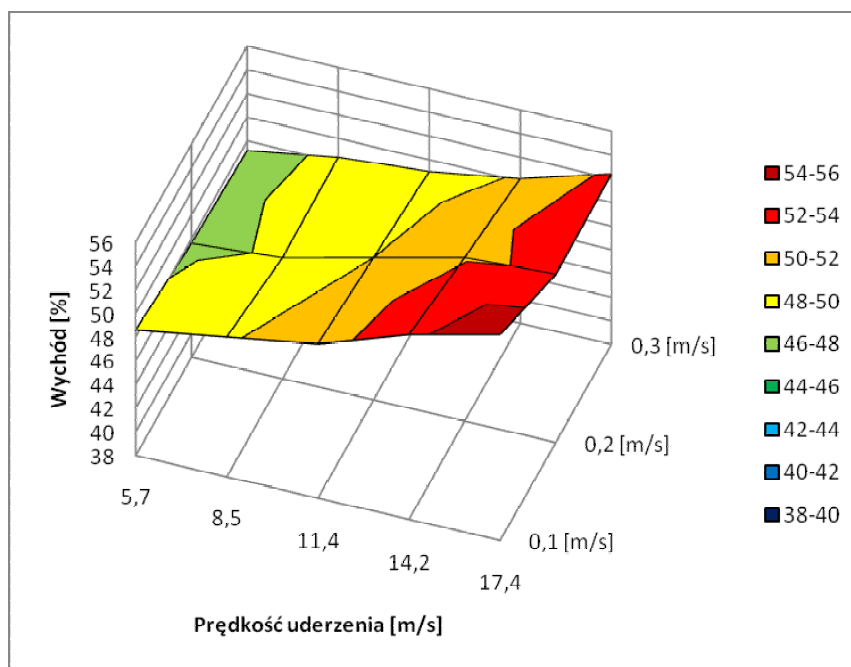
**Rys. 5.19.** Zależność wychodu frakcji ziarnowej 0,63 – 2,0 [mm] od wartości prędkości obwodowej walców podczas brykietowania  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  oraz wartości prędkości uderzenia w procesie kruszenia scalonego materiału - brykiety w kształcie kropli uzyskane z  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  z dodatkiem 17,5% wody



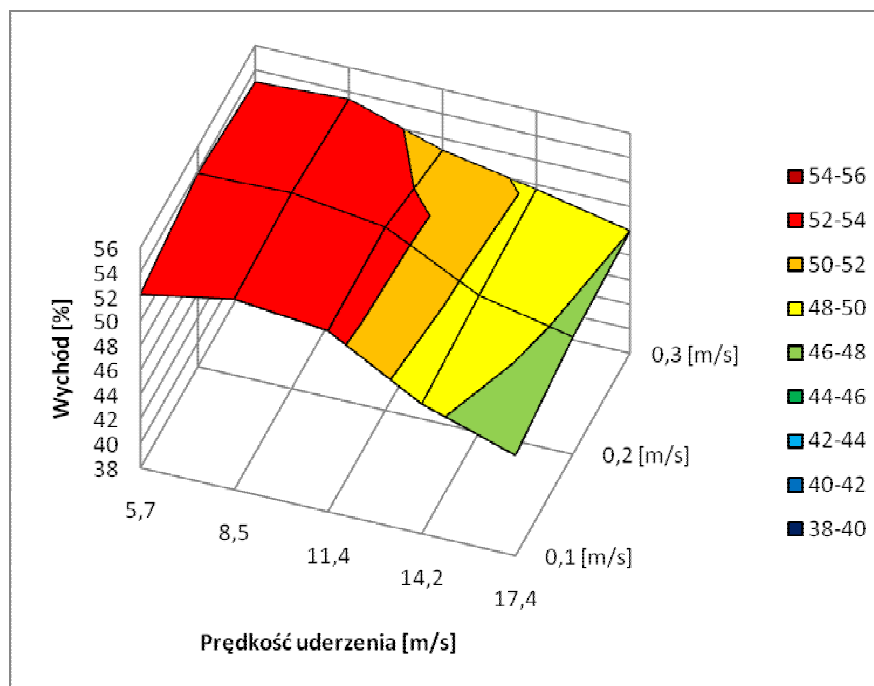
**Rys. 5.20.** Zależność wychodu frakcji ziarnowej 0,63 – 2,0 [mm] od wartości prędkości obwodowej walców podczas brykietowania  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  oraz wartości prędkości uderzenia w procesie kruszenia scalonego materiału - brykiety w kształcie siodła uzyskane z  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  z dodatkiem 17,5% wody



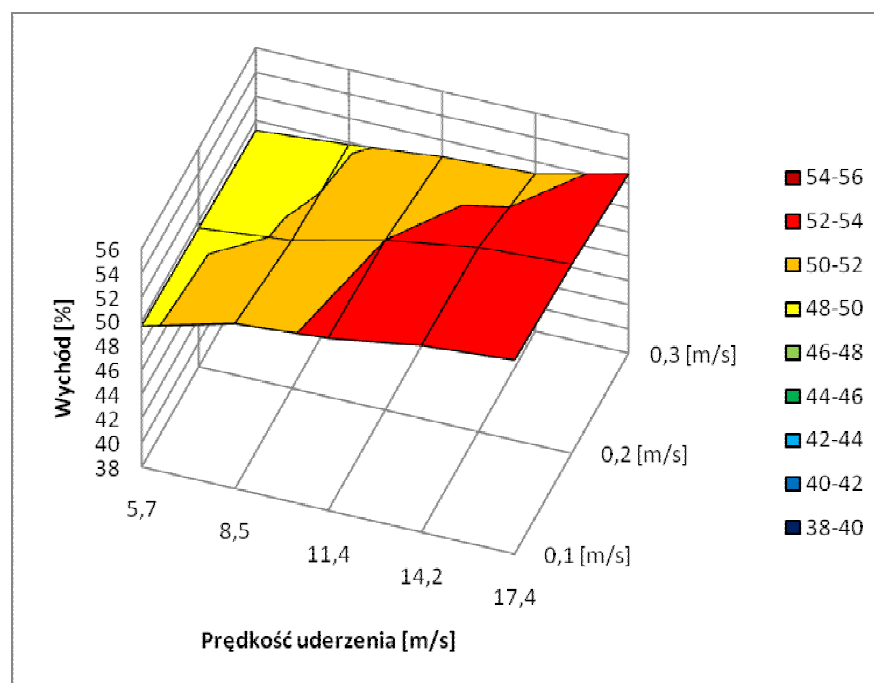
**Rys. 5.21.** Zależność wychodu frakcji ziarnowej 0,63 – 2,0 [mm] od wartości prędkości obwodowej walców podczas brykietowania  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  oraz wartości prędkości uderzenia w procesie kruszenia scalonego materiału - brykiety w kształcie kropli uzyskane z  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  z dodatkiem 20,0% wody



**Rys. 5.22.** Zależność wychodu frakcji ziarnowej 0,63 – 2,0 [mm] od wartości prędkości obwodowej walców podczas brykietowania  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  oraz wartości prędkości uderzenia w procesie kruszenia scalonego materiału - brykiety w kształcie siodła uzyskane z  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  z dodatkiem 20,0% wody



**Rys. 5.23.** Zależność wychodu frakcji ziarnowej 0,63 – 2,0 [mm] od wartości prędkości obwodowej walców podczas brykietowania  $\text{Ca(OH)}_2$  oraz wartości prędkości uderzenia w procesie kruszenia scalonego materiału - brykiety w kształcie kropli uzyskane z  $\text{Ca(OH)}_2$  z dodatkiem 22,5% wody



**Rys. 5.24.** Zależność wychodu frakcji ziarnowej 0,63 – 2,0 [mm] od wartości prędkości obwodowej walców podczas brykietowania  $\text{Ca(OH)}_2$  oraz wartości prędkości uderzenia w procesie kruszenia scalonego materiału - brykiety w kształcie siodła uzyskane z  $\text{Ca(OH)}_2$  z dodatkiem 22,5% wody

---

### 5.3.3. Wnioski

Na podstawie analizy wyników badań procesu brykietowania wodorotlenku wapnia w laboratoryjnej prasie walcowej LPW 450, uzyskanych dla wielkości wejściowych zawierających się w założonych przedziałach sformułowano podane poniżej wnioski:

- Stosowane kształty powierzchni roboczej elementów formujących, służących do brykietowania mają znaczący wpływ na własności mechaniczne brykietów oraz podatność na wytwarzanie z nich granulatu, a także pobór mocy układu napędowego prasy.
- Wzrost wilgotności wodorotlenku wapnia oraz wartości prędkości obwodowej walców powodują zwiększenie wytrzymałości na zrzut brykietów w kształcie kropli, natomiast nie wpływają w sposób znaczący na wytrzymałość brykietów w formie siodła.
- Podobnie jak w przypadku koncentratu miedzi wyższą wytrzymałością na ściskanie charakteryzują się brykiety w kształcie kropli, co wynika z ich większego przekroju poprzecznego.
- Zwiększenie wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do wodorotlenku wapnia powodują obniżenie wytrzymałości na ściskanie obu rodzajów brykietów.
- Stosowanie w prasie laboratoryjnej, podczas pierwszego zagęszczania wodorotlenku wapnia, powierzchni roboczej walców umożliwiającej wytwarzanie brykietów w formie siodła, powoduje ok. 3-krotny wzrost jednostkowego zapotrzebowania energii na tę operację w porównaniu z przypadkiem, w którym walce posiadają wgłębienia umożliwiające wytworzenie brykietów w kształcie kropli, natomiast podczas drugiego przejścia materiału wzrost ten jest nawet 5-krotny.
- Najmniejszą wartość całkowitego jednostkowego zapotrzebowania energii równą 6,1 [kWh/Mg] uzyskano dla powierzchni roboczej elementów formujących stosowanej do wytwarzania brykietów z płaszczyzną podziału, scalając  $\text{Ca(OH)}_2$  z dodatkiem wody 17,5% przy prędkości obwodowej walców 0,3 [m/s].
- Podatność wodorotlenku wapnia na dwustopniowe granulowanie zależy od kształtu powierzchni roboczej walców użytej do jego scalania.

- 
- Dla brykietów bez płaszczyzny podziału wraz ze wzrostem prędkości uderzenia w procesie ich rozdrabniania wychód przyjętej frakcji ziarnowej rośnie, przeciwnie jest natomiast w przypadku brykietów posiadających płaszczyznę podziału.
  - Największą podatność wodorotlenku wapnia na dwustopniowe granulowanie, sięgającą 55,4% otrzymano w przypadku rozdrabniania, z prędkością uderzenia 17,4 [m/s] brykietów w kształcie siodła scalonych z dodatkiem wody 20,0% przy wartości prędkości obwodowej walców 0,1 [m/s] i dużym całkowitym jednostkowym zapotrzebowaniu energii sięgającym 28,8 [kWh/Mg].
  - Wysoką podatność wodorotlenku wapnia na dwustopniową granulację, wynoszącą 54% uzyskano rozdrabniając z prędkością uderzenia 8,5 [m/s] brykiety w kształcie kropli wytworzone przy dodatku wody 22,5%, prędkości obwodowej walców 0,2 [m/s] i relatywnie małym całkowitym jednostkowym zapotrzebowaniu energii sięgającym 9,4 [kWh/Mg].
  - Dla obydwu stosowanych powierzchni roboczych elementów formujących, wartość prędkości obwodowej walców podczas scalania wodorotlenku wapnia nie ma znaczącego wpływu na wychód założonej frakcji ziarnowej powstałej w procesie kruszenia.

## **5.4. Badania eksperymentalne procesu kawałkowania wodorotlenku wapnia w prasie walcowej**

### **5.4.1. Program badań eksperymentalnych**

Na podstawie analizy wyników badań [42, 53, 54, 58,] badań procesu kawałkowania wodorotlenku wapnia w prasie walcowej przyjęto model obiektu badań, który przedstawiono na rysunku 5.25.

W przypadku eksperymentów kawałkowania realizowanych w prasie walcowej LPW 450 zbiór wielkości wejściowych tworzą następujące czynniki:

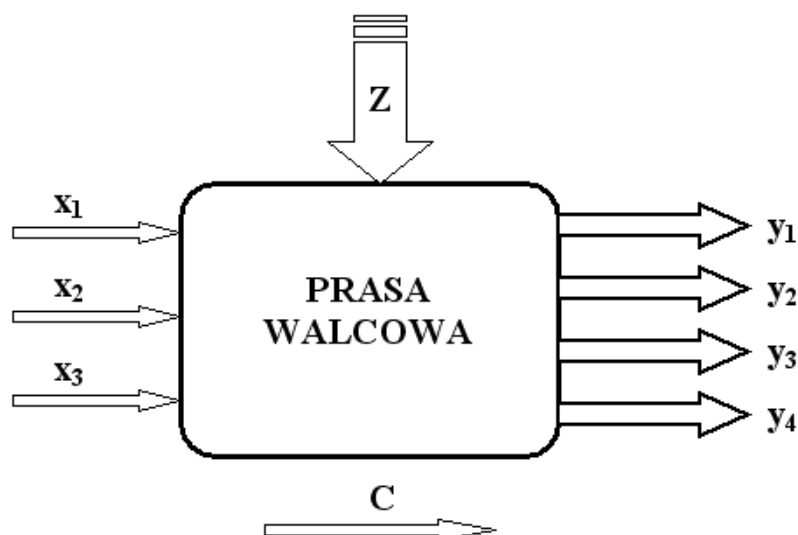
$x_1$  – rodzaj powierzchni roboczej walców,

$x_2$  – wartość prędkości obwodowej walców formujących,

$x_3$  – dodatek wody,

czynniki ustalone podczas badań, które tworzą podzbiór C,

czynniki zakłócające, tworzące podzbiór Z.



**Rys. 5.25.** Schemat przyjętego modelu obiektu badań w przypadku kawałkowania wodorotlenku wapnia w prasie walcowej

Natomiast w zbiorze czynników wyjściowych wyróżnia się:

- $y_1$  – podatność scalonego materiału na granulowanie dwustopniowe
- $y_2$  – pobór mocy prądu elektrycznego przez układ napędowy prasy LPW 450

Przed przystąpieniem do badań, kierując się kryterium maksymalnej informatywności zdecydowano, że zostaną one wykonane wg planu statystycznego zdeterminowanego kompletnego różnowartościowego PS/DK–V [121]. Planując badania procesu kawałkowania wodorotlenku wapnia w prasie walcowej LPW 450 uściślono czynniki niezależne:

- rodzaj powierzchni roboczej walców:
  - $x_{11}$  – umożliwiająca wytwarzanie wyprasek z dwustronnymi wypukłościami,
  - $x_{12}$  – umożliwiająca wytwarzanie wyprasek z jednostronnymi wypukłościami,
- wartość prędkości obwodowej walców formujących:
  - $x_{21}$  – 0,1 [m/s],
  - $x_{22}$  – 0,2 [m/s],
  - $x_{23}$  – 0,3 [m/s],
- dodatek wody:
  - $x_{31}$  – 17,5% ( $w = 14,9\%$ ),
  - $x_{32}$  – 20,0% ( $w = 16,7\%$ ),
  - $x_{33}$  – 22,5% ( $w = 18,4\%$ ).

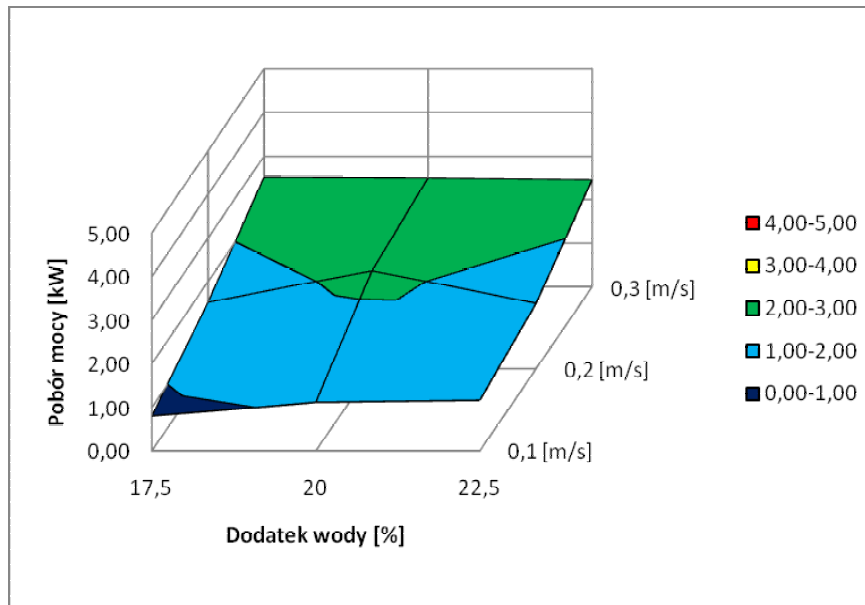
---

#### 5.4.2. Wyniki badań eksperymentalnych

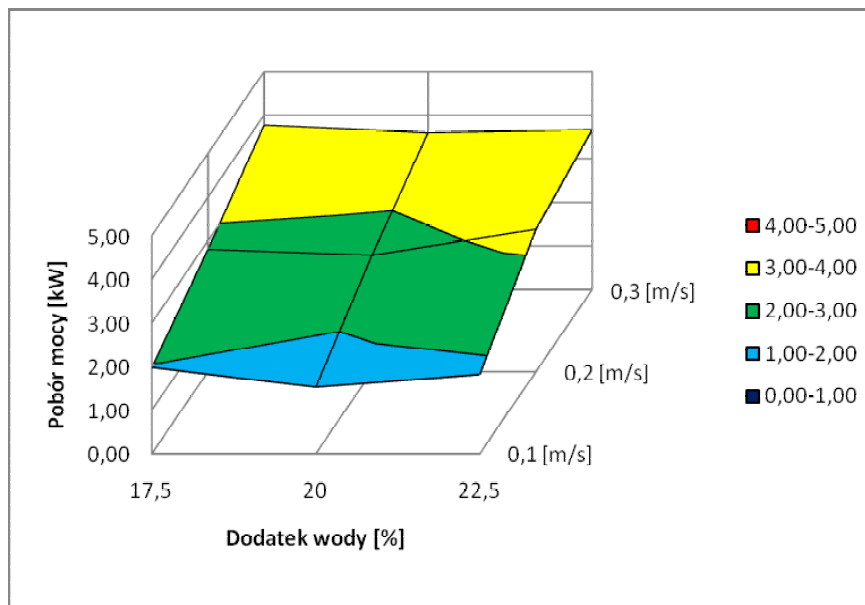
Badania eksperymentalne kawałkowania wodorotlenku wapnia w prasie LPW 450 prowadzono wg planu zamieszczonego w pkt. 5.4.1. Materiał scalano dwukrotnie z przyczyn wymienionych w pkt. 5.2.3. Podczas przeprowadzania każdego eksperymentu mierzono moc prądu elektrycznego pobieraną przez silnik układu napędowego prasy LPW 450, co zilustrowano na rysunkach od 5.26 do 5.31, a następnie obliczano jednostkowe zapotrzebowanie energii podczas kawałkowania wodorotlenku wapnia (rys. 5.32 do 5.37). Po okresie 24 h sezonowania badano podatność scalonego materiału na wytwarzanie z niego granulatu, a otrzymane rezultaty pokazano w formie graficznej na rys. 5.38 do 5.43.

Wyniki przeprowadzonych eksperymentów dowodzą, że podobnie jak to miało miejsce w przypadku brykietowania kształt powierzchni roboczej elementów formujących, stosowanych w badaniach kawałkowania, ma znaczący wpływ na pobór mocy układu napędowego prasy oraz podatność otrzymanych wyprasek na wytwarzanie z nich granulatu w procesie rozdrabniania. Próby laboratoryjne wykazały, że dla powierzchni roboczej walców umożliwiającej wytwarzanie wyprasek z jednostronnymi wypukłościami jednostkowe zapotrzebowanie energii podczas pierwszego zagęszczania wodorotlenku wapnia jest ok. 70% wyższe niż w przypadku stosowania walców dających wypraski z dwustronnymi wypukłościami. W przypadku powtórnego kawałkowania materiału jednostkowe zapotrzebowanie energii dla obydwu powierzchni roboczych walców utrzymuje się na porównywalnym poziomie. Eksperymenty, których celem było określenie podatności na rozdrabnianie wyprasek z jednostronnymi wypukłościami udowodniły, że w badanym zakresie prędkości uderzenia korzystnie jest kruszyć scalony  $\text{Ca(OH)}_2$  przy niskich jej wartościach. Dla wyprasek z dwustronnymi wypukłościami wskazane jest ich kruszenie z zachowaniem średniej wartości prędkości uderzenia z przyjętego przedziału tzn. 11,4 [m/s]. Natomiast nie stwierdzono znaczącego wpływu prędkości scalania wodorotlenku wapnia na jego podatność na granulowanie dwustopniowe. Najlepsze efekty uzyskano poddając rozdrabnianiu z prędkością uderzenia 8,5 [m/s] wypraski z jednostronnymi wypukłościami, otrzymane przy prędkości obwodowej walców 0,3 [m/s] i całkowitym jednostkowym zapotrzebowaniu energii sięgającym 11,8 [kWh/Mg]. Maksymalny wychód przyjętej frakcji ziarnowej 0,63 – 2,0 [mm] osiągnął 54,6%. Natomiast dla wyprasek z dwustronnymi wypukłościami wychód wyniósł 54,2%. Otrzymano go rozdrabniając z prędkością uderzenia 8,5 [m/s] wypraski, wytworzone przy prędkości obwodowej

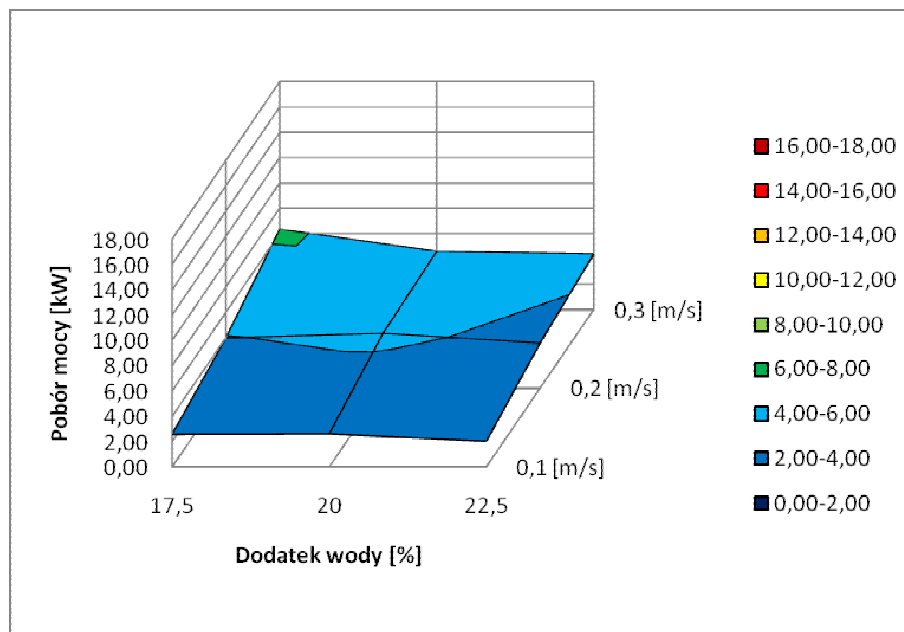
walców 0,1 [m/s]. Całkowite jednostkowe zapotrzebowanie energii przy wytwarzaniu tej partii wyprasek wynosiło 12,8 [kWh/Mg] i było o ok. 8% wyższe niż w przypadku wyprasek z jednostronnymi wypukłościami, z których po rozdrobnieniu otrzymano największy wychód przyjętej klasy ziarnowej. Przedstawione efekty uzyskano dla różnej ilości wody dodawanej do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . W pierwszym przypadku stanowiła ona 17,5% masy wodorotlenku, natomiast w drugim 22,5%.



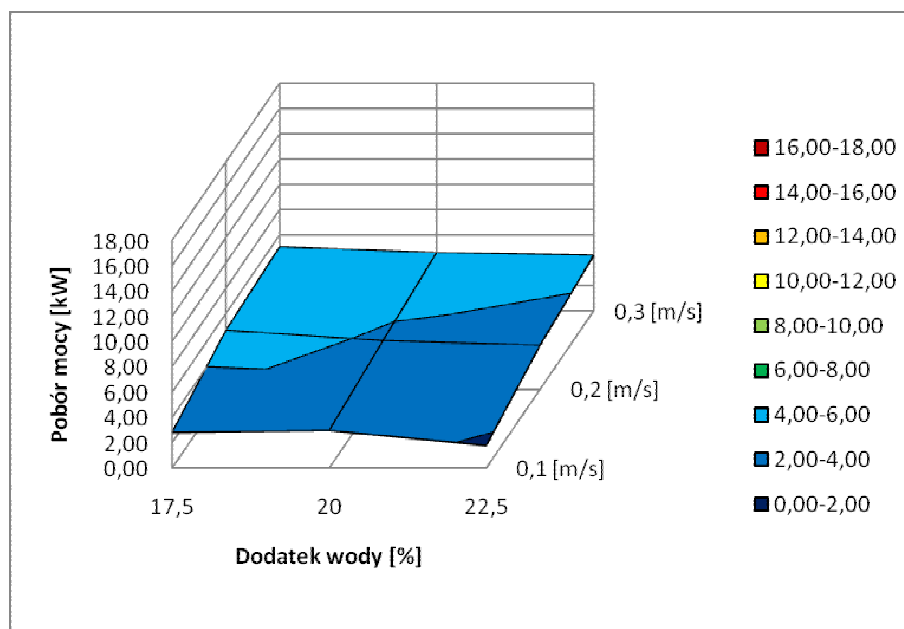
**Rys. 5.26.** Zależność poboru mocy napędu głównego brykociarki od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – wypraski z dwustronnymi wypukłościami, I przejście



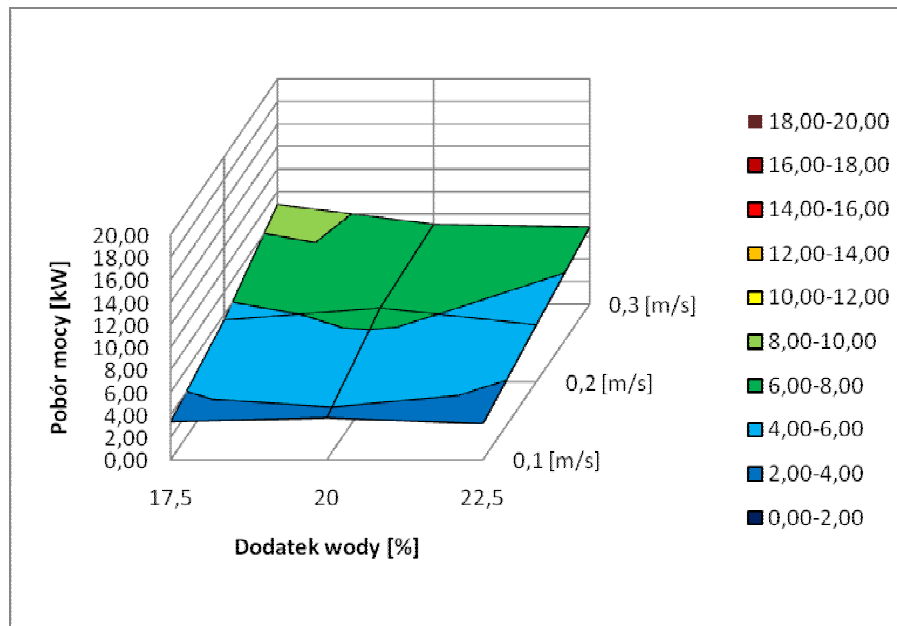
**Rys. 5.27.** Zależność poboru mocy napędu głównego brykociarki od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – wypraski z jednostronnymi wypukłościami, I przejście



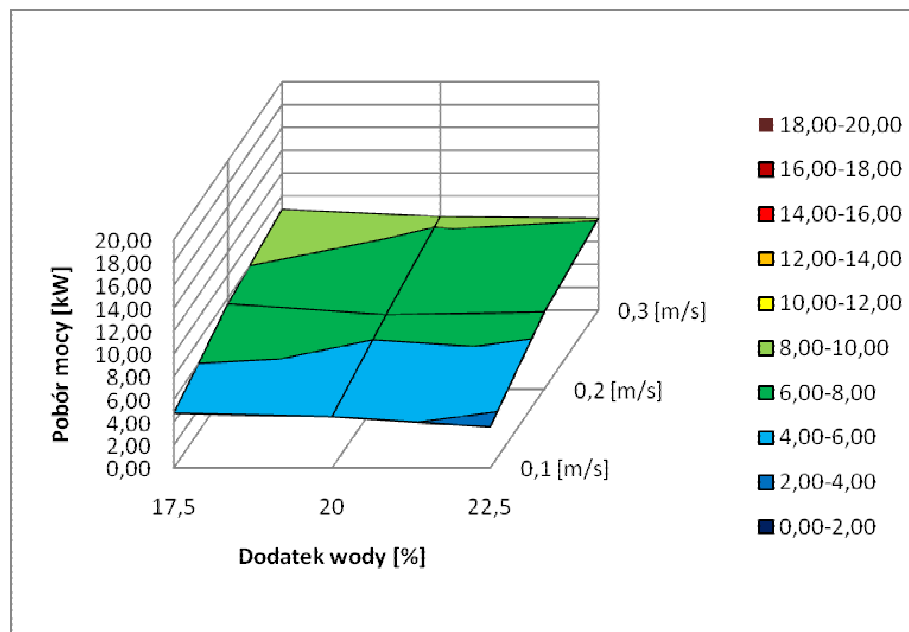
**Rys. 5.28.** Zależność poboru mocy napędu głównego brykociarki od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – wypraski z dwustronnymi wypukłościami, II przejście



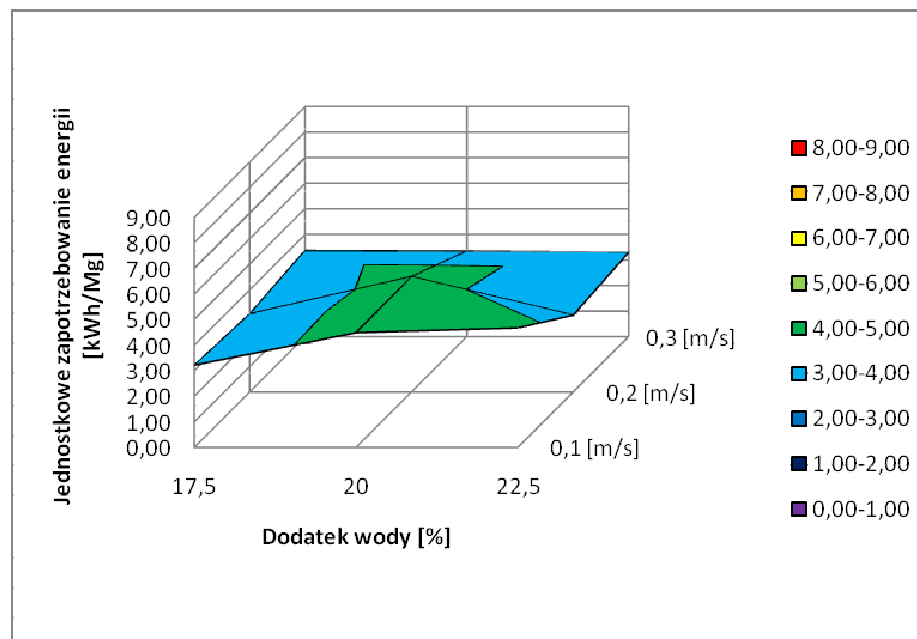
**Rys. 5.29.** Zależność poboru mocy napędu głównego brykociarki od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – wypraski z jednostronnymi wypukłościami, II przejście



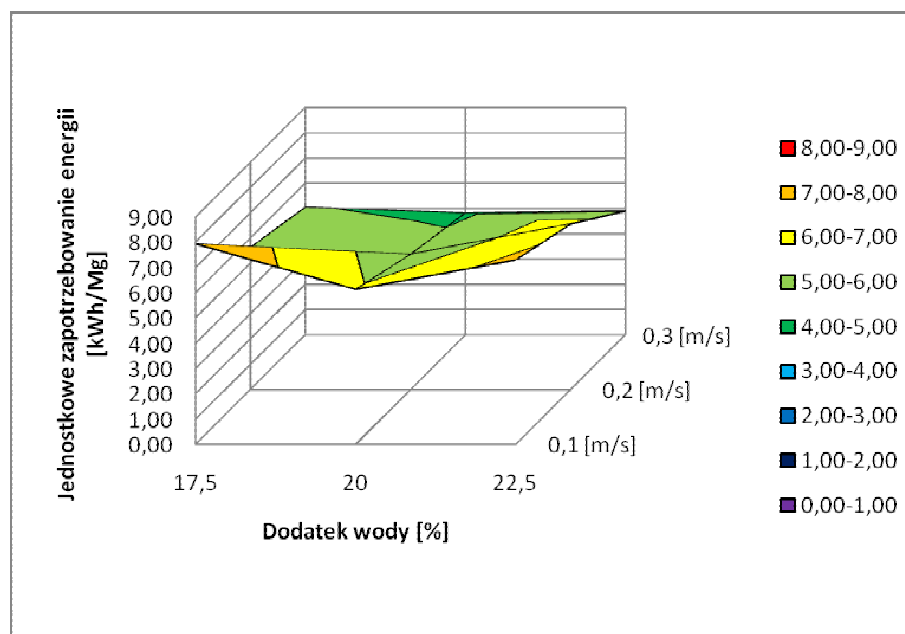
**Rys. 5.30.** Zależność całkowitego poboru mocy napędu głównego brykociarki od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - wypraski z dwustronnymi wypukłościami uzyskane w wyniku dwukrotnego zagęszczania materiału



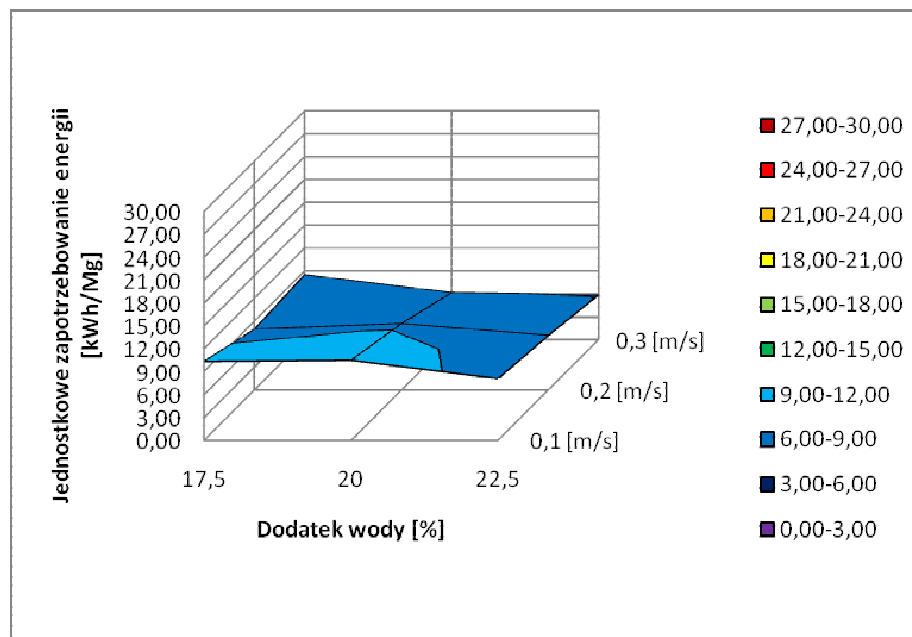
**Rys. 5.31.** Zależność całkowitego poboru mocy napędu głównego brykociarki od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - wypraski z jednostronnymi wypukłościami uzyskane w wyniku dwukrotnego zagęszczania materiału



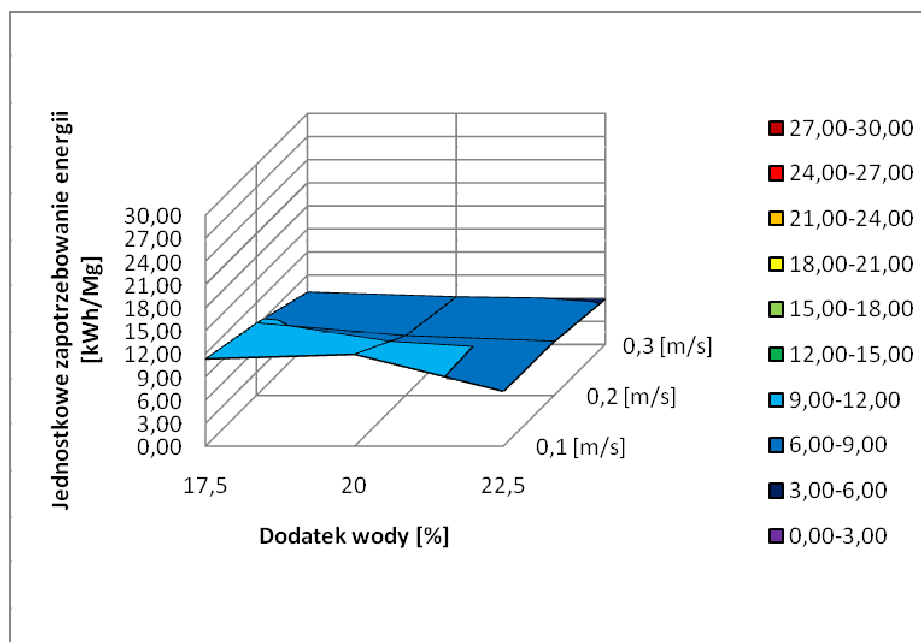
**Rys. 5.32.** Zależność jednostkowego zapotrzebowania energii od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – wypraski z dwustronnymi wypukłościami, I przejście



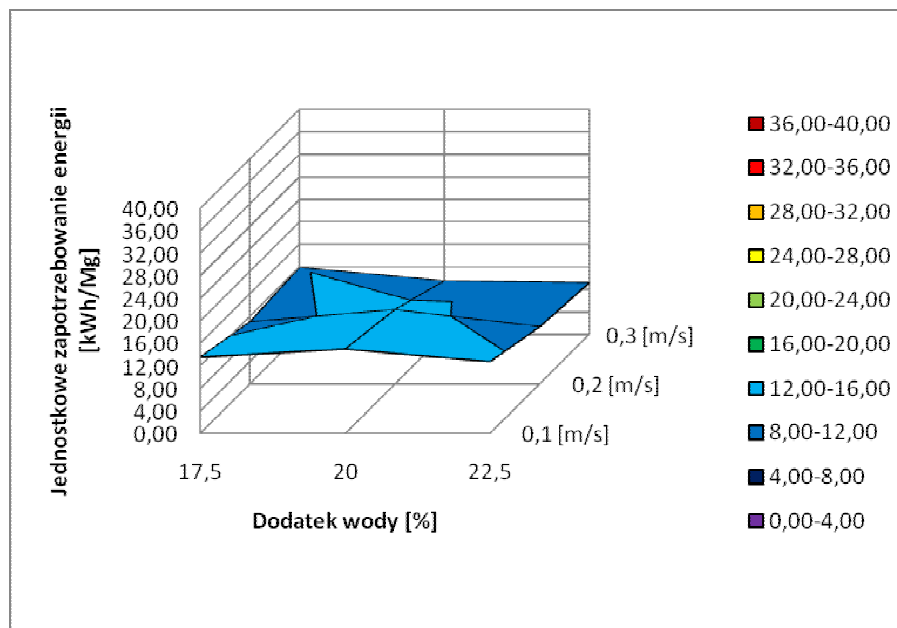
**Rys. 5.33.** Zależność jednostkowego zapotrzebowania energii od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – wypraski z jednostronnymi wypukłościami, I przejście



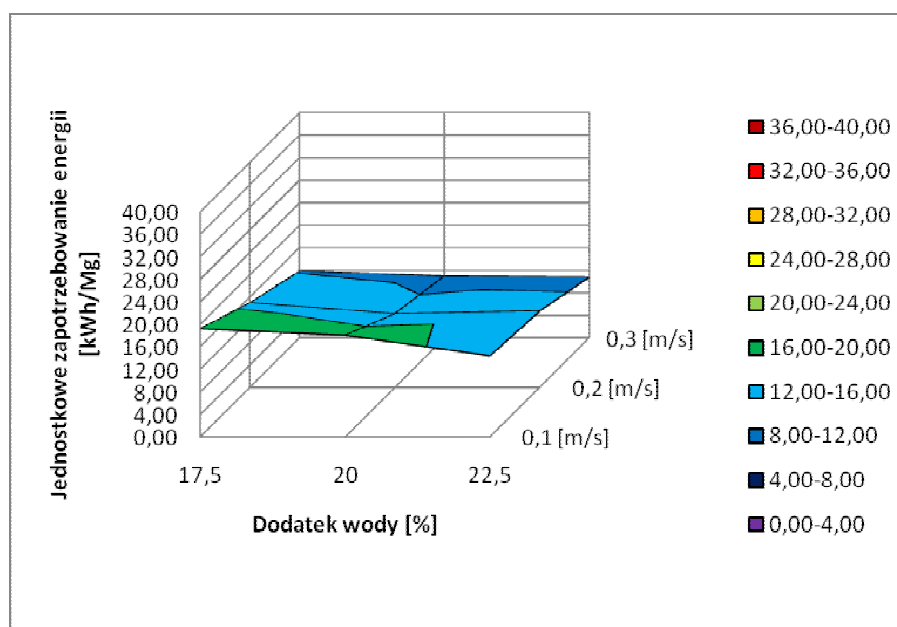
**Rys. 5.34.** Zależność jednostkowego zapotrzebowania energii od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – wypraski z dwustronnymi wypukłościami, II przejście



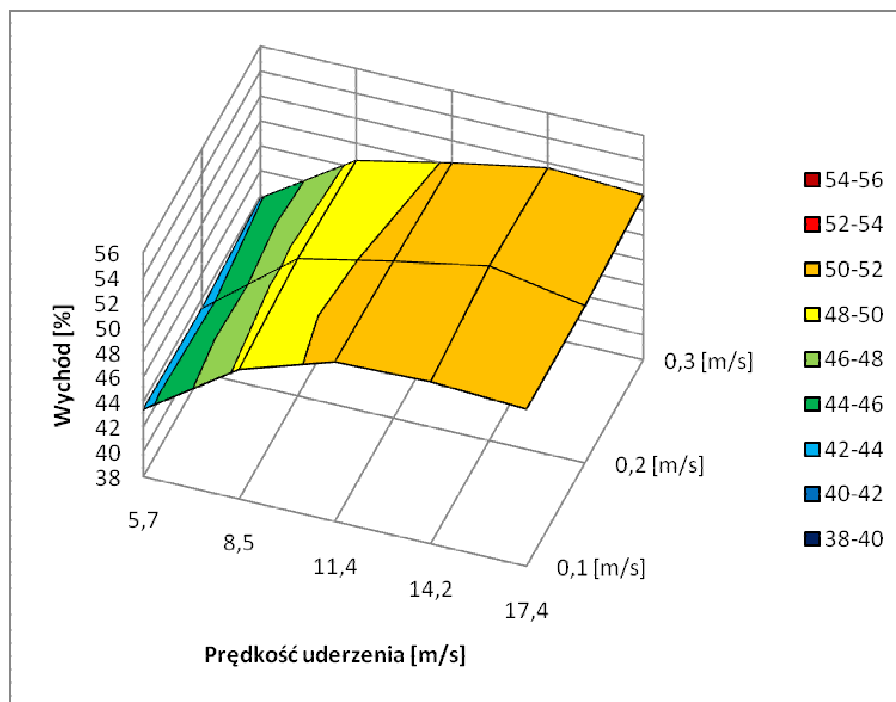
**Rys. 5.35.** Zależność jednostkowego zapotrzebowania energii od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – wypraski z jednostronnymi wypukłościami, II przejście



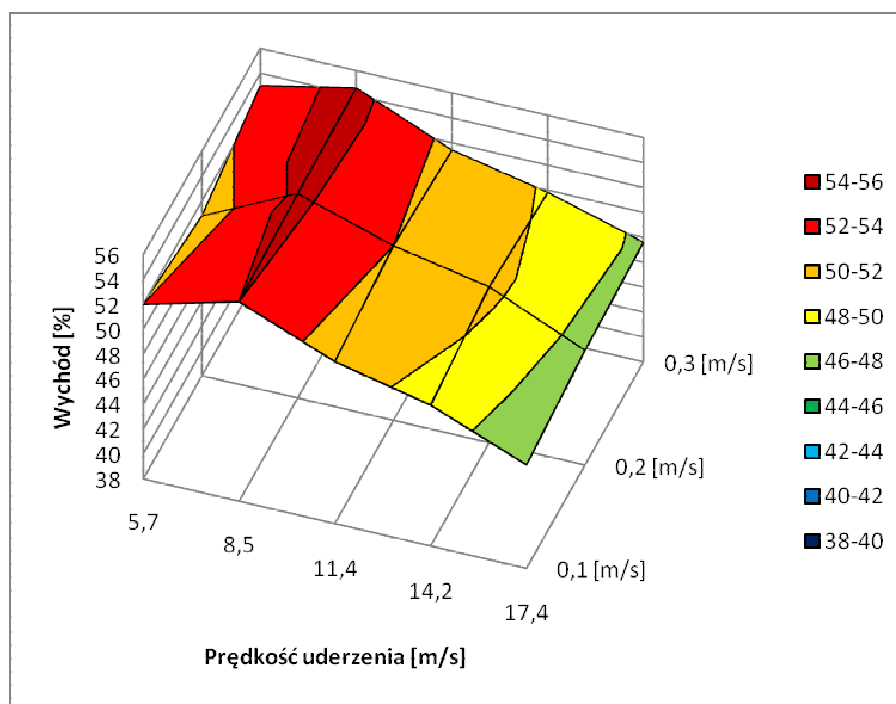
**Rys. 5.36.** Zależność całkowitego jednostkowego zapotrzebowania energii od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – wypraski z dwustronnymi wypukłościami uzyskane w wyniku dwukrotnego zagęszczania materiału



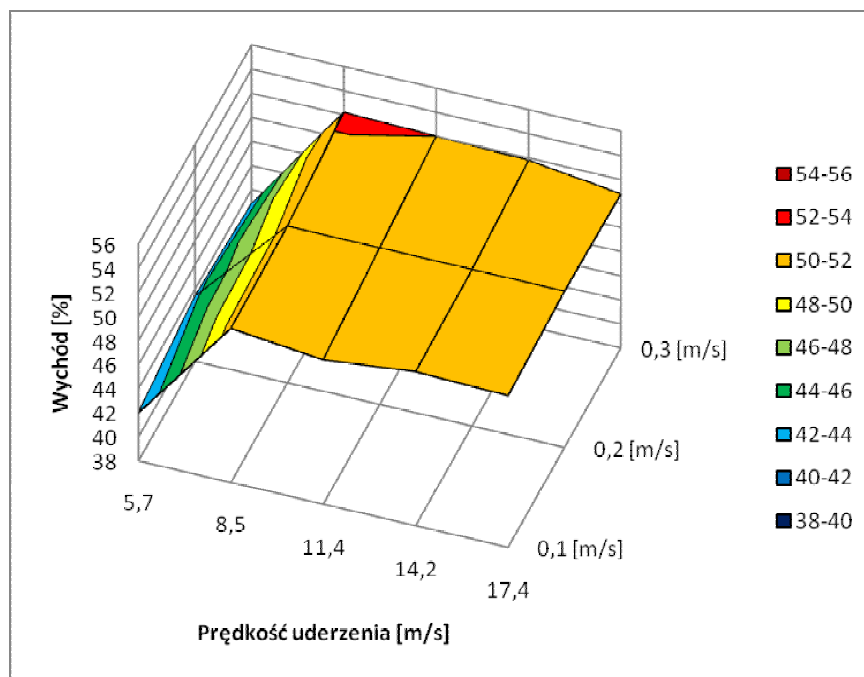
**Rys. 5.37.** Zależność całkowitego jednostkowego zapotrzebowania energii od wartości prędkości obwodowej walców oraz ilości wody dodawanej do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – wypraski z jednostronnymi wypukłościami uzyskane w wyniku dwukrotnego zagęszczania materiału



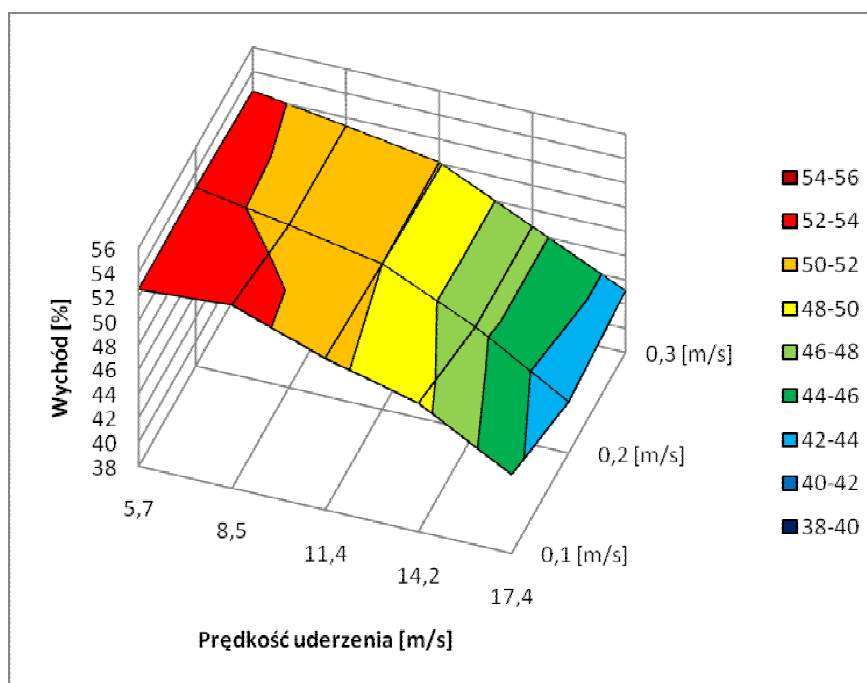
**Rys. 5.38.** Zależność wychodu frakcji ziarnowej 0,63 – 2,0 [mm] od wartości prędkości obwodowej walców podczas kawałkowania  $\text{Ca(OH)}_2$  oraz wartości prędkości uderzenia w procesie kruszenia scalonego materiału - wypraski z dwustronnymi wypukłościami uzyskane z  $\text{Ca(OH)}_2$  z dodatkiem 17,5% wody



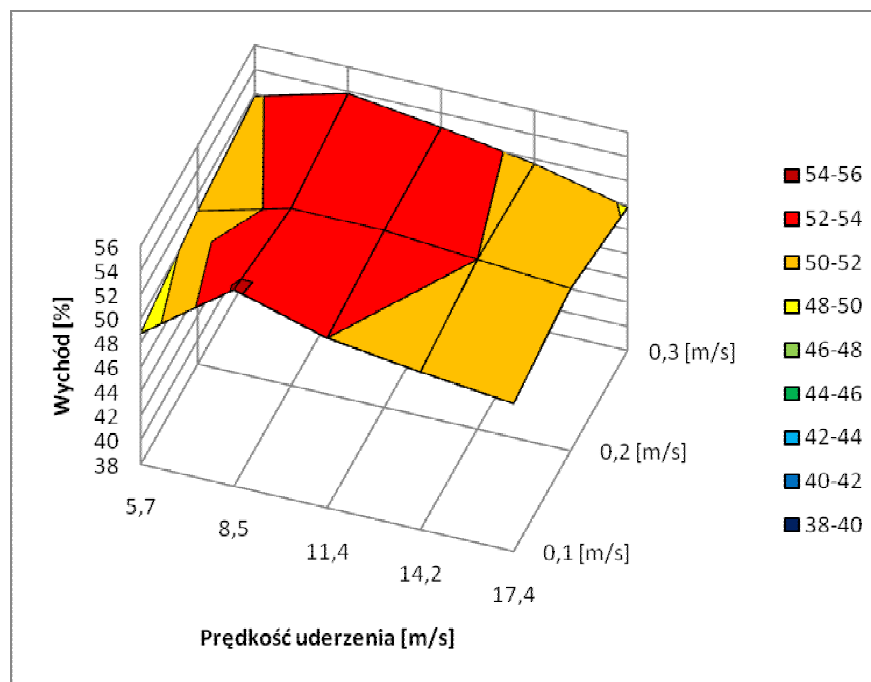
**Rys. 5.39.** Zależność wychodu frakcji ziarnowej 0,63 – 2,0 [mm] od wartości prędkości obwodowej walców podczas kawałkowania  $\text{Ca(OH)}_2$  oraz wartości prędkości uderzenia w procesie kruszenia scalonego materiału - wypraski z jednostronnymi wypukłościami uzyskane z  $\text{Ca(OH)}_2$  z dodatkiem 17,5% wody



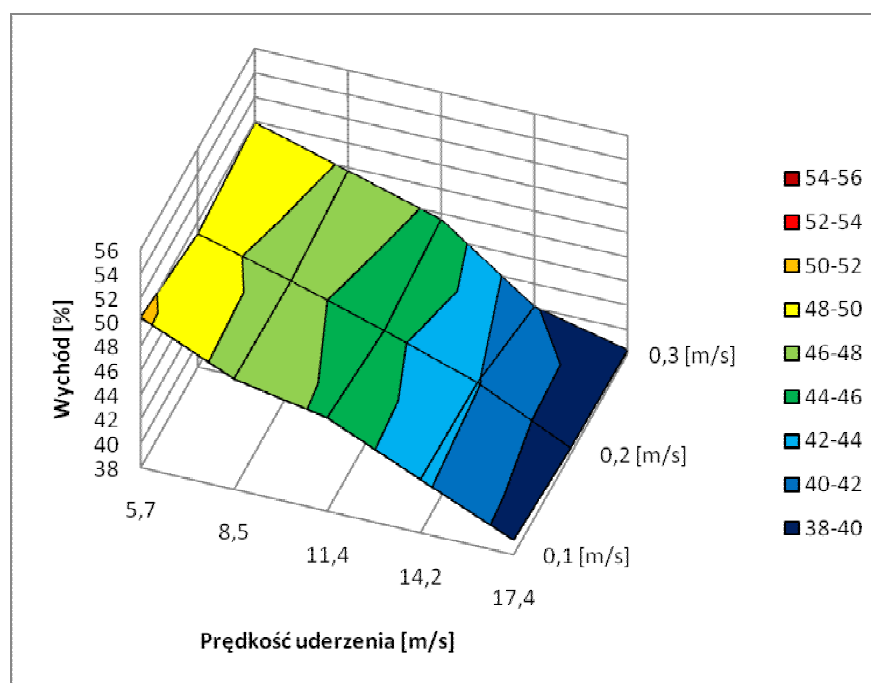
**Rys. 5.40.** Zależność wychodu frakcji ziarnowej 0,63 – 2,0 [mm] od wartości prędkości obwodowej walców podczas kawałkowania  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  oraz wartości prędkości uderzenia w procesie kruszenia scalonego materiału - wypraski z jednostronnymi wypukłościami uzyskane z  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  z dodatkiem 20,0% wody



**Rys. 5.41.** Zależność wychodu frakcji ziarnowej 0,63 – 2,0 [mm] od wartości prędkości obwodowej walców podczas kawałkowania  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  oraz wartości prędkości uderzenia w procesie kruszenia scalonego materiału - wypraski z jednostronnymi wypukłościami uzyskane z  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  z dodatkiem 20,0% wody



**Rys. 5.42.** Zależność wychodu frakcji ziarnowej 0,63 – 2,0 [mm] od wartości prędkości obwodowej walców podczas kawałkowania  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  oraz wartości prędkości uderzenia w procesie kruszenia scalonego materiału - wypraski z dwustronnymi wypukłościami uzyskane z  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  z dodatkiem 22,5% wody



**Rys. 5.43.** Zależność wychodu frakcji ziarnowej 0,63 – 2,0 [mm] od wartości prędkości obwodowej walców podczas kawałkowania  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  oraz wartości prędkości uderzenia w procesie kruszenia scalonego materiału - wypraski z jednostronnymi wypukłościami uzyskane z  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  z dodatkiem 22,5% wody

Analizując wyniki badań stwierdzono, że w niektórych przypadkach uzyskiwano niewiele mniejszy wychód założonej frakcji ziarnowej w porównaniu z maksymalnym, przy znacznie mniejszym jednostkowym zapotrzebowaniu energii na scalanie  $\text{Ca(OH)}_2$ . Stanowiło to inspirację do określenia całkowitego zapotrzebowania energii w procesie scalania takiej ilości materiału, która umożliwi wytworzenie 1 [Mg] granulatu o założonej frakcji ziarnowej. Wyniki stosownych obliczeń zamieszczono w tabeli 5.1.

**Tabela 5.1.** Wybrane wyniki procesu scalania wodorotlenku wapnia w prasie walcowej LPW 450 w różnych układach zagęszczania.

Prędkość obwodowa walców [m/s]		0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,3
Dodatek wody [%]		17,5			20,0			22,5		
brykiety w kształcie kropli	Całkowite jednostkowe zapotrzebowanie energii na proces brykietowania [kWh/Mg]	8,91	7,41	6,11	10,56	9,34	6,98	10,78	9,38	7,09
	Ilość energii na brykietowanie $\text{Ca(OH)}_2$ z którego po skruszeniu powstanie 1 [Mg] granulatu o frakcji ziarnowej 0,63 - 2,0 [mm] [kWh/Mg]	18,19	14,71	<b>12,22</b>	20,00	17,43	12,97	20,11	17,37	13,28
	Najwyższy uzyskany wychód frakcji ziarnowej po skruszeniu danej partii scalonego materiału 0,63 - 2,0 [mm] [%]	49	50,4	50	52,8	53,6	53,8	53,6	<b>54</b>	53,4
	Prędkość uderzenia podczas procesu rozdrabniania dla której uzyskano najwyższy wychód [m/s]	5,7	5,7	5,7	5,7	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
brykiety w kształcie siódła	Całkowite jednostkowe zapotrzebowanie energii na proces brykietowania [kWh/Mg]	37,31	27,12	25,53	28,79	24,26	22,46	23,87	22,48	20,86
	Ilość energii na brykietowanie $\text{Ca(OH)}_2$ z którego po skruszeniu powstanie 1 [Mg] granulatu o frakcji ziarnowej 0,63 - 2,0 [mm] [kWh/Mg]	67,59	50,23	49,10	51,98	46,48	42,86	44,21	41,95	<b>39,50</b>
	Najwyższy uzyskany wychód frakcji ziarnowej po skruszeniu danej partii scalonego materiału 0,63 - 2,0 [mm] [%]	55,2	54	52	<b>55,4</b>	52,2	52,4	54	53,6	52,8
	Prędkość uderzenia podczas procesu rozdrabniania dla której uzyskano najwyższy wychód [m/s]	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4

**Tabela 5.1. c.d.**

wypraski z dwustronnymi wypukłościami	Całkowite jednostkowe zapotrzebowanie energii na proces kawałkowania <b>[kWh/Mg]</b>	13,55	10,99	11,84	14,97	13,18	9,48	12,76	10,14	9,17
	Ilość energii na kawałkowanie Ca(OH) <sub>2</sub> z którego po skruszeniu powstanie 1 [Mg] granulatu o frakcji ziarnowej 0,63 - 2,0 [mm] <b>[kWh/Mg]</b>	26,57	21,13	22,95	29,48	25,83	18,16	23,54	19,28	<b>17,04</b>
	Najwyższy uzyskany wychód frakcji ziarnowej po skruszeniu danej partii scalonego materiału 0,63 - 2,0 [mm] <b>[%]</b>	51	52	51,6	50,8	51	52,2	<b>54,2</b>	52,6	53,8
	Prędkość uderzenia podczas procesu rozdrabniania dla której uzyskano najwyższy wychód <b>[m/s]</b>	14,2	14,2	14,2	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
wypraski z jednostronnymi wypukłościami	Całkowite jednostkowe zapotrzebowanie energii na proces kawałkowania <b>[kWh/Mg]</b>	19,24	14,97	11,81	18,04	13,05	10,97	14,41	13,54	10,77
	Ilość energii na kawałkowanie Ca(OH) <sub>2</sub> z którego po skruszeniu powstanie 1 [Mg] granulatu o frakcji ziarnowej 0,63 - 2,0 [mm] <b>[kWh/Mg]</b>	35,62	27,52	21,64	33,97	24,76	<b>20,93</b>	28,58	27,63	21,59
	Najwyższy uzyskany wychód frakcji ziarnowej po skruszeniu danej partii scalonego materiału 0,63 - 2,0 [mm] <b>[%]</b>	54	54,4	<b>54,6</b>	53,1	52,7	52,4	50,4	49	49,9
	Prędkość uderzenia podczas procesu rozdrabniania dla której uzyskano najwyższy wychód <b>[m/s]</b>	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	5,7	5,7	5,7

### 5.4.3. Wnioski

Na podstawie analizy wyników badań procesu kawałkowania wodorotlenku wapnia w laboratoryjnej prasie walcowej LPW 450, uzyskanych dla wielkości wejściowych zawierających się w założonych przedziałach sformułowano podane poniżej wnioski:

- Kształt powierzchni roboczej elementów formujących, stosowanych do kawałkowania ma znaczący wpływ na podatność scalonego materiału na wytwarzanie z niego granulatu, a także pobór mocy układu napędowego prasy.

- 
- Stosowanie w prasie laboratoryjnej, podczas pierwszego zagęszczania wodorotlenku wapnia, powierzchni roboczej walców umożliwiającej wytwarzanie wyprasek z jednostronnymi wypukłościami, powoduje średnio 70% wzrost jednostkowego zapotrzebowania energii na tę operację w porównaniu z przypadkiem, w którym walce posiadają wgłębienia umożliwiające wytworzenie wyprasek z dwustronnymi wypukłościami.
  - W przypadku powtórnego kawałkowania materiału jednostkowe zapotrzebowanie energii dla obydwu powierzchni roboczych walców utrzymuje się na porównywalnym poziomie.
  - Najmniejsze całkowite jednostkowe zapotrzebowanie energii równe 9,17 [kWh/Mg] uzyskano dla powierzchni roboczej elementów formujących stosowanej do wytwarzania wyprasek z dwustronnymi wypukłościami, scalając  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  z dodatkiem 22,5% wody, przy prędkości obwodowej walców 0,3 [m/s].
  - Największą podatność na dwustopniowe granulowanie, sięgającą 54,6% otrzymano w przypadku rozdrabniania z prędkością uderzenia 8,5 [m/s] wyprasek z  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  z dodatkiem 17,5% wody, posiadających jednostronne wypukłości, formowanych przy prędkości obwodowej walców 0,3 [m/s] i całkowitym jednostkowym zapotrzebowaniu energii sięgającym 11,8 [kWh/Mg].
  - Dla wyprasek z dwustronnymi wypukłościami najwyższy wychód założonej frakcji ziarnowej osiągnął 54,2% i otrzymano go rozdrabniając z prędkością uderzenia 8,5 [m/s] wypraski wytworzone z  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  z dodatkiem 22,5% wody przy prędkości obwodowej walców 0,1 [m/s] i całkowitym jednostkowym zapotrzebowaniu energii wynoszącym 12,8 [kWh/Mg].
  - Podobnie jak w przypadku brykietowania dla obydwu stosowanych powierzchni roboczych elementów formujących, wartość prędkości obwodowej walców podczas kawałkowania  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  nie ma znaczącego wpływu na wychód założonej frakcji ziarnowej powstałej w procesie kruszenia wyprasek.

---

## 6. Metoda doboru elementów formujących prasy walcowej

Przeprowadzone badania wykazały, że kształt oraz geometryczne cechy konstrukcyjne powierzchni roboczej elementów formujących mają istotny wpływ na przebieg procesu i właściwości scalonego materiału, a także na zapotrzebowanie energii. Ich wybór odbywa się w sposób niejednoznaczny, intuicyjny, na co zwrócono uwagę w rozdziale 2 pracy. Stanowiło to inspirację do opracowania metody doboru elementów formujących prasy walcowej. Procedurę tej metody przedstawiono na rysunku 6.1. Opracowano ją na podstawie wyników badań zawartych w niniejszej rozprawie oraz przedstawionych w literaturze.

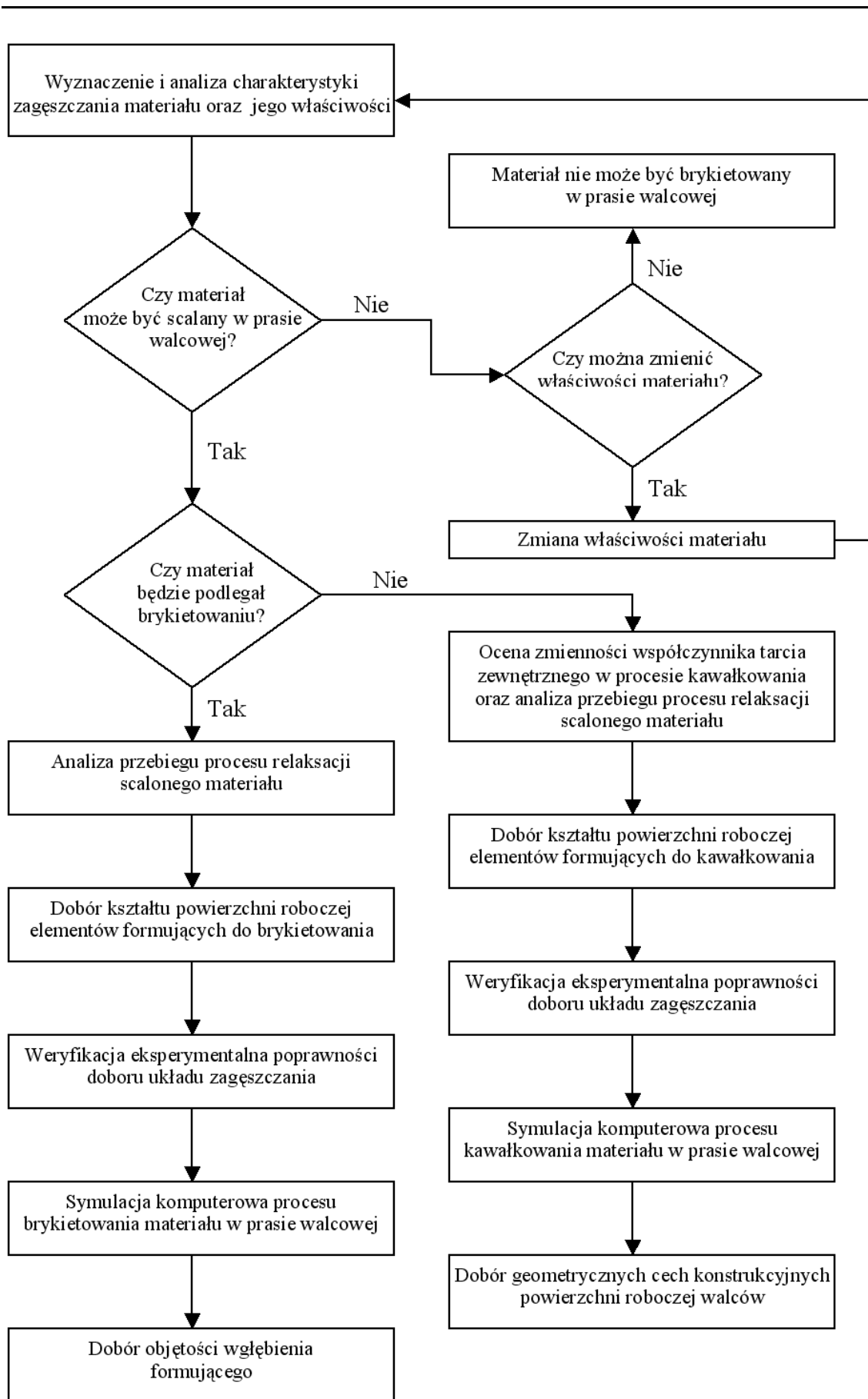
W metodzie doboru elementów formujących prasy walcowej wyróżnia się pięć głównych etapów, do których należy:

- ocena podatności materiału drobnoziarnistego na scalanie,
- wybór konfiguracji układu zagęszczania prasy walcowej,
- weryfikacja eksperymentalna poprawności wyboru układu zagęszczania prasy walcowej,
- badania symulacyjne procesu scalania materiału drobnoziarnistego w prasie z określoną konfiguracją układu zagęszczania,
- dobór geometrycznych cech konstrukcyjnych elementów formujących prasy walcowej.

W pierwszym etapie tj. ocenie podatności materiału drobnoziarnistego na scalanie, dokonuje się eksperymentalnego wyznaczenia jego charakterystyki zagęszczania. Pozwala ona na określenie:

- możliwości scalania danego materiału w prasie walcowej,
- minimalnej wartości nacisku jednostkowego zapewniającej utworzenie trwałych kształtek,
- stopnia zagęszczenia materiału,
- przebiegu procesu relaksacji (rozprężenia) materiału po scaleniu.

W prasie walcowej można scalać taki materiał, który ma progresywną charakterystykę zagęszczania. W przypadku, gdy posiada ona charakter degresywny lub degresywno-progresywny materiał nie może być scalany w prasie walcowej. W takiej sytuacji z reguły podejmuje się próbę dokonania zmiany jego właściwości. Jeżeli nie jest to



Rys. 6.1. Procedura doboru elementów formujących prasy walcowej

---

możliwe, bądź charakter przebiegu zagęszczania zmodyfikowanego materiału nie wskazuje to jednoznacznie, że dany ośrodek drobnoziarnisty nie może być poddany aglomeracji ciśnieniowej w prasie walcowej.

Drugim etapem jest dobór odpowiedniej konfiguracji układu zagęszczania prasy, którego dokonuje się na podstawie wymagań potencjalnego użytkownika brykociarki oraz analizy procesu relaksacji scalonego materiału. Rozstrzyga się wtedy m.in. kwestię sposobu jego podawania w strefę zagęszczania oraz kształtu powierzchni roboczej walców. W przypadku, gdy scalenie materiału wymaga dużego stopnia zagęszczenia, bądź ma on tendencję do zawieszania się w zasobniku grawitacyjnym, wskazane jest zastosowanie zasilacza ślimakowego. Wstępny dobór kształtu powierzchni roboczej walców powinien być podyktowany przeznaczeniem materiału po jego scaleniu. W przypadku procesu klasycznego brykietowania zalecane jest stosowanie powierzchni roboczej umożliwiającej wytwarzanie brykietów w kształcie kropli. Wynika to przede wszystkim z większej o ok. 10% wydajności prasy przy porównywalnej objętości brykietu (tab. 4.5) oraz podobnym koszcie wykonania elementów formujących. Zastosowanie powierzchni roboczej umożliwiającej wytwarzanie brykietów w kształcie siodła wskazane jest dla materiałów wykazujących cechy ciała quasiplastycznego lub charakteryzujących się dużym odkształceniem sprężystym po ustąpieniu działania nacisku, sięgającym powyżej 10%. W pierwszym przypadku występuje tendencja do pozostawiania brykietów we wgłębieniach formujących, szczególnie wtedy jeżeli posiadają one kształt kropli. Tego typu brykiety wytworzone z materiałów charakteryzujących się dużym odkształceniem sprężystym mają tendencję do rozwarstwiania się w płaszczyźnie podziału. Wynika to przede wszystkim z niekorzystnego rozkładu naprężeń wewnętrznych. Stosowanie powierzchni roboczej umożliwiającej wytwarzanie brykietów w kształcie siodła eliminuje płaszczyznę podziału brykietów, przez co zapobiega zjawisku ich dzielenia się na połowę.

Jeżeli kształt produktu scalania nie odgrywa istotnej roli, a materiał nie posiada cech ciała quasiplastycznego lub nie charakteryzuje się dużym odkształceniem sprężystym po ustąpieniu działania nacisku, zgodnie z aktualnym stanem wiedzy powinno się stosować symetryczny układ zagęszczania. O doborze kształtu powierzchni roboczej walców powinna rozstrzygnąć analiza charakterystyki zmienności współczynnika tarcia zewnętrznego w funkcji nacisku jednostkowego. Duży współczynnik tarcia zewnętrznego będzie wpływał na intensywne zużywanie się powierzchni roboczej walców. W takim przypadku zasadne jest wykorzystanie elementów formujących

---

z poprzecznymi rowkami, z uwagi na niższe koszty ich wytwarzania i łatwiejszą regenerację. Przy małym współczynniku tarcia zewnętrznego, korzystne jest wytwarzanie brykietów w kształcie kropli, gdyż odbywa się ono przy najmniejszym wydatku energii. Do kawałkowania materiałów drobnoziarnistych, posiadających cechy ciała quasiplastycznego lub charakteryzujących się dużym odkształceniem sprężystym po ustąpieniu działania nacisku powinno się stosować takie same elementy formujące jak w przypadku brykietowania.

Trzecim etapem jest weryfikacja eksperymentalna poprawności wyboru układu zagęszczania. Wymaga to posiadania odpowiedniej bazy laboratoryjnej umożliwiającej przeprowadzenie eksperymentów w celu określenia możliwości uzyskania brykietów o zadowalającej wytrzymałości mechanicznej.

Czwarty etap stanowią badania symulacyjne procesu brykietowania/kawałkowania materiału drobnoziarnistego w prasie z określoną konfiguracją układu zagęszczania. Służą one przede wszystkim określeniu zależności między objętością wgłębień a maksymalną wartością nacisku jednostkowego.

W piątym etapie na podstawie badań symulacyjnych dokonuje się doboru objętości wgłębień, a w przypadku kawałkowania, geometrycznych cech konstrukcyjnych powierzchni roboczej walców tak, aby scalony materiał spełniał założone wymagania wytrzymałościowe.

---

## Podsumowanie i wnioski końcowe

W niniejszej pracy przedstawiono koncepcję rozwiązania aktualnego problemu, jakim jest dobór powierzchni roboczej elementów formujących prasy walcowej. Po zapoznaniu się z obecnym stanem wiedzy dotyczącym procesu aglomeracji ciśnieniowej wykazano, że scalanie materiałów drobnoziarnistych w prasie walcowej odgrywa ważną rolę w szeroko pojętych procesach produkcyjnych. Większość publikacji związanych z tą tematyką dotyczy jednak zagadnień procesowych, natomiast znacznie mniej opracowań poświęconych jest konstrukcji maszyny. Ze względu na niewystarczający stan wiedzy dotyczący doboru kształtu powierzchni roboczej walców przeprowadzono stosowne badania porównawcze scalania materiałów w czterech układach zagęszczania prasy walcowej, w tym przy użyciu nowego rozwiązania, które stanowi tzw. układ niesymetryczny. Mając na uwadze intensywnie rozwijający się proces granulacji dwustopniowej w ramach niniejszej pracy zaproponowano także nową metodę określania jakości scalonego materiału. Polega ona na rozdrobnieniu kawałkowego produktu a następnie wydzieleniu z niego frakcji o założonym rozmiarze ziarna. Zaletą tej metody jest przede wszystkim możliwość określania jakości scalonego produktu o nieregularnych kształtach oraz odniesienia jej do właściwości mechanicznych brykietów. W ramach badań przeprowadzono również eksperymenty symulacyjne brykietowania materiału drobnoziarnistego w prasie walcowej z wgłębieniami określonego kształtu, różniącymi się objętością. Na podstawie wyników badań laboratoryjnych i symulacyjnych opracowano metodę doboru elementów formujących prasy walcowej. Mogą być one również wykorzystane w celu doskonalenia konstrukcji pras walcowych stosowanych w krajowym hutnictwie miedzi i służyć także rozwojowi metody wytwarzania wodorotlenkowego sorbentu wapniowego do palenisk fluidalnych [42, 56, 57, 58].

Z przeprowadzonych badań wynikają następujące wnioski ogólne:

- Kształt powierzchni roboczej elementów formujących, stosowanych w badaniach ma znaczący wpływ na własności mechaniczne kształtek, podatność na wytwarzanie z nich granulatu, a także jednostkowe zapotrzebowanie energii.

- 
- Korzystnie jest brykietować materiał w układzie zagęszczania umożliwiającym wytwarzanie brykietów w kształcie kropli, co wynika z większej o ok. 10% wydajności prasy przy zachowaniu porównywalnej objętości brykietów oraz podobnym koszcie wykonania tego typu elementów formujących.
  - Zastosowanie zasilacza ślimakowego w układzie zagęszczania prasy walcowej powoduje wzrost oraz stabilizację wartości nacisku jednostkowego w procesie brykietowania koncentratu miedzi o wilgotności  $w \in [3,75\%, 5,25\%]$ , co znacznie poprawia wytrzymałość mechaniczną brykietów w kształcie kropli w porównaniu z tymi, które otrzymuje się przy zasypie grawitacyjnym.
  - W przypadku potrzeby kawałkowania materiałów zaleca się stosowanie układu zagęszczania umożliwiającego wytwarzanie wyprasek z dwustronnymi wypukłościami, bądź brykietów w formie kropli, a decydującym o wyborze kształtu powierzchni roboczej walców powinien być współczynnik tarcia zewnętrznego oraz niektóre cechy materiału.
  - Materiały drobnoziarniste wykazujące cechy ciała quasiplastycznego lub charakteryzujące się dużym odkształceniem sprężystym po ustąpieniu działania nacisku powinny być brykietowane lub kawałkowane w prasie z układem zagęszczania umożliwiającym wytwarzanie brykietów w kształcie siodła.
  - Występowanie takich przypadków, w których uzyskiwano nieznacznie mniejszy wychód założonej frakcji ziarnowej w porównaniu z maksymalnym, przy znacznie mniejszym jednostkowym zapotrzebowaniu energii na scalanie wskazuje na to, że niejednokrotnie powinno być ono podstawowym kryterium doboru powierzchni roboczej walców do kawałkowania.
  - Wartość prędkości obwodowej walców w procesie scalania  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  nie ma znaczącego wpływu na wychód założonej frakcji ziarnowej powstałej w procesie kruszenia brykietów lub wyprasek.
  - W prasie walcowej z niesymetrycznym układem zagęszczania można otrzymać trwałe kształtki.
  - Określenie zasadności stosowania w prasie walcowej niesymetrycznego układu zagęszczania wymaga prowadzenia dalszych prac eksperymentalnych oraz symulacyjnych.

---

Istnieje zatem potrzeba kontynuowania podjętych badań. W ramach dalszych prac powinno się:

- dokonać analizy teoretycznej i eksperymentalnej procesu scalania materiału drobnoziarnistego w niesymetrycznym układzie zagęszczania, ze szczególnym zwróceniem uwagi na możliwości zwiększenia wydajności prasy oraz zmniejszenia energochłonności procesu,
- opracować model matematyczny procesu zagęszczania i scalania materiału we wgłębieniu formującym z uwzględnieniem relaksacji brykietu,
- przeprowadzić badania w skali przemysłowej w celu potwierdzenia praktycznego znaczenia przedstawionych wyników badań laboratoryjnych oraz rozszerzenia wiedzy na temat mechanizmu zużywania się elementów formujących pras walcowych o różnym kształcie wgłębień, niezbędnej do prognozowania ich trwałości.

---

## Spis literatury

1. Babanin V.I., Eremin A.Ya.: Briquetting fine-grained materials in ferroalloys production: Practical experience and future prospects. *Metallurgist* 2006, vol. 50, 241 – 247.
2. Bacher C., Olsen P.M., Bertelsen P., Kristensen J., Sonnergaard J.M.: Improving the compaction properties of roller compacted calcium carbonate. *International Journal of Pharmaceutics* 2007, vol. 342, 115-123.
3. Bakele W.: Neue Wege bei der Pressagglomeration von Düngemitteln. *Aufbereitungs-Technik* 1991, vol. 32, 252-260.
4. Bembenek M., Gara P., Machnik R.: Kompaktowanie popiołów pochodzących z elektrofiltru w celu ograniczenia ich pylenia wtórnego. *Monografie Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH* 2006, nr 32, 205–209.
5. Bembenek M.: Mechatroniczny układ napędowy laboratoryjnej prasy walcowej LPW-450. *Praca magisterska*, AGH Kraków 2004.
6. Binetti G., Piasentin.: Hot Briquetting Tests at Ammi Sarda Porto Vesme. *Proceedings of ISP Conference* 1975.
7. Borowski G., Kuczmazewski J.: Utylizacja drobnoziarnistych odpadów metalowych. *Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej*, Lublin 2005.
8. Broeckmann Ch., Höfter A., Packeisen A.: Cladding of Briquetting Tools by Hot Isostatic Pressing for Wear Resistance. *International Journal of Power Metallurgy* 2008, vol. 44/5, 49-56.
9. Bultmann J.M.: Multiple compaction of microcrystalline cellulose in a roller compactor. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics* 2002, vol. 54, 59-64.
10. Byrtus F., i inni: *Hutnictwo ogólne*. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1977.
11. Dahl J., Jones D., Komarek R.: Roll-press briquetting helps Iowa lime producer retain previously wasted fines as valuable product. *Powder Handling & Processing* 2001, vol.13, No.2.
12. Dec R., Bembenek M.: Testing performance of compacting - granulating system with Komarek B250PH roller press. *Abstracts of the congress topics: AICHEMA 2006: 28th international exhibition - congress on Chemical engineering, environmental protection and biotechnology: Frankfurt am Main, 15 - 19 May 2006*, 53.
13. Dec R., Hryniewicz M.: Identyfikacja procesu oraz badania nowych rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń w aspekcie intensyfikacji brykietowania w prasach walcowych. *Praca doktorska*, AGH Kraków 1978.
14. Dec R., Komarek R.: Testing performance of roll press force feed system. *IBA Proceedings* 1993, vol. 23, 65-75.
15. Dec R., Zavaliangos A., Cunningham J.: Comparison of various modeling methods for analysis of powder compaction in roller press. *Powder Technology* 2003, vol. 130, 265-271.

- 
16. Dec R., Zavaliangos A., Cunningham J.: Recent developments in FEM modeling of powder processing in the roller press. Proceedings 2005, vol.29, 83-92.
  17. Dec R.: Optimizing and controlling roll press operating parameters. Powder Handling & Processing 2002, vol.14, No.3, 222-225.
  18. Drzymała Z., Balak Cz.: Kompleksowa metoda utylizacji drobnoziarnistych odpadów żelazonośnych na przykładzie HTS S.A. Zeszyty Naukowe AGH, Kwartalnik Mechanika 1999, t.18, z.2, 153-164.
  19. Drzymała Z., Kosturkiewicz B.: Synteza badań nad utylizacją osadów ściekowych w gospodarce. Recyklace odpadu V, Ostrawa 2001, 173-178.
  20. Drzymała Z., Guzik J., Hryniewicz M., Zydrón W.: Testing the wear of materials used on roll press tires. IBA Proceedings 1993, vol. 23, 77-88.
  21. Drzymała Z., Hryniewicz M., Balak Cz.: Kompleksowa metoda utylizacji drobnoziarnistych odpadów żelazonośnych - przykład konstruktywnej współpracy HTS S.A. i AGH, Sesja Naukowo Techniczna z okazji 50-lecia HTS S.A., Kraków 1999, 69-80.
  22. Drzymała Z., Hryniewicz M., Janewicz A.: Badania nad opracowaniem metod utylizacji niektórych drobnoziarnistych odpadów metalonośnych. Recyklace odpadu V, Ostrawa 2001, 209-216.
  23. Drzymała Z., Hryniewicz M., Janewicz A.: Badania nad sposobem utylizacji odpadowego tlenku cynku. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Inżynieria Chemiczna i Procesowa 2000, z. 27, 60-70.
  24. Drzymała Z., Hryniewicz M., Maćków E.: Sposób bezlepiszczowego otrzymywania brykietów z węgla brunatnego. Opis patentowy, 1988.07.05, RP 157355.
  25. Drzymała Z., Hryniewicz M.: A new approach to brown coal binderless briquetting. Recent Advances in Coal Processing 1996, vol. 1, 377-383.
  26. Drzymała Z., Hryniewicz M.: Badania nad doбором urządzenia do brykietowania odpadowej gąbki kadmowej. Przegląd Mechaniczny 2003, R. 62, nr 1, 36-39.
  27. Drzymała Z., Hryniewicz M.: Badania nad doskonaleniem konstrukcji elementów formujących pras walcowych do brykietowania materiałów żelazonośnych. Materiały XII konferencji naukowej „Problemy rozwoju maszyn roboczych” Zakopane, 18 - 21 styczeń 1999, cz. 1, 67-74.
  28. Drzymała Z., Hryniewicz M.: Brykietowanie pyłów i szlamów żelazonośnych. Materiały II konferencji naukowo-technicznej: Problemy utylizacji odpadów w hutnictwie żelaza i stali, Raba Niżna k/Rabki, 7 - 9 czerwca 2000, 9-16.
  29. Drzymała Z., Hryniewicz M.: O doskonaleniu konstrukcji układu zagęszczania pras walcowych do brykietowania drobnoziarnistych odpadów żelazonośnych. Przegląd Mechaniczny 1999, R. 58, nr 14, 8-13.
  30. Drzymała Z., Hryniewicz M.: Problem niszczenia elementów formujących pras walcowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej 2001, nr 138, z. 24, 137-144.
-

- 
31. Drzymała Z., Hryniewicz M.: Wytyczne do konstrukcji pras walcowych do brykietowania odpadów produkcyjnych. Materiały VII konferencji naukowo-technicznej: „Problemy rozwoju maszyn roboczych”, Zakopane, styczeń 1995.
  32. Drzymała Z., i inni: Sposób otrzymywania brykietów do wielkiego pieca lub pieców stalowniczych. Opis patentowy, 2005.01.31, PL 188382 B1.
  33. Drzymała Z., i inni: Sposób wytwarzania brykietów z zendry i pyłów żelazonośnych. Opis patentowy, 2005.01.31, PL 188383 B1.
  34. Drzymała Z., i inni: Sposób wytwarzania z manganowego pyłu wielkopieczowego komponentu wsadu do wielkiego pieca. Opis patentowy, 2002.09.30, PL 184190 B1.
  35. Drzymała Z.: Industrial Briquetting - Fundamentals and Methods. Elsevier Science Publishers 1993.
  36. Drzymała Z.: Podstawy inżynierii procesu zagęszczania i prasowania. PWN, Warszawa 1988.
  37. Dzik T.: Teoretyczna i eksperymentalna analiza procesu scalania odpadów pochodzenia roślinnego. Chemik: nauka - technika - rynek 2008, R. 61, nr 9, 450-452.
  38. Ennis B.J.: Agglomeration and size enlargement. Session summary paper. Powder Technology 1996, vol. 88, 203-225.
  39. Feliks J., Filipowicz A.: Porównywanie wytrzymałości granulek o różnych średnicach. Inżynieria i Aparatura Chemiczna 2006, Nr 4s, 42-43.
  40. Flore K., Schoenherr M., Feise H.: Aspects of granulation in the chemical industry. Powder Technology 2009, vol. 189, 327-331.
  41. Freitag F., Kleinebudde P.: How do roll compaction/dry granulation affect the tableting behavior of inorganic materials? Comparison of four magnesium carbonates. European Journal of Pharmaceutical Sciences 2003, vol. 19, 281-289.
  42. Gara P.: Badania nad doborem parametrów scalania i rozdrabniania wodorotlenku wapnia w celu otrzymania specyficznego sorbentu. Praca doktorska, AGH Kraków, 2005.
  43. Garbaczewski J.: Sposób przygotowania wsadu do przerobu w piecu szybowym na kamień miedziowy oraz wsad brykietowy do przerobu w piecu szybowym na kamień miedziowy. Opis patentowy, 2003.02.28, PL 185036 B1.
  44. Gruśpiel J., Wawżewska-Riesenkampf W.: Kompleksowa metoda utylizacji odpadów cynkowośnych. Rudy i metale nieżelazne 1997, nr 1, 3-9.
  45. Guigon P., Simon O.: Roll press design-influence of force feed systems on compaction. Powder Technology 2003, vol. 130, 41-48.
  46. Günter H., Müller M., Sonntag P.: The application of Roller Presses for High Pressure Comminution. Köppern No. 11.3, Materiały „Symposium on Grinding Processes”, Toulouse, France, 14 - 15 luty 1996.
  47. Hejft R.: Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych. Wydawnictwo ITE, Radom 2002.
-

- 
48. Hejft R.: Ciśnieniowa aglomeracja pasz i podstawy konstrukcji urządzeń granulująco - brykietujących. Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok 1991.
  49. Hellwig Z. Elementy rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej. PWN, Warszawa 1998.
  50. Herting M.G., Kleinebudde P.: Roll compaction/dry granulation: Effect of raw material particle size on granule and tablet properties. *International Journal of Pharmaceutics* 2007, vol. 338, 110-118.
  51. Hirsch U.: Briquetting of metallurgical residues to be returned to the material cycle. *Köppern* No. 12.0.
  52. Hryniewicz M., Bembenek M., Gara P.: Analiza możliwości brykietowania wapna palonego oraz hydratyzowanego. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 2006, R. 45, nr 4 s, 66–67.
  53. Hryniewicz M., Bembenek M., Gara P.: Dobór układu zagęszczania prasy walcowej do scalania materiału w dwustopniowej granulacji. *Chemik: nauka - technika - rynek* 2008, R. 61, nr 9, 425-428.
  54. Hryniewicz M., Bembenek M., Gara P.: Problem doboru układu zagęszczania prasy walcowej do scalania wodorotlenku wapnia. *Materiały XX Konferencji Naukowej: „Problemy rozwoju maszyn roboczych”*, Zakopane, 22 - 25 stycznia 2007, dysk optyczny, 1-8.
  55. Hryniewicz M., Borowski G., Kuczmaszewski J.: Badania nad sposobem utylizacji odpadów poszlifierskich przemysłu łóżyskowego. *Recyklace odpadu VII*, Ostrawa 2003, 95-102.
  56. Hryniewicz M., Gara P., Bembenek M.: Development of High Surface Area Calcium Sorbent Manufacturing Method. 31st biennial conference, San Antonio, Texas, 27 - 30 September 2009, dysk optyczny, 161-170.
  57. Hryniewicz M., Gara P., Bembenek M.: Improvement of the calcium hydroxide sorbent production method. *Polish Journal of Environmental Studies* 2008, vol. 17, no. 3A, 240-244.
  58. Hryniewicz M., Gara P., Bembenek M.: Scalanie pylistego wodorotlenku wapnia w celu wytworzenia wysokopowierzchniowego sorbentu. *Monografie Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH* 2006, nr 32, 223-229.
  59. Hryniewicz M., Gara P.: Badania nad technologią utylizacji gąbki kadmowej. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budowa i Eksploatacja Maszyn* 2002, nr 142, z. 9, 125-132.
  60. Hryniewicz M., Janewicz A., Borowski G., Kuczmaszewski J.: Praktyczne aspekty utylizacji odpadów poszlifierskich przemysłu łóżyskowego. *Monografie Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH* 2004, nr 23, 79-85.
  61. Hryniewicz M., Janewicz A., Kosturkiewicz B., Gara P.: Badania procesów scalania osadów szlamów konwertorowych. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 2003, R. 42, nr 3s, 73-74.
-

- 
62. Hryniewicz M., Janewicz A., Kosturkiewicz B.: Brykietowanie osadów ściekowych w prasie walcowej. Monografie Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH 2004, nr 23, 87-93.
  63. Hryniewicz M., Janewicz A., Kosturkiewicz B.: Doskonalenie konstrukcji elementów formujących pras walcowych. Czasopismo Techniczne. Mechanika 2006, R. 103, z. 1-M, 131-137.
  64. Hryniewicz M., Janewicz A.: Analiza możliwości stosowania przekładni „CYCLO” w napędzie prasy walcowej. Systems: Journal of Transdisciplinary Systems Science 2003, vol. 8S, 177-184.
  65. Hryniewicz M., Janewicz A.: Badania i rozwój konstrukcji prasy walcowej. Problemy Eksploatacji 2008, nr 3, 143-151.
  66. Hryniewicz M., Janewicz A.: Badanie możliwości scalania odpadowej wełny szklanej w celu przygotowania do utylizacji. Odzysk odpadów - technologie i możliwości, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków 2005, 201-208.
  67. Hryniewicz M., Janewicz A.: Prasa walcowa: doskonalenie konstrukcji - metoda doboru. Chemik 2008, vol. 61, nr 9, 446-449.
  68. Hryniewicz M., Kosturkiewicz B., Janewicz A.: Koncepcja modernizacji napędu przemysłowej prasy walcowej PW 500. Monografie Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH 2004, nr 23, 71-77.
  69. Hryniewicz M., Kosturkiewicz B., Janewicz A.: Scalanie drobnoziarnistych odpadów. Inżynieria Chemiczna i Procesowa 2006, nr 972, z. 29, 89-98.
  70. Hryniewicz M., Kosturkiewicz B., Janewicz A.: Scalanie odpadowej wełny szklanej. Inżynieria i Aparatura Chemiczna 2006, R. 45, nr 4s, 70-71.
  71. Hryniewicz M., Kosturkiewicz B., Janewicz A.: Wybrane zagadnienia doskonalenia konstrukcji i eksploatacji pras walcowych. Problemy Eksploatacji 2004, nr 4, 63-70.
  72. Hryniewicz M.: Badania nad doskonaleniem technologii brykietowania koncentratu miedzi w prasach walcowych. Materiały X Konferencji Naukowej: „Problemy w konstrukcji i eksploatacji maszyn hutniczych i ceramicznych”, Kraków 2000, 189-195.
  73. Hryniewicz M.: Badania nad zwiększeniem trwałości elementów formujących brykieciarek. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budowa i Eksploatacja Maszyn 2001, nr 139, z. 8, 135-142.
  74. Hryniewicz M.: Badania procesów przygotowania drobnoziarnistych odpadów żelazonośnych do recyklingu. Wydawnictwo Naukowe Gabriel Borowski, Nałęczów 2002, 75-83.
  75. Hryniewicz M.: Metoda doboru pras walcowych oraz założeń do ich modernizacji lub konstrukcji. Rozprawy monografie, nr 58, Wydawnictwa AGH, Kraków 1997.
  76. Hryniewicz M.: Możliwości zagospodarowania drobnoziarnistych odpadów metalonośnych. Monografie Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH 2004, nr 23, 63-70.

- 
77. Hryniewicz M.: Problem kąta chwytu w modelowaniu procesu brykietowania materiałów drobnoziarnistych w prasach walcowych. *Zeszyty Naukowe AGH, Kwartalnik Mechanika* 1990, t. 9, z.3, 83-89.
  78. Inghelbrecht S., Remon J.P.: Reducing dust and improving granule and tablet quality in the roller compaction process. *International Journal of Pharmaceutics* 1998, vol. 171, 195-206.
  79. Janewicz A., Kosturkiewicz B.: Scalanie wieloskładnikowych nawozów sztucznych. Monografie Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH 2006, nr 32, 261–267.
  80. Janewicz A., Kosturkiewicz B.: Wyznaczanie zapotrzebowania energii w procesie scalania osadów ściekowych w prasie walcowej. *Problemy Eksploatacji* 2004, nr 4, 185-192.
  81. Janewicz A.: Analiza wpływu parametrów zasilacza zbieżnokanałowego na jakość brykietów otrzymywanych w prasie walcowej. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budowa i Eksploatacja Maszyn* 2002, z. 9, 157-164.
  82. Janewicz A.: Badania identyfikacyjne zasilacza zbieżnokanałowego do pras walcowych. Praca doktorska, AGH Kraków, 1996.
  83. Janewicz A.: Kształtowanie geometrii kanałów zagęszczających zasilacza zbieżno-kanałowego do pras walcowych. Materiały X Konferencji Naukowej: „Problemy w konstrukcji i eksploatacji maszyn hutniczych i ceramicznych”, Kraków 2000, 197-204.
  84. Janewicz A.: Uproszczona metoda kształtowania kanałów zagęszczających zasilacza zbieżno-kanałowego do pras walcowych. *Zeszyty Naukowe AGH, Kwartalnik Mechanika* 2000, t. 19, z. 2, 183-191.
  85. Janewicz A.: Wpływ parametrów zasilacza zbieżno-kanałowego na zapotrzebowanie energii procesu brykietowania w prasie walcowej. *Problemy Eksploatacji* 2006, nr 3, 117-124.
  86. Janewicz A.: Wpływ rodzaju zasilacza na brykietowanie fluorku wapnia w prasie walcowej. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 2006, R. 45, nr 4s, 72-73.
  87. Janewicz A.: Wskaźniki jakości brykietów a zapotrzebowanie energii w procesie brykietowania odpadowego fluorku wapnia. Monografie Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH 2006, nr 32, 231-239.
  88. Johanson J.R.: A rolling theory for granular solids. *Journal of applied Mechanics ASME Paper* 1965, No. 65, 842-848.
  89. Kapias P., Płonka J.: Próby przemysłowe brykietowania koncentratów miedzi przy użyciu nowego środka wiążącego na bazie skrobi wyprodukowanego w skali przemysłowej w Z. Ch. Złotniki. Instytut Metali Nieżelaznych, Gliwice 1992.
  90. Karbowniczek M., Sadowski A., Hryniewicz M.: Możliwości zastosowania odpadów poszlifierskich z produkcji łożysk jako wsadu w piecu łukowym. *Hutnik Wiadomości Hutnicze* 2005, R. 72, nr 7-8, 371-377.
  91. Kleinebudde P.: Roll compaction/dry granulation: pharmaceutical applications. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics* 2004, vol. 58, 317-326.
-

- 
92. Kłassien P.W., Griszajew I.G.: Podstawy techniki granulacji. WNT, Warszawa 1989.
  93. Komarek R.: Roll-press briquetting can help lime producers improve materials handling. Mining Engineering 1993, December, 1467-1469.
  94. Komarek R.: Selecting a roll-press briquetter to improve material handling. Powder and Bulk Engineering Magazine. February 1994.
  95. Kosturkiewicz B., Janewicz A.: Problem doboru konfiguracji układu zagęszczania prasy walcowej. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budowa i Eksploatacja Maszyn 2002, z. 9, 243-252.
  96. Kosturkiewicz B.: Badania identyfikacyjne zasilacza ślimakowego do pras walcowych. Praca doktorska, AGH Kraków, 1997.
  97. Kosturkiewicz B.: Badania możliwości poprawy efektywności procesu brykietowania w prasie walcowej. Materiały X Konferencji Naukowej: „Problemy w konstrukcji i eksploatacji maszyn hutniczych i ceramicznych”, Kraków 2000, 205-214.
  98. Kosturkiewicz B.: Badania obciążeń elementu roboczego zasilacza ślimakowego momentem skręcającym. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budowa i Eksploatacja Maszyn 2002, Z. 9, 235-242.
  99. Kosturkiewicz B.: Metoda zagospodarowania osadów ściekowych w przemyśle energetycznym. Monografie Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH 2006, nr 32, 249-259.
  100. Kosturkiewicz B.: Modelowanie obciążeń elementu roboczego zasilacza ślimakowego siłą poosiową. Monografie Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH 2004, nr 23, 121-128.
  101. Kosturkiewicz B.: Problem przygotowania osadów ściekowych do utylizacji. Odzysk odpadów - technologie i możliwości, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków 2005, 94-101.
  102. Kosturkiewicz B.: Zagadnienie doboru geometrycznych cech konstrukcyjnych ślimaków w urządzeniach do scalania drobnoziarnistych materiałów odpadowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Nauki Techniczne 2001, nr 139, z. 8, 249-258.
  103. Kosturkiewicz B.: Zagadnienie przepływu materiałów drobnoziarnistych w zasilaczu ślimakowym. Problemy Maszyn Roboczych 2001, z. 17, 135-143
  104. Kosturkiewicz B.: Zagadnienie wykorzystania osadów ściekowych jako substytutu paliwa w piecach rusztowych. Inżynieria i Aparatura Chemiczna 2006, R. 45, nr 4s, 90-91.
  105. Kosturkiewicz B.: Zagadnienie wykorzystania pras walcowych do zagospodarowania osadów ściekowych. Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów 2005, R. 39, nr 4s, 138-145.
  106. Kosturkiewicz B., Hryniewicz M., Janewicz A., Drzymała Z.: Badania nad przygotowaniem osadów ściekowych do utylizacji. Inżynieria i Aparatura Chemiczna 2003, R. 42, nr 3s, 94-95.

- 
107. Kuczyńska I.: Grudkowanie - forma przygotowania odpadów do wykorzystania lub unieszkodliwiania. Chemik: nauka - technika - rynek 2008, R. 61, nr 9, 434-438.
  108. Lysek N., i inni: Sposób otrzymywania sorbentu kawalkowego. Opis patentowy, 1997.03.14, PL 185017.
  109. Materiały ofertowe firmy Fitzpatrick: Industrial Roll Press.
  110. Materiały ofertowe firmy Hosokawa Bepex GmbH: Pharmaphaktor C250 The new generation.
  111. Materiały ofertowe firmy Sumitomo: Cyclo drive 6000.
  112. Mazanek E., Król L., Zieliński S.: Spiekanie i grudkowanie rud. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1974.
  113. Miczkowski Z., Czernecki J.: Wpływ składu ziarnowego koncentratu miedziowego na wybrane parametry procesu zawiesinowego. Rudy i Metale Nieżelazne 2008, R. 53, nr 4, 209-215.
  114. Mitchell S.; Reynolds T.; Dasbach T.: A compaction process to enhance dissolution of poorly water-soluble drugs using hydroxypropyl methylcellulose. International Journal of Pharmaceutics 2003, vol. 250, 3-11.
  115. Niesler M.: Laboratoryjne próby brykietowania pyłów odlewniczych. Prace Instytutu Metalurgii Żelaza 2007, T. 59, nr 2, 9-14.
  116. Orewczyk J., Sadowski A., Hryniewicz M: Thermal analysis in examinations of metallurgical materials obtained from iron-bearing fines. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 2001, vol. 65, 607-612.
  117. Patel S., Kaushal A.M., Bansal A.K.: Compaction behavior of roller compacted ibuprofen. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics 2008, vol. 69, 743-749.
  118. Pietsch W.: Granulation of fertilizers by compaction. Köppern No. 11.0.
  119. Pietsch W.: Roll Pressing. New York. Heyden Verlag 1976.
  120. Pietsch W.: Size Enlargement by Agglomeration. John Wiley & Sons Inc., New York 1991.
  121. Polański Z.: Planowanie doświadczeń w technice. PWN, Warszawa 1984.
  122. Praca zbiorowa: Analiza możliwości granulacji odpadów z prasy filtracyjnej. Sprawozdanie z pracy badawczej realizowanej na zlecenie firmy „Zakłady Chemiczne Alwernia S.A.”, KUTiOŚ AGH, Kraków 2006 (materiały niepublikowane).
  123. Praca zbiorowa: Analiza możliwości zastosowania suchego ługu posulfitowego w procesie brykietowania koncentratów miedzi. Praca wykonana na zlecenie HM „Głogów”, KUTiOŚ AGH, Kraków 2008 (materiały niepublikowane).
  124. Praca zbiorowa: Badania brykietowania zestawów szklarskich. Umowa nr 5.394.84. IMHiA AGH, Kraków 1986 (materiały niepublikowane).

- 
125. Praca zbiorowa: Badania odporności na zużycie materiałów stosowanych do wytwarzania elementów formujących pras walcowych. Sprawozdanie z pracy badawczej realizowanej na zlecenie firmy „K. R. Komarek Inc.” (USA), KUTiOŚ AGH, Kraków 2007 (materiały niepublikowane).
  126. Praca zbiorowa: Badania wytrzymałości brykietów w zależności od struktury mieszanki poddawanej brykietowaniu w prasach walcowych. Sprawozdanie z pracy badawczej realizowanej na zlecenie HM „Głogów”, KUTiOŚ AGH, Kraków 2007 (materiały niepublikowane).
  127. Praca zbiorowa: Wykonanie wstępnych badań prototypu prasy walcowej model P250BH. Sprawozdanie z pracy badawczej realizowanej na zlecenie firmy „Komarek”, KUTiOŚ AGH, Kraków 2006 (materiały niepublikowane).
  128. Rambali B.; Baert L.; Jans E.; Massart D.L.: Influence of the roll compactor parameter settings and the compression pressure on the buccal bio-adhesive tablet properties. *International Journal of Pharmaceutics* 2001, vol. 220, 129-140.
  129. Schütze W., Plagemann W., Gröne S.: Method for preventing material to be briquetted from sticking to a roll surface. Opis patentowy, 2000.08.15, US 6103159.
  130. Simon O.; Guigon P.: Correlation between powder-packing properties and roll press compact heterogeneity. *Powder Technology* 2003, vol. 130, 257-264.
  131. Spisak B., Spisak W, Stawski T.: Lepiszczce do brykietowania i granulowania oraz sposób jego wytwarzania. Opis patentowy, 1997.02.14, PL 184524 B1.
  132. Szekely L., Stieler F.: Process of making binderless briquets from steelworks dusts. Opis patentowy, 1989.12.26, US 4889555.
  133. Świątoniowski A., Boksa W.: Analiza stanu naprężeń i odkształceń w klatce walców roboczych brykieciarki walcowej PW 500. *Zeszyty Naukowe AGH, Kwartalnik Mechanika* 2000, t.19, z.3, 359-366.
  134. Weyenberg W., Vermeire A., Vandervoort J., Remon J.P., Ludwig A.: Effects of roller compaction settings on the preparation of bioadhesive granules and ocular minitables. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics* 2005, vol. 59, 527-536.
  135. Yehia K.A.: Estimation of roll press design parameters based on the assessment of a particular nip region. *Powder Technology* 2007, vol. 177, 148-153.
  136. Yusofa Y.A., Smith A.C., Briscoe B.J.: Roll compaction of maize powder. *Chemical Engineering Science* 2005, vol.60, 3919-3931.
  137. Zakrzewski J., i inni: Sposób wytwarzania lepiszcza do brykietowania. Opis patentowy, 1991.12.10, PL 166394.
  138. Zavaliangos A., Dec R.: Powder processing in the roller press - theory and practice. *Powder Handling & Processing* 2007, vol. 1, 23-28.

# Załączniki

## Załącznik 1

Tabela Z.1.1. Zestawienie występujących w doświadczeniach granicznych względnych błędów systematycznych

Lp.	Mierzona wielkość fizyczna	Jednostka	Nazwa i typ przyrządu pomiarowego	Dokładność przyrządu pomiarowego	Nominalny zakres pomiarowy	Zakres mierzonej wielkości	Graniczny względny błąd pomiaru [%]
1.	Masa próbki do pomiaru wilgotności	g	Waga Vibra AJH 420 CE	0,001 [g]	0 – 200 [g]	8,844 – 26,405	0,010 – 0,004
2.	Masa 10-ciu brykietów *	g	Waga WS-23	1 [g]	0 – 1000 [g]	95 - 350	1,05 – 0,29
3.	Wytrzymałość brykietu na ściskanie	N	Maszyna wytrzymałościowa Zwick 1120	1 [N]	0 – 2000 [N]	150 - 1416	0,67 – 0,07
4.	Masa wychodu **	g	Waga WS-23	1 [g]	0 – 1000 [g]	192 - 277	0,52 – 0,36
5.	Prędkość obrotowa wału kruszarki	[min <sup>-1</sup> ]	Obrotomierz TЧ10-P	10 [min <sup>-1</sup> ]	0 – 10000 [min <sup>-1</sup> ]	570 - 1750	1,75 – 0,57
6.	Pobór mocy prądu przez silnik układu napędowego	W	Watomierz Nanovip Plus	10 [W]	0 – 80000 [W]	780 - 17900	1,28 – 0,06
7.	Wartość nacisku jednostkowego	MPa	Tor pomiarowy konstrukcji KSW	0,1 [MPa]	0 – 105 [MPa]	12,6 - 88,4	0,79 – 0,11

\* do wyznaczenia wytrzymałości brykietów na zrzut

\*\* do wyznaczenia podatności scalonego materiału na granulowanie dwustopniowe

## Wyznaczenie niezbędnej ilości pomiarów dla określenia poboru mocy układu napędowego prasy LPW 450

Analizę statystyczną wyników pomiarów miała na celu na wyznaczenie niezbędnej ilości pomiarów przy założeniu dopuszczalnego błędu oceny wynoszącego  $e_o = \pm 5\%$ . Poniżej przedstawiono procedurę postępowania przy jej dokonywaniu dla pomiaru poboru mocy napędu głównego prasy LPW 450.

Z otrzymanych wyników poboru mocy napędu głównego prasy LPW 450 podczas próby brykietowania wybrano losowo kolejnych 10 pomiarów. Opracowane wstępnie wyniki badań związane z niedokładnością obiektu badań podano w tabeli Z.2.1.

Tabela Z.2.1. Opracowane wstępnie wyniki poboru mocy napędu głównego prasy LPW 450 związane z niedokładnością obiektu badań

Nr pomiaru	Pobór mocy		$P_i - P_{\text{sr}}$	$(P_i - P_{\text{sr}})^2$
	$P_i$ [W]	$P_{\text{sr}}$		
1.	12200	11950	250	62500
2.	11300		-650	422500
3.	11800		-150	22500
4.	11700		-250	62500
5.	12600		650	422500
6.	12000		50	2500
7.	12500		550	302500
8.	12400		450	202500
9.	12200		250	62500
10.	10800		-1150	1322500
				$\Sigma = 2885000$

Aby opracować statystycznie wyniki pomiarów należało określić rozkład cechy (pobór mocy napędu głównego prasy LPW 450) w populacji generalnej. Założono, że rozkład wyników pomiarów jest rozkładem normalnym. Weryfikację postawionej hipotezy dokonano stosując nieparametryczny test dla małej próbki oparty o badanie dobroci ciągu pseudolosowego [49]. Hipotezę statystyczną o normalnym rozkładzie uważa się za zweryfikowaną jeżeli dystrybuanta  $K=\Phi(t)$  ma rozkład jednostronny na odcinku (0, 1). W tym celu odcinek (0, 1) podzielono na  $n = 10$  równych przedziałów zwanych komórkami.

Podczas weryfikacji rozważono następujące przypadki:

- do danej komórki trafiła przynajmniej jedna realizacja  $p_i$  zmiennej losowej P,
- do danej komórki nie trafiła żadna realizacja  $p_i$  zmiennej losowej P.

Dla danych zawartych w tabelicy Z.2.1 odchylenie standardowe skorygowane  $\sigma$  wyniosło:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (P_i - P_{sr})^2} = 537,1 \quad (\text{Z.2.1})$$

gdzie:

$n$  – ilość pomiarów

Zmienną standaryzowaną  $t_i$  obliczono z wyrażenia:

$$t_i = \frac{P_i - w}{\sigma} \quad (\text{Z.2.2})$$

gdzie:

$w$  – wartość oczekiwana (w rozpatrywanym przypadku  $P_{sr}$ ).

Dystrybuanty zmiennej losowej  $\Phi(t_i)$ , które realizowały wypełnienie komórek, odczytano z tablic i podano w tabeli Z.2.2.

Tabela Z.2.2 Dane do określenia niezbędnej ilości pomiarów poboru mocy napędu głównego prasy LPW 450

Lp.	$t_i$	$K=\Phi(t_i)$	Przedziały komórek	Realizacja wypełnienia komórek zmienną losową P
1.	0,47	0,6808	0,1	+
2.	-1,21	0,1131	0,2	+
3.	-0,28	0,3897	0,3	-
4.	-0,47	0,3192	0,4	++
5.	1,21	0,8869	0,5	-
6.	0,09	0,5359	0,6	+
7.	1,02	0,8464	0,7	++
8.	0,84	0,7995	0,8	+
9.	0,47	0,6808	0,9	++
10.	-2,14	0,0162	1	-

+ komórka wypełniona realizacją  $p_i$  zmiennej losowej P, - komórka pusta

Dla wyznaczenia przedziału ufności oraz niezbędnej ilości pomiarów w próbie przyjęto test t-Studenta. Dla przyjętego przedziału istotności  $\alpha = 0,05$  i liczby stopni swobody  $n-1 = 9$  wartość krytyczna testu t wynosi  $t_\alpha = 2,262$ . Stosując odpowiednio wzór na liczebność próby otrzymano:

$$n = \frac{t_\alpha^2 \sigma}{e_o^2} = 4,13 \quad (\text{Z.2.3})$$

Aby uzyskać dokładność wyników pomiaru wytrzymałości brykietów na zrzut po próbie  $e_o = \pm 5\%$  należy wykonać nie mniej niż 5 pomiarów. Biorąc pod uwagę wyniki obliczeń oraz dotychczasowe doświadczenie za moc czynną prądu elektrycznego pobieraną przez układ napędu głównego prasy uznano średnią z 7 najwyższych wskazań przy odrzuceniu 3 maksymalnych odczytów.

## Szczegółowe wyniki badań procesu brykietowania koncentratu miedzi w prasie walcowej LPW 450

Tabela Z.3.1. Szczegółowe wyniki badań procesu brykietowania koncentratu miedzi w prasie walcowej LPW 450 z grawitacyjnym układem podawania materiału

Lp.	Oznaczenie próby	Kształt brykietów	Wilgotność			Wytrzymałość na zrzut				Wytrzymałość na ściskanie [N]	Nacisk wywierany na dno wgłębienia formującego			
			w <sub>1</sub> [%]	w <sub>2</sub> [%]	w <sub>śr</sub> [%]	K <sub>1</sub> [%]	K <sub>2</sub> [%]	K <sub>3</sub> [%]	K <sub>śr</sub> [%]		p <sub>1</sub> [MPa]	p <sub>2</sub> [MPa]	p <sub>3</sub> [MPa]	p <sub>śr</sub> [MPa]
1.	k120608p2	kropla	3,95	3,96	3,96	93,2	94,1	93,5	93,6	603	28,5	25,3	23,0	25,6
2.	k120608p1	kropla	4,28	4,23	4,26	92,6	91,3	90,9	91,6	459	26,1	19,6	21,2	22,3
3.	k020608p2	kropla	4,46	4,4	4,43	90,1	87,1	88,3	88,5	455	18,9	18,7	13,4	17,0
4.	k290508p1	kropla	4,71	4,65	4,68	---	---	---	---	---	12,6	14,4	13,0	13,4
5.	k200508p1	kropla	4,71	4,73	4,72	78,9	84,0	77,7	80,2	338	---	---	---	---
6.	k300508p1	kropla	5,33	5,23	5,28	81,2	80,1	79,9	80,4	349	17,3	13,2	---	15,2
7.	k130508p1	siodło	3,98	3,99	3,99	99,3	99,0	99,0	99,1	347	80,0	65,5	60,8	68,8
8.	k120508p2	siodło	4,28	4,24	4,26	98,0	98,1	97,6	97,9	327	59,7	57,5	35,5	50,9
9.	k140508p1	siodło	4,48	4,48	4,48	98,2	96,6	97,7	97,5	238	47,5	44,9	35,4	42,6
10.	k120508p1	siodło	4,75	4,74	4,75	97,5	96,3	97,2	97	278	---	---	---	---
11.	k130508p2	siodło	5,19	5,12	5,16	99,1	99,5	99,6	99,4	219	59,3	52,2	30,6	47,4

Tabela Z.3.1 c.d.

Lp.	Oznaczenie próby	Kształt brykietów	W <sub>śr</sub> [%]	Pobór mocy silnika napędu głównego prasy walcowej										Jednostkowe zapotrzebowanie energii [kWh/Mg]
				P <sub>1</sub> [W]	P <sub>2</sub> [W]	P <sub>3</sub> [W]	P <sub>4</sub> [W]	P <sub>5</sub> [W]	P <sub>6</sub> [W]	P <sub>7</sub> [W]	P <sub>śr</sub> [W]	P <sub>śr</sub> [kW]		
1.	k120608p2	kropla	3,96	3760	3660	3630	3470	3460	3280	3260	3502,9	3,50	3,92	
2.	k120608p1	kropla	4,26	3840	3830	3730	3660	3550	3540	3540	3670,0	3,67	4,11	
3.	k020608p2	kropla	4,43	4030	3950	3950	3930	3930	3840	3800	3918,6	3,92	4,38	
4.	k290508p1	kropla	4,68	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
5.	k200508p1	kropla	4,72	2960	2810	2750	2750	2740	2710	2690	2772,9	2,77	3,10	
6.	k300508p1	kropla	5,28	3350	3190	3170	3140	3130	3100	3060	3162,9	3,16	3,54	
7.	k130508p1	siodło	3,99	6940	6900	6780	6650	6610	6460	6440	6682,9	6,68	11,96	
8.	k120508p2	siodło	4,26	6332	6048	5702	5515	5383	5293	5258	5647,3	5,65	10,10	
9.	k140508p1	siodło	4,48	5780	5690	5670	5630	5590	5390	5260	5572,9	5,57	9,97	
10.	k120508p1	siodło	4,75	5180	4990	4950	4920	4880	4860	4570	4907,1	4,91	8,78	
11.	k130508p2	siodło	5,16	5610	5500	5430	5410	5260	5260	5140	5372,9	5,37	9,61	

Tabela Z.3.2. Szczegółowe wyniki badań procesu brykietowania koncentratu miedzi w prasie walcowej LPW 450 wymuszonym podawaniem materiału

Lp.	Oznaczenie próby	Kształt brykietów	Obroty ślimaka [min <sup>-1</sup> ]	Wilgotność			Wytrzymałość na zrzut				Wytrzymałość na ściskanie [N]	Nacisk wywierany na dno wgłębienia formującego		
				w <sub>1</sub> [%]	w <sub>2</sub> [%]	w <sub>śr</sub> [%]	K <sub>1</sub> [%]	K <sub>2</sub> [%]	K <sub>3</sub> [%]	K <sub>śr</sub> [%]		p <sub>1</sub> [MPa]	p <sub>2</sub> [MPa]	p <sub>śr</sub> [MPa]
1.	ks2804p015_2	kropla	78	5,33	5,23	5,28	71,2	67,0	70,6	69,6	293	21,1	19,7	20,4
2.	ks0705p015_2	kropla	85	3,79	3,99	3,89	91,8	93,9	92,1	92,6	741	44,3	50,4	47,3
3.	ks0705p015_1	kropla	85	4,21	4,04	4,13	95,1	93,2	93,4	93,9	811	32,1	54,5	43,3
4.	ks2904p015_2	kropla	85	4,38	4,44	4,41	98,8	98,3	99,0	98,7	929	40,5	71,2	55,9
5.	ks2904p015_1	kropla	85	4,82	4,77	4,80	98,1	98,1	97,5	97,9	923	26,8	57,3	42,1
6.	ks0505p015_1	kropla	85	5,10	5,05	5,08	99,1	98,4	98,6	98,7	885	46,6	52,3	49,5
7.	ks2404p015_1	kropla	90	3,44	3,62	3,53	95,9	94,1	95,0	95,0	1063,0	79,4	35,2	57,3
8.	ks230409p015	kropla	90	3,68	3,60	3,64	95,7	96,1	96,5	96,1	969,0	68,3	47,5	57,9
9.	ks2404p015_2	kropla	90	4,11	3,79	3,95	99,0	99,6	99,6	99,4	1197	28,0	88,4	58,2
10.	ks220409p015	kropla	90	4,41	4,29	4,35	98,0	96,9	97,3	97,4	---	48,4	80,1	64,2
11.	ks2804p015_1	kropla	90	4,60	4,47	4,54	99,2	99,4	99,3	99,3	1287	26,4	84,1	55,3
12.	ks0605p015_1	kropla	90	5,31	5,20	5,26	99,7	99,5	99,6	99,6	958	68,5	50,5	59,5

Tabela Z.3.2 c.d.

Lp.	Oznaczenie próby	Kształt brykietów	Obroty ślimaka	w <sub>śr</sub> [%]	Pobór mocy silnika napędu głównego prasy walcowej										Jednostkowe zapotrzebowanie energii [kWh/Mg]
					P <sub>1</sub> [W]	P <sub>2</sub> [W]	P <sub>3</sub> [W]	P <sub>4</sub> [W]	P <sub>5</sub> [W]	P <sub>6</sub> [W]	P <sub>7</sub> [W]	P <sub>śr</sub> [W]	P <sub>śr</sub> [kW]		
1.	ks2804p015_2	kropla	78	5,28	3930	3800	3780	3770	3510	3460	3360	3658,6	3,66	4,09	
2.	ks0705p015_2	kropla	85	3,89	6210	6170	5310	5300	5270	5240	5240	5534,3	5,53	6,19	
3.	ks0705p015_1	kropla	85	4,13	5520	5270	5250	5010	4990	4840	4820	5100,0	5,10	5,70	
4.	ks2904p015_2	kropla	85	4,41	6460	6450	6260	6220	5850	5530	5100	5981,4	5,98	6,69	
5.	ks2904p015_1	kropla	85	4,80	5880	5850	5460	5140	4950	4660	4620	5222,9	5,22	5,84	
6.	ks0505p015_1	kropla	85	5,08	6220	6120	5940	5890	5220	5120	4950	5637,1	5,64	6,31	
7.	ks2404p015_1	kropla	90	3,53	6700	5860	5590	5550	5410	5270	5270	5664,3	5,66	6,34	
8.	ks230409p015	kropla	90	3,64	7390	7380	7130	6260	6220	6200	6050	6661,4	6,66	7,45	
9.	ks2404p015_2	kropla	90	3,95	7160	6790	6500	6120	6040	5750	5530	6270,0	6,27	7,01	
10.	ks220409p015	kropla	90	4,35	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
11.	ks2804p015_1	kropla	90	4,54	7410	7030	6580	5950	5930	5790	5520	6315,7	6,32	7,06	
12.	ks0605p015_1	kropla	90	5,26	6640	6500	6440	5370	5030	4940	4920	5691,4	5,69	6,37	

c.d.  
Tab.  
Z.3.2.

### Szczegółowe wyniki badań wyznaczenia zmienności jednostkowego oporu zagęszczania

Tabela Z.4.1. Wyniki badań zagęszczania koncentratu miedzi z dodatkiem 11% ługu posulfitowego w cylindrycznej matrycy zamkniętej w celu określenia jednostkowego oporu zagęszczania dla wilgotności  $w_1 = 3,74\%$

Nacisk jednostkowy [MPa]	Stopień zagęszczenia [-]			
	Próba 3.2 0702p11	Próba 3.3 0702p12	Próba 3.4 0702p13	Średnia
0	1,000	1,000	1,000	1,000
7	1,487	1,479	1,455	1,474
14	1,559	1,548	1,522	1,543
28	1,646	1,636	1,603	1,628
42	1,702	1,693	1,657	1,684
57	1,746	1,737	1,697	1,727
71	1,777	1,769	1,727	1,758
85	1,802	1,796	1,753	1,784
99	1,823	1,819	1,774	1,805
113	1,841	1,838	1,791	1,823
127	1,856	1,854	1,805	1,838
142	1,868	1,868	1,817	1,851

Tabela Z.4.2. Wyniki badań zagęszczania koncentratu miedzi z dodatkiem 11% ługu posulfitowego w cylindrycznej matrycy zamkniętej w celu określenia jednostkowego oporu zagęszczania dla wilgotności  $w_2 = 4,00\%$

Nacisk jednostkowy [MPa]	Stopień zagęszczenia [-]			
	Próba 2.1 0702p6	Próba 2.2 0702p7	Próba 2.4 0702p9	Średnia
0	1,000	1,000	1,000	1,000
7	1,490	1,503	1,509	1,501
14	1,559	1,572	1,586	1,572
28	1,642	1,655	1,674	1,657
42	1,696	1,708	1,730	1,711
57	1,737	1,747	1,772	1,752
71	1,766	1,775	1,802	1,781
85	1,790	1,800	1,824	1,805
99	1,810	1,818	1,843	1,824
113	1,826	1,833	1,858	1,839
127	1,839	1,844	1,870	1,851
142	1,850	1,853	1,879	1,861

Tabela Z.4.3. Wyniki badań zagęszczania koncentratu miedzi z dodatkiem 11% ługu posulfitowego w cylindrycznej matrycy zamkniętej w celu określenia jednostkowego oporu zagęszczania dla wilgotności  $w_3 = 4,59\%$

Nacisk jednostkowy [MPa]	Stopień zagęszczenia [-]			
	Próba 1.1 0702p2	Próba 1.2 0702p3	Próba 1.4 0702p5	Średnia
0	1,000	1,000	1,000	1,000
7	1,543	1,557	1,525	1,542
14	1,615	1,628	1,594	1,613
28	1,702	1,713	1,678	1,697
42	1,754	1,766	1,732	1,751
57	1,794	1,804	1,770	1,789
71	1,819	1,830	1,796	1,815
85	1,839	1,851	1,817	1,836
99	1,854	1,866	1,834	1,851
113	1,866	1,877	1,845	1,862
127	1,873	1,884	1,853	1,870
142	1,879	1,890	1,859	1,876

**Szczegółowe wyniki badań wyznaczenia zmienności  
współczynnika tarcia zewnętrznego**

Tabela Z.5.1. Wyniki badań zmienności współczynnika statycznego tarcia zewnętrznego w procesie scalania koncentratu rudy miedzi z dodatkiem 11% ługu posulfitowego dla wilgotności mieszanki  $w_1 = 3,74\%$

Wartość nacisku jednostkowego [MPa]	Wartość siły nacisku [kN]	Nazwa próby	Wartość momentu tarcia statycznego [Nm]	Wsp. statycznego tarcia zewn. [-]	Śr. wartość momentu tarcia statycznego. [Nm]	Śr. wsp. statycznego tarcia zewn. [-]
20	6,28	M4_20_p1	153,465	0,611	152,519	0,607
		M4_20_p2	155,090	0,617		
		M4_20_p4	149,004	0,593		
40	12,57	M4_40_p1	247,913	0,493	257,218	0,512
		M4_40_p2	259,276	0,516		
		M4_40_p3	264,463	0,526		
60	18,85	M4_60_p1	333,319	0,442	333,766	0,443
		M4_60_p2	334,911	0,444		
		M4_60_p3	333,067	0,442		
80	25,13	M4_80_p1	388,487	0,386	395,185	0,393
		M4_80_p2	395,109	0,393		
		M4_80_p3	401,958	0,400		
100	31,42	M4_100_p1	459,329	0,366	456,230	0,363
		M4_100_p3	460,360	0,366		
		M4_100_p4	449,001	0,357		
120	37,71	M4_120_p1	526,994	0,349	522,896	0,347
		M4_120_p3	539,698	0,358		
		M4_120_p4	501,996	0,333		
140	43,98	M4_140_p1	565,638	0,322	544,847	0,310
		M4_140_p3	517,426	0,294		
		M4_140_p4	551,477	0,313		

Tabela Z.5.2. Wyniki badań zmienności współczynnika statycznego tarcia zewnętrznego w procesie scalania koncentratu rudy miedzi z dodatkiem 11% ługu posulfitowego dla wilgotności mieszanki  $w_2 = 4,00\%$

Wartość nacisku jednostkowego [MPa]	Wartość siły nacisku [kN]	Nazwa próby	Wartość momentu tarcia statycznego [Nm]	Wsp. statycznego tarcia zewn. [-]	Śr. wartość momentu tarcia statycznego. [Nm]	Śr. wsp. statycznego tarcia zewn. [-]
20	6,28	M3_20_p1	152,171	0,605	149,902	0,596
		M3_20_p2	144,781	0,576		
		M3_20_p3	152,754	0,608		
40	12,57	M3_40_p2	258,573	0,514	247,174	0,492
		M3_40_p3	234,907	0,467		
		M3_40_p4	248,041	0,493		
60	18,85	M3_60_p1	301,372	0,400	302,162	0,401
		M3_60_p2	302,043	0,401		
		M3_60_p3	303,072	0,402		
80	25,13	M3_80_p2	379,777	0,378	372,867	0,371
		M3_80_p3	383,025	0,381		
		M3_80_p4	355,800	0,354		
100	31,42	M3_100_p1	385,381	0,307	405,895	0,323
		M3_100_p2	408,157	0,325		
		M3_100_p4	424,147	0,338		
120	37,71	M3_120_p1	452,709	0,300	442,016	0,293
		M3_120_p2	446,553	0,296		
		M3_120_p4	426,786	0,283		
140	43,98	M3_140_p2	499,178	0,284	487,174	0,277
		M3_140_p3	490,571	0,279		
		M3_140_p4	471,772	0,268		

Tabela Z.5.3. Wyniki badań zmienności współczynnika statycznego tarcia zewnętrznego w procesie scalania koncentratu rudy miedzi z dodatkiem 11% ługu posulfitowego dla wilgotności mieszanki  $w_3 = 4,59\%$

Wartość nacisku jednostkowego [MPa]	Wartość siły nacisku [kN]	Nazwa próby	Wartość momentu tarcia statycznego [Nm]	Wsp. statycznego tarcia zewn. [-]	Śr. wartość momentu tarcia statycznego. [Nm]	Śr. wsp. statycznego tarcia zewn. [-]
20	6,28	M2_20_p1	146,257	0,582	141,149	0,562
		M2_20_p2	136,758	0,544		
		M2_20_p4	140,432	0,559		
40	12,57	M2_40_p1	221,491	0,441	223,682	0,445
		M2_40_p2	223,690	0,445		
		M2_40_p4	225,866	0,449		
60	18,85	M2_60_p2	290,404	0,385	298,750	0,396
		M2_60_p3	295,768	0,392		
		M2_60_p4	310,078	0,411		
80	25,13	M2_80_p2	354,424	0,353	344,890	0,343
		M2_80_p3	347,935	0,346		
		M2_80_p4	332,311	0,331		
100	31,42	M2_100_p1	356,056	0,283	364,653	0,290
		M2_100_p3	365,539	0,291		
		M2_100_p4	372,365	0,296		
120	37,71	M2_120_p1	419,752	0,278	414,982	0,275
		M2_120_p2	434,987	0,288		
		M2_120_p3	390,207	0,259		
140	43,98	M2_140_p1	402,208	0,229	388,913	0,221
		M2_140_p2	423,609	0,241		
		M2_140_p4	340,921	0,194		

Tabela Z.5.4. Wyniki badań zmienności współczynnika kinetycznego tarcia zewnętrznego w procesie scalania koncentratu rudy miedzi z dodatkiem 11% ługu posulfitowego dla wilgotności mieszanki  $w_1 = 3,74\%$

Wartość nacisku jednostkowego [MPa]	Wartość siły nacisku [kN]	Nazwa próby	Wartość momentu tarcia statycznego [Nm]	Wsp. statycznego tarcia zewn. [-]	Śr. wartość momentu tarcia statycznego. [Nm]	Śr. wsp. statycznego tarcia zewn. [-]
20	6,28	M4_20_p	133,0706	0,529	125,165	0,498
		M4_20_p	124,3542	0,495		
		M4_20_p	118,0701	0,470		
40	12,57	M4_40_p	233,8818	0,465	228,594	0,455
		M4_40_p	231,3519	0,460		
		M4_40_p	220,5482	0,439		
60	18,85	M4_60_p	295,3297	0,392	295,009	0,391
		M4_60_p	290,1645	0,385		
		M4_60_p	299,5334	0,397		
80	25,13	M4_80_p	301,1309	0,300	318,211	0,317
		M4_80_p	322,1972	0,321		
		M4_80_p	331,3064	0,330		
100	31,42	M4_100_p	336,283	0,268	336,963	0,268
		M4_100_p	345,1713	0,275		
		M4_100_p	329,4346	0,262		
120	37,71	M4_120_p	354,5795	0,235	364,520	0,242
		M4_120_p	375,5806	0,249		
		M4_120_p	363,3998	0,241		
140	43,98	M4_140_p	388,5884	0,221	359,936	0,205
		M4_140_p	329,809	0,187		
		M4_140_p	361,4113	0,205		

Tabela Z.5.5. Wyniki badań zmienności współczynnika kinetycznego tarcia zewnętrznego w procesie scalania koncentratu rudy miedzi z dodatkiem 11% ługu posulfitowego dla wilgotności mieszanki  $w_2 = 4,00\%$

Wartość nacisku jednostkowego [MPa]	Wartość siły nacisku [kN]	Nazwa próby	Wartość momentu tarcia statycznego [Nm]	Wsp. statycznego tarcia zewn. [-]	Śr. wartość momentu tarcia statycznego. [Nm]	Śr. wsp. statycznego tarcia zewn. [-]
20	6,28	M3_20_p2	112,103	0,446	111,669	0,444
		M3_20_p3	115,980	0,461		
		M3_20_p4	106,923	0,425		
40	12,57	M3_40_p1	191,949	0,382	186,695	0,371
		M3_40_p2	183,012	0,364		
		M3_40_p3	185,124	0,368		
60	18,85	M3_60_p2	224,333	0,298	219,503	0,291
		M3_60_p3	225,271	0,299		
		M3_60_p4	208,905	0,277		
80	25,13	M3_80_p2	249,550	0,248	236,097	0,235
		M3_80_p3	238,511	0,237		
		M3_80_p4	220,229	0,219		
100	31,42	M3_100_p2	232,219	0,185	231,884	0,194
		M3_100_p3	264,150	0,210		
		M3_100_p4	234,084	0,186		
120	37,71	M3_120_p2	243,170	0,161	225,792	0,150
		M3_120_p3	212,753	0,141		
		M3_120_p4	221,455	0,147		
140	43,98	M3_140_p2	337,162	0,192	318,108	0,181
		M3_140_p3	304,990	0,173		
		M3_140_p4	312,174	0,177		

Tabela Z.5.6. Wyniki badań zmienności współczynnika kinetycznego tarcia zewnętrznego w procesie scalania koncentratu rudy miedzi z dodatkiem 11% ługu posulfitowego dla wartości wilgotności mieszanki  $w_3 = 4,59\%$

Wartość nacisku jednostkowego [MPa]	Wartość siły nacisku [kN]	Nazwa próby	Wartość momentu tarcia statycznego [Nm]	Wsp. statycznego tarcia zewn. [-]	Śr. wartość momentu tarcia statycznego. [Nm]	Śr. wsp. statycznego tarcia zewn. [-]
20	6,28	M2_20_p2	97,471	0,388	99,499	0,396
		M2_20_p3	96,731	0,385		
		M2_20_p4	104,294	0,415		
40	12,57	M2_40_p1	148,058	0,295	153,554	0,305
		M2_40_p2	152,815	0,304		
		M2_40_p3	159,787	0,318		
60	18,85	M2_60_p1	207,862	0,276	187,712	0,249
		M2_60_p2	179,292	0,238		
		M2_60_p3	175,982	0,233		
80	25,13	M2_80_p2	193,233	0,192	180,947	0,180
		M2_80_p3	175,738	0,175		
		M2_80_p4	173,869	0,173		
100	31,42	M2_100_p1	181,050	0,144	179,783	0,143
		M2_100_p3	179,170	0,143		
		M2_100_p4	179,130	0,143		
120	37,71	M2_120_p1	220,509	0,146	237,813	0,158
		M2_120_p2	248,824	0,165		
		M2_120_p3	244,107	0,162		
140	43,98	M2_140_p1	287,108	0,163	283,303	0,161
		M2_140_p2	295,474	0,168		
		M2_140_p4	267,326	0,152		

## Szczegółowe wyniki badań procesu scalania wodorotlenku wapnia w prasie walcowej LPW 450

Tabela. Z.6.1. Szczegółowe wyniki badań procesu brykietowania wodorotlenku wapnia w prasie walcowej LPW 450 – brykiety w kształcie kropli

Lp.	Oznaczenie próby	Dodatek wody [%]	Prędkość obwodowa walców [m/s]	Przejście materiału	Wytrzymałość na zrzut				Wytrzymałość na ściskanie [N]	Podatności scalonego materiału na granulowanie [%] przy prędkości uderzenia				
					K <sub>1</sub> [%]	K <sub>2</sub> [%]	K <sub>3</sub> [%]	K <sub>śr</sub> [%]		5,7 [m/s]	8,5 [m/s]	11,4 [m/s]	14,2 [m/s]	17,4 [m/s]
1.	w175p01	17,5	0,1	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
2.	w175p01_2p	17,5	0,1	2	45,6	48,3	50,7	48,2	529	49,0	49,0	48,8	47,8	45,6
3.	w175p02	17,5	0,2	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
4.	w175p02_2p	17,5	0,2	2	70,1	65,1	69,4	68,2	474	50,4	50,4	49,4	48,4	47,2
5.	w175p03	17,5	0,3	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
6.	w175p03_2p	17,5	0,3	2	71,9	74,3	72,8	73	345	50,0	49,2	48,2	46,6	45,2
7.	w20p01	20,0	0,1	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
8.	w20p01_2p	20,0	0,1	2	74,0	70,8	72,1	72,3	439	52,8	51,4	50,4	49,0	48,6
9.	w20p02	20,0	0,2	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
10.	w20p02_2p	20,0	0,2	2	83,3	84,8	83,9	84,0	404	53,4	53,6	52,8	50,8	49,6
11.	w20p03	20,0	0,3	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
12.	w20p03_2p	20,0	0,3	2	85,2	83,9	85,3	84,8	384	53	53,8	52,4	51,8	50,6
13.	w225p01	22,5	0,1	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
14.	w225p01_2p	22,5	0,1	2	80,6	83,4	81,1	81,7	385	52,2	53,6	52,8	48,6	46,2
15.	w225p02	22,5	0,2	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
16.	w225p02_2p	22,5	0,2	2	89,4	86,8	89,3	88,5	451	53,8	54,0	53,0	49,2	47,6
17.	w225p03	22,5	0,3	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
18.	w225p03_2p	22,5	0,3	2	75,4	75,2	75,9	75,5	391	53,0	53,4	51	49,6	48,0

Tabela. Z.6.1 c.d.

Lp.	Oznaczenie próby	Pobór mocy silnika napędu głównego prasy walcowej										Jednostkowe zapotrzebowanie energii [kWh/Mg]
		P <sub>1</sub> [W]	P <sub>2</sub> [W]	P <sub>3</sub> [W]	P <sub>4</sub> [W]	P <sub>5</sub> [W]	P <sub>6</sub> [W]	P <sub>7</sub> [W]	P <sub>sr</sub> [W]	P <sub>sr</sub> [kW]		
1.	w175p01	1280	1280	1230	1230	1220	1210	1200	1235,7	1,24	2,87	
2.	w175p01_2p	2750	2700	2690	2610	2490	2490	2450	2597,1	2,60	6,04	
3.	w175p02	2430	2420	2420	2410	2410	2410	2370	2410,0	2,41	2,81	
4.	w175p02_2p	4240	4160	3910	3880	3840	3840	3830	3957,1	3,96	4,61	
5.	w175p03	3230	3210	3130	3080	3010	3000	3000	3094,3	3,09	2,40	
6.	w175p03_2p	5120	5040	4990	4830	4830	4510	4150	4781,4	4,78	3,71	
7.	w20p01	1790	1740	1710	1690	1690	1660	1660	1705,7	1,71	3,97	
8.	w20p01_2p	3020	2960	2960	2620	2620	---	---	2836,0	2,84	6,60	
9.	w20p02	3500	3310	3310	3300	3180	3160	3110	3267,1	3,27	3,80	
10.	w20p02_2p	5660	5590	5090	4970	4730	4570	2710	4760,0	4,76	5,54	
11.	w20p03	3580	3490	3480	3470	3310	3280	3270	3411,4	3,41	2,65	
12.	w20p03_2p	6590	6250	5330	5040	4720	---	---	5586,0	5,59	4,33	
13.	w225p01	1590	1510	1510	1500	1500	1490	1470	1510,0	1,51	3,51	
14.	w225p01_2p	3240	3220	3160	3120	3090	3040	3010	3125,7	3,13	7,27	
15.	w225p02	2830	2830	2820	2800	2720	2720	2680	2771,4	2,77	3,23	
16.	w225p02_2p	5570	5400	5390	5190	4870	---	---	5284,0	5,28	6,15	
17.	w225p03	3690	3530	3510	3400	3350	3330	3330	3448,6	3,45	2,68	
18.	w225p03_2p	6420	6050	5670	5180	5130	---	---	5690,0	5,69	4,41	

c.d.  
Tab.  
Z.6.1.

Tabela. Z.6.2. Szczegółowe wyniki badań procesu brykietowania wodorotlenku wapnia w prasie walcowej LPW 450 – brykiety w kształcie siodła

Lp.	Oznaczenie próby	Dodatek wody [%]	Prędkość obwodowa walców [m/s]	Przejście materiału	Wytrzymałość na zrzut				Wytrzymałość na ściskanie [N]	Podatności scalonego materiału na granulowanie [%] przy prędkości uderzenia				
					K <sub>1</sub> [%]	K <sub>2</sub> [%]	K <sub>3</sub> [%]	K <sub>śr</sub> [%]		5,7 [m/s]	8,5 [m/s]	11,4 [m/s]	14,2 [m/s]	17,4 [m/s]
1.	w175p01	17,5	0,1	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
2.	w175p01_2p	17,5	0,1	2	85,6	86,6	85,8	86	454	43,6	45,0	49,4	50,8	55,2
3.	w175p02	17,5	0,2	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
4.	w175p02_2p	17,5	0,2	2	84,1	86,7	83,6	84,8	325	42,2	42,4	46,8	48,0	54,0
5.	w175p03	17,5	0,3	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
6.	w175p03_2p	17,5	0,3	2	86,0	83,8	85,8	85,2	343	44,4	45,6	46,2	48,2	52,0
7.	w20p01	20,0	0,1	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
8.	w20p01_2p	20,0	0,1	2	81,8	84,6	82	82,8	411	48,6	49,8	51,0	53,6	55,4
9.	w20p02	20,0	0,2	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
10.	w20p02_2p	20,0	0,2	2	90,1	89,2	91	90,1	346	47,6	48,2	50,0	51,8	52,2
11.	w20p03	20,0	0,3	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
12.	w20p03_2p	20,0	0,3	2	92,2	92,8	92,2	92,4	345	47,2	48,4	49,0	50,2	52,4
13.	w225p01	22,5	0,1	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
14.	w225p01_2p	22,5	0,1	2	77,8	78,6	78,8	78,4	341	49,6	51,6	52,2	53,4	54,0
15.	w225p02	22,5	0,2	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
16.	w225p02_2p	22,5	0,2	2	88,1	86,9	87,5	87,5	270	49,4	50,2	52,0	53,2	53,6
17.	w225p03	22,5	0,3	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
18.	w225p03_2p	22,5	0,3	2	83,3	85,1	83,9	84,1	226	49,2	49,8	50,6	51,0	52,8

Tabela. Z.6.2 c.d.

Lp.	Oznaczenie próby	Pobór mocy silnika napędu głównego prasy walcowej										Jednostkowe zapotrzebowanie energii [kWh/Mg]
		P <sub>1</sub> [W]	P <sub>2</sub> [W]	P <sub>3</sub> [W]	P <sub>4</sub> [W]	P <sub>5</sub> [W]	P <sub>6</sub> [W]	P <sub>7</sub> [W]	P <sub>śr</sub> [W]	P <sub>śr</sub> [kW]		
1.	w175p01	2400	2330	2310	2300	2290	2270	2270	2310,0	2,31	8,59	
2.	w175p01_2p	7960	7950	7880	7870	7680	7550	7190	7725,7	7,73	28,72	
3.	w175p02	3010	3000	2890	2800	2770	2750	2740	2851,4	2,85	5,31	
4.	w175p02_2p	12200	12200	12000	11800	11700	11300	10800	11714,3	11,71	21,81	
5.	w175p03	3940	3850	3700	3680	3620	---	---	3758,0	3,76	4,66	
6.	w175p03_2p	17900	17600	17400	16300	14900	---	---	16820,0	16,82	20,87	
7.	w20p01	2430	2410	2390	2380	2350	2340	2320	2374,3	2,37	8,83	
8.	w20p01_2p	5800	5640	5580	5280	5270	5150	4880	5371,4	5,37	19,97	
9.	w20p02	3630	3580	3560	3500	3470	3460	3450	3521,4	3,52	6,56	
10.	w20p02_2p	10200	9780	9620	9420	8520	---	---	9508,0	9,51	17,71	
11.	w20p03	4320	4290	4230	4210	4150	4010	4000	4172,9	4,17	5,18	
12.	w20p03_2p	14700	14300	14200	13800	13800	13500	13200	13928,6	13,93	17,28	
13.	w225p01	2580	2550	2510	2370	2370	2310	2260	2421,4	2,42	9,00	
14.	w225p01_2p	4150	4040	4040	4000	3990	3920	3860	4000,0	4,00	14,87	
15.	w225p02	3850	3680	3660	3580	3270	3240	3240	3502,9	3,50	6,52	
16.	w225p02_2p	9470	9140	9130	8880	8660	8530	6190	8571,4	8,57	15,96	
17.	w225p03	4590	4500	4290	4260	4220	---	---	4372,0	4,37	5,42	
18.	w225p03_2p	13300	12800	12200	12000	11900	---	---	12440,0	12,44	15,43	

c.d.  
Tab.  
Z.6.2.

Tabela. Z.6.3. Szczegółowe wyniki badań procesu scalania wodorotlenku wapnia w prasie walcowej LPW 450 – wypraski z dwustronnymi wypukłościami

Lp.	Oznaczenie próby	Dodatek wody [%]	Prędkość obwodowa walców [m/s]	Przejsięcie materiału	Podatności scalonego materiału na granulowanie [%] przy prędkości uderzenia					Pobór mocy silnika napędu głównego prasy walcowej								Jednostkowe zapotrzebowanie energii [kWh/Mg]	
					5,7 [m/s]	8,5 [m/s]	11,4 [m/s]	14,2 [m/s]	17,4 [m/s]	P <sub>1</sub> [W]	P <sub>2</sub> [W]	P <sub>3</sub> [W]	P <sub>4</sub> [W]	P <sub>5</sub> [W]	P <sub>6</sub> [W]	P <sub>7</sub> [W]	P <sub>sr</sub> [W]		P <sub>sr</sub> [kW]
1.	w175p01	17,5	0,1	1	---	---	---	---	---	834	832	790	789	789	785	780	799,9	0,80	3,21
2.	w175p01_2p	17,5	0,1	2	43,4	48,4	50,8	51	50,6	2820	2650	2560	2560	2510	2470	2450	2574,3	2,57	10,34
3.	w175p02	17,5	0,2	1	---	---	---	---	---	1580	1580	1540	1540	1530	1480	1390	1520,0	1,52	3,05
4.	w175p02_2p	17,5	0,2	2	43,2	49	50,6	52	50,6	4280	4240	4080	4020	3980	3610	3460	3952,9	3,95	7,94
5.	w175p03	17,5	0,3	1	---	---	---	---	---	2660	2580	2520	2480	2450	2450	2440	2511,4	2,51	3,37
6.	w175p03_2p	17,5	0,3	2	43,8	48,6	50,2	51,6	51,2	8110	7280	7270	6430	5520	5400	4260	6324,3	6,32	8,48
7.	w20p01	20,0	0,1	1	---	---	---	---	---	1200	1170	1140	1090	1080	1070	1070	1117,1	1,12	4,49
8.	w20p01_2p	20,0	0,1	2	42	50,8	50	50,8	50,6	2840	2820	2640	2540	2520	2480	2440	2611,4	2,61	10,49
9.	w20p02	20,0	0,2	1	---	---	---	---	---	2550	2370	2280	2160	2140	2130	2090	2245,7	2,25	4,51
10.	w20p02_2p	20,0	0,2	2	43,4	51	51	51	51	4790	4560	4370	4360	4200	4120	3810	4315,7	4,32	8,67
11.	w20p03	20,0	0,3	1	---	---	---	---	---	2560	2550	2540	2540	2440	2420	2410	2494,3	2,49	3,34
12.	w20p03_2p	20,0	0,3	2	42,8	52,2	52	51,8	50,8	4990	4960	4930	4760	4270	4160	3980	4578,6	4,58	6,14
13.	w225p01	22,5	0,1	1	---	---	---	---	---	1180	1170	1170	1160	1160	1150	1150	1162,9	1,16	4,67
14.	w225p01_2p	22,5	0,1	2	48,8	54,2	52	51	50,2	2190	2020	2010	2010	1980	1950	1940	2014,3	2,01	8,09
15.	w225p02	22,5	0,2	1	---	---	---	---	---	1570	1550	1500	1490	1480	1460	1430	1497,1	1,50	3,01
16.	w225p02_2p	22,5	0,2	2	50,6	52,6	52,6	52	51,4	3910	3650	3630	3600	3380	3360	3340	3552,9	3,55	7,13
17.	w225p03	22,5	0,3	1	---	---	---	---	---	2620	2600	2520	2490	2370	2320	2280	2457,1	2,46	3,29
18.	w225p03_2p	22,5	0,3	2	51,8	53,8	52,8	51,6	49,8	5060	4990	4550	4180	4000	3950	3930	4380,0	4,38	5,87

Tabela. Z.6.4. Szczegółowe wyniki badań procesu scalania wodorotlenku wapnia w prasie walcowej LPW 450 – wypraski z jednostronnymi wypukłościami

Lp.	Oznaczenie próby	Dodatek wody [%]	Prędkość obwodowa walców [m/s]	Przejsięcie materiału	Podatności scalonego materiału na granulowanie [%] przy prędkości uderzenia					Pobór mocy silnika napędu głównego prasy walcowej								Jednostkowe zapotrzebowanie energii [kWh/Mg]	
					5,7 [m/s]	8,5 [m/s]	11,4 [m/s]	14,2 [m/s]	17,4 [m/s]	P <sub>1</sub> [W]	P <sub>2</sub> [W]	P <sub>3</sub> [W]	P <sub>4</sub> [W]	P <sub>5</sub> [W]	P <sub>6</sub> [W]	P <sub>7</sub> [W]	P <sub>śr</sub> [W]		P <sub>śr</sub> [kW]
1.	w175p01	17,5	0,1	1	---	---	---	---	---	2390	2270	2140	1890	1740	1690	1690	1972,9	1,97	7,92
2.	w175p01_2p	17,5	0,1	2	52	54	51	49,3	46,3	3330	3080	2830	2740	2580	2580	2580	2817,1	2,82	11,31
3.	w175p02	17,5	0,2	1	---	---	---	---	---	2890	2880	2810	2800	2760	2750	2700	2798,6	2,80	5,62
4.	w175p02_2p	17,5	0,2	2	50,8	54,4	52	50,5	47,2	4990	4900	4820	4670	4550	4340	4330	4657,1	4,66	9,35
5.	w175p03	17,5	0,3	1	---	---	---	---	---	3780	3770	3770	3770	3750	3750	3740	3761,4	3,76	5,04
6.	w175p03_2p	17,5	0,3	2	53	54,6	51,4	49,8	47,6	5860	5450	5370	5130	5120	4940	3490	5051,4	5,05	6,77
7.	w20p01	20,0	0,1	1	---	---	---	---	---	1590	1560	1530	1520	1510	1490	1480	1525,7	1,53	6,13
8.	w20p01_2p	20,0	0,1	2	52,6	53,1	50,5	48,6	44,5	3070	3030	3020	2960	2950	2890	2840	2965,7	2,97	11,91
9.	w20p02	20,0	0,2	1	---	---	---	---	---	2730	2700	2670	2640	2640	2620	2620	2660,0	2,66	5,34
10.	w20p02_2p	20,0	0,2	2	52,7	51,4	50	46,6	42,2	4150	4120	3940	3850	3640	3640	3520	3837,1	3,84	7,71
11.	w20p03	20,0	0,3	1	---	---	---	---	---	3710	3710	3660	3520	3520	3510	3500	3590,0	3,59	4,81
12.	w20p03_2p	20,0	0,3	2	52,4	51,3	50,1	46,6	43,1	5150	4860	4780	4680	4360	4290	4030	4592,9	4,59	6,16
13.	w225p01	22,5	0,1	1	---	---	---	---	---	1920	1910	1830	1810	1750	1750	1740	1815,7	1,82	7,29
14.	w225p01_2p	22,5	0,1	2	50,4	47,1	45,7	42,4	39,2	1940	1800	1790	1770	1730	1710	1660	1771,4	1,77	7,11
15.	w225p02	22,5	0,2	1	---	---	---	---	---	3300	3300	3280	3270	3270	3250	3160	3261,4	3,26	6,55
16.	w225p02_2p	22,5	0,2	2	49	46,9	44,6	42,1	38,5	3640	3580	3530	3530	3430	3350	3310	3481,4	3,48	6,99
17.	w225p03	22,5	0,3	1	---	---	---	---	---	3810	3800	3630	3600	3590	3580	3570	3654,3	3,65	4,90
18.	w225p03_2p	22,5	0,3	2	49,9	47,7	45,5	40,1	38,3	4690	4650	4630	4520	4210	4000	3980	4382,9	4,38	5,88