

334 DISSERTATIONS MONOGRAPHS

BOGDAN KOSTURKIEWICZ

The method of thickening system's setup
of roll presses
used in the process of the agglomeration
of the sewage sludge mixtures



ROZPRAWY
MONOGRAFIE **334**

BOGDAN KOSTURKIEWICZ

Metoda doboru konfiguracji
układu zagęszczania pras walcowych
do scalania mieszanek
komunalnych osadów ściekowych



WYDAWNICTWA AGH

KRAKÓW 2018

Wydawnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

Redaktor Naczelny Wydawnictw AGH

Jan Sas

Komitet Naukowy Wydawnictw AGH:

Andrzej Pach (przewodniczący)

Jan Chłopek

Barbara Gąciarz

Bogdan Sapiński

Stanisław Stryczek

Tadeusz Telejko

Recenzenci: *dr hab. inż. Marek Macko, prof. nadzw. UKW*

dr hab. inż. Marian Banaś, prof. nadzw. AGH

Afiliacja autora:

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Katedra Systemów Wytwarzania

al. A. Mickiewicza 30

30-059 Kraków

Redakcja: *Joanna Ciągala*

Skład komputerowy: *Andre*

© Wydawnictwa AGH, Kraków 2018

ISSN 0867-6631

ISBN 978-83-66016-19-4

Wydawnictwa AGH

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

tel. 12 617 32 28, 12 636 40 38

e-mail: redakcja@wydawnictwoagh.pl

<http://www.wydawnictwa.agh.edu.pl>

Spis treści

Streszczenie	9
Summary	11
Wykaz ważniejszych oznaczeń	13
1. Eksploracja problematyki zagospodarowania osadów ściekowych	19
2. Sformułowanie problemu badawczego	31
3. Ocena możliwości termicznej konwersji komunalnych osadów ściekowych	33
3.1. Problematyka wyboru materiału do badań	33
3.2. Badania fizyczno-chemiczne komunalnych osadów ściekowych	35
3.3. Analiza bilansu energetycznego	38
4. Scalanie komunalnych osadów ściekowych w prasie walcowej z zasilaniem grawitacyjnym	41
4.1. Opis uniwersalnej instalacji do badań procesu scalania materiałów drobnoziarnistych w prasie walcowej	41
4.2. Metodyka badań	45
4.3. Wyznaczanie charakterystyki zagęszczania mieszanek komunalnych osadów ściekowych	53
4.4. Wyniki badań brykietowania mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego w prasie walcowej z niesymetrycznym układem zagęszczania i zasilaniem grawitacyjnym	54
4.5. Wyniki badań scalania mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego w prasie walcowej z gładkimi walcami i zasilaniem grawitacyjnym	61

4.6. Wyniki badań brykietowania mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego z węglem kamiennym w prasie walcowej z niesymetrycznym układem zagęszczania i zasilaniem grawitacyjnym	64
4.7. Brykietowanie mieszanek komunalnych osadów ściekowych w prasie laboratoryjnej o średnicy walców 1100 mm zasilanej grawitacyjnie	69
4.8. Ocena spalania brykietów uzyskanych z mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego z węglem kamiennym	71
5. Brykietowanie komunalnych osadów ściekowych w prasie walcowej z zasilaczem ślimakowym	75
5.1. Cel badań	75
5.2. Metodyka badań	77
5.3. Wyniki badań	80
6. Praktyczne aspekty modelowania matematycznego procesu scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych w prasach walcowych	87
6.1. Modelowanie procesu scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych w prasach walcowych zasilanych grawitacyjnie	87
6.2. Badania zmienności tarcia zewnętrznego w procesie scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych	91
6.2.1. Cel badań	91
6.2.2. Opis stanowiska laboratoryjnego	92
6.2.3. Metodyka badań	93
6.2.4. Wyniki badań	94
6.3. Modelowanie procesu scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych w prasach walcowych z zasilaczem ślimakowym	100
6.3.1. Pasmowy model przepływu materiału drobnoziarnistego w zasilaczu ślimakowym	100
6.3.2. Model obciążenia elementu roboczego zasilacza ślimakowego	108
6.3.3. Wyznaczanie wartości kąta tarcia wewnętrznego i zewnętrznego mieszanek komunalnych osadów ściekowych przepływających przez zasilacz ślimakowy	111
6.3.4. Badania symulacyjne przepływu mieszanek komunalnych osadów ściekowych w zasilaczu ślimakowym	117

7. Zastosowanie do celów projektowych	
wyników badań scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych	119
7.1. Procedura doboru przemysłowych pras walcowych	
do scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych	119
7.2. Praktyczne aspekty stosowania zasilania	
wymuszonego w przemysłowych prasach walcowych	124
7.3. Konstrukcje pras walcowych	
do scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych	128
Podsumowanie	138
Literatura	141

BOGDAN KOSTURKIEWICZ

Metoda doboru konfiguracji układu zagęszczania pras walcowych do scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych

Streszczenie

Problem zagospodarowania odpadów powstających w sektorze komunalnym i przemysłowym jest niezwykle istotny dla zrównoważonej gospodarki. Przygotowanie komunalnych osadów ściekowych do spalania wiąże się często z koniecznością ich scalenia. Proces ten może być realizowany po zmieszaniu tego odpadu z innymi paliwami stałymi poprawiającymi gęstość energetyczną mieszanki. Z doświadczeń własnych autora oraz analizy literatury przedmiotu wynika, że z ekonomicznego punktu widzenia najkorzystniej jest realizować proces scalania tego odpadu w prasach walcowych. W pracy przedstawiono procedurę doboru tych urządzeń opartą na rezultatach badań prowadzonych na obiektach rzeczywistych oraz wynikach badań symulacyjnych. Osiągnięcie zamierzonego celu wiązało się z koniecznością wykonania szeregu badań podstawowych związanych z określeniem wartości parametrów materiałowych decydujących o przebiegu procesu zagęszczania. Stąd w poszczególnych rozdziałach pracy omówiono wyniki badań mających na celu wyznaczenie wartości współczynników statycznego i kinetycznego tarcia zewnętrznego pary ciernej stal-mieszanki komunalnych osadów ściekowych, współczynnika tarcia wewnętrznego oraz charakterystyk zagęszczania. Badania na obiektach rzeczywistych prowadzono, mając na uwadze możliwość spalania tego odpadu w piecach rusztowych lub cementowych. Wyniki pomiarów posłużyły do opracowania założeń do projektów pras walcowych do scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych oraz koncepcji linii technologicznych. W pracy zamieszczono ponadto wyniki badań symulacyjnych, do których przeprowadzenia wykorzystano własne modele przepływu i obciążeń zasilacza ślimakowego, a także analizę SWOT pierścieni formujących.

BOGDAN KOSTURKIEWICZ

**The method of thickening system's setup of roll presses
used in the process of the agglomeration of the sewage sludge mixtures**

Summary

Utilisation of the sewage sludge poses a problem for the sustainable economy in both the municipal and the industrial sectors. Sewage sludge often has to be agglomerated first before it can be combusted. The agglomeration can take place after the sewage sludge had been mixed with other solid fuels which positively affect the energy density of the mixture. According to the literature review as well as own experience, the agglomeration process that takes place in the roll presses is the most economical one. In this monograph the results of the simulations as well as the real time research on the roll presses are thoroughly discussed. Numerous tests determining the parameters that must be taken into account during the agglomeration process also had to be conducted. The results of the research on determining the coefficients of the static and kinetic external frictions between steel mixtures of the municipal sewage sludge, the coefficient of the internal friction and densification characteristics are presented. The real time research was conducted on the sewage combusted in grate furnaces and cement kilns. The results of the measurements allowed for improving the setup of the roll presses used for the agglomeration of the municipal sewage sludge mixtures as well as conceptualisation of the processing lines. The results of the simulations of the own flow patterns and screw feeder's load as well as the SWOT analysis of the forming rings are also presented.

Wykaz ważniejszych oznaczeń

- α_0 – kąt chwytu,
 α_y – kąt zagęszczania materiału,
 β – kąt przepływu materiału drobnoziarnistego w zasilaczu ślimakowym,
 γ – kąt wyznaczający strefę rozprężania brykietów,
 γ_y – kąt rozprężania brykietów,
 δ – szerokość szczeliny między walcami,
 Φ – zbiór parametrów konstrukcyjnych, materiałowych i kinematycznych mających wpływ na przepływ materiału w zasilaczu ślimakowym,
 φ_m – średni kąt pochylenia linii śrubowej ślimaka,
 φ_w – kąt pochylenia linii śrubowej ślimaka mierzony na średnicy wewnętrznej,
 φ_z – kąt pochylenia linii śrubowej ślimaka mierzony na średnicy zewnętrznej,
 θ – kąt wyznaczający początek strefy podawania materiału,
 ϑ – jednostkowy opór zagęszczania,
 κ – kąt zbieżności ślimaka,
 μ – współczynnik kinetycznego tarcia zewnętrznego,
 ρ_b – gęstość brykietu,
 σ_1, σ_2 – naprężenia główne,
 σ_y – średnie naprężenie normalne,
 ξ – współczynnik tarcia wewnętrznego,
 B – szerokość pierścienia,
 d – średnia grubość brykietu przy szczelinie walcowej równej zero,
 D – średnica walców roboczych prasy walcowej,

- D_m – średnia średnica ślimaka,
 D_w – średnica wewnętrzna ślimaka,
 D_z – średnica zewnętrzna ślimaka,
 e – szerokość szczeliny między walcami w układzie zastępczym zagęszczania,
 h_y – odległość między walcami na poziomie kąta α_y ,
 i – liczba ślimaków,
 i_b – liczba wgłębień formujących,
 m – współczynnik bocznego nacisku,
 $n_{\text{śl}}$ – prędkość obrotowa ślimaka,
 n_w – prędkość obrotowa prasy walcowej,
 p_k – wartość nacisku wywieranego przez zagęszczany materiał drobnoziarnisty na ostatni zwój ślimaka,
 p_p – nacisk wywierany przez zagęszczany materiał na pierwszy zwój ślimaka,
 P_y – nacisk jednostkowy w dowolnej fazie procesu zagęszczania,
 P_{α_0} – nacisk jednostkowy w ostatniej fazie procesu zagęszczania dla $\alpha = \alpha_{\text{max}}$,
 Q_m – wydajność masowa zasilacza ślimakowego,
 R – rzeczywisty promień walców,
 R_0 – promień walców w układzie zastępczym,
RLM – równoważna liczba mieszkańców,
 s_b – stopień zagęszczenia brykietu,
 S – skok ślimaka,
s.m. – sucha masa,
 t – temperatura materiału,
 t_y – jednostkowa siła tarcia,
 w – wilgotność materiału,
 v_w – prędkość obwodowa walców prasy,
 V_b – objętość brykietu,
 W_m – wydajność masowa prasy walcowej,
 z – długość wstępnie zagęszczanego pasma materiału drobnoziarnistego,
 Z_e – jednostkowe zapotrzebowanie na energię

Wstęp

Według ostatnich opublikowanych przez Główny Urząd Statystyczny danych w Polsce w roku 2015 wytworzono 142 mln ton odpadów, z czego 131 mln ton w sektorze przemysłowym i 11 mln ton w sektorze komunalnym [124]. Jednocześnie prawie 1,7 mld ton odpadów znajdowało się na składowiskach [124]. W wielu przypadkach racjonalne wykorzystanie drobnoziarnistych odpadów wymaga ich zagęszczenia i nadania im trwałej formy kawałkowej [7]. Proces scalania może się odbywać w prasach walcowych, ślimakowych, stemplowych lub pierścieniowych. Wydaje się, że obecnie najbardziej odpowiednią metodą zbrylania sypkich materiałów odpadowych jest brykietowanie w prasach walcowych. Decydują o tym ich zalety, mianowicie: zwartość konstrukcji, ciągły charakter pracy, możliwość uzyskania dużej wydajności, mniejsze zapotrzebowanie na energię oraz dłuższa żywotność elementów formujących w porównaniu z brykietarkami stemplowymi.

W trakcie procesu zagęszczania odpadowych materiałów drobnoziarnistych występują różnego rodzaju oddziaływania fizyczno-chemiczne [17, 18, 43, 128]:

- siły przyciągania między cząstkami ciał stałych (van der Waalsa, elektostatyczne),
- powierzchniowe, na granicy rozdziału fazy stałej i ciekłej,
- adhezyjne, powstające w warstwie adsorpcyjnej,
- spójności, przejawiające się w tworzeniu mostków, występujące przy zateżaniu lepiszcza.

Problematyka modelowania procesów technologicznych opartych na zagęszczaniu ośrodków ziarnistych jest od wielu lat przedmiotem zainteresowania pracowników Katedry Systemów Wytwarzania w Akademii Górniczo-Hutniczej [2, 17, 18, 20, 47, 67, 76–78, 80, 81, 85]. Samodzielnie lub we współpracy z ośrodkami naukowymi w Polsce (Politechnika Białostocka, Politechnika Lubelska, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy) i z zagranicy (The United States Department of Energy, European Institute of Innovation & Technology) realizowane są programy badawcze mające na celu opracowanie metody doboru urządzeń technologicznych służących do

scalania odpadów powstających w sektorze komunalnym i przemysłowym [24, 49, 52, 54, 57, 58, 60, 63, 65, 82, 91, 99, 100], materiałów dla przemysłu energetycznego [31, 61, 62, 64, 79, 83, 86–89, 92, 93, 96, 101, 103–107], spożywczego [90] czy rolnictwa [95, 97].

Metody służące opracowaniu założeń do modernizacji lub konstrukcji pras walcowych mają charakter ogólny [47, 48] i nie uwzględniają indywidualnych cech materiałowych zagęszczanych ośrodków sypkich. Dostępne modele matematyczne procesu zagęszczania materiałów drobnoziarnistych można zaliczyć do teoretyczno-empirycznych lub empirycznych [13–15, 17, 18, 47, 48]. Ich autorzy próbowali zastosować w praktyce wiedzę zdobytą podczas identyfikacji procesu walcowania ośrodków ciągłych. Na uwagę zasługują tutaj trzy prace: W. Pietscha [127, 128], J. Johansona [71] i M. Hryniewicza [47, 48]. Autor pierwszej z nich w swoim modelu pasmowym uwagę skupił na występowaniu kąta neutralnego. Według W. Pietscha w punkcie, w którym wartość nacisku jednostkowego występującego na powierzchni walca jest największa, następuje zmiana zwrotu sił tarcia. Z kolei model J. Johansona dotyczył walcowania ośrodków sypkich i nie uwzględniał specyficznych cech procesu brykietowania. Krytycznej oceny obu modeli dokonał M. Hryniewicz [47, 48, 50]. Na podstawie badań własnych wykazał, że podczas brykietowania materiałów w prasach walcowych nacisk jednostkowy we wgłębieniach formujących osiąga najwyższą wartość w momencie maksymalnego zbliżenia walców. Wprowadzając w strefie zagęszczania tzw. układ zastępczy, w którym objętość wgłębień formujących zastąpiono objętością wypraski w kształcie pasma, powiązał ze sobą procesy brykietowania i walcowania materiałów drobnoziarnistych. Równocześnie odwołał się do doświadczeń R. Thompsona w zakresie modelowania procesu zagęszczania w matrycy zamkniętej [141]. W swoim modelu M. Hryniewicz dążył do uwzględnienia w większym stopniu własności zagęszczanego materiału. Osiągnął to dzięki wprowadzeniu do modelu wielkości, którą nazwał jednostkowym oporem zagęszczania. Zdefiniował ją jako „zmienną zależną od stopnia zagęszczania oraz wilgotności brykietowanego materiału, która stanowi wartość ciśnienia prasowania niezbędną dla uzyskania określonego stopnia zagęszczania materiału, poddanego zbrylaniu w cylindrycznej matrycy zamkniętej, przy zachowaniu porównywalnych objętości brykietów oraz stosunku ich wysokości do wymiaru poprzecznego” [49]. Korzystanie z tej metody wymagało wykonania szeregu badań podstawowych polegających na wyznaczeniu wartości kąta tarcia wewnętrznego lub efektywnego kąta tarcia wewnętrznego, statycznego i kinetycznego współczynnika tarcia zewnętrznego czy jednostkowego oporu zagęszczania.

Spory problem stanowiło zawsze scalanie ośrodków określanych jako „trudne do zagęszczania”, które cechują się ograniczoną płynnością powodującą „zawieszanie się” wsadu w strefie zasypu, co skutkuje niemożnością opróżnienia zbiornika. Brykietowanie tego typu materiałów w prasach walcowych wyposażonych w zasilacz grawitacyjny

jest praktycznie niemożliwe. Próby rozwiązania tego problemu przez wprowadzenie zasilania wymuszonego były przedmiotem zainteresowania wielu ośrodków badawczych [14, 17, 18, 20, 21, 25, 39, 40, 127, 128].

Pierwsze próby modelowania przepływu materiału drobnoziarnistego w prasach walcowych wyposażonych w zasilacz ślimakowy zapoczątkowane zostały przez J. Johansona [71]. Opierały się na doświadczeniach W.H. Darnella oraz E.A.J. Mola [11] w zakresie modelowania przepływu ośrodków kohezyjnych o stałej gęstości. W przypadku drobnoziarnistych materiałów zagęszczanych przyjmowanie tego typu założeń upraszczających prowadziło do dużej rozbieżności pomiędzy wynikami obliczeń teoretycznych oraz wykonywanych eksperymentów. Inną strategię w zakresie pozyskiwania informacji służących określaniu założeń projektowych do konstrukcji zasilaczy ślimakowych przyjęły firmy zajmujące się produkcją pras walcowych. I tak w firmie K.R. Komarek Briquetting Research Inc. zbudowano symulator układu zasilania pras walcowych [13]. Głównym celem prowadzonych na nim badań było opracowanie formuł empirycznych opisujących wpływ geometrycznych cech konstrukcyjnych zasilacza ślimakowego na wartość dobieranych parametrów pras walcowych. Również inne firmy zajmujące się problematyką zagęszczania ośrodków sypkich, takie jak Bepex, KHD Humbolt-Wedag, Sahut Conreur & Cie czy też Köppern, nie opracowały – jak wynika z dostępnych publikacji – skutecznej metody doboru geometrycznych i kinematycznych cech konstrukcyjnych zasilaczy ślimakowych. Opracowanie własnego modelu przepływu materiałów drobnoziarnistych w zasilaczu ślimakowym [75, 81, 85] jest jednym z elementów doboru konfiguracji układu zagęszczania pras walcowych do scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych.

W niniejszej pracy przedstawiono metodę doboru pras walcowych do scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych bazującą przede wszystkim na wynikach badań własnych autora. Efektem końcowym rozważań są koncepcje linii technologicznych do brykietowania i granulacji dwustopniowej tego odpadu. W pracy przedstawiono ponadto projekty i modele 3D pras walcowych do scalania komunalnych osadów ściekowych, do których założenia opracowano na podstawie wyników badań własnych. Rozważania poparto wynikami badań symulacyjnych, do których przeprowadzenia wykorzystano własne modele przepływu i obciążeń podzespołu zasilającego prasę walcową.

1. Eksploracja problematyki zagospodarowania osadów ściekowych

Zgodnie z obowiązującym prawem [133] komunalne osady ściekowe mogą być utylizowane i wykorzystane w rolnictwie do uprawy roślin, w gospodarce środowiskowej do rekultywacji terenów oraz w celu dostosowania gruntów do określonych potrzeb wynikających z planów gospodarki odpadami, planów zagospodarowania przestrzennego lub decyzji o warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu.

Otrzymywany w komunalnych oczyszczalniach ścieków osad cechuje się dużą zawartością wody. Mając na uwadze fakt, że sprawność suszarni zazwyczaj nie przekracza 65%, szczególną wagę należy przyłożyć do wstępnego odwodnienia osadów ściekowych. Można je przeprowadzić metodą biologiczną lub mechaniczną. Proces odwadniania osadów metodą biologiczną przebiega przy zastosowaniu złóż trzciniowych lub wierzby z gatunku *Salix viminalis* (systemy hydrofitowe) [135]. Rośliny te mają zdolność pochłaniania związków azotu i fosforu oraz akumulacji metali ciężkich. Cechuje je ponadto szybki przyrost i związana z tym intensywna wymiana jonowa pomiędzy korzeniami a podłożem z komunalnych osadów ściekowych. Sam proces odwadniania biologicznego przebiega ok. 300 razy szybciej niż w przypadku odwadniania grawitacyjnego. Wadą tej metody jest konieczność zapewnienia dużej powierzchni gruntu do składowania osadów ściekowych oraz długi czas oczekiwania na ich odwodnienie.

W tabeli 1.1 przedstawiono skuteczność stosowania określonych metod odwadniania.

Tabela. 1.1

Skuteczność stosowania metod odwadniania [26, 135]

Metoda odwadniania		Zawartość s.m. osadów ściekowych, %
Biologiczne	<i>Salix viminalis</i>	10–20
	złóża trzciniowe	30–40
Mechaniczne	prasy ślimakowo-taśmowe	12–18
	wirówki	20
	prasy rotacyjne	20
	prasy taśmowe	23–36
	prasy ciśnieniowe	30–37

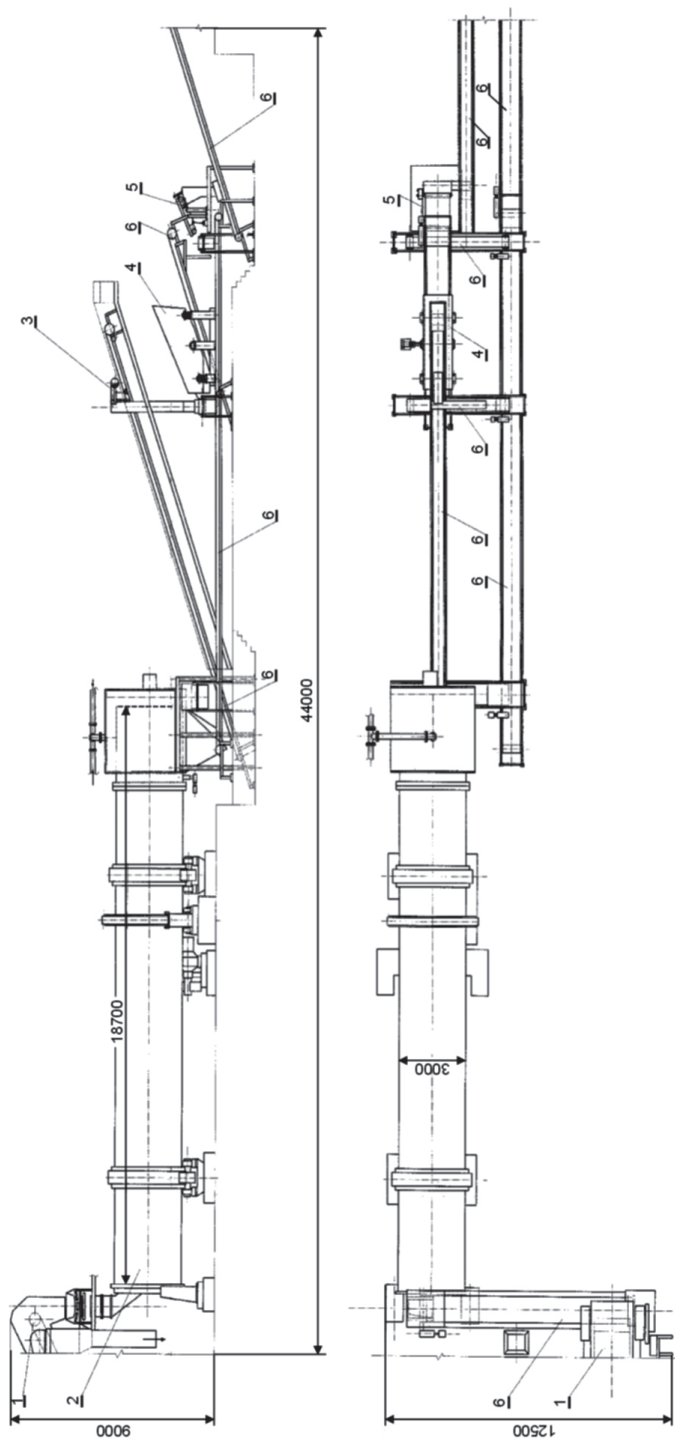
Rozwiązaniem alternatywnym w stosunku do biologicznych metod odwadniania osadów ściekowych są metody mechaniczne. W ich przypadku proces realizowany jest w wirówkach, filtracyjnych prasach taśmowych, rotacyjnych lub ślimakowo-taśmowych czy też prasach ciśnieniowych. Pozwalają one na szybkie odwodnienie osadu ściekowego do zawartości masy suchej w wysokości 15–38%.

Pod koniec XX wieku w Polsce opracowywano technologie umożliwiające poddawanie częściowo odwodnionych osadów ściekowych kompostowaniu z udziałem organicznych odpadów komunalnych (np. system Caspari – brykietowanie, KNEER, HERHOF – system statyczny, DANO – system dynamiczny i inne). W Katedrze Urządzeń Technologicznych i Ochrony Środowiska AGH (poprzednik organizacyjny Katedry Systemów Wytwarzania) podjęto nawet prace zmierzające do zastosowania tej technologii w praktyce [26]. Przykład schematu linii technologicznej do kompostowania odpadów powstających w sektorze komunalnym metodą DANO, opracowany przez autora monografii, przedstawiono na rysunku 1.1.

Ze względu na niewielkie zainteresowanie wdrożeniem systemu DANO na terenie kraju postanowiono, że dalsze badania dotyczące opracowania metody zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych będą kontynuowane dwukierunkowo. Pierwszy kierunek obejmował ocenę możliwości ich granulowania, kompaktowania bądź brykietowania pod kątem późniejszej utylizacji odpadu w rolnictwie jako substytutu nawozu. Drugi kierunek zmierzał do opracowania najkorzystniejszej, z ekonomicznego punktu widzenia, technologii aglomeracji tego odpadu mając na względzie jego późniejsze wykorzystanie jako paliwa. W związku z tym szczególną uwagę zwrócono na minimalizację zapotrzebowania na energię cieplną dla potrzeb odwodnienia osadów ściekowych, jego odpowiednią higienizację i biostabilizację oraz ograniczenie emisji szkodliwych związków np. SO_x .

Termiczne zagospodarowanie komunalnych osadów ściekowych wpisuje się w działania zmierzające do rozwiązania problematyki związanej z zagospodarowaniem odpadów i produkcją energii. Spalanie lub współspalanie takich odpadów niejednokrotnie wymusza konieczność ich scalenia. Stąd w Katedrze Systemów Wytwarzania AGH podjęto prace zmierzające do opracowania technologii umożliwiającej realizację tego procesu. Mając na uwadze możliwości aplikacji uzyskanych wyników badań w warunkach przemysłowych, dokonano analizy prawodawstwa unijnego i krajowego.

Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych [27] definiuje ją jako energię z odnawialnych źródeł niekopalnych, a mianowicie energię wiatru, energię promieniowania słonecznego, energię aerotermalną, geotermalną i hydrotermalną, energię oceanów, hydroenergię oraz energię pozyskiwaną z biomasy, gazu pochodzącego z wysypisk śmieci, oczyszczalni ścieków i ze źródeł biologicznych (biogaz).



Rys. 1.1. Schemat linii technologicznej do kompostowania odpadów komunalnych metodą DANO [26]: 1 – przenośnik czotowo-płytkowy, 2 – biostabilizator, 3 – separator elektromagnetyczny, 4 – przesiewacz wibracyjny, 5 – separator przedmiotów twardych, 6 – zespół przenośników taśmowych

Zobowiązanie Wspólnoty Europejskiej do rozwoju produkcji energii ze źródeł odnawialnych na jej terytorium, potwierdzone na posiedzeniu Rady Europejskiej w marcu 2007 roku, postawiło przed Polską nowe zadania w tym zakresie. Zgodnie z załącznikiem nr 1 do dyrektywy [27] docelowy udział energii ze źródeł odnawialnych w końcowym bilansie energetycznym w naszym kraju w roku 2020 (S_{2020}) musi wzrosnąć do co najmniej 15%. Ten obowiązkowy krajowy cel ogólny jest zgodny z obowiązującym celem wyznaczonym przez Radę Europejską w marcu 2007 roku, zakładającym 20-procentowy udział energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zapotrzebowaniu na energię brutto we Wspólnocie w 2020 roku [9].

Biomasa stanowi jedno z najbardziej dostępnych odnawialnych źródeł energii (OZE) w Polsce. W dyrektywie [27] określono biomasę jako ulegającą biodegradacji część produktów, odpadów lub pozostałości pochodzenia biologicznego z rolnictwa (łącznie z substancjami roślinnymi i zwierzęcymi), leśnictwa i związanych z nimi działów przemysłu, w tym rybołówstwa i akwakultury, a także ulegającą biodegradacji część odpadów przemysłowych i miejskich. W krajowym źródle prawa, tj. w ustawie o biopaliwach i biokomponentach ciekłych [144], biomasa została zdefiniowana jako stałe lub ciekłe substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, które ulegają biodegradacji, pochodzące z produktów, odpadów i pozostałości z produkcji rolnej i leśnej oraz przemysłu przetwarzającego ich produkty, a także części pozostałych odpadów, które ulegają biodegradacji, a w szczególności surowce rolnicze. Komunalne osady ściekowe mieszczą się zatem w zbiorze odnawialnych źródeł energii zdefiniowanych w źródłach prawa krajowego i Unii Europejskiej. Należy również zaznaczyć, że zgodnie z dyrektywą Rady z dnia 21 maja 1991 roku dotyczącą oczyszczania ścieków komunalnych (91/271/EWG) [30] powinno się wspierać powtórne wykorzystanie osadów powstających w oczyszczalniach ścieków. Implementacji tej dyrektywy dokonano zgodnie z traktatem akcesyjnym do 31 grudnia 2015 roku, a obecnie istnieje konieczność jej egzekucji. Pasywność w realizacji jej postanowień grozi złożeniem skargi przez Komisję Europejską do Europejskiego Trybunału Sprawiedliwości (ETS), a następnie nałożeniem na państwo członkowskie kar finansowych.

W związku z dostosowywaniem polskiego prawa do prawa Unii Europejskiej w ostatnim okresie większość aktów prawnych została gruntownie zmieniona. Dyrektywa Rady 1999/31/WE w sprawie składowania odpadów [29] opisuje wymagania techniczno-eksploatacyjne dotyczące odpadów i składowisk ziemnych. Według niej zabrania się składowania odpadów płynnych oraz w zdecydowany sposób ogranicza składowanie substancji organicznych. Dotychczas w Polsce ponad 70% komunalnych osadów ściekowych było unieszkodliwianych przez deponowanie ich na składowisku odpadów. Zgodnie z ww. dyrektywą ewentualne korzystanie w Polsce z dotychczasowej formy składowania odpadów płynnych wymaga zastosowania takiej technologii, która pozwoliłaby na zmniejszenie zawartości substancji organicznych w osadach. Głównym problemem, jeśli chodzi o zagospodarowanie osadów ściekowych, jest bardzo mała

zawartość suchej masy odpadu w ściekach, a termiczne metody wymagają osuszania, stabilizacji i odwadniania oraz przygotowania materiału do procesu spalania. Dlatego przed procesem suszenia komunalne osady ściekowe poddawane są zagęszczeniu w sposób naturalny lub mechaniczny.

Koszty procesów przeróbki komunalnych osadów ściekowych stanowią często ponad 30% kosztów eksploatacji całej oczyszczalni ścieków. Według *Krajowego planu gospodarki odpadami 2022* (KPGO) [143] na terenie Polski powstanie w 2020 roku ok. 740 tys. Mg suchej masy komunalnych osadów ściekowych. Istotną barierą w ich zagospodarowaniu jest wysoki stopień uwodnienia, dochodzący nawet do 80%.

Przystąpienie Polski do Unii Europejskiej pociągnęło za sobą szereg istotnych zmian w mechanizmach zarządzania odpadami. Artykuł 14 dyrektywy [30] zobowiązuje państwa członkowskie Unii do ponownego wykorzystania osadów w każdym przypadku, gdy jest to właściwe. Przeznaczanie w ostatnich latach, pochodzących głównie ze źródeł unijnych, znaczących środków finansowych na realizację zadań związanych z ochroną środowiska spowodowało, że zagospodarowanie powstających na terenie oczyszczalni ścieków osadów staje się poważnym problemem dla spółek i zakładów gminnych. Zmiany dotknęły również sektor energii odnawialnej. Wprowadzono rozwiązania sprzyjające kreowaniu konkurencyjności i wymuszające poprawę efektywności ekonomicznej [144]. Pomimo rosnącego znaczenia proekologicznych metod postępowania z komunalnymi osadami ściekowymi w Polsce zdecydowana większość tego odpadu jest w dalszym ciągu deponowana na składowiskach. Aby przeciwdziałać temu zjawisku, podejmuje się działania administracyjne, które wymuszają będą rezygnację z tej metody postępowania. Głównym instrumentem działań administracyjnych propagujących inne metody zagospodarowania tego odpadu jest stałe podnoszenie stawek opłat za ten sposób korzystania ze środowiska. Istotne ponadto jest to, że opłata za składowanie komunalnych osadów ściekowych uzależniona jest od uwodnienia osadu (im wyższe jego uwodnienie, tym wyższa opłata) (tab. 1.1).

Opłatę za składowanie na składowisku odpadów zawierających wodę oblicza się, mnożąc całkowitą masę odpadu zawierającego wodę przez jednostkową stawkę obliczoną według wzoru [134]:

$$Q = (100 - W)0,01 n q \quad (1.1)$$

gdzie:

Q – jednostkowa stawka opłaty za umieszczenie na składowisku odpadu zawierającego wodę, zł/Mg,

W – zawartość wody w odpadzie, %,

n – współczynnik, którego wartość zależy od zawartości wody w odpadzie, wartość współczynnika n w zależności od zawartości wody w odpadzie podano w tabeli 1.2, –,

q – jednostkowa stawka opłaty, zł/Mg (tab. 1.3).

Tabela 1.2

Wartość współczynnika n do obliczenia stawki podwyższonej za składowanie odpadów zawierających wodę [134]

Procentowa zawartość wody w odpadzie W	Współczynnik n
<50	1,0
$50 \leq W \leq 60$	1,0
$60 \leq W \leq 70$	1,1
$70 \leq W \leq 75$	1,2
$75 \leq W \leq 80$	1,4
$80 \leq W \leq 84$	1,6
$84 \leq W \leq 88$	1,8
$88 \leq W \leq 92$	2,0
$92 \leq W \leq 95$	2,4
> 95	2,4

Tabela 1.3

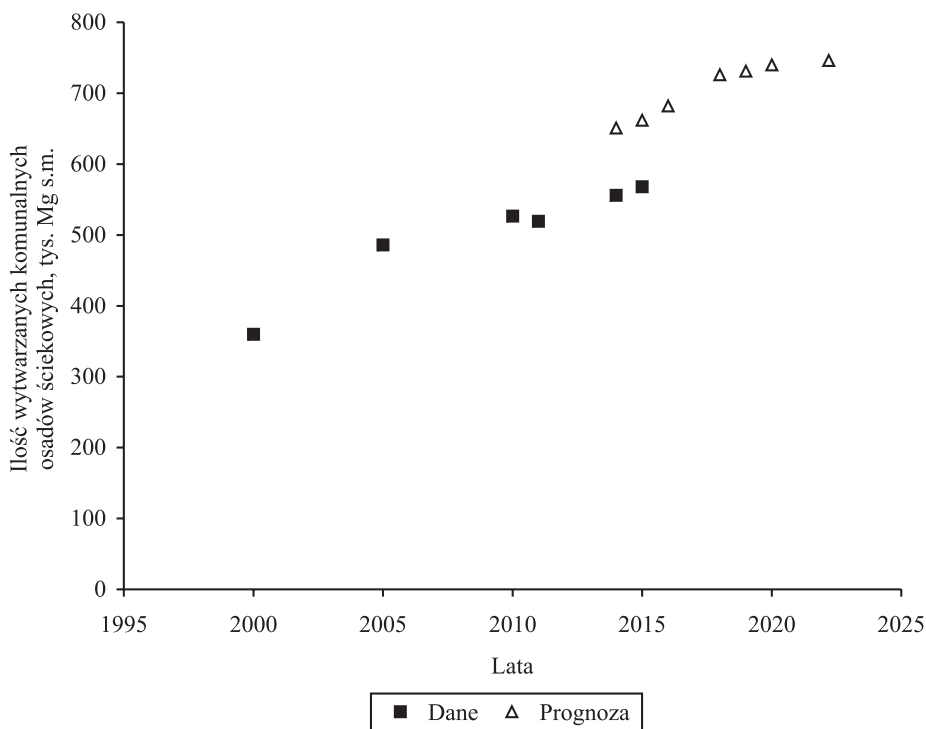
Jednostkowe stawki opłat za umieszczenie odpadów na składowisku [134]

Jednostkowa stawka opłaty, zł/Mg	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
	16,16	16,58	17,29	17,93	18,09	18,09	18,09	26,00	29,00	35,00

Zauważyć należy, że wartość jednostkowej stawki opłat za umieszczenie odpadów na składowisku wzrosła od 2011 do 2020 roku ponad dwukrotnie. Ponadto od 1 stycznia 2016 roku wszedł w życie przepis rozporządzenia w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku danego typu [132], który ogranicza możliwości deponowania odpadów cechujących się ciepłem spalania o wartości powyżej 6 MJ/kg s.m. Przepisy tego rozporządzenia wdrażają postanowienia decyzji Rady Unii Europejskiej nr 2003/33/WE z dnia 19 grudnia 2002 roku ustanawiającej kryteria i procedury przyjęcia odpadów na składowiskach, wydanej na podstawie dyrektywy Rady z dnia 26 kwietnia 1999 roku w sprawie składowania odpadów (1999/31/WE) [29].

Powyższe ograniczenia narzucają konieczność stosowania nowych metod zagospodarowania tego odpadu, tym bardziej że ze względu na zainwestowanie w budowę nowych oczyszczalni ścieków i wzrost poziomu życia mieszkańców Polski ilość wytwarzanych komunalnych osadów ściekowych jest coraz większa.

Na rysunku 1.2 przedstawiono rzeczywistą i prognozowaną ilość wytwarzanych w Polsce komunalnych osadów ściekowych [131, 142].



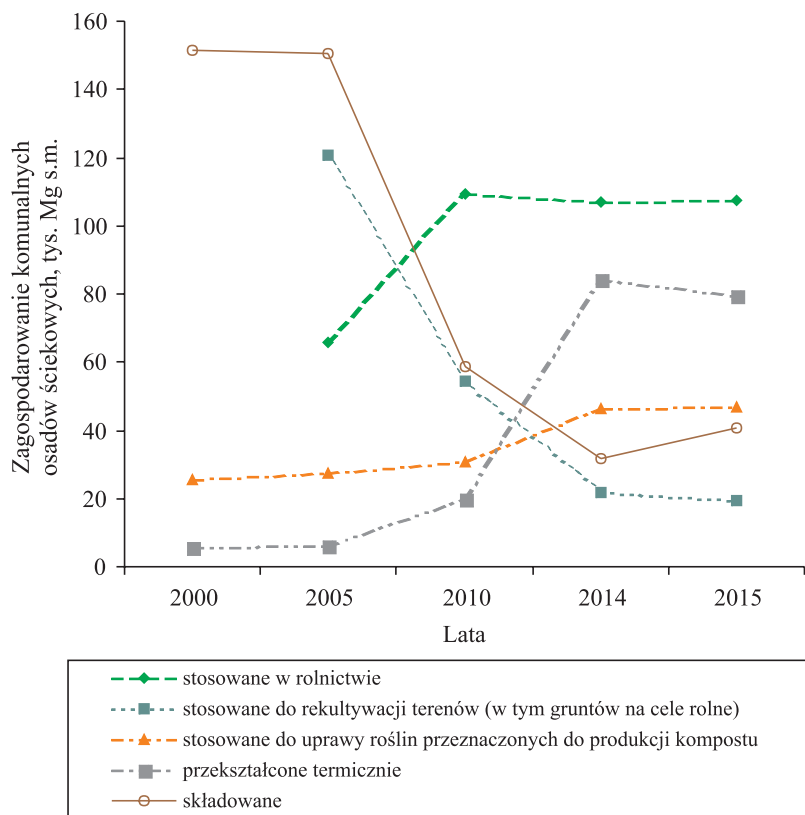
Rys. 1.2. Rzeczywista i prognozowana ilość wytwarzanych w Polsce w kolejnych latach komunalnych osadów ściekowych [131, 142]

Prognozy dotyczące ilości powstających na terenie Polski osadów ściekowych, przedstawione na rysunku 1.2, wskazują na dalsze finansowanie zadań z zakresu oczyszczania ścieków komunalnych w perspektywie unijnej 2014–2020. Nie ulega zatem wątpliwości, że problem zagospodarowania tego odpadu będzie coraz bardziej uciążliwy, mimo że ilość osadów komunalnych wytworzonych w latach 2014–2015 okazała się mniejsza o ok. 17% od ilości prognozowanej. Zwiększenie ilości powstających na terenie Polski komunalnych osadów ściekowych do 746 tys. Mg s.m. w roku 2022 wymusza konieczność poszukiwania nowych metod przygotowania tego odpadu do utylizacji. Na rysunku 1.3, na podstawie dostępnych danych, przedstawiono dotychczasowy sposób zagospodarowania w Polsce.

Zgodnie z *Krajowym planem gospodarki odpadami 2022* [143] podstawowe cele do osiągnięcia w gospodarce komunalnymi osadami ściekowymi wynikają z wymogów ochrony środowiska.

Są nimi:

- zwiększenie stopnia kontroli obrotu komunalnymi osadami ściekowymi celem zapewnienia maksymalnego bezpieczeństwa zdrowotnego i środowiskowego,
- zwiększenie stopnia przetworzenia komunalnych osadów ściekowych,
- maksymalizacja stopnia wykorzystania substancji biogenych zawartych w osadach przy jednoczesnym spełnieniu wszystkich wymogów dotyczących bezpieczeństwa sanitarnego i chemicznego.



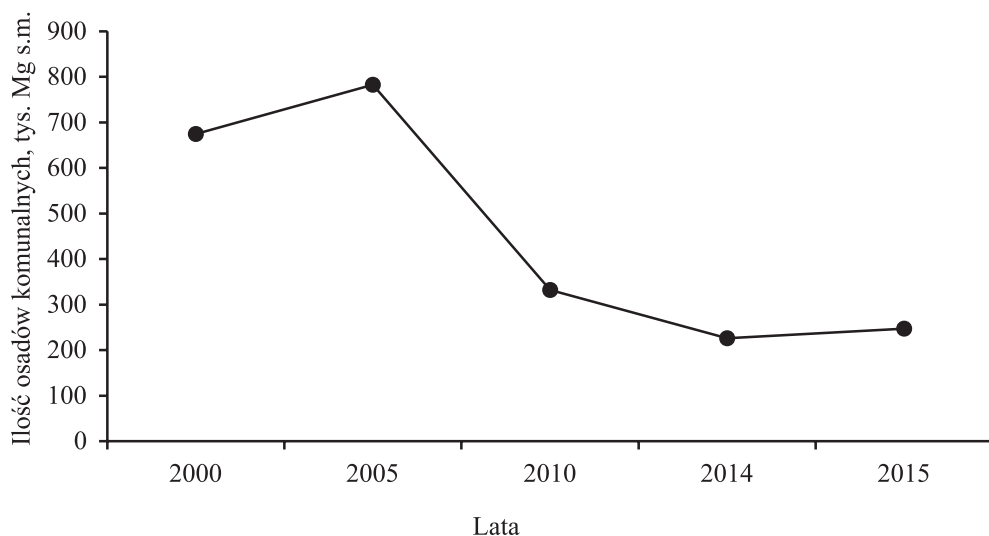
Rys. 1.3. Zagospodarowanie komunalnych osadów ściekowych w Polsce [124]

Komunalne osady ściekowe są obecnie stosowane do rekultywacji terenów oraz w rolnictwie, w tym do uprawy roślin. Część z nich jest przekształcana termicznie, a reszta składowana. Ten ostatni sposób jest najmniej pożądaną metodą zagospodarowania osadów ściekowych [137]. Według ostatnich danych GUS-u z 2016 roku [124] w 2015 roku składowanych było 40,5 tys. Mg s.m. (7,13% całkowitej masy osadów wytworzonych w komunalnych oczyszczalniach ścieków na terenie Polski). Mimo że

w stosunku do poprzednich kilku lat odnotowano znaczący postęp w zakresie proekologicznego zagospodarowania tych odpadów, to problemu ich składowania w dalszym ciągu nie wolno bagatelizować. Ten wyżej wymieniony sposób postępowania z osadami ściekowymi jest bowiem znaczącym źródłem emisji metanu, jednego z najgroźniejszych gazów cieplarnianych.

Jeżeli odpady nie mogą być wykorzystane jako surowce wtórne, należy dążyć do odzysku zawartej w nich energii. Konieczne jest zatem zwiększanie udziału termicznych metod zagospodarowania osadów ściekowych. Ten sposób jest najczęściej wskazywany w literaturze europejskiej i światowej [1, 35, 36, 72, 108, 117, 121, 122, 125, 126, 148, 149]. Został on również uwzględniony w opracowywanych na szczeblu rządowym krajowych planach i programach dotyczących ochrony środowiska i energii odnawialnej [110, 111]. W 2015 roku w Polsce zagospodarowano tą metodą 79,3 tys. Mg s.m. komunalnych osadów ściekowych.

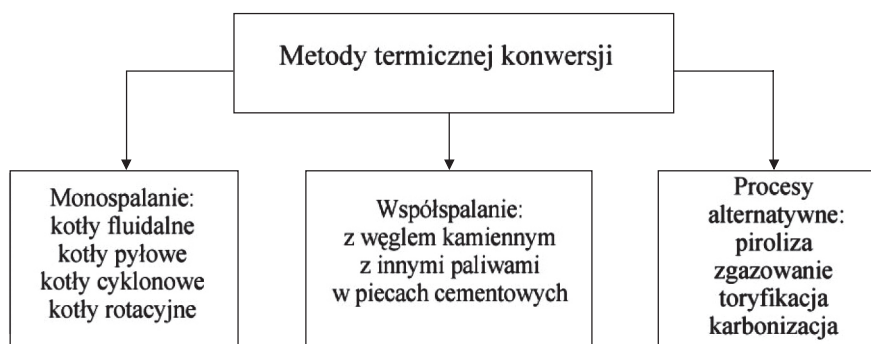
Należy zaznaczyć, że składowanie nieprzetworzonych komunalnych osadów ściekowych, które jest w dalszym ciągu najbardziej popularną metodą ich zagospodarowania, od 1 stycznia 2016 roku jest niedopuszczalne z uwagi na niespełnienie wymagań określonych w załączniku do rozporządzenia Ministra Gospodarki z 8 stycznia 2013 roku w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów danego typu [132]. Na terenie oczyszczalni nagromadzona jest w dalszym ciągu znaczna ilość osadów komunalnych. Na rysunku 1.4 przedstawiono ich ilość na koniec każdego roku w latach 2000, 2005, 2010, 2014 i 2015.



Rys. 1.4. Osady komunalne nagromadzone na terenie oczyszczalni (stan na koniec roku) [124]

Według prognoz Ministerstwa Gospodarki przedstawionych w 2010 roku w *Krajowym planie działania w zakresie energii ze źródeł odnawialnych* docelowo w 2020 roku będzie się termicznie przekształcać ponad 400 tys. Mg s.m., czyli około 57% komunalnych osadów ściekowych.

Przydatność komunalnych osadów ściekowych do termicznego przekształcania jest determinowana przez ich właściwości fizyczne i chemiczne. W zależności od technologii ich pozyskiwania w oczyszczalniach ścieków i etapu procedury przeróbki różna jest kaloryczność tego odpadu. Stąd stosowanych jest wiele metod termicznej konwersji komunalnych osadów ściekowych, które przedstawiono na rysunku 1.5.



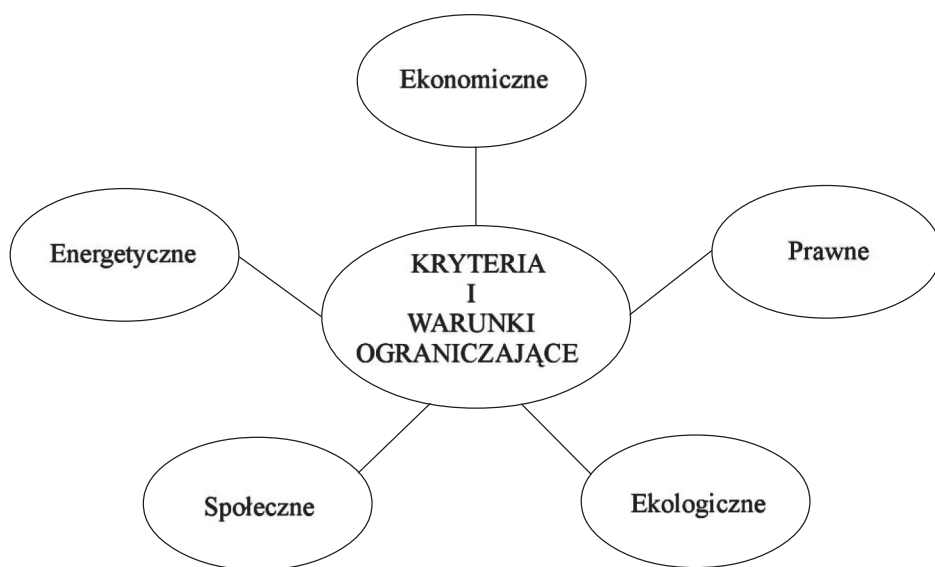
Rys. 1.5. Sposoby termicznej konwersji komunalnych osadów ściekowych [116]

Spalanie lub współspalanie komunalnych osadów ściekowych powstających w oczyszczalniach ścieków obsługujących aglomeracje do 100 tys. RLM wiąże się z koniecznością zwiększenia ich kaloryczności, czyli ilości ciepła, jaką można uzyskać ze spalania jednostki masy tego odpadu. Również względy logistyczne przemawiają za jak największym zagęszczeniem komunalnych osadów ściekowych. Realizacja założeń określonych w *Krajowym planie działania w zakresie energii ze źródeł odnawialnych*, dotyczących termicznego przekształcania tego odpadu (57%), narzuca konieczność opracowania nowych technologii jego przygotowania do utylizacji w kotłach rotacyjnych i piecach cementowych [82, 87, 105, 119]. Rozważania na ten temat poprzedzono analizą kryteriów i ograniczeń występujących przy stosowaniu tego typu metod zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych.

Graficzny model kryteriów i ograniczeń w termicznym zagospodarowaniu komunalnych osadów ściekowych przedstawiono na rysunku 1.6.

Podstawowym ograniczeniem ekonomicznym, z jakim mamy do czynienia przy projektowaniu termicznego zagospodarowania osadów ściekowych, jest konieczność poniesienia wysokich nakładów inwestycyjnych oraz eksploatacyjnych związanych z funkcjonowaniem obiektu termicznego przekształcania odpadu. Ponadto przyjmuje

się, że największa ilość osadów utylizowanych w instalacjach termicznych będzie powstawać w oczyszczalniach ścieków obsługujących aglomeracje liczące powyżej 100 tys. RLM [124]. W 2015 roku wytwarzanych tam było ok. 58% ogólnej ilości tych odpadów [111]. W przypadku tych aglomeracji budowa instalacji scalania osadów ściekowych jest bezzasadna. Osady ściekowe po mechanicznym odwodnieniu w wirówkach, prasach taśmowych lub prasach filtracyjnych mogą być spalane np. w piecu ze złożem fluidalnym. Prawne ograniczenia wynikają z konieczności zaplanowania budowy zakładu termicznej utylizacji osadu w miejscowych planach zagospodarowania przestrzennego gmin będących źródłem prawa miejscowego oraz uzyskania szeregu pozwoleń np. decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach dla przedsięwzięcia mogącego znacząco oddziaływać na środowisko.



Rys. 1.6. Graficzny model kryteriów i ograniczeń w termicznym zagospodarowaniu komunalnych osadów ściekowych

Ekologiczne ograniczenia wynikają z konieczności zapewnienia właściwego procesu spalania (ograniczenie emisji chloropochodnych i NO_x) oraz zagospodarowania pozostałego po spalaniu popiołu. Istotnym problemem jest również wydzielanie do atmosfery podczas termicznej konwersji znacznej ilości związków SO_x .

Społeczne ograniczenia wynikają z konieczności zasięgnięcia opinii zainteresowanych mieszkańców oraz pozarządowych organizacji ekologicznych na każdym etapie projektowania budowy zakładu termicznej utylizacji komunalnych osadów ściekowych. Konsultacje społeczne w rozumieniu dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady

z 16 kwietnia 2014 roku (2014/52/UE) zmieniającej dyrektywę 2011/52/UE w sprawie oceny wpływu wywieranego przez niektóre przedsięwzięcia publiczne i prywatne na środowisko [28] polegają na umożliwieniu zainteresowanej społeczności składania swoich uwag i wniosków dotyczących projektu, a następnie uwzględnieniu ich w postępowaniu w sprawie wydania decyzji. Wydłuża to termin uzyskania ostatecznej decyzji, a w ekstremalnych przypadkach wręcz uniemożliwia jej realizację.

Energetyczne kryteria wynikają z konieczności zapewnienia wysokiej wartości opałowej poddawanego termicznej obróbce osadu [120]. Do procesu spalania na złożu fluidalnym powinien być podawany osad odwodniony w takim stopniu, aby zapewnić autotermiczne prowadzenie procesu. Według KPGO [142] minimalna wartość opałowa odpadów zapewniająca autotermiczne spalanie na ruszcie wynosi 5800 kJ/kg. Zawartość wilgoci, podobnie jak zawartość popiołu i substancji organicznej, decyduje o właściwościach paliwowych komunalnych osadów ściekowych. Przy dokonywaniu oceny autotermicznego spalania można posłużyć się również trójkątem Tannera [116]. Wynika z niego, że granicznymi wartościami dla autotermicznego spalania są: zawartość substancji palnej większa niż 25%, zawartość substancji mineralnych mniejsza niż 60% oraz zawartość wilgoci mniejsza niż 50%.

2. Sformułowanie problemu badawczego

Spalanie lub współspalanie komunalnych osadów ściekowych w kotłach rotacyjnych lub piecach cementowych wiąże się z koniecznością nadania temu odpadowi postaci kawałkowej w celu umożliwienia dopływu odpowiedniej ilości tlenu. W Katedrze Systemów Wytwarzania AGH od wielu lat prowadzone są badania, których celem jest opracowanie założeń do projektów linii technologicznych stosowanych w inżynierii procesowej i ochronie środowiska. Istotnym ich elementem są urządzenia do scalania drobnoziarnistych materiałów nazywane brykietarkami. Do brykietowania ośrodków sypkich stosuje się prasy stemplowe, ślimakowe, pierścieniowe i walcowe [17, 18, 44]. Z powodów technicznych i ekonomicznych w nowoczesnych liniach technologicznych stosuje się przeważnie prasy walcowe.

Brak wiedzy na temat podatności komunalnych osadów ściekowych na scalanie w prasie walcowej wymusił konieczność przeprowadzenia szeregu badań o charakterze poznawczym.

Obejmowały one:

- opis modelu kryteriów i ograniczeń występujących przy termicznym zagospodarowaniu komunalnych osadów ściekowych;
- analizę właściwości wytypowanego do badań odpadu;
- określenie metodyki badań scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych w prasach walcowych;
- analizę wyników badań scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych w laboratoryjnej prasie walcowej;
- dobór konfiguracji układu zagęszczania prasy walcowej;
- określenie obciążeń wybranych elementów roboczych prasy walcowej;
- określenie obciążeń elementu roboczego zasilacza ślimakowego;
- określenie procedury doboru przemysłowych pras walcowych do scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych;

- opracowanie koncepcji linii technologicznych oraz modeli pras walcowych do zagospodarowania mieszanek komunalnych osadów ściekowych;
- analizę SWOT pierścieni formujących do brykietowania mieszanek komunalnych osadów ściekowych;
- ocenę możliwości zastosowania zaprojektowanych pras walcowych do scalania wybranych materiałów drobnoziarnistych.

Sposób rozwiązania wymienionych problemów został opisany w poszczególnych rozdziałach pracy.

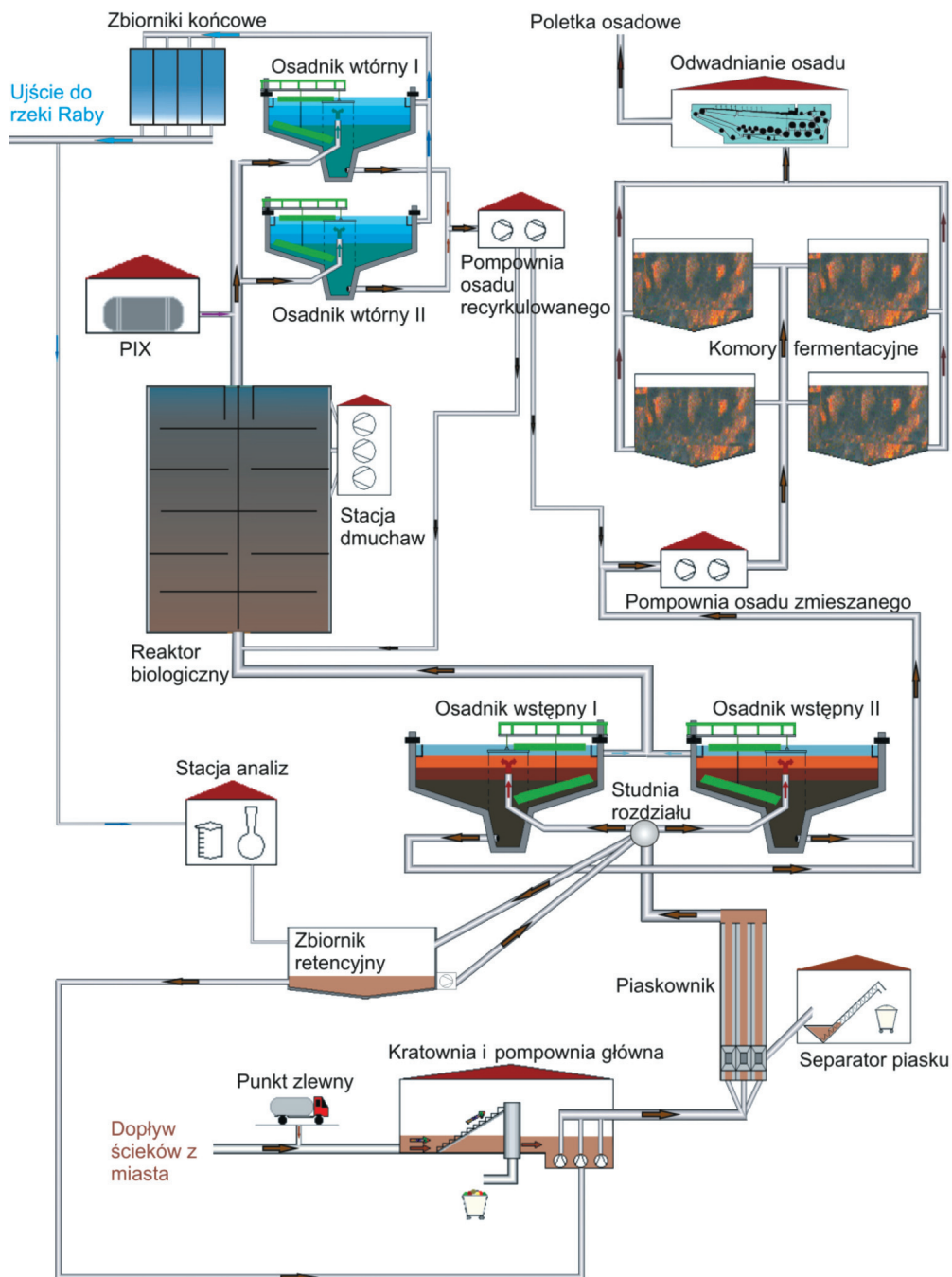
3. Ocena możliwości termicznej konwersji komunalnych osadów ściekowych

3.1. Problematyka wyboru materiału do badań

Do podstawowych problemów stojących obecnie przed Europą możemy zaliczyć zagospodarowanie odpadów i produkcję energii. Istnieją obszary wiedzy, które są wspólne dla obu wymienionych dziedzin. Niejednokrotnie ich powiązanie ze sobą daje efekt synergii. Spoiwem łączącym problematykę zagospodarowania odpadów i produkcji energii jest technologia.

O ile problem termicznego przekształcania komunalnych osadów ściekowych w spalarniach lub współspalarniach został praktycznie rozwiązany, o tyle zagospodarowanie tych odpadów w oczyszczalniach ścieków obsługujących aglomeracje do 100 tys. RLM, czyli obszary, na których z uwagi na opłacalność ekonomiczną nie buduje się spalarni, napotyka spore trudności. Są one spowodowane przede wszystkim wysoką wilgotnością tego odpadu po wstępnym zagęszczeniu, która utrudnia przewożenie go do spalarni, niską wartością opałową oraz nieodpowiednim dla dalszej przeróbki składem granulometrycznym. Tymczasem w 2015 roku w tych właśnie aglomeracjach powstawało około 42% osadów ściekowych wytwarzanych w Polsce [124].

Obligatoryjnym warunkiem zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych jest ich odpowiednie przygotowanie przez obróbkę biologiczną, chemiczną, termiczną lub inną eliminującą zagrożenie dla środowiska lub zdrowia ludzi [82]. Stąd do badań wybrano komunalne osady ściekowe pochodzące z Oczyszczalni Ścieków Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji sp. z o.o. w Bochni obsługującej ok. 49 tys. RLM. Oczyszczalnia ścieków w Bochni jest typową oczyszczalnią mechaniczno-biologiczną pracującą metodą konwencjonalnego osadu czynnego z procesem przeróbki osadów metodą fermentacji w otwartych komorach fermentacyjnych (rys. 3.1). Powstający w niej komunalny osad ściekowy można uznać za reprezentatywny dla innych oczyszczalni tego typu w kraju.



Rys. 3.1. Schemat Oczyszczalni Ścieków Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji sp. z o.o. w Bochni

Osad prefermentowany odwadniany jest mechanicznie, higienizowany wapnem, a następnie odbierany przez firmę zewnętrzną wyłonioną w drodze przetargu. Oczyszczalnia przyjmuje rocznie ponad 1,7 mln m³ ścieków komunalnych. Wydajność nominalna oczyszczalni wynosi 9100 m³/dobę, a wydajność maksymalna 16 000 m³/dobę. Rocznie wytwarzanych jest w niej blisko 700 Mg s.m. ustabilizowanych osadów ściekowych (kod 19 08 05). Poddano je ocenie pod kątem przydatności do termicznego przekształcania. W tym celu przeprowadzono badania podstawowych własności fizycznych i chemicznych.

3.2. Badania fizyczno-chemiczne komunalnych osadów ściekowych

Badania fizyczno-chemiczne komunalnych osadów ściekowych wykonano w współpracy z pracownikami Katedry Techniki Ciepłej i Ochrony Środowiska Wydziału Inżynierii Metali i Informatyki Akademii Górniczo-Hutniczej.

Komunalne osady z oczyszczania ścieków zawierają dużo substancji organicznych oraz różne ilości metali ciężkich i chorobotwórczych organizmów. Skład chemiczny osadów ściekowych wykazuje dużą różnorodność i zmienność powodowaną przez ich biochemiczne przemiany w czasie. W pierwszej kolejności określono ich skład elementarny i zawartości pierwiastków śladowych (tab. 3.1).

Tabela 3.1

Skład elementarny badanych osadów ściekowych po prasie odwadniającej

Oznaczenie	Jednostka	Wartość
Zawartość substancji organicznej	% s.m.	43,7
Azot	% s.m.	2,9
Fosfor	% s.m.	3,3
Wapń	% s.m.	2,4
Magnez	% s.m.	0,33
Ołów	mg/kg s.m.	75,6
Kadm	mg/kg s.m.	3,6
Rtęć	mg/kg s.m.	0,6
Nikiel	mg/ kg s.m.	22,8
Cynk	mg/kg s.m.	1183
Miedź	mg/kg s.m.	103
Chrom	mg/kg s.m.	36,1

Zawartość pierwiastków śladowych oraz skład popiołu oszacowano metodami powszechnie stosowanymi w chemii analitycznej z wykorzystaniem analizy instrumentalnej. Głównym składnikiem palnym w badanych komunalnych osadach ściekowych jest węgiel. Całkowita zawartość substancji organicznej (C, H, S) wynosi 43,7%. Porównanie tej wartości z danymi literaturowymi [32, 33, 113, 122] wskazuje, że badane osady zawierają stosunkowo dużą ilość węgla, wodoru i siarki, co sugeruje, że mogą być stosowane jako paliwo. Komunalne osady ściekowe zawierają oczywiście te składniki, które występują w ściekach, a więc metale śladowe. Wśród pierwiastków śladowych najwięcej jest cynku, a następnie miedzi i ołowiu. Należy podkreślić, że w badanych osadach ściekowych zawartość szkodliwych metali ciężkich (Pb, Cd, Hg) jest niska [32, 33, 122]. Pod względem zawartości substancji szkodliwych na jednostkę energii osady te charakteryzują się odpowiednimi właściwościami, które umożliwią ich termiczną utylizację w kotłowniach przemysłowych, ciepłowniach i elektrowniach. Następnie przeprowadzono próbę spalania, a wyniki analizy popiołu przedstawiono w tabeli 3.2.

Tabela 3.2

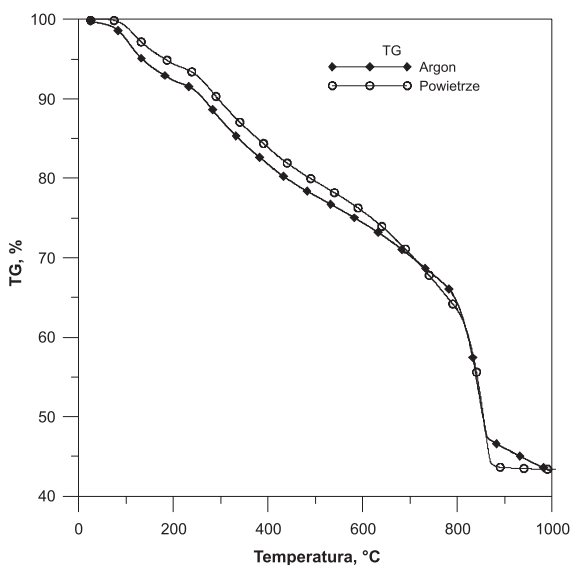
Skład chemiczny popiołu z badanych komunalnych osadów ściekowych

Składnik	Zawartość, %
SiO ₂	32,93
CaO	5,56
MgO	0,98
Fe ₂ O ₃	2,24
Cl ⁻ (chlorki)	2,32
Al ₂ O ₃	23,41
P ₂ O ₅	0,42
Na ₂ O	0,73
K ₂ O	1,75

Zawartość poszczególnych tlenków w popiele jest zróżnicowana pod względem ilościowym. Zawartość SiO₂ i Al₂O₃ jest największa, podczas gdy zawartość CaO, P₂O₅ i Fe₂O₃ jest zdecydowanie niższa. Metale alkaliczne oraz chlor i siarka uwalniane podczas procesu spalania mogą być przyczyną korozji wysokotemperaturowej będącej podstawowym problem eksploatacji kotłów na paliwa odnawialne. Biorąc pod uwagę zawartość agresywnych składników, stwierdzono, że komunalne osady ściekowe mogą wywoływać niewielkie zagrożenie korozyjne.

W celu uzyskania informacji na temat przebiegu procesu spalania przeprowadzono analizę termogravimetryczną. Jest ona jedną z metod instrumentalnych wykorzystywanych w analizie osadów ściekowych [8, 9, 12, 117, 118, 145, 149, 150]. Paliwa podczas ogrzewania ulegają różnym przemianom fizycznym i chemicznym. Ich zbadanie pozwala na ilościową i jakościową ocenę paliwa oraz dostarcza informacji o mechanizmie rozkładu termicznego [136, 138]. Analiza termogravimetryczna (TG) pozwala w szybki sposób wyznaczyć temperaturę początku i końca procesu spalania, jak również określić ilość popiołu. W trakcie wykonywania pomiaru temperaturowego ustala się zmiany masy próbki w zależności od temperatury i czasu. Termiczna analiza różnicowa (DTA) umożliwia natomiast pomiar efektów energetycznych towarzyszących przemianom zachodzącym w badanej substancji pod wpływem zmian temperatury (tzw. efektów egzotermicznych lub endotermicznych).

Badania termogravimetryczne (TG) wykonano przy użyciu termoanalyzera NETZSCH STA 449 F3 Jupiter. Badaną próbkę umieszczano w tyglach typu Alumina Al_2O_3 . Pomiar prowadzono w warunkach dynamicznych, ogrzewając próbkę od temperatury otoczenia do $1000^\circ C$ z szybkością grzania $10^\circ C/min$ w atmosferze powietrza oraz argonu. Szybkość objętościowa przepływu gazu reakcyjnego wynosiła 40 ml/min . Na podstawie przeprowadzonych badań sporządzono krzywe zmiany masy (krzywe TG) badanych próbek w zależności od temperatury dla danych warunków pomiarowych (szybkość grzania, atmosfera). Otrzymane krzywe TG pozwoliły na analizę procesu utleniania osadów ściekowych (rys. 3.2).

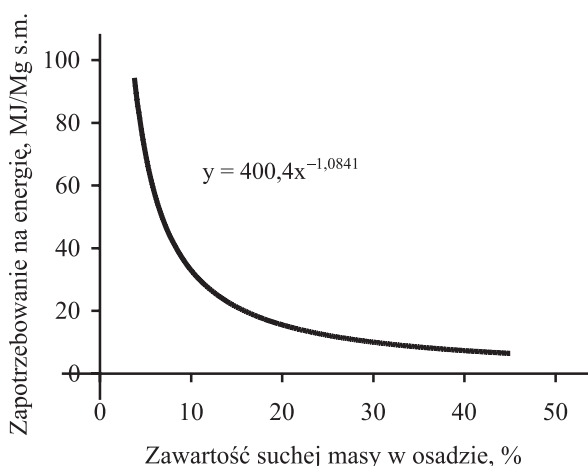


Rys. 3.2. Krzywe TG spalania badanych komunalnych osadów ściekowych w atmosferze powietrza i argonu

Ubytek masy przedstawia krzywa TG powstała podczas ogrzewania próbki komunalnych osadów ściekowych w atmosferze powietrza i w argonie. Można zauważyć, że rozkład termiczny uzyskany w obu atmosferach jest podobny. Proces spalania komunalnych osadów ściekowych można podzielić na trzy etapy: rozkład początkowy, główny i końcowy [116]. W pierwszym etapie (do 220°C) następuje ubytek masy związany z odparowaniem wilgoci. W drugim etapie (220–870°C) ubytek masy jest spowodowany rozkładem węglowodorów i białek. W temperaturze powyżej 870°C spalanie w atmosferze powietrza jest zakończone.

3.3. Analiza bilansu energetycznego

Energochłonność suszenia osadów zależy od ich wilgotności. Zależność zapotrzebowania na energię do suszenia osadów ściekowych od zawartości suchej masy w osadzie ściekowym przedstawiono na rysunku 3.3 [4].

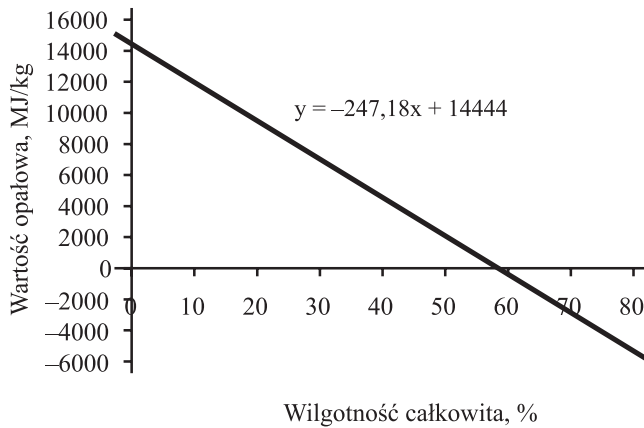


Rys. 3.3. Zapotrzebowanie na energię do suszenia osadów ściekowych [4]

Zawartość substancji organicznej w osadach ściekowych jest wskaźnikiem, który informuje o właściwościach paliwowych osadów i możliwości ich stosowania w procesach termicznych. Wartość opałowa zależna jest od rodzaju osadów ściekowych. W celu określenia bilansu energetycznego spalania osadów ściekowych wyznaczono, według normy PN-Z-15008-04:1993, zależność ich wartości opałowej od wilgotności całkowitej [105] (rys. 3.4).

Komunalne osady ściekowe o wilgotności całkowitej powyżej 58,44% nie mają wartości energetycznej. Konieczność odparowania wilgoci z osadów ściekowych i ujedno-

rozdnienia materiału oraz wydatkowania energii na scalenie osadów ściekowych powoduje, że bilans energetyczny procesu brykietowania tego odpadu o wilgotności powyżej 40% jest ujemny. Należy zauważyć, że w bilansie energetycznym, oprócz energii elektrycznej lub ciepłej potrzebnej do odparowania wilgoci, należy uwzględnić energię potrzebną do wykonania niezbędnych operacji jednostkowych (mieszania, brykietowania lub kompaktowania, kruszenia).



Rys. 3.4. Zależność wartości opałowej osadów ściekowych od ich wilgotności

Ilość energii elektrycznej lub ciepła wytworzonych z brykietów lub wyprasek otrzymanych z osadów ściekowych E_{OZE} można określić z wzoru:

$$E_{OZE} = \eta m_p W_{op} - E_z - E_t - 3,6 m_b Z_e, \text{ MJ} \quad (3.1)$$

gdzie:

- η – współczynnik efektywności procesu spalania, –
- m_p – masa komunalnych osadów ściekowych spalonych w jednostce wytwórczej, Mg,
- W_{op} – wartość opałowa komunalnych osadów ściekowych spalonych w jednostce wytwórczej, MJ/Mg,
- E_z – ilość energii potrzebnej do odparowania wilgoci z komunalnych osadów ściekowych, MJ,
- E_t – ilość energii potrzebnej do przygotowania mieszanki do brykietowania, MJ,
- m_b – masa materiału poddanego brykietowaniu, Mg,
- Z_e – jednostkowe zapotrzebowanie na energię elektryczną w czasie realizacji procesu brykietowania, kWh/Mg.

Jak wynika z analizy dostępnej literatury, dodawanie komunalnych osadów ściekowych do węgla kamiennego nie wpływa na zwiększenie emisji substancji szkodliwych, takich jak CO, NO_x i SO₂ podczas spalania tego paliwa [1, 4, 109, 123, 139, 146, 153].

W ostatnim czasie prowadzone są badania zmierzające do unowocześnienia technologii odzyskiwania fosforu z popiołów powstających po spaleniu komunalnych osadów ściekowych [16, 34, 112, 140, 151, 152]. Ze względu na dużą, sięgającą nawet 9%, zawartość tego pierwiastka popioły mogą stanowić alternatywne jego źródło. W chwili obecnej fosfor jest jednym z najbardziej poszukiwanych pierwiastków na świecie, a fosforyty znalazły się na unijnej liście dwudziestu krytycznych surowców [130]. Przewiduje się, że dostępne obecnie zasoby zostaną wyeksploatowane w ciągu najbliższych 125 lat [38, 151]. Warunkiem uzyskania wysokiego stopnia odzysku fosforu z popiołów jest odpowiednia temperatura spalania osadów ściekowych [152].

4. Scalanie komunalnych osadów ściekowych w prasie walcowej z zasilaniem grawitacyjnym

4.1. Opis uniwersalnej instalacji do badań procesu scalania materiałów drobnoziarnistych w prasie walcowej

Badania procesu scalania komunalnych osadów ściekowych wykonywano z wykorzystaniem instalacji doświadczalnej znajdującej się w laboratorium Katedry Systemów Wytwarzania AGH (rys. 4.1). W jej skład wchodzi następujące stanowiska:

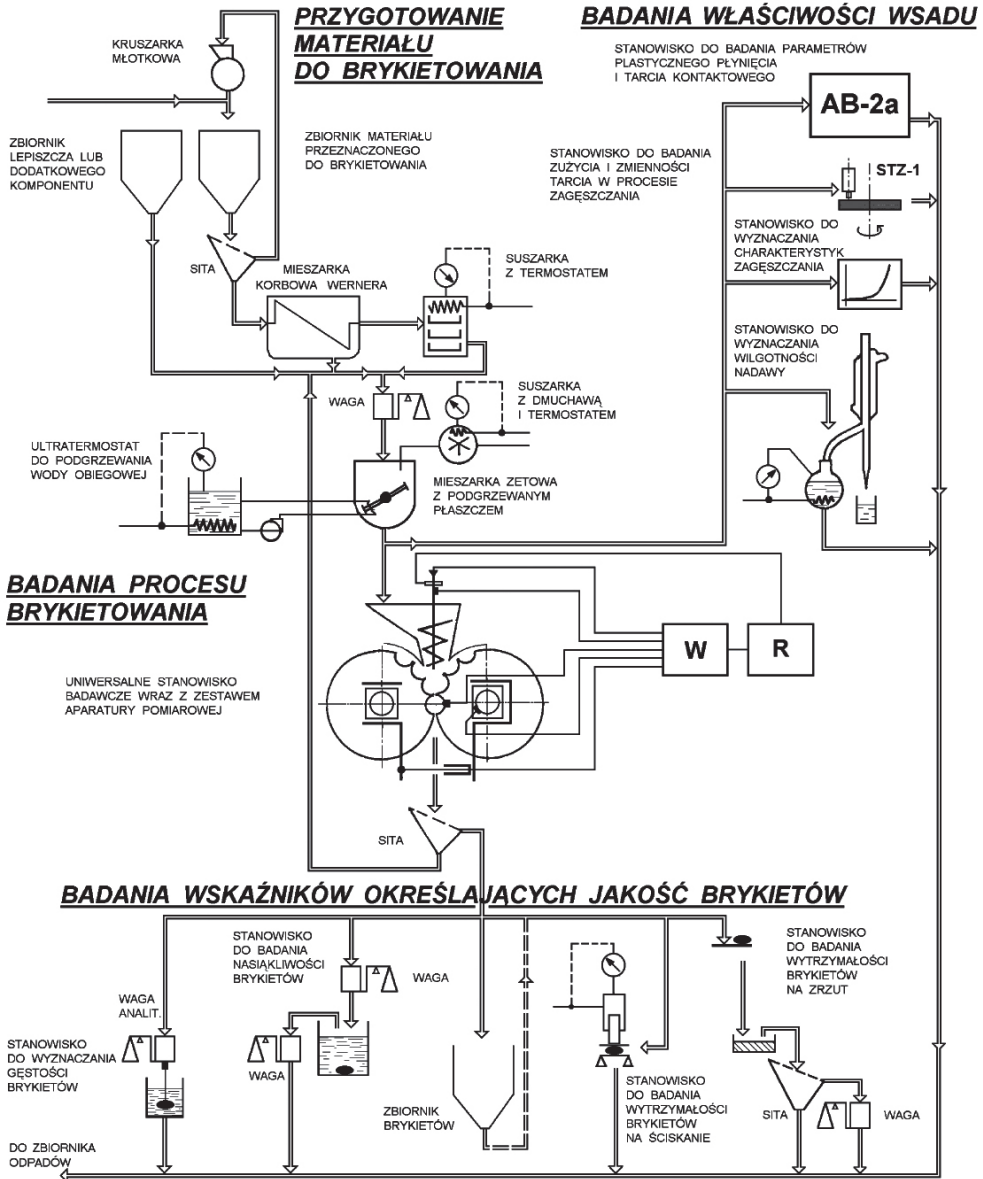
- przygotowania materiału do brykietowania,
- badania właściwości wsadu,
- badania procesu brykietowania,
- badania wskaźników określających jakość brykietów.

Badania procesu scalania prowadzono na uniwersalnym stanowisku wyposażonym w zestaw aparatury pomiarowej. W jego skład wchodzi następujące urządzenia i podzespoły:

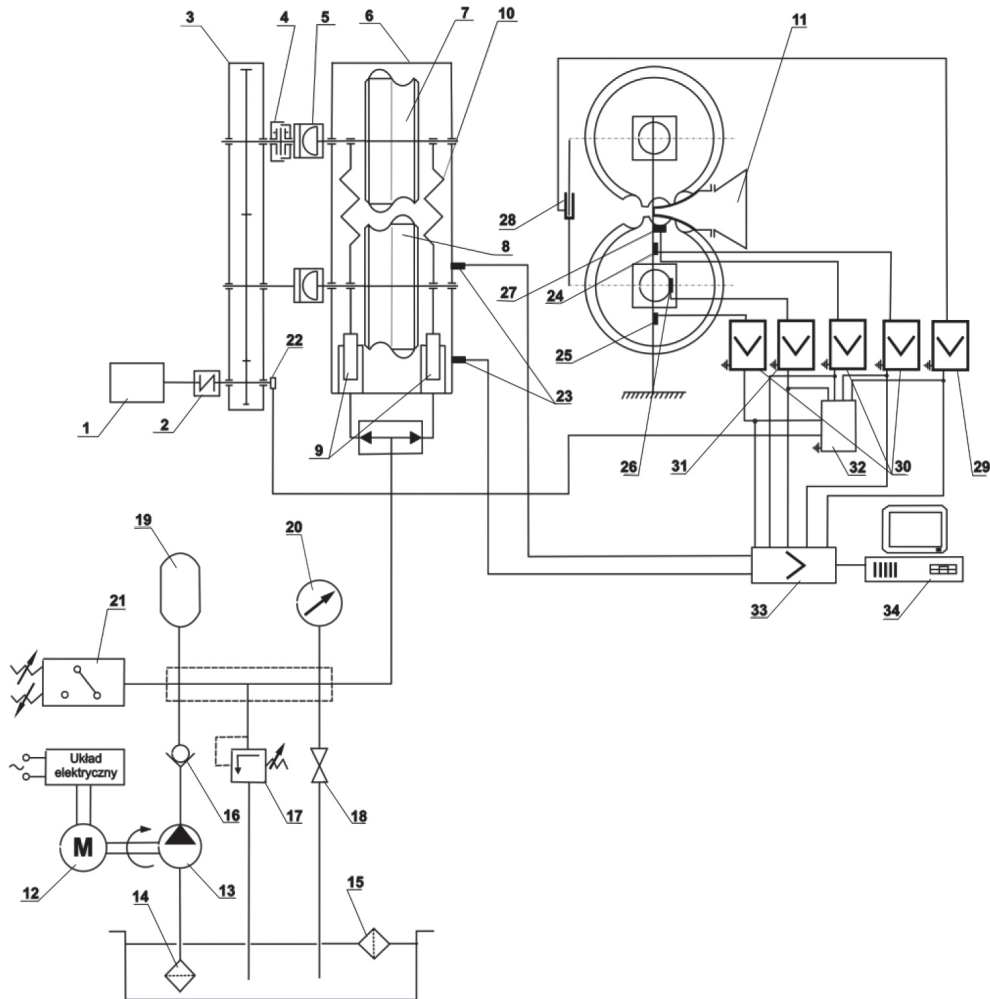
- laboratoryjna prasa walcowa LPW 450,
- zasilacze różnego typu (grawitacyjny swobodny, ślimakowy, zbieżnokanałowy itp.).

Schemat laboratoryjnej prasy walcowej LPW 450 wraz z układem pomiarowym przedstawiono na rysunku 4.2. Napęd główny prasy walcowej LPW 450 składał się z motoreduktora serii Drive 6000 typ CHHMS 30-6170-15/T F180MG/4 (silnik asynchroniczny o mocy $P_S = 22,0$ kW i prędkości obrotowej nominalnej $n_n = 1440$ obr/min (50 Hz), reduktor typ CYCLO o przełożeniu $i = 15$), którego czop połączony był za pośrednictwem sprzęgła podatnego z klatką wałców zębatach o całkowitym przełożeniu $i = 6,43$ służącą również do rozdzielania momentu obrotowego. Na czopach wałców klatki wałców zębatach znajdowały się sprzęgła Oldhama pozwalające na kompensację niewspółosiowości wałców. Dodatkowo na jednym z nich znajdowało się sprzęgło cierne umożliwiające, w razie potrzeby, odpowiednie ustawienie względem siebie wstępnie wałców formujących. Elektroniczny układ regulacji prędkości obrotowej silnika składał się z przemiennika częstotliwości FR 540 30K EC (Mitsubishi Electric) oraz filtru FFR-A540-95A-SF100. Układ ten, wraz z zastosowanym napędem głównym prasy, zapewniał płynną regulację wartości prędkości obwodowej wałców prasy v_w w zakresie 0–0,5 m/s.

Do akwizycji danych zastosowano system pomiarowy zrealizowany z wykorzystaniem karty pomiarowej DAQ-700 firmy National Instruments oraz przenośnego komputera klasy PC. Specjalistyczny program do rejestracji, przetwarzania i prezentacji danych pomiarowych powstał w środowisku labVIEW.

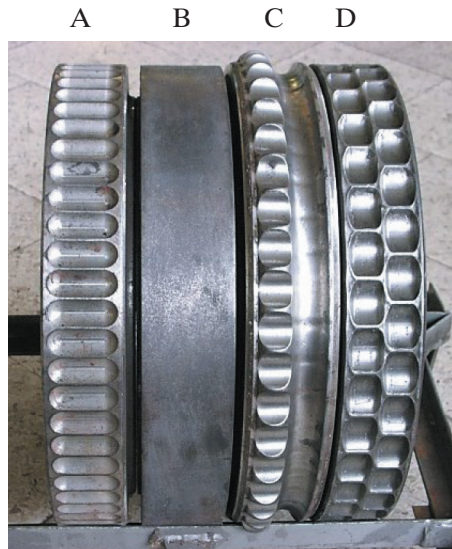


Rys. 4.1. Schemat instalacji doświadczalnej do badań procesu scalania materiałów droбноziarnistych w prasie walcowej



Rys. 4.2. Schemat laboratoryjnej prasy walcowej LPW 450 wraz z układem pomiarowym: 1 – motoreduktor, 2 – sprzęgło podatne, 3 – klatka walców zębatach, 4 – sprzęgło cierne, 5 – sprzęgło Oldhama, 6 – rama, 7 – wałek formujący nieprzesuwny, 8 – wałek formujący przesuwny, 9 – siłowniki nurnikowe, 10 – element sprężysty lub dystansowy, 11 – zasilacz grawitacyjny, 12 – silnik elektryczny, 13 – pompa, 14 – filtr ssawny, 15 – filtr wlewowy, 16 – zawór zwrotny, 17 – zawór przelewowy, 18 – zawór zamykający, 19 – akumulator gazowy, 20 – manometr, 21 – układ regulacji ciśnienia, 22 – tor pomiarowy prędkości obrotowej wału wejściowego klatki zębataj, 23 – czujniki drgań, 24 – tor pomiarowy siły obciążającej element dystansowy, 25 – tor pomiarowy siły docisku walca przesuwnego, 26 – tor pomiarowy momentu skręcającego na wale przesuwnego walca formującego, 27 – tor pomiarowy nacisku we wgłębieniu formującym, 28 – tor pomiarowy przemieszczenia walca przesuwnego, 29 – wzmacniacz pomiarowy PE102, 30 – wzmacniacz pomiarowy MGT-232, 31 – wzmacniacz pomiarowy KMN-602, 32 – rejestrator, 33 – karta pomiarowa DAQ-700 (National Instruments), 34 – komputer pomiarowy

Do scalania materiałów drobnoziarnistych w laboratorium Katedry Systemów Wytwarzania AGH stosuje się cztery rodzaje zestawów pierścieni formujących (rys. 4.3). Pierwszy zestaw pierścieni formujących zaprezentowany na tym rysunku (A) służy do wytwarzania ciągłego pasma materiału powiększonego o wypukłości w kształcie łódek. Stosuje się go np. w przypadku scalania drobnoziarnistych odpadów przemysłowych i nawozów sztucznych. Drugi zestaw (B) służy do kompaktowania materiałów drobnoziarnistych w celu uzyskania płaskich wyprasek. Ich wymiar uzależniony jest od szerokości pierścieni formujących i wielkości szczeliny między walcami. Bardzo często uzyskane wypraski poddaje się rozdrobnieniu w kruszarkach w celu uzyskania określonej frakcji granulometrycznej. Tego typu zestaw znajduje m.in. zastosowanie przy prowadzeniu granulacji dwustopniowej różnego rodzaju produktów przemysłu chemicznego. Trzeci zestaw (C) służy do wytwarzania brykietów bez płaszczyzny podziału w kształcie siodła. Jest on wykorzystywany przy scalaniu materiałów drobnoziarnistych wykazujących tendencję do tzw. ekspansji zwrotnej, np. węgla brunatnego [2, 53, 59, 94]. Stosowanie tego typu zestawu formującego skutkuje zwiększonym obciążeniem elementów roboczych prasy walcowej i większym, w stosunku do symetrycznego układu zagęszczania, zużyciem pierścieni [47, 59]. Ostatni z przedstawionych na rysunku zestaw formujący (D) umożliwia uzyskanie brykietów w kształcie kropli.



Rys. 4.3. Rodzaje pierścieni formujących stosowanych w laboratorium Katedry Systemów Wytwarzania AGH: A – do wytwarzania pasma z wypukłościami, B – do wytwarzania płaskiego pasma, C – do wytwarzania brykietów w kształcie siodła, D – do wytwarzania brykietów w kształcie kropli

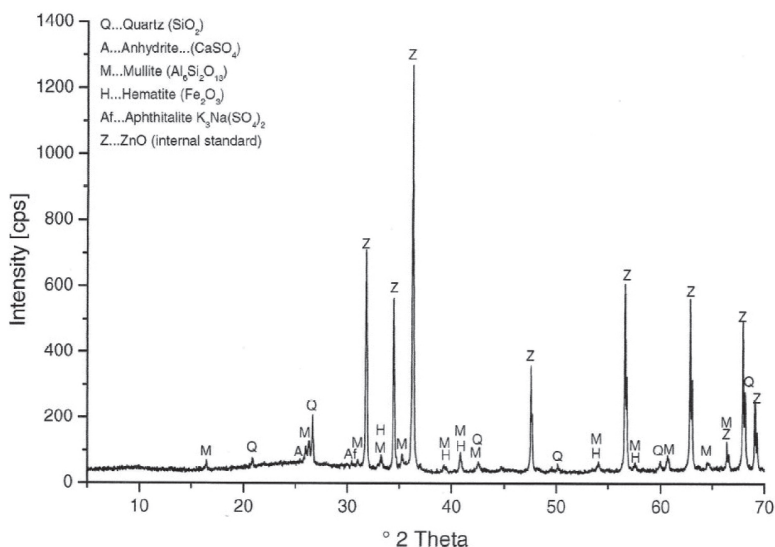
W trakcie badań stosowano zestawy pierścieni B i C.

4.2. Metodyka badań

Proces brykietowania komunalnych osadów ściekowych został poprzedzony ujednorodnieniem składu materiału pod względem fizyczno-chemicznym przez długotrwałe mieszanie w mieszarce zetowej z podgrzewanym płaszczem wodnym. Mając na względzie ograniczenie zapotrzebowania na energię cieplną do odwodnienia osadów ściekowych, odpowiednią higienizację i biostabilizację odpadu oraz skuteczność wiązania tlenków siarki w procesie spalania [46, 147], dodawano do scalanego materiału wapno palone w ilości 10% udziału masowego wsadu.

W przypadku wybranych prób do mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego dodawano miał węgla kamiennego w celu zwiększenia gęstości energetycznej powstałego w czasie procesu scalania paliwa. Jest ona bowiem niewystarczająca na potrzeby spalania odpadu w obrotowych piecach cementowych. Zdaniem technologów wartość opałowa paliwa, przy której zawarta w nim energia jest efektywnie wykorzystywana w procesie wypalania klinkieru, nie może być niższa niż 12 MJ/kg. Stąd np. polskie cementownie należące do koncernu Lafarge żądają, by minimalna średnia tygodniowa wartość opałowa osadów wynosiła 14 MJ/kg, a średnia dzienna 11,7 MJ/kg [3, 5].

W celu określenia wpływu badanego miału węglowego na popielenie i żużlowanie scalanego paliwa wykonano jego analizę dyfraktometryczną. Aglomeracja nieorganicznej części paliwa jest istotnym problemem w procesie spalania paliw składających się z biomasy [116]. Na rysunku 4.4 przedstawiono dyfraktogram rentgenowski próbki popiołu z węgla kamiennego użytego do przygotowania mieszanek. Badania przeprowadzono w Centrum Baustoffe und Materialprüfung MPA BAU Technische Universität München.



Rys. 4.4. Dyfraktogram rentgenowski próbki popiołu z węgla kamiennego użytego do przygotowania mieszanek

Skład procentowy udziałów masowych poszczególnych składników mieszanki komunalnych osadów ściekowych przedstawia tabela 4.1.

Tabela 4.1

Skład procentowy udziałów masowych poszczególnych składników w mieszankach komunalnych osadów ściekowych

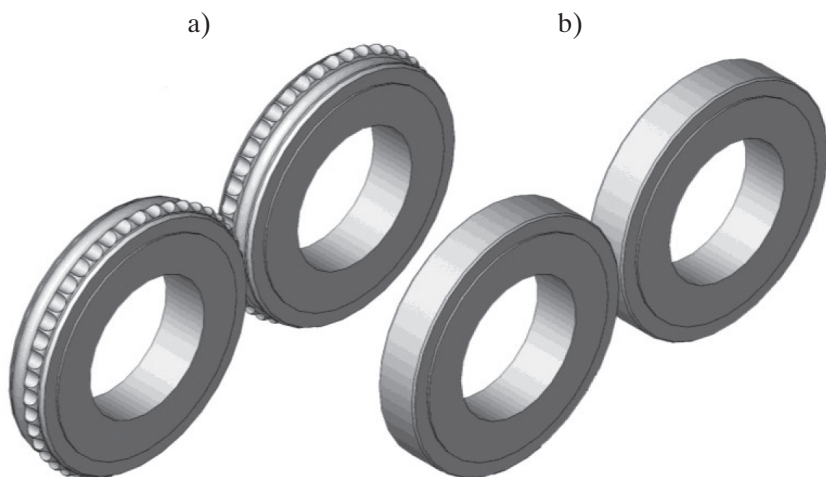
Symbol mieszanki	Komunalny osad ściekowy	Wapno odpadowe	Miał węglowy
	%	%	%
A	90,0	10,0	–
B	45,0	5,0	50,0
C	29,5	3,5	67,0

Czas mieszania ustalano na podstawie wyników badań zmiany poziomu wilgotności materiału. Jej oczekiwana wartość wynosiła ok. 23,5%. Badania wstępne procesu brykietowania mieszanek wykazywały, że przy wilgotności materiału wyższej niż 25% brykiety nie wypadały z wgłębień formujących. Obniżanie wilgotności scalanego materiału nie było zasadne ze względu na wysokie koszty suszenia.

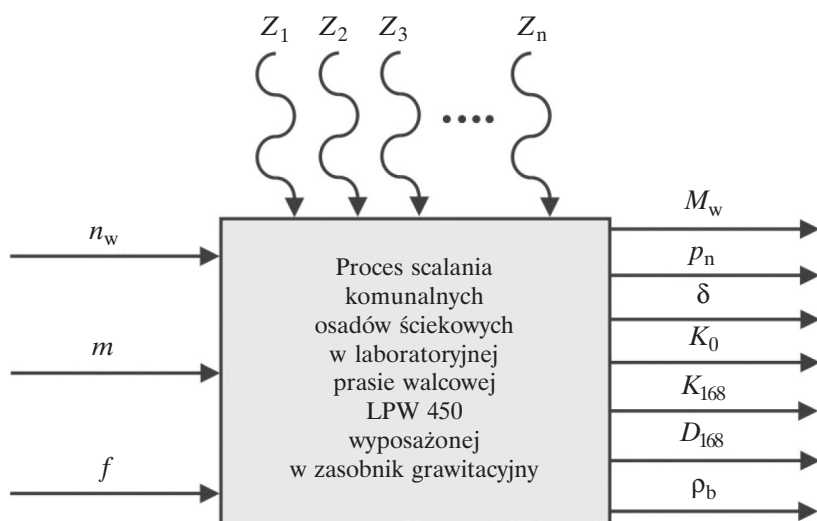
Tak przygotowane mieszanki podawano do zasypu grawitacyjnego umieszczonego nad strefą zagęszczania prasy walcowej LPW 450, którą wyposażono w pierścienie formujące przeznaczone do wytwarzania brykietów bez płaszczyzny podziału, tzn. w kształcie siodła lub walce gładkie. Z przeprowadzonych badań wynika, że podczas wytwarzania brykietów w kształcie siodła występuje bardziej równomierny rozkład nacisków jednostkowych na powierzchni wgłębienia formującego w porównaniu z przypadkiem wytwarzania brykietów w kształcie kropli. Wybranie pierścieni formujących o niesymetrycznym układzie zagęszczania (rys. 4.5), umożliwiających uzyskanie brykietów w kształcie siodła, miało na celu uzyskanie bardziej równomiernego rozkładu nacisku jednostkowego na powierzchni brykietu, w porównaniu z przypadkiem stosowania pierścieni umożliwiających uzyskanie brykietów w kształcie kropli.

Ilość materiału drobnoziarnistego dozowanego jednorazowo wynosiła 5–7 kg. Mieszankę scalano przy prędkościach obwodowych walców $v_w = 0,1\text{--}0,4$ m/s, co odpowiadało prędkości obrotowej $n_w = 4,24\text{--}16,99$ obr/min. Początkowa wartość szerokości szczeliny między walcami podczas brykietowania wynosiła $\delta_{\text{nom}} \sim 1,0$ mm. Przy próbach kompaktowania, czyli scalania między gładkimi walcami, początkowa wartość szerokości szczeliny między walcami wynosiła $\delta_{\text{nom}} \sim 5,0$ mm.

Schemat jakościowy modelu obiektu badań przedstawiono na rysunku 4.6.



Rys. 4.5. Modele pierścieni formujących zastosowanych podczas scalania komunalnych osadów ściekowych w laboratoryjnej prasie walcowej LPW 450: a) pierścienie o niesymetrycznym układzie zagęszczania umożliwiające otrzymanie brykietów w kształcie siodła; b) pierścienie umożliwiające otrzymanie wyprasek



Rys. 4.6. Schemat jakościowego modelu obiektu badań

Jako wielkości niezależne wytypowano:

- prędkość obrotową walców prasy n_w ,
- skład mieszanki m ,
- typ pierścieni formujących f .

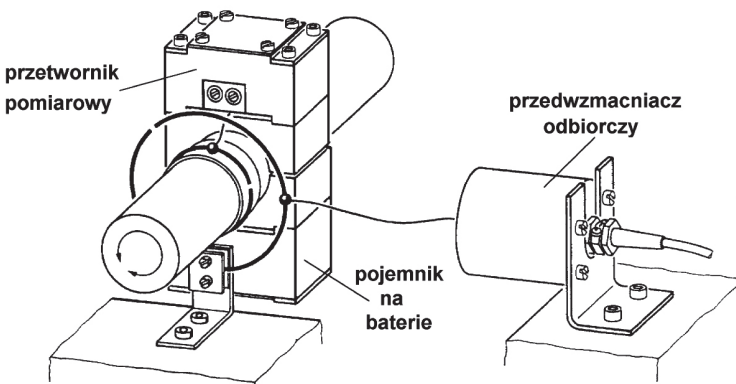
Wielkościami zależnymi były:

- moment na wale prasy walcowej M_w ,
- nacisk jednostkowy we wgłębieniu formującym pierścieni prasy walcowej p_n ,
- szerokość szczeliny między walcami δ ,
- wytrzymałość na zrzut mierzona bezpośrednio po próbie K_0 ,
- wytrzymałość na zrzut mierzona po 168 h K_{168} ,
- wytrzymałość na ściskanie mierzona po 168 h D_{168} ,
- gęstość brykietu ρ_b .

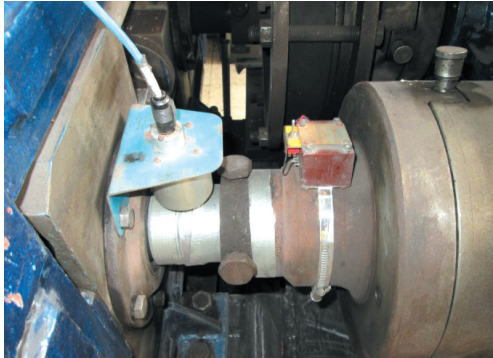
Wartość **momentu skręcającego na wale prasy walcowej** rejestrowano za pomocą toru pomiarowego, w którego skład wchodził zestaw telemetryczny MT 2555A, przedwzmacniacz EV 2510A oraz wzmacniacz pomiarowy KMN 602A firmy Hottinger Baldwin Messtechnik. Przy pomiarach stosowano tensometry foliowe firmy Hottinger Baldwin Messtechnik. Sygnał z tensometrów był transmitowany poprzez przetwornik pomiarowy i antenę do przedwzmacniacza odbiorczego, a następnie przesyłany za pomocą kabla do wzmacniacza pomiarowego i rejestrowany na twardym dysku przenośnego komputera klasy PC.

Wizualizację telemetrycznego toru pomiarowego do pomiaru momentu skręcającego na wale prasy zamieszczono na rysunku 4.7, a fotografię wału laboratoryjnej prasy walcowej LPW 450, na którym dokonywano pomiaru momentu skręcającego, na rysunku 4.8.

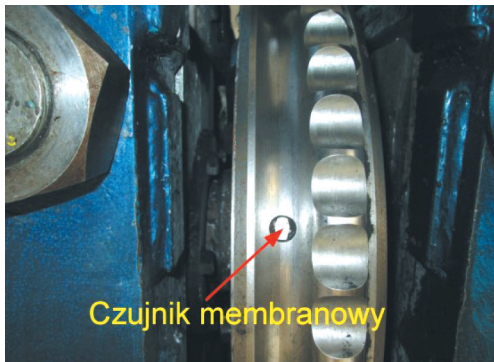
Nacisk jednostkowy wywierany przez zagęszczony osad ściekowy na dno wgłębienia formującego mierzono za pomocą membranowego czujnika tensometrycznego konstrukcji Katedry Systemów Wytwarzania (rys. 4.9) oraz wzmacniacza tensometrycznego MTG 232 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik. Sygnał z membranowego czujnika tensometrycznego przesyłany był kablem przez drażony wał do gniazda pomiarowego (rys. 4.10), a następnie po zamianie w przetworniku analogowo-cyfrowym rejestrowany na twardym dysku przenośnego komputera klasy PC.



Rys. 4.7. Wizualizacja telemetrycznego toru do pomiaru momentu skręcającego na wale prasy walcowej



Rys. 4.8. Fotografia wału laboratoryjnej prasy walcowej LPW 450, na którym mierzono moment skręcający



Rys. 4.9. Fotografia pierścienia formującego laboratoryjnej prasy walcowej LPW 450, w którym zamontowano czujnik membranowy do pomiaru nacisku jednostkowego we wgłębieniu formującym



Rys. 4.10. Widok klatki walców roboczych laboratoryjnej prasy walcowej LPW 450 z zaznaczonym gniazdem pomiarowym nacisku jednostkowego we wgłębieniu formującym pierścienia oraz indukcyjnym czujnikiem przemieszczeń

Szerokość szczeliny między walcami mierzono za pomocą toru pomiarowego, w którego skład wchodził indukcyjny czujnik przemieszczeń PTx20 (rys. 4.10) oraz przyrząd z falą nośną firmy Peltron.

Na rysunku 4.11. przedstawiono zdjęcie laboratoryjnej prasy walcowej LPW 450 wyposażonej w gładkie walce.



Rys. 4.11. Zdjęcie laboratoryjnej prasy walcowej LPW 450 wyposażonej w zasilacz grawitacyjny i gładkie walce

Z materiału dozowanego do prasy walcowej uzyskiwano brykiety o kształcie odpowiadającym kształtowi wgłębień formujących lub wypraski (rys. 4.12).



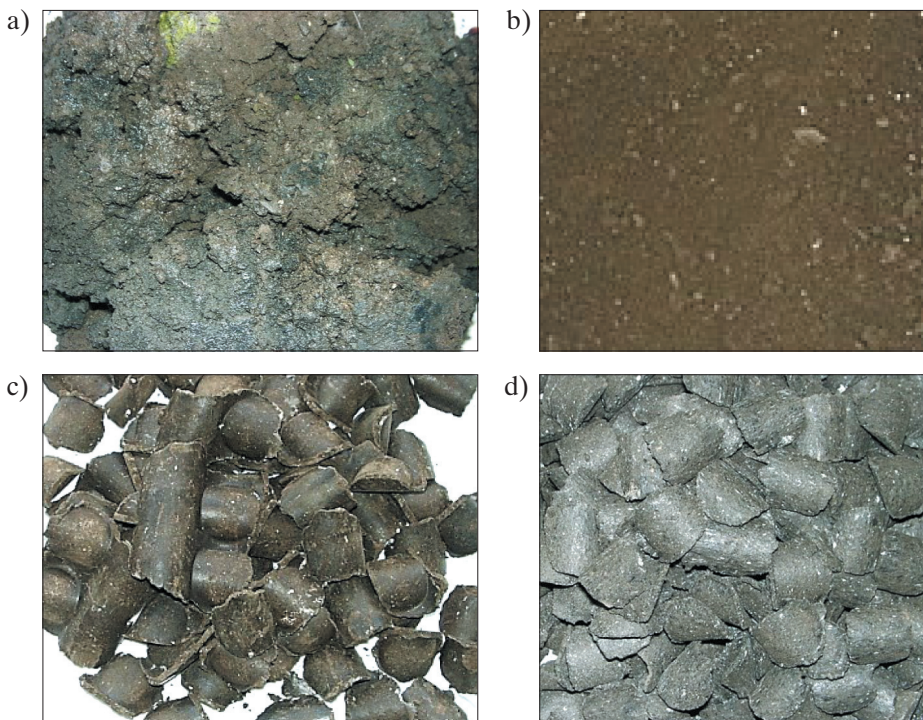
Rys. 4.12. Zdjęcie wyprasek otrzymanych w prasie walcowej z mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego

Po opuszczeniu wgłębień brykiety (lub wypraski) gromadziły się w pojemniku, skąd pobierano losowo próbki (w seriach po dziesięć sztuk) w celu wyznaczenia parametrów charakteryzujących ich właściwości:

- wytrzymałości na zrzut,
- wytrzymałości na ściskanie,
- gęstości.

Te wskaźniki wytrzymałościowe pozwalają na ocenę odporności brykietów na obciążenia, na jakie są one narażone w czasie przeładunku, transportu oraz termicznego zagospodarowania.

Na rysunku 4.13 przedstawiono zdjęcia komunalnych osadów ściekowych przed procesem i po procesie brykietowania.



Rys. 4.13. Zdjęcia komunalnych osadów ściekowych: a) próbka z poletka osadowego; b) po wysuszeniu do wilgotności 23,5%; c) przetworzonych w prasie walcowej LPW 450 z dodatkiem 10% odpadowego wapna palonego (objętość brykietów – $6,5 \text{ cm}^3$); d) przetworzonych w prasie walcowej LPW 450 z dodatkiem 3,5% odpadowego wapna palonego i 67,0% miazgu węglowego (objętość brykietów – $6,5 \text{ cm}^3$)

Próby wytrzymałości brykietów na ściskanie przeprowadzano na stanowisku pomiarowym wyposażonym w prasę ZWICK 1120 o zakresie nacisku 0–2000 N. Brykiet

ściskano pomiędzy dwiema równoległymi płaszczyznami z prędkością $v = 0,001$ m/s, a kierunek siły nacisku był prostopadły do tych płaszczyzn. Pomiar ten jest zbliżony do metody pomiaru ściskania średnicowego określanej mianem metody brazylijskiej [6, 109, 129]. Badania wytrzymałościowe przeprowadzono po 168 h sezonowania w celu zminimalizowania wpływu warunków pogodowych (wilgotność powietrza, temperatura) na wartość otrzymywanych wyników. Wyniki pomiarów otrzymywano w jednostkach siły.

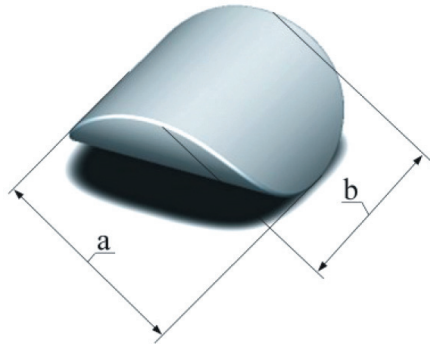
W celu określenia wytrzymałości na ściskanie w jednostkach naprężenia sformułowano następującą zależność:

$$R_D = \frac{D_c}{\zeta_{ab}}, \text{ MPa} \quad (4.1)$$

gdzie:

- D_c – siła ściskająca, N,
- ζ – współczynnik kształtu brykietu, –,
- a, b – wymiary brykietu, mm (rys. 4.14).

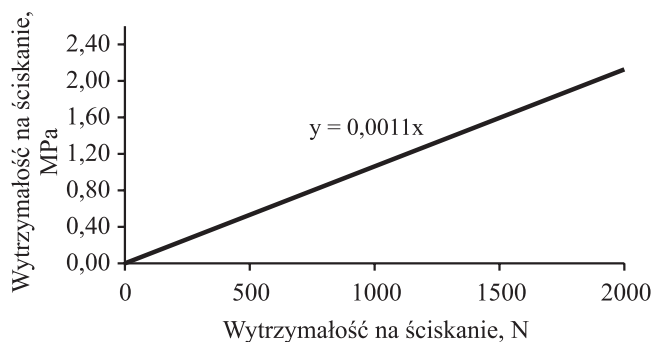
W przypadku brykietu o kształcie siodłowym współczynnik kształtu brykietu ζ wynosi 0,95.



Rys. 4.14. Model brykietu o kształcie siodłowym

Na rysunku 4.15 przedstawiono określoną na podstawie wzoru (4.1) zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie mierzoną w jednostkach siły a wytrzymałością na ściskanie mierzoną w jednostkach naprężenia dla brykietu o kształcie siodłowym i objętości $6,5 \text{ cm}^3$.

Brykiety zrzucano w seriach (po dziesięć sztuk) z wysokości 2 m na płytę stalową o grubości 60 mm. Próby te powtarzano trzykrotnie, za każdym razem przesiewając pokruszoną masę przez sito o wymiarach oczka $18 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$. Rozmiar sita określono jako $2/3$ średniej obliczonej z dwóch maksymalnych wymiarów brykietu, mierzonych we wzajemnie prostopadłych kierunkach.

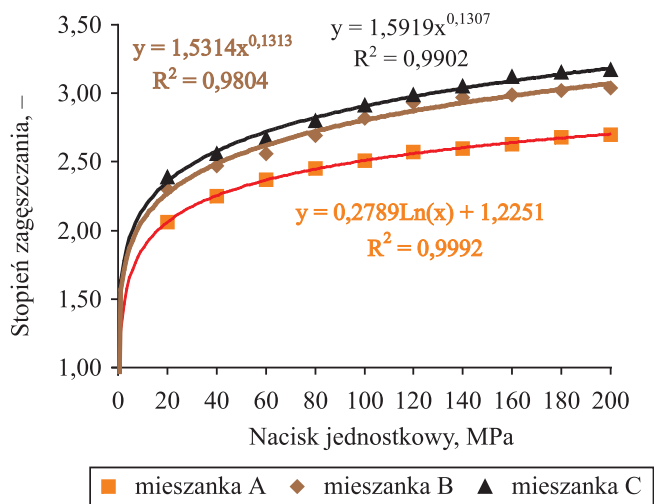


Rys. 4.15. Zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie mierzoną w jednostkach siły a wytrzymałością na ściskanie mierzoną w jednostkach naprężenia dla brykietu o kształcie siodłowym i objętości $6,5 \text{ cm}^3$

4.3. Wyznaczanie charakterystyki zagęszczania mieszanek komunalnych osadów ściekowych

Znajomość charakterystyki zagęszczania materiału droбноziarnistego pozwala na ocenę jego podatności na brykietowanie [2, 63]. Jej ilościowy i jakościowy charakter decyduje o konfiguracji układu zagęszczania prasy walcowej. Znajomość wartości tzw. maksymalnego stopnia zagęszczania materiału droбноziarnistego umożliwia podjęcie wstępnej decyzji o rodzaju zastosowanego zasilania. Charakterystykę zagęszczania mieszanki osadów ściekowych i wapna palonego wyznaczano na stanowisku pomiarowym wyposażonym w prasę hydrauliczną ZDM-1 i matrycę zamkniętą o średnicy wewnętrznej wynoszącej 30 mm według procedur określonych w normie PN-72/H-04931. Ilość zagęszczanego materiału dobrano w ten sposób, aby wysokość uzyskanego w czasie badań brykietu wynosiła ok. $2/3$ jego średnicy, czyli 20 mm. Ta wartość, uzyskana w matrycy zamkniętej, odpowiada wymiarom brykietu powstającego w prasie walcowej LPW-450 wyposażonej w pierścienie formujące o siodłowym kształcie wgłębień. Gęstość nasypowa mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego o wilgotności 23,5% wynosiła $0,653 \text{ g/cm}^3$. Prędkość przesuwu tłoka dobrano w ten sposób, aby nacisk jednostkowy wzrastał z prędkością nie większą niż 60 MN/m^2 w ciągu minuty. Czas utrzymywania ciśnienia nominalnego wynosił 10 s. Wyniki pomiaru przedstawiono na wykresie obrazującym wartość stopnia zagęszczania materiału w funkcji nacisku jednostkowego (rys. 4.16).

Degresywny (w układzie $s = f(p_n)$) kształt charakterystyk świadczy o dobrej podatności na scalanie w prasie walcowej mieszanek komunalnych osadów ściekowych. Ilościowy charakter tych krzywych stanowi o możliwości stosowania grawitacyjnego zasilania brykieciarki.



Rys. 4.16. Charakterystyki zagęszczania mieszanek komunalnych osadów ściekowych w układzie $s = f(p_n)$

4.4. Wyniki badań brykietowania mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego w prasie walcowej z niesymetrycznym układem zagęszczania i zasilaniem grawitacyjnym

Wyniki badań poddano obróbce statystycznej zgodnie z procedurami ustalonymi dla estymacji dokonywanej oceną punktową. Na ich podstawie określono wpływ prędkości obwodowej walców na gęstość i wskaźniki jakości otrzymywanych brykietów. Nie przeprowadzono pomiarów wytrzymałości na ściskanie bezpośrednio po próbie, ponieważ brykiety wykazywały cechy ciała plastycznego.

Zapotrzebowanie na moc w procesie brykietowania N_b wyznaczano z zależności:

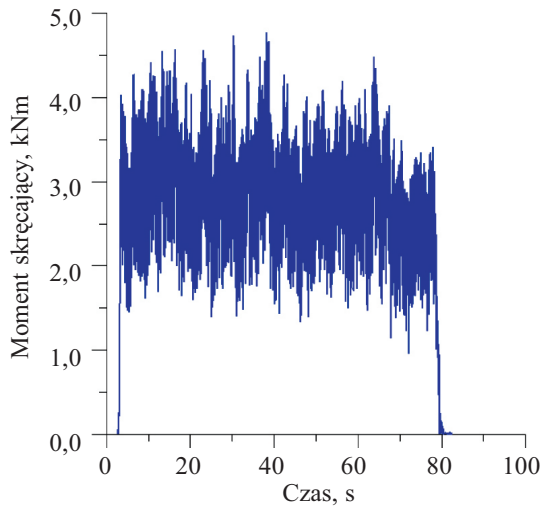
$$N_b = 2 \frac{M_w n_w}{9,55}, \text{ kW} \quad (4.1)$$

gdzie:

M_w – moment skręcający na wale prasy walcowej, kN·m

n_w – prędkość obrotowa prasy walcowej, obr/min.

Przykładowy zapis charakterystyki czasowej momentu skręcającego na wale prasy walcowej przedstawiono na rysunku 4.17.



Rys. 4.17. Charakterystyka czasowa momentu skręcającego zmierzonego podczas brykietowania mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego przy prędkości walców $v_w = 0,1$ m/s

Wartość momentu skręcającego na wale prasy walcowej M_w wyznaczano jako średnią z przedziału wytypowanego w stanie ustalonym przebiegu obciążeń $[t_1, t_2]$, określoną z wzoru:

$$M_w = \frac{\int_{t_1}^{t_2} f dt}{t_2 - t_1} \quad (4.2)$$

gdzie f – funkcja momentu skręcającego.

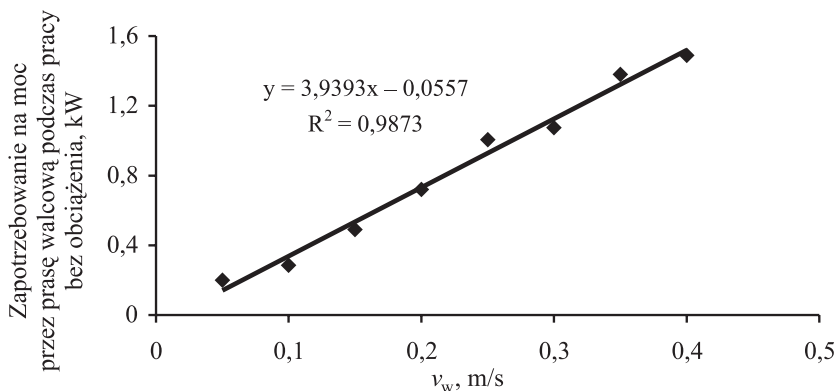
Należy zaznaczyć, że zależność (4.2) nie ujmuje zapotrzebowania na moc konieczną do pokonania oporów ruchu jałowego prasy walcowej. Jest zatem wielkością identyfikującą proces brykietowania nieprzyporządkowany do konkretnego urządzenia.

W celu wyznaczenia całkowitego zapotrzebowania na moc w procesie brykietowania w laboratoryjnej prasie walcowej LPW 450 należy uwzględnić zapotrzebowanie na moc podczas pracy urządzenia bez obciążenia. Zależność tę przedstawiono na rysunku 4.18.

Całkowite zapotrzebowanie na moc przez laboratoryjną prasę walcową LPW 450 N_c w czasie brykietowania można wyznaczyć z zależności:

$$N_c = N_b + N_j, \text{ kW} \quad (4.3)$$

gdzie N_j – zapotrzebowanie na moc prasy walcowej LPW 450 podczas pracy bez obciążenia, kW.



Rys. 4.18. Zapotrzebowanie na moc przez prasę walcową LPW 450 podczas pracy bez obciążenia

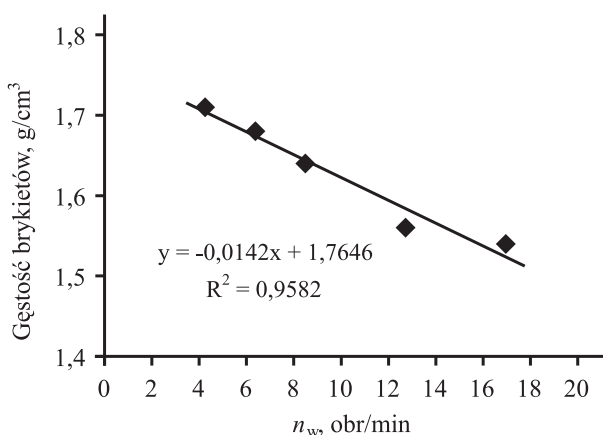
Wydajność masową prasy walcowej wyposażonej w pierścienie formujące o wgłębieniach w kształcie siodła W_m obliczano ze wzoru:

$$W_m = 60 V_b i_b n_w \rho_b, \text{ Mg/h} \quad (4.4)$$

gdzie:

- V_b – objętość brykietu, m^3 ,
- i_b – liczba wgłębień formujących, –,
- n_w – prędkość obrotowa prasy walcowej, obr/min,
- ρ_b – gęstość brykietu, g/cm^3 .

Zależność gęstości brykietu od prędkości obrotowej walców przedstawiono na rysunku 4.19.



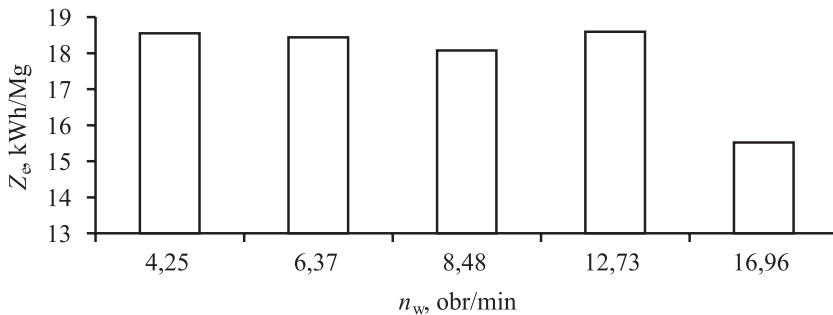
Rys. 4.19. Zależność gęstości brykietów od prędkości obrotowej walców prasy

W celu określenia energochłonności procesu scalania wyznaczano całkowite zapotrzebowanie na moc w procesie scalania oraz wydajność masową prasy walcowej.

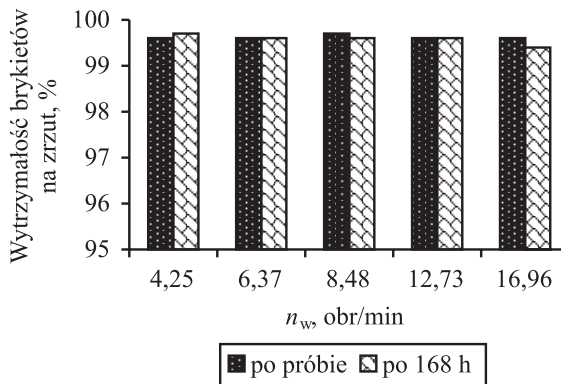
Wartości jednostkowego zapotrzebowania na energię w czasie realizacji procesu brykietowania Z_e obliczano z zależności:

$$Z_e = \frac{N_b}{W_m}, \text{ kWh/Mg} \quad (4.5)$$

Rysunek 4.20 obrazuje wpływ prędkości obrotowej walców prasy na jednostkowe zapotrzebowanie na energię w czasie procesu brykietowania.



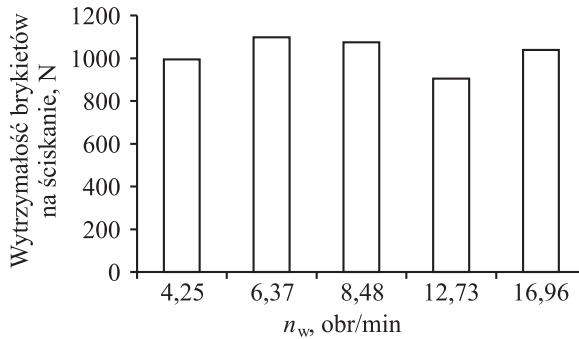
Rys. 4.20. Wpływ prędkości obrotowej walców prasy na jednostkowe zapotrzebowanie na energię Z_e w czasie procesu brykietowania mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego



Rys. 4.21. Zależność wytrzymałości brykietów na zrzut od prędkości obrotowej walców

Jak wynika z rysunku 4.21 brykiety charakteryzowały się bardzo wysokim wskaźnikiem wytrzymałości na zrzut bezpośrednio po próbie i po 168 h sezonowania. Jego wartość przekraczała 99%.

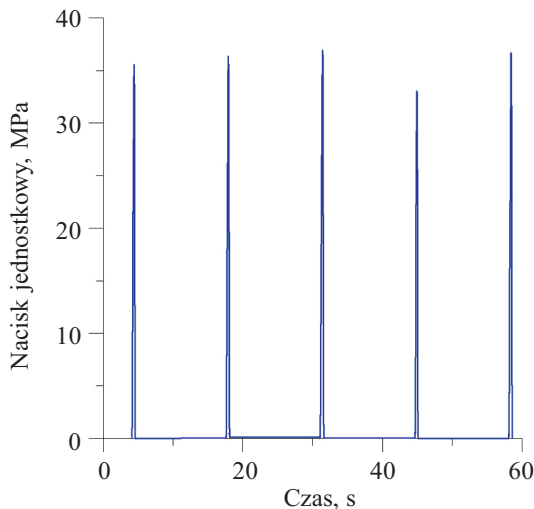
Również wytrzymałość brykietów na ściskanie mierzona po 168 h sezonowania była bardzo wysoka, a zniszczenie brykieta następowało przy nacisku siły o wartości powyżej 905 N (1,0 MPa) (rys. 4.22).



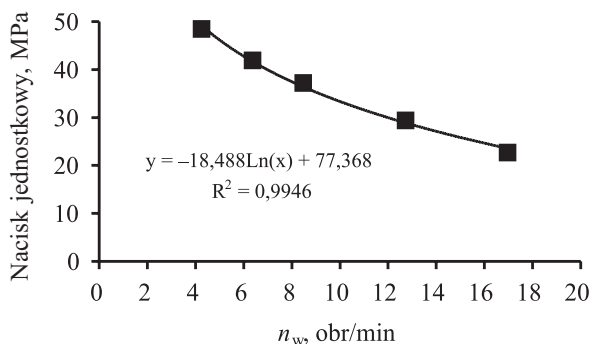
Rys. 4.22. Zależność wytrzymałości brykietów na ściskanie po 168 h od prędkości obwodowej walców

Wpływ wartości prędkości obwodowej na jakość brykietów nie był znaczący. Powyższe wyniki sugerują, że o parametrach wytrzymałościowych brykietów decydują w znacznie większym stopniu oddziaływania chemiczne niż wiązania mechaniczne.

Przykładową charakterystykę czasową nacisku jednostkowego we wgłębieniu formującym przedstawiono na rysunku 4.23, a na rysunku 4.24 opisano zależność nacisku jednostkowego od prędkości obrotowej walców prasy.



Rys. 4.23. Charakterystyka czasowa nacisków jednostkowych zarejestrowana podczas brykietowania mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego przy prędkości walców $v_w = 0,1$ m/s



Rys. 4.24. Zależność nacisku jednostkowego od prędkości obrotowej walców prasy

Wartość średnią nacisku jednostkowego we wgłębieniu formującym p_{sr} obliczono ze wzoru:

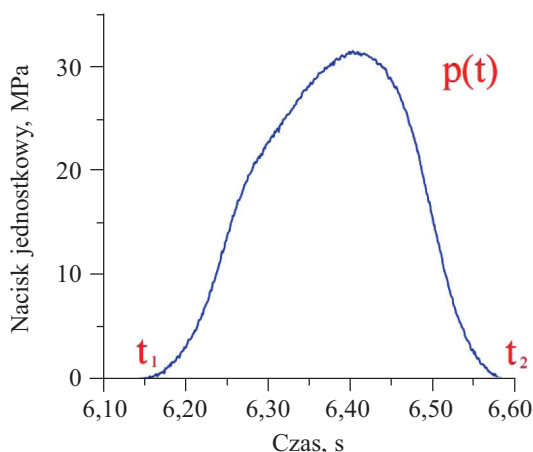
$$p_{\text{sr}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p dt}{t_2 - t_1} \quad (4.6)$$

gdzie:

t_1 – czas określający początek strefy zagęszczania,

t_2 – czas określający koniec strefy rozprężania.

Na rysunku 4.25 przedstawiono przykładową pojedynczą charakterystykę nacisku jednostkowego we wgłębieniu formującym



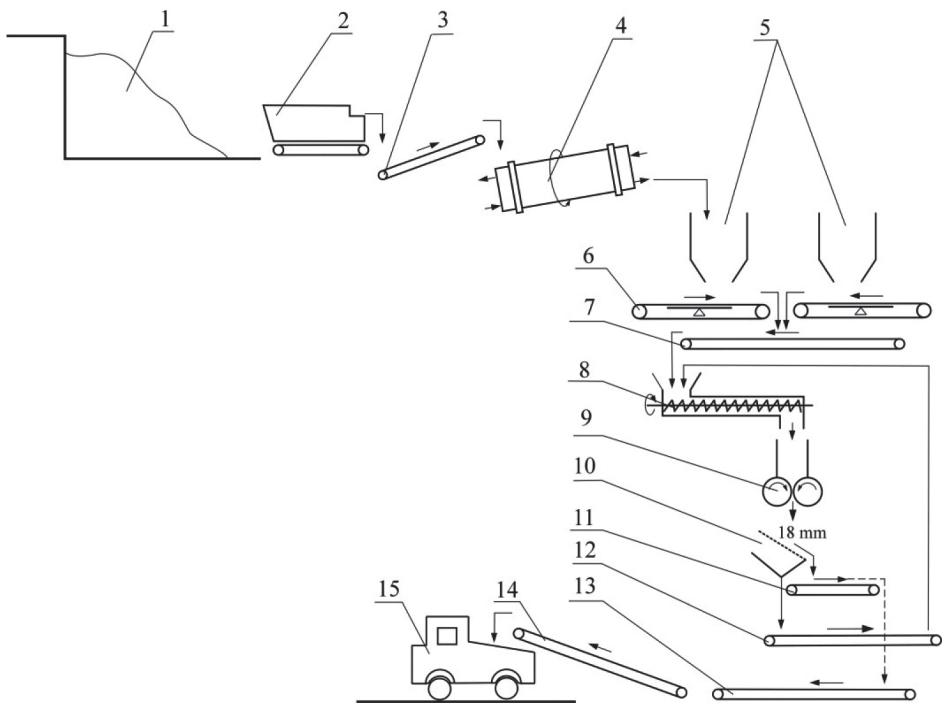
Rys. 4.25. Przykładowa charakterystyka nacisku jednostkowego we wgłębieniu formującym zarejestrowana podczas brykietowania mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego przy prędkości walców $v_w = 0,1$ m/s

Brykietowanie mieszanki osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego w laboratoryjnej prasie walcowej LPW 450 wyposażonej w zasilacz grawitacyjny i pierścienie formujące o siodłowym kształcie wgłębień umożliwiło otrzymanie brykietów cechujących się wysokimi parametrami wytrzymałościowymi: wytrzymałość na ściskanie po 168 h wynosiła $D_{168} = 905\text{--}1098\text{ N}$ (1,0–1,21 MPa), wytrzymałość na zrzut bezpośrednio po próbie $K_0 > 99\%$ i po 168 h $K_{168} > 99\%$ oraz gęstością brykietów $\rho_b = 1,54\text{--}1,71\text{ g/cm}^3$.

Jednostkowe zapotrzebowanie na energię w procesie brykietowania w prasie walcowej z zasilaczem grawitacyjnym wynosiło 15,52–19,98 kWh/Mg.

Wartość nacisków jednostkowych wynosiła $p_n = 49,92\text{--}24,15\text{ MPa}$ i malała wraz ze wzrostem wartości prędkości obwodowej walców prasy.

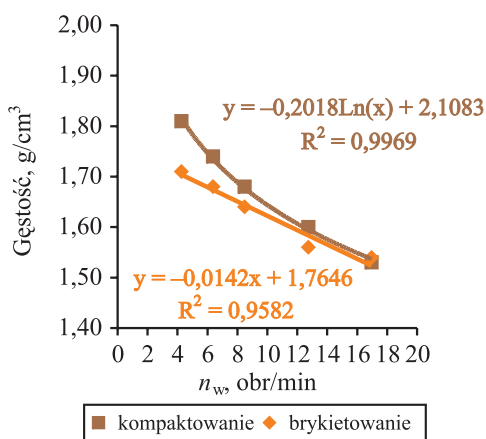
Na podstawie przeprowadzonych badań uzyskano informacje o obciążeniu wałów prasy walcowej. Wiedza ta przyczyniła się do opracowania koncepcji linii technologicznej do brykietowania mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego. Jej schemat przedstawiono na rysunku 4.26.



Rys. 4.26. Koncepcja linii technologicznej do brykietowania mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego: 1 – poletko osadowe, 2 – wózek transportowy, 3, 7, 11–14 – przenośnik taśmowy, 4 – suszarnia bębnowa, 5 – silosy, 6 – waga taśmowa, 8 – podajnik ślimakowy, 9 – prasa walcowa, 10 – przesiewacz, 15 – punkt odbioru brykietów

4.5. Wyniki badań scalania mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego w prasie walcowej z gładkimi walcami i zasilaniem grawitacyjnym

W celu określenia jednostkowego zapotrzebowania na energię na realizację procesu scalania mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego w prasie walcowej z gładkimi walcami i zasilaniem grawitacyjnym po próbach mierzono gęstość uzyskanych wyprasek. Na rysunku 4.27 przedstawiono wykres zależności gęstości brykietów (wyprasek) od prędkości obrotowej walców prasy.



Rys. 4.27. Zależność gęstości brykietów (wypraski) od prędkości obrotowej walców prasy

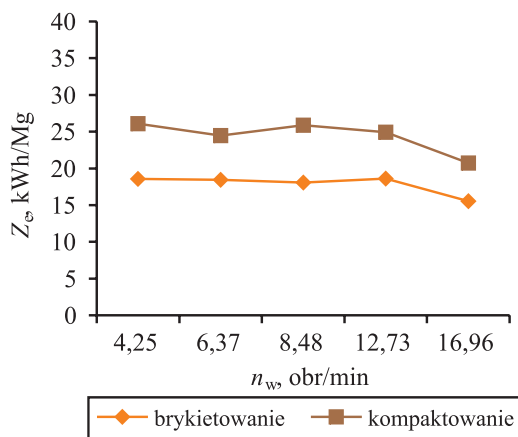
Wydajność masową prasy walcowej wyposażonej w pierścienie gładkie W_{mk} obliczano ze wzoru:

$$W_{mk} = 3600 \delta B v_w \rho_w, \text{ Mg/h} \quad (4.7)$$

gdzie:

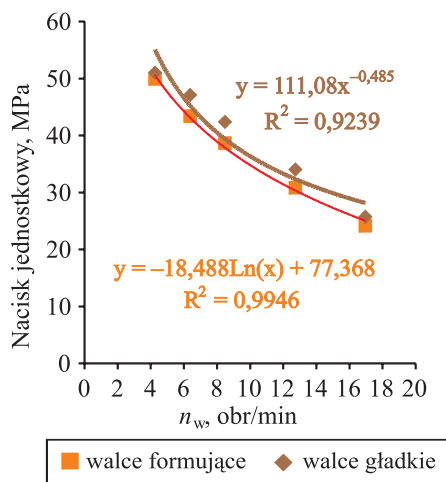
- δ – grubość wypraski, m,
- B – szerokość pierścienia, m,
- v_w – prędkość obwodowa prasy walcowej, m/s,
- ρ_w – gęstość wypraski, g/cm³.

Na rysunku 4.28 przedstawiono wykres porównawczy obrazujący wpływ prędkości obrotowej walców prasy na jednostkowe zapotrzebowanie na energię Z_e w czasie realizacji procesu brykietowania i kompaktowania.



Rys. 4.28. Wpływ prędkości obrotowej walców prasy na jednostkowe zapotrzebowanie na energię Z_c w czasie procesu brykietowania i kompaktowania

Wartość nacisku jednostkowego podczas kompaktowania była o 5–7% wyższa niż w przypadku brykietowania (rys. 4.29).

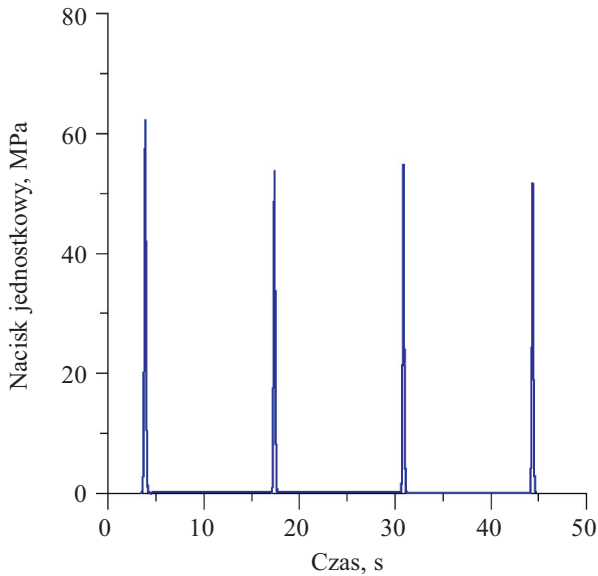


Rys. 4.29. Zależność nacisku jednostkowego od prędkości obrotowej walców prasy

Jednostkowe zapotrzebowanie na energię potrzebną do przeprowadzenia procesu kompaktowania wynosiło 20,74–26,09 kWh/Mg.

Wartość nacisków jednostkowych w czasie realizacji procesu scalania wynosiła $p_n = 51,005$ – $25,75$ MPa i malała wraz ze wzrostem wartości prędkości obwodowej

walców prasy. Na rysunku 4.30 przedstawiono charakterystykę czasową nacisku jednostkowego zmierzoną podczas kompaktowania mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego przy prędkości walców $v_w = 0,1$ m/s

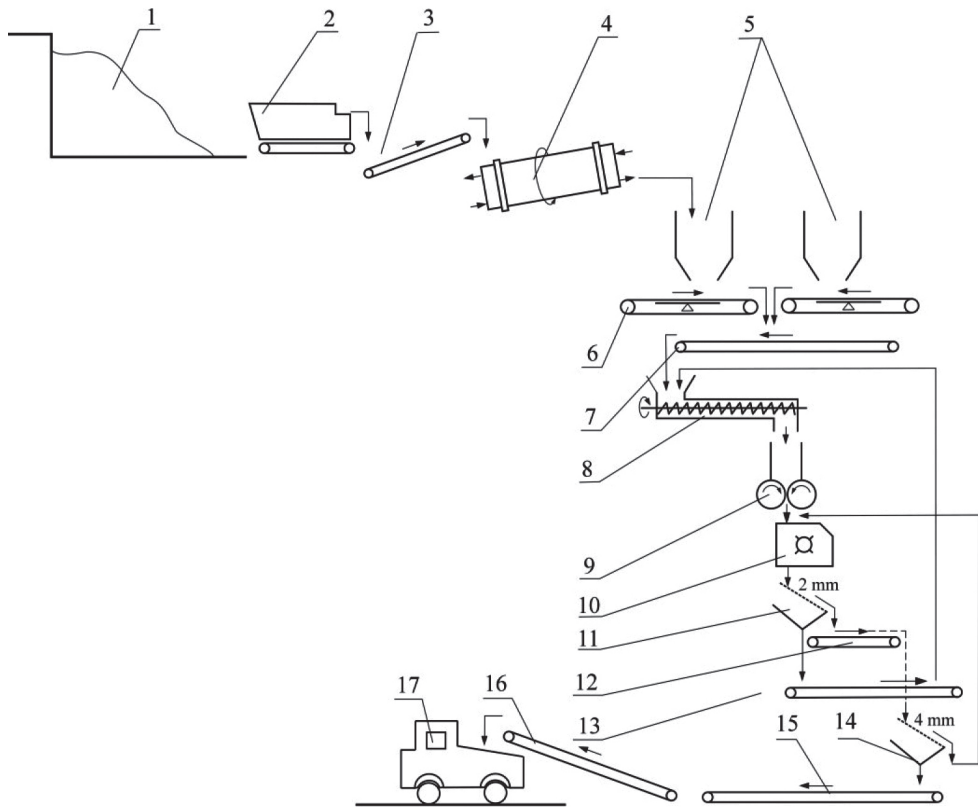


Rys. 4.30. Charakterystyka czasowa nacisku jednostkowego zmierzona podczas kompaktowania mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego przy prędkości walców $v_w = 0,1$ m/s

Scalanie mieszanki osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego w laboratoryjnej prasie walcowej LPW 450 wyposażonej w zasilacz grawitacyjny i gładkie walce umożliwia otrzymanie wyprasek o gęstości $\rho_w = 1,53\text{--}1,81$ g/cm³.

Przy kompaktowaniu mieszanek komunalnych osadów ściekowych kąt wyprzedzenia wynosił $0,8\text{--}1,2^\circ$. Jego wartość była porównywalna z wynikami badań otrzymanych przez M. Hryniewicza [50] oraz J.C. Cunninghama [10]. Należy zauważyć, że w pracach [39, 40] P. Guigon i O. Simon negują występowanie kąta wyprzedzenia, przyjmując, że maksymalna wartość nacisku jednostkowego przypada na punkt największego zbliżenia walców. Nie można wykluczyć, że wyniki badań są efektem znikomo małej spójności zagęszczanego ośrodka i/lub sposobu podawania materiału między walce (materiał scalano w prasie z walcami usytuowanymi pionowo i poziomym zasila- niem wymuszonym).

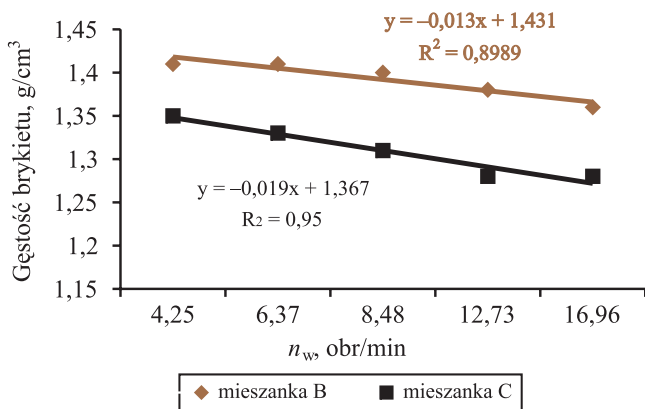
Na rysunku 4.31 zaprezentowano koncepcję linii technologicznej do granulacji dwustopniowej mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego.



Rys. 4.31. Koncepcja linii technologicznej do granulacji dwustopniowej mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego: 1 – poletko osadowe, 2 – wózek transportowy, 3, 7, 12, 13, 15, 16 – przenośnik taśmowy, 4 – suszarnia bębnowa, 5 – silosy, 6 – waga taśmowa, 8 – podajnik ślimakowy, 9 – prasa walcowa, 10 – kruszarka młotkowa, 11, 14 – przesiewacz, 17 – punkt odbioru brykietów

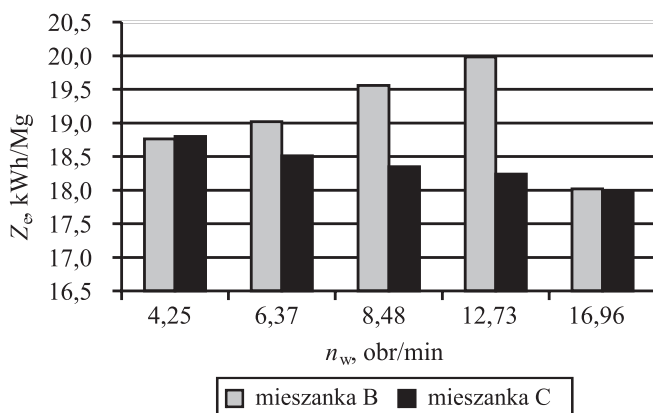
4.6. Wyniki badań brykietowania mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego z węglem kamiennym w prasie walcowej z niesymetrycznym układem zagęszczania i zasilaniem grawitacyjnym

Przed rozpoczęciem badań brykietowania określono charakterystyki zagęszczania mieszanek komunalnych osadów ściekowych z droбноziarnistym węglem kamiennym (mieszanki B i C) (rys. 4.17). Zależność gęstości brykietów od prędkości obrotowej walców przedstawiono na rysunku 4.32.



Rys. 4.32. Zależność gęstości brykietów od prędkości obrotowej walców prasy

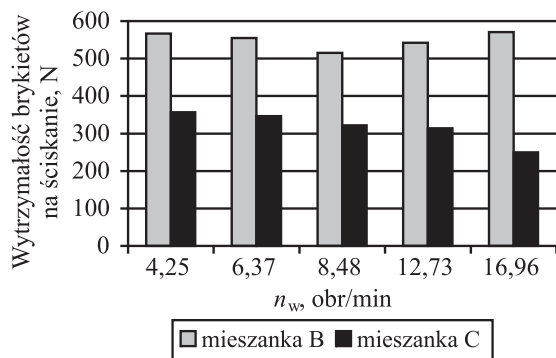
Rysunek 4.33 obrazuje wpływ prędkości obrotowej walców prasy na jednostkowe zapotrzebowanie na energię w czasie prowadzenia procesu brykietowania.



Rys. 4.33. Wpływ prędkości obrotowej walców prasy na jednostkowe zapotrzebowanie na energię Z_e w czasie prowadzenia procesu brykietowania mieszanek komunalnych osadów ściekowych z drobnoziarnistym węglem kamiennym (mieszanki B i C)

Jednostkowe zapotrzebowanie na energię w procesie brykietowania w prasie walcowej z zasilaczem grawitacyjnym wynosiło 17,98–19,98 kWh/Mg. Powyższe obliczenia nie uwzględniały strat energii spowodowanych oporami ruchu maszyny. Ilość dozowanego miazła węglowego nie miała większego wpływu na wartość jednostkowego zapotrzebowania na energię w czasie procesu brykietowania.

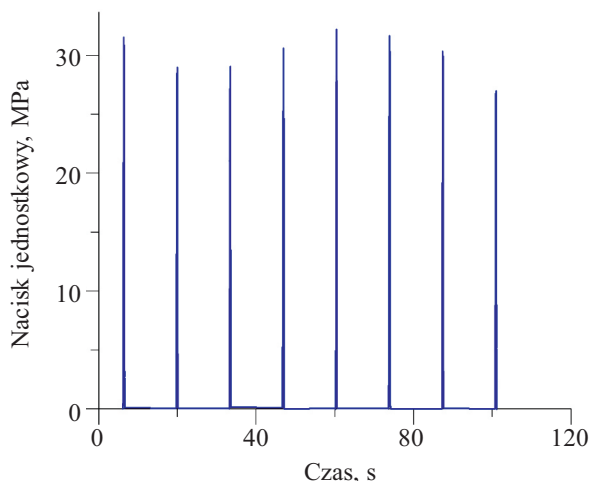
Wpływ prędkości obrotowej walców na wytrzymałość na ścislenie brykietów otrzymanych z mieszanek, w których głównym składnikiem są osady ściekowe, przedstawiono na rysunku 4.34.



Rys. 4.34. Zależność wytrzymałości brykietów na ściskanie od prędkości obrotowej walców prasy

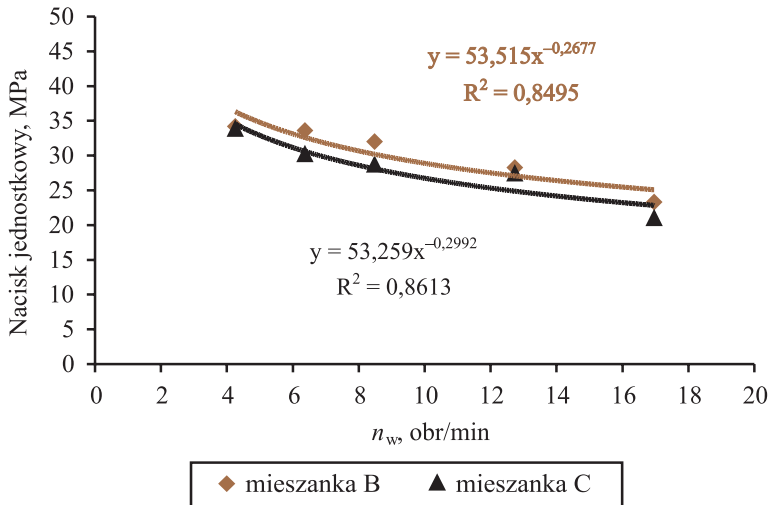
Wytworzone brykiety charakteryzowały się wysoką wytrzymałością na ściskanie – zniszczenie brykieta następowało przy nacisku siły o wartości zbliżonej do 600 N (0,66 MPa). Należy zaznaczyć, że wpływ wartości prędkości obrotowej na jakość brykietów nie był znaczący. W przypadku mieszanki C wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wartość parametrów wytrzymałościowych brykietów nieznacznie malała.

Na rysunku 4.35 przedstawiono charakterystykę czasową nacisku jednostkowego we wgłębieniu formującym zmierzoną podczas brykietowania mieszanki komunalnych osadów ściekowych, odpadowego wapna palonego i miazłu węgla kamiennego (mieszanka B) przy prędkości walców $v_w = 0,1$ m/s.



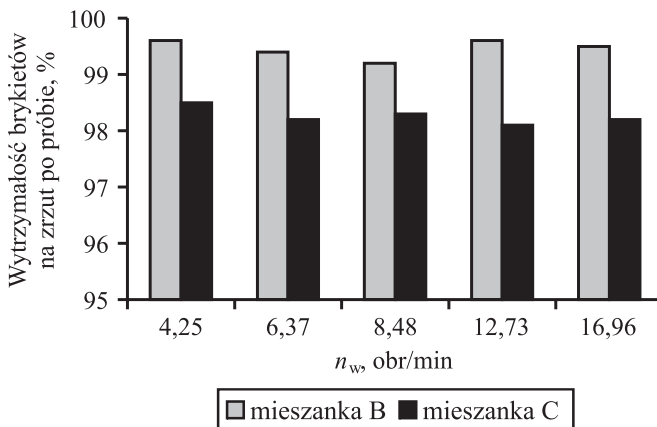
Rys. 4.35. Charakterystyka czasowa nacisku jednostkowego zmierzona podczas brykietowania mieszanki komunalnych osadów ściekowych, odpadowego wapna palonego i miazłu węgla kamiennego (mieszanka B) przy prędkości walców $v_w = 0,1$ m/s

W przypadku mieszanki B i C wartość nacisku jednostkowego malała wraz ze wzrostem udziału miazgi węgla kamiennego w mieszance komunalnych osadów ściekowych (rys. 4.36).

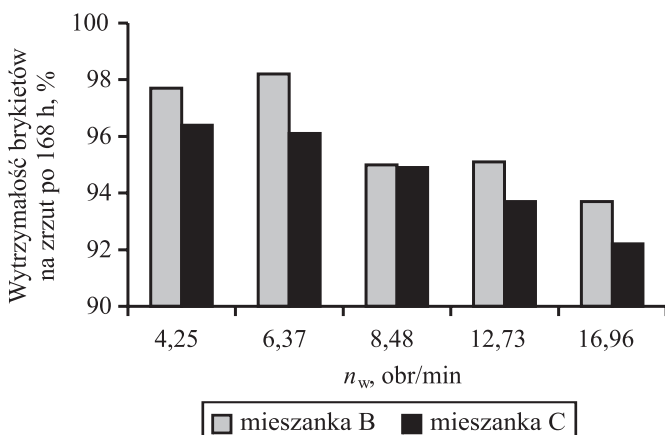


Rys. 4.36. Zależność nacisku jednostkowego od prędkości obrotowej walców prasy

Na rysunkach 4.37 i 4.38 przedstawiono zależności wytrzymałości brykietów na zrzut bezpośrednio po próbie i po 168 h od prędkości obrotowej walców.



Rys. 4.37. Zależność wytrzymałości brykietów na zrzut bezpośrednio po próbie od prędkości obrotowej walców



Rys. 4.38. Zależność wytrzymałości brykietów na zrzut po 168 h od prędkości obrotowej walców

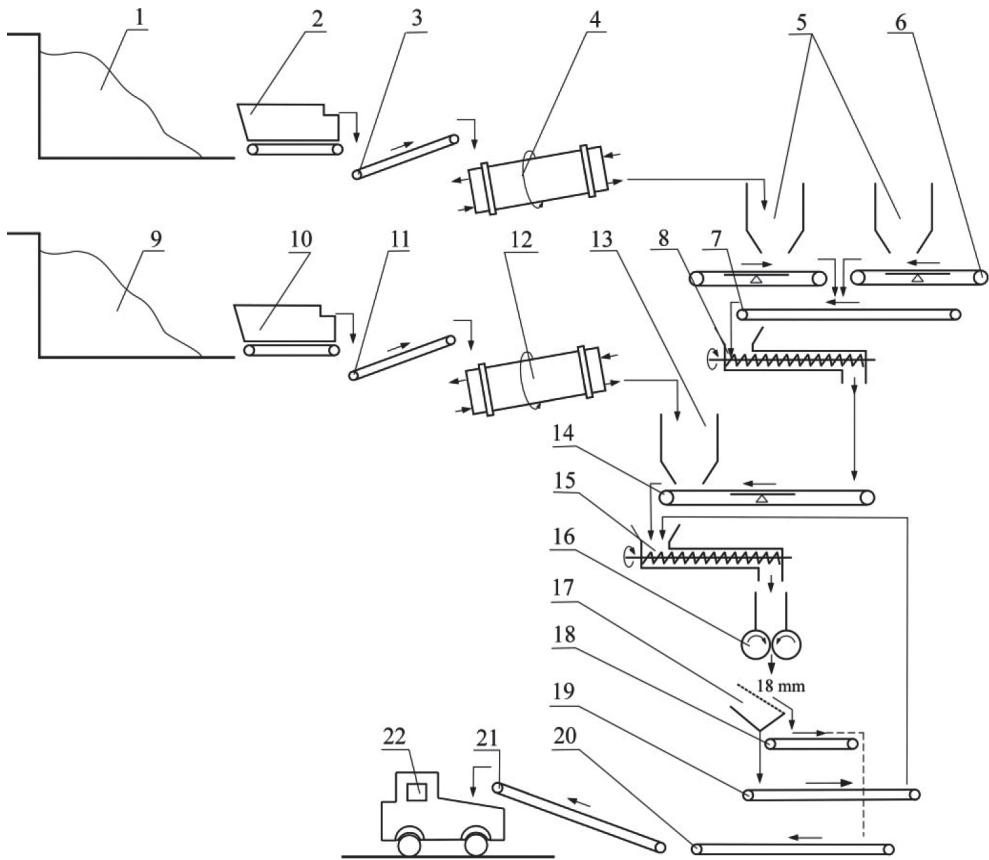
Wytrzymałość brykietów na zrzut mierzona bezpośrednio po próbie wynosiła $K_0 = 98,2\text{--}99,6\%$, a po 168 h $K_{168} = 90,2\text{--}98,2\%$. Wraz ze wzrostem prędkości obwodowej walców prasy następował spadek parametrów wytrzymałościowych brykietów z mieszanki C.

Scalanie mieszanki osadów ściekowych, odpadowego wapna palonego i miazgu węgla kamiennego w laboratoryjnej prasie walcowej LPW 450 wyposażonej w zasilač grawitacyjny umożliwia otrzymanie brykietów o objętości około $6,5 \text{ cm}^3$ cechujących się następującymi parametrami wytrzymałościowymi:

- wytrzymałość na ściskanie po 168 h $D_{168} = 250\text{--}571 \text{ N}$ ($0,275\text{--}0,628 \text{ MPa}$),
- wytrzymałość na zrzut
bezpośrednio po próbie $K_0 = 98,2\text{--}99,6\%$,
- wytrzymałość na zrzut po 168 h $K_{168} = 90,2\text{--}98,2\%$,
- gęstość $\rho_b = 1,28\text{--}1,41 \text{ g/cm}^3$.

W przypadku mieszanki C wraz ze wzrostem w mieszance osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego udziału miazgu węgla kamiennego i wzrostem wartości prędkości obwodowej walców prasy następuje spadek parametrów wytrzymałościowych oraz gęstości brykietów.

Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano koncepcję linii technologicznej do brykietowania mieszanek komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego z miazgiem węgla kamiennego. Jej schemat przedstawiono na rysunku 4.39.



Rys. 4.39. Koncepcja linii technologicznej do brykietowania mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego z miałem węgla kamiennego: 1, 9 – poletko osadowe, 2, 10 – wózek transportowy, 3, 7, 11, 18–21 – przenośnik taśmowy, 4, 12 – suszarnia bębnowa, 5, 13 – silosy, 6, 14 – waga taśmowa, 8, 15 – podajnik ślimakowy, 16 – prasa walcowa, 17 – przesiewacz, 22 – punkt odbioru brykietów

4.7. Brykietowanie mieszanek komunalnych osadów ściekowych w prasie laboratoryjnej o średnicy walców 1100 mm zasilanej grawitacyjnie

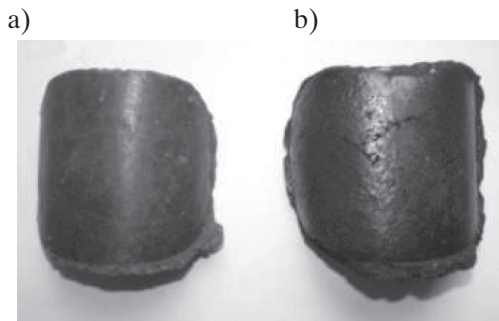
Celem badań było uzyskanie informacji na temat możliwości brykietowania mieszanek komunalnych osadów ściekowych w prasach walcowych o średnicach walców porównywalnych ze średnicami walców pras przemysłowych. Badania wykonano na

prasie laboratoryjnej LPW 1100 zainstalowanej w Katedrze Systemów Wytwarzania AGH wyposażonej w pierścienie umożliwiające uzyskanie brykietów w kształcie siodła i zasilanej grawitacyjnie (rys. 4.40).



Rys. 4.40. Zdjęcie laboratoryjnej prasy walcowej LPW 1100 wyposażonej w zasilacz grawitacyjny i pierścienie formujące umożliwiające otrzymanie brykietów w kształcie siodła

Metodykę przygotowania materiału do badań opisano w podrozdziale 4.2. Proces brykietowania prowadzono przy prędkości obwodowej walców równej 0,3 m/s. W wyniku przeprowadzonych prób brykietowania otrzymano brykiety przedstawione na rysunku 4.41. Ich objętość wynosiła 84–94 cm³ i była zależna od udziału zawartości węgla w mieszance. Wraz ze wzrostem udziału miazgu węgla kamiennego w mieszance wzrastała objętość brykietów.



Rys. 4.41. Brykiety otrzymane w prasie walcowej LPW 1100: a) z mieszanki osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego (objętość brykietów – 85 cm³); b) z mieszanki osadów ściekowych, odpadowego wapna palonego i miazgu węgla kamiennego (objętość brykietów – 93 cm³)

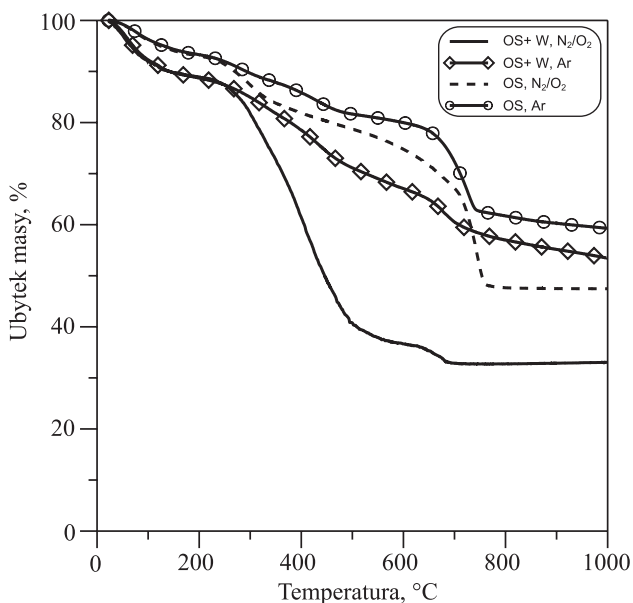
Wytrzymałość na ściskanie brykietów uzyskanych z mieszanki osadów ściekowych, odpadowego wapna palonego i miału węgla kamiennego (mieszanka C) w prasie walcowej LPW 1100 mierzona po 168 h była o 50% niższa od wytrzymałości na ściskanie brykietów uzyskanych z mieszanki osadów ściekowych oraz odpadowego wapna palonego.

4.8. Ocena spalania brykietów uzyskanych z mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego z węglem kamiennym

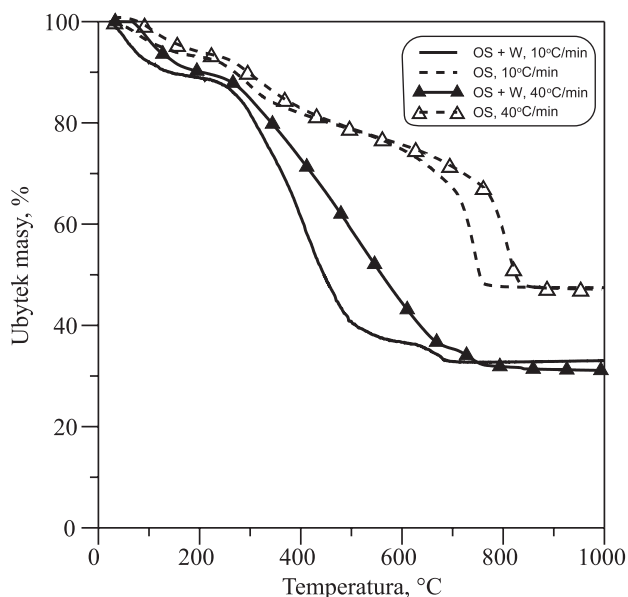
Badanie zjawisk termicznych zachodzących podczas procesu konwersji mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego z węglem kamiennym oparte były na analizie termicznej. Wykonano ją w termoanalizatorze Mettler Toledo TGA/SDTA 851 w Laboratorium Analizy Termicznej i Kalorymetrii UJ. Urządzenie TGA kalibrowano na indzie, cynku i glinie. Dokładność analizatora jest równa do 10^{-6} g. Badane próbki mieszanki komunalnych osadów ściekowych z wapnem palonym oraz mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego z węglem kamiennym umieszczano w tyglach korundowych (α - Al_2O_3). Pomiaru prowadzono w warunkach dynamicznych, ogrzewając próbkę od temperatury otoczenia do 1000°C z szybkością grzania 10°C i $40^\circ\text{C}/\text{min}$ w atmosferze powietrza oraz argonu. Szybkość objętościowa przepływu gazu wynosiła $40\text{ cm}^3/\text{min}$. Na podstawie przeprowadzonych badań sporządzono krzywe zmiany masy (krzywe TG) badanych próbek w zależności od temperatury dla danych warunków pomiarowych (szybkość grzania, atmosfera).

Rysunek 4.42 przedstawia porównanie procesu spalania (atmosfera powietrza) i procesu pirolizy (atmosfera beztlenowa). Spalanie i piroliza osadów ściekowych są procesami bardzo złożonymi. Komunalne osady ściekowe składają się w części organicznej oraz nieorganicznej, która stanowi dużą, niepożądaną część w procesie termicznej przemiany. Proces spalania mieszanki komunalnych osadów ściekowych z wapnem palonym oraz mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego z węglem kamiennym przedstawiony na krzywych TG ma odmienny przebieg.

Proces termicznego rozpadu w powietrzu mieszanki komunalnych osadów ściekowych z wapnem palonym można podzielić na trzy etapy: do temperatury 300°C , 300 – 760°C i powyżej 760°C . Największy ubytek masy, tj. 40%, nastąpił w drugim etapie. Powyżej temperatury 760°C masa próbki nie ulegała już zmianie, co świadczy o zakończeniu procesu spalania. Uzyskano bardzo dużą pozostałość w postaci popiołu, tj. 47%, co jest niekorzystne podczas procesu spalania.



Rys. 4.42. Krzywe TG procesu spalania (atmosfera N₂/O₂) i pirolizy (atmosfera Ar) mieszanki komunalnych osadów ściekowych z wapnem palonym (OS) oraz mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego z węglem kamiennym (OS+W), szybkość grzania 10°C/min



Rys. 4.43. Wpływ szybkości grzania (10°C/min i 40°C/min) na krzywe TG procesu spalania mieszanki komunalnych osadów ściekowych z wapnem palonym (OS) oraz mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego z węglem kamiennym (OS+W) – mieszanka C

Dodatek węgla do osadu ściekowego spowodował, że proces spalania odbywał się w niższych temperaturach. Najszybciej przebiegał on do temperatury 500°C. Powyżej 682°C nie zaobserwowano już zmiany masy, a zawartość popiołu wynosiła 32%. Krzywa TG procesu pirolizy osadu ściekowego ma podobny charakter, jednak pozostałość po procesie w temperaturze 1000°C wynosi aż 58%, a w przypadku osadu ściekowego z węglem 53%.

Rysunek 4.43 przedstawia wpływ szybkości grzania (10°C/min i 40°C/min) na proces spalania osadu ściekowego i osadu ściekowego z węglem. Można zaobserwować, że wzrost szybkości ogrzewania nie powoduje znacznej zmiany profilu krzywych, lecz wpływa na to, że poszczególne etapy termicznego rozkładu przebiegają w wyższych temperaturach.

Na rysunku 4.44 przedstawiono zbiorcze zestawienie wyników pomiarów analizy termogravimetrycznej składników mieszanek komunalnych osadów ściekowych.

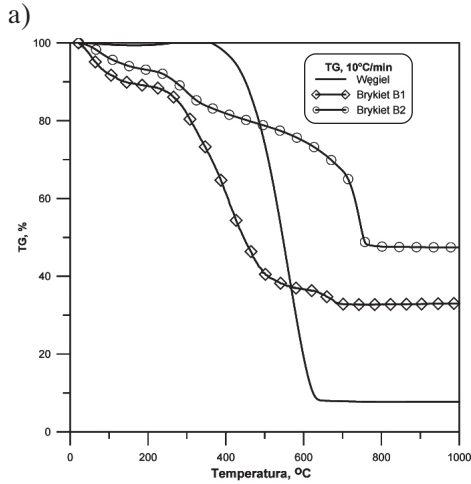
Na podstawie przeprowadzonej analizy termicznej możemy stwierdzić, że komunalne osady ściekowe mogą być poddawane termicznej utylizacji, jednak ze względu na wysoką zawartość części mineralnej pozostaje duża ilość popiołu. Spalanie osadów ściekowych z miałem węgla kamiennego w postaci brykietu jest korzystniejszym rozwiązaniem niż spalanie samego osadu, ponieważ proces rozpoczyna się w niższych temperaturach i pozostaje mniej popiołu.

Ilość energii elektrycznej lub ciepła wytworzonych z brykietów otrzymanych z mieszanki komunalnych osadów ściekowych, odpadowego wapna palonego oraz węgla kamiennego E_{OSW} można określić z wzoru:

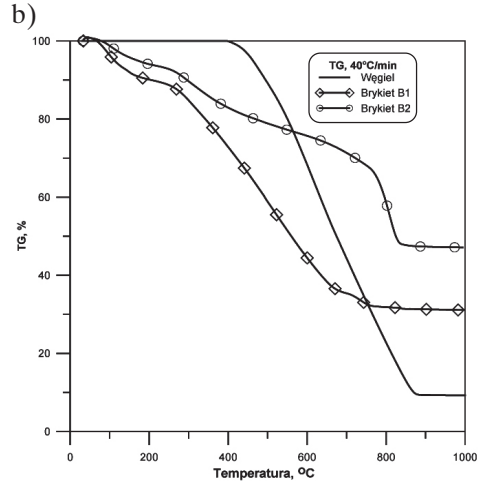
$$E_{OSW} = \eta m_{wk} W_{wk} + m_{os} W_{os} - E_z - E_t - 3,6 m_b Z_e, \text{ MJ} \quad (4.8)$$

gdzie:

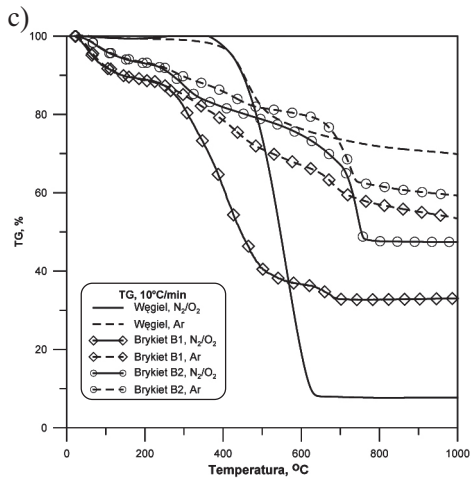
- η – współczynnik efektywności procesu spalania, –
- m_{wk} – masa węgla kamiennego spalonego w jednostce wytwórczej, Mg,
- W_{wk} – wartość opałowa węgla kamiennego spalonego w jednostce wytwórczej, MJ/Mg,
- m_{os} – masa komunalnych osadów ściekowych spalonych w jednostce wytwórczej, Mg,
- W_{os} – wartość opałowa komunalnych osadów ściekowych spalonych w jednostce wytwórczej, MJ/Mg,
- E_z – ilość energii potrzebnej do odparowania wilgoci z komunalnych osadów ściekowych, MJ,
- E_t – ilość energii potrzebnej do przygotowania mieszanki do scalania, MJ,
- m_b – masa materiału poddanego brykietowaniu, Mg,
- Z_e – jednostkowe zapotrzebowanie na energię w czasie realizacji procesu brykietowania, kWh/Mg.



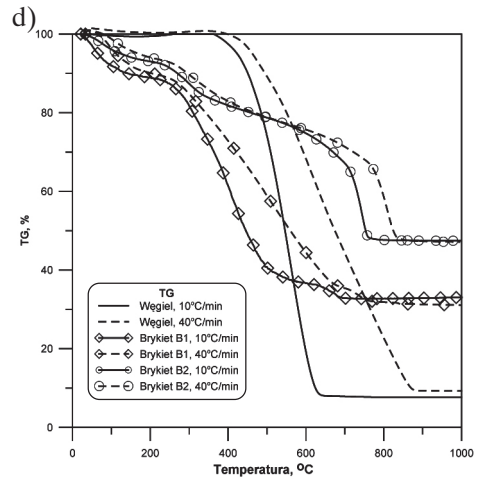
Krzywe TG ogrzewania z szybkością **10°C/min** dla węgla, brykietu B1 (osad z węglem) – mieszanka C i brykietu B2 (osad)



Krzywe TG ogrzewania z szybkością **40°C/min** dla węgla, brykietu B1 (osad z węglem) – mieszanka C i brykietu B2 (osad)



Krzywe TG ogrzewania z szybkością **10°C/min**, dla węgla, brykietu B1 (osad z węglem) – mieszanka C i brykietu B2 (osad) w atmosferze powietrza oraz argonu (porównanie spalania z pirolizą)



Krzywe TG, porównanie ogrzewania z szybkością **10°C/min** i **40°C/min** węgla, brykietu B1 (osad z węglem) – mieszanka C i brykietu B2 (osad) w atmosferze powietrza

Rys. 4.44. Zbiorcze zestawienie wyników pomiarów analizy termogravimetrycznej składników mieszanek komunalnych osadów ściekowych

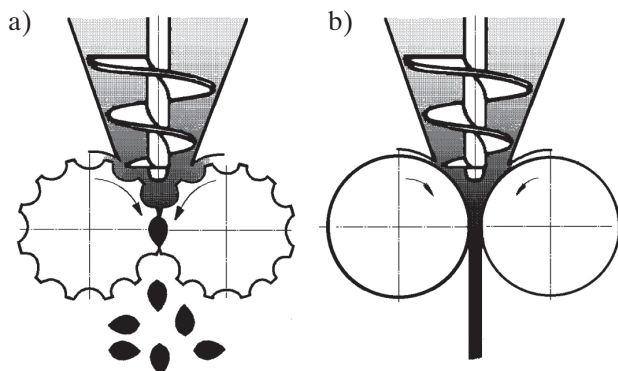
5. Brykietowanie komunalnych osadów ściekowych w prasie walcowej z zasilaczem ślimakowym

5.1. Cel badań

Zastosowanie grawitacyjnego zasypu materiału nie zawsze umożliwia jego równomierny dopływ do strefy zagęszczania. Zasilacze ślimakowe są podzespołem pras walcowych umożliwiającym zagęszczanie ośrodków sypkich w sposób ciągły. Znalazły zastosowanie w prasach walcowych o walcach:

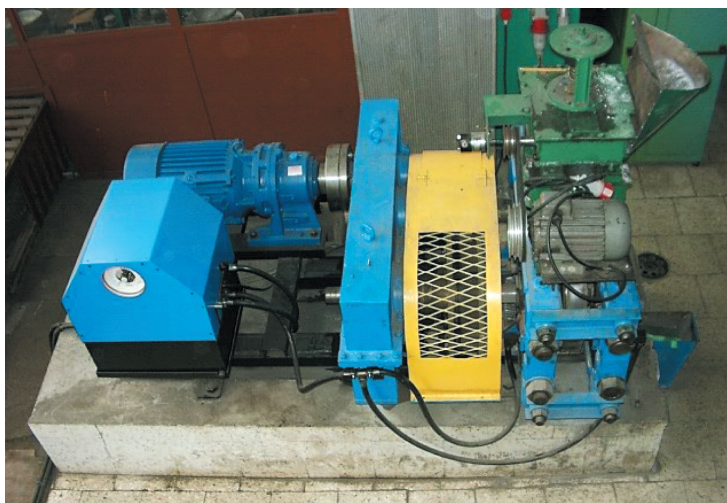
- z wgłębieniami formującymi (brykieciarki),
- gładkich (kompaktory).

Przykład zastosowania zasilaczy ślimakowych do brykietowania lub kompaktowania materiałów drobnoziarnistych przedstawiono na rysunku 5.1. Zazwyczaj stosuje się je do scalania materiałów drobnoziarnistych określanych jako „trudne do zagęszczania”. Zastosowanie zasilania wymuszonego w zespole prasy walcowej może się przyczynić do zwiększenia, w porównaniu z zasilaniem grawitacyjnym, przepływu materiału w jej strefę zagęszczania. Dzięki temu można osiągnąć lepsze upakowanie materiału drobnoziarnistego, Zasilanie wymuszone pozwala również zwiększyć prędkość obrotową walców prasy i – co za tym idzie – uzyskać większą wydajność urządzenia przy zachowaniu wysokich parametrów wytrzymałościowych brykietów. Jest to możliwe dzięki wytworzeniu większego nacisku jednostkowego we wgłębieniu formującym lub na powierzchni walca brykieciarki. Zasilacze ślimakowe umożliwiają ponadto, poza wstępnym zagęszczeniem materiału dozowanego, uzyskanie dodatkowych, często bardzo ważnych dla procesu brykietowania efektów. Przykładowo mogą powodować rozdrobnienie materiału w celu osiągnięcia najbardziej korzystnego, jeśli chodzi o możliwość brykietowania, składu ziarnowego czy też jego lepszą homogenizację. Występujące podczas rozdrabniania ziaren tarcie powoduje powstanie większej powierzchni kontaktu pomiędzy poszczególnymi ziarnami i dzięki wzrostowi temperatury aktywizuje zawarte w nich lepiszcze, co w konsekwencji prowadzi do powstania silniejszych wiązań międzyziarnowych podczas procesu zagęszczania.



Rys. 5.1. Zastosowanie zasilaczy ślimakowych do materiałów drobnoziarnistych:
a) brykietowanie; b) kompaktowanie

Wyniki badań przedstawione w rozdziale 4 monografii wykazały, że możliwe jest scalanie w warunkach laboratoryjnych mieszanek komunalnego osadu ściekowego w prasach walcowych. Z doświadczeń zespołu Katedry Systemów Wytwarzania AGH wynika jednak, iż w warunkach przemysłowych słabym punktem linii technologicznej jest węzeł zasypu materiału drobnoziarnistego w strefę zasilania prasy walcowej. Zawieszanie się materiału drobnoziarnistego z zasobnika wpływa negatywnie na jakość otrzymywanych brykietów lub wyprasek. Stąd postanowiono przeprowadzić badania możliwości scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych w laboratoryjnej prasie walcowej z zasilaniem wymuszonym. W tym celu wyposażono laboratoryjną prasę walcową LPW 450 w zasilacz ślimakowy (rys. 5.2).



Rys. 5.2. Zdjęcie laboratoryjnej prasy walcowej LPW 450 wyposażonej w zasilacz ślimakowy i gładkie walce

5.2. Metodyka badań

Materiał przygotowano zgodnie z procedurą opisaną w podrozdziale 4.2. Podobnie jak w przypadku badań scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych w prasie walcowej z zasilaczem grawitacyjnym zastosowano pierścienie formujące przeznaczone do wytwarzania brykietów bez płaszczyzny podziału, tzn. w kształcie siodła (objętość brykietu $6,5 \text{ cm}^3$) lub walce gładkie (grubość wypraski 5 mm). Prasa walcowa wyposażona była w zasilacz ślimakowy z wymiennymi elementami roboczymi (ślimakami) o różnych geometrycznych cechach konstrukcyjnych (zbieżności, skoku).

Napęd zasilacza ślimakowego składa się z silnika asynchronicznego o mocy $P_{\text{śl}} = 2,2 \text{ kW}$ i prędkości obrotowej nominalnej $n_n = 1410 \text{ obr/min}$ (50 Hz), trójstopniowej przekładni pasowej, przekładni ślimakowej oraz sprzęgła sztywnego połączonego ze ślimakiem. Opis geometrycznych cech konstrukcyjnych zastosowanych podczas badań ślimaków przedstawiono w tabeli 5.1.

Zdjęcie testowanego ślimaka nr 3 i 7 przedstawiono na rysunku 5.3.

Tabela 5.1

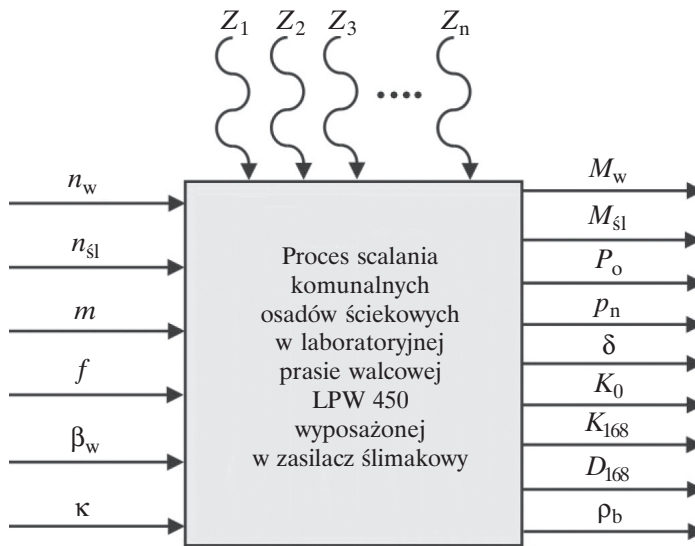
Charakterystyka zastosowanych ślimaków

Numer ślimaka	3	6	7
Kąt pochylenia linii śrubowej ślimaka po średnicy wewnętrznej $\beta_w, ^\circ$	43,69	43,69	32,48
Średni kąt pochylenia linii śrubowej ślimaka $\beta_m, ^\circ$	23,01	23,01	15,80
Kąt zbieżności ślimaka $\kappa, ^\circ$	7,85	0,00	0,00
Skok ślimaka $S, \text{ mm}$	60	60	40
Typ ślimaka	stożkowy	walcowy	walcowy



Rys. 5.3. Zdjęcie testowanych ślimaków: nr 3 (stożkowy) i nr 7 (walcowy)

Przygotowane w mieszarce mieszanki komunalnych osadów ściekowych, opisane w tabeli 4.1, podawano do zasilacza ślimakowego zainstalowanego nad strefą zagęszczania prasy walcowej. Ilość materiału drobnoziarnistego dozowanego jednorazowo wynosiła 5–7 kg. Mieszanekę scalano przy prędkościach obwodowych walców $v_w = 0,1\text{--}0,4$ m/s, co odpowiadało prędkości obrotowej $n_w = 4,24\text{--}16,99$ obr/min oraz przy prędkościach obrotowych ślimaka $n_{\text{śl}} = 73\text{--}124$ obr/min. Początkowa wartość szerokości szczeliny między walcami podczas brykietowania wynosiła $\delta_{\text{nom}} \sim 1,0$ mm. Przy próbach kompaktowania, czyli scalania między gładkimi walcami, mieszanki początkowa wartość szerokości szczeliny między walcami wynosiła $\delta_{\text{nom}} \sim 5,0$ mm. Schemat jakościowego modelu obiektu badań przedstawiono na rysunku 5.4.



Rys. 5.4. Schemat jakościowego modelu obiektu badań

Jako wielkości niezależne wytypowano:

- prędkość obrotową walców prasy n_w ,
- prędkość obrotową ślimaka $n_{\text{śl}}$,
- skład mieszanki m ,
- typ pierścieni formujących f ,
- kąt pochylenia linii śrubowej ślimaka po średnicy wewnętrznej β_w ,
- kąt zbieżności ślimaka κ .

Wielkościami zależnymi były:

- moment na wale prasy walcowej M_w ,
- moment na wale ślimaka $M_{\text{śl}}$,

- siła poosiowa oddziaływująca na wał ślimaka P_o ,
- nacisk jednostkowy we wgłębieniu formującym pierścieni prasy walcowej p_n ,
- szerokość szczeliny między walcami δ ,
- wytrzymałość na zrzut mierzona bezpośrednio po próbie K_0 ,
- wytrzymałość na zrzut mierzona po 168 h K_{168} ,
- wytrzymałość na ściskanie mierzona po 168 h D_{168} ,
- gęstość brykietu ρ_b .

Wartość momentu skręcającego na wale ślimaka rejestrowano za pomocą toru pomiarowego, w którego skład wchodził zestaw telemetryczny MT 2555A, przedwzmacniacz EV 2510A oraz wzmacniacz pomiarowy KMN 602A firmy Hottinger Baldwin Messtechnik. Tor pomiarowy siły poosiowej działającej na ślimak składał się z przystawki pomiarowej konstrukcji Katedry Systemów Wytwarzania AGH wyposażonej w siłomierz Q2/200-5 oraz wzmacniacz pomiarowy KMN 602A firmy Hottinger Baldwin Messtechnik (rys. 5.5).



Rys. 5.5. Przystawka do pomiaru siły poosiowej i momentu skręcającego na wale ślimaka

Prędkość obrotową ślimaka mierzono za pomocą prądniczki tachometrycznej EF.66.2.16.nf firmy Deuta-Werke.

5.3. Wyniki badań

Jednym z bardziej istotnych efektów badań było obliczenie wartości jednostkowego zapotrzebowania na energię Z_e niezbędną w procesie brykietowania mieszanek komunalnych osadów ściekowych. W tym celu określano całkowity pobór mocy N_c i wydajność masową prasy walcowej W_m .

Moc pobieraną w czasie procesu brykietowania N_c wyznaczano z zależności:

$$N_c = 2 \frac{M_w n_w}{9,55} + \frac{M_{\text{śl}} n_{\text{śl}}}{9,55}, \text{ kW} \quad (5.1)$$

gdzie:

M_w – moment na wale prasy walcowej, kNm,

$M_{\text{śl}}$ – moment na wale ślimaka, kNm,

n_w – prędkość obrotowa walców prasy, obr/min,

$n_{\text{śl}}$ – prędkość obrotowa ślimaka, obr/min.

Na rysunku 5.6 przedstawiono charakterystykę czasową momentu skręcającego na wale prasy walcowej, mierzoną przy prędkości obrotowej ślimaka $n_{\text{śl}} = 124$ obr/min i prędkości obrotowej walców prasy $n_w = 12,73$ obr/min.

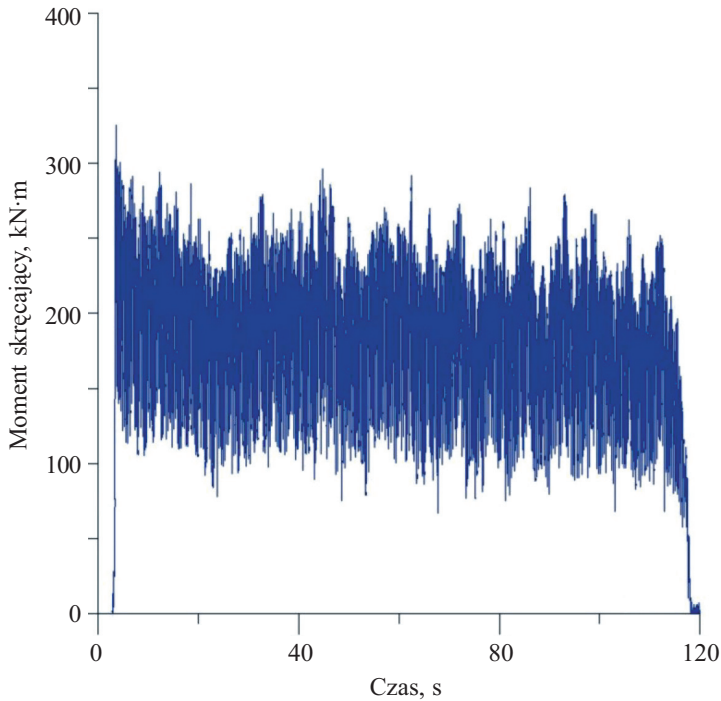
Ponieważ o skuteczności procesu brykietowania decyduje m.in. prawidłowość doboru prędkości obrotowych walców prasy i ślimaka, na potrzeby oceny wyników badań dwie zmienne niezależne, tj. prędkość obrotową prasy walcowej oraz prędkość obrotową ślimaka, zastąpiono bezwymiarową wielkością nazywaną współczynnikiem prędkości, wyrażającą się ilorazem $n_{\text{śl}}/n_w$. Wynikiem tego ustalenia było pominięcie wpływu czasu zagęszczania na wartość mierzonych czynników wyników.

Przyjęcie powyższego założenia upraszczającego umożliwiło ocenę wpływu parametrów kinematycznych prasy walcowej i zasilacza ślimakowego na wartość obciążenia jego elementu roboczego momentem skręcającym i siłą poosiową.

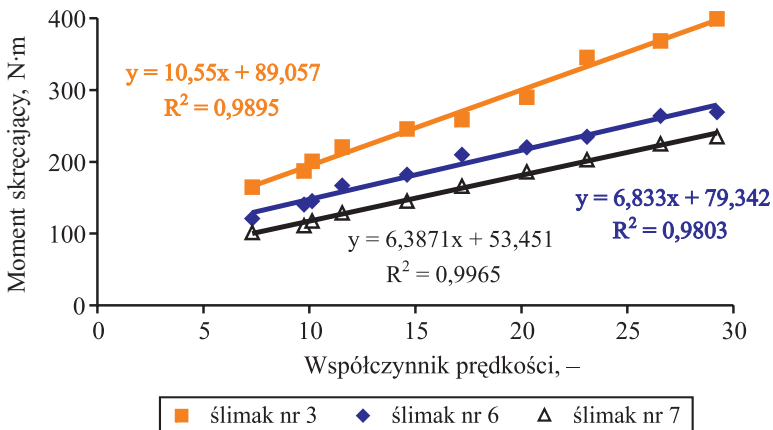
Na rysunku 5.7 przedstawiono zależność momentu skręcającego na wale ślimaka w czasie realizacji procesu brykietowania mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego (mieszanka A) od współczynnika prędkości.

Największe obciążenie elementu roboczego zasilacza występuje przy zastosowaniu ślimaka typu stożkowego, co jest konsekwencją jego skuteczności w zakresie zagęszczania mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego. Oprócz kąta zbieżności wpływ na wartość momentu skręcającego ma również skok ślimaka.

Podobne zależności uzyskano przy scalaniu pozostałych mieszanek komunalnych osadów ściekowych.



Rys. 5.6. Charakterystyka czasowa momentu skręcającego na wale ślimaka (kąt pochylenia linii śrubowej ślimaka po średnicy wewnętrznej $\beta_w = 32,48^\circ$, skok ślimaka $S = 40$ mm, kąt zbieżności $\kappa = 0^\circ$, średnica zewnętrzna ślimaka $D_z = 70$ mm, średnica wewnętrzna ślimaka $D_w = 20$ mm) mierzona przy prędkości obrotowej ślimaka $n_{sl} = 124$ obr/min i prędkości obrotowej walców prasy $n_w = 12,73$ obr/min



Rys. 5.7. Zależność momentu skręcającego na wale ślimaka w czasie realizacji procesu brykietowania mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego (mieszanka A) od współczynnika prędkości

Wydajność masową prasy walcowej W_m obliczano ze wzoru:

$$W_m = 60 V_b i_b n_w \rho_b, \text{ Mg/h} \quad (5.2)$$

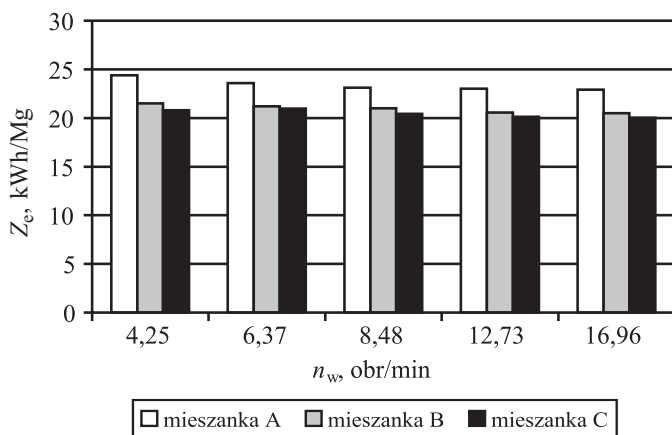
gdzie:

- V_b – objętość brykietu, m^3 ,
- i_b – liczba wgłębień formujących,
- n_w – prędkość obrotowa prasy walcowej, obr/min,
- ρ_b – gęstość brykietów, g/cm^3 .

Wartości jednostkowego zapotrzebowania na energię w czasie realizacji procesu brykietowania Z_e obliczano z zależności:

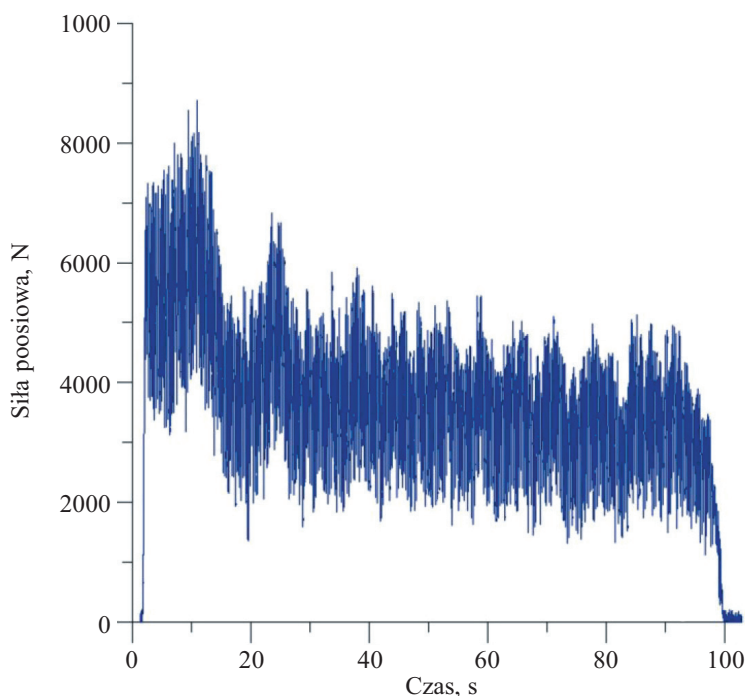
$$Z_e = \frac{N_c}{W_m}, \text{ kWh/Mg} \quad (5.3)$$

Wykres jednostkowego zapotrzebowania na energię Z_e w czasie brykietowania mieszanek komunalnych osadów ściekowych w prasie walcowej z niesymetrycznym układem zagęszczania i zasilaczem ślimakowym przedstawiono na rysunku 5.8.



Rys. 5.8. Wpływ prędkości obrotowej walców prasy na jednostkowe zapotrzebowanie na energię Z_e w czasie realizacji procesu brykietowania mieszanek komunalnych osadów ściekowych w prasie walcowej z niesymetrycznym układem zagęszczania, przy stałej wartości współczynnika prędkości wynoszącej 7,30 – ślimak nr 7

Drugą, obok momentu skręcającego, wielkością wynikową rejestrowaną podczas badań była siła poosiowa na wale ślimaka. Jej przykładową charakterystykę czasową mierzoną przy prędkości obrotowej ślimaka $n_{sl} = 124$ obr/min i prędkości obrotowej walców prasy $n_w = 12,73$ obr/min przedstawiono na rysunku 5.9.

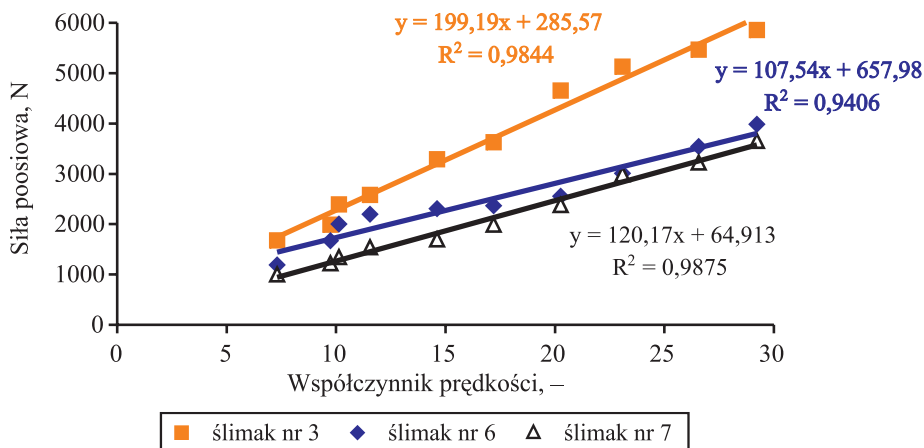


Rys. 5.9. Charakterystyka czasowa siły poosiowej na wale ślimaka (kąt pochylenia linii śrubowej ślimaka po średnicy wewnętrznej $\beta_w = 32,48^\circ$, skok ślimaka $S = 40$ mm, kąt zbieżności $\kappa = 0^\circ$, średnica zewnętrzna ślimaka $D_z = 70$ mm, średnica wewnętrzna ślimaka $D_w = 20$ mm) mierzony przy prędkości obrotowej ślimaka $n_{sl} = 124$ obr/min i prędkości obrotowej walców prasy $n_w = 12,73$ obr/min

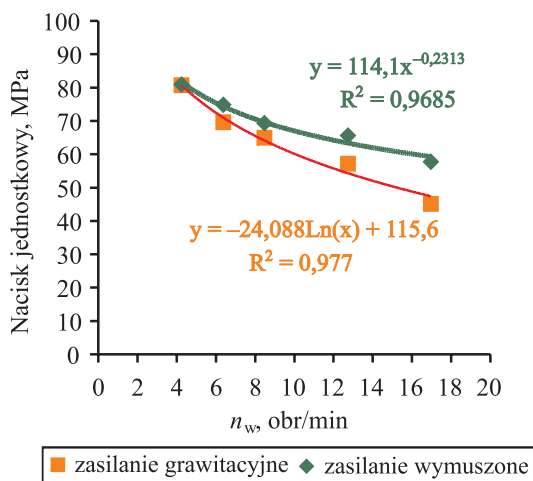
Widoczny na wykresie początkowy wzrost obciążenia wału ślimaka siłą poosiową jest wynikiem niejednoczesnego włączenia napędu zasilacza ślimakowego i prasy walcowej. W warunkach laboratoryjnych trudno jest zsynchronizować moment włączenia obu współpracujących urządzeń, stąd najczęściej włącza się najpierw zasilacz ślimakowy, a dopiero później prasę walcową. Konsekwencją tego jest chwilowe znaczne zagęszczenie materiału, które skutkuje zwiększonym obciążeniem ślimaka. W warunkach przemysłowych doprowadzenie do takiej sytuacji może skutkować ścięciem ostatnich zwojów ślimaka.

Na rysunku 5.10 przedstawiono wykres obrazujący zależność siły poosiowej na wale ślimaka od współczynnika prędkości w czasie realizacji procesu brykietowania mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego (mieszanka A), wyznaczoną dla trzech badanych elementów roboczych zasilacza.

Zastosowanie zasilacza ślimakowego doprowadziło do wzrostu nacisku jednostkowego we wgłębieniu formującym. Na rysunku 5.11 przedstawiono jego zależność od prędkości obrotowej walców prasy i rodzaju zasilania.



Rys. 5.10. Zależność siły poosiowej na wale ślimaka w czasie realizacji procesu brykietowania mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego (mieszanka A) od współczynnika prędkości

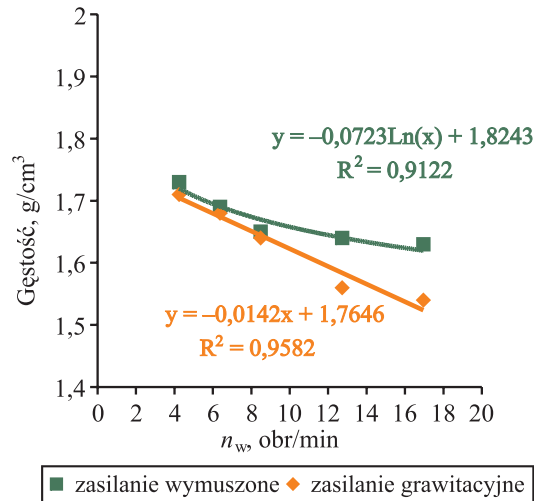


Rys. 5.11. Zależność nacisku jednostkowego od prędkości obrotowej walców prasy podczas scalania mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego (mieszanka A) w prasie walcowej wyposażonej w gładkie walce oraz zasilanie grawitacyjne i wymuszone (ślimak walcowy, $\beta_w = 43,68^\circ$) przy stałej wartości współczynnika prędkości wynoszącej 7,30

Dzięki zastosowaniu zasilacza ślimakowego uzyskano dwudziestokilkuprocentowy wzrost, w porównaniu z zasilaniem grawitacyjnym, wartości nacisku jednostkowego przy prędkości obwodowej równej 0,4 m/s.

Konsekwencją wzrostu nacisku jednostkowego we wgłębieniu formującym jest wzrost gęstości brykietów (rys. 5.12). Był on najbardziej zauważalny przy prędkości ob-

rotowej walców prasy wynoszącej 16,96 obr/min. Przy scalaniu mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego wynosił on ok. 6%. W przypadku mieszanki B i C wzrost gęstości brykietów zawierał się w granicach 2–7%.



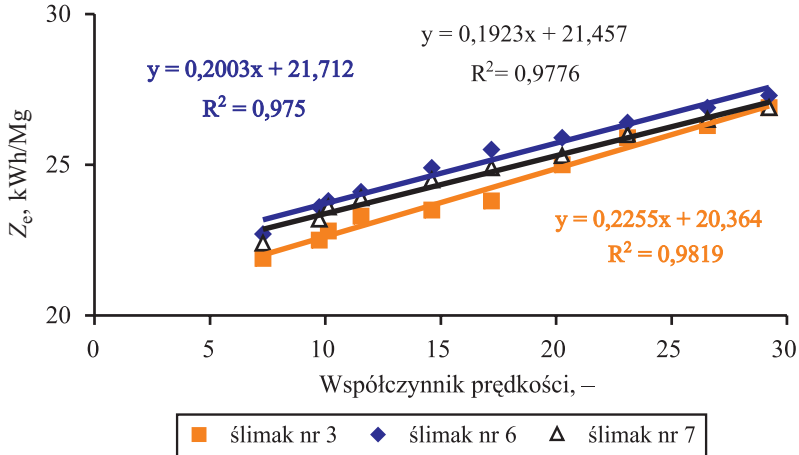
Rys. 5.12. Zależność nacisku jednostkowego od prędkości obrotowej walców prasy przy scalaniu mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego (mieszanka A) w prasie walcowej wyposażonej w gładkie walce oraz zasilanie grawitacyjne i wymuszone (ślimak walcowy, $\beta_w = 43,68^\circ$) przy stałej wartości współczynnika prędkości wynoszącej 7,30

O skuteczności brykietowania materiału drobnoziarnistego w prasie walcowej wyposażonej w zasilacz ślimakowy decydują wskaźniki określające jakość otrzymywanych brykietów (gęstość, wytrzymałość na zrzut, wytrzymałość na ściskanie i inne) oraz wskaźniki techniczno-ekonomiczne urządzenia (wydajność prasy walcowej, zapotrzebowanie na energię na jednostkę produkcji finalnej, trwałość pierścieni formujących itp.). Wartość wymienionych powyżej wskaźników zależy od prawidłowego doboru geometrycznych cech konstrukcyjnych elementu roboczego zasilacza ślimakowego oraz prędkości obrotowych walców prasy i ślimaka.

Na rysunku 5.13 przedstawiono zależność jednostkowego zapotrzebowania na energię Z_e w czasie realizacji procesu brykietowania mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego od współczynnika prędkości wyznaczoną dla trzech badanych ślimaków.

Istotną rolę przy identyfikacji technologii brykietowania odgrywa analiza wpływu rodzaju zastosowanego zasilania (grawitacyjny, ślimakowy) oraz geometrycznych cech konstrukcyjnych elementów roboczych zasilacza ślimakowego na wydajność prasy walcowej. Skuteczność podawania materiału drobnoziarnistego do strefy brykietowania prasy walcowej zależy od prawidłowości doboru geometrycznych cech konstrukcyjnych

elementu roboczego zasilacza ślimakowego oraz właściwej relacji między prędkością obrotową ślimaka a prędkością obrotową walców brykietarki. Jak wykazały powyższe wyniki badań, wpływ na wydajność identyfikowanego podzespołu ma zarówno rodzaj zastosowanego zasilania, jak i typ ślimaka.



Rys. 5.13. Zależność jednostkowego zapotrzebowania na energię Z_e w czasie realizacji procesu brykietowania mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego (mieszanka A) od współczynnika prędkości

Zasilacz ślimakowy ułatwiający przepływ mieszanek komunalnych osadów ściekowych w strefie zagęszczania prasy walcowej, przyczynia się do zwiększenia wydajności brykietarki. Decyzja o rodzaju zastosowanej konfiguracji układu zagęszczania powinna być poprzedzona gruntowną analizą skutków ekonomicznych (wydajność, jednostkowe zapotrzebowanie na energię) i procesowych (wytrzymałość mechaniczna i gęstość brykietów).

6. Praktyczne aspekty modelowania matematycznego procesu scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych w prasach walcowych

6.1. Modelowanie procesu scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych w prasach walcowych zasilanych grawitacyjnie

Problematyka modelowania matematycznego procesu zagęszczania materiałów drobnoziarnistych w prasach walcowych została szeroko omówiona w literaturze [17, 18, 47, 127, 128]. Przedmiotem zainteresowania ośrodków badawczych było przede wszystkim opracowanie formuł matematycznych określających rozkład nacisku jednostkowego [47, 48, 50]. Jak dotąd najlepszą zgodność modelu z rzeczywistą sytuacją fizyczną uzyskał w swoich badaniach M. Hryniewicz [47]. Podstawą jego rozważań były modele oparte na teorii przepływów zastosowane w pracach J. Johansona [71] i W. Herrmanna [44, 45].

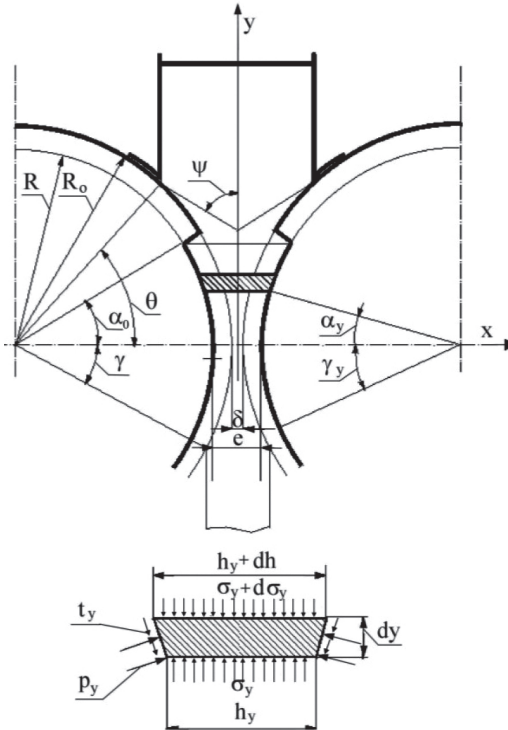
J. Johanson zależność określającą rozkład nacisku w strefie zagęszczania przedstawił za pomocą wzoru:

$$p_y = p_{\alpha_0} \left[\frac{\frac{d}{D} + \left(1 + \frac{\delta}{D} - \cos \alpha_0\right) \cos \alpha_0}{\frac{d}{D} + \left(1 + \frac{\delta}{d} - \cos \alpha_y\right) \cos \alpha_y} \right]^K \quad (6.1)$$

gdzie:

- p_y – nacisk jednostkowy w dowolnej fazie procesu zagęszczania,
- p_{α_0} – nacisk jednostkowy w ostatniej fazie procesu zagęszczania dla $\alpha = \alpha_{\max}$,
- d – średnia grubość brykietu przy szczelinie walcowej równej zero,
- D – średnica walców roboczych prasy walcowej,
- δ – szerokość szczeliny między walcami,
- α_0 – kąt chwytu,
- α_y – kąt w dowolnej fazie procesu zagęszczania,
- K – stała Johansona.

M. Hryniewicz w swoich pracach [47] zwrócił uwagę na niedoskonałość modelu J. Johansona, wskazując na jego częściowo analityczny charakter. Za poważną słabość uznał uwzględnianie właściwości materiału wyłącznie za pomocą stałej K . Wskazał ponadto na kontrowersyjność idealizacji rzeczywistej sytuacji fizycznej. Pominięcie występowania w części roboczej pierścieni formujących obszarów oddzielających wgłębienia uznał za zbyt znaczne uproszczenie rzeczywistej sytuacji fizycznej. W pracy [47] M. Hryniewicz dokonał oceny modeli opartych na teorii przepływu mas plastycznych oraz surowców ceramicznych. Po poddaniu ich gruntownej analizie wskazał na brak możliwości uwzględniania w nich zmian właściwości zbrylanego materiału. Wskazał również na istotne znaczenie dla przebiegu brykietowania układu zagęszczania. Jego idealizacja polegała na zastąpieniu brykietowania walcowaniem tzw. zastępczym układem walców. Stosując metodę cienkich przekrojów w strefie zagęszczania prasy walcowej, M. Hryniewicz wydzielił element objętości brykietowanego materiału ograniczony powierzchniami bocznymi walców i dwiema płaszczyznami prostopadłymi do kierunku przemieszczania się materiału odległymi od siebie o nieskończenie małą wartość dy (rys. 6.1).



Rys. 6.1. Schemat idealizacji układu zagęszczania prasy walcowej [48]: α_0 – kąt chwytu, α_y – kąt zagęszczenia, γ – kąt wyznaczający strefę rozprężania brykietów, γ_y – kąt rozprężania brykietów, δ – szerokość szczeliny między walcami, θ – kąt wyznaczający początek strefy podawania materiału, Ψ – kąt zasypu materiału, e – szerokość szczeliny między walcami w układzie zastępczym zagęszczania, R_0 – promień walców w układzie zastępczym, R – rzeczywisty promień walców

Porównując sumaryczną objętość wgłębień formujących na powierzchniach roboczych walców prasy z objętością płaskiego pasma walcowanego w układzie zastępczym, M. Hryniewicz otrzymał poniższą zależność, wyrażającą związek pomiędzy promieniami walców w układzie rzeczywistym i zastępczym:

$$R_0 = R - \frac{i_b V_b}{4\pi RB} \quad (6.2)$$

gdzie:

- R_0 – promień walców w układzie zastępczym,
- R – rzeczywisty promień walców,
- i_b – liczba wgłębień formujących,
- V_b – objętość brykietu,
- B – szerokość pierścienia.

Następnie w celu określenia zależności pomiędzy jednostkowymi siłami a naprężeniami występującymi na powierzchni wydzielonego elementu, korzystając z warunku równowagi działających na niego sił, wyprowadził równanie:

$$h_y d\sigma_y + \sigma_y dh_y - p_y dh_y + t_y \frac{dh_y}{\operatorname{tg}\alpha_y} = 0 \quad (6.3)$$

gdzie:

- h_y – odległość między walcami na poziomie kąta α_y ,
- σ_y – średnie naprężenie normalne,
- t_y – jednostkowa siła tarcia,
- α_y – kąt zagęszczenia.

Jednostkową siłę tarcia t_y na powierzchni walców M. Hryniewicz wyraził jako iloczyn kinetycznego współczynnika tarcia zewnętrznego μ_k , stanowiącego zmienną zależną od stopnia zagęszczenia oraz wilgotności scalanego materiału i nacisku jednostkowego p_y :

$$t_y = \mu_{(s,w)} p_y \quad (6.4)$$

Bazując na hipotezie największego naprężenia stycznego (warunek Treski), M. Hryniewicz zaproponował stosowanie w przypadku scalania materiału drobnodziarnistego w prasie walcowej korzystanie z następującej postaci warunku plastyczności:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \vartheta \quad (6.5)$$

gdzie:

- σ_1, σ_2 – naprężenia główne,
- ϑ – jednostkowy opór zagęszczania.

Jednostkowy opór zagęszczania M. Hryniewicz zdefiniował jako zmienną zależną od stopnia zagęszczania 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 [49].

Przyjmując, że $\sigma_1 = p_y$ oraz $\sigma_2 = \sigma_y$, M. Hryniewicz uzyskał szczególną postać warunku plastyczności, wyrażającą się wzorem:

$$p_y - \sigma_y = \vartheta \quad (6.6)$$

Po podstawieniu zależności (6.4) oraz (6.6) do równania (6.3) i wprowadzeniu uproszczenia polegającego na zastąpieniu łuku chwytu cięciwą ($\alpha_y = \alpha_0/2$) M. Hryniewicz otrzymał równanie:

$$\frac{dp_y}{dh_y} + p_y \frac{\mu_k \operatorname{ctg}(\alpha_0/2)}{h_y} = \frac{\vartheta}{h_y} + \frac{d\vartheta}{dh_y} \quad (6.7)$$

Dla zagęszczanego materiału o znanej wilgotności, czyli np. badanych mieszanek komunalnych osadów ściekowych, rozwiązanie równania (6.3) sprowadza się do wyznaczenia kąta chwytu α_0 oraz określenia szczególnych postaci formuł empirycznych $\vartheta = f(s)$ oraz $\mu_k = g(s)$.

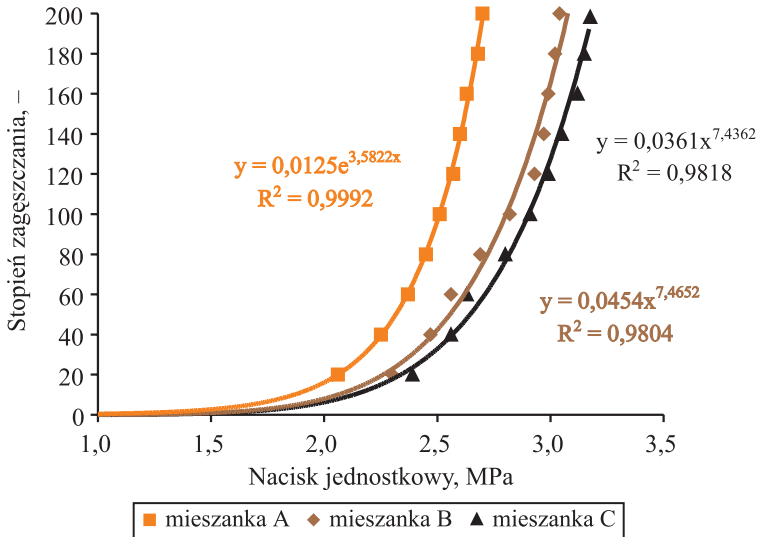
Jako pierwszy problem wyznaczenia kąta chwytu α_0 rozpoznał J. Johanson [71] i to z jego doświadczeń oraz wyników badań symulacyjnych początkowo korzystano. Dopiero M. Hryniewicz na podstawie badań brykietowania mieszanki koncentratu miedzi z dodatkiem ługu posulfitowego oraz mieszanki łupków przywęglowych z dodatkiem ługu posulfitowego wskazał na znaczną rozbieżność pomiędzy wynikami obliczeń wykonywanych w oparciu o doświadczenia J. Johansona a wynikami badań uzyskanymi w laboratorium Katedry Systemów Wytwarzania AGH [48]. Zaproponował, aby do obliczeń wartości kąta chwytu stosować wzór:

$$\alpha_0 = \arccos \left[1 - \frac{\left(\frac{i_b V_b}{2\pi R B} + e \right) (S_b - 1)}{2 \left(R - \frac{i_b V_b}{4\pi R B} \right)} \right] \quad (6.8)$$

gdzie:

- e – szerokość szczeliny między walcami w układzie zastępczym zagęszczania,
- S_b – stopień zagęszczenia brykietu.

Pierwsze z tych zależności określono, wyznaczając charakterystyki zagęszczania mieszanek komunalnych osadów ściekowych (metodykę opisano w podrozdziale 4.3). W celu zastosowania uzyskanych wyników badań w modelu zagęszczania charakterystyki przedstawiono w układzie $p_n = f(s)$ (rys. 6.2).



Rys. 6.2. Charakterystyki zagęszczania mieszanek komunalnych osadów ściekowych w układzie $p_n = f(s)$

Określenie ilościowego i jakościowego charakteru zmian współczynnika tarcia zewnętrznego par ciernych stal – mieszanki komunalnych osadów ściekowych wymagało wykonania specjalistycznych badań, które zostały opisane w podrozdziale 6.2.

6.2. Badania zmienności tarcia zewnętrznego w procesie scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych

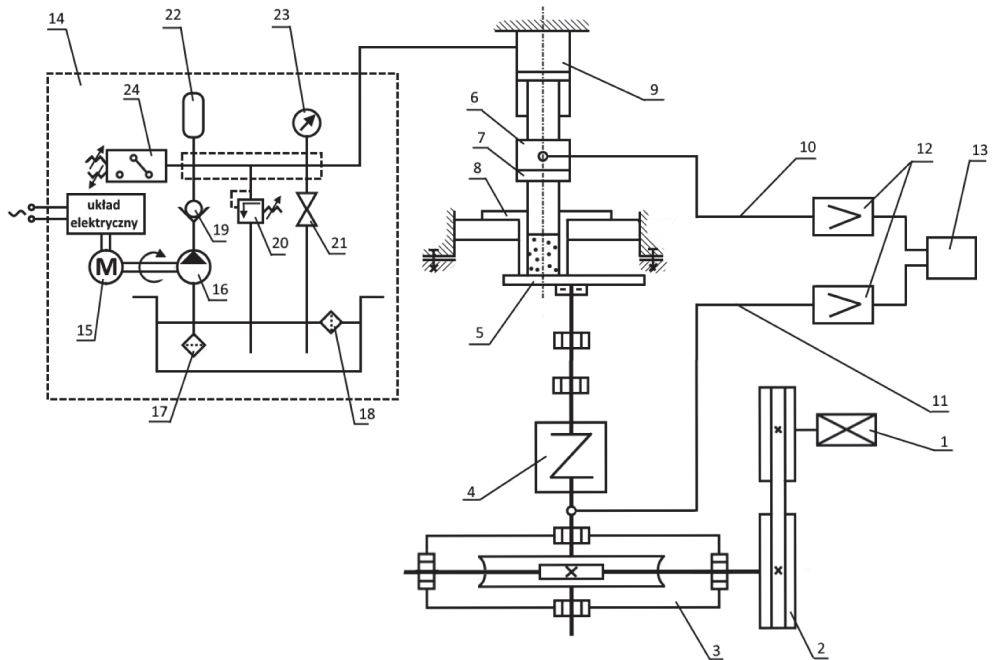
6.2.1. Cel badań

Badania własne autora pracy wskazały na istotny wpływ wartości współczynników statycznego i kinetycznego tarcia zewnętrznego na przebieg procesu scalania materiałów drobnoziarnistych w prasie walcowej [22, 51, 55]. Ponieważ w czasie procesu zagęszczania materiałów drobnoziarnistych zmienia się nacisk jednostkowy wywierany na scalany materiał, zasadne było określenie jego wpływu na jakościowy i ilościowy charakter zmian współczynnika statycznego oraz kinetycznego tarcia zewnętrznego

pary ciernej stal – mieszanki komunalnych osadów ściekowych. Badania przeprowadzono na specjalnie zaprojektowanym stanowisku laboratoryjnym, które wyposażono w odpowiednie tory pomiarowe.

6.2.2. Opis stanowiska laboratoryjnego

Stanowisko laboratoryjne, oznaczone symbolem STZ-1M, zostało zaprojektowane w Katedrze Systemów Wytwarzania AGH w ten sposób, aby możliwe było dokładne odwzorzenie zjawisk powierzchniowych zachodzących podczas brykietowania na granicy ośrodek zagęszczany – pierścień formujący. Konstrukcja stanowiska STZ-1M umożliwia również prowadzenie na nim badań zużycia tworzyw, np. w obecności zagęszczanego ośrodka syplkiego. Schemat i opis stanowiska przedstawiono na rysunku 6.3, a jego fotografię na rysunku 6.4.



Rys. 6.3. Schemat stanowiska laboratoryjnego do badania tarcia oraz zużycia w procesie brykietowania materiału drobnziarnistego STZ-1M: 1 – silnik elektryczny prądu zmiennego, 2 – przekładnia pasowa, 3 – przekładnia ślimakowa, 4 – sprzęgło podatne, 5 – tarcza stalowa, 6 – tensometryczny przetwornik siły nacisku, 7 – stempel, 8 – matryca, 9 – siłownik hydrauliczny, 10 – tor pomiarowy wartości siły nacisku, 11 – tor pomiarowy wartości momentu skręcającego, 12 – wzmacniacze pomiarowe, 13 – komputerowy system akwizycji danych, 14 – układ hydrauliczny, 15 – silnik elektryczny prądu zmiennego, 16 – pompa, 17 – filtr ssawny, 18 – filtr wlewny, 19 – zawór zwrotny, 20 – zawór przelewowy, 21 – zawór zamykający, 22 – akumulator gazowy, 23 – monometr, 24 – układ redukcji ciśnienia



Rys. 6.4. Fotografia stanowiska laboratoryjnego do badania tarcia oraz zużycia w procesie brykietowania materiału drobnoziarnistego STZ-1M

Stanowisko do badania tarcia i zużycia STZ-1M składa się z dwóch podzespołów: napędu tarczy oraz układu docisku stempla. Sposób rozwiązania napędu tarczy umożliwia płynną regulację jej prędkości obrotowej w zakresie 1,4–7,5 obr/min. Pomiary prowadzono przy prędkości obrotowej tarczy $n = 4,7$ obr/min, co odpowiadało prędkości liniowej $v = 0,02$ m/s.

Docisk stempla prowadzono za pomocą układu hydraulicznego, zapewniającego uzyskanie na powierzchni kontaktu siłownika hydraulicznego i stempla nacisku jednostkowego w zakresie 0–170 MPa. Wartość nacisku jednostkowego na powierzchni kontaktu stempla z zagęszczanym materiałem zależała od ciśnienia w układzie hydraulicznym i oporów tarcia pomiędzy stemplem i tuleją. Stanowisko badawcze wyposażone zostało w tory pomiarowe, umożliwiające rejestrację charakterystyk czasowych wartości następujących wielkości:

- momentu skręcającego na wale tarczy (5),
- siły nacisku wywieranej na stempel (6),
- siły nacisku wywieranej na przeciwpróbkę osadzoną na tarczy (5).

6.2.3. Metodyka badań

Wartość momentu skręcającego wał tarczy (5) mierzono za pomocą klasycznego układu tensometrycznego. Sygnał z układu pomiarowego przekazywany był przez wzmacniacz pomiarowy MGT 232C firmy Hottinger Baldwin Messtechnik do komputerowego systemu akwizycji danych.

Do skalowania toru pomiarowego momentu skręcającego użyto siłomierza pałkowego typu WK 19/05. Dokładność pomiaru siły w ciągnię wynosiła $\pm 0,3\%$ w pełnym zakresie pomiarowym. Skalowanie wykonano w spodziewanym przedziale zmian wartości momentu tarcia. Wartość siły nacisku wywieranej na stempel (6) mierzono za pomocą czujnika tensometrycznego. Tor pomiarowy składał się z tego samego wzmacniacza oraz komputerowego systemu akwizycji danych, których używano w przypadku pomiaru momentu skręcającego. Do skalowania toru pomiarowego wykorzystywano również siłomierz pałkowy typ WK 19/05.

Założono, że próbkę będzie stanowił brykiet w kształcie walca, wytworzony w matrycy zamkniętej o średnicy wewnętrznej 20 mm, a przeciwpróbkę tarcza wykonana ze stali NC6 (hartowanej w temperaturze 830°C w oleju i odpuszczanej w temperaturze 200°C), obrobiona cieplnie do twardości 65 HRC (wg PN-60/H-85023 – obecna norma PN-EN ISO 4957:2004) i początkowej chropowatości $R_a = 1,25$ po szlifowaniu zgrubnym. Stal tę cechuje średnia hartowność i duża twardość, dobra skrawalność, odporność na ścieranie, mała ciągliwość i odporność na odpuszczanie. Stal zachowuje wymiary po hartowaniu i nie ma skłonności do paczzenia się. Skład chemiczny zastosowanej stali NC6 przedstawiono w tabeli 6.1.

Tabela 6.1
Skład chemiczny stali NC6

C, %	Mn, %	Si, %	P, %	S, %	Cr, %	V, %
1,4	0,6	0,3	0,03	0,03	1,4	0,2

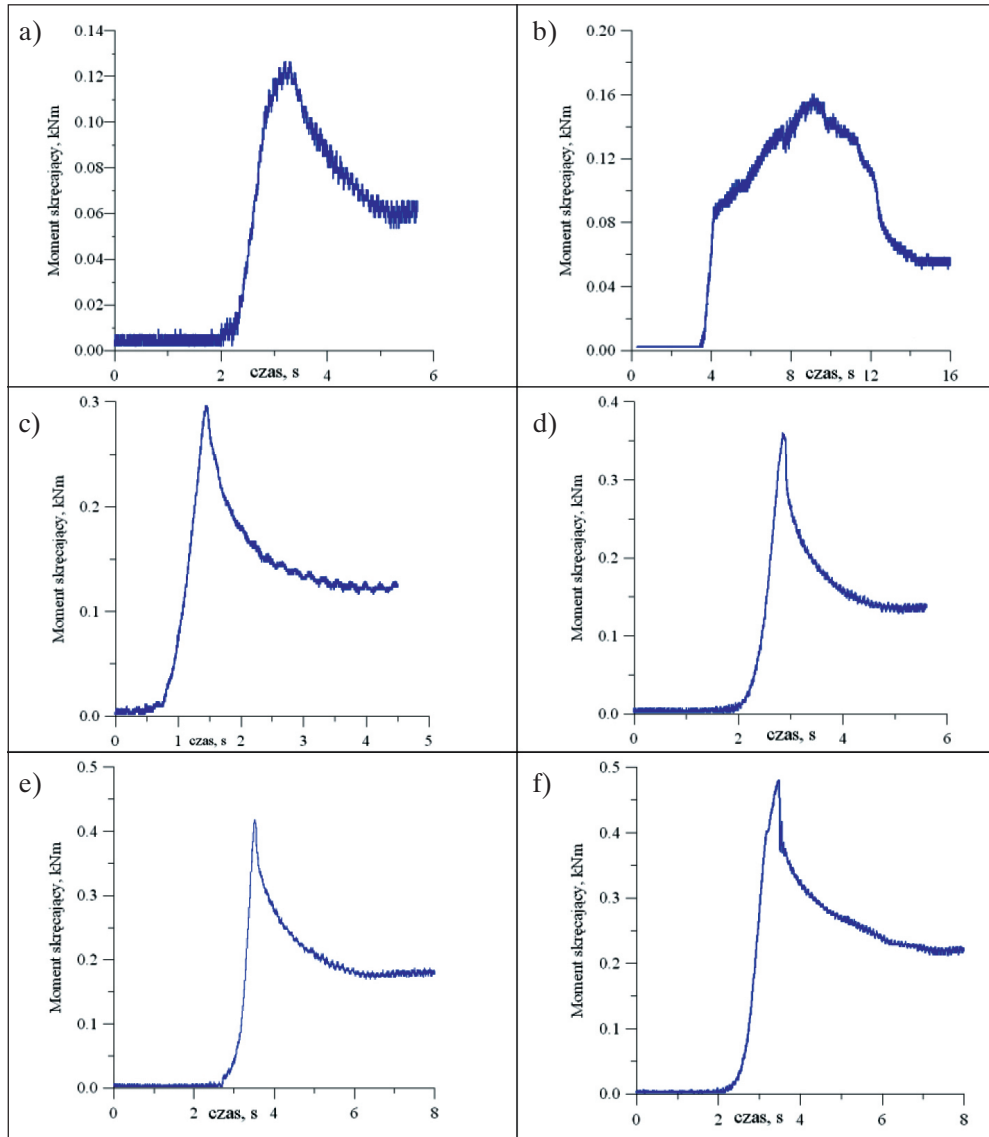
Stal NC6 jest jednym z tworzyw najczęściej stosowanych do wytwarzania pierścieni formujących w prasach walcowych (obok stali 35, NC10 oraz 18HGT). W Katedrze Systemów Wytwarzania wymienione wyżej tworzywa oraz stale NCV8 i 11G12 poddano badaniom pod kątem ich zużycia [19, 69]. Objętość próbki została dobrana doświadczalnie w ten sposób, aby po osiągnięciu najwyższego stopnia zagęszczenia iloraz jej wysokości do średnicy wynosił 1/3. W trakcie prowadzenia badań założono równomierny rozkład nacisku na powierzchni kontaktu stempla z próbką oraz pominięto wpływ odkształceń makro- i mikroobszarów styku na wartość współczynników statycznego i kinetycznego tarcia zewnętrznego.

Tarcie występujące na ścianach bocznych matrycy powoduje różnice między wartościami sił nacisku wywieranych na stempel oraz przeciwpróbkę. W celu pomiaru rzeczywistej wartości siły nacisku występującej na powierzchni kontaktu próbki z przeciwpróbką podnoszono matrycę i umieszczano pod nią czujnik tensometryczny.

6.2.4. Wyniki badań

Zgodnie z tematem zadania eksperymentalnie określono jakościowy i ilościowy charakter zmian współczynnika statycznego oraz kinetycznego tarcia zewnętrznego pary ciernej stal – zagęszczany materiał droбноziarnisty.

Przykładowy zapis charakterystyki czasowej wartości momentu skręcającego na wale tarczy stanowiska STZ-1M dla pary ciernej stalowa próbka – brykiety z mieszanki przedstawiono na rysunku 6.5.



Rys. 6.5. Przykładowy zapis charakterystyk czasowych wartości momentu skręcającego na wale tarczy stanowiska STZ-1M dla pary ciernej stalowa próbka – brykiety z mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego (mieszanka A) przygotowanych przy różnych wartościach nacisku jednostkowego na powierzchni kontaktu próbki z przeciwpróbką: a) 18,47 MPa; b) 38,14 MPa; c) 50,84 MPa; d) 63,56 MPa; e) 76,27 MPa; f) 88,97 MPa

Wyniki pomiarów przedstawione w tabelach 6.2–6.4 i na rysunkach 6.6–6.8 oraz przyjęte założenia upraszczające stanowiły podstawę do obliczenia współczynników statycznego i kinetycznego tarcia zewnętrznego. Posługiwano się w tym celu zależnościami:

$$\mu_s = \frac{M_{s(\max)}}{NR_T} \quad (6.9)$$

$$\mu = \frac{M_{s(\acute{s}r)}}{NR_T} \quad (6.10)$$

gdzie:

- μ_s – współczynnik statycznego tarcia zewnętrznego,
- μ – współczynnik kinetycznego tarcia zewnętrznego,
- $M_{s(\max)}$ – maksymalna wartość momentu skręcającego w trakcie rozruchu stanowiska pod obciążeniem,
- $M_{s(\acute{s}r)}$ – średnia wartość momentu skręcającego w ruchu ustalonym pod obciążeniem,
- N – wartość siły nacisku wywieranej na przeciwpróbkę,
- R_T – ramię siły tarcia ($R_T = 0,039$ mm).

Tabela 6.2

Wyniki badań zmienności współczynnika tarcia zewnętrznego w procesie brykietowania mieszanki komunalnych osadów ściekowych i wapna palonego (mieszanka A)

Lp.	Nacisk jednostkowy, MPa	Siła docisku, kN	Moment tarcia stat., kN·m	Siła tarcia stat., kN	Współ. stat. tarcia zewn., –	Moment tarcia kinet., kN·m	Siła tarcia kinet., kN	Współ. kinet. tarcia zewn., –
1	18,47	5,80	0,117	3,00	0,52	0,081	2,076	0,36
2	38,14	11,97	0,232	5,95	0,50	0,148	3,795	0,32
3	50,84	15,96	0,297	7,62	0,48	0,146	3,744	0,23
4	63,56	19,96	0,373	9,56	0,48	0,189	4,846	0,24
5	76,27	23,95	0,425	10,90	0,46	0,176	4,513	0,19
6	88,97	27,93	0,482	12,36	0,43	0,238	6,103	0,22

Tabela 6.3

Wyniki badań zmienności współczynnika tarcia zewnętrznego w procesie brykietowania mieszanki komunalnych osadów ściekowych, wapna palonego i węgla w proporcji 1:1 (mieszanka B)

Lp.	Nacisk jednostkowy, MPa	Siła docisku, kN	Moment tarcia stat., kN·m	Siła tarcia stat., kN	Współ. stat. tarcia zewn., –	Moment tarcia kinet., kN·m	Siła tarcia kinet., kN	Współ. kinet. tarcia zewn., –
1	19,07	5,99	0,114	2,93	0,49	0,064	2,037	0,34
2	39,88	12,53	0,225	5,76	0,46	0,122	3,884	0,31
3	53,91	16,94	0,284	7,28	0,43	0,138	4,404	0,26
4	68,76	21,60	0,354	9,07	0,42	0,156	4,968	0,23
5	82,45	25,90	0,414	10,62	0,41	0,163	5,180	0,20
6	95,22	29,91	0,455	11,66	0,39	0,169	5,384	0,18

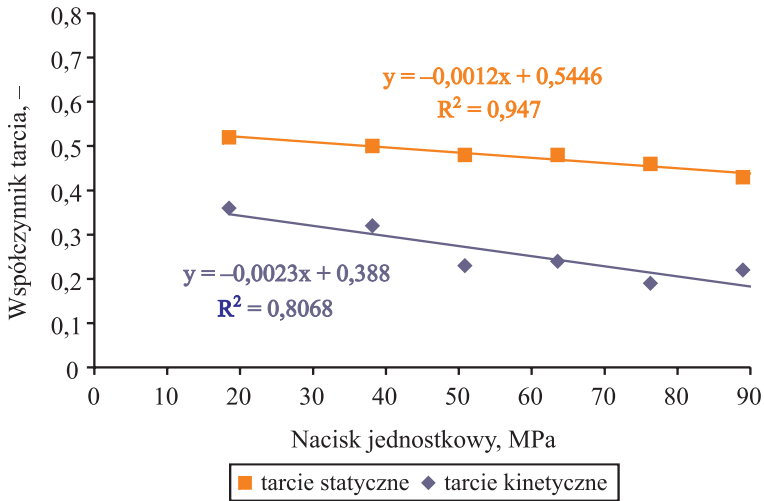
Tabela 6.4

Wyniki badań zmienności współczynnika tarcia zewnętrznego w procesie brykietowania mieszanki brykietowania mieszanki komunalnych osadów ściekowych, wapna palonego i węgla w proporcji 1:2 (mieszanka C)

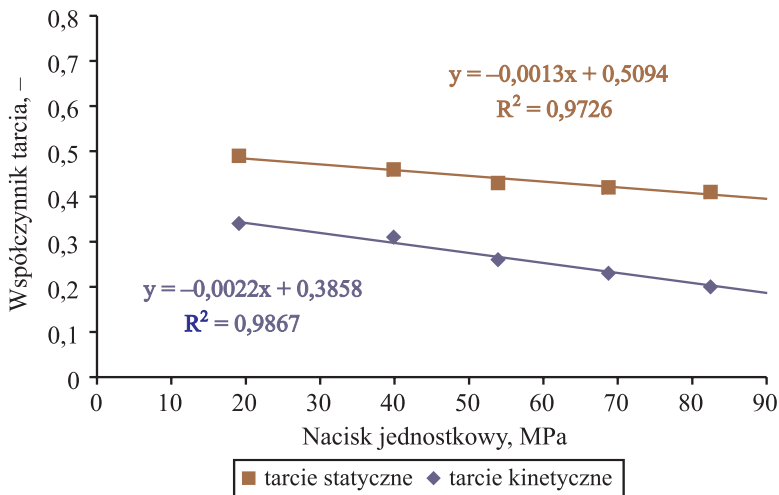
Lp.	Nacisk jednostkowy, MPa	Siła docisku, kN	Moment tarcia stat., kN·m	Siła tarcia stat., kN	Współ. stat. tarcia zewn., –	Moment tarcia kinet., kN·m	Siła tarcia kinet., kN	Współ. kinet. tarcia zewn., –
1	19,48	6,12	0,112	2,88	0,47	0,064	2,020	0,33
2	40,99	12,88	0,221	5,67	0,44	0,122	3,864	0,30
3	55,01	17,28	0,269	6,91	0,40	0,138	4,320	0,25
4	71,23	22,38	0,340	8,73	0,39	0,156	4,924	0,22
5	85,67	26,91	0,399	10,23	0,38	0,163	5,382	0,20
6	98,24	30,86	0,445	11,42	0,37	0,169	5,246	0,17

Uzyskanie formuł empirycznych opisujących tarcie zewnętrzne pary ciernej stal – mieszanki komunalnego osadu ściekowego w trakcie procesu zagęszczania umożliwiło konkretyzację modelu matematycznego procesu aglomeracji ciśnieniowej opisanego równaniem (6.7). Wyniki badań wskazały na istotny wpływ nacisku jednostkowego wywieranego na zagęszczany materiał drobnoziarnisty na wartość współczynnika

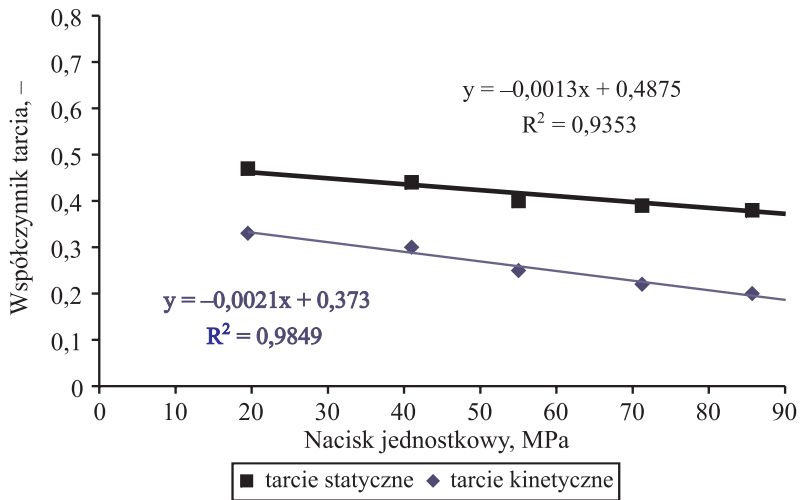
statycznego oraz kinetycznego tarcia zewnętrznego pary ciernej stal – zagęszczany materiał drobnoziarnisty. Wzrostowi nacisku jednostkowego towarzyszył znaczący spadek wartości współczynników tarcia zewnętrznego.



Rys. 6.6. Zależność współczynników statycznego i kinetycznego tarcia zewnętrznego od nacisku jednostkowego w procesie zagęszczania mieszanki komunalnych osadów ściekowych i wapna palonego (mieszanka A)

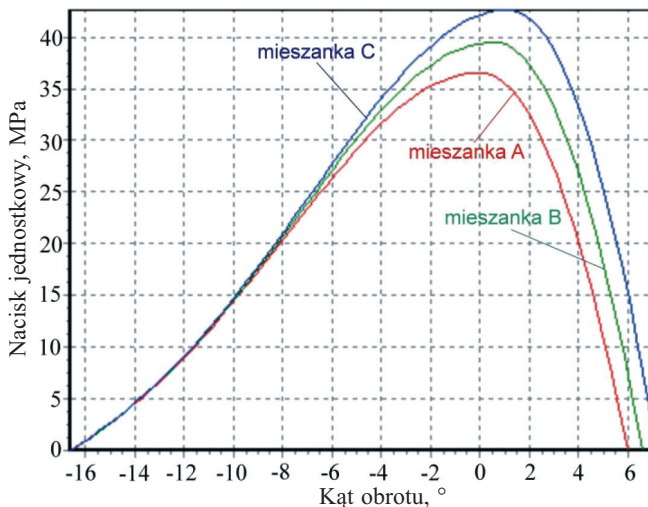


Rys. 6.7. Zależność współczynników statycznego i kinetycznego tarcia zewnętrznego od nacisku jednostkowego w procesie zagęszczania mieszanki komunalnych osadów ściekowych, wapna palonego i węgla w proporcji 1:1 (mieszanka B)



Rys. 6.8. Zależność współczynników statycznego i kinetycznego tarcia zewnętrznego od nacisku jednostkowego w procesie zagęszczania mieszanki komunalnych osadów ściekowych, wapna palonego i węgla w proporcji 1:2 (mieszanka C)

Dysponując szczególnymi postaciami formuł empirycznych $v = f(s)$ oraz $\mu_k = g(s)$, wyznaczono metodą eksperymentu symulacyjnego przebieg nacisku jednostkowego podczas procesu brykietowania mieszanek komunalnych osadów ściekowych w prasie walcowej LPW 450 z niesymetrycznym układem zagęszczania i zasilaniem grawitacyjnym (rys. 6.9).



Rys. 6.9. Przykład charakterystyk nacisku jednostkowego występujących podczas symulacji procesu brykietowania dla badanych mieszanek komunalnych osadów ściekowych w prasie walcowej LPW 450 z niesymetrycznym układem zagęszczania i zasilaniem grawitacyjnym

Uzyskane tą metodą wyniki badań symulacyjnych stanowią przybliżoną charakterystykę nacisku jednostkowego we wgłębieniu formującym. Wyniki badań uzyskane przez M. Hryniewicza [47] podczas badań brykietowania węgla brunatnego z odkrywki Józwin KWB Konin w prasie walcowej o niesymetrycznym układzie zagęszczania wskazują na zróżnicowany rozkład nacisku jednostkowego we wgłębieniu formującym. W przypadku brykietów w kształcie siodła maksymalna wartość nacisku jednostkowego przypada na środkową część brykietu. W tym właśnie miejscu gęstość brykietu jest największa.

6.3. Modelowanie procesu scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych w prasach walcowych z zasilaczem ślimakowym

6.3.1. Pasmowy model przepływu materiału drobnoziarnistego w zasilaczu ślimakowym

Rozważania dotyczące problematyki przepływu ciała stałego czy też cieczy w urządzeniach o elemencie roboczym w kształcie ślimaka były prowadzone od wielu lat. Szczególnie dużo uwagi poświęcono problemom przepływu materiałów plastycznych w prasach ślimakowych. Jako pierwsi próby identyfikacji procesu wytłaczania zachodzącego w prasach ślimakowych podjęli się W.H. Darnell i E.A.J. Mol [11]. Ich model, oparty na analizie przepływu w kanale ślimaka wydzielonego elementu materiału i rozpatrzeniu warunków równowagi sił działających na jego powierzchni, był przeznaczony do badania ośrodków kohezyjnych o stałej gęstości. Udoskonalił go E. Hallmann [41, 42], wprowadzając do modelu szereg współczynników korygujących uwzględniających stopień wypełnienia ślimaka, porowatość materiału czy też ograniczenie przepływu wynikające ze zmniejszenia objętości skokowej przez obwiednię śrubową. Kolejnej próby modelowania przepływu materiału w urządzeniach ślimakowych podjęli się J.G.A. Lovegrove i J.G. Williams [114, 115]. Również jednak ta trójwymiarowa analiza przepływu materiału nie uwzględniała zmienności właściwości (np. gęstości pozornej) materiału przepływającego przez ślimakowy element roboczy. Stąd, bazując na wynikach badań własnych, autor monografii opracował pasmowy model przepływu materiału w zasilaczu ślimakowym. Na wstępie wytypowano parametry konstrukcyjne, materiałowe i kinematyczne mające wpływ na przepływ materiału w zasilaczu ślimakowym, z których utworzono zbiór Φ :

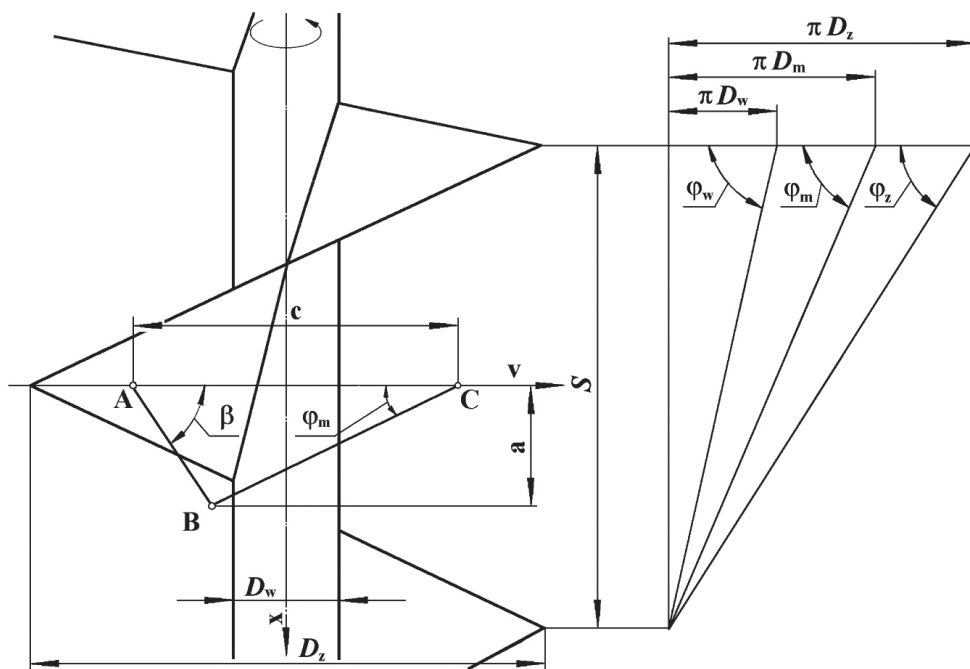
$$\Phi = \{\varphi_w(D_w, S), \varphi_m(D_m, S), \varphi_z(D_z, S), \kappa, i, j, \mu(w, t), \xi(w, t), m, n_{sl}\} \quad (6.11)$$

gdzie:

- φ_w – kąt pochylenia linii śrubowej ślimaka mierzony na średnicy wewnętrznej,
- D_w – średnica wewnętrzna ślimaka,

- S – skok ślimaka,
 φ_m – średni kąt pochylenia linii śrubowej ślimaka,
 $D_m = (D_z + D_w)/2$,
 φ_z – kąt pochylenia linii śrubowej ślimaka mierzony na średnicy zewnętrznej,
 D_z – średnica zewnętrzna ślimaka,
 κ – kąt zbieżności ślimaka,
 i – liczba ślimaków,
 j – krotność ślimaka,
 μ – współczynnik kinetycznego tarcia zewnętrznego,
 w – wilgotność materiału,
 t – temperatura materiału,
 ξ – współczynnik tarcia wewnętrznego,
 m – współczynnik bocznego nacisku,
 $n_{\text{śl}}$ – prędkość obrotowa ślimaka.

Na rysunku 6.10 przedstawiono graficzny opis podstawowych cech konstrukcyjnych identyfikujących element roboczy urządzenia ślimakowego.



Rys. 6.10. Graficzny opis podstawowych cech konstrukcyjnych identyfikujących element roboczy urządzenia ślimakowego

Przy tworzeniu modelu przyjęto następujące założenia upraszczające:

- rozważania ograniczono do analizy przepływu materiału drobnoziarnistego w zasilaczu wyposażonym w jeden jednozwojowy ślimak walcowy ($i = 1, j = 1, \kappa = 0^\circ$);
- w kanale ślimaka, w obrębie pasma, nie dochodzi do ścinania wewnętrznego materiału;
- zagęszczany materiał wypełnia całkowicie kanał ślimaka;
- na całej długości przepływu materiału na styku pary ciernej stal – materiał zagęszczany mamy do czynienia z kinetycznym tarcieniem zewnętrznym;
- wartość współczynnika bocznego nacisku jest stała;
- wartość współczynników tarcia zewnętrznego oraz wewnętrznego w zakresie nacisków jednostkowych 0–2 MPa jest stała;
- wytrzymałość materiału przepływającego przez zasilacz ślimakowy odpowiada modelowi Coulomba–Mohra bez wzmocnienia gęstościowego;
- pominięto wpływ siły odśrodkowej.

Czas przepływu pojedynczego ziarna materiału drobnoziarnistego z punktu A do punktu B (rys. 6.9) określono zgodnie z procedurą przyjętą przy próbach identyfikacji procesu wytłaczania zachodzącego w prasach ślimakowych:

$$t = \frac{c}{v} = \frac{a}{v_x} \quad (6.12)$$

gdzie:

- t – czas przepływu pojedynczego ziarna materiału drobnoziarnistego z punktu A do punktu B,
- c – droga, jaką teoretycznie może przebyć pojedyncze ziarno materiału drobnoziarnistego, gdy $\varphi_w = \varphi_m = \varphi_z = 90^\circ$,
- v – prędkość obwodowa ślimaka,
- a – droga, jaką przebywa pojedyncze ziarno materiału drobnoziarnistego względem osi x ,
- v_x – składowa prędkości obwodowej ślimaka względem osi x .

Po przekształceniach uzyskano:

$$v_x = \frac{v \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \varphi_m}{\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \varphi_m} \quad (6.13)$$

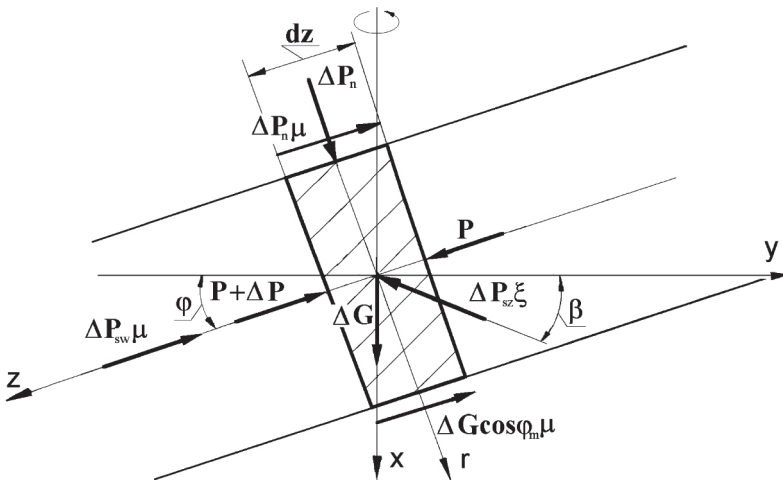
gdzie β – kąt przepływu materiału drobnoziarnistego w zasilaczu ślimakowym, $^\circ$.

Przyjmując liniową zależność wydajności zasilacza od prędkości przepływu materiału, a także uwzględniając (6.13), otrzymano wzór na wydajność masową zasilacza ślimakowego Q_m :

$$Q_m = 15\pi^2 (D_z^2 - D_w^2) D_m n_{sl} \frac{\text{tg}\beta \text{tg}\varphi_m}{\text{tg}\beta + \text{tg}\varphi_m} \rho_w \quad (6.14)$$

gdzie ρ_w – gęstość wypływającego z zasilacza materiału.

Do ustalenia wydajności przepływu materiału drobnoziarnistego przez zasilacz ślimakowy przy zastosowaniu równania (6.14) konieczna jest znajomość wartości kąta β . Wyznaczenie tej wielkości poprzedzono odpowiednimi rozważaniami teoretycznymi. W tym celu wydzielono element materiału ograniczony zwojami ślimaka oraz dwiema płaszczyznami prostopadłymi do kierunku przemieszczania się materiału, odległymi od siebie o nieskończenie małą wartość dz (rys. 6.11), a następnie skorzystano z warunku równowagi sił działających na ten element.



Rys. 6.11. Schemat rozkładu sił działających na wydzielony element materiału przepływającego przez zasilacz ślimakowy

Na wydzielony element objętości materiału działają następujące siły:

- G – siła ciężkości materiału, prostopadła do powierzchni odniesienia;
- $G \cos \varphi_m \mu$ – siła tarcia zewnętrznego na powierzchni zwoju ślimaka pochodząca od składowej siły ciężkości; jej kąt z płaszczyzną odniesienia wynosi φ_m ;

- P_n – siła normalna do powierzchni zwoju ślimaka; jej kąt z płaszczyzną odniesienia wynosi $90^\circ - \varphi_m$;
- $P_n \mu$ – siła tarcia zewnętrznego na powierzchni zwoju ślimaka; jej kąt z płaszczyzną odniesienia wynosi φ_m ;
- $P_{sw} \mu$ – siła tarcia zewnętrznego na powierzchni wału ślimaka; przeciwdziała ruchowi materiału pod kątem φ_w do płaszczyzny odniesienia;
- $P_{sz} \xi$ – siła tarcia wewnętrznego pomiędzy materiałem nagromadzonym w rowkach cylindra a materiałem przepływającym przez kanał ślimaka; działa pod kątem β do płaszczyzny odniesienia;
- P – siła wynikająca z przyrostu ciśnienia materiału; działa pod kątem φ_m do płaszczyzny odniesienia.

Na podstawie schematu rozkładu sił działających na wydzielony element materiału przepływającego przez zasilacz ślimakowy można je opisać następującymi równaniami:

- Siła ΔP_{sz} :

$$\Delta P_{sz} = p A_1 m \quad (6.15)$$

gdzie p – ciśnienie materiału w zasilaczu ślimakowym.

Wartość współczynnika bocznego nacisku m można wyliczyć z wzoru [154]:

$$m = \frac{1}{1 + 2\xi^2 + 2\sqrt{(1 + \mu^2)(\xi^2 - \mu^2)}} \quad (6.16)$$

a pole powierzchni A_1 :

$$A_1 = S \cos \varphi_z \frac{D_z}{D_m} dz \quad (6.17)$$

Stąd:

$$\Delta P_{sz} = p S \cos \varphi_z \frac{D_z}{D_m} m dz \quad (6.18)$$

- Siła ΔG :

$$\Delta G = V \rho g \quad (6.19)$$

gdzie:

- V – objętość rozpatrywanego elementu materiału,
- ρ – gęstość zagęszczanego materiału,
- g – przyspieszenie ziemskie.

Objętość można obliczyć z wzoru:

$$V = \frac{D_z - D_w}{2} S \cos \varphi_z dz \quad (6.20)$$

Zakładając, że:

$$\rho = ap \quad (6.21)$$

gdzie a – moduł zagęszczenia (odpowiednik modułu Younga dla ośrodków zagęszczanych) [78, 84]:

$$a = \frac{s\rho_0}{p} \quad (6.22)$$

gdzie ρ_0 – gęstość nasypowa materiału,

po podstawieniu (6.20) i (6.21) do (6.19) otrzymano:

$$\Delta G = \frac{D_z - D_w}{2} apgS \cos \varphi_z dz \quad (6.23)$$

– Siła ΔP :

$$\Delta P = A_2 dp \quad (6.24)$$

$$A_2 = \frac{D_z - D_w}{2} S \cos \varphi_m \quad (6.25)$$

$$\Delta P = \frac{D_z - D_w}{2} S \cos \varphi_m dp \quad (6.26)$$

– Siła ΔP_{sw} :

$$\Delta P_{sw} = pA_3 m \quad (6.27)$$

$$A_3 = S \cos \varphi_w \frac{D_w}{D_m} dz \quad (6.28)$$

$$\Delta P_{sw} = S \cos \varphi_w \frac{D_w}{D_m} pmdz \quad (6.29)$$

Suma współrzędnych sił prostopadłych do kanału ślimaka wynosi:

$$\Delta P_r = \Delta P_n - \Delta P_{sz} \xi \sin(\varphi_z + \beta) + \Delta G \cos \varphi_m = 0 \quad (6.30)$$

Suma współrzędnych sił działających wzdłuż kanału wynosi:

$$\Delta P_z = \Delta G \sin \varphi_m + \Delta P_{sz} \xi \cos (\varphi_z + \beta) - \Delta P - \Delta P_{sw} \mu - \Delta G \cos \varphi_m \mu - \Delta P_n \mu = 0 \quad (6.31)$$

Po podstawieniu do równania (6.30) zależności (6.18) oraz (6.23) otrzymano wzór na ΔP_n :

$$\Delta P_n = S \cos \varphi_z \xi \sin (\varphi_z + \beta) p m d z \frac{D_z}{D_m} - \frac{D_z - D_w}{2} S a p g \cos^2 \varphi_m d z \quad (6.32)$$

Po podstawieniu prawej strony równania (6.32) za ΔP_n do wzoru (6.31) otrzymano równanie:

$$\begin{aligned} p d z S \left\{ \frac{D_z - D_w}{2} \cos \varphi_m a g [\sin \varphi_m - \cos \varphi_m \mu + \cos \varphi_m] + \right. \\ \left. + \frac{D_z}{D_m} m \cos \varphi_z \xi [\cos (\varphi_z + \beta) - \sin (\varphi_z + \beta)] - m \cos \varphi_w \mu \frac{D_w}{D_m} \right\} + \\ - \frac{D_z - D_w}{2} S \cos \varphi_m d p = 0 \end{aligned} \quad (6.33)$$

Po podstawieniu za:

$$\begin{aligned} E = S \left\{ \frac{D_z - D_w}{2} \cos \varphi_m a g [\sin \varphi_m - \cos \varphi_m \mu + \cos \varphi_m] + \right. \\ \left. + \frac{D_z}{D_m} m \cos \varphi_z \xi [\cos (\varphi_z + \beta) - \sin (\varphi_z + \beta)] - m \cos \varphi_w \mu \frac{D_w}{D_m} \right\} \end{aligned} \quad (6.34)$$

oraz za:

$$F = \frac{D_z - D_w}{2} S \cos \varphi_m \quad (6.35)$$

otrzymano równanie różniczkowe zwyczajne o rozdzielonych zmiennych:

$$E p d z - F d p = 0 \quad (6.36)$$

Po scałkowaniu i uwzględnieniu warunków brzegowych uzyskano równanie przepływu materiału drobnoziarnistego w kanale ślimaka:

$$p_k = p_p e^{\frac{E}{F}z} \quad (6.37)$$

gdzie:

p_k – wartość nacisku wywieranego przez zagęszczany materiał drobnoziarnisty na ostatni zwój ślimaka,

p_p – nacisk wywierany przez zagęszczany materiał na pierwszy zwój ślimaka,

z – długość wstępnie zagęszczanego pasma materiału drobnoziarnistego.

Przy doborze geometrycznych cech konstrukcyjnych prasy walcowej i zasilacza ślimakowego należy uwzględnić warunek stałości przepływu masowego określony równaniem:

$$Q_m = W_m \quad (6.38)$$

gdzie:

Q_m – wydajność masowa zasilacza ślimakowego,

W_m – wydajność masowa prasy walcowej.

Podstawiając za Q_m zależność (6.14) oraz za W_m zależność (4.4), otrzymano wzór (6.39) umożliwiający wyznaczenie wartości stopnia zagęszczenia możliwego do uzyskania w prasie walcowej wyposażonej w kształtowe pierścienie formujące:

$$s_b = \frac{\rho_b}{\rho_w} = \frac{\pi^2 (D_z^2 - D_w^2) D_m n_{sl} \frac{\text{tg}\beta \text{tg}\varphi_m}{\text{tg}\beta + \text{tg}\varphi_m}}{4 V_b i_b n_w} \quad (6.39)$$

W przypadku stosowania pierścieni gładkich po podstawieniu za W_{mk} zależności (4.7) wartość stopnia zagęszczenia będzie równa:

$$s_b = \frac{\rho_b}{\rho_w} = \frac{\pi^2 (D_z^2 - D_w^2) D_m n_{sl} \frac{\text{tg}\beta \text{tg}\varphi_m}{\text{tg}\beta + \text{tg}\varphi_m}}{240 \delta B v_w} \quad (6.40)$$

Zależność ta umożliwia ocenę wpływu poszczególnych wielkości występujących po prawej stronie równania (6.40) na wartość stopnia zagęszczenia możliwego do uzyskania w prasie walcowej wyposażonej w zasilacz ślimakowy.

6.3.2. Model obciążenia elementu roboczego zasilacza ślimakowego

W czasie podawania materiału drobnoziarnistego do strefy zagęszczania prasy walcowej element roboczy zasilacza ślimakowego jest narażony na zniszczenie wskutek występowania obciążeń od siły poosiowej i momentu skręcającego.

Całkowita siła poosiowa, jaką jest obciążony ślimak, stanowi sumę sił cząstkowych:

$$\sum P_x = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 \quad (6.41)$$

gdzie:

- P_1 – siła cząstkowa pochodząca od rzutu siły G na oś x ,
- P_2 – siła cząstkowa pochodząca od rzutu siły P_n na oś x ,
- P_3 – siła cząstkowa pochodząca od rzutu siły $P_{n\mu}$ na oś x ,
- P_4 – siła cząstkowa pochodząca od rzutu siły $P_{sw\mu}$ na oś x ,
- P_5 – siła cząstkowa pochodząca od rzutu siły P na oś x .

Zatem:

$$\sum \Delta P_x = -\Delta G + \Delta P_n \cdot \cos \varphi_m - \Delta P_n \cdot \mu \cdot \sin \varphi_m - \Delta P_{sw} \cdot \mu \cdot \sin \varphi_w - \Delta P \cdot \sin \varphi_m \quad (6.42)$$

Po podstawieniach oraz przekształceniach otrzymano:

$$\begin{aligned} \sum \Delta P_x = p S dz \left\{ -\frac{D_z - D_w}{2} \cos \varphi_m ag + \left[\cos \varphi_z \xi \sin(\varphi_z + \beta) m \frac{D_z}{D_m} + \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{D_z - D_w}{2} ag \cos^2 \varphi_m \right] [\cos \varphi_m - \sin \varphi_m \mu] + \right. \\ \left. - \cos \varphi_w \mu \sin \varphi_w m \frac{D_w}{D_m} \right\} - \frac{D_z - D_w}{2} S \cos \varphi_m \sin \varphi_m dp \end{aligned} \quad (6.43)$$

Po podstawieniu za:

$$\begin{aligned} C(\beta) = S \left\{ -\frac{D_z - D_w}{2} \cos \varphi_m ag + \left[\cos \varphi_z \xi \sin(\varphi_z + \beta) m \frac{D_z}{D_m} + \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{D_z - D_w}{2} ag \cos^2 \varphi_m \right] [\cos \varphi_m - \sin \varphi_m \mu] - \cos \varphi_w \mu \sin \varphi_w m \frac{D_w}{D_m} \right\} \end{aligned} \quad (6.44)$$

oraz za:

$$D = \frac{D_z - D_w}{2} \cdot S \cdot \cos \varphi_m \cdot \sin \varphi_m \quad (6.45)$$

otrzymano wzór na wartość siły poosiowej obciążającej wał ślimaka P_0 :

$$\sum P_0 = C(\beta) \cdot p_k \cdot z + D \cdot (p_k - p_p) \quad (6.46)$$

Równanie momentów względem osi ślimaka można przedstawić w następujący sposób:

$$\sum M_y = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 \quad (6.47)$$

gdzie:

- M_1 – moment oporu pochodzący od składowej siły P_n na oś y ,
- M_2 – moment oporu pochodzący od składowej siły $P_n \mu$ na oś y ,
- M_3 – moment oporu pochodzący od siły $G \mu$,
- M_4 – moment oporu pochodzący od składowej siły $P_{sw} \mu$ na oś y ,
- M_5 – moment oporu pochodzący od składowej siły P na oś y .

$$\begin{aligned} \sum \Delta M_y = & \Delta P_n \sin \varphi_m \frac{D_m}{2} + \Delta P_n \mu \cos \varphi_m \frac{D_m}{2} + \\ & + \Delta G \mu \frac{D_m}{2} + \Delta P_{sw} \mu \cos \varphi_w \frac{D_w}{2} + \Delta P \cos \varphi_m \end{aligned} \quad (6.48)$$

Po przekształceniach otrzymano:

$$\begin{aligned} \sum \Delta M_y = & \left[\sin \varphi_m \frac{D_m}{2} + \mu \cos \varphi_m \frac{D_m}{2} \right] + \left[S \cos \varphi_z \xi \sin(\varphi_z + \beta) p m dz \frac{D_z}{D_m} + \right. \\ & \left. - \frac{D_z - D_w}{2} S a p g \cos^2 \varphi_m dz \right] + \frac{D_z - D_w}{2} S \cos \varphi_m a p g G \mu \frac{D_m}{2} dz + \\ & + S \mu \cos^2 \varphi_w p m \frac{D_w}{2} dz \frac{D_w}{D_m} + \frac{D_z - D_w}{2} S \cos^2 \varphi_m \frac{D_m}{2} dp \end{aligned} \quad (6.49)$$

Po podstawieniach uzyskano:

$$\begin{aligned} \sum \Delta M_y = pdzS \left\{ \left[\sin \varphi_m + \mu \cos \varphi_m \right] \left[\cos \varphi_z \xi \sin(\varphi_z + \beta) m \frac{D_z}{2} + \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{D_z - D_w}{2} ag \cos^2 \varphi_m \frac{D_m}{2} \right] + \mu \left[\frac{D_z - D_w}{2} \cos \varphi_m ag \frac{D_m}{2} + \cos^2 \varphi_w m \frac{D_w^2}{2D_m} \right] \right\} + \\ \frac{D_z - D_w}{2} S \cos^2 \varphi_m \frac{D_m}{2} dp \end{aligned} \quad (6.50)$$

Po podstawieniu za:

$$\begin{aligned} A(\beta) = S \left\{ \left[\sin \varphi_m + \mu \cos \varphi_m \right] \left[\cos \varphi_z \xi \sin(\varphi_z + \beta) m \frac{D_z}{2} + \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{D_z - D_w}{2} ag \cos^2 \varphi_m \frac{D_m}{2} \right] + \right. \\ \left. + \mu \left[\frac{D_z - D_w}{2} \cos \varphi_m ag \frac{D_m}{2} + \cos^2 \varphi_w m \frac{D_w^2}{2D_m} \right] \right\} \end{aligned} \quad (6.51)$$

oraz za:

$$B = \frac{D_z - D_w}{2} S \cos^2 \varphi_m \frac{D_m}{2} \quad (6.52)$$

otrzymano wzór na wartość momentu skręcającego obciążającego wał ślimaka $M_{\text{śl}}$:

$$M_{\text{śl}} = A p_k z + B(p_k - p_p) \quad (6.53)$$

Określenie wartości siły poosiowej i momentu skręcającego pozwala na wyznaczenie geometrycznych cech konstrukcyjnych elementu roboczego zasilacza ślimakowego oraz dobór napędu dla tego podzespołu. Pozwala ponadto na przeprowadzenie symulacji komputerowej z wykorzystaniem omawianego modelu, która zastępuje pracochłonne badania empiryczne.

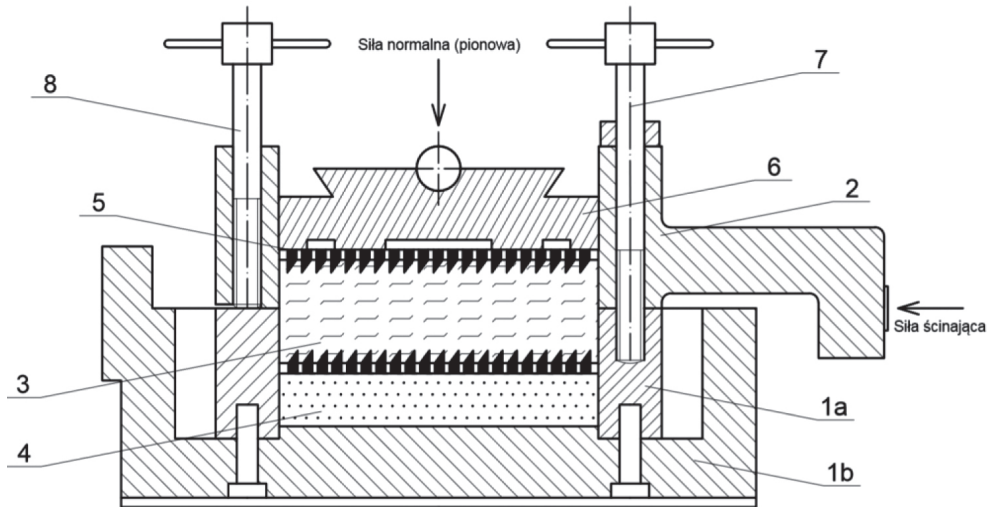
Zastosowanie modelu pasmowego do badań symulacyjnych konkretnego materiału drobnoziarnistego jest związane z wyznaczeniem wartości jego parametrów mate-

riałowych. Należą do nich m.in.: kąt tarcia wewnętrznego, statyczny i kinetyczny kąt tarcia zewnętrznego oraz współczynnik bocznego nacisku. Mając na uwadze wartość nacisku jednostkowego wywieranego na mieszanki komunalnych osadów ściekowych, podczas ich wstępnego zagęszczania w zasilaczu ślimakowym zdecydowano, że urządzeniem, w którym wyznaczane będą ww. parametry materiałowe, będzie aparat bezpośredniego ścinania typu AB-2a.

6.3.3. Wyznaczanie wartości kąta tarcia wewnętrznego i zewnętrznego mieszanek komunalnych osadów ściekowych przepływających przez zasilacz ślimakowy

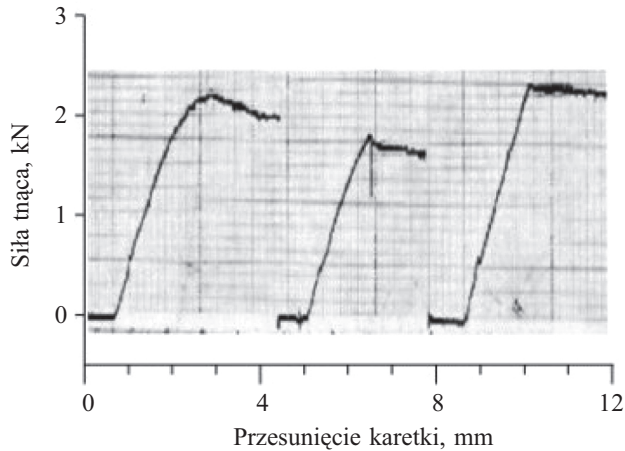
Zagadnienie wyznaczania wartości kąta tarcia wewnętrznego zostało dość szeroko opisane w pracach podejmujących problematykę związaną z projektowaniem zbiorników [70, 73, 74, 154] czy też opisujących zjawiska zachodzące w gruntach. Z analizy warunków stanu granicznego materiałów drobnoziarnistych poddawanych zagęszczeniu w prasie walcowej wyposażonej w zasilacz ślimakowy wynika, że nie można w sposób bezkrytyczny korzystać z procedur określających metodykę prowadzenia badań laboratoryjnych próbek gruntu. Inna jest bowiem wartość nacisku wywieranego na materiał ziarnisty w zbiorniku czy na grunt budowlany w porównaniu z obciążeniem materiału drobnoziarnistego w zasilaczu ślimakowym podczas jego zagęszczania. Kąt tarcia wewnętrznego jest miarą oporu zagęszczanego materiału przeciw poślizgowi dwu jego części względem siebie. Wartość kąta tarcia wewnętrznego zależy od: składu mineralnego zagęszczanego materiału, wielkości ziaren i ich kształtu (im większe są ziarna, tym większa jest strefa objęta tarciem wewnętrznym), stopnia zagęszczenia materiału drobnoziarnistego, wilgotności zagęszczanego materiału oraz rodzaju powierzchni ziaren (zaokrąglone czy ostrokrawędziste). Zarówno dane literaturowe [37], jak i wyniki badań własnych [23] wskazują na to, że na ostatni zwój elementu roboczego zasilacza ślimakowego wywierany jest jednostkowy nacisk normalny osiągający niejednokrotnie wartość 2 MPa, podczas gdy procedury wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego opracowane dla materiałów ziarnistych w zbiornikach przewidują wartości obciążeń o dwa rzędy niższe, a dla gruntów budowlanych – kilkakrotnie niższe. Z kolei w pracach poświęconych problematyce wyznaczania wartości parametrów fizyczno-mechanicznych skał oddziałujących na obudowę wyrobisk analizowane są naciski normalne osiągające wartość kilkudziesięciu lub stu kilkudziesięciu megapaskali. Mając powyższe na uwadze, w Katedrze Systemów Wytwarzania AGH opracowano procedurę wyznaczania wartości kąta tarcia wewnętrznego w aparacie bezpośredniego ścinania typu AB-2a. Metodykę badań ustalono, wzorując się na normie do badań próbek gruntu

PN-B-04481:1988 (wycofanej 10.09.2015 r.). Próbka badanego materiału drobnoziarnistego miała kształt prostopadłościanu o przekroju kwadratowym w płaszczyźnie ścinania i wymiarach boków równych 60 mm. Ilość materiału drobnoziarnistego w próbce dobierano w ten sposób, aby po zagęszczeniu płaszczyzna ścinania przebiegała w połowie wysokości próbki, która wynosiła 15–18 mm. Nie przeprowadzono konsolidacji wstępnej próbki. Schemat karetki aparatu skrzynkowego, w którym umieszcza-no próbkę, przedstawiono na rysunku 6.12.



Rys. 6.12. Przekrój karetki aparatu bezpośredniego ścinania AB-2a zainstalowanego w Laboratorium Katedry Systemów Wytwarzania: 1a, 1b – elementy skrzynki (karetki) dolnej, 2 – skrzynka (karetką) górna, 3 – badana próbka, 4 – dolna płytka oporowa, 5 – górna płytka oporowa, 6 – płytka dociskowa, 7 – śruba do łączenia ramki ze skrzynką, 8 – śruba do podnoszenia ramki przed rozpoczęciem ścinania

Napęd przesuwu karetki (2) zapewniał jej stałą prędkość wynoszącą 1 mm/min. Badanie wykonywano przy zadanym początkowym jednostkowym nacisku normalnym. Było ono prowadzone aż do całkowitego jednokrotnego ścięcia próbki (3). Zapis zmienności wartości siły ścinającej w funkcji przemieszczenia górnej karetki aparatu skrzynkowego był prowadzony na rejestratorze XY/t. W skład układu pomiarowego wchodził ponadto czujnik pierścieniowy do pomiaru siły ścinającej, indukcyjny czujnik przemieszczeń PT×2 oraz dwa wzmacniacze tensometryczne KWS II/5 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik. Przykładowy przebieg charakterystyki jednokrotnego ścinania próbki mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego przedstawiono na rysunku 6.13.



Rys. 6.13. Przykładowe charakterystyki jednokrotnego ścinania próbki mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego otrzymane przy zadanym początkowym jednostkowym nacisku normalnym $\sigma_B = 1$ MPa

Wytrzymałość próbek na ścinanie obliczano według wzoru:

$$\tau = \frac{T_{\max}}{a(a-r)}, \text{ MPa} \quad (6.54)$$

gdzie:

- τ – wytrzymałość próbek na ścinanie (odpowiadająca wartości umownego naprężenia stycznego tzn. wartości naprężenia stycznego w momencie ścięcia próbki), MPa,
- T_{\max} – maksymalna siła ścinająca, N,
- a – długość boku próbki przy przesunięciu względnym próbek $\varepsilon = 0\%$, mm,
- r – przesunięcie ramki aparatu w stosunku do skrzynki, w momencie osiągnięcia siły równej T_{\max} , mm.

Na potrzeby wyznaczenia kąta tarcia wewnętrznego założono występowanie zależności liniowej pomiędzy naprężeniem normalnym a stycznym zgodnie z warunkiem Coulomba:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi_w, \text{ MPa} \quad (6.55)$$

gdzie:

- τ – wytrzymałość zagęszczonego materiału drobnoziarnistego na ścinanie, MPa,
- c – spójność (kohezja), MPa,
- σ – naprężenie normalne, MPa,
- φ_w – kąt tarcia wewnętrznego, °.

Wartość współczynnika tarcia wewnętrznego wyznaczono z wzoru:

$$\xi = \frac{N \sum \sigma_i \tau_i - \sum \sigma_i \sum \tau_i}{N \sum (\sigma_i^2) - (\sum \sigma_i)^2}, - \quad (6.56)$$

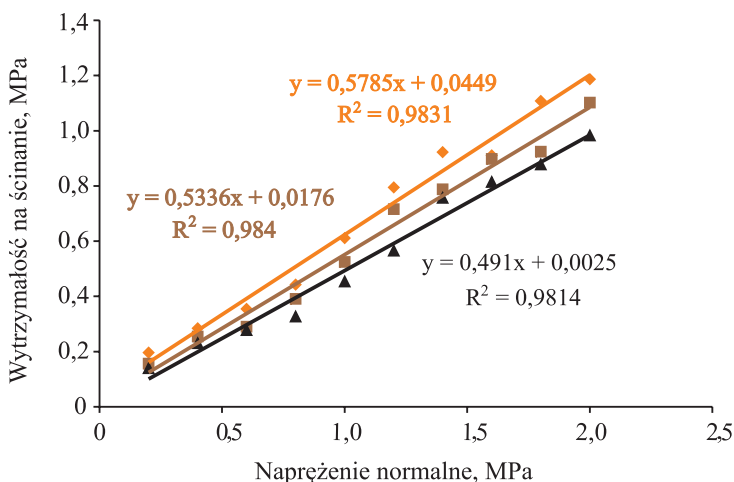
gdzie:

σ_i – umowne wartości naprężeń normalnych określone dla poszczególnych próbek, MPa,

τ_i – wartości wytrzymałości na ścinanie wyznaczone dla poszczególnych próbek, MPa,

N – liczba ściętych próbek uwzględniona w obliczeniach, –.

Wykres zależności $\tau = f(\sigma)$ przedstawiono na rysunku 6.14, a szczególne postacie formuł empirycznych opisujących tarcie wewnętrzne w tabeli 6.5.



Rys. 6.14. Wyniki badań parametrów plastycznego płynięcia mieszanek komunalnego osadu ściekowego

Tabela 6.5

Szczególne postacie formuł empirycznych opisujących tarcie wewnętrzne badanych mieszanek komunalnego osadu ściekowego

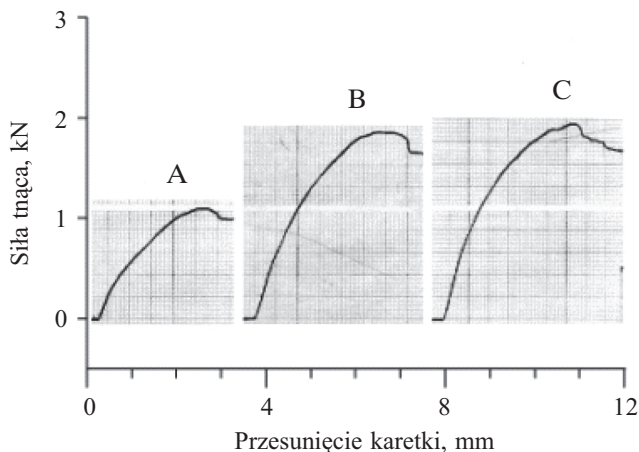
Rodzaj materiału	Równanie regresji	Współczynnik determinacji
Mieszanka A	$\tau = 0,5785\sigma + 0,0449$	$R^2 = 0,9831$
Mieszanka B	$\tau = 0,5336\sigma + 0,0176$	$R^2 = 0,9840$
Mieszanka C	$\tau = 0,491\sigma + 0,0025$	$R^2 = 0,9814$

Zwraca uwagę stosunkowo niewielką wartość kohezji, która wynosi 0,0449 MPa w przypadku mieszanki komunalnych osadów ściekowych i wapna palonego, 0,0176 MPa w mieszance komunalnych osadów ściekowych, wapna palonego i miazła węglowego (udział masy 50%) i 0,0025 MPa w mieszance komunalnych osadów ściekowych, wapna palonego i miazła węglowego (udział masy 67%).

Równie ważne dla identyfikacji procesu wstępnego zagęszczania jest wyznaczenie wartości współczynników statycznego i kinetycznego tarcia zewnętrznego. Badania wykonano za pomocą aparatu bezpośredniego ścinania typu AB-2a oraz zestawu pomiarowego opisanego powyżej. Prędkość przesuwu karetki (2) wynosiła 1 mm/min. Podobnie jak w przypadku wyznaczania współczynnika tarcia wewnętrznego próbka badanego materiału drobnoziarnistego miała kształt prostopadłościanu o przekroju kwadratowym i wymiarach boków równych 60 mm. Również w tym przypadku nie przeprowadzono konsolidacji wstępnej próbki. W skrzynce dolnej o przekroju kwadratowym i wymiarach boków równych 80 mm (o 20 mm większych niż w pomiarze tarcia wewnętrznego) zainstalowano płytkę stalową szlifowaną zgrubnie o 7. klasie chropowatości ($R_a = 1,25$) wykonaną ze stali konstrukcyjnej wyższej jakości 55 (wg PN) o składzie chemicznym określonym w tabeli 6.6.

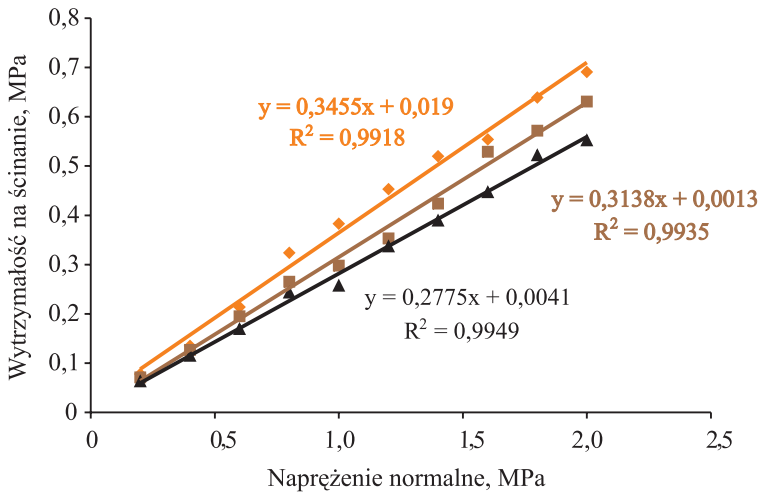
Tabela 6.6
Skład chemiczny stali 55

C, %	Mn, %	Si, %	P, %	S, %	Cr, %	Ni, %	Mo, %
0,52–0,60	0,6–0,9	maks. 0,4	maks. 0,045	maks. 0,045	maks. 0,4	maks. 0,4	maks. 0,1

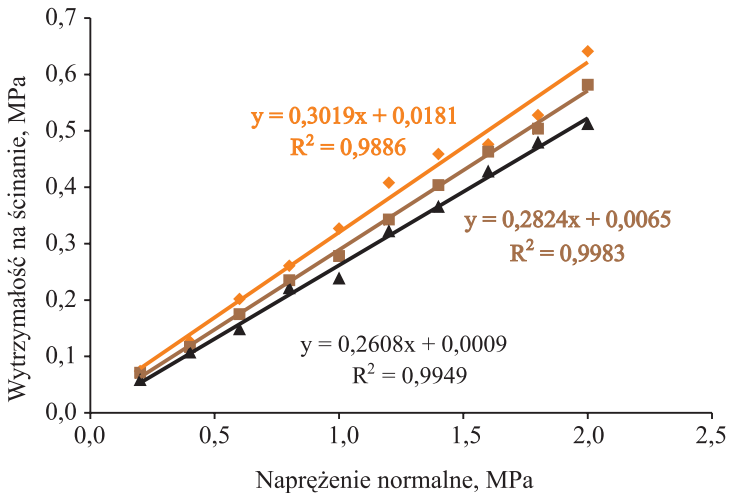


Rys. 6.15. Przykładowe charakterystyki siły tarcia zewnętrznej mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego uzyskane przy początkowych jednostkowych naciskach normalnych: $\sigma_B = 0,8$ MPa (A), $\sigma_B = 1,4$ MPa (B) i $\sigma_B = 1,6$ MPa (C)

Na rysunku 6.15 przedstawiono przykładowe charakterystyki siły tarcia zewnętrznej mieszanki komunalnych osadów ściekowych i odpadowego wapna palonego uzyskane przy różnych początkowych naciskach normalnych, a na rysunkach 6.16 i 6.17 – graficzny obraz wyników badań statycznego i kinetycznego kąta tarcia zewnętrznego pary ciernej stal – mieszanki komunalnego osadu ściekowego.



Rys. 6.16. Wyniki badań statycznego kąta tarcia zewnętrznego pary ciernej stal – mieszanki komunalnego osadu ściekowego



Rys. 6.17. Wyniki badań kinetycznego kąta tarcia zewnętrznego pary ciernej stal – mieszanki komunalnego osadu ściekowego

Zestawienie szczególnych postaci formuł empirycznych opisujących tarcie zewnętrzne pary ciernej: stal – mieszanki komunalnego osadu ściekowego przedstawiono w tabeli 6.7.

Tabela 6.7

Szczególne postaci formuł empirycznych opisujących tarcie zewnętrzne pary ciernej stal – mieszanki komunalnego osadu ściekowego

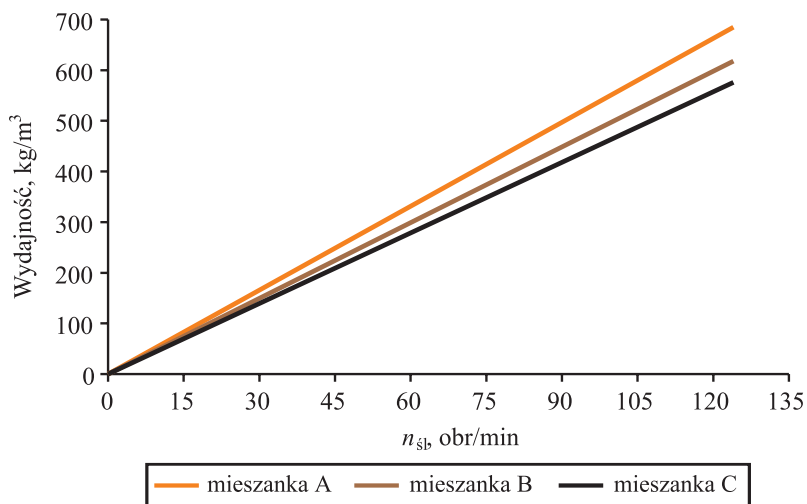
Rodzaj materiału	Rodzaj tarcia	Szczególne postaci równania regresji	Współczynnik determinacji
Mieszanka A	statyczne	$\tau = 0,3455\sigma + 0,0190$	$R^2 = 0,9918$
	kinetyczne	$\tau = 0,3019\sigma + 0,0181$	$R^2 = 0,9886$
Mieszanka B	statyczne	$\tau = 0,3138\sigma + 0,0013$	$R^2 = 0,9935$
	kinetyczne	$\tau = 0,2824\sigma + 0,0065$	$R^2 = 0,9983$
Mieszanka C	statyczne	$\tau = 0,2775\sigma + 0,0041$	$R^2 = 0,9949$
	kinetyczne	$\tau = 0,2608\sigma + 0,0009$	$R^2 = 0,9949$

Uzyskane wyniki badań umożliwiły przeprowadzenie obliczeń mających na celu określenie wydajności zasilaczy ślimakowych wyposażonych w ślimaki walcowe o różnych kątach pochylenia linii śrubowej ślimaka oraz o różnym skoku.

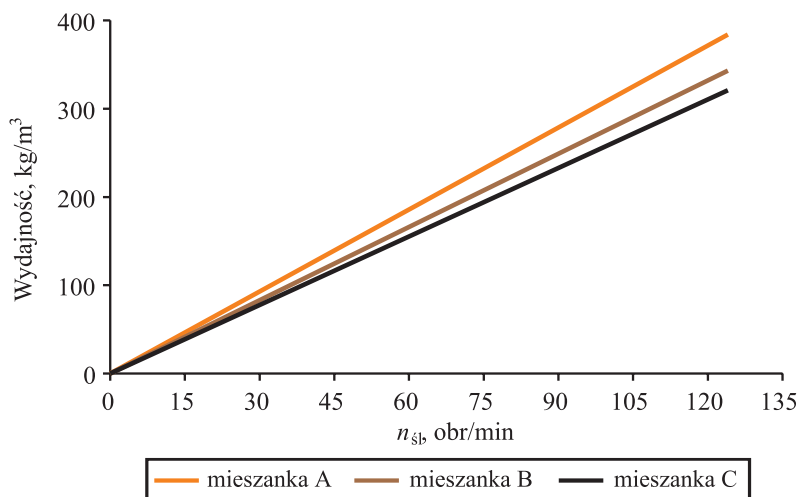
6.3.4. Badania symulacyjne przepływu mieszanek komunalnych osadów ściekowych w zasilaczu ślimakowym

W celu określenia wydajności zasilacza ślimakowego prasy walcowej LPW 450 przeprowadzono badania symulacyjne przepływu mieszanek komunalnych osadów ściekowych w tym urządzeniu. Objęto nimi ślimaki walcowe oznaczone w tabeli 5.1 numerami 6 i 7. Odznaczały się one różnymi geometrycznymi cechami konstrukcyjnymi.

Na rysunkach 6.18 i 6.19 przedstawiono graficzną wizualizację wyników badań symulacyjnych przepływu mieszanek komunalnych osadów ściekowych w zasilaczu ślimakowym. Wskazują one na znaczący wpływ wartości skoku ślimaka S na ilość materiału dostarczanego w strefę zagęszczania prasy walcowej, a tym samym jakość uzyskiwanych brykietów lub wyprasek.



Rys. 6.18. Wyniki obliczeń wydajności masowej zasilacza ślimakowego (kąt pochylenia linii śrubowej ślimaka po średnicy wewnętrznej $\beta_w = 43,68^\circ$, skok ślimaka $S = 60$ mm)

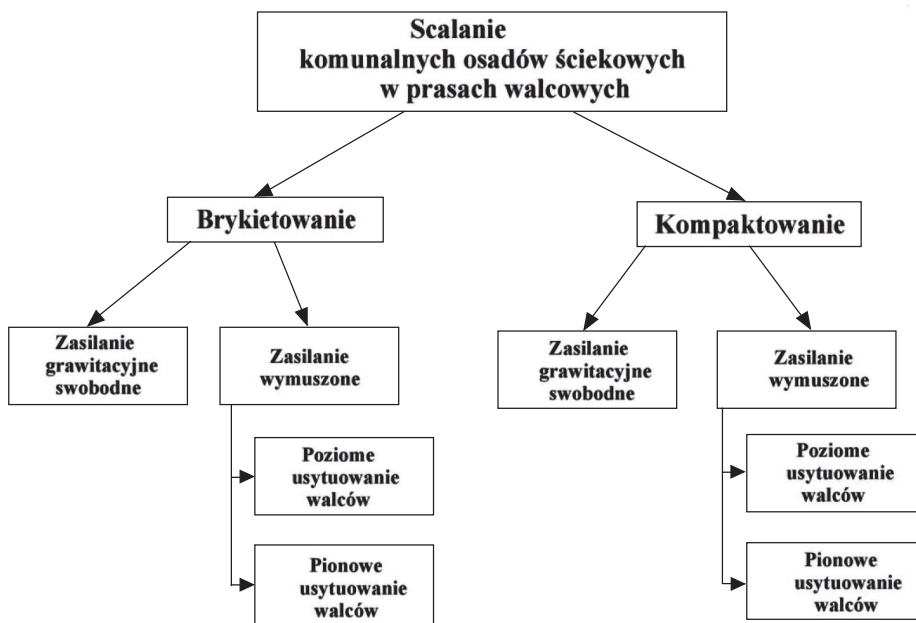


Rys. 6.19. Wyniki obliczeń wydajności masowej zasilacza ślimakowego (kąt pochylenia linii śrubowej ślimaka po średnicy wewnętrznej $\beta_w = 32,48^\circ$, skok ślimaka $S = 40$ mm)

7. Zastosowanie do celów projektowych wyników badań scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych

7.1. Procedura doboru przemysłowych pras walcowych do scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych

Przedstawione w niniejszej pracy wyniki badań scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych oraz rozważania teoretyczne umożliwiają dobór parametrów konstrukcyjnych i kinematycznych przemysłowych pras walcowych do scalania tego odpadu. Są one ponadto efektem prowadzonych od wielu lat prac poznawczych i użytkarnych. Schemat sposobów scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych w prasach walcowych przedstawiono na rysunku 7.1.



Rys. 7.1. Schemat sposobów scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych w prasach walcowych

Mieszanki komunalnych osadów ściekowych mogą być scalane w prasach walcowych zasilanych grawitacyjnie lub w sposób wymuszony. Kształt scalonej mieszanki komunalnych osadów ściekowych zależy od typu zestawu zastosowanych pierścieni formujących (tab. 7.1). Pierwsze dwa rodzaje pierścieni mają zastosowanie w procesach dwustopniowej granulacji, kolejne dwa służą do wytwarzania brykietów o kształcie kropli lub siodła.

Zaprezentowane powyżej zestawy pierścieni formujących były przedmiotem badań prowadzonych w Katedrze Systemów Wytwarzania [53]. W tabeli 7.2 przedstawiono analizę SWOT pierścieni do wytwarzania brykietów o kształcie kropli lub siodła.

Analiza SWOT pierścieni formujących do brykietowania mieszanek komunalnych osadów ściekowych przedstawia zalety i wady pierścieni do wytwarzania brykietów o kształcie kropli lub siodła.

Na rysunku 7.2 przedstawiono procedurę doboru przemysłowej prasy walcowej do scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych. Dotyczy ona zarówno pras walcowych zasilanych grawitacyjnie, jak i tych, w których zastosowano układ automatycznej regulacji parametrów procesu zagęszczania, który sprawia, że przepływ materiału drobnoziarnistego do strefy zagęszczania jest wymuszany przez zastosowanie różnego rodzaju podzespołów, np. zasilaczy ślimakowych. Tego typu układy automatycznej regulacji parametrów procesu zagęszczania stosuje się w przypadku scalania materiałów drobnoziarnistych określanych jako „trudne do zagęszczania” lub gdy zależy nam na zwiększeniu wydajności prasy walcowej. Efekt ten można uzyskać przez sterowanie prędkością obrotową elementu roboczego zasilacza ślimakowego oraz prędkością obrotową walców prasy [75]. O skuteczności stosowania wstępnego zagęszczania decyduje właściwe ustalenie proporcji wartości prędkości obrotowej elementu roboczego zasilacza ślimakowego oraz wartości prędkości obrotowej walców prasy. Tę bezwymiarową wielkość ustala się jako iloraz $n_{\text{śl}}/n_{\text{w}}$ i nazywa współczynnikiem prędkości. Jego właściwy dobór decyduje o wielkości wskaźników określających jakość otrzymywanych brykietów (gęstość, wytrzymałość na zrzut, wytrzymałość na ścislenie i inne) oraz wskaźników techniczno-ekonomicznych urządzenia (wydajność prasy walcowej, zapotrzebowanie na energię na jednostkę produkcji finalnej, trwałość pierścieni formujących itp.). Warunkiem decydującym o możliwości uwzględnienia tego współczynnika w analizie wyników badań stało się pominięcie wpływu czasu zagęszczania na wartość mierzonych czynników wynikowych. O ile w przypadku zastosowania zasilania grawitacyjnego założenie takie jest niedopuszczalne, o tyle – jak wykazano w pracach [56, 75] – przyjęcie tego uproszczenia w przypadku zasilacza ślimakowego jest zasadne w przewidywanym zakresie prędkości obrotowych walców prasy i ślimaka.

Tabela 7.1

Charakterystyka typowych pierścieni formujących do scalania materiałów drobnoziarnistych w prasie walcowej PW 360 skonstruowanej w Katedrze Systemów Wytwarzania AGH


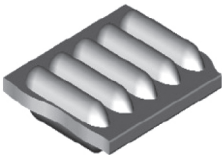

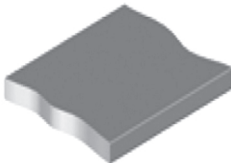

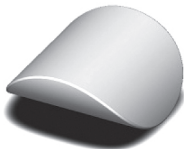


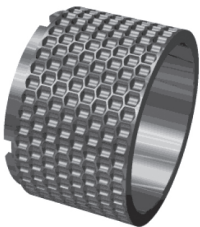

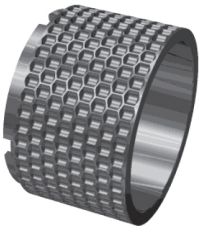

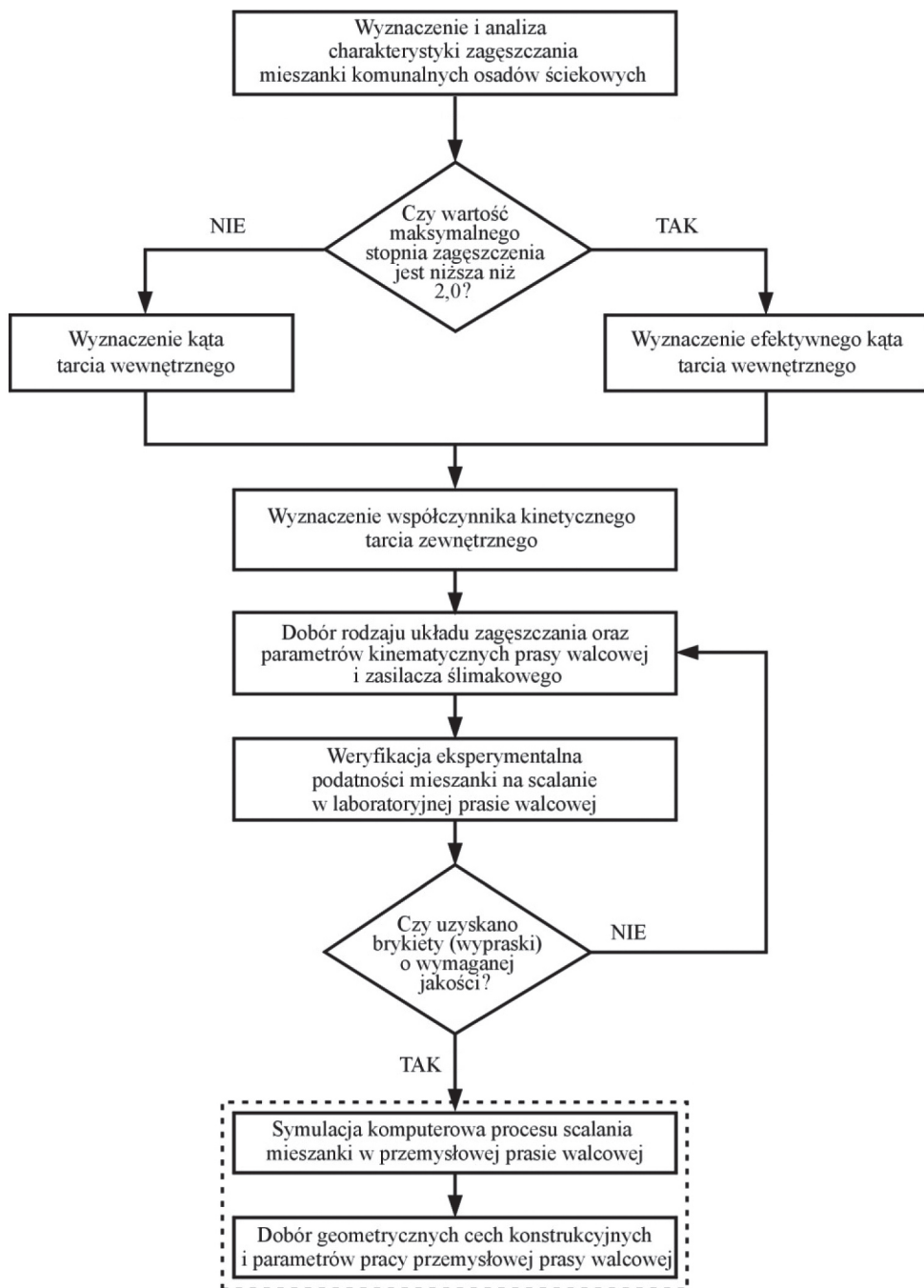
Lp.	Typ pierścieni	Model pierścienia	Kształt scalonego materiału
1	do wytwarzania brykietów z obustronnymi wypukłościami		
2	gładki do wytwarzania płaskich wyprasek		
3	do wytwarzania brykietów bez płaszczyzny podziału o kształcie siodła		
4	do wytwarzania brykietów z płaszczyzną podziału o kształcie kropki		

Tabela 7.2

Analiza SWOT pierścieni formujących do brykietowania mieszanek komunalnych osadów ściekowych

Mocne strony (<i>Strengths</i>) + szanse (<i>Opportunities</i>)	
<p>Pierścienie o symetrycznym układzie zagęszczania</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – wyższa trwałość elementów formujących prasy, – mniejsze obciążenie walców prasy, – niższy pobór prądu przez silnik napędu głównego, – wyższa wydajność prasy walcowej
<p>Pierścienie o niesymetrycznym układzie zagęszczania</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – brykiety łatwiej opuszczają wgłębienia formujące, – wyższy nacisk jednostkowy w procesie brykietowania oraz bardziej równomierny jego rozkład, – brykiety mają wyższą wytrzymałość mechaniczną, – wyeliminowanie zjawiska dzielenia się brykietów na pół po opuszczeniu przez nie wgłębień formujących, – rozszerzenie wartości wilgotności brykietowanego materiału, – pierścienie nie wymagają uciążliwego docierania ich powierzchni roboczych
Słabe strony (<i>Weaknesses</i>) + zagrożenia (<i>Threats</i>)	
<p>Pierścienie o symetrycznym układzie zagęszczania</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – nierównomierna gęstość brykietów, – brykiety trudniej opuszczają wgłębienia formujące, – brykiety posiadają niższą wytrzymałość mechaniczną, – dzielenie się brykietów na pół po opuszczeniu przez nie wgłębień formujących, – niższy przedział wartości wilgotności brykietowanego materiału, – pierścienie wymagają uciążliwego docierania ich powierzchni roboczych, – niższy nacisk jednostkowy w procesie brykietowania oraz mniej równomierny jego rozkład
<p>Pierścienie o niesymetrycznym układzie zagęszczania</p> 	<ul style="list-style-type: none"> – zwiększenie obciążenia walców prasy, – wyższy pobór prądu przez silnik napędu głównego, – mniejsza wydajność prasy walcowej, – szybsze zużycie



Rys. 7.2. Procedura doboru przemysłowej prasy walcowej do scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych

W procedurze wyboru przemysłowej prasy walcowej do scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych można wyróżnić pięć etapów. **Pierwszy** z nich polega na wyznaczeniu w sposób eksperymentalny charakterystyki zagęszczania materiału, jej analizie i doborze odpowiedniego rodzaju zasilacza. Jeżeli stopień zagęszczenia materiału nie przekracza 2,0, wskazane jest stosowanie zasobnika grawitacyjnego. Uzyskanie wyższego stopnia zagęszczenia materiału wymaga stosowania zasilacza ślimakowego. Gdy stopień zagęszczenia nie przekracza 2,6, stosuje się ślimaki walcowe [98]. Większą jego wartość zapewniają ślimaki stożkowe.

W **drugim** etapie przeprowadza się badania eksperymentalne i określa kąt tarcia wewnętrzznego oraz współczynnik kinetycznego tarcia zewnętrznego. Jeżeli wymagany stopień zagęszczenia jest niższy aniżeli 2,0, wyznacza się efektywny kąt tarcia wewnętrznego zamiast kąta tarcia wewnętrznego.

Trzecim etapem jest weryfikacja eksperymentalna podatności mieszanki komunalnych osadów ściekowych na scalanie w prasie walcowej. Jego realizacja jest możliwa pod warunkiem posiadania odpowiedniej bazy laboratoryjnej.

W **czwartym** etapie przeprowadza się badania symulacyjne procesu scalania mieszanki komunalnych osadów ściekowych w przemysłowej prasie walcowej, a w **piątym** dobiera się geometryczne cechy konstrukcyjne i parametry pracy przemysłowej prasy walcowej.

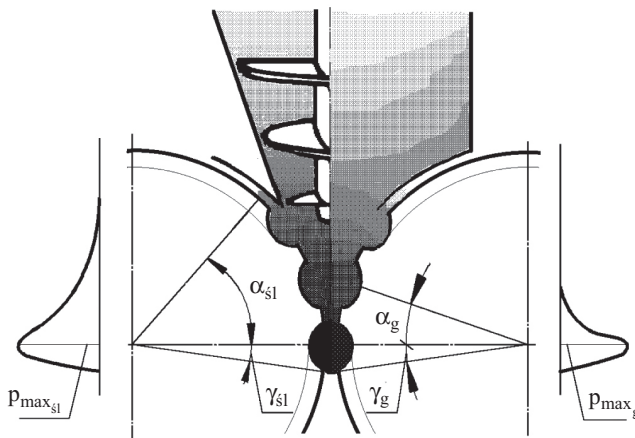
7.2. Praktyczne aspekty stosowania zasilania wymuszonego w przemysłowych prasach walcowych

Zastosowanie zasilacza ślimakowego w zespole prasy walcowej, z prawidłowo dobranym elementem roboczym, umożliwia zwiększenie wartości kąta chwytu w czasie prowadzenia procesu brykietowania od kilku do kilkunastu procent w porównaniu z zasilaczem grawitacyjnym swobodnym [127]. Konsekwencją wzrostu wartości kąta chwytu jest wzrost nacisku jednostkowego we wgłębieniu formującym (rys. 7.3).

Stosowanie zasilacza ślimakowego w zespole prasy walcowej umożliwia zwiększenie wartości kąta chwytu α_{sl} od kilku do kilkadziesiąt procent w porównaniu z zasilaczem grawitacyjnym α_g . Powoduje to wydłużenie czasu oddziaływania nacisku na scalany materiał i wzrost jego maksymalnej wartości p_{max} . Z badań własnych autora wynika, że kąt sprężystego odkształcenia $\gamma_{sl} = \gamma_g$ nie ulega zmianie.

Bardzo ważną częścią zasilacza jest jego element roboczy, czyli ślimak. W podzespołach pras walcowych stosuje się ślimaki walcowe o stałym lub zmiennym skoku oraz ślimaki stożkowe. W zależności od szerokości walców roboczych prasy zasilacz ślimakowy wyposażony jest w jeden lub kilka elementów roboczych. Przemysłowe

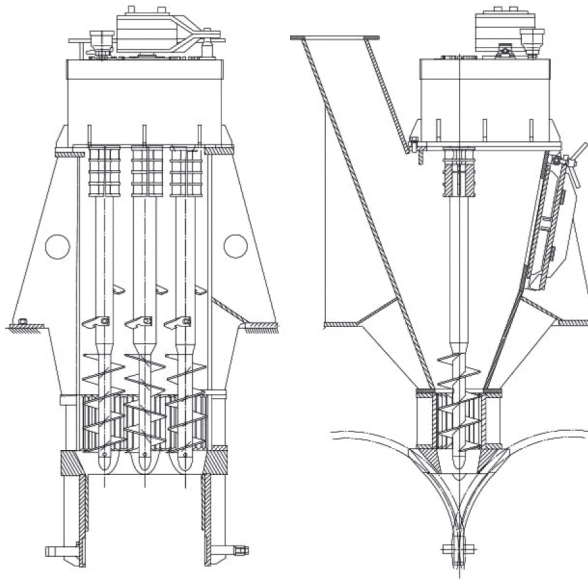
brykietarki i kompaktory mają często większą szerokość walców w porównaniu z prasami laboratoryjnymi. Istotnym problemem w trakcie ich zasilania jest konieczność równomiernego rozprowadzania materiału wzdłuż całej szerokości walców. Zmienność ilościowego przepływu wynika z występowania sił tarcia na powierzchni styku materiał drobnziarnisty – kanał zasypowy. Powoduje ona niedostateczne zasilanie obszarów brzegowych walców. Próba wyeliminowania tego zjawiska przez zastosowanie zasilania wymuszonego sprawdza się połowicznie jedynie w przypadku, gdy jest możliwe wprowadzenie końcówki ślimaka możliwie blisko strefy zagęszczania, a iloraz szerokości walca do jego średnicy jest możliwie niewielki. W efekcie w paśmie wsadu wprowadzanego między walce powstaje sinusoidalna krzywa wyższej gęstości tym wyraźniejsza, im większa jest średnica ślimaka [17, 18]. Ponadto gdy walce są szerokie, wzrost wydajności prasy determinuje zwiększenie średnicy ślimaka z równoczesnym zwiększonym przyrostem poboru mocy napędu prasy [127]. W celu poprawy równomierności zasilania strefy zagęszczania stosować należy naprzemiennie ślimaki walcowe lewozwojne i prawozwojne, synchronizując równocześnie ich prędkość obrotową [17, 18]. Zastosowanie w układzie napędowym silnika hydraulicznego pozwala natomiast na płynną regulację prędkości obrotowej ślimaków.



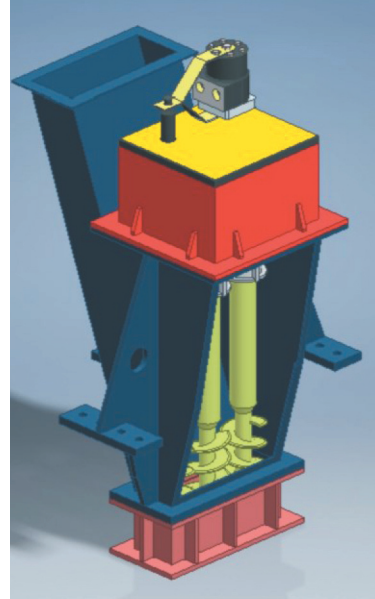
Rys. 7.3. Wizualizacja wpływu rodzaju zastosowanego zasilania na wartość kąta chwytu oraz nacisku jednostkowego we wgłębieniu formującym: α_{s1} – kąt chwytu przy zastosowaniu zasilacza ślimakowego, α_g – kąt chwytu przy zastosowaniu zasilacza grawitacyjnego, γ_{s1} – kąt wyznaczający strefę rozprężania brykietów przy zastosowaniu zasilacza ślimakowego, γ_g – kąt wyznaczający strefę rozprężania brykietów przy zastosowaniu zasilacza grawitacyjnego, $p_{max(s1,g)}$ – nacisk jednostkowy we wgłębieniu formującym

Przykład trójślismakowego zasilacza do prasy przemysłowej o szerokich walcach formujących przedstawiono na rysunku 7.4. Podzespół został zastosowany w linii technologicznej do brykietowania węgla brunatnego w KWB Konin [56].

a)



b)



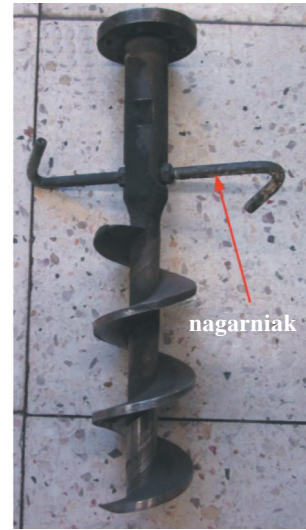
Rys. 7.4. Trójślimakowy zasilacz do pras o szerokich walcach formujących zastosowany w linii technologicznej do brykietowania węgla brunatnego w KWB Konin:
a) schemat rozwiązania konstrukcyjnego; b) model 3D

Ze względu na funkcje, jakie spełnia zasilacz ślimakowy, wyróżnia się w nim dwie strefy: podawania i homogenizacji oraz wstępnego zagęszczania. Podawanie i homogenizowanie materiału odbywa się przez nagarniak i pierwszy zwoj ślimaka. Strefa wstępnego zagęszczania obejmuje odcinek od pierwszego do ostatniego zwoju ślimaka. Następuje w niej początkowe odpowietrzenie materiału. Wpływ na nie ma właściwe ukształtowanie powierzchni ślimaka i cylindra. W tym celu należy tak skonstruować cylinder, aby opór wywołany tarciem pomiędzy przemieszczanym materiałem drobnoziarnistym a jego ścianą był możliwie jak największy. Sytuacja taka występuje wówczas, gdy ściany cylindra są rowkowane, a przepływający materiał drobnoziarnisty wypełnia rowki. Konsekwencją tego jest występowanie na styku powierzchni materiał drobnoziarnisty – cylinder tarcia wewnętrznego. Powoduje to utrudnienie przepływu materiału drobnoziarnistego i tym samym jego lepsze odpowietrzenie. Ponadto naprężenia ścinające i tarcie występujące w trakcie przepływu materiału przez ślimak powodują utworzenie większej powierzchni kontaktu pomiędzy indywidualnymi ziarnami i w efekcie silniejsze wiązania międzyziarnowe. Tarcie może być również wykorzystane do podgrzewania materiału drobnoziarnistego i aktywizacji zawartego w nim lepiszcza.

a)



b)



Rys. 7.5. Elementy zasilacza ślimakowego: a) wylotnik; b) ślimak

Inaczej niż w przypadku pary kontaktowej materiał drobnoziarnisty – cylinder na powierzchni ślimaka opór tarcia powinien być jak najmniejszy. Dlatego należy zadbać o odpowiednią chropowatość powierzchni elementu roboczego zasilacza. Zaleca się, aby stan powierzchni ślimaka odpowiadał 7. klasie chropowatości ($R_a = 1,25$). Dla prawidłowego przebiegu procesu scalania materiału w prasie walcowej istotny jest dobór właściwej prędkości obrotowej ślimaka. W celu jej określenia skorzystano z omówionego w rozdziale 6 modelu pasmowego i rozważono warunek stałości przepływu masowego przez zasilacz ślimakowy i prasę walcową określony wzorem (6.38). Korzystając z zależności (6.14), określono wydajność masową zasilaczy wieloślimakowych, którą można przedstawić wzorem:

$$Q_m = 15i_{\text{śl}} \pi^2 (D_z^2 - D_w^2) D_m n_{\text{śl}} \frac{\text{tg}\beta \text{tg}\varphi_m}{\text{tg}\beta + \text{tg}\varphi_m} \rho_w, \text{ kg/h} \quad (7.1)$$

gdzie $i_{\text{śl}}$ – liczba ślimaków.

Po podstawieniu do (6.38) wzoru (7.1) otrzymano zależność (7.2), z której można obliczyć żadaną prędkość obrotową ślimaka:

$$n_{\text{śl}} = \frac{60 V_b i_b n_w \rho_b (\text{tg}\beta + \text{tg}\varphi_m)}{15 i_{\text{śl}} \pi^2 (D_z^2 - D_w^2) D_m \text{tg}\beta \text{tg}\varphi_m \rho_w}, \text{ obr/min} \quad (7.2)$$

Iloraz gęstości brykietu oraz materiału wpływającego z zasilacza ślimakowego stanowi stopień zagęszczenia uzyskiwany w strefie między walcami.

Stopień zagęszczenia s możliwy do uzyskania w prasie walcowej wyposażonej w zasilacz ślimakowy określa zależność:

$$s = s_w s_b, - \quad (7.3)$$

gdzie:

s_w – stopień wstępnego zagęszczenia w zasilaczu,

s_b – stopień zagęszczenia uzyskany w strefie między walcami prasy.

Stopień zagęszczenia możliwy do uzyskania w strefie między walcami prasy wynosi [48]:

$$s_b = \frac{h_p}{e}, - \quad (7.4)$$

gdzie:

h_p – odległość między walcami zastępczymi na poziomie kąta chwytu wyznaczającego początek strefy zagęszczania materiału,

e – szerokość szczeliny między walcami w układzie zastępczym.

Korzystając ze wzoru (7.4), otrzymano zależność (7.5), z której oblicza się gęstość materiału wpływającego z zasilacza ślimakowego:

$$\rho_w = \frac{\rho_b e}{h_p}, \text{ g/cm}^3 \quad (7.5)$$

7.3. Konstrukcje pras walcowych do scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych

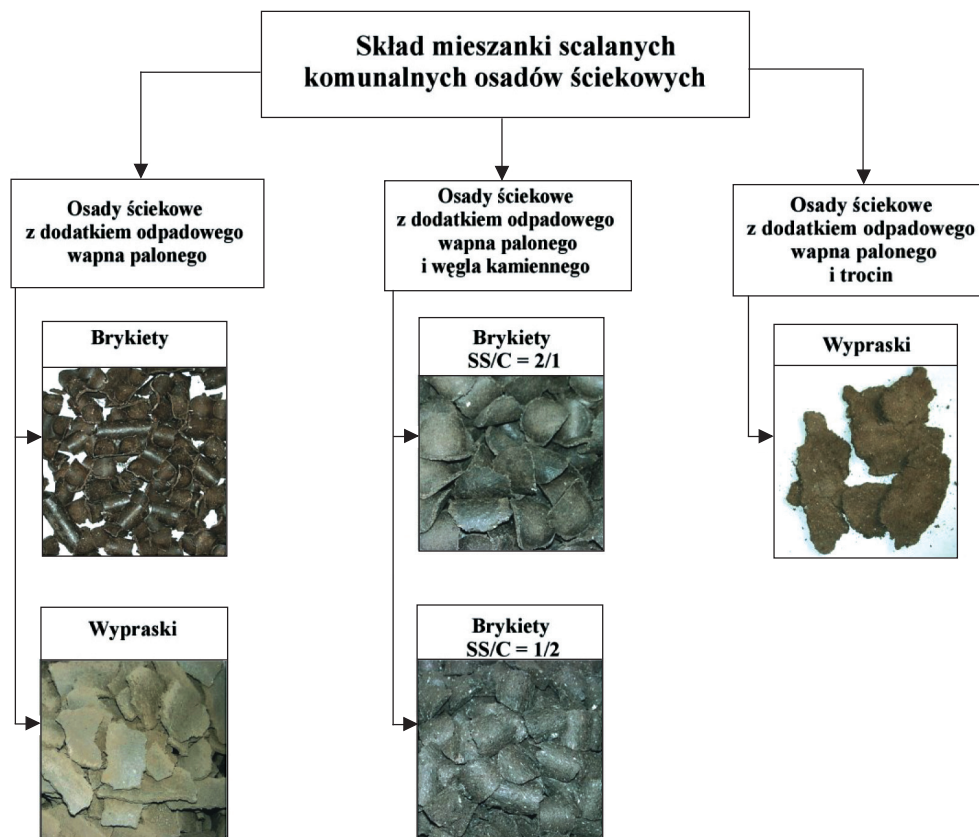
Dysponując modelami matematycznymi procesu brykietowania oraz wynikami badań laboratoryjnych mieszanek komunalnych osadów ściekowych, opracowano projekty pras walcowych o średnicach pierścieni formujących 360 mm, 450 mm i 500 mm, których charakterystyki techniczne zaprezentowano w tabeli 7.3.

Na rysunku 7.6 przedstawiono efekty scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych – brykiety lub wypraski.

Tabela 7.3

Charakterystyki techniczne pras walcowych do scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych

Typ prasy	Średnica walców, mm	Moc napędu, kW	Masa, kg	Objętość brykietów, cm ³	Wydajność objętościowa, m ³ /h	Wymiary gabarytowe, mm
PW 360	360	30	4.220	5,5	0,88	3300 × 1650 × 1200
PW 450	450	22	2.850	6,5	0,6	1210 × 710 × 720
PW 500	500	55	10.440	13,0	4,0	4450 × 2650 × 2320

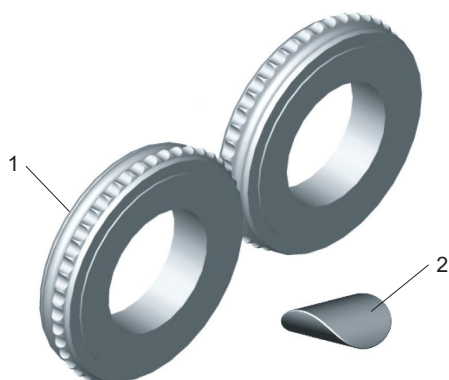
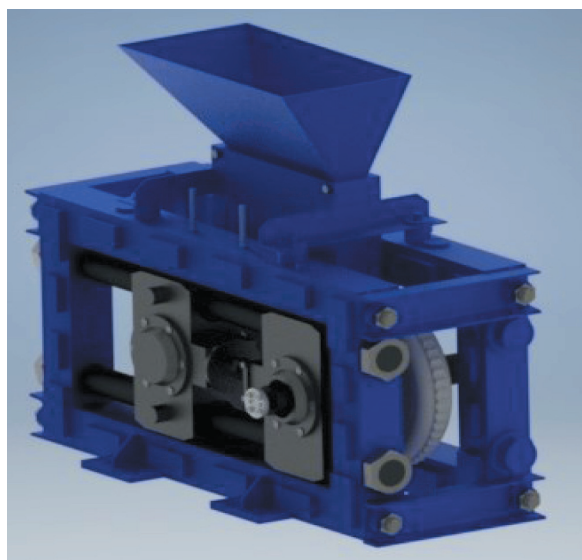


Rys. 7.6. Efekty scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych w prasach walcowych

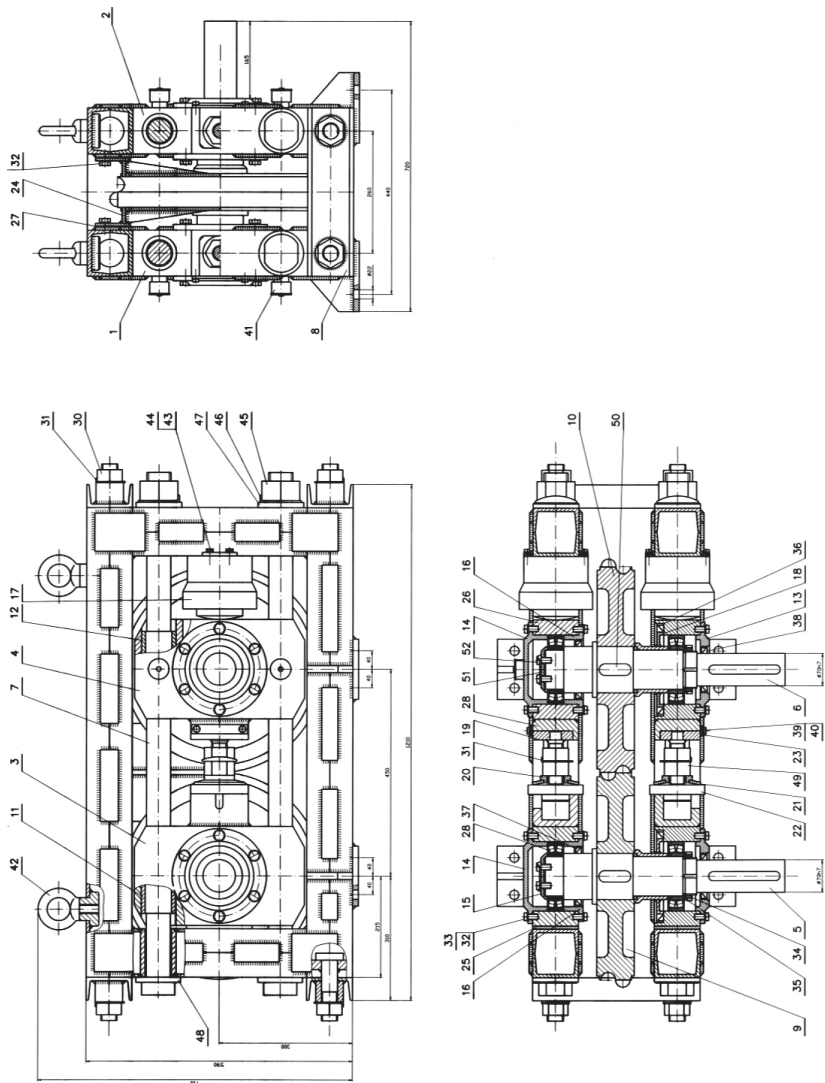
Zaprojektowane prasy walcowe różnią się ułożyskowaniem i usytuowaniem pierścieni formujących oraz sposobem podawania materiału do strefy zagęszczania. Przy opracowywaniu założeń konstrukcyjnych do tych pras korzystano z doświadczeń w zakresie

scalania różnych materiałów drobnoziarnistych. Wiele spośród nich należało do grupy tzw. materiałów trudnych do zagęszczania. Stąd w tych przypadkach prasy walcowe wyposażono w podzespoły zasilające. Na rysunku 7.7 przedstawiono model 3D prasy walcowej o średnicy walców 450 mm do scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych i pierścieni formujących do wytwarzania brykietów bez płaszczyzny podziału, a na rysunku 7.8 rysunek złożeniowy tej prasy.

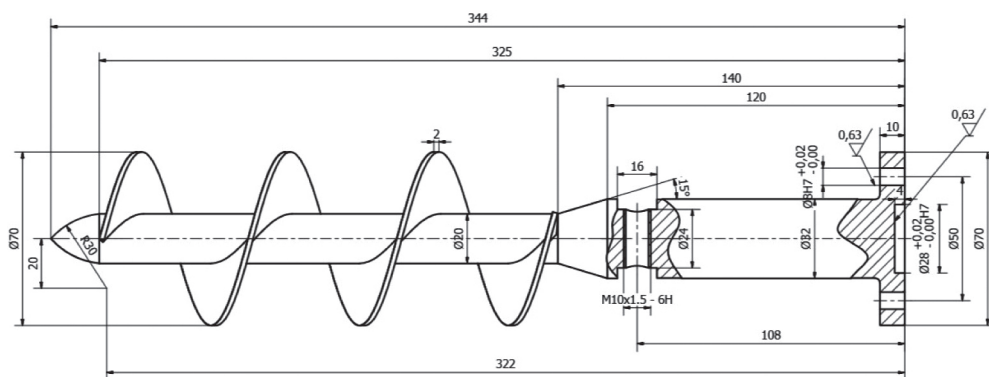
Na rysunku 7.9 przedstawiono element roboczy zasilacza ślimakowego prasy walcowej o średnicy walców 450 mm, zastosowany do scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych.



Rys. 7.7. Wizualizacja prasy walcowej o średnicy walców 450 mm oraz pierścieni formujących do wytwarzania brykietów bez płaszczyzny podziału (1 – pierścień, 2 – brykiet)

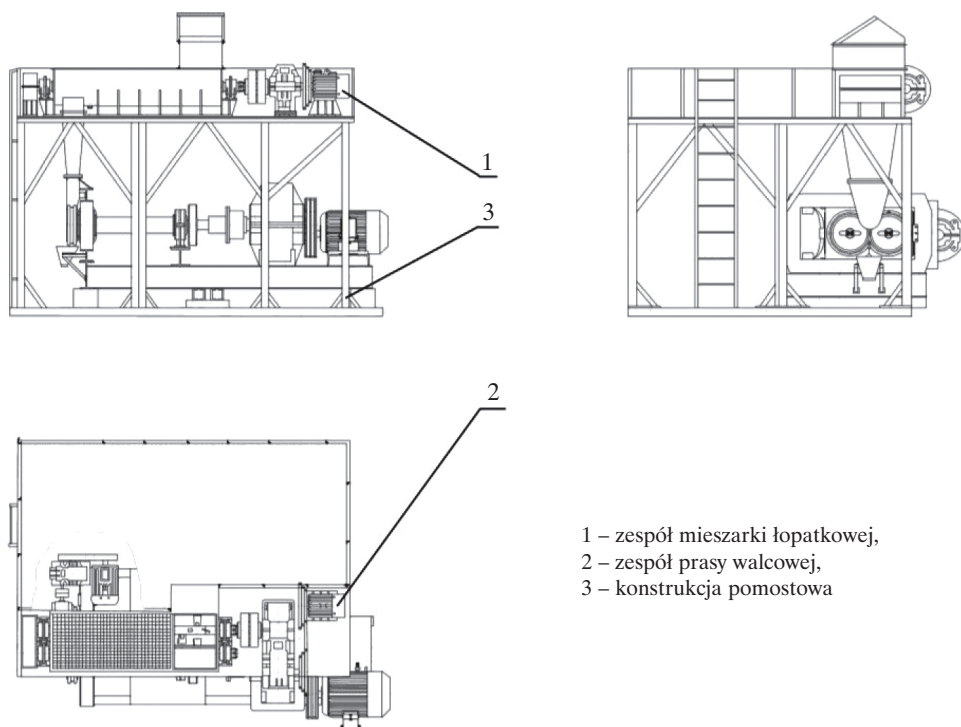


Rys. 7.8. Rysunek złożeniowy prasy walcowej o średnicy walców 450 mm do scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych: 1, 2 – stojak, 3, 4, 26, 27 – obudowa, 5, 6 – wał, 7 – prowadnica, 8 – poprzeczka, 9, 10 – koło brykietujące, 11, 12 – panewka, 13–16 – pokrywa, 17 – siłownik nurkowy, 18 – pierścień dystansowy, 19 – wkładka specjalna, 20, 22 – podkładka specjalna, 21 – sprężyna talerzowa, 23 – płyta zabezpieczająca, 24 – uszczelnienie, 25 – podkładka oporowa, 28 – płytka dystansowa, 29 – łożysko baryłkowe, 30, 45, 49 – nakrętka, 31, 46 – podkładka odginana, 32, 39, 43, 52 – śruba, 33, 40, 44 – podkładka sprężysta, 34 – nakrętka łożyskowa, 35 – podkładka zębata, 36–38 – pierścień uszczelniający, 41 – smarownica kapturowa, 42 – śruba z uchem, 47, 48, 51 – podkładka, 50 – wpust



Rys. 7.9. Rysunek wykonawczy elementu roboczego do zasilacza ślimakowego prasy walcowej o średnicy walców 450 mm do scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych

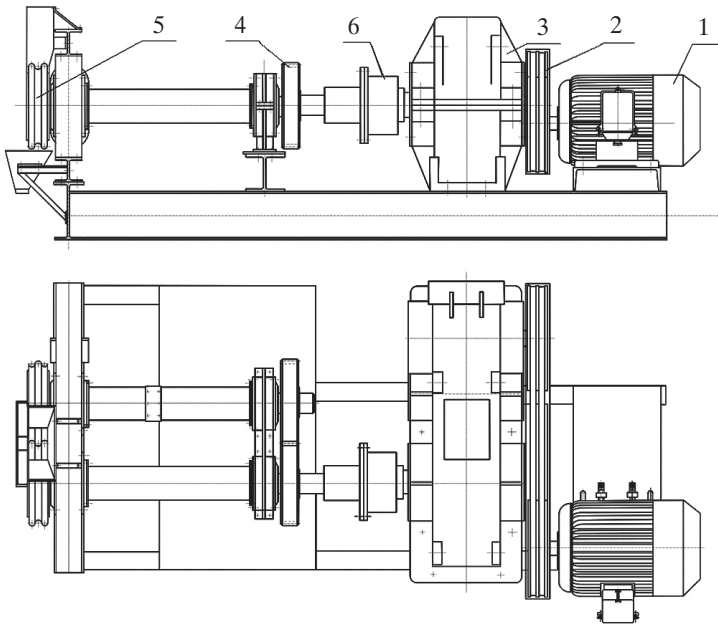
Wyniki badań scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych wykorzystano przy projektowaniu węzła stanowiska przemysłowego (rys. 7.10). Wyposażono go w prasę walcową PW 360 z poziomo usytuowanymi pierścieniami formującymi.



- 1 – zespół mieszarki łopatkowej,
- 2 – zespół prasy walcowej,
- 3 – konstrukcja pomostowa

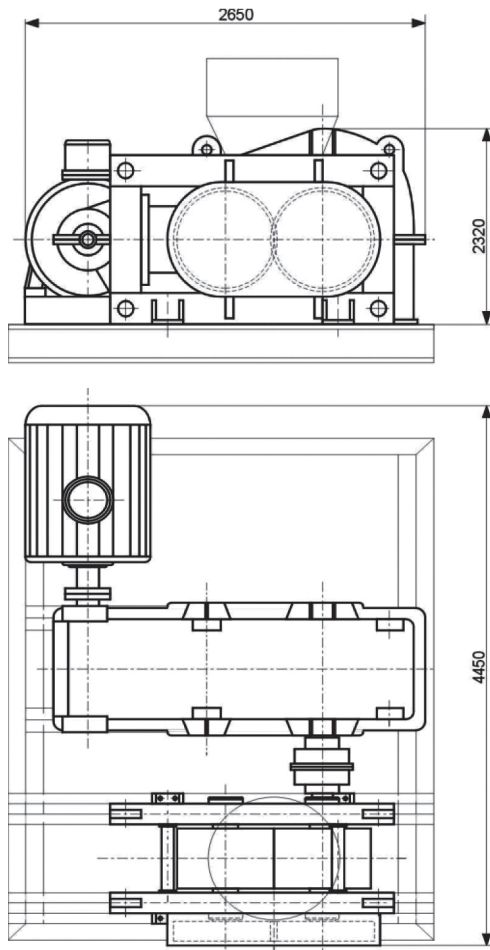
Rys. 7.10. Schemat węzła brykietowania stanowiska przemysłowego wyposażonego w prasę walcową PW 360 do scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych

Na rysunku 7.11 przedstawiono prasę walcową PW 360 z walcami usytuowanymi poziomo i grawitacyjnym zasilaniem, a na rysunku 7.12 schemat przemysłowej prasy walcowej PW 500.



Rys. 7.11. Prasa walcowa PW 360 z walcami usytuowanymi poziomo i grawitacyjnym zasilaniem: 1 – silnik, 2 – przekładnia pasowa, 3 – przekładnia zębata, 4 – przekładnia zębata synchronizująca, 5 – pierścienie formujące, 6 – sprzęgło

Prasę walcową PW 500 testowano najpierw w Krakowskich Zakładach Przemysłu Nieorganicznego Bonarka, gdzie brykietowano fluorek wapnia na potrzeby hutnictwa stali. Również dzięki zastosowaniu tej prasy rozwiązano problem zagospodarowania podziarna wapna palonego w spółce Polsin-Karbid w Chorzowie. Następnie prasę tego typu zastosowano w węźle brykietowania zbudowanym na terenie Elektrociepłowni Bełchatów, gdzie służyła do brykietowania gipsu IOS oraz w Piotrkowie Kujawskim do scalania węgla brunatnego. Kolejne testowanie tej prasy walcowej miało miejsce w Hucie im. T. Sendzimira. Stanowiła tam podstawowy element węzła brykietowania mułków zgorzelinowych. Doświadczenia zdobyte podczas eksploatacji prasy walcowej PW 500 były pomocne przy modernizacji jej napędu [56]. Polega ona na zastosowaniu w zespole układu napędowego motoreduktora serii Drive 6000 CHHMS75-6265-59/T F1250S/6, tzn. silnika elektrycznego o mocy 55 kW i prędkości obrotowej nominalnej $n_n = 980$ obr/min oraz reduktora CYCLO o przełożeniu $i = 59$. Do regulacji prędkości obrotowej walców przewiduje się zastosowanie przemiennika częstotliwości FRA 540LG75KE1 (Mitsubishi Electric).



Rys. 7.12. Schemat przemysłowej prasy walcowej PW 500 do scalania osadów ściekowych (wersja dotychczasowa) [68]

Prasy walcowe zaprojektowane do scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych mogą służyć również do zagospodarowania innych materiałów drobnoziarnistych. Są wśród nich paliwa, półprodukty oraz odpady powstające w sektorze gospodarczym.

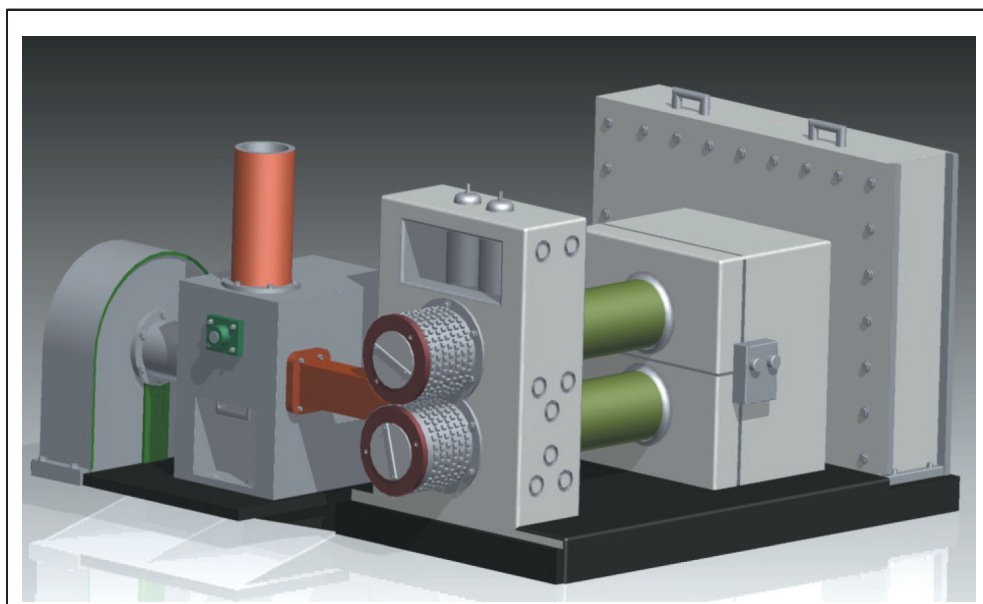
Celem badań procesu brykietowania w laboratoryjnych prasach walcowych drobnoziarnistych materiałów odpadowych było:

- wybranie sposobu przygotowania tych materiałów do brykietowania oraz wyznaczenie podstawowych parametrów procesu technologicznego,
- określenie wytrzymałości mechanicznej brykietów,
- stworzenie bazy danych niezbędnych do opracowania koncepcji linii technologicznych do brykietowania badanych odpadów,
- dobór konfiguracji układu zagęszczania prasy walcowej.

W tabelach 7.4 i 7.5 przedstawiono przykłady możliwych zastosowań prasy walcowej PW 360 i prasy walcowej PW 500 do brykietowania materiałów odpadowych z sektora gospodarczego, a na rysunku 7.13 – wizualizację pierścienia formującego do wytwarzania brykietów bez płaszczyzny podziału do prasy walcowej PW 360.

Tabela 7.4

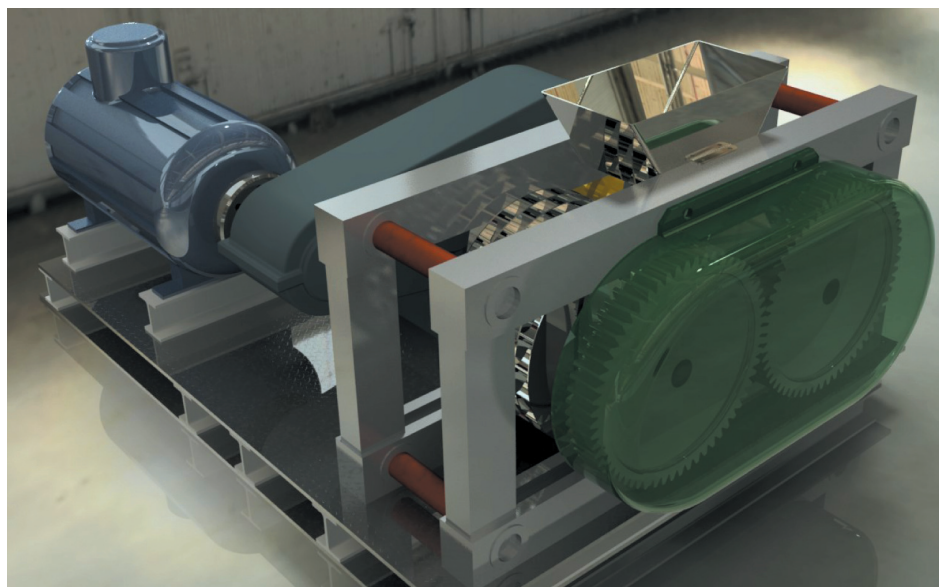
Przykłady zastosowania prasy walcowej PW 360



Nazwa odpadu	Sposób brykietowania	Sposoby zagospodarowania brykietów
Pyły i zgary miedziopodobne	z lepiszczem	komponent wsadu pieca szybowego do kamienia miedziowego
Wióry brązów łożyskowych	bez lepiszcza	wsad złomowy do pieca tyglowego
Poregeneracyjny tlenek żelaza	z lepiszczem	komponent wsadu wielkopiecowego oraz materiał do produkcji farb i lakierów
Wióry stalowe	bez lepiszcza	komponent wsadu wielkopiecowego
Pyły grafitowe	z lepiszczem	komponent wsadu wielkopiecowego oraz konwertorowego
Mineralna wełna szklana	z lepiszczem	komponent wsadu piecowego
Gąbka kadmowa	bez lepiszcza	wsad pieca elektrycznego do destylacji kadmu
Drobnziarniste zgary aluminiowe	z lepiszczem	w stalownictwie do odtleniania, odsiarczania i rafinacji

Tabela 7.5

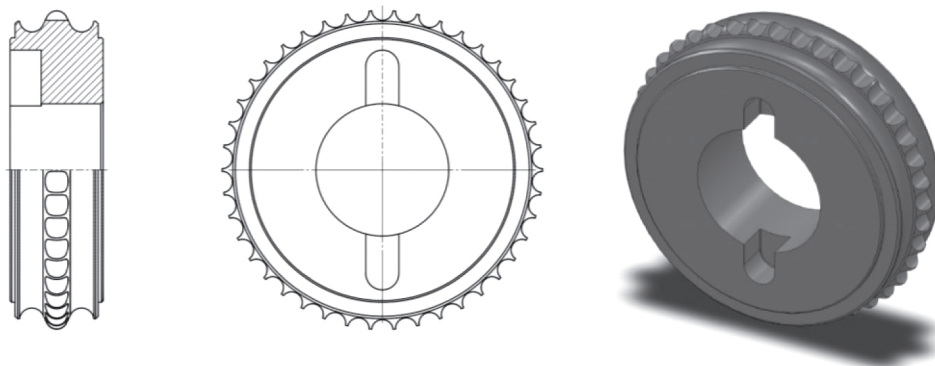
Przykłady zastosowania prasy walcowej PW 500



Nazwa odpadu	Sposób brykietowania	Sposoby zagospodarowania brykietów
Drobnoziarnisty węgiel brunatny	bez lepiszcza	substytut paliwa
Paliwa kompozytowe	bez lepiszcza	substytut paliwa
Miał węgla kamiennego	z lepiszczem	substytut paliwa
Pylisty węgiel drzewny	z lepiszczem	substytut paliwa
Pylisty węgiel brunatny	z lepiszczem	substytut paliwa
Gips IOS	bez lepiszcza	dodatek uszlachetniający cement, surowiec do produkcji gipsu budowlanego
Pyły cynkowo-ołowiowe	z lepiszczem	komponent wsadu pieca szybowego do cynku i ołowiu
Tlenek cynku	z lepiszczem	komponent wsadu pieca szybowego do cynku i ołowiu
Pyły i szlasy żelazonośne	z lepiszczem	komponent wsadu wielkopieczowego
Szlasy z mokrej oczyszczalni gazów wielkopieczowych	z lepiszczem	komponent wsadu wielkopieczowego
Mułki zgorzelinowe	z lepiszczem	komponent wsadu wielkopieczowego oraz konwertorowego

Tabela 7.5 cd.

Pył wielkopiecowy	z lepiszczem	komponent wsadu wielkopiecowego
Szlam konwertorowy	z lepiszczem	komponent wsadu wielkopiecowego oraz konwertorowego
Zendra walcownicza	z lepiszczem	komponent wsadu wielkopiecowego oraz żeliwniaka
Drobnoziarnisty żelazomangan	z lepiszczem	dodatek wykańczający i odtleniający stal
Fluorek wapnia	bez lepiszcza	dodatek upłynniający żużel, zmniejszający zawartość siarki i fosforu podczas wytopu stali
Drobnoziarnisty fosforyt	z lepiszczem	komponent wsadu wielkopiecowego
Podziarno karbidu	bez lepiszcza	substytut karbidu kawałkowego
Drobnoziarnisty żelazokrzem	z lepiszczem	dodatek wykańczający i odtleniający stal
Pylista sól kamienna	bez lepiszcza	lizawki dla zwierząt
Drobnoziarniste nawozy sztuczne	bez lepiszcza	produkt dla rolnictwa
Koksujący węgiel kamienny	bez lepiszcza	proces koksowania
Podziarno wapna palonego	bez lepiszcza	substytut kawałkowego wapna palonego
Szlamy poszlifyerskie	z lepiszczem	komponent wsadu pieca łukowego



Rys. 7.13. Wizualizacja pierścienia formującego do wytwarzania brykietów bez płaszczyzny podziału do prasy walcowej PW 360

Podsumowanie

Zastosowanie metod termicznej konwersji przy neutralizacji odpadów powstających w sektorze gospodarczym i przemysłowym można rozpatrywać, biorąc pod uwagę trzy kryteria: ekonomiczne, ekologiczne i energetyczne. Zagospodarowanie komunalnych osadów ściekowych w oczyszczalniach ścieków obsługujących aglomeracje do 100 tys. RLM, na których obszarze ze względów ekonomicznych nie buduje się spalarni, wiąże się z koniecznością nadania temu odpadowi postaci kawałkowej. Obniża się dzięki temu koszty jego transportu do miejsca utylizacji i minimalizuje zagrożenie dla środowiska, a zagospodarowanie komunalnych osadów ściekowych w wyniku termicznej konwersji ogranicza zużycie zasobów naturalnych i redukuje ilość zanieczyszczeń.

Opracowana metoda doboru przemysłowych pras walcowych do scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych oraz wyniki badań podstawowych są niezwykle pomocne przy konstruowaniu linii technologicznych, doborze geometrycznych cech konstrukcyjnych pierścieni formujących i elementu roboczego zasilacza ślimakowego, a także określaniu parametrów pracy urządzeń. Przedstawione w monografii wyniki badań wskazują na możliwość zastosowania technologii brykietowania mieszanek komunalnych osadów ściekowych w przemysłowej prasie walcowej wyposażonej w pierścienie formujące o wgłębieniach w kształcie siodła lub gładkie walce. Uzyskane wyniki badań będą pomocne przy opracowaniu oceny opłacalności instalacji do zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych i doskonaleniu konstrukcji pras walcowych.

Do najważniejszych efektów niniejszej pracy należy:

- opracowanie technologii scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych w prasie walcowej,
- ustalenie konfiguracji układu zagęszczania prasy walcowej,
- określenie wartości wskaźników pozwalających na ocenę efektów scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych,
- wyznaczenie wartości obciążeń elementów roboczych prasy walcowej,

- określenie metodyki wyznaczania parametrów konstrukcyjnych, materiałowych i kinematycznych mających wpływ na przebieg procesu zagęszczania mieszanek komunalnych osadów ściekowych w prasie walcowej,
- konkretyzacja modelu przepływu materiału drobnoziarnistego przez zasilacz ślimakowy,
- ustalenie założeń do projektów pras walcowych o różnych średnicach pierścieni formujących,
- opracowanie procedury doboru przemysłowych pras walcowych do scalania mieszanek komunalnych osadów ściekowych.

Zasadne jest podjęcie dalszych badań zarówno w celu poznawczym, jak i utylitar-nym. Winny one obejmować dalsze rozwijanie teorii zagęszczania ośrodków sypkich oraz kontynuowanie prób przemysłowych w zakresie scalania wybranych materiałów odpadowych powstających w sektorze komunalnym i przemysłowym, a także doskona-lenie konstrukcji pierścieni formujących [66] i poszukiwanie nowych komponentów mieszanek komunalnych osadów ściekowych poprawiających własności paliwowe bry-kietów oraz ograniczające uciążliwości związane ze spalaniem tego odpadu.

Istotnym problemem jest ograniczenie emisji pyłów powstających podczas ter-micznej konwersji komunalnych osadów ściekowych [102]. W Katedrze Systemów Wytwarzania AGH, w zespole Bolesława Karwata, opracowano elektrofiltr do wychwytywania pyłów PM 10 oraz PM 2,5 stanowiących główne źródło niskiej emisji. Obecnie trwają intensywne prace zmierzające do wdrożenia tego urządzenia w celu realizacji zapisów dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/50/WE z 21 maja 2008 roku w sprawie jakości powietrza i czystszej powietrza dla Europy (dyrektywa CAFE). Wstępne wyniki badań wykazały, że przyjęte rozwiązanie konstrukcyjne elektrofiltru umożliwia znaczne ograniczenie emisji pyłów PM 10 i PM 2,5 emitowanych przez kotły eksploatowane w gospodarstwach domowych i małych kotłowniach lokalnych.

Autor ma nadzieję, że zrealizowanie założonego w pracy programu badań sta-nowić będzie istotny wkład w rozwój wiedzy na temat ośrodków zagęszczanych oraz z zakresu budowy i eksploatacji maszyn. Otrzymane wyniki badań mogą być rów-nież podstawą do prowadzenia prac projektowych dotyczących konstrukcji brykiecia-rek walcowych.

Literatura

- [1] Adam C., Peplinski B., Michaelis M., Kley G., Simon F.: *Thermochemical treatment of sewage sludge in European countries*. Waste Management, vol. 29, 2009, 1122–1128
- [2] Bembenek M., Hryniewicz M.: *Badania i opracowanie metody doboru układu zagęszczania prasy walcowej*. Wydawnictwa AGH, Kraków 2010
- [3] Bień J.: *Chosen aspects of thermal utilization of municipal sewage sludge*. Częstochowa 2011
- [4] Bień J.B., Wystalska K.: *Procesy termiczne w unieszkodliwianiu osadów ściekowych*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2008
- [5] Bień J.D.: *Zagospodarowanie komunalnych osadów ściekowych metodami termicznymi*. Inżynieria i Ochrona Środowiska, t. 15, nr 4, 2012, 439–449
- [6] Borowski G.: *Porównanie dwóch sposobów określenia wytrzymałości brykietów z materiałów drobnoziarnistych*. Postępy Nauki i Techniki, nr 12, 2012, 115–121
- [7] Borowski G.: *Wykorzystanie brykietowania do zagospodarowania odpadów*. Monografia. Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin 2011
- [8] Calvo L.F., Otero M., Jenkins B.M., Garcia A.I., Moran A.: *Heating process characteristics and kinetics of sewage sludge in different atmospheres*. Thermochimica Acta, vol. 409, 2004, 127–135
- [9] Cepanko V., Baltrenas P., Buinevicius K.: *Assessment of air pollution when incinerating fermented waste with combustion gas components*. Chemical and Process Engineering, vol. 31, 2010, 163–179
- [10] Cunningham J.C., Sinca I.C., Zavaliangos A.: *Analysis of tablet compaction. Part I: Characterization of mechanical behaviour of powder and powder/tooling friction*. Journal of Pharmaceutical Science, no. 93, 2004, 2022–2039
- [11] Darnell W.H., Mol E.A.J.: *Solids Conveying in Extruders*. SPE Journal, no. 4, 1956, 20–29
- [12] Darvell L.I., Jones J.M., Gudka B., Baxter X.C., Saddawi A., Williams A., Malmgren A.: *Combustion properties of some power station biomass fuels*. Fuel, vol. 89, 2010, 2881–2890

- [13] Dec R.T.: *Modelowanie procesu zagęszczania materiałów drobnoziarnistych w prasie walcowej*. Mechanika: kwartalnik Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, t. 11, z. 2, 1992, 101–110
- [14] Dec R.T.: *Study of compaction process in roll press*. [w:] *Proceedings, 22nd Biennial Conference – Institute for Briquetting and Agglomeration: November 1991, San Antonio, Texas*, IBA, Laramie 1991, 207–217
- [15] Dec R.T., Zavaliangos A., Cunningham J.C.: *Comparison of various modeling methods for analysis of powder compaction in roller press*. Powder Technology, vol. 130, 2003, 265–271
- [16] Donatello S., Tong D., Cheeseman C.R.: *Production of technical grade phosphoric acid from incineration sewage sludge ash (ISSA)*. Waste Management, vol. 30, 2010, 1634–1642
- [17] Drzymała Z.: *Industrial Briquetting – Fundamentals and Methods*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam 1993
- [18] Drzymała Z.: *Podstawy inżynierii procesu zagęszczania i prasowania*. PWN, Warszawa 1988
- [19] Drzymała Z., Guzik J., Zydroń W.: *Badania zużycia tworzyw konstrukcyjnych na pierścienie formujące pras walcowych*. Mechanika: kwartalnik Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, t. 11, z. 2, 1992, 121–133
- [20] Drzymała Z., Hryniewicz M., Janewicz A., Kosturkiewicz B.: *Wyniki badań nad rozwojem konstrukcji pras walcowych*. [w:] *Problemy rozwoju maszyn roboczych: X konferencja naukowa, Zakopane 20–24 stycznia 1997. Z. 1*, MET, Warszawa 1997, 73–80
- [21] Drzymała Z., Hryniewicz M., Kosturkiewicz B.: *Badania ślimakowego urządzenia dozująco-zagęszczającego*. [w:] Orzeszak S., Kwiatkowska M. (red.), *Rozwój podstaw budowy eksploatacji i badań maszyn roboczych ciężkich – w tym budowlanych: VI konferencja, Zakopane 18-21 stycznia 1993. Cz. 1*, IMRC. PW, Warszawa 1993, 71–78
- [22] Drzymała Z., Hryniewicz M., Kosturkiewicz B.: *Badania zmienności tarcia zewnętrznego w procesie zagęszczania materiałów drobnoziarnistych*. Mechanika: kwartalnik Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, t. 11, z. 2, 1992, 135–144
- [23] Drzymała Z., Hryniewicz M., Kosturkiewicz B.: *Wytyczne do konstrukcji zasilaczy ślimakowych do pras walcowych*. [w:] *Problemy rozwoju maszyn roboczych: XI konferencja naukowa, Zakopane 19–23 stycznia 1998*, Wydawnictwo Katedry Mechaniki Robotów i Maszyn Politechniki Śląskiej w Gliwicach, Gliwice 1998, 97–104
- [24] Drzymała Z., Hryniewicz M., Kosturkiewicz B.: *Zagadnienie doboru konfiguracji układu zagęszczania pras walcowych do brykietowania drobnoziarnistych odpadów przemysłowych*. Przegląd Mechaniczny, z. 13, 1998, 5–10

- [25] Drzymała Z., Kosturkiewicz B.: *Badania dla określenia wstępnych wytycznych do konstrukcji zasilacza ślimakowego*. Mechanika: kwartalnik Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, t. 13, z. 4, 1994, 531–541
- [26] Drzymała Z., Kosturkiewicz B.: *Synteza badań nad utylizacją osadów ściekowych w gospodarce*. [w:] Fečko P. (ed.), *Recyklace odpadů V: 26.10.2001, Ostrava*, VSB-TU, Ostrava 2001, 173–178
- [27] *Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE*. Dz.U.U.E.L.2009.140.16
- [28] *Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/52/UE z dnia 16 kwietnia 2014 r., zmieniająca dyrektywę 2011/52/UE w sprawie oceny wpływu wywieranego przez niektóre przedsięwzięcia publiczne i prywatne na środowisko*. Dz.U.WE.L.124
- [29] *Dyrektywa Rady 1999/31/WE z dnia 26 kwietnia 1999 roku w sprawie składowania odpadów*. Dz.U.U.E.L.182/1
- [30] *Dyrektywa Rady 91/271/EWG z dnia 21 maja 1991 roku dotycząca oczyszczania ścieków komunalnych*. Dz.U.WE.L.135
- [31] Dzik T., Hryniewicz M., Janewicz A., Kosturkiewicz B.: *Brykietowanie paliw stałych w prasie walcowej*. Przemysł Chemiczny, t. 96, nr 9, 2017, 1852–1855
- [32] Folgueras M.B., Diaz R.M., Xiberta J., Prieto I.: *Thermogravimetric analysis of the co-combustion of coal and sewage sludge*. Fuel, vol. 82, 2003, 2051–2055
- [33] Folgueras M.B., Diaz R.M., Xiberta J., Prieto I.: *Volatilisation of trace elements for coal-sewage sludge blends during their combustion*. Fuel, vol. 82, 2003, 1939–1948
- [34] Franz M.: *Phosphate fertilizer from sewage sludge ash (SSA)*. Waste Management, vol. 28, 2008, 1809–1818
- [35] Fytli D., Zabaniotou A.: *Utylization of sewage sludge in EU application of old and new methods – A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 12, 2008, 116–140
- [36] Gaska K., Wandrasz A.J.: *Optymalizacja procesów formowania paliw z odpadów komunalnych*. [w:] *Efektywne zarządzanie gospodarką odpadami: VII Międzynarodowe Forum Gospodarki Odpadami = Efficient management of solid waste: VII-th International Waste Management Forum: Kalisz – Poznań, Polska, 2007 r.*, Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych. Oddział Wielkopolski, Kalisz – Poznań, 609–619
- [37] Goldacker E., Rautenbach R.: *Zur Theorie der Pulverförderung gegen Druck in Extrudern*. Chemie Ingenieur Technik, Nr. 6, 1972, 405–410
- [38] Gorazda K., Wzorek Z., Tarko B., Nowak A.K., Kulczycka J., Henclik A.: *Phosphorus cycle – possibilities for its rebuilding*. Acta Biochimika Polonica, vol. 60, no. 4, 2013, 725–730

- [39] Guigon P., Simon O.: *Correlation between powder-packing and roll press compact heterogeneity*. Powder Technology, vol. 130, 2003, 257–264
- [40] Guigon P., Simon O.: *Roll press design-influence of force feed systems on compaction*. Powder Technology, vol. 130, 2003, 41–48
- [41] Hallmann E.: *Berechnung der Schnecke von Strangpressen für plastische Stoffe*. Die Ziegelindustrie, H. 12, 1962, 425–431
- [42] Hallmann E.: *Die Berechnung der Schneckenpresse für Stoffe aus festen Partikeln*. Die Ziegelindustrie, H. 9/10, 1960, 321–330, 627–634
- [43] Hejft R.: *Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych*. Politechnika Białostocka, Białystok; Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 2002.
- [44] Herrmann W.: *Das Verdichten von Pulvern zwischen zwei Walzen*. Verlag Chemie GmbH, Karlsruhe 1973
- [45] Herrmann W., Rieger R.: *Auslegung von Walzenpressen*. Aubereitungs-Technik, Nr. 12, 1977, 648–655
- [46] Hong Y., Mkilaha I.S.N., Naruse I.: *Screening of sorbents and capture of lead and cadmium compounds during sewage sludge combustion*. Fuel, vol. 83, 2004, 1001–1007
- [47] Hryniewicz M.: *Metoda doboru pras walcowych oraz opracowania założeń do ich modernizacji lub konstrukcji*. Rozprawy, Monografie – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, nr 58, Wydawnictwa AGH, Kraków 1997
- [48] Hryniewicz M.: *Model matematyczny procesu brykietowania drobnoziarnistych odpadów przemysłowych w prasie walcowej*. [w:] Wiatr I., Marczak H. (red.), *Modelowanie matematyczne w strategii gospodarowania środowiskiem: III Forum Inżynierii Ekologicznej, Naęczów 2000*, Ekoinżynieria, Lublin 2000, 269–276
- [49] Hryniewicz M., Bembenek M., Janewicz A., Kosturkiewicz B.: *Brykietowanie materiałów drobnoziarnistych w prasach walcowych z niesymetrycznym układem ząszczania*. Przemysł Chemiczny, t. 94, nr 12, 2015, 2223–2226
- [50] Hryniewicz M., Gara P., Bembenek M.: *Modelowanie rozkładu nacisku jednostkowego w procesie kompaktowania materiału sypkiego*. Automatyka, t. 15, z. 2, 2011, 175–182
- [51] Hryniewicz M., Janewicz A., Kosturkiewicz B.: *Badania tarcia zewnętrznego w procesie brykietowania materiałów miedzionośnych*. Inżynieria i Aparatura Chemiczna, nr 4s, r. 45 (37), 2006, 68–69
- [52] Hryniewicz M., Janewicz A., Kosturkiewicz B.: *Brykietowanie osadów ściekowych w prasie walcowej*. [w:] Hryniewicz M., Kochan E. red., *Problemy w budowie i eksploatacji wybranych maszyn i urządzeń technologicznych*, WIMiR AGH, Kraków 2004, 87–94

- [53] Hryniewicz M., Janewicz A., Kosturkiewicz B.: *Doskonalenie konstrukcji elementów formujących pras walcowych*. [w:] *Problemy rozwoju maszyn roboczych: XIX konferencja naukowa, Zakopane 23–26 stycznia 2006*, Wydawnictwo PK im. Tadeusza Kościuszki, Kraków 2006, 131–137
- [54] Hryniewicz M., Janewicz A., Kosturkiewicz B., Gara P.: *Badania procesów scalania osadów szlamów konwertorowych*. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, nr 3s, r. 42 (34), 2003, 73–74
- [55] Hryniewicz M., Kosturkiewicz B.: *Zmienność tarcia zewnętrznego w procesie brykietowania*. *Mechanika: kwartalnik Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie*, t. 13, z. 4, 1994, 555–563
- [56] Hryniewicz M., Kosturkiewicz B., Janewicz A.: *Koncepcja modernizacji napędu przemysłowej prasy walcowej PW 500*. [w:] Hryniewicz M., Kochan E. red., *Problemy w budowie i eksploatacji wybranych maszyn i urządzeń technologicznych*, WIMiR AGH, Kraków 2004, 71–78
- [57] Hryniewicz M., Kosturkiewicz B., Janewicz A.: *Scalanie drobnoziarnistych odpadów*. *Inżynieria Chemiczna i Procesowa. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej*, nr 972, z. 29, 2006, 89–98
- [58] Hryniewicz M., Kosturkiewicz B., Janewicz A.: *Scalanie odpadowej węgny szklanej*. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, nr 4s, r. 45 (37), 2006, 70–71
- [59] Hryniewicz M., Kosturkiewicz B., Janewicz A.: *Wybrane zagadnienia doskonalenia konstrukcji i eksploatacji pras walcowych*. *Problemy Eksploatacji*, nr 4 (55), 2004, 63–70
- [60] Janewicz A., Hryniewicz M., Kosturkiewicz B.: *Granulacja talerzowa odpadów cynkonośnych*. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna. Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, nr 3s, r. 42 (34), 2003, 77–78
- [61] Janewicz A., Kosturkiewicz B.: *Analiza podatności na zagęszczanie i brykietowanie mieszanek węgla brunatnego oraz biomasy*. *Przemysł Chemiczny*, t. 95, nr 8, 2016, 1482–1484
- [62] Janewicz A., Kosturkiewicz B.: *Brykietowanie węgla brunatnego z biomasą w celu uzyskania paliwa kompozytowego*. *Rynek Energii*, nr 5, 2014, 121–128
- [63] Janewicz A., Kosturkiewicz B.: *Compactibility of selected production wastes*. *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 20, no. 4A, 2011, 88–92
- [64] Janewicz A., Kosturkiewicz B.: *Otrzymywanie brykietów paliwa kompozytowego z węgla brunatnego i biomasy*. *Przemysł Chemiczny*, t. 94 nr 9, 2015, 1521–1523
- [65] Janewicz A., Kosturkiewicz B.: *Research on the properties and assessing vulnerabilities of CaF₂ to briquetting in a roll press*. *Chemik: Nauka-Technika-Rynek*, t. 66, nr 5, 2012, 428–435
- [66] Janewicz A., Kosturkiewicz B.: *Urządzenie do formowania brykietów*. Patent PL nr 224559, 2017

- [67] Janewicz A., Kosturkiewicz B.: *Wizualizacja grawitacyjnego dozowania nadawy do prasy walcowej*. [w:] *Zagadnienia urzędzeń ochrony środowiska*. WIMiR AGH, Kraków 2006, 241–248
- [68] Janewicz A., Kosturkiewicz B.: *Wyznaczanie zapotrzebowania na energię w procesie scalania osadów ściekowych w prasie walcowej*. *Problemy Eksploatacji*, nr 4 (55), 2004, 185–192
- [69] Janewicz A., Kosturkiewicz B., Hryniewicz M.: *Zużycie eksploatacyjne i niszczenie powierzchni roboczej elementów formujących pras walcowych*. [w:] *Problemy rozwoju maszyn roboczych: XXVI konferencja naukowa, Zakopane 27–31.01.2013: materiały konferencyjne*, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Przemysłu Hutniczego w Polsce, 2013, 1–9 [CD-ROM]
- [70] Jenike A.W., Shield R.T.: *On the plastic flow of Coulomb Solids Beyond original failure*. *Journal of Applied Mechanics*, vol. 26, 1959, 559–602
- [71] Johanson J.: *A Rolling Theory for Granular Solids*. *Journal of Applied Mechanics*. ASME Paper 1965, No. 65, 842–848
- [72] Kaczmarek A.: *The use of biomass in energy sector*. *Rynek Energii*, nr 2, 2008, 54–58
- [73] Korzeń Z.: *Zasady kształtowania lejów wysypowych w silosach i zbiornikach na materiały pylaste i sproszkowane. Część 1. Geometryczne kształtowanie lejów wysypowych według metody Jenikego*. *Cement-Wapno-Gips*, nr 12, 1991, 334–340
- [74] Korzeń Z.: *Zasady kształtowania lejów wysypowych w silosach i zbiornikach na materiały pylaste i sproszkowane. Część 2. Wyznaczanie parametrów plastycznego płynięcia i tarcia kontaktowego materiałów miękich w aparacie Jenikego*. *Cement-Wapno-Gips*, nr 1–2, 1992, 3–9
- [75] Kosturkiewicz B.: *Badania możliwości poprawy efektywności procesu brykietowania w prasie walcowej*. [w:] *Problemy w konstrukcji i eksploatacji maszyn hutniczych i ceramicznych: Jubileuszowa X Konferencja Naukowa. T. 1*, PiT, Kraków 2000, 205–214
- [76] Kosturkiewicz B.: *Badania obciążeń elementu roboczego zasilacza ślimakowego momentem skręcającym*. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budowa i Eksploatacja Maszyn*, z. 9, 2002, 235–243
- [77] Kosturkiewicz B.: *Badania przepływu materiału drobnoziarnistego w zasilaczu ślimakowym*. [w:] *Problemy rozwoju maszyn roboczych: IX Konferencja Naukowa, Zakopane 22–26 stycznia 1996*. Z. 3, 1996, 61–68
- [78] Kosturkiewicz B.: *Matematyczny model obciążenia elementu roboczego zasilacza ślimakowego*. *Automatyka*, t. 15, z. 2, 2011, 247–254
- [79] Kosturkiewicz B.: *Metoda zagospodarowania osadów ściekowych w przemyśle energetycznym*. [w:] *Zagadnienia urzędzeń ochrony środowiska*, WIMiR AGH, Kraków 2006, 249–259

- [80] Kosturkiewicz B.: *Modelowanie obciążeń elementu roboczego zasilacza ślimakowego siłą poosiową*. [w:] Hryniewicz M., Kochan E. (red.), *Problemy w budowie i eksploatacji wybranych maszyn i urządzeń technologicznych*, WIMiR AGH, Kraków 2004, 121–128
- [81] Kosturkiewicz B.: *Pasmowy model przepływu materiału drobnoziarnistego w zasilaczu ślimakowym*. *Mechanika: kwartalnik Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie*, t. 19, z. 4, 2000, 439–448
- [82] Kosturkiewicz B.: *Problem przygotowania osadów ściekowych do utylizacji*. [w:] Wzorek Z. [et al.] (red.), *Odzysk odpadów – technologie i możliwości*, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków 2005, 94–101
- [83] Kosturkiewicz B.: *Zagadnienie brykietowania osadów ściekowych z węglem kamiennym*. [w:] Kaproń (red.), *Rynek ciepła 2014: materiały i studia*, Wydawnictwo Kaprint, Lublin 2014, 119–132
- [84] Kosturkiewicz B.: *Zagadnienie doboru geometrycznych cech konstrukcyjnych ślimaków w urządzeniach do scalania drobnoziarnistych materiałów odpadowych*. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Nauki Techniczne. Budowa i Eksploatacja Maszyn*, nr 139, z. 8, 2001, 205–214
- [85] Kosturkiewicz B.: *Zagadnienie przepływu materiałów drobnoziarnistych w zasilaczu ślimakowym*. *Problemy Maszyn Roboczych. Kolegium Twórczości Technicznej Akademii Inżynierskiej w Polsce*, z. 17, 2001, 135–143
- [86] Kosturkiewicz B.: *Zagadnienie wykorzystania osadów ściekowych jako substytutu paliwa w piecach rusztowych*. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, nr 4s, r. 45 (37), 2006, 90–91
- [87] Kosturkiewicz B.: *Zagadnienie wykorzystania pras walcowych do zagospodarowania osadów ściekowych*. *Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów*, nr 4 (228), 2005, 138–145
- [88] Kosturkiewicz B., Hryniewicz M., Janewicz A., Drzymała Z.: *Badania nad przygotowaniem osadów ściekowych do utylizacji*. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, nr 3s, r. 42 (34), 2003, 94–95
- [89] Kosturkiewicz B., Janewicz A.: *Analysis of briquetting process of sewage sludge with coal to combustion process*. *E3S Web of Conferences* [dokument elektroniczny], vol. 10, art. no. 00041, 2016, 1–6
- [90] Kosturkiewicz B., Janewicz A.: *Briquetting of dusty rock-salt roll process*. *Chemic: nauka-technika-rynek*, t. 66, nr 5, 2012, 412–417
- [91] Kosturkiewicz B., Janewicz A.: *Brykietowanie odpadowego grafitu w prasie walcowej z podajnikiem ślimakowym*. *Przemysł Chemiczny*, t. 96, nr 8, 2017, 1691–1694
- [92] Kosturkiewicz B., Janewicz A.: *Brykietowanie osadów ściekowych z wapnem palonym i węglem kamiennym w prasach walcowych*. *Przemysł Chemiczny*, t. 94, nr 9, 2015, 1524–1526

- [93] Kosturkiewicz B., Janewicz A.: *Issue of Selecting Thickening System of Roll Press for Briquetting the Sewage Sediment*. Polish Journal of Environmental Studies, vol. 20, no. 4A, 2011, 141–144
- [94] Kosturkiewicz B., Janewicz A.: *Problem doboru konfiguracji układu zagęszczania prasy walcowej*. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budowa i Eksploatacja Maszyn, z. 9, 2002, 243–253
- [95] Kosturkiewicz B., Janewicz A.: *Scalanie wieloskładnikowych nawozów sztucznych*. [w:] *Zagadnienia urządzeń ochrony środowiska*, WIMiR AGH, Kraków 2006, 261–267
- [96] Kosturkiewicz B., Janewicz A.: *The Issue of Sludge Utilization for Power Production*. Polish Journal of Environmental Studies, 17 (3A), 2008, 313–316
- [97] Kosturkiewicz B., Janewicz A., Hryniewicz M.: *Granulacja dwustopniowa nawozów mineralnych*. Przemysł Chemiczny, t. 96, nr 9, 2017, 1873–1876
- [98] Kosturkiewicz B., Janewicz A., Hryniewicz M.: *Selection method for the roll press feeder*. Journal of Machine Construction and Maintenance, no. 3, 2017, 45–51
- [99] Kosturkiewicz B., Janewicz A., Hryniewicz M., Gara P., Bembenek M., Kosturkiewicz Ł.: *Scalanie gipsu z instalacji odsiarczania spalin w prasach walcowych*. Przemysł Chemiczny, t. 95, nr 8, 2016, 1492–1495
- [100] Kosturkiewicz B., Janewicz A., Hryniewicz M., Kosturkiewicz Ł.: *Synthesis on research results of FGD gypsum briquetting*. E3S Web of Conferences [dokument elektroniczny], vol. 14, art. no. 02031, 2017, 1–10
- [101] Kosturkiewicz B., Janewicz A., Hryniewicz M., Rozwadowski A.: *Zagadnienie zagospodarowania pylistego węgla drzewnego*. Rynek Energii, nr 6, 2015, 99–105
- [102] Kosturkiewicz B., Janewicz A., Magdziarz A.: *Application of electrofilters during incineration of communal sewage sludge*. Polish Journal of Environmental Studies, vol. 21, no. 5A, 2012, 201–205
- [103] Kosturkiewicz B., Janewicz A., Magdziarz A.: *Results of briquetting and combustion process on binder-free coking coal*. Polish Journal of Environmental Studies. vol. 23, no. 4, 2014, 1385–1389
- [104] Kosturkiewicz B., Janewicz A., Magdziarz A., Hryniewicz M., Bembenek M., Gara P.: *Zagadnienie brykietowania węgla kamiennego koksowego*. Rynek Energii, nr 2, 2014, 104–109
- [105] Kosturkiewicz B., Magdziarz A., Wilk M.: *Osady ściekowe jako paliwo odnawialne*. Rynek Energii, nr 5(96), 2011, 111–117
- [106] Kosturkiewicz B., Tora B.: *Proposition of energetic utilization of sewage sludge from Bochnia*. Waste Forum [dokument elektroniczny], č. 4, 2010, 385–388

- [107] Kosturkiewicz B., Tora B.: *Propozycja energetycznego wykorzystania osadów ściekowych w Bochni*. [w:] *Odpady i środowisko: międzynarodowa konferencja = Waste and environment: international conference: 21–22.10.2010, Cracow, Poland*, Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego. Zakład Wydawnictw i Promocji, Warszawa 2010, 14–24
- [108] Kotowicz J., Bartela Ł.: *Energetyczne wykorzystanie biomasy drzewnej – przegląd technologii*. Rynek Energii, nr 6, 2007, 22–28
- [109] Kowalczyk-Juško A., Kulig R., Laskowski J.: *The influence of moisture content of selected energy crops on the briquetting process parameters*. Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa – Polska Akademia Nauk. Oddział w Lublinie, t. 11, 2011, 189–196
- [110] *Krajowy plan działania w zakresie energii ze źródeł odnawialnych*. Minister Gospodarki, Warsaw 2010
- [111] *Krajowy program oczyszczania ścieków komunalnych*. Ministerstwo Środowiska, Warszawa 2005, Warsaw 2005
- [112] Lapa N., Barbosa R., Mendes B., Abelha P., Gulyurtlu I., Oliveira S.: *Chemical and ecotoxicological characterization of ashes obtained from sewage sludge combustion in a fluidized-bed reactor*. Journal of Hazardous Materials, vol. 147, 2007, 175–183
- [113] Leckner B., Amand L.E., Lücke K., Werther J.: *Gaseous emissions from co-combustion of sewage sludge and coal/wood in a fluidized bed*. Fuel, vol. 83, 2004, 477–486
- [114] Lovegrove J.G.A.: *An Examination of the stresses in Solids Being Conveyed in a Single-Screw Extruders*. Journal Mechanical Engineering Science, no. 5, 1974, 281–285
- [115] Lovegrove J.G.A., Williams J.G.: *Pressure generation mechanism in the feed section of screw extruders*. Polymer Engineering and Science, no. 8, 1974, 589–594
- [116] Magdziarz A.: *Identyfikacja zagrożeń korozyjnych i eksploatacyjnych w procesach spalania stałych paliw odnawialnych*. Rozprawy, Monografie – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, 316, Wydawnictwa AGH, Kraków 2016
- [117] Magdziarz A., Werle S.: *Analysis of the combustion and pyrolysis of dried sewage sludge by TGA and MS*. Waste Management, vol. 34, 2014, 174–179
- [118] Magdziarz A., Wilk M.: *Thermogravimetric study of biomass, sewage sludge and coal combustion*. Energy Conversion and Management, vol. 75, 2013, 425–430
- [119] Magdziarz A., Wilk M., Kosturkiewicz B.: *Investigation of sewage sludge preparation for combustion process*. Chemical and Process Engineering, vol. 32 (4/1), 2011, 299–309
- [120] Mills N., Pearce P., Farrow J., Thorpe R.B., Kirkby N.F.: *Environmental & economic life cycle assessment of current & future sewage sludge to energy technologies*. Waste management, vol. 34 (1), 2014, 185–195

- [121] Nadziakiewicz J., Kozioł M.: *Co-combustion of sludge with coal*. Applied Energy, vol. 75, 2003, 239–248
- [122] Nadziakiewicz J., Waclawiak K., Stelmach S.: *Procesy termiczne utylizacji odpadów*. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007
- [123] Nowicki L., Stolarek P., Olewski T., Bedyk T., Ledakowicz S.: *Mechanism and kinetics of sewage sludge pyrolysis by thermogravimetry and mass spectrometry analysis*. Chemical and Process Engineering, vol. 29, 2008, 813–825
- [124] *Ochrona środowiska 2016. Informacje i opracowania statystyczne GUS*. Warszawa 2016
- [125] Pająk T.: *Projekty spalarni odpadów komunalnych i osadów ściekowych w strategii zagospodarowania odpadów*. Inżynieria i Ochrona Środowiska, t. 13, nr 1, 2010, 53–66
- [126] Pająk T.: *Thermal treatment as sustainable sewage sludge management*. Environmental Protection Engineering, vol. 39, no. 2, 2013, 41–53
- [127] Pietsch W.: *Roll pressing*. John Wiley & Sons, New York 1976
- [128] Pietsch W.: *Size enlargement by agglomeration*. John Wiley & Sons, New York 1991
- [129] Pitt K.G., Heasley M.G.: *Determination of the tensile strength of elongated tablets*. Powder Technology, vol. 238, 2013, 169–175
- [130] *Report on critical raw materials for the UE. Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials*. European Commission, May 2014
- [131] *Rocznik Statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej 2012*. R. 72. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2012
- [132] *Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 8 stycznia 2013 r. w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów danego typu*. Dz.U. 2013, poz. 38
- [133] *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych*. Dz.U. 2015, poz. 257
- [134] *Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 6 marca 2017 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie opłat za korzystanie ze środowiska*. Dz.U. 2017, poz. 723
- [135] Różanowski B., Michałowski M., Kosturkiewicz B.: *Evaluation of content selected heavy metals in organs of willow tree as a measure of its potential use for biological sewage sludge utilization*. [w:] Soliński I. (red.), *Czysta energia – czyste środowisko 2008*, Agencja Wydawniczo-Poligraficzna Art-Tekst Mariusz Sierpień, Kraków 2008, 325–332
- [136] Senneca O.: *Kinetics of pyrolysis, combustion and gasification of three biomass fuels*. Fuel Processing Technology, vol. 88, 2007, 87–97
- [137] Siuta J.: *Spór o prawną i wykonawczą zasadność stosowania komunalnych osadów ściekowych*. Inżynieria Ekologiczna, vol. 45, 2015, 1–20
- [138] Skreiberg A., Skreberg O., Sandquist J., Sorum L.: *TGA and macro-TGA characterisation of biomass fuels and fuel mixtures*. Fuel, vol. 90, 2011, 2189–2197

- [139] Sobolewski A., Kotowicz J., Iluk T., Matuszek K.: *The influence of biomass type on the operating parameters of a fixed-bed gasifier*. Rynek Energii, vol. 3, 2009, 53–58
- [140] Stark K., Plaza E., Hultman B.: *Phosphorus release from ash, dried sludge and sludge residue from supercritical water oxidation by acid or base*. Chemosphere, vol. 62, 2006, 827–832
- [141] Thompson R.A.: *Mechanics of Powder Pressing: I, Model for Powder Densification*. American Ceramic Society Bulletin, vol. 60, no. 2, 1981, 237–242
- [142] *Uchwała nr 217 Rady Ministrów z dnia 24 grudnia 2010 r. w sprawie Krajowego planu gospodarki odpadami 2014*. M.P. 2010, nr 101, poz. 1183
- [143] *Uchwała nr 88 Rady Ministrów z dnia 1 lipca 2016 r. w sprawie Krajowego Planu Gospodarki Odpadami 2022*. M.P. 2016, poz. 784
- [144] *Ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 r. o biopaliwach i biokomponentach ciekłych*. Dz.U. 2006, nr 169, poz. 1199
- [145] Vamvuka D., Karouki E., Sfakiotakis S.: *Gasification of waste biomass chars by carbon dioxide via thermogravimetry*. Fuel, vol. 90, 2011, 1120–1127
- [146] Wandrasz J.W., Wandrasz A.J.: *Paliwa formowane: biopaliwa i paliwa z odpadów w procesach termicznych*. Wydawnictwa Seidel-Przywecki, Warszawa 2005
- [147] Wasielewski R., Stelmach S., Jagustyn B.: *Sewage sludge as a renewable energy carrier and CO₂ zero emission biomass in co-combustion with coal*. Environment Protection Engineering, vol. 39, no. 2, 2013, 145–152
- [148] Werle S., Wilk R.: *A review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: The Polish perspective*. Renewable Energy, vol. 35, 2010, 1914–1919
- [149] Werther J., Ogada T.: *Sewage sludge combustion*. Progress in Energy and Combustion Science, vol. 25 (1), 1999, 55–116
- [150] Wu H., Hanna M.A., Jones D.D.: *Thermogravimetric characterization of dairy manure as pyrolysis and combustion feedstocks*. Waste Management & Research, vol. 30 (10), 2012, 1066–1071
- [151] Wzorek Z.: *Odzysk związków fosforu z termicznie przetworzonych odpadów i ich zastosowanie jako substytutu naturalnych surowców fosforowych*. Monografia – Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, nr 356, Wydawnictwo PK, Kraków 2008
- [152] Wzorek Z., Nowak A.K., Gorazda K.: *Possibilities of communal sewage sludges management*. Waste Forum, vol. 4, 2010, 407–412
- [153] Yumbo Z., Lu Z., Hongmei Ch., Bibo X., Caiting L., Guangming Z.: *Experimental investigation on NO_x emission characteristics of a new solid fuel made from sewage sludge mixed with coal in combustion*. Waste Management and Research, vol. 33 (2), 2015, 157–164
- [154] Zenkov R.L.: *Mehanika nasyprnyh gruzov*. Mašinstroenie, Moskva 1964 [Зенков Р.Л.: *Механика насыпных грузов*. Машиностроение, Москва 1964]

