

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki
Katedra Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki

Załącznik nr3a

AUTOREFERAT

Załącznik do wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego
w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn

dr inż. Artur Wójcik

Kraków, dn. 21.03.2019

SPIS TREŚCI

1.	Dane osobowe	3
2.	Posiadane dyplomy i stopnie naukowe	3
3.	Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	4
4.	Wskazanie osiągnięcia naukowego	4
4.1.	Tytuł osiągnięcia naukowego	4
4.2.	Wykaz prac naukowych dokumentujących osiągnięcia naukowe, stanowiące podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego	4
4.3.	Omówienie celu i osiągniętych wyników prac naukowych oraz sposobu ich wykorzystania	5
4.4.	Główne osiągnięcia naukowo-badawcze i kierunki dalszych prac	28
5.	Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych	29
5.1.	Osiągnięcia naukowo – badawcze przed uzyskaniem stopnia doktora nauk technicznych	29
5.2.	Osiągnięcia naukowo – badawcze po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych	30
6.	Omówienie dorobku i osiągnięć popularyzatorskich, dydaktycznych, organizacyjnych	32
7.	Podsumowanie – sumaryczne zestawienie kryteriów osiągnięć	34

1. Dane osobowe

- 1.1. Imię i nazwisko: Artur Wójcik
- 1.2. Stopień naukowy: doktor nauk technicznych
- 1.3. Miejsce i adres zatrudnienia:
Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie
Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki
Katedra Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki
Ul. Balicka 120
30-149 Kraków
tel. +48 (012) 662-46-44

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

2006 – stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn

Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny

Temat rozprawy doktorskiej: *Metoda oceny dokładności odwzorowania powierzchni swobodnych w zastosowaniu do inżynierii odwrotnej*

Promotor: prof. dr hab. inż. Józef Gawlik (Politechnika Krakowska)

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Stanisław Adamczak (Politechnika Świętokrzyska)

dr hab. inż. Jerzy Sładek, prof. PK (Politechnika Krakowska)

2004 – Studium Pedagogiczne dla Absolwentów Szkół Wyższych – Centrum Pedagogiki i Psychologii Politechniki Krakowskiej

2000 – tytuł zawodowy magistra inżyniera

Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny

Kierunek: Zarządzanie i Marketing

Specjalność: Zarządzanie i Restrukturyzacja Zakładów

Temat pracy dyplomowej: *Analiza procesu produkcyjnego łożysk za pomocą metody FMEA i metody Taguchi* (studia ukończone z wyróżnieniem)

Promotor: prof. dr hab. inż. Józef Gawlik

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

W październiku 2000 roku na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej rozpocząłem studia doktoranckie, a od października 2000 roku, po uzyskaniu uprawnień nauczyciela akademickiego, podjąłem się realizacji obowiązków doktoranta w Instytucie Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, biorąc udział w pracach badawczych Instytutu (m.in. grant promotorski) oraz realizacji zajęć dydaktycznych prowadzonych przez Instytut.

Tuż przed obroną doktoratu rozpocząłem ponad sześcioletnią pracę w przemyśle, kierując wieloma działami (głównie w pionie produkcyjno-technologicznym) oraz dużymi projektami wdrożeniowymi (szczegółowe informacje – pkt. 5).

W 2011 roku zostałem powołany na członka Zarządu Ośrodka Badawczo - Rozwojowego Sprzętu Mechanicznego w Tarnowie, a od października 2012 r. rozpocząłem pracę w Katedrze Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki na Wydziale Inżynierii Produkcji i Energetyki, Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, na stanowisku adiunkta naukowo – dydaktycznego.

Zatrudnienie w jednostkach naukowych - stanowiska

01.10.2012 –	Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, Katedra Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki. Praca na stanowisku adiunkta naukowo-dydaktycznego.
01.10.2000– 31.01.2004	Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Studia Doktoranckie.

4. Wskazanie osiągnięcia naukowego

Osiągnięcie naukowe, stanowiące podstawę wszczęcia postępowania habilitacyjnego i znaczny wkład w rozwój dyscypliny Budowa i Eksploatacja Maszyn, według art.16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.), stanowi cykl 9 publikacji powiązanych tematycznie, na który składają artykuły naukowe opublikowane w czasopismach znajdujących się w bazie *JCR* (lista A wykazu MNiSW – trzy artykuły), w czasopiśmie krajowym znajdującym się poza bazą *JCR* (lista B wykazu MNiSW – cztery artykuły) oraz indeksowanych na *Web of Science* materiałach konferencyjnych (dwa artykuły).

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Modelowanie własności tribologicznych wybranych materiałów ziarnistych

4.2. Wykaz prac naukowych dokumentujących osiągnięcia naukowe, stanowiące podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego

- H1 Wójcik A.** (80%), Frączek J., Wota A. K. (2019) The methodical aspects of the friction modeling of plant granular materials. *Powder Technology*, 344, 504-513.
MNiSW – 35 pkt; IF = 3,230
- H2 Wójcik A.** (55%), Kłapa P., Mitka B., Sładek J. (2018) The use of the photogrammetric method for measurement of the repose angle of granular materials. *Measurement*, 115, 19–26.
MNiSW – 30 pkt; IF = 2,218
- H3 Wójcik A.** (58%), Kościelniak P., Mazur M., Mathia T.G. (2019) Granular materials morphological discrimination by the measurement of pixel intensity distribution (PID), *Mertology and Measurement Systems* 2/2019 (po pozytywnych recenzjach, przyjęte do druku)

MNiSW – 20 pkt; IF = 1,523

H4 Wójcik A. (85%), Frączek J. (2017) The influence of selected factors upon the value of external friction concerning plant granular materials, *Tribologia*, nr 4, 107-113.

MNiSW – 15 pkt

H5 Wójcik A. (85%), Frączek J. (2017) The influence of the repose angle and porosity of granular plant materials on the angle of internal friction and cohesion, *Tribologia*, nr 5, 117-123.

MNiSW – 15 pkt

H6 Wójcik A. (80%), Frączek J. (2016) Research on the correlation between the porosity of plant granular materials and the selected parameters of surface texture, *Tribologia*, nr 6, 179-189.

MNiSW – 15 pkt

H7 Wójcik A. (75%), Frączek J. (2016) The influence of the external surface topography of granular plant materials on external friction, *Tribologia*, nr 6, 191-203.

MNiSW – 15 pkt

H8 Wójcik A. (60%), Przybyła W., Francik S., Knapczyk A. (2018) The research into determination of the particle-size distribution of granular materials by digital image analysis. In: Mudryk K., Werle S. (eds) *Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation*. Springer Proceedings in Energy. Springer, Cham, DOI:10.1007/978-3-319-72371-6_61

MNiSW – 15 pkt

H9 Wójcik A. (80%), Francik S., Knapczyk A., (2019) The main factors determining the porosity of granular materials of biological origin, In: Wróbel M., Jewiarz M., Szłek A. (eds) *Renewable energy sources: engineering, technology, innovation: ICORES 2018*, Springer Proceedings in Energy (po pozytywnych recenzjach, przyjęte do druku)

MNiSW – docelowo 15 pkt

Zgłoszone osiągnięcie naukowe – **Modelowanie własności tribologicznych wybranych materiałów ziarnistych** zawarto w cyklu powiązanych tematycznie publikacji naukowych **H1÷H9**, których byłem pomysłodawcą oraz inicjatorem. Opracowałem też koncepcję metodyki badań eksperymentalnych, analizę wyników oraz ich dyskusję. Zgłoszone do czasopism publikacje redagowałem, a ich treści konsultowałem ze współautorami i koordynowałem proces wydawniczy (we wszystkich przedstawionych powyżej publikacjach byłem pierwszym i korespondencyjnym autorem).

Średni udział procentowy w opracowanie cyklu publikacji powiązanych tematycznie **H1÷H9** wynosi **73,1 %**. Sumaryczny *Impac Factor (IF)* publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego wynosi **6,971**, przy łącznym *IF* wszystkich publikacji **11,637**. Liczba punktów cyklu **H1÷H9** wg wykazu MNiSW, uwzględniająca mój udział procentowy wynosi **127,36** (przy całkowitej liczbie punktów **175,0**).

Prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego wraz z zakresem mojego wkładu w ich powstanie oraz oszacowanym udziałem procentowym przedstawia **Załącznik nr4, pkt. IB**.

Kopie prac, stanowiących podstawę wszczęcia postępowania habilitacyjnego wraz z oświadczeniami współautorów, określającymi indywidualny wkład każdego z nich w powstanie prac **H1÷H9**, zawiera **Załącznik nr5** (Kopie prac stanowiących osiągnięcie naukowe) oraz **Załącznik nr6** (Oświadczenia współautorów).

4.3. Omówienie celu i osiągniętych wyników prac naukowych oraz sposobu ich wykorzystania

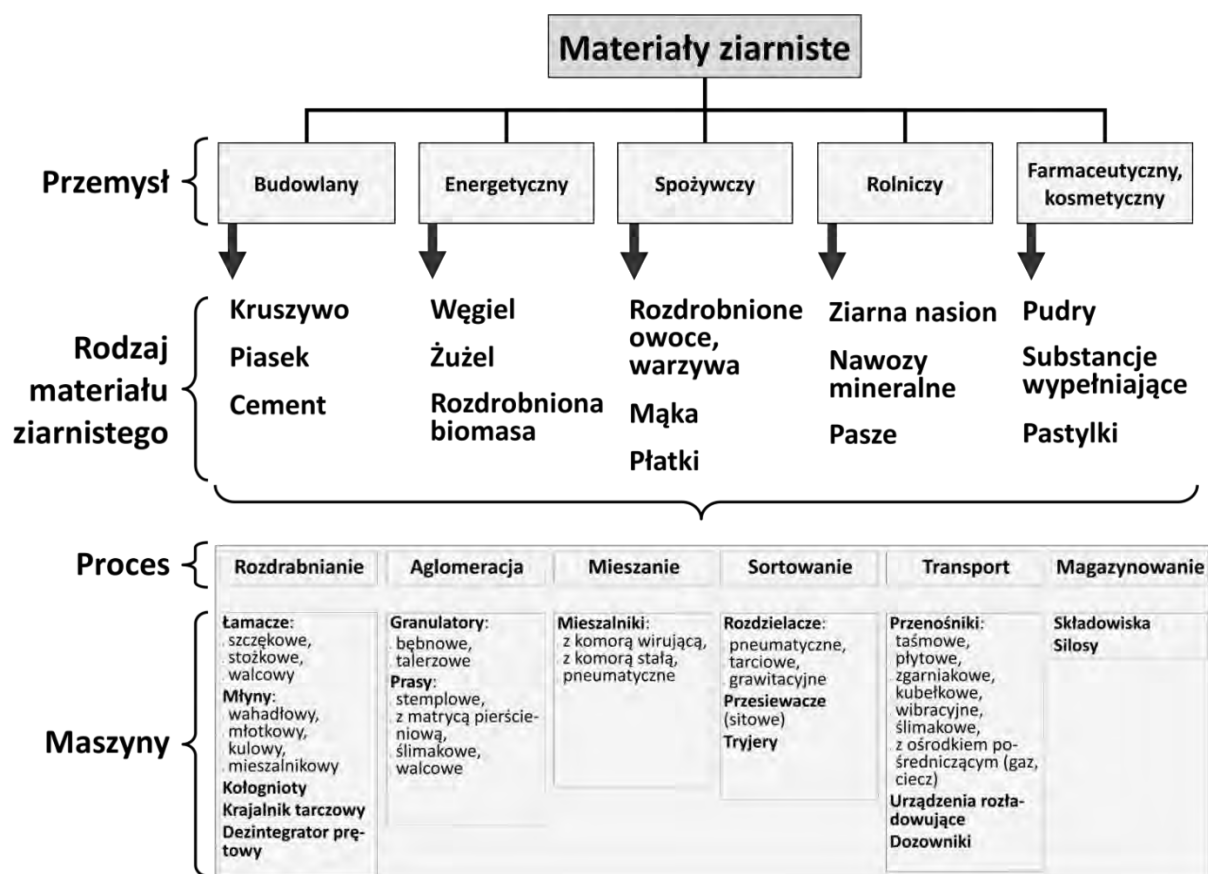
Rozwój energooszczędnych technologii determinuje rozwój nowych konstrukcji maszyn i urządzeń. Jednym z kluczowych zadań w obszarze inżynierii mechanicznej jest konstruowanie i eksploatacja maszyn wykorzystywanych w procesach technologicznych zachodzących z udziałem materiałów

ziarnistych. Obecnie jest to znaczących rozmiarów segment rynku, wart setki miliardów dolarów. Materiały ziarniste spotykane są praktycznie w każdej dziedzinie gospodarki tj. budowlanej, energetycznej, spożywczej, rolniczej oraz farmaceutycznej. Stanowią większość materiałów jakie są transportowane, przechowywane czy poddawane przeróbce za pomocą maszyn i urządzeń mechanicznych. Mogą występować jako surowiec (piasek, ziarna zbóż) lub efekt pewnych procesów technologicznych, takich jak rozdrabnianie, mielenie itp. Materiały ziarniste stanowią połączenie trzech frakcji, tzn. ciało stałe (materiał właściwy o określonym składzie granulometrycznym), gaz (przestrzeń pomiędzy ziarnami - pory) oraz ciecz (mogąca występować w trzech typach wiązań z ciałem stałym - chemicznym, fizyko-chemicznym i mechanicznym). Materiały te mogą być pochodzenia organicznego, mineralnego lub biologicznego. Ponieważ nie ma jednolitej klasyfikacji materiałów ziarnistych, stąd w zależności od przeprowadzanej analizy, parametrami klasyfikacji mogą być: wielkość ziaren, kształt ziarna, masa w jednostce objętości, ścieralność, zdolność płynięcia lub inne własności mechaniczne.

Projektowanie maszyn i procesów technologicznych zachodzących z udziałem materiałów ziarnistych opiera się na przewidywaniu zachowania tych materiałów (zarówno pojedynczego ziarna jak i całego złoża). Przewidywanie to jest jednak często bardzo trudne, ponieważ zachowanie się tych materiałów jest wynikiem zarówno indywidualnych własności mechanicznych poszczególnych ziaren, jak i szeregu interakcji zachodzących pomiędzy nimi, których źródłem są najczęściej oddziaływania zewnętrzne.

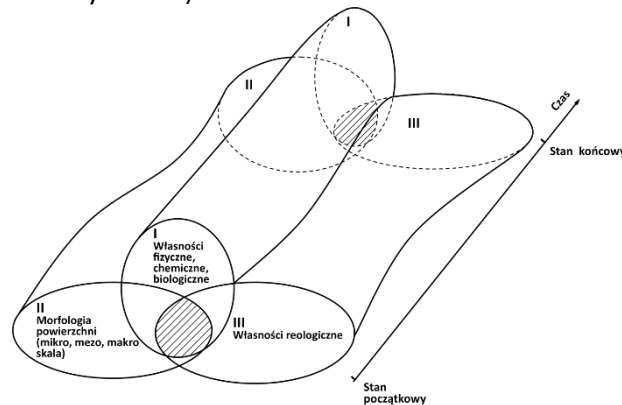
Materiały ziarniste są rozdrabnianie, aglomerowane, mieszane, sortowanie, magazynowane oraz transportowane. Można zaryzykować twierdzenie, że niezależnie od rodzaju i przeznaczenia tych materiałów, poddawane są one prawie wszystkim wspomnianym procesom technologicznym.

Rysunek 1 przedstawia klasyfikację materiałów ziarnistych, opracowaną w sposób uwzględniający ich wykorzystanie oraz proces przetwarzania.



Rys. 1. Klasyfikacja materiałów ziarnistych ze względu na sposób wykorzystania oraz proces przetwarzania (opracowanie własne)

Materiały ziarniste charakteryzuje szereg własności, które pogrupowano w zbiory i oznaczono I, II i III. W ujęciu ogólnym, relacje między zbiorami poszczególnych własności (I, II, III) wpływających na dany proces technologiczny, a tym samym determinujących określone rozwiązania konstrukcyjne maszyn, można przedstawić za pomocą diagramów Eulera/Venna (rys. 2). Na przykład własności grupy I to m.in. zdolność ziarna do wiązania wody, która wpływa na zmianę własności reologicznych (III), powodując zmianę kształtu ziarna pod wpływem nacisku i zmianę powierzchni kontaktu z elementami konstrukcyjnymi maszyn (zmiana morfologii złoża w skali makro - II). Powoduje to, że czynnik jakim jest zawartość wody w materiale wpływa w określony sposób, na przedstawione trzy grupy własności (zakresowany obszar).



Rys.2. Diagram poszczególnych grup własności (I, II, III) wpływających na procesy technologiczne oraz zmiany ich wzajemnych relacji w czasie [Mathia 1982].

Współpraca dwóch elementów (ziarno – maszyna) ma charakter nieodwracalny a dodatkowo określone relacje własności zmieniają się w czasie. Nie ma możliwości powrotu do warunków stanu początkowego, dlatego projektowane rozwiązania muszą uwzględnić możliwą zmianę czynników w czasie. Przykład stanowi zmieniająca się wilgotność materiału w trakcie trwania procesu, która może wpływać na zmianę własności tribologicznych kontaktujących się ze sobą elementów, a te z kolei mają kluczowe znaczenie w projektowaniu i eksploatacji maszyn.

Trudności z teoretycznym opisem wielu zjawisk, będących udziałem materiałów ziarnistych, sprawiają że, konstrukcja maszyn i urządzeń, realizujących procesy technologiczne z udziałem materiałów ziarnistych w dużej mierze opierają się na wiedzy empirycznej. Kluczowym zjawiskiem występującym w procesach technologicznych materiałów ziarnistych jest tarcie.

Oddzielną, a zarazem specyficzną grupą tych materiałów są ziarniste materiały roślinne. Według prognozy FAO (Food and Agriculture Organization), światowa produkcja samego ziarna zbóż w 2018r. szacowana była na 2,595 mld ton. Ze względu na skalę produkcji, zainteresowanie badaniami własności fizycznych ziarnistych materiałów roślinnych jest powszechne. Do grupy tych materiałów należą ziarna zbóż, roślin oleistych i strączkowych oraz rozdrobniona biomasa różnego rodzaju. Wykorzystywane są one głównie w rolnictwie, przemyśle spożywczym oraz energetyce. Szeroki zakres zastosowania generuje konieczność opisu i opracowania modelu ich własności tribologicznych.

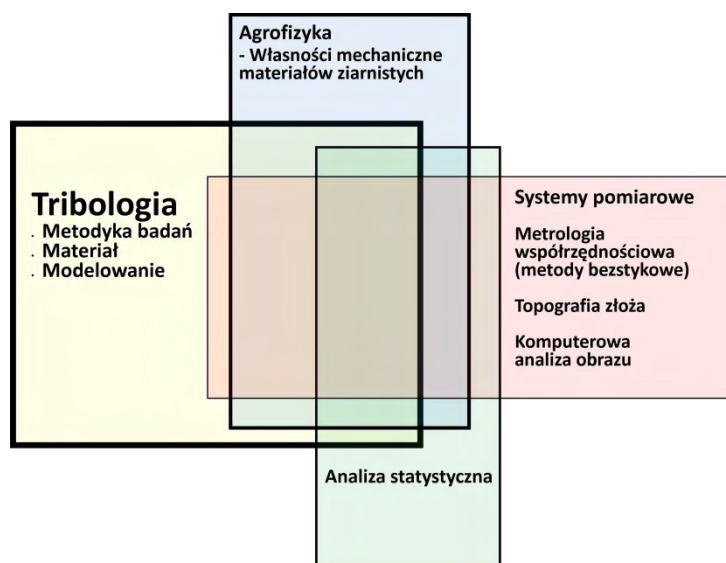
Przedstawiona tematyka mieści się z obszarze dyscypliny Budowa i Eksploatacja Maszyn (Inżynieria Mechaniczna) zarówno pod względem zastosowanych narzędzi i metodyki badawczej, jak również wykorzystania wyników badań do procesu projektowania maszyn i urządzeń, używanych głównie do transportu oraz przechowywania materiałów ziarnistych.

Ze względu na wielowątkowość tematyki (rys. 3), obejmującej zagadnienia z zakresu tribologii, agrofizyki oraz metrologii (systemów pomiarowych, w szczególności systemów optycznych) uzupełnione aparatem matematycznych (analizą statystyczną), w celu realizacji zaplanowanych badań konieczne było nawiązanie współpracy z przedstawicielami różnych jednostek naukowych

(Katedra Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki, Laboratorium Technologii Produkcji i Oceny Jakości Biopaliw, Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej, Katedra Geodezji Rolnej, Katastru i Fotogrametrii, Instytut Matematyki Uniwersytet Jagielloński, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes LTDS - Francja).

W związku ze wskazaną powyżej wielowątkowością tematyki cele moich badań, przedstawionych w cyklu publikacji naukowych H1÷H9 a stanowiących podstawę wszczęcia postępowania habilitacyjnego, skoncentrowały się głównie na:

- badaniu zjawiska tarcia materiałów ziarnistych pochodzenia roślinnego, a w szczególności, wpływie określonych własności mechanicznych materiału ziarnistego na siłę tarcia (statyczną, kinetyczną). Proponowane modele uwzględniały równoczesny wpływ wielu czynników, często pomijanych przez innych badaczy (nacisk, wilgotność, rodzaj materiału, prędkość poślizgu, powierzchnia kontaktu),
- wykorzystaniu metrologii współrzędnościowej, w szczególności metod optycznych oraz komputerowej analizy obrazu, do akwizycji i analizy topografii powierzchni (struktury geometrycznej powierzchni) złoza materiałów ziarnistych w celu uwzględnienia charakteru kontaktu ziaren z materiałem konstrukcyjnym oraz wpływu uzyskanej geometrii złoza na inne własności fizyczne.
- badaniach własności mechanicznych/fizycznych materiałów ziarnistych w celu określenia ich wzajemnych relacji oraz wpływu na zjawisko tarcia.
- wykorzystaniu analizy statystycznej obrazu cyfrowego złoza materiałów ziarnistych do kontroli ich przepływu w zautomatyzowanych systemach transportowanych.



Rys. 3. Metodologiczna koncepcja obszaru badań (opracowanie własne)

Materiały ziarniste pochodzenia roślinnego są jednym z najtrudniejszych obiektów do teoretycznego opisu. Wynika to z faktu, że są to materiały o dużej niejednorodności struktury oraz dużej podatności na zmieniające się warunki otoczenia - zwłaszcza wilgotność, która wpływa na główne własności mechaniczne tych materiałów. Dodatkowym czynnikiem jest to, że własności mechaniczne ziaren kształtują się w okresie wzrostu, przy różnych warunkach atmosferycznych, rodzaju gleby, sposobie uprawy i nawożenia, co sprawia, że nawet w obrębie danego gatunku niektóre własności mechaniczne pojedynczych ziaren mogą się różnić.

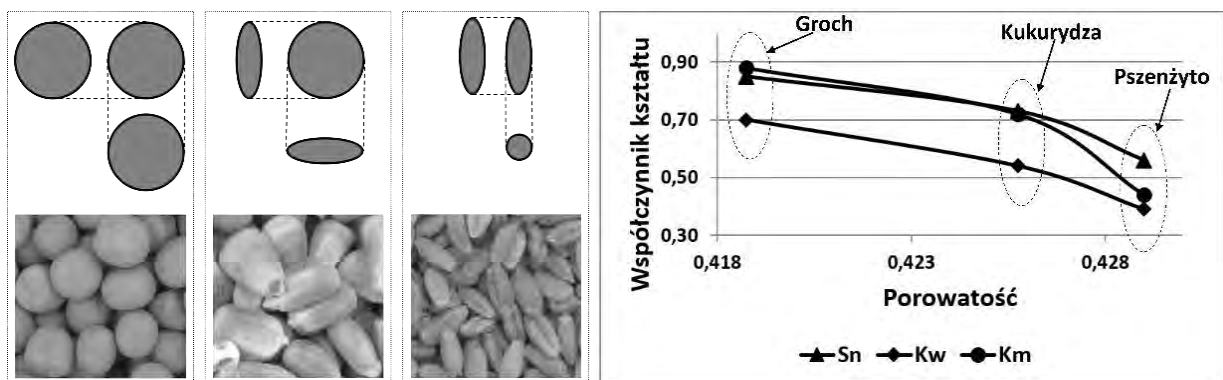
Specyfika prowadzenia procesów technologicznych z udziałem materiałów ziarnistych pochodzenia roślinnego zależy od ich finalnego wykorzystania. Jeżeli jest to materiał siewny, wówczas ważne jest takie prowadzenie procesów (podczas zbioru, transportu, magazynowania), aby nie doprowadzić do uszkodzenia nasion. W przypadku produkcji żywności, pasz oraz zastosowaniu tego typu materiałów

na cele niekonsumpcyjne, np. do produkcji zrębków i peletu wykorzystywanych na cele energetyczne, istotne jest takie poprowadzenie procesów technologicznych (np. rozdrabnianie, mielenie, aglomeracja), aby wydatek energetyczny był najmniejszy [H5].

Doświadczenia przemysłowe potwierdzają, że większość problemów eksploatacyjnych instalacji do przetwarzania materiałów ziarnistych dotyczy głównie przesyłania materiału między operacjami procesu technologicznego oraz pakowania (wg. [Opaliński 2014] nawet do 90%). Problemy te dotyczą głównie ścierania i uszkodzania materiału ziarnistego, zapychania, blokowania różnego rodzaju przepustów, zsyków (skłonność do tworzenia sklepień), co zakłóca ciągłość przepływu procesu, powodując przestoje. Dlatego wyniki badań własności mechanicznych materiałów ziarnistych oraz wzajemnych relacji pomiędzy tymi własnościami, pomagają w konstrukcji nowych lub modernizacji już istniejących maszyn i urządzeń.

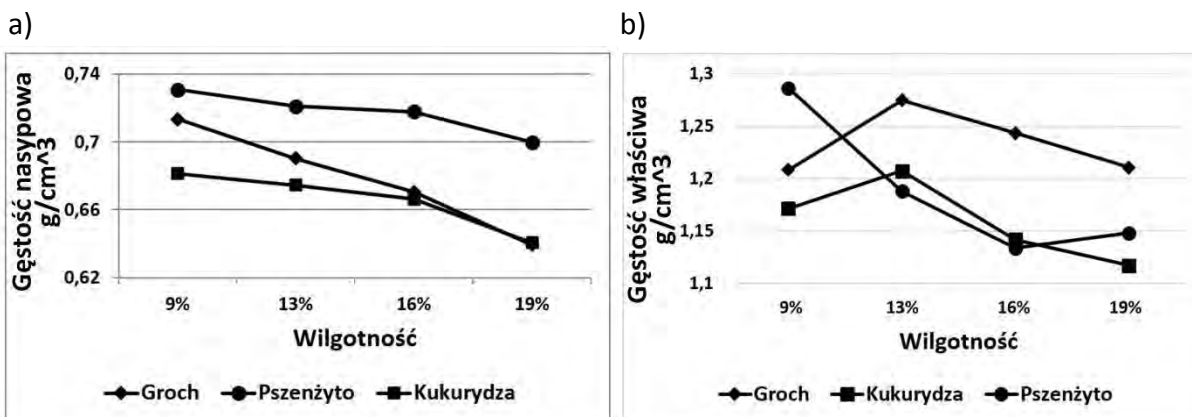
Jedną z podstawowych własności materiałów ziarnistych jest porowatość. Odnosi się ona bezpośrednio do objętości wolnych przestrzeni występujących pomiędzy cząstkami materiału właściwego. Porowatość możemy również wyrazić za pomocą gęstości nasypowej (odnoszącej się do masy ziaren znajdującej się określonej objętości) oraz gęstości właściwej (gęstości pojedynczego ziarna). Zagadnienia związane z pomiarem porowatości, jej zmianą w trakcie trwania procesów technologicznych (współczynnik ubicia dynamicznego), są istotne w kontekście projektowania, np. różnego rodzaju przenośników, w procesach automatycznego i precyzyjnego dozowania materiału oraz w procesach pakowania i magazynowania materiałów sypkich [H6].

Prowadzone przeze mnie badania wykazały, że porowatość nie zależy bezpośrednio od wielkości ziaren, natomiast duży wpływ na jej wartość ma kształt ziaren [H9]. Dla trzech badanych materiałów (groch, kukurydza, pszenżyto) charakteryzujących się odmiennym kształtem, najniższą porowatość uzyskałem dla ziaren zbliżonych kształtem do kuli, natomiast dla ziaren o kształtach wydłużonych porowatość była największa. Wynika to m.in. z faktu, że ziarna o kształcie wydłużonym poprzez wzajemne klinowanie się w złożu ziarnistym, ograniczają zdolność złoża do samo zagęszczania.



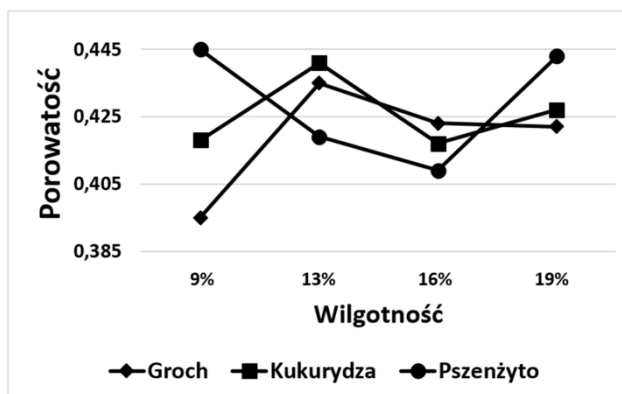
Rys. 4. Średnie wartości porowatości zależne od współczynnika kształtu (Kw, Km wsp. kształtu wg Grochowicz, Sn wsp. kształtu wg. Mohsenin) [H9].

Wyniki badań wykazały dodatkowo, że występuje silna liniowa korelacja pomiędzy wilgotnością a gęstością nasypową ($R^2=0,9$). Wraz ze wzrostem wilgotności, gęstość nasypowa maleje – rys. 5.



Rys. 5. Wpływ wilgotności na: a) gęstość nasypową, b) gęstość właściwą [H9].

Zauważono, że zmiana gęstości właściwej badanych materiałów pod wpływem wilgotności nie jest już tak oczywista. Parametr ten związany jest z wchłanianiem wody przez poszczególne ziarna oraz towarzyszącemu temu zjawisku wzrostem objętości ziaren. Okazuje się, że zjawisko to przebiega w różny sposób, w zależności od rodzaju materiału. Dla grochu oraz kukurydzy gęstość właściwa w początkowej fazie rośnie (do 13%), co sugeruje, że ziarna wchłaniają wodę, ale nie zwiększają swojej objętości. Następnie wzrost wilgotności powoduje spadek gęstości właściwej, co musi być spowodowane tym, że ziarna zaczynają pęcznieć (zwiększają swoją objętość). Natomiast inaczej zachowuje się pszenżyto, które od początku zwiększa swoją objętość. Fakt ten sprawia, że zależność porowatości od wilgotności, nie jest jednoznaczna w przypadku badanych materiałów [H5, H9].



Rys. 6. Wpływ wilgotności na porowatość [H9].

Poszukiwanie korelacji między porowatością a wilgotnością i kształtem ziaren (rys. 6) nie dało zadowalających wyników. Zagadnienie to wymaga więc podjęcia dalszych badań w celu uzyskania bardziej miarodajnych wyników dotyczących mechanizmu zmiany gęstości właściwej ziaren od wilgotności [H9].

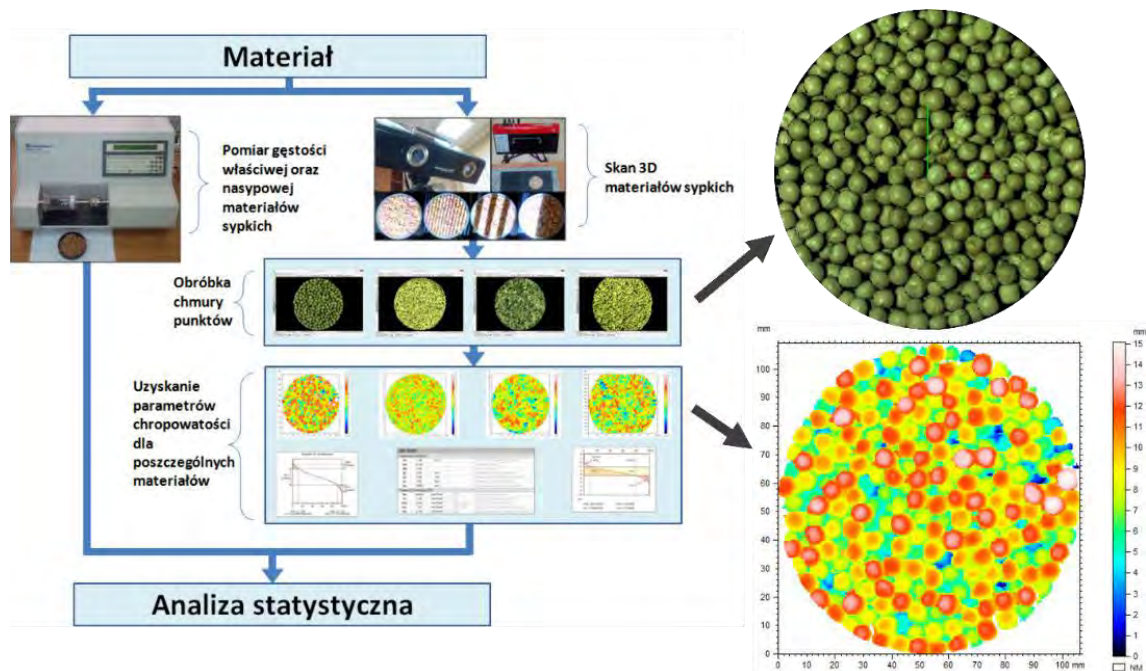
Współczynnik kształtu odnosi się do pojedynczego ziarna, natomiast jego wartość w żaden sposób nie charakteryzuje wzajemnego ułożenia ziaren (orientacji ziaren w złożu). Dlatego w ramach prowadzonych badań zaproponowałem wykorzystanie współrzędnościowej techniki pomiarowej do pomiaru warstwy wierzchniej złoża materiału ziarnistego.

Pomiary struktury geometrycznej powierzchni (SGP) stanowią podstawowe źródło wiedzy na temat procesu obróbki, któremu została poddana powierzchnia warstwy wierzchniej kształtowanego przedmiotu (technologiczna warstwa wierzchnia – TWW) oraz mechanizmów zużycia wynikających z procesu eksploatacji obiektu technicznego (eksploatacyjna warstwa wierzchnia EWW), [Wieczorowski 2013]. Biorąc pod uwagę, że charakter morfologiczny powierzchni warstwy

wierzchniej materiałów ziarnistych wykazuje pewne podobieństwa, co do struktury geometrycznej (topografii) powierzchni obrobionych lub ukształtowanych w wyniku eksploatacji, to do ich opisu z powodzeniem można zastosować parametry wykorzystywane do opisu i oceny SGP [H6].

Na uwagę zasługuje fakt, że opisanie struktury geometrycznej powierzchni złoża materiałów ziarnistych poprzez parametry SGP nie zostało do tej pory wykonane przez innych autorów. Takie podejście przyjąłem również jako sposób pośredniego określenia powierzchni kontaktu materiału ziarnistego z powierzchnią konstrukcyjną podczas zjawiska tarcia, które zostało opisane poniżej.

Badania przeprowadziłem na specjalnie przygotowanym stanowisku pomiarowym (wyposażonym w skaner optyczny 3D), według opracowanej przeze mnie procedury pomiarowej, uzyskując topografię powierzchni warstwy wierzchniej złoża badanych materiałów ziarnistych. Dla zeskanowanych materiałów ziarnistych została wyznaczana gęstość właściwa i usypowa oraz porowatość (rys. 7).



Rys. 7. Procedura pomiarowa [H6]

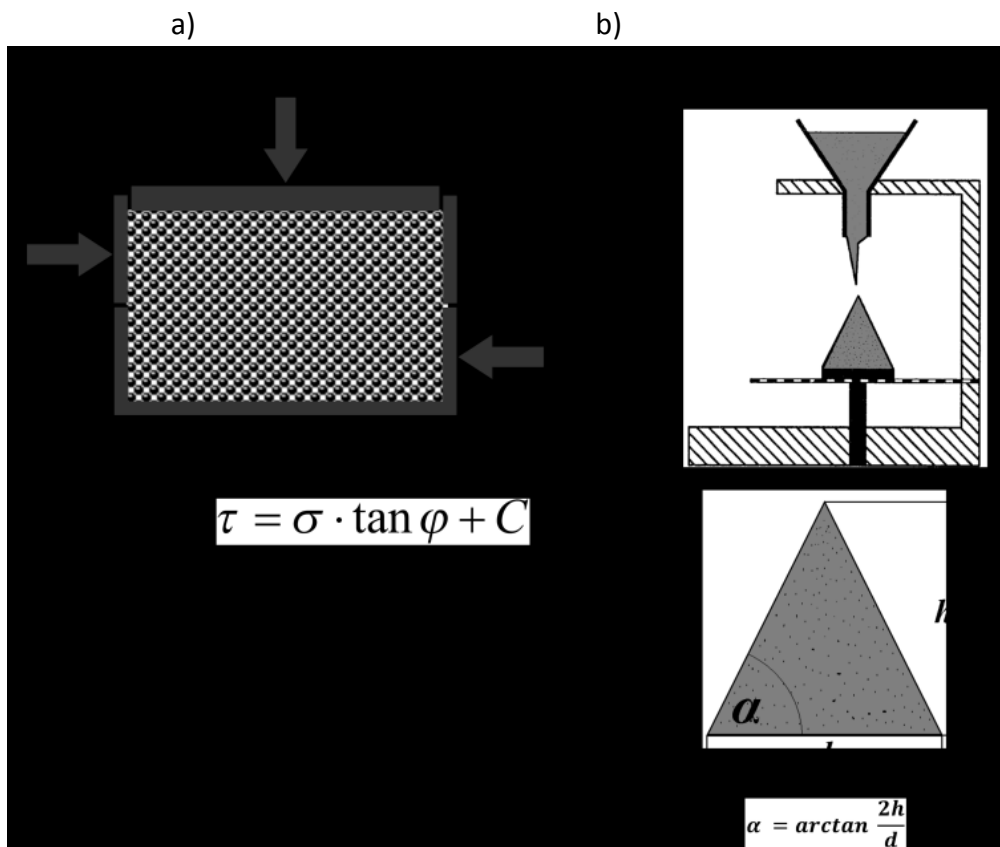
Wyznaczone parametry SGP poddano analizie statystycznej, której celem było znalezienie zależności pomiędzy zmienną zależną (jaką była porowatość), a uzyskanymi wartościami parametrów opisujących topografię powierzchni dla poszczególnych materiałów. Analiza wariacji wskazała istotność następujących parametrów (Sp , Vv , Vvc , $Sr1$), przy czym najwyższy stopień dopasowania modelu uzyskano dla parametru Sp (maksymalna wysokość wzniesienia powierzchni).

Sformułowanie hipotezy wyjaśniającej, uwzględniające fizykalną stronę uzyskanej zależności jest utrudnione. Wpływ parametru Sp nie wydaje się oczywisty mimo, że analiza statystyczna wskazała to jednoznacznie. Zakładając, że na porowatość materiałów sypkich wpływa kształt ziaren oraz wzajemne ich rozmieszczenie (dopasowanie), to uzależnianie porowatości od maksymalnej wysokości wzniesienia powierzchni wydaje się wątpliwe. Otrzymałą zależność należy tłumaczyć tym, że wysokość wzniesienia powierzchni może być związana z ułożeniem ziaren względem siebie, co w przypadku ziaren podłużnych (np. peletu) może być miernikiem ich mniej lub bardziej chaotycznego i wielokierunkowego ułożenia. Z fizycznego punktu widzenia, związek ten wymaga przeprowadzenia dalszych badań, uwzględniających standaryzację metod zapewniających możliwość uzyskania wyższej powtarzalności i odtwarzalności systemu pomiarowego. Należy również rozszerzyć analizę na pozostałe parametry topografii powierzchni pod kątem ich korelacji z porowatością. Otwartą kwestią

jest także zdefiniowanie alternatywnych parametrów topografii powierzchni, które lepiej obrazują kształt i ułożenie ziaren materiału.

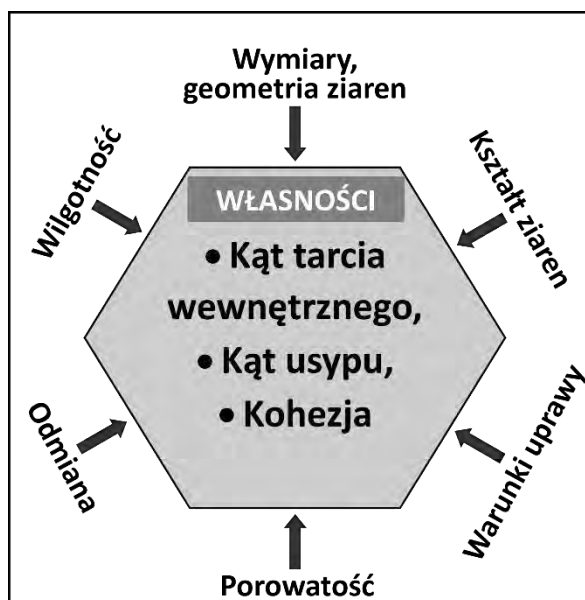
Pomiary wielu własności mechanicznych materiałów ziarnistych mogą być trudne do przeprowadzenia i wymagające zastosowania specjalistycznego oprzyrządowania. Dodatkowo, wielość czynników (m.in. tarcie wewnętrzne i kohezja), które powinny być uwzględnione w opisie zjawiska, utrudnia budowę wiarygodnych modeli. Dlatego uzasadnione jest prowadzenie badań mających na celu próbę zastąpienia trudnych do zmierzenia czynników przez czynniki, których wyznaczenie jest relatywnie proste, jak np. porowatość, kąt usypu, wilgotność.

W przypadku roślinnych materiałów ziarnistych tarcie wewnętrzne rozumiane jest jako opór stawiany przemieszczaniu się ziarna względem ziarna, zatem występuje pomiędzy poszczególnymi ziarnami tego samego ośrodka. Stanowią one jednak oddzielne elementy złoża i w tym kontekście zjawisko to mogłoby być traktowane jako tarcie zewnętrzne ziarno-ziarno (rys 8a). Natomiast kohezja C określana jest jako maksymalna wartość naprężenia stycznego przenoszonego przez ośrodek przy braku naprężenia normalnego [Łukaszuk J., Horabik J. 2002]. W przypadku materiałów konstrukcyjnych kohezja rozumiana jest jako opór stawiany przez ciało fizyczne w czasie rozdzielania na części. Jego miarą jest siła potrzebna do realizacji tego procesu. W tym kontekście dla roślinnych materiałów ziarnistych pojęcie kohezji, które jest uwzględniane w przypadku tarcia wewnętrznego, zasadniczo bliższe jest pojęciu adhezji czyli zdolności do łączenia się powierzchni ciał fizycznych. Obie siły wynikają wprawdzie z oddziaływań międzycząsteczkowych, ale adhezja jest zjawiskiem powierzchniowym, a kohezja występuje wewnątrz rozrywanego ciała. W wielu przypadkach rozdzielenie pojęcia kohezji i adhezji jest trudne. W badaniach złóż ziarnistych materiałów roślinnych przyjęto – podobnie jak w mechanice gruntów, że cohesion (spójność) to zespół sił fizykochemicznych, które wiążą szkielety i stawiają opór naprężeniom ścinającym. Pojęciem odwrotnym do kohezji jest zdolność materiałów ziarnistych do płynięcia, co bezpośrednio związane jest z kątem usypu, czyli kątem jaki tworzy tworząca stożka, który uformuje się w wyniku swobodnego sypania materiału ziarnistego na płaską powierzchnię. Kąt naturalnego usypu jest jedną z podstawowych własności fizycznych materiałów ziarnistych (sypkich). Jego wartość w uogólniony sposób określa zachowanie materiałów ziarnistych podczas przesypania (rys. 8b).



Rys. 8. Schematy wyznaczania: a) kąta tarcia wewnętrznego, b) kąta usypu [H5]

Uwzględniając, że zarówno siła tarcia wewnętrznego, kohezja jak i kąt usypu są determinowane przez te same czynniki założyłem, że istnieje silny związek pomiędzy tymi własnościami (rys. 9.).



Rys. 9. Czynniki determinujące zachowanie biologicznych materiałów ziarnistych [H5]

W pracy [H5], w oparciu o przedstawione założenie, analizowano trzy materiały (groch, kukurydzę oraz pszenżyto). Niezbędne dane wyznaczono dla czterech poziomów wilgotności. Jako dodatkowy czynnik uwzględniono również porowatość.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że na wartość kąta tarcia wewnętrznego ma wpływ zarówno wilgotność, jak i porowatość oraz kąt usypu. Zależność tę można opisać funkcjami nieliniowymi oddzielnie dla każdego z badanych materiałów. Wysoki stopień dopasowania modelu ($R^2 > 0,9$) uzyskano tylko dla grochu. Stąd próba ujednoczenia modelu dla trzech materiałów zostanie podjęta w dalszych badaniach.

Badania wykazały natomiast istotny wpływ wilgotności i kąta usypu na kohezję. Zależność można opisać funkcją nieliniową w sposób zadowalający dla kukurydzy i grochu. Stałe w obu modelach znacząco się różniły, co nie pozwoliło na zbudowanie modelu uniwersalnego, o wystarczająco dużym dopasowaniu ($R^2 > 0,9$), uwzględniającym wszystkie trzy materiały. Dlatego, zarówno w przypadku kąta tarcia wewnętrznego, jak i kohezji należy prowadzić dalsze badania uwzględniając inne czynniki, w dodatkowy sposób rozróżniające badane materiały, np. współczynnik tarcia.

Uzyskane rezultaty prowadzonych przeze mnie badań w opisanym powyżej obszarze zostały przedstawione w publikacjach:

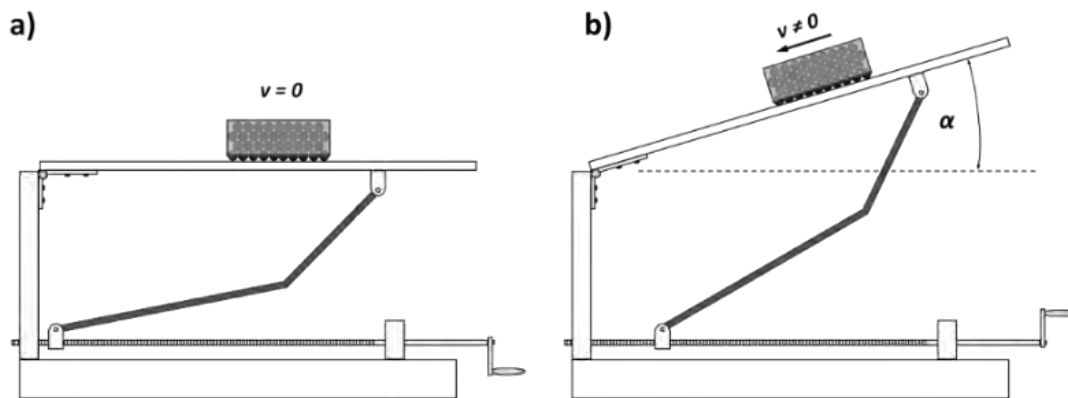
- Wójcik, A., Frączek J. (2016) Research on the correlation between the porosity of plant granular materials and the selected parameters of surface texture, Tribologia, nr 6, 179-189.
- Wójcik, A., Frączek J. (2016) The influence of the external surface topography of granular plant materials on external friction, Tribologia, nr 6, 191-203.
- Wójcik A., Francik S., Knapczyk A. (2019) The main factors determining the porosity of granular materials of biological origin In: Wróbel M., Jewiarz M., Szłek A. (eds) Renewable energy sources: engineering, technology, innovation: ICORES 2018, Springer Proceedings in Energy (przyjęte do druku)

Jednym z podstawowych czynników determinujących zachowania złoza w kontakcie z elementami maszyn jest zjawisko tarcia. Dla materiałów ziarnistych pochodzenia roślinnego trudno jest znaleźć bezpośrednio odniesienie do istniejących już teorii tarcia (mechanicznych, molekularnych, mechaniczno-molekularnych), które rozwijane były najczęściej w oparciu o materiały konstrukcyjne. Powoduje to, że wiele zagadnień dotyczących tarcia, dla tego specyficznego materiału, jest niedostatecznie poznana.

Założenia dotyczące zjawiska ślizgowego tarcia suchego materiałów ziarnistych tworzących parę trącą z powierzchnią materiału konstrukcyjnego muszą przede wszystkim uwzględniać (w odróżnieniu od typowych badań tribologicznych) to, że:

- tarcie poszczególnych ziaren ma charakter przypadkowy i krótkotrwały,
- zużycie materiału ziarnistego ma drugorzędne znaczenie, ponieważ materiał ten poddawany jest zazwyczaj dalszej obróbce mechanicznej, takiej jak rozdrabnianie, mielenie itp. (jedynym wyjątkiem jest materiał siewny, który jest oddzielnie segregowany)
- ze względu na charakter pracy wielu urządzeń (szczególnie transportowych) zdecydowanie ważniejsze jest tarcie statyczne (początkujące ruch).

Badania zjawiska tarcia materiałów ziarnistych pochodzenia roślinnego nie cieszą się tak dużym zainteresowaniem jak tego typu badania materiałów konstrukcyjnych, głównie stali. Współczynnik tarcia tych materiałów wyznaczany jest bardzo często w kontekście np. badania własności fizycznych nowej odmiany, jako jednej z kilku analizowanych własności. Najczęściej nie są to badania pogłębione i opierają się na prostej aparaturze. Ograniczają się one zazwyczaj do wyznaczenia współczynnika tarcia w oparciu o teorię Coulomba, pomijając np. parametry i wielkość powierzchni tarcia materiałów pary trącej. W tym przypadku do wyznaczania współczynnika tarcia często wykorzystywana jest regulowana pochylnia, na której umieszcza się badany materiał ziarnisty. Tangens kąta nachylenia płyty, przy którym następuje poślizg ziaren (ziarna zaczynają się zsuwać) przyjmowany jest jako współczynnik tarcia statycznego (rys. 9.).



Rys. 9. Schemat pochylni do wyznaczania współczynnika tarcia, a) faza spoczynku, b) faza poślizgu.

Badaniami procesu tarcia zajmowało się wielu autorów, każdy z opracowanych przez nich modeli stanowi jednak jedynie pewne przybliżenie warunków rzeczywistych. Podstawą trudności związanych z prognozowaniem procesów tarciovych jest złożoność cech materiałów roślinnych (zależnych w znacznym stopniu od zawartości wody). Przykładowo, zwiększenie wilgotności materiału powoduje zwiększenie udziału odkształceń plastycznych i w skrajnych przypadkach może skutkować tym, iż pomiędzy parą tracą, wystąpi warstwa wody, zmieniając charakter tarcia z suchego na mieszane lub płynne.

W dostępnych pracach różnorodność badanych roślinnych materiałów ziarnistych jest bardzo duża. Najczęściej poruszonym problemem jest wpływ zmiany wilgotności na zjawisko tarcia. Przykładami prac, w których przedawniono wyniki badań współczynnika tarcia dla materiałów ziarnistych są: [Markowska i in. 2016] – dla pszenicy, [Sologubik i in. 2013] dla jęczmienia, [Saracoglu & Ozarslan 2012] – dla ziarna kapusty, [Çetin i in. 2010] – dla ziaren rzodkiewki, [Aghkhani i in. 2012] dla ziaren fasoli, [Singh i in. 2010] dla prosa, [Amer Eissa 2009] dla nasion lnu, [Ünal i in. 2013] dla nasion tykwy. We wszystkich wymienionych przykładach autorzy wykazali, iż wraz ze wzrostem wilgotności nasion następuje wzrost wartości współczynnika tarcia.

Drugim badanym czynnikiem jest rodzaj podłoża, po którym przemieszczają się nasiona, chociaż rzadko, oprócz deklaracji co do rodzaju materiału (tzn. blacha stalowa, szkło, drewno itp.), podawane były inne własności tej powierzchni (np. struktura geometryczna powierzchni).

W pracy [Alibas & Koksal 2015] określono współczynnik tarcia statycznego dla różnych odmian nasion papryki przemieszczających się po różnych powierzchniach. W tym przypadku wartości współczynnika tarcia mieściły się w przedziale od 0,554 do 1,205.

W pracy [Kalkan & Kara 2011] badano tarcie ślizgowe dla pięciu odmian pszenicy, dwóch materiałów konstrukcyjnych oraz kilku poziomów wilgotności. Poza wykazaniem istotnego wpływu ostatniego z wymienionych czynnika, nie odnotowano wyraźnego wpływu odmiany pszenicy na wartość współczynnika tarcia.

W pracy [Molenda i in. 2002] badano między innymi współczynnik tarcia ziaren pszenicy zarówno względem siebie, jak również ziaren pszenicy z ocynkowaną blachą. W tym celu wykorzystano zmodyfikowane urządzenie do bezpośredniego ścinania.

Autorzy pracy [Amin i in. 2005] badali wpływ wilgotności na statyczny i kinetyczny współczynnik tarcia różnych nasion (peluszki, fasoli mung, groszku siewnego i soczewicy, ciecierzycy, fasolnika chińskiego) w kontakcie z ocynkowaną blachą, gładkim betonem, żeliwem, sklejką oraz szklaną płytą.

W pracy [Razavi & Milani 2006] przedstawiono wyniki badań współczynnika tarcia dla trzech odmian ziaren arbuza w kontakcie z kilkoma różnymi powierzchniami. Autorzy odnotowali pewne różnice wartości współczynników tarcia dla badanych odmian ziaren, przy czym poszczególne ziarna różniły się wilgotnością, co utrudniało interpretację uzyskanych wyników.

Kolejnym uwzględnianym czynnikiem jest prędkość poślizgu. W pracy [Asli-Ardeh i in. 2010] przy wyznaczaniu kinetycznego współczynnika tarcia uwzględniono wilgotność, prędkości poślizgu, trzy różne materiały konstrukcyjne oraz trzy odmiany ryżu. Uzyskane wyniki pokazały istotny wpływ tych zmiennych na wartość współczynnika tarcia. Wraz ze wzrostem wilgotności ziarna i prędkości obwodowej płyty rosła wartość kinetycznego współczynnika tarcia (od ok. 0,260 do 0,661). Niestety autorzy nie zaproponowali żadnego modelu opisującego otrzymane wyniki.

W pracy [Shafaei & Kamgar 2017] podjęto bardziej szczegółową próbę opisu problemu tarcia ziaren pszenicy, uwzględniając równocześnie wpływ wilgotności, rodzaju materiału oraz prędkości poślizgu na wartość siły tarcia.

Prędkość poślizgu została uwzględniona także w pracy [Kabas & Ozmerzi 2009]. Współczynnik tarcia wyznaczano dla dwóch odmian kaktusa przemieszczających się po różnych powierzchniach. Wyniki badań pokazały, że wpływ prędkości na wartość współczynnika tarcia nie jest taki jednoznaczny. Autorzy pracy stwierdzili, że dla małych prędkości współczynnik tarcia spada wraz ze wzrostem prędkości (podobnie jak w tarcu suchym materiałów konstrukcyjnych), natomiast po przekroczeniu pewnej wartości siła tarcia zwiększa się. Odwrotną tendencję wykazano i przedstawiono w pracy [Pasumarty i in. 2011]. W pracy [Ślipek i in. 1999] wykazano, że wzrost wartości współczynnika tarcia wzrasta wraz ze wzrostem prędkości. Podobną tendencję przedstawiono w pracach [Bucklin i in. 1996] oraz [Askari i in. 2010].

Szerszą analizę zjawiska tarcia biomasy przedstawiono w pracy [Kaliniewicz 2013], gdzie oprócz różnych materiałów ziarnistych (pszenicy, żyta, jęczmienia, owsa i pszenżyta) oraz konstrukcyjnych, dodatkowo uwzględniono korelację między siłą tarcia a wymiarami i masą nasion. Otrzymane wyniki badań nie przyniosły zadowalających wyników. W innej pracy [Kaliniewicz i in. 2016] zaproponowano takie podejście, które uwzględniało wpływ orientacji ziaren na wartość współczynnika tarcia, biorąc pod uwagę również korelację z innymi własnościami fizycznymi ziaren.

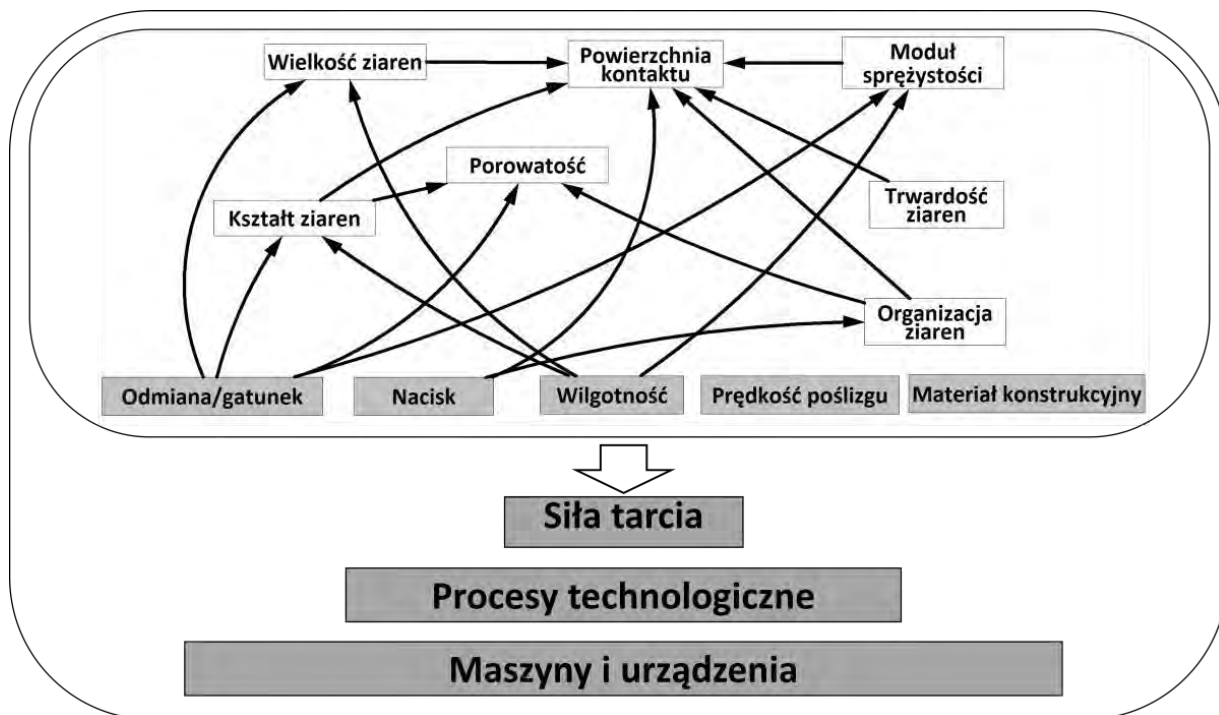
W pracy [Frączek & Reguła 2009] autorzy przeprowadzili badania zjawiska tarcia statycznego oraz kinetycznego rozdrobionych pędów miskanta. W swoich badaniach uwzględnili: wilgotność pędów, siłę nacisku oraz rodzaj materiału konstrukcyjnego. Potwierdzili wpływ wilgotności na wartość współczynnika tarcia wyznaczony według modelu Coulomba dla tarcia statycznego oraz według modelu Amontonsa dla tarcia kinetycznego.

W stosunkowo niewielu publikacjach podejmuje się próbę dyskusji, uwzględniającej większą liczbę czynników działających równocześnie. Wyjątek stanowią prace [Frączek 1999], [Więcek 2011] czy [Kaczorowski 1996], w której mnogość poszczególnych czynników znacznie utrudnia analizę i interpretację faktycznego ich wpływu na przebieg procesu tarcia, a wiarygodność jest trudna do potwierdzenia w warunkach eksperymentalnych.

Przytoczona analiza wskazuje, że badania zjawiska tarcia ziarnistych materiałów roślinnych prowadzone są na różnych materiałach, a wartość współczynnika tarcia zmienia się w szerokim zakresie. Podkreślić należy również, że metody pomiaru siły tarcia zazwyczaj są uproszczone.

Biorąc pod uwagę powyższą analizę, zasadne jest, aby modele tarcia uwzględniały dodatkowe czynniki, m.in. kształt, wielkość, odmianę i organizację ziaren, nacisk, twardość, prędkość poślizgu, pole kontaktu, moduł sprężystości, porowatość, wilgotność.

Należy jednak pamiętać, że wiele z wymienionych czynników może lub bezpośrednio zależy od pozostałych, a w związku z tym umieszczanie ich w jednym modelu nie ma większego sensu (Rys. 10). Dlatego tak ważne jest prowadzenie badań nad korelacją różnych własności fizycznych materiału.

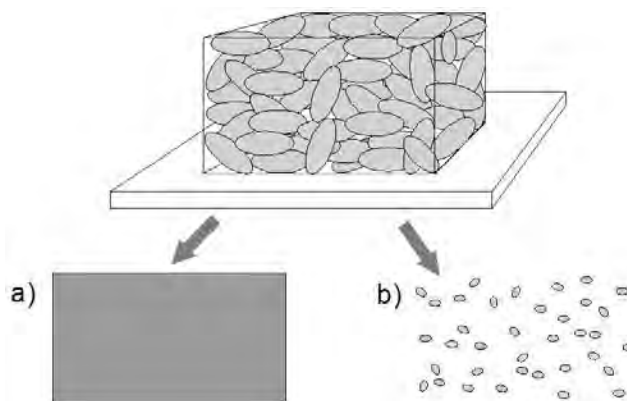


Rys. 10. Główne czynniki determinujące siłę tarcia (opracowanie własne)

Z przedstawionych na powyższym rysunku interakcji (Rys. 10) pomiędzy czynnikami widać, że do czynników niezależnych należą głównie rodzaj materiału, nacisk, wilgotność i prędkość poślizgu. Natomiast czynnikiem, na który wpływa najwięcej innych czynników jest powierzchnia kontaktu. Stąd dalsze analizy dotyczące tarcia zostały przeze mnie przeprowadzone dla wymienionego zestawu czynników.

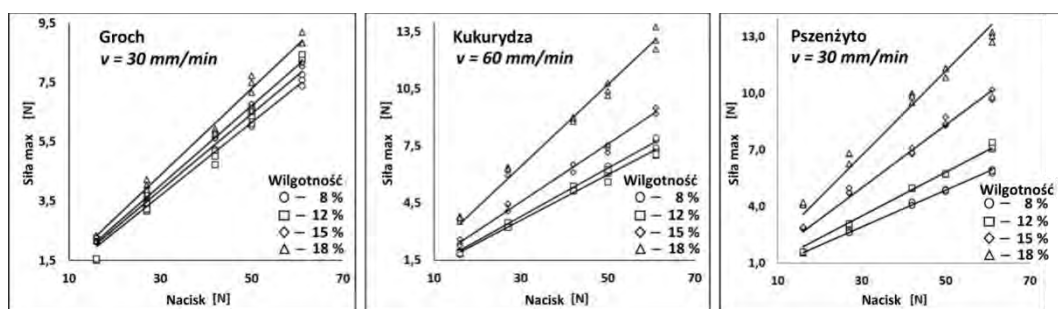
Jednym z podstawowych braków w literaturze przedmiotu jest nieuwzględnianie powierzchni kontaktu przy zmieniającym się nacisku. Powierzchnia ta jest determinowana przez kształt ziaren (promień krzywizny powierzchni ziaren w obszarze kontaktu z innym materiałem). W przypadku ziaren o kształcie odmiennym niż kulisty, promień krzywizny będzie różny, zależny od ułożenia ziarna w złożu.

Podejście takie w jakimś sensie jest tożsame (choć odnoszące się do skali makro) z założeniami teorii tarcia opracowanej przez Bowdena i Tabora [Lewrowski 2008], która zakłada, że styk ciał nie zachodzi na powierzchni nominalnej lecz rzeczywistej. W wyniku nacisku nierówności powierzchni ulegają odkształceniu, co prowadzi do powstania tzw. mostków zwarcia. Nierówności znajdujące się na powierzchni ulegają deformacji. Siła tarcia potrzebna jest zatem do zerwania kontaktów adhezyjnych.



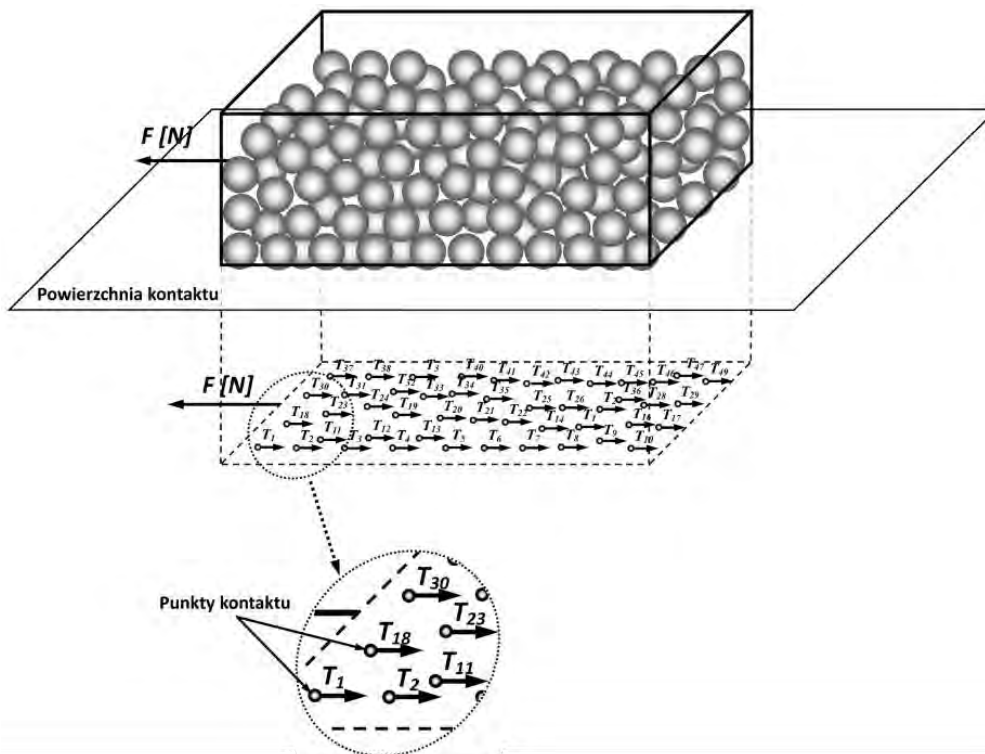
Rys. 11. Powierzchnia styku materiału ziarnistego z płaszczyzną [H7]: a) nominalną, b) rzeczywistą

Pomijanie przez wielu autorów tego aspektu wynika z faktu ograniczania się wyłącznie do teorii tarcia Coulomba, która zakłada liniowy charakter zależności siły tarcia od nacisku ($F=\mu N+C$). Współczynnikiem kierunkowym takiej funkcji jest współczynnik tarcia, a stałą C interpretujemy jako dodatkowy opór wywołany, m.in. przez adhezję. Dla ziarnistego materiału roślinnego, prawo to stanowi tylko pewne uproszczenie problemu. Podatność na odkształcenie (pole kontaktu z powierzchnią) zdecydowanie rośnie wraz ze wzrostem wilgotności, co musi mieć swoje konsekwencje w wartości siły tarcia. Potwierdzają to m.in. wyniki badań, które przedstawiłem w pracy [H1] (rys. 12). Zauważono, że dla kolejnych prostych aproksymujących zmienia się nie tylko wartość stałej C , ale również współczynnik tarcia μ (gdyby prawo Coulomba miało tutaj zastosowanie, to kolejne proste aproksymacyjne byłyby do siebie równoległe).



Rys. 12. Przykładowe wykresy zależności siły tarcia od nacisku przy zmiennej wilgotności [H1]

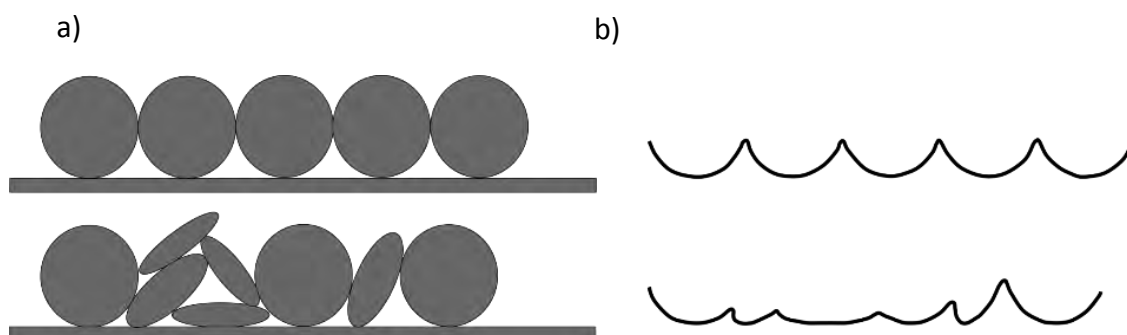
Rzeczywista powierzchnia kontaktu to obszar bezpośredniego styku ciał. W przypadku masy ziarnistej rzeczywista powierzchnia styku określana jest jako sumaryczna wartość wszystkich jednostkowych mikrokontaktów o łącznej powierzchni stanowiącej tylko niewielki ułamek powierzchni nominalnej styku. Całkowitą siłę tarcia można więc wyrazić jako sumę sił tarcia występujących w miejscu kontaktu poszczególnych ziaren z powierzchnią (rys. 13).



Rys. 13. Rozkład sił tarcia w punktach kontaktu (opracowanie własne).

Powierzchnia kontaktu jest trudna do wyznaczenia. Nie istnieje bowiem skuteczna, bezpośrednia metoda pomiaru tej powierzchni. Pozostają zatem tylko metody pośrednie, które są mało precyzyjne (np. pomiar pola powierzchni śladów powstałych wskutek odcisnięcia zabarwionego ziarna na kartce papieru). Najczęściej wykorzystywana jest w tym celu komputerowa analiza obrazu. Badania są jednak czasochłonne i wymagają zastosowania odpowiednich filtrów.

Chcąc uwzględnić wpływ powierzchni kontaktu zostało zaproponowane przeze mnie wykorzystanie parametrów struktury geometrycznej powierzchni do opisu zewnętrznego kształtu złoża ziarnistych materiałów roślinnych, przy założeniu, że powierzchnia kontaktu zależy od tego kształtu oraz wpływa na siłę tarcia zewnętrznego. Odnosząc powyższe rozumowanie do wymiaru 2D, na rys. 14 przedstawiono w jaki sposób zmienia się profil kontaktu przy różnym kształcie i ułożeniu ziaren.



Rys. 14. Kontakt ziaren o różnym kształcie: a) schemat ułożenia, b) profil (opracowanie własne)

Uwzględnienie charakteru kontaktu pomiędzy materiałem ziarnistym, a materiałem konstrukcyjnym podjąłem w pracach:

- Wójcik A., Frączek J. (2017) The influence of selected factors upon the value of external friction concerning plant granular materials, Tribologia, nr 4, 107-113

- Wójcik A. , Frączek J. (2016) The influence of the external surface topography of granular plant materials on external friction, *Tribologia*, nr 6, 191-203
- Wójcik A., Frączek J., Wota A. K. (2019) The methodical aspects of the friction modeling of plant granular materials. *Powder Technology*, 344, 504-513.

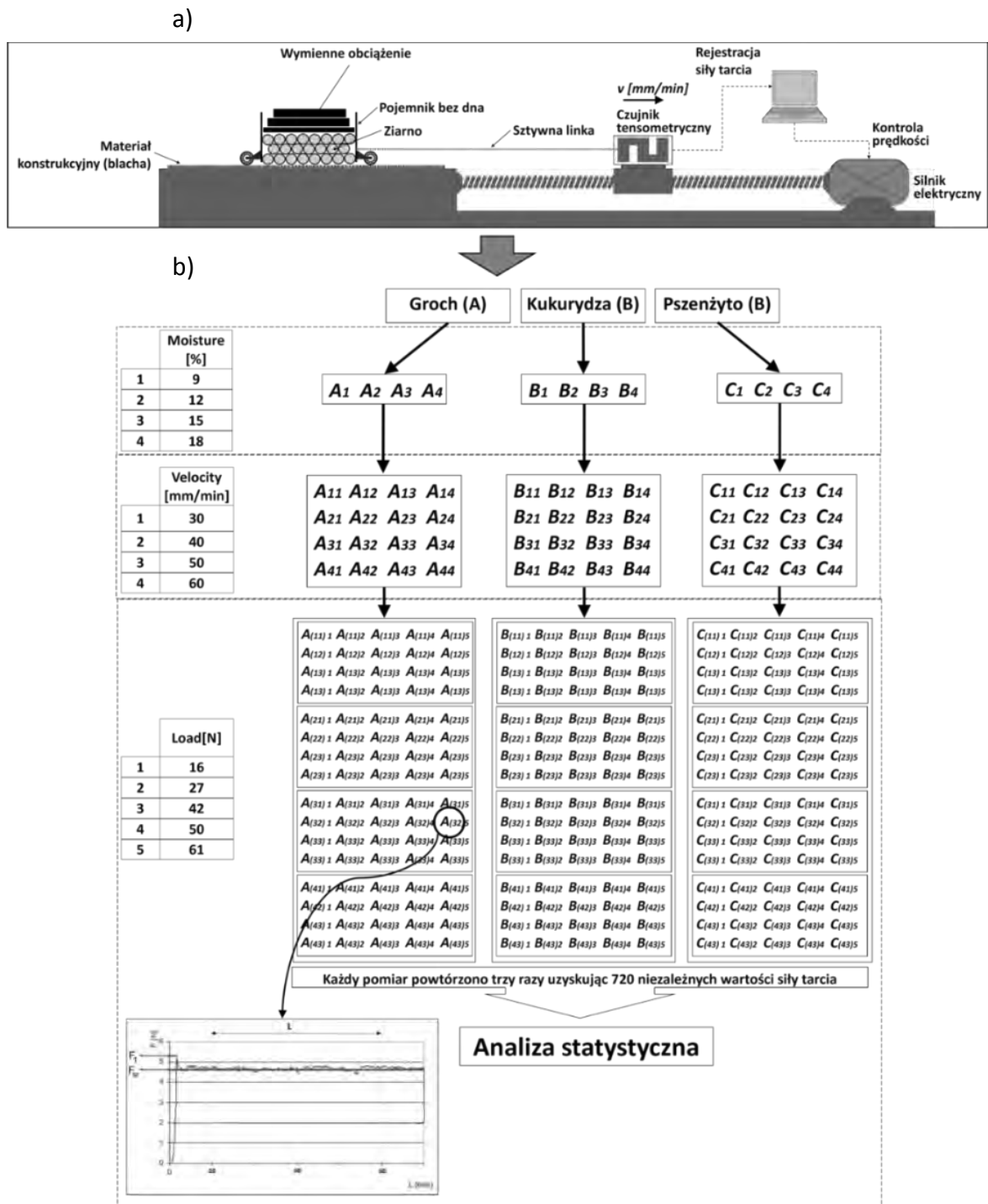
Akwizycja kształtu złoza materiału ziarnistego wykonana została za pomocą skanera optycznego 3D, pracującego w technologii światła białego LED. Urządzenie umożliwiło uzyskanie rozdzielczości pomiarowej na poziomie 164 pkt/mm². Niepewność pomiaru została określona na poziomie 0,04 mm.

W pracy [H7] jako główny wyróżnik opisu SGP została wybrana nośność powierzchni, która określa zależność powierzchniowego udziału materiałowego od wysokości (funkcja powierzchniowego udziału materiałowego) i stanowi tę grupę wyróżników topografii powierzchni, którą zalicza się do parametrów funkcyjnych, stanowiących rozszerzenie dla parametrów chropowatości. W ujęciu 3D stanowi ona skumulowaną wartość prawdopodobieństwa współrzędnych $z(x,y)$ [Wieczorowski 2013]. Parametrami opisującymi w sposób ilościowy krzywą nośności powierzchni są: głębokość chropowatości rdzenia Sk [mm], zredukowaną wysokość wierzchołków Spk [mm], zredukowaną głębokość doliny Svk [mm], górny udział materiałowy $Sr1$ [%], dolny udział materiałowy $Sr2$ [%].

Powyższe parametry zostały wyznaczone dla zewnętrznej warstwy złoza następujących materiałów: groch, pszenica, pelety wierzby energetycznej, zrębki wierzby energetycznej. Badania tarcia (pomiar siły tarcia statycznej i kinetycznej) dokonano za pomocą specjalnie przygotowanego stanowiska, wykorzystującego maszynę wytrzymałościową MTS Insight 2 z zamontowaną głowicą tensometryczną pracującą w zakresie do 25 [N], z rozdzielczością 0,001 [N] oraz przystawką w postaci płaskiej powierzchni, po której poruszał się wózek (rys. 15a). Współpracujące z maszyną wytrzymałościową oprogramowanie pozwalało na rejestrację wartości siły tarcia z częstotliwością 100 [Hz] oraz utworzenie wykresu zależności siły od przemieszczenia. Długość odcinka pomiarowego (przemieszczenia wózka) wynosiła w tym przypadku 100 [mm]. Jako materiał konstrukcyjny wykorzystano ocynkowaną blachę. Maksymalną siłę obserwowano przy starcie materiału i kojarzono z tarciem statycznym. Siłę średnią, występującą na całym odcinku pomiarowym, kojarzono z tarciem kinetycznym.

Zastosowanie zmodyfikowanego modelu Coulomba uwzględniającego parametr Spk zwiększyło pewność prognozowania wartości siły tarcia (zarówno dla tarcia statycznego jak i kinetycznego). Stopień dopasowania modelu do wartości rzeczywistych był duży i wynosił odpowiednio 0,9978 dla tarcia statycznego oraz 0,9975 dla tarcia kinetycznego. Potwierdziło to wcześniejsze założenia.

Kolejnymi czynnikami uwzględnianymi (równocześnie) w trakcie prowadzonych badań były wilgotność, nacisk, prędkość i rodzaj materiału. Dla każdej kombinacji wymienionych czynników oraz badanych materiałów ziarnistych (groch, kukurydza, pszenżyto) w oparciu o stanowisko, którego ideowy schemat znajduje się na rys. 15, wyznaczono wartości siły tarcia (stacyjnej oraz kinetycznej).



Rys. 15. Ideowy schemat stanowiska a) oraz program badań b) [H1, H4]

Czynnikiem najbardziej determinującym zmiany wartości siły tarcia jest wilgotność. Wpływa ona na wzrost zarówno siły tarcia statycznego jak również kinetycznego. Wpływ ten można tłumaczyć tym, że ziarna wilgotne stają się bardziej podatne na odkształcenia, co przy większych obciążeniach wpływa na pole powierzchni kontaktu rzeczywistego. Widoczna jest również mocna liniowa zależność siły od obciążenia w całym zakresie analizowanej prędkości oraz wilgotności.

W przypadku tarcia kinetycznego współczynnik tarcia osiągał najwyższe wartości (przy dopasowaniu modelu na poziomie $R^2=0,975$) dla ziaren grochu, którego kształt jest najbardziej zbliżony do kuli. Najmniejszy współczynnik tarcia (przy $R^2=0,811$) uzyskano dla pszenżyta – ziaren najbardziej wydłużonych. Trudno bez dalszych, bardziej szczegółowych badań sformułować jednoznaczną

hipotezę wyjaśniająca uzyskane wyniki. Wstępnie można wnioskować, że w czasie poślizgu dochodzi do sytuacji, w której nasiona zmieniają swoje położenie, obracają się i zmieniają orientację. Obrót ten, spowodowany jest przez siłę tarcia zewnętrznego, która musi przewyciężyć siłę tarcia wewnętrznego między ziarnami. Jest to tym łatwiejsze, im ziarno kształtem jest bardziej zbliżone do kuli. Tak więc ziarna pszenżyta, prawdopodobnie w zdecydowanie mniejszym stopniu zmieniają swoją pozycję. Złoże jest bardziej stabilne i stąd wynikają mniejsze wartości siły tarcia.

Można również stwierdzić, że wraz ze spadkiem wartości współczynnika kształtu wzrasta znaczenie sił adhezji między ziarnami i powierzchnią tarcia. Tak więc istotność tego składnika jest tym większa, im współczynnik kształtu ziaren jest niższy [H4].

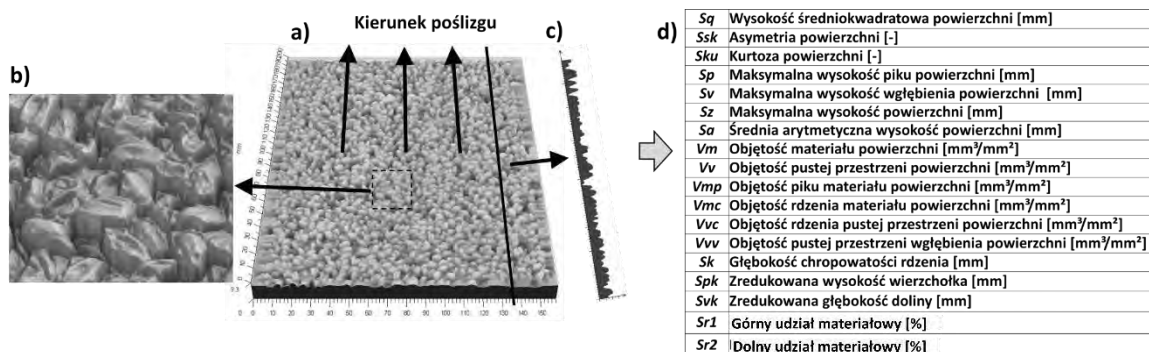
W przypadku tarcia statycznego przytoczone powyżej tendencje nie są tak oczywiste. Interpretacja uzyskanych wyników jest zdecydowanie trudniejsza, chociaż dopasowanie do modelu wydaje się lepsze.

Pomimo wstępnych badań, w których podjęto próbę wykazania wpływu prędkości na wartość siły tarcia, szersza analiza nie daje podstaw do jednoznacznego stwierdzenia (przynajmniej w badanym zakresie prędkości 30-60 mm/min), że taka zależność ma miejsce. Dlatego należy podjąć dalsze badania, ale w szerszym zakresie prędkości.

W związku z powyższym, w późniejszych modelach postanowiono pominąć czynnik, jakim jest prędkość. Stwierdzenie braku wpływu prędkości na wartość siły tarcia jest sprzeczne z wynikami badań tarcia materiałów konstrukcyjnych (np. stali), gdzie czynnik ten jest znaczący. Należy jednak podkreślić, że w badaniach tarcia materiałów konstrukcyjnych występują dużo większe prędkości, które powodują wzrost temperatury na styku elementów pary tarczej, co zmienia początkowe warunki współpracy.

Próba uogólnienia modelu dla trzech materiałów obniżyła dopasowanie (R^2 powyżej 0,8), przy czym należy zaznaczyć, że wartość współczynnika determinacji R^2 była w dalszym ciągu na wysokim poziomie, jak na badania przeprowadzone dla materiału biologicznego. W wielu opublikowanych wynikach badań, stopień dopasowania krzywych jest na poziomie nieprzekraczającym 0,7.

Kolejnym zagadnieniem modelowania tarcia materiałów ziarnistych pochodzenia roślinnego było powiązanie badanych czynników z kształtem struktury zewnętrznej złoża. Przyjęto, że wielkość powierzchni kontaktu (suma powierzchni styku pojedynczych nasion) jest zależna od takich parametrów jak: wielkość ziaren, kształt, sposób ułożenia (organizacja). Założono, że parametry te w pośredni sposób można przedstawić za pomocą wybranych parametrów opisujących strukturę geometryczną powierzchni (SGP) zdefiniowanych, m.in. w normach ISO 25178 oraz EUR 15178N. Digitalizacji powierzchni dokonano w identyczny sposób jak opisany powyżej. Efektem przeprowadzonych przez mnie prac było uzyskanie modeli struktury geometrycznej powierzchni (3D), badanych materiałów ziarnistych, dla każdego poziomu wilgotności. Pomiar wykonano przy dziesięciu powtórzeniach (rys. 16).



Rys.16. Przykładowy rezultat skanowania dla pszenżyta: a) obraz zdigitalizowanej powierzchni, b) obraz powiększonego wycinka powierzchni, c) przykładowy profil, d) wyznaczone parametry charakteryzujące strukturę geometryczną powierzchni [H1]

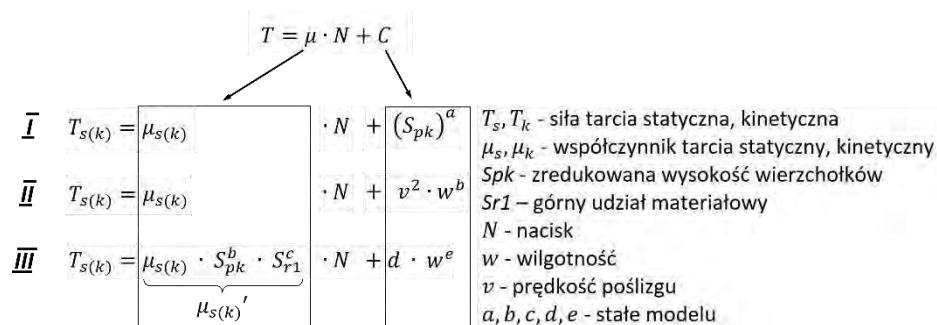
Wyznaczone parametry SGP pozostają w intuicyjnym związku ze zjawiskami tribologicznymi. Struktura geometryczna powierzchni złoża materiałów ziarnistych wpływa na procesy zachodzące na styku z powierzchnią materiałów konstrukcyjnych w zależności od rodzaju tarcia. Analiza statystyczna wykazała silną korelację wszystkich czynników z wartością siły tarcia statycznego i kinetycznego. Stwierdzono również korelację między poszczególnymi parametrami powierzchni. W związku z powyższym do dalszej analizy wybrano dwa parametry: zredukowaną wysokość wierzchołków Spk oraz górny udział materiałowy $Sr1$. Założono, że obydwa parametry w dużej mierze decydują o wielkości pola powierzchni kontaktu. Wraz ze wzrostem siły nacisku wierzchołki ulegają odkształceniu, a rzeczywista powierzchnia kontaktu ulega zwiększeniu. Można uznać, że Spk oraz $Sr1$ są parametrami opisującymi materiał tworzący parę tącą (w pewnym sensie stałą materiałową) stąd będą decydowały o wartości współczynnika tarcia.

Drugim ważnym parametrem jest wilgotność. Decyduje ona m.in. o rodzaju odkształceń ziaren – wraz z jej wzrostem rośnie udział odkształceń plastycznych. W związku z powyższym postawiono hipotezę, że Spk oraz $Sr1$ będą determinowały wartość współczynnika tarcia, a wilgotność - wartość adhezji.

Należy podkreślić, że uzyskano bardzo duży stopień dopasowania ($R^2 > 0,95$) utworzonych modeli tarcia do wyników pomiarów dla grochu i kukurydzy. Jest to rzadkość w przypadku materiałów roślinnych, które cechuje anizotropowość skutkująca dużymi rozrzutami wyników pomiarów. Wskazuje to jednoznacznie na to, że utworzone modele w sposób zadowalający opisują w tym przypadku zjawisko tarcia. Wilgotność w znaczący sposób wpływa na wartość adhezji zarówno dla tarcia statycznego jak i kinetycznego. Charakterystyczne jest również to, że w przypadku tarcia kinetycznego zarówno Spk jak i $Sr1$ są odwrotnie proporcjonalne do siły tarcia. Dla tarcia statycznego dotyczyło to tylko $Sr1$. Prawdopodobnie jest to następstwem zerwania przyczepności i ścięcia nierówności powierzchni ziaren.

W ramach prowadzonych badań podjęto również próbę przeprowadzenia estymacji nieliniowej zbiorczo dla trzech materiałów ziarnistych. Niestety współczynnik dopasowania uległ zmniejszeniu, ale w dalszym ciągu jego wartość wynosiła ponad 0,7. Niezbędne jest zatem kontynuowanie badań w celu identyfikacji dodatkowych czynników determinujących przebieg procesu tarcia ziarnistych materiałów roślinnych.

Odnosząc się do przeprowadzonych analiz zjawiska tarcia roślinnych materiałów ziarnistych, na rys. 17 przedstawiono kolejne modyfikacje modelu Coulomba, wraz ze zwiększaniem ilości analizowanych czynników (I – [H7], II – [H4], III – [H1])



Rys. 17. Zmodyfikowane modele Coulomba

Zagadnienia związane z modelowaniem procesu tarcia w zależności od analizowanych czynników przedstawiono szczegółowo w pracach:

- Wójcik A., Frączek J. & Wota A. K. (2019) The methodical aspects of the friction modeling of plant granular materials, Powder Technology, 344, 504-513.
- Wójcik A., Frączek J. (2017) The influence of selected factors upon the value of external friction concerning plant granular materials, Tribologia, nr 4, 107-113.

- Wójcik A., Frączek J. (2016) The influence of the external surface topography of granular plant materials on external friction, *Tribologia*, nr 6, 191-203.

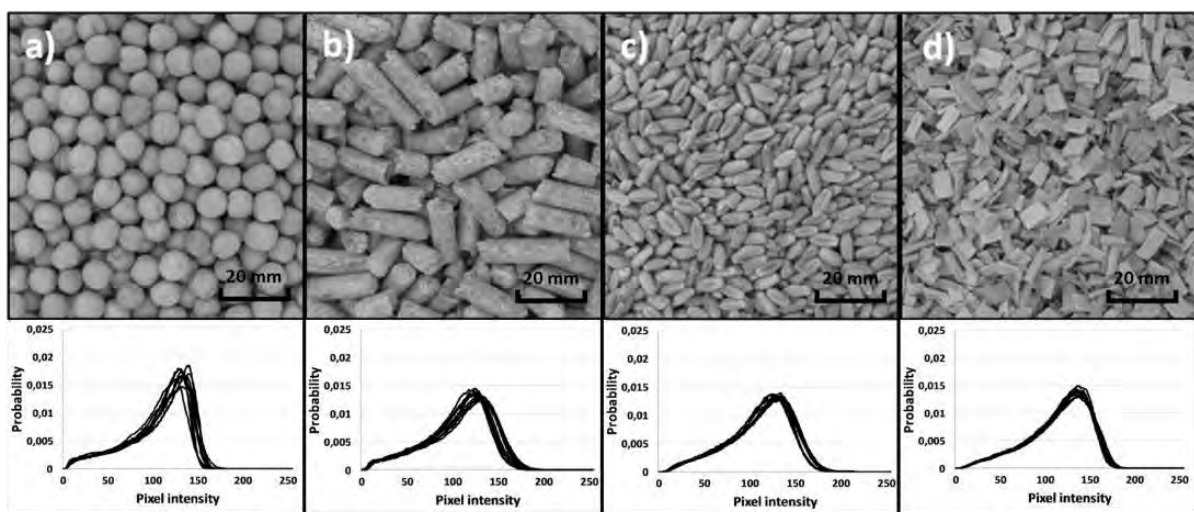
Wnioski podsumowujące wyniki badań w ramach tych prac można sformułować następująco:

- model Coulomba w przypadku materiałów ziarnistych pochodzenia roślinnego ma ograniczone zastosowanie,
- wraz ze wzrostem wilgotności rośnie wartość siły tarcia,
- zredukowaną wysokość wierzchołków *Spk* oraz górny udział materiałowy *Sr1* determinują wartość współczynnika tarcia,
- wilgotność materiału wpływa na wartość adhezji,
- niezbędne jest kontynuowanie badań w celu identyfikacji dodatkowych czynników determinujących badany proces.

Jednym z dodatkowych zagadnień podejmowanych przeze mnie w podjętym obszarze badaniach są nowe alternatywne metody pomiaru oraz analizy własności mechanicznych materiałów ziarnistych, głównie w oparciu o systemy optyczne [H2, H3, H8]. Zagadnienia te zostały szczegółowo omówione w pracach:

- Wójcik A., Kłapa P., Mitka B., Sładek J. (2018) The use of the photogrammetric method for measurement of the repose angle of granular materials. *Measurement*, 115, 19–26.
- Wójcik A., Kościelniak P., Mazur M., Mathia T.G. (2019) Granular materials morphological discrimination by the measurement of pixel intensity distribution (PID), *Mertology and Measurement Systems* (przyjęte do druku).
- Wójcik A., Przybyła W., Francik S., Knapczyk A. (2018) The research into determination of the particle-size distribution of granular materials by digital image analysis. In: Mudryk K., Werle S. (eds) *Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation*. Springer Proceedings in Energy. Springer, Cham, DOI:10.1007/978-3-319-72371-6_61.

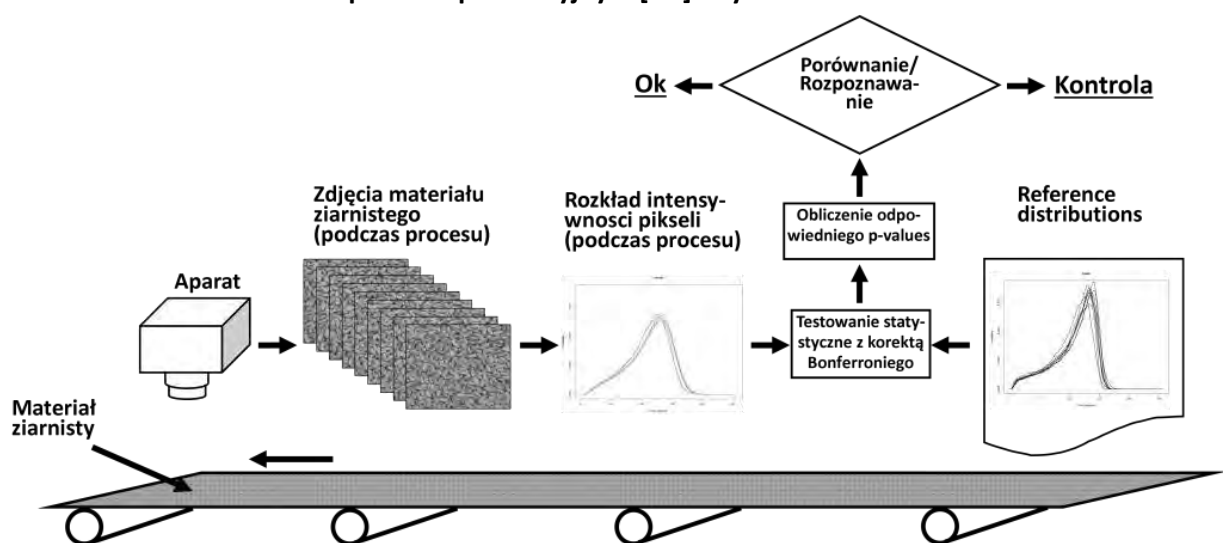
W złożu materiałów ziarnistych bardzo trudno jest przewidywać zachowanie pojedynczego ziarna, jednak rozpatrując dostatecznie dużą powierzchnię złoża można dostrzec pewne prawidłowości dotyczące wyglądu czy organizacji ziaren. Przykładowo, pomiary topografii powierzchni zewnętrznej złoża materiałów ziarnistych dawały bardzo zbliżone wartości poszczególnych parametrów SGP (różnice na poziomie ok. 8%), podobnie było w przypadku analizy histogramów obrazujących rozkład intensywności pikseli na zdjęciach materiałów ziarnistych (histogramy się pokrywały), pomimo że w obu przypadkach, przed każdym pomiarem materiał był przemieszany (Rys. 18).



Rys. 18. Przykład kolejnych rozkładów prawdopodobieństwa występowania pikseli o określonej intensywności dla: a) grochu, b) peletu, c) pszenżyta, d) zrębki, [H3]

Powyższe przykłady były inspiracją do podjęcia próby wykorzystania analizy statystycznej oraz analizy obrazu do określania pewnych charakterystycznych wielkości materiału ziarnistego. Wstępną analizę przedstawiono w pracy [H8], gdzie prognozowanie składu granulometrycznego materiału znajdującego się w dużym pojemniku (zawierających wiele warstw), określono na podstawie obrazu widzianego z góry (pierwsza warstwa) oraz z boku. Pomiar wykonano w oparciu o klasyczne metody komputerowej analizy obrazu, polegające na segmentacji poszczególnych ziaren i obliczaniu pola przekroju. Mimo, że uzyskany w tych badaniach stopień korelacji nie wydaje się wystarczająco wysoki (dla ostatecznego potwierdzenia przydatności metody), to wyniki wydają się obiecujące i stanowią przyczynek do dalszych prac w tym obszarze. Podstawowym problemem w tego rodzaju badaniach był jednolity system mieszania umożliwiający równomierny rozkład materiału dosypanego w mieszaniu. Zwiększenie wartości R^2 możliwe jest do uzyskania poprzez zwiększenie liczby powtórzeń oraz obszaru fotografowania.

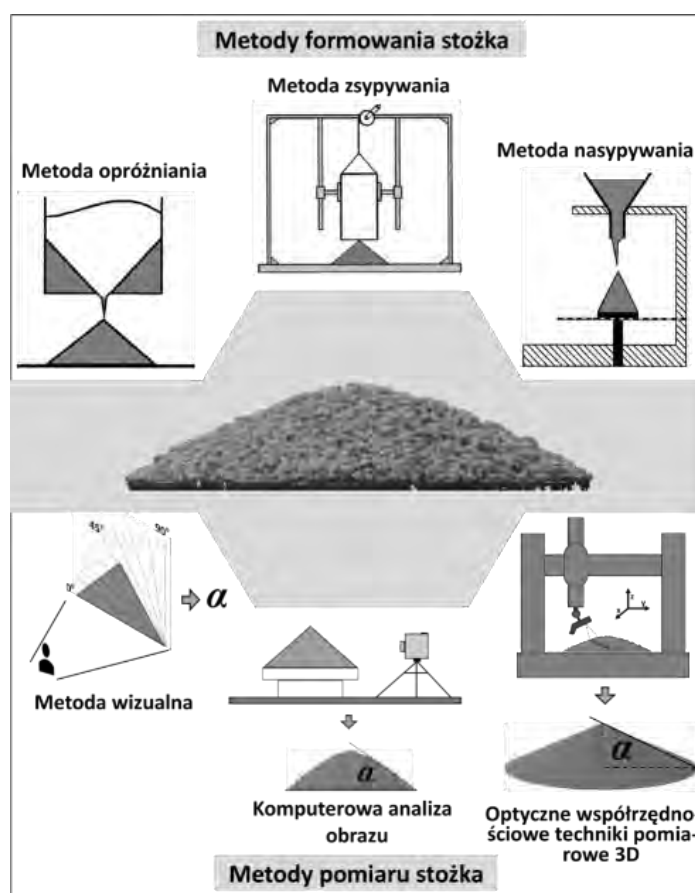
Podjęcie to oparte na przedstawionej filozofii jest czasochłonne, dlatego opierając się na analizie statystycznej opracowano metodę do dyskryminacji materiałów ziarnistych w oparciu o cechy morfologiczne [H3]. W analizie wykorzystano analizę statystyczną zdjęć czterech różnych materiałów ziarnistych (groch, pelet, pszenżyto, zrębki) w celu wykrycia różnic pomiędzy badanymi materiałami. Elementem charakterystycznym dla każdego materiału ziarnistego był rozkład prawdopodobieństwa występowania pikseli o określonej intensywności. W analizie testowano hipotezę, że prawdopodobieństwo znalezienia na zdjęciu piksela o określonej intensywności, jest (średnio) takie samo dla każdego badanego materiału. Do analizy zastosowano test parametryczny ANOVA i nieparametryczny testy Kruskala-Wallisa. Dodatkowo przeprowadzono test parametryczny t-test i nieparametryczny test Wilcoxona, w celu porównywania materiałów między sobą. W każdym przypadku zastosowano poprawkę Bonferroniego. Metodę testowano dla zdjęć o różnych polach, od pojedynczego ziarna (najmniejsze pole) do rozmiaru 1233x1200 pikseli (największe pole). Analiza wykazała statystyczny dowód na istnienie różnic między odpowiednimi średnimi rozkładami intensywności dyskretnego piksela (PID) wywołanymi histogramami w każdej grupie zdjęć, które nie mogą być wyjaśnione jedynie przez istniejące różnice między pojedynczymi ziarnami badanych materiałów. Okazało się, że dostrzegalne różnice, w ujęciu statystycznym, pojawiały się dopiero przy odpowiednio dużym polu fotografowania, na którym znajdowała się odpowiednia liczba widocznych ziaren oraz ciemnych pól (pustych przestrzeni) odzwierciedlonych na wykresie jako rozkład intensywności poszczególnych pikseli. **Proponowane podejście może przyczynić się do opracowania metody szybkiej kontroli w celu porównania i dyskryminacji materiałów ziarnistych różniących się od materiału odniesienia w procesie produkcyjnym [H3] – rys. 19.**



Rys. 19. Schemat ideowy zastosowania statystycznej dyskryminacji materiałów ziarnistych w procesie transportu na przenośniku taśmowym [H3]

Podstawowym problemem dotyczącym badań własności mechanicznych (w głównej mierze związanych z tarciem), oprócz dużej zmienności samego materiału, są także różne metody pomiarowe. Czynniki te utrudniają wnioskowanie oraz porównywanie wyników badań. Dlatego powinno się dążyć do ustandaryzowania metod pomiarowych z pełną świadomością niepewności otrzymywanych wyników.

Dobrym przykładem może tutaj być pomiar kąta usypu, dla którego istnieje kilka metod formowania stożka oraz metod jego pomiaru (rys. 20). Na podstawie analizy literatury trudno wskazać, która kombinacja metod jest dominująca. W pracy [H2] przedstawiona została nowa metoda wyznaczenia kąta usypu, wykorzystująca metrologię współrzędnościową opartą na metodzie fotogrametrycznej wraz z pełną analizą niepewności pomiaru.



Rys. 20. Metody formowania i pomiaru kąta usypu (opracowanie własne)

Prowadzona analiza wykazała, większą skuteczność i wyższość metod opartych na modelowaniu 3D nad pozostałymi technikami pomiarowymi kąta usypu. Pozwala ona na bardziej precyzyjne wyznaczenie rzeczywistej wartości kąta usypu jako podstawowego parametru, charakteryzującego zachowanie materiałów ziarnistych podczas procesów transportu i przechowywania.

Literatura

Mathia T., Louis F. (1982) Relationships between surface states, finishing processes and engineering properties, *Wear* 83 241 - 250

Opaliński I. (2014) *Inżynieria materiałów sypkich – wybrane zagadnienia*. Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Rzeszów

Wieczorowski M. (2013) Teoretyczne podstawy przestrzennej analizy nierówności powierzchni, *Inżynieria Maszyn*, R.18, z 3

- Łukaszuk J., Horabik J. (2002) Determination of the internal friction angle for plant granular material, *Acta Agrophysica* 64, Lublin
- Markowska A., Warechowska M., Warechowski J. (2016) Influence of moisture on external friction coefficient and basic physical properties of Astoria variety wheat grain, *Technical Sciences* 19(1), 17–26
- Sologubika C.A., Campanonec L.A., Paganob A.M., Gelyb M.C. (2013) Effect of moisture content on some physical properties of barley, *Industrial Crops and Products* 43, 762– 767
- Saracoglu T., Ozarslan C. (2012) Moisture-dependent geometric, frictional, mechanical properties of cabbage (*Brassica oleraceae* L. var. capitata) seeds, *Philipp Agric Scientist*, Vol. 95 No. 1, 53-63
- Mustafa Çetin, Erkan Şimşek, Taner Akbaş and Cengiz Özarslan, (2010) Physical properties of radish (*Raphanus sativus* L.) seed as a function of moisture content, physical properties of radish (*Raphanus sativus* L.) Mustafa Cetin et al. 291 PHILIPP AGRIC SCIENTIST ISSN 0031-7454, Vol. 93 No. 3, 291-298
- Aghkhani M.H., Miraei Ashtiani S.H., Baradaran Motie J., Abbaspour-Fard M.H. (2012) Physical properties of Christmas Lima bean at different moisture content, *Int. Agrophys.* 26, 341-346
- Singh K.P., Mishra H.N., Saha S. (2010) Moisture-dependent properties of barnyard millet grain and kernel, *Journal of Food Engineering* 96, 598–606
- A.H. Amer Eissa, (2011) Physical and aerodynamic properties of flaxseeds for proper separation by using airstream, *Journal of Food Process Engineering* 34, 983–1012
- Ünal H, Alpsoy H.C., Ayhan A. (2013) Effect of the moisture content on the physical properties of bitter melon seed, *Int. Agrophys.* 27, 455-461
- Alibas I., Koksall N., (2015) Determination of physical, mechanical, and structural seed properties of pepper cultivars, *Int. Agrophys.*, 29, 107-113
- Kalkan F., Kara M, (2011) Handling, frictional and technological properties of wheat as affected by moisture content and cultivar, *Powder Technology* 213, 116–122
- Molenda M, Horabik, J, Ross I. J., Montross M. D. (2002) Friction of wheat: grain-on-grain and on corrugated steel, *Trans. ASAE*, Vol. 45(2), 415–420
- Amin M.N., Ahammed S., Roy K.C., .Hossain M.A., (2005) Coefficient of friction of pulse grains on various surfaces at different moisture content, *International Journal Of Food Properties* Vol. 8 Issue: 1
- Razavi S.M.A, Milani E. (2006) Some physical properties of the watermelon seeds, *African Journal of Agricultural Research* Vol. 1 (3), 065-069
- Askari Asli-Ardeh E., Abbaspour-Gilandeh Y, Shojaei S. (2010) Determination of dynamic friction coefficient of paddy grains on different surfaces, *Int. Agrophysics* 24, 101-105
- Shafaei S.M., Kamgar S. (2017) A comprehensive investigation on static and dynamic friction coefficients of wheat grain with the adoption of statistical analysis, *Journal of Advanced Research* 8, 351–361
- Kabas O., Ozmerzi A. (2009) Relationship between the friction coefficient and velocity of two cactus pear (*Opuntia ficus-india* L.) cultivars on different surfaces, *International Journal of Food Science and Technology* 44, 100–105
- Pasumarty S. M., Johnson S. A., Watson S. A., Adams M. J. (2011) Friction of the Human Finger Pad: Influence of Moisture, Occlusion and Velocity, *Tribol Lett* 44, 117–137
- Ślipek Z., Kaczorowski J., Frączek J. (1999) Theoretical and experimental analysis of vegetable materials friction, PTIR 1999. Kraków
- Bucklin R.A., Molenda M., Bridges T. C., Ross I.J. (1996) Slip-stick frictional behavior of wheat on galvanized steel, *Transactions of the ASAE* 39(2), 649-653
- Askari Asli-Ardeh E., Abbaspour-Gilandeh Y, and Shojaei S. (2010) Determination of dynamic friction coefficient of paddy grains on different surfaces, *Int. Agrophysics* 24, 101-105
- Kaliniewicz Z. (2013) Analysis of frictional properties of cereal seeds, *African Journal of Agricultural Research*, Vol. 8(45), 5611-5621
- Kaliniewicz Z., Anders A., Markowski P., Jadwisieńczyk K, Rawa T. (2016) Influence of cereal seed orientation on external friction coefficients, *Trans. ASAE* 59(3) 1073-1081
- Frączek, J., Reguła, T. (2009). Wpływ wybranych czynników na wartość współczynników tarcia rozdrobnionych pędów miskanta olbrzymiego. *Inżynieria Rolnicza*, 6(115), 79-86.
- Frączek J. (1999) Tarcie ziarnistych materiałów roślinnych. *Zeszyty Naukowe AR w Krakowie*. z.252.
- Więcek J., Molenda M. Horabik J. (2011) Mechanical properties of granular agro-materials. Continuum and discrete approach, *Acta Agrophysica* 190

Kaczorowski J., Slipek Z., Fraczek J. (1996) Modelling of the external friction kinetic process in plant materials, Part III. Mathematical model. Annual Review of Agricultural Engineering 1(1), 95-104
Lewrowski Z. (2008) Tribologia. Tarcie zużywanie smarowanie, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław

4.4. Główne osiągnięcia naukowo-badawcze i kierunki dalszych prac

Cykl publikacji powiązanych tematycznie H1-H9 opisany w punkcie 4.3 ma charakter poznawczy i w znaczącym procencie dotyczy zagadnień związanych ze zjawiskiem tarcia materiałów ziarnistych pochodzenia roślinnego. W przedstawionych pracach skoncentrowałem się na analizie wybranych własności fizycznych badanych materiałów oraz ich wpływu na siłę tarcia (mierzoną jako opór występujący podczas poślizgu ziaren na płaskiej powierzchni – rys. 13). Uzyskane wyniki oraz zdobyta wiedza pozwoliły na lepsze zrozumienie relacji pomiędzy badanymi czynnikami, charakteryzującymi dany materiał ziarnisty. To z kolei umożliwiło wytypowanie czynników bezpośrednio wpływających na zjawisko tarcia, a w konsekwencji sformułowanie modeli opisujących to zjawisko. Uzyskane wyniki oraz ich interpretacja stanowiły podstawę rozbudowania (modyfikacji) modelu Coulomba o dodatkowe czynniki.

Niewątpliwą **nowością jest pokazanie charakteru kontaktu złoza materiałów ziarnistych z elementami konstrukcyjnymi maszyn poprzez parametry opisujące strukturę geometryczną powierzchni (SGP)**. Wyniki prowadzonych przeze mnie badań wykazały, że powierzchnia kontaktu w przypadku materiałów ziarnistych pochodzenia roślinnego ma znaczenie (znaczenie to rośnie ze wzrostem wilgotności oraz nacisku) i nie powinna być pomijana w modelach opisujących tarcie tego typu materiałów.

Opracowana przeze mnie metodyka pomiaru siły tarcia, w oparciu o specjalnie zbudowane stanowisko, zapewniła dużą precyzję i powtarzalność uzyskiwanych wyników. Pozwoliło to na dużo łatwiejszą interpretację wyników. Stworzony model tarcia (III) – rys. 17, uwzględnia zarówno charakter kontaktu jak również zmieniającą się wilgotność materiału.

Dodatkowo zaproponowane zostały przeze mnie alternatywne metody pomiaru wybranych cech materiałów ziarnistych [H2, H3]. Pierwsza z nich dotyczy procedury pomiaru kąta usypu bazując na fotogrametrii z pełną analizą niepewności pomiaru, a druga metoda wykorzystuje komputerową analizę obrazu oraz analizę statystyczną do dyskryminacji materiałów ziarnistych.

Zaproponowane osiągnięcie naukowe zawarte w cyklu powiązanych tematycznie publikacji stanowi poszerzenie wiedzy w obszarze zagadnień tarcia materiałów ziarnistych pochodzenia roślinnego (równoczesne uwzględnienie kształtu złoza, kontaktu, wilgotności, siły nacisku), a jej wykorzystanie w projektowaniu poprawi przebieg procesów, głównie w systemach zautomatyzowanego transportu materiałów ziarnistych.

Zaprezentowana metoda dyskryminacji materiałów ziarnistych może przyczynić się do rozwoju metod szybkiej wstępnej kontroli jakości (powtarzalności określonych cech) np. w transportowanym na przenośniku materiale ziarnistym. Idea metody wpisuje się w koncepcje Przemysłu 4.0 i znacząco może ułatwić sposób pozyskania, obsługi oraz analizy dużej liczby danych.

Przedstawiona problematyka nie jest zamknięta. Należy stwierdzić, że wyniki badań oraz związane z nimi przemyślenia wskazują na ich konieczność kontynuowania, głównie w zakresie:

- wpływu innych własności fizycznych materiałów ziarnistych na siłę tarcia,
- uwzględnienia struktury ziarna na poziomie mikro (chropowatość powierzchni kontaktujących się elementów) i jej wpływu na wartość siły tarcia,
- wpływu prędkości poślizgu na siłę tarcia w dużo większym zakresie prędkości (od 0,01 do 1000 [m/min])
- zjawisk towarzyszących tarcu (np. przy określonych prędkościach poślizgu obserwowane jest zjawisko stick-slip), w ramach projektu zgłoszonego przeze mnie do NCN (obecnie w ocenie merytorycznej) pt. *Określenie czynników determinujących występowanie zjawiska stick-slip dla wybranych materiałów ziarnistych pochodzenia roślinnego.*
- wykorzystania analizy fraktalnej w modelowaniu procesu tarcia

- procesu zużywania elementów maszyn, z którymi ma kontakt materiał ziarnisty; problem ważny szczególnie w przypadku produkcji żywności.

Katedra Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki posiadana niezbędne stanowiska badawcze do kontynuacji przedmiotowych badań, a dodatkowo podjęta współpraca z krajowymi i zagranicznymi ośrodkami naukowymi pozwala na kompleksowe podejście do prezentowanych zagadnień naukowych.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

5.1. Osiągnięcia naukowo – badawcze przed uzyskaniem stopnia doktora nauk technicznych

Po ukończeniu studiów wyższych podjąłem dalszą naukę na Studiach Doktoranckich na kierunku Budowa i Eksploatacja Maszyn, prowadzonych na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej. Głównym obszarem zainteresowań naukowych w tamtym okresie była metrologia współrzędnościowa w zastosowaniu do oceny dokładności odwzorowania powierzchni swobodnych, wytworzonych w procesie obróbki skrawaniem.

Swoje badania realizowałem w Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej Wydziału Mechanicznego PK, na maszynie współrzędnościowej wyposażonej w głowice stykowe. W tym celu odbyłem szereg szkoleń dotyczących obsługi maszyn współrzędnościowych oraz wykorzystania oprogramowania wspomagającego proces pomiarowy.

Na badania prowadzone w ramach realizowanej pracy doktorskiej, otrzymałem grant promotorski, w konkursie ogłoszonym przez Komitet Badań Naukowych (2004).

W ramach swojej aktywności naukowej, w roku 2004, odbyłem miesięczny staż naukowy w VSB Technical University of Ostrava, w ramach programu CEEPUS.

Wyniki prowadzonych badań zostały opublikowane w artykułach oraz zaprezentowane podczas konferencji naukowych.

- Boratyńska A., Gawlik J., Wójcik A. (2000) Analiza jakości technologicznej łożysk z zastosowaniem metody FMEA i metody Taguchi, Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyk Politechniki Wrocławskiej 78, seria: Konferencje 36, Tom 2, Wrocław.
- Gawlik J., Wójcik A. (2001) Zintegrowane zarządzanie jakością w produkcji łożysk tocznych z wykorzystaniem modułu Q-FAIL w pakiecie Q-PAK. Komputerowo zintegrowane zarządzanie, tom 1., pod red. R. Knosali. WNT, Warszawa, 235-241.
- Gawlik J., Karbowski K., Wójcik A. (2002) Reverse engineering in reconstruction of sculptured surface. Developing tendencies of production engineering, Miskolc, Hungary, 2-3 September.
- Gawlik J., Juras B., Karbowski K., Wójcik A. (2003) Koncepcja oceny dokładności powierzchni swobodnych w systemie inżynierii odwrotnej. X Krajowa, I Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, Metrologia w Technikach Wytwarzania, Tom 1, Kraków 2003.
- Gawlik J., Wójcik A. (2003) Modelowanie i ocena dokładności powierzchni swobodnych w systemie WMP-CAD-CAM. Automatykacja Produkcji, Prace Naukowe Instytutu Maszyn i Automatyk Produkcji, Nr 84, Seria 41, Tom 1, 173-182.
- Gawlik J., Karbowski K., Wójcik A. (2005) Metoda i program komputerowy do oceny dokładności odwzorowania powierzchni swobodnych systemie inżynierii odwrotnej. XI Krajowa, II Międzynarodowa Konferencja Naukowo – Techniczna, Metrologia w Technikach Wytwarzania, Przegląd Mechaniczny, 9'05 suplement.

Zwieńczeniem prowadzonych prac naukowo – badawczych była praca doktorska obroniona w dniu 11.01.2006. Stopień naukowy doktora nauk technicznych nadany mi został na posiedzeniu Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej w dniu 25 stycznia 2006.

5.2. Osiągnięcia naukowo – badawcze po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych

Po uzyskaniu stopnia doktora rozpocząłem trwającą ponad sześć, lat pracę w przemyśle maszynowym, głównie w branży produkcyjnej taboru kolejowego oraz zbrojeniowej, gdzie pełniłem funkcje kierownicze w pionie techniczno-produkcyjnym (również jako członek zarządu).

W swojej pracy miałem możliwość kompleksowego wykorzystania zdobytej wiedzy, głównie z obszaru nowoczesnych technik wytwarzania oraz metod zarządzania produkcją. Ważniejsze, stanowiska oraz nabyte kompetencje związane z dyscypliną inżynieria mechaniczna (budowa i eksploatacja maszyn, inżynieria produkcji) przedstawia poniższa tabela:

Stanowisko	Zakres obowiązków	Zdobyte kompetencje
Newag SA - Produkcja i naprawa taboru kolejowego		
Mistrz	<ul style="list-style-type: none"> · Koordynacja pracy w zakresie przydzielonego obszaru produkcji (naprawa elementów układów hamulcowych wagonów i lokomotyw) 	<ul style="list-style-type: none"> · Zapoznanie się z funkcjonowaniem zakładu/produkcji na najniższym poziomie
Samodzielny Referent ds. Optymalizacji Procesów Produkcji	<ul style="list-style-type: none"> · Analiza wybranych obszarów działalności przedsiębiorstwa pod kątem optymalizacji procesów · Opracowywanie propozycji wdrożeń zmian zmierzających do poprawy procesów produkcyjnych oraz nadzorowanie ich realizacji 	<ul style="list-style-type: none"> · Zapoznanie się z wszystkimi procesami technologicznymi w przedsiębiorstwie · Umiejętność patrzenia na procesy technologiczne/organizacje pracy przez pryzmat kosztów i strat · Umiejętność normowania pracy
Kierownik Działu Projektów i Prototypów	<ul style="list-style-type: none"> · Project Manager – międzynarodowego projektu - Modernizacja lokomotywy spalinowej M62/ST44 (311D) - projekt realizowany wspólnie z General Electric z USA · Project Manager - budowa Elektrycznego Zespołu Trakcyjnego 19 WE 	<ul style="list-style-type: none"> · Umiejętność pracy w międzynarodowym środowisku · Umiejętności zarządzania złożonymi i rozproszonymi procesami poprzez konieczność koordynacji zadań produkcyjnych, logistyki, zakupów oraz techniczno-technologicznych. · Doświadczenie w zakupach na zagranicznych rynkach m.in. Rosja, USA · Zdobycie wiedzy i praktyki z zakresu zarządzania projektami · Umiejętność pracy w grupie · Umiejętność sporządzania harmonogramów pracy oraz rozliczanie z wykonanych zadań
Kierownik Działu Doskonalenia Procesów Produkcji	<ul style="list-style-type: none"> · Analiza wybranych obszarów działalności przedsiębiorstwa pod kątem optymalizacji procesów · Wprowadzenie standaryzacji pracy w wyznaczonych obszarach przedsiębiorstwa, w oparciu o filozofie Lean Manufacturing 	<ul style="list-style-type: none"> · Poznanie i wdrożenie zasad oraz metod optymalizacji i standaryzacji pracy (Lean Manufacturing, Kaizen, 5S)
z-ca Kierownika Działu Technologicznego	<ul style="list-style-type: none"> · Nadzór nad procesami technologicznymi firmy · Koordynacja pracy ponad 30 osobowego zespołu technologów dla zapewnienia ciągłej pracy produkcji 	<ul style="list-style-type: none"> · Zarządzanie dużą grupą wykwalifikowanych specjalistów · Pogłębienie wiedzy na temat nadzoru technologicznego, odbiorów i serwisu

Kierownik Działu Marketingu	<ul style="list-style-type: none"> Realizacja polityki sprzedaży firmy Analiza rynku Pozyskiwanie klientów Przygotowywanie ofert Uczestnictwo w przetargach 	<ul style="list-style-type: none"> Zdobycie wiedzy na temat procedur związanych z Zamówieniami Publicznymi Umiejętność sporządzania ofert przetargowych Doświadczenie w reprezentowaniu firmy na rozprawach sądowych oraz w KIO
Zakłady Mechaniczne "Tarnów" S A branża zbrojeniowa		
Prokurent Spółki Z-ca Dyrektora ds. Produkcji Specjalnej, Pełnomocnik ds. Rozwoju i Wdrożeń Nowych Wyrobów	<ul style="list-style-type: none"> Nadzorowanie i koordynacja prac związanych z rozwojem wyrobów Nadzór nad nowymi wdrożeniami Pozyskiwanie środków finansowych na rozwój Inicjowanie działań zmierzających do doskonalenia procesów produkcji Reprezentowanie firmy na zewnątrz. Udział w negocjacjach Komitet sterujący projektu badawczo rozwojowego współrealizowanego przez Spółkę pt: Przeciwlotniczy zestaw raketowo-artyleryjski krótkiego zasięgu systemu osłony bazy lotniczej "Pilica" Kierownik Projektu „Komputerowo Wspomagane Centrum Wytwarzania Elementów Uzbrojenia” 	<ul style="list-style-type: none"> Doświadczenie w zarządzaniu pionem produkcyjnym, oraz cała spółką (produkcja, badania i rozwój, zakupy, marketing, rekrutacja, BHP) Współpraca w ramach dużej Grupy Kapitałowej (ponad 20 spółek) Doświadczenia w budowaniu planów strategicznych Spółki Doświadczenie w realizacji projektów Badawczo-Rozwojowych Doświadczenie w opracowywaniu planów rozwojowo - marketingowych Umiejętność w pozyskiwaniu i rozliczaniu środków na rozwój Uczestnictwo w realizacji kontraktów międzynarodowych Doświadczenie w kontaktach z organizacjami związkowymi – rozwiązywanie konfliktów
Ośrodek Badawczo Rozwojowy Sprzętu Mechanicznego Sp. z o. o. (JBR) branża zbrojeniowa		
Członek Zarządu	<ul style="list-style-type: none"> Zarządzanie Ośrodkiem realizującym projekty i zlecenia związane z obronnością kraju. Zagadnienia związane z konsolidacją Dywizji w ramach grupy Bumar 	<ul style="list-style-type: none"> Doświadczenie w zarządzaniu Jednostką Badawczo Rozwojową Opracowanie wstępnej koncepcji konsolidacji Ośrodka Badawczo Rozwojowego z Zakładami Mechanicznymi

Pracę na uczelni rozpocząłem w październiku 2012 roku. **Zdobyte doświadczenie przemysłowe, pozwoliło mi na takie podejście do podejmowanych zagadnień w obszarze badań naukowych, aby stanowiły przyczynek do rozwiązywania realnych problemów eksploatacyjnych.**

Obszarem moich dotychczasowych zainteresowań naukowych były zagadnienia związane z:

- badaniem procesu tarcia, głównie materiałów ziarnistych pochodzenia roślinnego,
- badaniem innych własności fizycznymi materiałów ziarnistych pochodzenia roślinnego, determinujących zjawisko tarcia,
- komputerową analizą obrazu,
- metrologią współrzędnościową (m.in systemy optyczne) w zastosowaniu do pomiarów materiałów ziarnistych

Stanowią one nadal tematykę podejmowanych przeze mnie prac i realizowanych projektów naukowo-badawczych.

Wyniki tych prac znalazły swoje odzwierciedlenie w postaci artykułów naukowych opublikowanych w czasopiśmie o zasięgu krajowym i międzynarodowym oraz referatach wygłaszanych na krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych – Załącznik nr4, pkt. I B, pkt. II A, II E, II L.

Jestem autorem lub współautorem łącznie 35 opracowań naukowych, opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych i zatrudnieniu na uczelni, z czego najważniejsze:

- 6 artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach z bazy *JCR* (w tym jedna po pozytywnych recenzjach, zaakceptowana do druku);
- 7 artykułów naukowych opublikowanych w materiałach konferencyjnych, indeksowanych na *Web of Science* – w tym 3 po pozytywnych recenzjach, zaakceptowane do druku),
- 14 artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach spoza bazy *JCR* (lista B wykazu MNiSW),
- 1 współautorska monografia naukowa pt. *Ekonomiczno-organizacyjne aspekty produkcji biopaliw*, nagrodzonej przez Komitet Technik Rolniczych Polskiej Akademii Nauk.

Poza tym wykonuję recenzje artykułów naukowych dla czasopism międzynarodowych oraz krajowych – Załącznik nr4, pkt. III P.

Osiągnięcia naukowo-badawcze, przedstawione w liczbach (Załącznik nr7) obejmują: sumaryczny Impact Factor (IF) wszystkich publikacji wg listy *JCR*, zgodnie z rokiem opublikowania, wynoszący 11,637. Liczba cytowań wg bazy *Scopus* wynosi 15 oraz Indeks Hirscha 3 (dane z dnia 19.03.2019).

Moja działalność publikacyjna była efektem aktywnego udziału w tematach realizowanych w ramach Działalności Statutowej Wydziału Inżynierii Produkcji i Energetyki Uniwersytetu Rolniczego, w szczególności w zakresie - Załącznik nr4, pkt. II F:

- doskonalenia procesów decyzyjnych w inżynierii rolniczej,
- elementów agrofizyki w ocenie właściwości biomasy przetwarzanej na cele energetyczne oraz w ocenie jakości surowców i produktów rolniczych,
- rozszerzania współpracy naukowej i umiędzynarodowianie działalności naukowej na Wydziale Inżynierii Produkcji i Energetyki,
- oraz systemu Mikrograntów Wydziałowych.

W ramach tych ostatnich realizowałem temat pt. Zastosowanie cyfrowej analizy obrazu do oceny wybranych parametrów rozdrobionej biomasy przeznaczonej na cele energetyczne. Jego realizacja była możliwa dzięki ciągłej modernizacji i rozbudowie bazy badawczej do pomiaru tarcia (Laboratorium Agrofizyczne oraz Laboratorium Fotooptycznego) znajdującej się w Katedrze Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki, gdzie przyczyniłem się do pozyskania kilku urządzeń m.in. skanera optycznego 3D oraz specjalistycznego oprogramowania do modelowania oraz komputerowej analizy obrazu.

Za swoją dotychczasową działalność naukową otrzymałem dwie indywidualne nagrody Rektora UR III stopnia za wybitne osiągnięcia w działalności naukowej oraz nagrodę za monografię (współautor) pt. *Ekonomiczno-organizacyjne aspekty produkcji biopaliw*, wydanej przez Komitet Technik Rolniczych Polskiej Akademii Nauk - Załącznik nr4, pkt. IIK, III D.

6. Omówienie dorobku i osiągnięć popularyzatorskich, dydaktycznych, organizacyjnych.

Moją działalność naukowo-badawczą uzupełniam działalnością dydaktyczną oraz organizacyjną, jak również podejmowaną współpracą naukową oraz popularyzowaniem nauki.

W chwili obecnej prowadzona przeze mnie działalność dydaktyczna koncentruje się głównie na prowadzeniu wykładów, ćwiczeń audytoryjnych z przedmiotów *mechanika* i *wytrzymałość materiałów* oraz dodatkowo, z przedmiotów *informacja techniczna* (wykłady, ćwiczenia, projekty), *ochrona własności intelektualnej* (wykłady, ćwiczenia), *system wartościowania pracy i wynagrodzeń* (studia podyplomowe). W poprzednich latach prowadziłem również zajęcia z przedmiotów: *pojazdy i układy napędowe* (wykłady, laboratoria), *zarządzanie projektem i ryzykiem kapitałowym* (wykłady)

(studia podyplomowe), *przedsiębiorczość produkcji roślin energetycznych* (wykłady ćwiczenia) (studia podyplomowe), *metrologia* (laboratoria) - Załącznik nr4, pkt. III I.

Jestem również pomysłodawcą i autorem programu przedmiotu *techniki obrazowania materii żywej* (wykłady, laboratoria, projekty) na kierunku Inżynieria Biosystemów.

Dodatkowo zostałem zaproszony do wygłoszenia dwóch referatów pt. *Metrologia współrzędnościowa w badaniach materiałów biologicznych – problemy wybrane*, w ramach seminariów badawczych Matematyka Stosowana oraz Group of Machine Learning Research, odbywających się na Wydziale Matematyki i Informatyki UJ - Załącznik nr4, pkt. III I.

Dzięki swojemu doświadczeniu w przemyśle w obszarze optymalizacji procesów produkcyjnych oraz harmonogramowania, zostałem promotorem pomocniczym w przewodzie doktorskim pt: *Wspomaganie komputerowe odporne na zakłócenia szeregowania zadań w małych i średnich przedsiębiorstwach* - Załącznik nr4, pkt. III K.

Poza tym sprawowałem opiekę naukową w charakterze promotora nad 7 pracami dyplomowymi na kierunku Zarządzanie i Inżynieria Produkcji, Technika Rolnicza i Leśna, Odnawialne Źródła Energii i Gospodarka Odpadami - Załącznik nr4, pkt. III J.

Odbyłem 2 staże naukowe, w tym 1 zagraniczny (State Agrarian and Engineering University in Podilya – Ukraina) oraz 1 krajowy (Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy w Radomiu) – Załącznik nr4, pkt. III L.

Byłem członkiem komitetu sterującego w ramach: The European Cooperation in Science and Technology (COST) - Action: MP1303 - Understanding and Controlling Nano and Mesoscale Friction (2014-2017) - Management Committee Member, Załącznik nr4, pkt. III A.

W ramach projektu pt. Wzmocnienie potencjału dydaktycznego UR w Krakowie, pełniłem funkcję sekretarza Studiów Podyplomowych „Systemy jakości biopaliw” - Załącznik nr4, pkt. III Q.

Aktywnie uczestniczyłem w organizacji sześciu konferencji międzynarodowych oraz dwóch krajowych konferencji naukowych (członek komitetu organizacyjnego, sekretarz, prowadzący sesje tematyczne). Załącznik nr4, pkt. III C.

Jestem członkiem 2 towarzystw naukowych: Polskiego Towarzystwa Tribologicznego oraz Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją – Załącznik nr4, pkt. III H.

Jestem członkiem wydziałowych komisji: Oceny Jakości Kształcenia oraz Komisji Finansowej Załącznik nr4, pkt. III Q.

Ze względu na prowadzoną działalność naukową i dydaktyczną stale podnoszę swoje kwalifikacje uczestnicząc wielu szkoleniach, zarówno bezpośrednio związanych z tematyką badawczą, jak również podnoszących moje umiejętności pracy z grupą. Lista odbytych szkoleń znajduje się w Załączniku 4, pkt. IIIQ.

7. Podsumowanie – sumaryczne zestawienie kryteriów osiągnięć

Poniższe zestawienie stanowi sumaryczne podsumowanie kryteriów osiągnięć, wg Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 01.09.2011, w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego, przed uzyskaniem i po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych.

lp.	Kryterium	Liczba	
		przed uzyskaniem stopnia doktora	po uzyskaniu stopnia doktora
1.	Publikacje naukowe w czasopismach z bazy <i>Journal Citation Reports (JCR)</i>		6
2.	Zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne i technologiczne		2
3.	Udzielone patenty: a) międzynarodowe b) krajowe		
4.	Wynalazki oraz wzory użytkowe i przemysłowe, które zostały wystawione na międzynarodowych lub krajowych wystawach lub targach		
5.	Monografie, publikacje naukowe w czasopismach innych niż znajdujące się w bazie <i>JCR</i>	6	22
6.	Opracowania zbiorowe, katalogi zbiorów, dokumentacja prac badawczych, ekspertyz		3
7.	Sumaryczny <i>Impact Factor (IF)</i> według listy <i>JCR</i> , zgodnie z rokiem opublikowania		11,637
8.	Liczba cytowań publikacji według bazy <i>Web of Science (WoS)</i> ,: z autocytowaniami / bez autocytowań		6/5 (<i>WoS</i>) 15/13 (<i>Scopus</i>)
9.	Indeks Hirscha według bazy <i>Web of Science (WoS)/Scopus/Google Scholar</i>		2/3/5
	Kierowanie projektami badawczymi:		
10.A	a) międzynarodowymi b) krajowymi		1 1
	Udział w projektach badawczych:		
10.B	a) międzynarodowych b) krajowych	1	1 2
11.	Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową		2
	Wygłoszenie referatów na tematycznych konferencjach		
12.	a) międzynarodowych b) krajowych	2 3	11 5
	Uczestnictwo w programach europejskich oraz innych programach:		
13.	a) międzynarodowych b) krajowych		1
	Aktywny udział w konferencjach naukowych:		
14.	a) międzynarodowych b) krajowych		8 3
	Udział w komitetach organizacyjnych konferencji naukowych:		
15.	a) międzynarodowych b) krajowych		6 2

16.	Otrzymane nagrody i wyróżnienia inne niż wymienione wyżej	1	1
17.	Udział w konsorcjach i sieciach badawczych		1
18.	Kierowanie projektami realizowanymi we współpracy z: a) naukowcami z innych ośrodków polskich, b) naukowcami z ośrodków zagranicznych, c) przedsiębiorcami, innymi niż wymienione wyżej		2 1
19.	Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism		2
20.A	Członkostwo w międzynarodowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych a) ogółem b) w tym z wyboru		
20.B	Członkostwo w krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych a) ogółem b) w tym z wyboru		2
21.	Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki		3
22.	Opieka naukowa nad studentami		7
23.	Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze: a) opiekuna naukowego b) promotora pomocniczego		1
24.	Staż w ośrodkach naukowych lub akademickich a) zagranicznych b) krajowych	1	1 1
25.	Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie		
26.	Udział w zespołach eksperckich i konkursowych		1
27.	Recenzowanie projektów: a) międzynarodowych b) krajowych		
28.	Recenzowanie publikacji w czasopismach: a) międzynarodowych b) krajowych		4 6
29.	Inne osiągnięcia		3

Szczegółowy wykaz osiągnięć naukowo – badawczych, popularyzatorskich, dydaktycznych i organizacyjnych znajduje się w Załączniku nr4 do wniosku o wszczęcie postępowania habilitacyjnego.