

**AUTOREFERAT W JĘZYKU POLSKIM**

*Mateusz Stasiak*

Dr inż. Mateusz Stasiak  
Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego Polskiej Akademii Nauk w Lublinie  
Zakład Fizycznych Właściwości Materiałów Roślinnych  
Laboratorium Mechaniki Materiałów Sypkich

## AUTOREFERAT

1. Imię i Nazwisko: **Mateusz Stasiak**

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne - z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

- 1994 – 1999**      Magisterskie studia stacjonarne; Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Kierunek Mechanika i Budowa Maszyn w zakresie Samochody i Ciągniki. Tytuł magistra inżyniera uzyskany po obronie pracy magisterskiej pt. „Analiza zderzenia pojazdu jednośladowego z samochodem osobowym” w lipcu 1999 roku.
- październik 2005**      Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego Polskiej Akademii Nauk, Zakład Fizycznych Właściwości Materiałów Roślinnych. Uzyskanie stopnia naukowego doktora nauk rolniczych w zakresie agronomii agrofizyki po publicznej obronie pracy doktorskiej pt. „Charakterystyki mechaniczne wybranych materiałów sypkich pochodzenia roślinnego” w czerwcu 2005 roku.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.

- maj 1999 - wrzesień 1999**      Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego Polskiej Akademii Nauk w Lublinie – **młodszy mechanik**
- wrzesień 1999 - grudzień 2005**      Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego Polskiej Akademii Nauk w Lublinie – **asystent**
- styczeń 2006 – obecnie**      Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego Polskiej Akademii Nauk w Lublinie – **adiunkt**
- lipiec 2007- sierpień 2008**      Uniwersytet Otto-von-Guericke'a w Magdeburgu – **adiunkt**
- sierpień 2010 – obecnie**      Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego Polskiej Akademii Nauk w Lublinie – **opiekun Laboratorium Mechaniki Materiałów Sypkich**



4. Wskazanie osiągnięcia\* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

Moim osiągnięciem, będącym podstawą ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego jest cykl 6 oryginalnych prac twórczych.

A) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego:

### **Wpływ czynników technologicznych na charakterystyki mechaniczne proszków**

B) autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa:

1. **Stasiak M.**, Molenda M., Horabik J., 2006: Wpływ składu granulometrycznego na sypkość śrutę pszenicznej. Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 4s, 139-140. **(5pkt. MNiSW)**

2. Molenda M., **Stasiak M.**, Horabik J., Fornal J., Błaszczak W., Ornowski A., 2006: Microstructure and mechanical parameters of five types of starch. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 15/56, 2, 161-168. **(10pkt. MNiSW)**

3. **M. Stasiak**, J. Tomas, M. Molenda, P. Müller, 2009: Compression and flow behaviour of cohesive powders. EJPAU, 12(2). **(7pkt. MNiSW)**

4. **M. Stasiak**, I. Opaliński, M. Molenda, 2008: Masowe i mikroskopowe właściwości sypkich materiałów roślinnych i przemysłowych. I. Porównanie właściwości mechanicznych. Przemysł Chemiczny, 87/2, 199-202. **(15pkt. MNiSW; IF: 0,254)**

5. **M. Stasiak**, R. Rusinek, M. Molenda, J. Fornal, W. Błaszczak, 2011: Effect of potato starch modification on mechanical parameters and granules morphology. Journal of Food Engineering, 102, 154-162. **(40pkt. MNiSW; IF: 2,414)**

6. **M. Stasiak**, M. Molenda, I. Opaliński, W. Błaszczak, 2013: Mechanical properties of native corn, wheat and potato starches, Czech Journal of Food Sciences, 31:4, 347-354. **(20pkt. MNiSW; IF: 0,685)**

Liczba punktów MNiSW publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego: **97 pkt.**  
Całkowity IF publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego: **3,353.**

Mój wkład jako autora wiodącego obejmuje autorstwo hipotez i planu przeprowadzonych doświadczeń, udział w przygotowaniu, zestawianiu i uruchamianiu stanowisk badawczych, wykonanie doświadczeń, analizę i opracowanie wyników oraz przygotowanie manuskryptów (załączono oświadczenia współautorów). Ponadto opracowanie koncepcji, wykonanie projektu, nadzór nad wykonaniem, uruchomienie, opracowanie metody i wykonanie doświadczeń na prototypowym urządzeniu do wyznaczania sypkości.



C) omówienie celu naukowego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania:

## **Wprowadzenie**

W przemyśle spożywczym i farmaceutycznym wykorzystuje się na szeroką skalę surowce i produkty w postaci proszków. Przechowywane i przemieszczane są one luzem, a ich cechą charakterystyczną są wymiary pojedynczych ziaren. Średnie wielkości ziaren najczęściej zawierają się między 0,05 mm a 0,5 mm. Właściwości mechaniczne tych materiałów są aktualnie przedmiotem żywego zainteresowania badaczy i technologów. Jednym z ważnych czynników zwiększających zapotrzebowanie na tego rodzaju informacje jest upowszechnienie metod projektowania wspomaganych komputerem, które wymagają, jako danych wejściowych, parametrów materiałowych dla każdej realizacji technicznej. Zainteresowanie mechaniką materiałów proszkowych wzrasta także w wyniku globalizacji, rosnącej skali produkcji i wzmożenia konkurencji rynkowej. Rosnąca konkurencja wymusza zachowanie wysokiej jakości produktu, której ważnymi atrybutami są właściwości mechaniczne i sypkość, mające znaczenie praktyczne w ocenie możliwości grawitacyjnego przepływu i określeniu warunków, w jakich materiał sypki staje się w swoim zachowaniu podobny do cieczy. Ich znajomość pomaga unikać granicznych sytuacji, prowadzących do powstania nawisów materiału, a w skrajnych przypadkach nawet do całkowitego zatrzymania przepływu.

Proszki pochodzenia roślinnego sprawiają specyficzne trudności metodyczne w badaniach, gdyż podlegają wpływowi wielu czynników nieistotnych w przypadku lepiej już rozpoznanych materiałów sypkich pochodzenia mineralnego. Ich właściwości i zachowanie pod obciążeniem modyfikowane jest pod wpływem zmian wilgotności i historii obciążenia. Charakterystyki mechaniczne wyznaczane w standardowych testach pozwalają przewidzieć zachowanie w rzeczywistych procesach. Na przebiegi tych charakterystyk wpływają istotnie czynniki technologiczne, zmienne podczas procesu technologicznego. Z analizy literatury dotyczącej mechaniki proszków wynika, że ciągle istnieje potrzeba wyznaczania parametrów mechanicznych proszków, które pozwalają ocenić możliwość grawitacyjnego przepływu oraz określić warunki w jakich materiał traci sypkość i zbryla się. Materiały te identycznie organoleptycznie wykazują często odmienne zachowanie podczas operacji technologicznych, a ich parametry znacznie się od siebie różnią.

Jednym z materiałów w postaci proszku, szeroko stosowanym w przemyśle spożywczym i farmaceutycznym jest skrobia. Jest ona niedrogim, szeroko dostępnym surowcem i przetwarzana jest na masową skalę. Udział najbardziej popularnych skrobi

w światowym rynku wynosi kolejno: skrobia kukurydziana – 83%, skrobia pszeniczna – 7%, skrobia ziemniaczana – 6% i tapiokowa – 4%. Ponad 53% całkowitej produkcji skrobi używana jest w przemyśle spożywczym. Istnieje wiele danych literaturowych dotyczących chemicznych i fizykochemicznych właściwości oraz budowy różnych skrobi, jednak wciąż wiedza o ich właściwościach mechanicznych i sypkości jest skromna. W przypadku proszków pochodzenia roślinnego decydującymi czynnikami warunkującymi zachowanie się w trakcie operacji technologicznych jest morfologia, wilgotność, skład granulometryczny oraz zawartość domieszek i dodatków poprawiających sypkość. W celu uzyskania określonych właściwości fizykochemicznych skrobia ziemniaczana poddawana jest szeregu procesom zmieniającym jej właściwości. Dlatego istotnym zagadnieniem jest także badanie cech mechanicznych i charakterystyk produktów będących wynikiem przetworzenia skrobi ziemniaczanej. Istotne z punktu widzenia praktyki przemysłowej jest określenie przyczyn występowania efektu drgań ciernych podczas testów ścinania proszków – tzw. efekt slip-stick. W ostatnich latach daje się także zauważyć rosnące zapotrzebowanie na techniczne metody wyznaczania sypkości, bezpośrednio na liniach produkcyjnych przemysłu. Jednocześnie nowe metody powinny być szybkie i niewymagające wysoko wykwalifikowanego personelu, gdzie sypkość mogłaby być określana prostym do wyznaczenia wskaźnikiem.

Pomimo istnienia wielu nowych metod oznaczania sypkości metoda Jenikego jest ciągle używana. Jako metoda odniesienia służy do weryfikacji nowych, powstających metod opisu sypkości materiału. W przypadku materiałów proszkowych, które przetwarzane i przemieszczane są w warstwach nieprzekraczających wysokości 1 metra coraz większe znaczenie ma wyznaczanie ich parametrów w warunkach niskich naporów normalnych symulujących zakres obciążeń w warunkach rzeczywistych technologii.

Wszystkie powyższe i aktualne przesłanki ukierunkowujące aspekty badań w dziedzinie mechaniki proszków znajdują odzwierciedlenie w przedstawianej serii prac stanowiących osiągnięcie habilitacyjne.

## Cel

Celem przeprowadzonych badań, przedstawionych w monotematycznym cyklu publikacji, było wyznaczenie wpływu czynników technologicznych na charakterystyki i właściwości mechaniczne proszków rozpowszechnionych w przemyśle spożywczym i farmaceutycznym. Ponadto podjęto również próbę opracowania nowego wskaźnika sypkości będącego wartością siły potrzebnej do złamania skonsolidowanej, cylindrycznej próbki materiału proszkowego oraz znanej z badań farmaceutyków metody pomiaru czasu wypływu proszku z lejka.

Analizowano wpływ następujących czynników technologicznych: zawartości drobnej frakcji, budowy morfologicznej pojedynczych granul proszku, rozkładu granulometrycznego, wydłużonego czasu konsolidacji, dodatku czynnika smarującego, wilgotności, fizykochemicznych modyfikacji skrobi oraz pochodzenia botanicznego skrobi. Celem pracy było również określenie warunków granicznych występowania efektu drgań ciernych.

## Opis badań i otrzymanych wyników

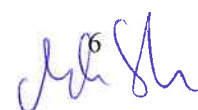
W pierwszym etapie badań analizowano wpływ zawartości drobnej frakcji oraz przydatność pomiaru czasu wypływu materiału z lejka do oznaczania sypkości proszków spożywczych pochodzenia roślinnego na przykładzie śruty pszenicznej o różnym składzie granulometrycznym. Wyniki przeprowadzonych badań zamieszczono w publikacji 4.B.1.

Pomiary czasu wypływu przeprowadzono w przyrządzie składającym się z cylindrycznej komory o średnicy 120 mm i wysokości 240 mm, zakończonej lejkiem, umieszczonej na statywie i sztywnej podstawie. Kąt nachylenia ściany lejka wynosił  $60^\circ$ . Otwór o średnicy 20 mm zamykany był zasuwą. Komorę napełniano badanym materiałem, a następnie otwierano zasuwę i mierzono czas wypływu z dokładnością do 0,01 s. Pomiary sypkości według standardowej procedury przeprowadzono w aparacie bezpośredniego ścinania o średnicy 60 mm przy prędkości przemieszczenia  $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Testy przeprowadzono przy naporze normalnym nieprzekraczającym 10 kPa. Przebieg funkcji płynięcia FF wyznaczano z trzech punktów pomiarowych uzyskanych przy naporze odniesienia  $\sigma_r = 4, 6$  oraz 10 kPa. Badania przeprowadzono dla sześciu próbek proszku, różniących się składem granulometrycznym. Badano śrutę pszeniczną w stanie po przemiale, stanowiącą materiał wyjściowy oraz 5 próbek z 5, 10, 15, 20, i 25% dodatkiem drobnej frakcji ( $0,1 \text{ mm} < d < 0,2 \text{ mm}$ ).

Badania wykazały, że skład granulometryczny śruty pszenicznej wpływa na wartości funkcji płynięcia FF, które wzrastają z przyrostem zawartości drobnej frakcji. Największe wartości FF, charakterystyczne dla materiałów kohezyjnych otrzymano dla próbki z 25%

zawartością drobnej frakcji, zaś najniższe, charakterystyczne dla materiałów łatwo płynących, dla materiału wyjściowego. Dla materiałów z zawartością drobnej frakcji od 5 do 20% wartości FF przyjmowały wartości charakterystyczne dla materiałów kohezyjnych. Wartości indeksów płynięcia, tj. współczynników nachylenia funkcji płynięcia wzrastały od 0,16 dla materiału wyjściowego do 0,47 dla materiału z 25% udziałem drobnej frakcji. Najkrótszy czas, wynoszący około 5 s, otrzymano dla materiału o zawartości 5% frakcji drobnej, natomiast najdłuższy ok. 7,5 s dla materiału z zawartością 25% drobnej frakcji. Stwierdzono istotną, dodatnią ( $r=0,822$ ,  $\alpha=0,01$ ) korelację czasu wypływu  $t$  i indeksu płynięcia  $i$ .

W drugim etapie, badań opisanym w pracy 4.B.2, analizowano charakterystyki mechaniczne i parametry pięciu rodzajów skrobi: ziemniaczanej, pszenicznej, kukurydzianej, tapiokowej i amarantusowej. Podjęto także próbę określenia zależności pomiędzy morfologią i mechanicznymi właściwościami. Badania przeprowadzono dla skrobi popularnych na rynku światowym ze względu na ich duży udział w technologiach przemysłowych. Zdjęcia mikroskopowe wykonano przy pomocy skaningowego mikroskopu elektronowego JSM 5200, we współpracy z Instytutem Rozrodu Zwierząt i Badań Żywności PAN w Olsztynie, a analizę składu granulometrycznego przeprowadzono przy pomocy analizatora firmy Malvern Mastersizer 2000. Charakterystyki mechaniczne ścinania wykonywano w aparacie bezpośredniego ścinania tak, jak w poprzednim przypadku, zgodnie z procedurą normy Eurokod 1. Dodatkowo przeprowadzono testy w aparacie jednoosiowego ściskania o średnicy komory 54 mm. Analiza rozkładów granulometrycznych wykazała, że skrobia ziemniaczana ma największe cząstki, nawet dwa razy większe od następnej w kolejności skrobi pszenicznej. Skrobia kukurydziana i tapiokowa charakteryzowały się zbliżonymi rozkładami granulometrycznymi. Najmniejsze wymiary pojedynczych cząstek miała skrobia amarantusowa. Analiza zdjęć mikroskopowych wykazała, że budowa morfologiczna pojedynczych granul skrobi ziemniaczanej odbiega od pozostałych. Rozkład jest bimodalny. Duże granule mają nieregularności na powierzchni w ich środkowej części. Skrobia pszenna również wykazuje bimodalny charakter rozkładu granulometrycznego. W tym przypadku większość cząstek jest spłaszczona i ma soczewkowaty kształt. Na zdjęciu z większym przybliżeniem część cząstek jest zdeformowana i zniszczona podczas przemieszczania warstw próbki. Kształt i wzajemna orientacja w trakcie testów jest czynnikiem decydującym o zachowaniu mechanicznym. Skrobia tapiokowa i kukurydziana należy do klasy proszków o średnich rozmiarach pojedynczych cząstek 10 - 25  $\mu\text{m}$ , a amarantusowa do bardzo małych - około 1  $\mu\text{m}$ . W wyniku badań stwierdzono występowanie oscylacji przebiegów



eksperymentalnych zależności naprężenia stycznego od przemieszczenia względnego w przypadku skrobi ziemniaczanej oraz pszennej w całym zakresie naprężenia konsolidującego. W przypadku pozostałych skrobi oscylacje nie występowały. Najwyraźniejszy efekt oscylacji przebiegów eksperymentalnych bezpośredniego ścinania zaobserwowano dla skrobi ziemniaczanej. Oscylacje naprężenia stycznego dla skrobi pszennej były mniej regularne i miały mniejszą częstotliwość. Wartość kąta tarcia wewnętrznego  $\varphi$  nie zmieniała się istotnie wraz z naporem konsolidacji. Najwyższą wartość tego parametru  $38,9^\circ$  otrzymano dla skrobi ziemniaczanej natomiast najniższą  $22,9^\circ$  dla skrobi tapiokowej. Wartości kąta tarcia wewnętrznego były dla skrobi kukurydzianej i tapiokowej około 30% niższe od pozostałych materiałów w całym zakresie naporu konsolidacji. Przyczyną tego jest rozkład granulometryczny i kształt oraz chropowatość powierzchni pojedynczych granул skrobi tapiokowej i kukurydzianej. Wartości efektywnego kąta tarcia wewnętrznego były wyższe niż kąt tarcia wewnętrznego, wskutek niewielkiej kohezji. Najwyższą wartość -  $43^\circ$  stwierdzono dla skrobi amarantusowej przy 10 kPa konsolidacji, a najniższy -  $29^\circ$  dla skrobi kukurydzianej przy 30 kPa konsolidacji. Najwyższe wartości funkcji płynięcia FF i najszerszy zakres zmienności (od 4 do 16 kPa) otrzymano dla skrobi amarantusowej. W przypadku pozostałych materiałów wartości  $\sigma_c$  wzrastały wolniej ze wzrostem  $\sigma_1$ . Przyczyną gorszej sypkości skrobi amarantusowej są mniejsze wymiary pojedynczych granул i stosunkowo duża powierzchnia właściwa  $2,75 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ . Większa powierzchnia cząstek na jednostkę masy skutkuje większą powierzchnią oddziaływań kohezyjnych w materiale, a co za tym idzie gorszą sypkością. Wartości indeksu płynięcia i przyjmowały wartości charakterystyczne dla proszków łatwo i swobodnie płynących. Najniższą wartość odkształcenia w aparacie jednoosiowego ściskania - 0,14 otrzymano dla skrobi amarantusowej, a najwyższą 0,21 dla skrobi pszennej. Różnice w wartościach przemieszczenia względnego wynikają z kształtu i wymiarów pojedynczych granул. W przypadku skrobi pszennej wydłużone i soczewkowate cząstki zmieniają swoje położenia w trakcie konsolidacji i dodatkowo ulegają zniszczeniu pod wpływem obciążenia.

Ze względu na wartości parametrów mechanicznych badane materiały można podzielić na trzy grupy. Do grupy pierwszej należy skrobia kukurydziana i tapiokowa, z wartościami kąta tarcia wewnętrznego i efektywnego kąta tarcia wewnętrznego znacznie niższymi od pozostałych. Drugą grupę reprezentuje skrobia amarantusowa, charakteryzująca się istotnie mniejszą sypkością, zaś grupę trzecią skrobia ziemniaczana i pszena. Zdjęcia mikroskopowe pozwoliły na interpretację powyższych wyników. Stwierdzono, że materiały należące do poszczególnych grup różnią się rozmiarem i kształtem pojedynczych granул.



Skrobia ziemniaczana i pszenna charakteryzuje się większymi cząsteczkami o bimodalnym rozkładzie granulometrycznym i dlatego wykazuje odmienne zachowanie podczas jednoosiowego ściskania. Zaobserwowano dwa spadki naporu dla skrobi pszennej oraz regularne fluktuacje przebiegu zagęszczania dla skrobi ziemniaczanej. Przebieg zagęszczania próbki skrobi ziemniaczanej w początkowej fazie także różnił się od tych otrzymanych dla pozostałych materiałów. Wystąpiły niewielkie wahania naporu, których najbardziej prawdopodobną przyczyną jest zmiana i reorganizacja upakowania w próbce materiału poddanej obciążeniu. Mniejsze granule wypełniają przestrzenie pomiędzy większymi. Regularnych wahań nie obserwowano w przypadku skrobi pszennej, a zdjęcia mikroskopowe wykazują gładszą powierzchnię pojedynczych cząstek. Jest to przyczyną niewystępowania gwałtownych przemieszczeń podczas zagęszczania. Przebiegi zagęszczania skrobi kukurydzianej i tapiokowej są bardzo zbliżone i różnią się od tych otrzymanych dla trzech pozostałych materiałów. Także w tym przypadku jest to wynikiem prawie identycznego rozkładu granulometrycznego skrobi: od 2 do 30  $\mu\text{m}$  w przypadku skrobi kukurydzianej i od 4 do 35  $\mu\text{m}$  dla skrobi tapiokowej. Dla tych materiałów otrzymano zbliżone wartości kąta tarcia wewnętrznego i efektywnego kąta tarcia wewnętrznego oraz stwierdzono wzrost tych parametrów wraz ze zwiększaniem naporu konsolidacji. W przypadku skrobi amarantusowej czynnikiem decydującym o własnościach mechanicznych, tj. gorszej sypkości i większej wartości kąta tarcia wewnętrznego był rozkład granulometryczny. W tym przypadku wielkość cząstek zawierała się w zakresie od 0,75 do 2,0  $\mu\text{m}$ .

Kolejnym etapem badań wpływu czynników technologicznych na charakterystyki i parametry mechaniczne proszków było określenie wpływu wydłużonego czasu konsolidacji oraz dodatku czynnika smarującego dla skrobi ziemniaczanej. Wyniki tych badań przedstawione zostały w publikacji 4.B.3. W pracy analizowano wpływ zawartości talku na amplitudę drgań ciernych w teście bezpośredniego ścinania oraz sypkość skrobi ziemniaczanej. Do materiału wyjściowego dodawano 2, 4, 6, 8 i 10% talku w proporcji wagowej. Talk stosowany jest w procesie ekstruzji oraz przy produkcji biodegradowalnych tworzyw skrobiowych jako czynnik smarujący i poprawiający poślizg.

Tak jak w przypadku poprzednich projektów stwierdzono występowanie oscylacji przebiegów eksperymentalnych zależności naprężenie styczne-przemieszczenie względne  $\tau=f(\Delta l/D)$ . Drgania wystąpiły przy naporze konsolidacji  $\sigma_r=6$  i 10 kPa. Amplituda oscylacji dla skrobi ziemniaczanej bez domieszek wynosiła 1,8 kPa dla  $\sigma_r=6$  kPa i 3,7 kPa dla  $\sigma_r=10$  kPa. W miarę wzrostu zawartości talku amplituda oscylacji malała i dla zawartości 6%

wynosiła 0,53 kPa dla  $\sigma_r=6$  kPa i 1,47 kPa dla  $\sigma_r=10$  kPa. W przypadku 8 i 10% dodatku talku następował całkowity zanik oscylacji. Talk ma mniejsze pojedyncze cząsteczki. Jego dodatek powoduje otoczenie cząstek skrobi, a przez to zmniejszenie tarcia i spadek oporów podczas ruchu względnego.

Wartości FF skrobi ziemniaczanej były charakterystyczne dla materiałów swobodnie i łatwo płynących. Wyraźny spadek wartości FF wraz ze zwiększaniem zawartości talku stwierdzono dla naporu konsolidacji  $\sigma_r=6$  i 10 kPa. Wartości funkcji płynięcia FF wzrastały wraz z wydłużeniem czasu konsolidacji od 6 do 50%.

Celem pracy 4.B.4 było porównanie zachowania mechanicznego proszków szeroko stosowanych w przemyśle chemicznym i farmaceutycznym oraz proszków spożywczych. W tym przypadku do badań wybrano typowe materiały sypkie: surowce, półprodukty lub produkty przemysłu chemicznego i farmaceutycznego oraz ważne z gospodarczego punktu widzenia proszki spożywcze. Do pierwszej grupy należały: tarflen, PVC, polistyren, biel tytanowa, celuloza mikrokrystaliczna oraz uwodniony krzemian magnezu i glinu; do drugiej: mąka kukurydziana, skrobia pszenna, skrobia ziemniaczana.

Pomiary i analizę wyników przeprowadzono, podobnie jak we wcześniejszych badaniach, zgodnie z normą Eurokod 1, w aparacie bezpośredniego ścinania o średnicy 60 mm, przy trzech poziomach naporu konsolidacji  $\sigma_r = 4, 6$  i 10 kPa. Badania ściśliwości przeprowadzono w aparacie jednoosiowego ściskania o średnicy 54 mm.

Maksymalne wartości naprężenia stycznego  $\tau$ , wynoszące około 11 kPa, otrzymano w przypadku mąki kukurydzianej dla naporu konsolidacji 10 kPa. Dla skrobi pszennej i mąki kukurydzianej stwierdzono występowanie oscylacji, podczas gdy w przypadku skrobi ziemniaczanej oscylacje nie wystąpiły. Niewystępowanie oscylacji w przypadku skrobi ziemniaczanej może być wynikiem innej wilgotności materiału, spowodowanej niestabilnymi warunkami w laboratorium. Wyniki badań wpływu wilgotności na efekt drgań przedstawione zostaną w dalszej części opracowania. Amplituda oscylacji wzrastała wraz z naporem konsolidacji nawet dwukrotnie w przypadku skrobi pszennej i o około 80% w przypadku mąki kukurydzianej. Maksymalna wartość kąta tarcia wewnętrznego  $\phi$  skrobi pszennej i mąki kukurydzianej wynosiła około  $50^\circ$  (przy  $\sigma_r=4$  kPa dla skrobi pszennej i przy  $\sigma_r=10$  kPa dla mąki kukurydzianej). Dla skrobi ziemniaczanej kąt  $\phi$  równy był około  $30^\circ$  w całym zakresie naporu konsolidacji. Wartości funkcji płynięcia FF dla mąki kukurydzianej i skrobi pszennej zawierały się w przedziale charakterystycznym dla materiałów łatwo płynących w całym zakresie naporu konsolidacji. W przypadku skrobi ziemniaczanej wartości FF były

charakterystyczne dla materiałów kohezyjnych. Dla materiałów stosowanych w przemyśle chemicznym i farmaceutycznym nie stwierdzono występowania oscylacji przebiegów eksperymentalnych, a wyznaczone FF przyjmowały wartości charakterystyczne dla materiałów kohezyjnych. Jedynie w przypadku PVC wartości były charakterystyczne dla materiałów swobodnie i łatwo płynących. Najwyższe wartości FF od 4,7 do 9,5 kPa przy naporze konsolidacji odpowiednio 4 i 10 kPa otrzymano dla bieli tytanowej. Wartości  $\phi$  materiałów przemysłowych zawierały się w zakresie od około  $15^\circ$  dla bieli tytanowej przy  $\sigma_r=4$  kPa i tarflenu przy  $\sigma_r=6$  kPa do około  $45^\circ$  dla tarflenu przy  $\sigma_r=10$  kPa. Badania wykazały, że największe wartości odkształcenia względnego dla 100 kPa naporu konsolidującego miały materiały wykazujące się mniejszą płynnością. W przypadku materiałów spożywczych wartość odkształcenia względnego wynosiła od około 0,13 przypadku skrobi pszennej do około 0,33 w przypadku mąki kukurydzianej. Prawidłowość ta nie dotyczyła skrobi ziemniaczanej, która miała wysokie wartości FF, charakterystyczne dla materiałów kohezyjnych, a najniższą wartość odkształcenia względnego dla zadanego naporu konsolidującego w teście. Spośród materiałów stosowanych w przemyśle chemicznym i farmaceutycznym największe wartości odkształcenia względnego stwierdzono dla bieli tytanowej i tarflenu, podczas gdy najniższe dla polistyrenu i PVC. Dla tych materiałów wartości odkształcenia względnego odzwierciedlają prawidłowości w wartościach FF.

W pracy 4.B.5 omówiono wyniki badań mechanicznych właściwości 12 materiałów, będących wynikiem fizykochemicznych modyfikacji skrobi ziemniaczanej oraz skrobi ziemniaczanej nieprzetworzonej, jako materiału odniesienia. Scharakteryzowano morfologię i rozkład granulometryczny badanych materiałów oraz podjęto próbę znalezienia zależności pomiędzy morfologią a cechami mechanicznymi. Do badań wybrano typowe surowce, półprodukty i produkty przemysłu farmaceutycznego i spożywczego: sproszkowane białko ziemniaczane, skrobię granulowaną, żelującą i ziemniaczaną, mączkę budyniową, dwa zagęstniki skrobiowe AC i AD oraz dwie dekstryny białe (40% oraz 60 %) i cztery dekstryny żółte (S, N, W oraz WB).

Skrobia granulowana otrzymywana jest poprzez działanie wysokiej temperatury i wilgotności, skrobia żelująca i mączka budyniowa (E1404) poprzez acetylację. Dekstryny białe otrzymywane są poprzez ogrzewanie parą suchej zakwaszonej skrobi (40 i 60 oznacza % rozpuszczalności w temperaturze  $20^\circ\text{C}$ ). Dekstryny żółte otrzymywane są przez prażenie z dodatkiem kwasu. Symbole S, N, W, WB korespondują ze skalą lepkości Hoptera. Analogicznie do poprzednich badań parametry mechaniczne wyznaczano w aparacie

bezpośredniego ścinania według normy Eurocode 1, a mikrostrukturę proszków analizowano w skaningowym mikroskopie elektronowym typu JEOL JSM 5200.

Z analizy zdjęć mikroskopowych wynika, że skrobia ziemniaczana kontrolna ma granule o bimodalnym kształcie i szerokim zakresie wymiarów od 5 do 70  $\mu\text{m}$ . Większe cząstki mają wydłużony kształt, a mniejsze bardziej bliski kulistemu. Zróżnicowanie kształtu i wymiarów istotnie wpływa na mechaniczne zachowanie się podczas przetwarzania. Znaczną zmianę kształtu i wymiaru po modyfikacji fizykochemicznej zaobserwowano jedynie w przypadku skrobi granulowanej. W przypadku tego materiału działanie wysokiej temperatury i wilgotności powodowało aglomeracje i skutkowało utworzeniem stosunkowo dużych nieregularnych cząstek o wymiarze rzędu kilkuset  $\mu\text{m}$ . Chemiczna modyfikacja skrobi ziemniaczanej nie powodowała widocznych zmian w morfologii cząstek. Jedynie w przypadku białka ziemniaczanego, z uwagi na odmienną budowę chemiczną granule charakteryzowały się większymi wymiarami oraz porowatą strukturą. W porównaniu z pozostałymi materiałami cząstki białka ziemniaczanego były kruche i łamliwe. Działanie pary wodnej na suchą skrobię (dekstryny białe) oraz prażenie suchej skrobi (dekstryny żółte) nie zmieniało znacząco mikroskopowej budowy pojedynczych granul. Następowoło jedynie nieznaczne nabrzmienie pojedynczych granul (dla dekstryn żółtych S i N). Współczynnik kształtu (iloraz dwóch wymiarów cząstki) większych cząsteczek dla mączki budyniowej i dekstryny żółtej WB WK zawierał się w zakresie od 2,04 do 2,71. Najwyższy współczynnik kształtu WK, odpowiednio 9,38 i 9,88, otrzymano dla skrobi granulowanej i białka ziemniaczanego. W tym przypadku jest to wynikiem parametrów procesu wytwarzania i silniej tendencji do aglomerowania. Podobnie jak w przypadku poprzednich badań, zaobserwowano oscylacje przebiegów eksperymentalnych otrzymanych w testach bezpośredniego ścinania dla skrobi ziemniaczanej kontrolnej, przy czym drgania wystąpiły jeszcze dla dekstryny białej 60% oraz dekstryny żółtej W. Najsilniejszy efekt drgań zaobserwowano dla dekstryny białej z amplitudą wynoszącą ok. 3 kPa przy ścinaniu dla 10 kPa naporu konsolidacji. Jest to dowód na to, że nawet materiał o bardzo jednolitych cząstkach może wykazywać ten niekorzystny efekt. W przypadku dekstryny białej 60% efekt drgań może być potęgowany poprzez nieregularny kształt większych cząstek, co może być przyczyną ich wzajemnego zahaczania podczas ścinania. Dla skrobi ziemniaczanej kontrolnej przy najniższym naporze konsolidacji efekt drgań pojawiał się przy przemieszczeniu względnym 0,03, a dla dekstryny żółtej przy 0,01. Przyczyny tego odmiennego zachowania należy upatrywać w większej sztywności i mniejszej deformowalności cząstek dekstryny.

Odmienna mikrostruktura skrobi granulowanej i białka ziemniaczanego skutkowała innymi wartościami parametrów mechanicznych, w porównaniu do pozostałych materiałów. Charakteryzowały się znacznie wyższym kątem tarcia wewnętrznego i efektywnym kątem tarcia wewnętrznego, a białko ziemniaczane najwyższą kohezją. Mikrostruktura i kształt cząstek wpływały istotnie na wartości funkcji płynięcia. Dla proszku o chropowatej powierzchni cząstek i ich największej średnicy (białko ziemniaczane) stwierdzono najwyższe wartości FF. Tym samym udowodniono, że stan powierzchni jest czynnikiem krytycznym decydującym o sypkości proszku i nawet materiał o stosunkowo dużych cząsteczkach i chropowatej powierzchni wykazuje słabą sypkość. W przypadku skrobi granulowanej nie stwierdzono różnic w wartościach FF w stosunku do innych. Zbliżone wartości FF są wynikiem niszczenia aglomeratów skrobi granulowanej podczas testów ścinania.

W ostatniej pracy 4.B.6 zawarto wyniki badań służące wyjaśnieniu powstawania efektu drgań ciernych. Podjęto badania, mające na celu wyjaśnienie sprzecznych wyników otrzymanych wcześniej dla skrobi ziemniaczanej. Prawdopodobną przyczyną tego zmiennego zachowania jest różny zakres wilgotności dostarczanych i analizowanych partii materiału.

Celem badań była analiza powstawania i zanikania efektu slip-stick w zależności od wilgotności oraz wyznaczenie parametrów mechanicznych skrobi ziemniaczanej, pszenicznej i kukurydzianej przy różnych wilgotnościach materiału. Przedmiotem projektu było przedstawienie możliwie szerokiego zakresu parametrów skrobi ziemniaczanej, kukurydzianej oraz pszenicznej wyznaczanych w standardowych testach. Do badań wybrano materiały o wilgotności kondycjonalnej w stanie jakim dostarczono je do laboratorium oraz przesuszone. Wilgotność skrobi ziemniaczanej wynosiła 16%, skrobi pszenicznej 20%, a kukurydzianej 12%. Właściwości wyznaczono również po 24-godzinnym suszeniu w komorze z wymuszonym obiegiem powietrza, w temperaturze 30°C. Po procesie suszenia wilgotność obniżyła się do poziomu 6% dla skrobi kukurydzianej i pszennej oraz do 4% dla ziemniaczanej. Rozkłady granulometryczne i współczynniki kształtu WK wyznaczano przy pomocy analizatora IPS UA firmy Kamika. Parametry Carra wyznaczano w automatycznym testerze proszków firmy Hosokawa. Parametry tarcia wewnętrznego wyznaczano w aparacie bezpośredniego ścinania oraz w aparacie pierścieniowo obrotowym Schulzego. Dodatkowo przeprowadzono testy jednoosiowego ściskania w aparacie o średnicy 54 mm.

W wyniku badań stwierdzono, że wilgotność nie wpływa na wielkość pojedynczych ziaren badanych skrobi. Średnia średnica dla liczby cząstek skrobi o niższej

wilgotności wynosiła 7,7  $\mu\text{m}$  dla skrobi pszennej, 5,8  $\mu\text{m}$  dla kukurydzianej, 12,9  $\mu\text{m}$  dla skrobi ziemniaczanej, 12,4  $\mu\text{m}$  odpowiednio dla skrobi przesuszanej oraz tej o wilgotności kondycjonalnej. Współczynnik kształtu WK skrobi ziemniaczanej wynosił około 3 dla skrobi pszennej około 1,5 oraz 1,10 dla kukurydzianej. Badania te korespondują z wcześniejszymi wynikami badań mikrostruktury określającymi cząstki skrobi ziemniaczanej jako owalne o nieregularnym kształcie, a skrobi pszenicznej i kukurydzianej jako sferyczne i soczewkowate. Najwyższą gęstość nasypową 763  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  wyznaczoną w automatycznym testerze proszków otrzymano dla skrobi ziemniaczanej, zaś najniższą dla skrobi kukurydzianej. Taką samą tendencję stwierdzono w przypadku materiałów o większej wilgotności, jednak w tym przypadku gęstość była znacząco niższa. Ścisłość, stanowiąca miarę zmian gęstości nasypowej i upakowanej, była wyższa w przypadku skrobi zbożowych i wynosiła od 34% do 54%, podczas gdy dla skrobi ziemniaczanej wynosiła 22% i 30%, odpowiednio dla materiału przesuszonego i o wilgotności kondycjonalnej. Ścisłość dla skrobi ziemniaczanej o wilgotności magazynowej była najmniejsza. Wzrost wilgotności powodował przyrost ścisłości w każdym z badanych przypadków, a największy efekt zaobserwowano w przypadku skrobi ziemniaczanej. Najbardziej prawdopodobną przyczyną takiego zachowania są bardziej deformowalne i kleiste cząstki skrobi o większej wilgotności. Kąt nasypu był większy dla skrobi o wyższej wilgotności. W przypadku skrobi kukurydzianej wzrastał od 52° do 56°, natomiast dla pszenicznej od 42° do 56°. Dla skrobi ziemniaczanej różnica wartości kąta nasypu, w zależności od wilgotności, była największa. Dla materiału przesuszonego wynosiła 38°, a dla wilgotności magazynowej 58°. W przypadku wszystkich przesuszonych skrobi stwierdzono występowanie oscylacji przebiegów eksperymentalnych bezpośredniego ścinania. Drgań nie stwierdzono dla skrobi o wilgotności magazynowej. Wykresy eksperymentalne zależności naprężenia stycznego od przemieszczenia względnego osiągały stabilną wartość przy mniejszym odkształceniu dla materiałów o większej wilgotności. Wartości kąta tarcia wewnętrznego były wyższe dla materiałów przesuszonych. Dla skrobi pszennej zawierały się w zakresie od 37° do 39° dla 6% wilgotności i od 28° do 34° dla wilgotności 20%. Dla skrobi ziemniaczanej o wyższej wilgotności kąt tarcia wewnętrznego zawierał się w przedziale od 27° do 32°, podczas gdy dla przesuszonej od 34° do 38°. Najwyższe wartości tego parametru, od 35° do 42°, otrzymano dla przesuszonej skrobi kukurydzianej. Wzrost wilgotności powodował nawet trzy-, czterokrotny wzrost kohezji i wartości FF. Przesuszone skrobie charakteryzowały się wartościami FF charakterystycznymi dla materiałów swobodnie płynących, a wilgotne dla łatwo płynących. Skrobie pszenna i kukurydziana o wilgotności magazynowej charakteryzowały się zbliżonymi

wartościami FF w zakresie od 2,5 kPa do 3,5kPa. Wartości dla skrobi ziemniaczanej były o 30% niższe (1,8-2,2 kPa). Jest to wynikiem wielkości ziaren skrobi ziemniaczanej, która ma cząsteczki dwa razy większe od pozostałych.

Wyraźny slip-stick dla skrobi przesuszonych zaobserwowano także na wykresach eksperymentalnych otrzymanych w aparacie pierścieniowo obrotowym. Analogicznie jak w przypadku testów bezpośredniego ścinania, efektu nie zaobserwowano dla wyższej wilgotności materiałów. Najwyższe wartości naprężenia stycznego otrzymano dla skrobi pszenicznej, a najniższe dla skrobi ziemniaczanej. Dla materiałów o wyższej wilgotności stabilną wartość naprężenia stycznego dla skrobi ziemniaczanej otrzymywano o połowę wcześniej niż w przypadku skrobi zbożowych. Dla materiałów przesuszonych stabilizacja przebiegu skrobi ziemniaczanej następowała po 1,5 raza dłuższym czasie niż w przypadku skrobi pochodzenia zbożowego.

Przebiegi liniowych warunków plastyczności materiałów o mniejszej wilgotności pokrywały się, zaś otrzymane dla skrobi o większej wilgotności różniły się znacznie. Dla skrobi pszennej liniowy warunek plastyczności przebiegał najwyżej, a dla skrobi ziemniaczanej najniżej. Efektywny kąt tarcia wewnętrznego miał zbliżone wartości dla wszystkich skrobi: 38° dla skrobi pochodzenia zbożowego i 39° dla ziemniaczanej. Kąt tarcia wewnętrznego wynosił 37°. Sypkość wyznaczona w aparacie Schulzego była porównywalna z sypkością wyznaczoną w aparacie bezpośredniego ścinania – materiały o większej zawartości wody wykazywały gorszą sypkość oraz największe wartości kąta tarcia wewnętrznego i efektywnego kąta tarcia wewnętrznego. W wyniku analizy przebiegów eksperymentalnych testów jednoosiowego ściskania stwierdzono różnice w wartościach deformacji otrzymanych dla naporu konsolidacji 12 kPa. Dla skrobi ziemniaczanej deformacja była najmniejsza i wynosiła 3,5 mm oraz była o połowę niższa od tych otrzymanych dla skrobi pochodzenia zbożowego. W przypadku skrobi kukurydzianej deformacja była największa i wynosiła 7,2 mm. Różnice w wartościach deformacji są wynikiem odmiennego kształtu i wielkości ziaren ośrodka. Dla skrobi kukurydzianej, dla której otrzymano najwyższe wartości przemieszczenia pojedyncze, granule były najmniejsze (5,8  $\mu\text{m}$ ) i najbardziej zbliżone do kuli ( $WK=1,11$ ). W testach jednoosiowego ściskania dla materiałów przesuszonych zaobserwowano efekt slip-stick. Największą amplitudę drgań zaobserwowano dla skrobi pszenicznej. Dla kukurydzianej i ziemniaczanej amplituda oscylacji miała zbliżoną wartość.

W wyniku prac nad nową metodą indeksowania sypkości materiałów proszkowych poprzez pomiar siły złamania cylindrycznej, wstępnie skonsolidowanej tłoczyskiem, próbki

materiału stwierdzono, że nadaje się ona do prostego oznaczania sypkości. W wyniku badań otrzymano przebiegi eksperymentalne siły w funkcji czasu. W przypadku skrobi stwierdzono istotny wpływ wszystkich analizowanych czynników. Największy wpływ na wartość siły złamania skonsolidowanej próbki miał rodzaj skrobi. Największą wartość siły otrzymano dla skrobi ziemniaczanej, a najmniejszą dla skrobi kukurydzianej. Najwyższa wartość siły spowodowana jest najprawdopodobniej kształtem pojedynczych cząstek skrobi ziemniaczanej. W przypadku tego materiału kształt jest najbardziej oddalony od kulistego, a stan powierzchni pojedynczych cząstek może powodować wzajemne zahaczanie się nierówności powierzchni cząstek. W przypadku pozostałych skrobi wartości siły złamania były zbliżone, co jest efektem podobnego kształtu i stanu powierzchni pojedynczych cząstek. Najmniejszy wpływ na wartość siły miał dodatek stearynianu magnezu. Średnia wartość siły złamania dla skrobi wzrastała wraz z wilgotnością od około 0,1405 N, przy wilgotności 6% do około 0,1455 N dla wilgotności 17%. Wartość siły złamania w przypadku największej wilgotności to prawdopodobnie skutek większych siły spójności w materiale oraz występowanie mostków cieczowych pomiędzy cząsteczkami proszków powodujących wzrost kohezji. Wartość kohezji w przypadku wszystkich skrobi zredukowana była poprzez dodatek stearynianu magnezu, który ma mniejsze wymiary pojedynczych cząstek i gromadzi się na powierzchni granul skrobi. Otrzymane średnie wartości siły złamania dla materiałów z dodatkiem stearynianu magnezu były niższe od tych bez dodatku lubryfikatora.

Na podstawie analizy sił złamania, wyznaczonych dla poszczególnych materiałów wraz z dodatkiem stearynianu magnezu oraz o różnej wilgotności, i ich porównania z tymi otrzymanymi przy pomocy standardowych metod w aparacie pierścieniowo obrotowym i automatycznym testerze proszków przyjęto wartości charakterystyczne opisujące w sposób uproszczony sypkość materiału. Przedziały wyznaczono dla skrobi, skrobi ziemniaczanej, jako materiału o odmiennym zachowaniu od pozostałych oraz dla mąk i mleka. W przypadku skrobi ziemniaczanej można stwierdzić, że wartości siły złamania poniżej 0,1420 N są charakterystyczne dla materiałów swobodnie płynących. W zakresie od 0,1420 N do 0,1460 N dla materiałów łatwo płynących i powyżej tej wartości dla materiałów kohezyjnych. Dla pozostałych skrobi wartości siły złamania poniżej 0,1410 N są charakterystyczne dla materiałów swobodnie płynących, do wartości 0,1420 N dla materiałów łatwo płynących, a powyżej tej wartości dla materiałów kohezyjnych. Dla mąk wartości siły złamania w zakresie poniżej 0,1320 N określają materiał jako swobodnie płynący, do wartości siły 0,1380 N jako łatwo płynący, podczas gdy powyżej tej wartości jako kohezyjny. W przypadku mleka w proszku wartości poniżej 0,1350 N określają materiał jako



swobodnie płynący, do 0,1380 N jako łatwo płynący, a powyżej tej wartości siły złamania jako kohezyjny.

### **Wnioski:**

Zwiększenie zawartości drobnej frakcji w proszku istotnie wpływa na wzrost wartości naprężenia stycznego w teście bezpośredniego ścinania oraz na wzrost wartości funkcji płynięcia i tym samym na spadek sypkości. Zwiększenie zawartości drobnej frakcji ( $0,1 < d < 0,2$  mm) z 0 do 25% powodowało zmianę charakterystyki śruty pszenicznej z charakterystycznej dla materiału łatwo płynącego na kohezyjny. Wzrost zawartości drobnej frakcji powodował wzrost indeksu płynięcia od 0,16 do 0,47.

Możliwe jest wykorzystanie pomiaru czasu wypływu z lejka jako uproszczonej metody indeksowania sypkości proszków spożywczych. Pomiar czasu wypływu śruty pszenicznej z lejka wykazały istotny przyrost ze wzrostem zawartości drobnej frakcji powyżej 5%.

Badania potwierdzają wpływ budowy morfologicznej pojedynczych granул skrobi na właściwości mechaniczne. W przypadku skrobi ziemniaczanej, posiadającej największe granule zaobserwowano efekt slip-stick. Kolejną przyczyną powstawania drgań w testach skrobi ziemniaczanej jest relatywnie szeroki zakres rozkładu wielkości cząstek – 93% granул należało do 8 frakcji od 10 do 90 mm. Niewielkie drgania zaobserwowano w przypadku skrobi pszennej dla której  $d(0,5) = 20,2$  mm oraz 97% należy do trzech frakcji od 10 do 30 mm. Nie zaobserwowano drgań dla skrobi kukurydzianej, tapiokowej i amarantusowej – materiałów o stosunkowo jednolitym składzie granulometrycznym.

Rozkład granulometryczny determinuje właściwości cierne i sypkość. Proszki drobnoziarniste mogą wykazywać problematyczne zachowanie w trakcie procesów technologicznych. Im mniejsze cząstki proszku tym gorsze właściwości cierne oraz sypkość. Największe wartości kąta tarcia wewnętrznego, efektywnego kąta tarcia wewnętrznego oraz najgorszą sypkość stwierdzono dla skrobi amarantusowej, dla której wielkość pojedynczych ziaren była najmniejsza (98% granул mniejszych od 10  $\mu\text{m}$ ).

Morfologia pojedynczych granул i rozkład wielkości ma wpływ na przebieg zagęszczania w aparacie jednoosiowego ściskania. Im mniejsze są cząstki ośrodka, tym mniejsze odkształcenie względne. Skrobia pszenna charakteryzowała się najwyższym odkształceniem 0,21 dla naporu konsolidacji 80 kPa, podczas gdy odkształcenie dla skrobi amarantusowej przy tym samym naporze wynosiło 0,15. Skrobia tapiokowa oraz

*psk sh*

kukurydziana ze zbliżonym rozkładem wielkości cząstek wykazywały się podobieństwem przebiegów zagęszczania oraz wartości odkształcenia.

Wydłużenie czasu konsolidacji proszków powoduje zmianę właściwości mechanicznych i pogorszenie sypkości. Wydłużenie czasu konsolidacji próbek skrobi ziemniaczanej do 2 h przed wykonaniem zasadniczych testów powoduje wzrost wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie i pogorszenie sypkości.

Dodatek czynnika smarującego zmniejsza istotnie wielkość efektu slip-sick, nawet do całkowitego zaniku. Już 5% dodatek talku do skrobi ziemniaczanej, powoduje znaczny spadek wartości amplitudy drgań wykresów eksperymentalnych zarówno dla naporu konsolidacji 10 kPa jak i 4 kPa, a 10% dodatek czynnika smarującego powoduje całkowity zanik efektu slip-stick.

Różnice w sypkości oraz odmiennym zachowaniu się pod obciążeniem, w teście jednoosiowego ściskania pomiędzy materiałami stosowanymi w przemyśle chemicznym i farmaceutycznym, a materiałami spożywczymi są wynikiem odmiennej wielkości, stanu powierzchni, kształtu i odkształcalności pojedynczych ziaren. Stwierdzone różnice podstawowych właściwości mechanicznych nasuwają przypuszczenie o występowaniu odmiennych mechanizmów kontrolujących oddziaływanie pomiędzy cząstkami obu grup materiałów.

Chemiczne modyfikowanie skrobi ziemniaczanej nie wpływa znacząco na morfologię pojedynczych granul, z wyjątkiem oddziaływania parą wodną, która powoduje aglomerację. Oddziaływanie ciepła na skrobię podczas dekstrynizacji miało niewielki wpływ na morfologię cząstek, jednak w tym przypadku zaobserwowano powstanie cząstek o zróżnicowanych wymiarach. Spośród wszystkich modyfikowanych materiałów pochodnych skrobi suszone białko ziemniaczane wyróżniało się innym wymiarem cząstek oraz odmiennymi parametrami mechanicznymi.

Nieregularny kształt i chropowatość pojedynczych granul jest przyczyną wzrostu kąta tarcia wewnętrznego. Dla skrobi granulowanej wynosił  $43,4^\circ$ . Chropowata i porowata powierzchnia pojedynczych granul białka ziemniaczanego i granulowanej skrobi ziemniaczanej jest przyczyną wysokiej wartości efektywnego kąta tarcia zewnętrznego do  $45^\circ$ .

Zwiększenie porowatości i chropowatości powierzchni pojedynczych granul powoduje zwiększenie kohezji. Największe wartości tego parametru stwierdzono dla białka ziemniaczanego i skrobi granulowanej. W przypadku tych materiałów wartość kohezji wzrasta znacząco wraz z naporem konsolidacji.

*dob Sh*

W wyniku badań skrobi ziemniaczanej modyfikowanej oraz skrobi ziemniaczanej kontrolnej stwierdzono, że efekt slip-stick obserwowany jest dla materiałów charakteryzujących się najwyższym kątem tarcia wewnętrznego i efektywnym kątem tarcia wewnętrznego.

Stan powierzchni pojedynczych granul jest czynnikiem decydującym o właściwościach mechanicznych. Najwyższe wartości funkcji płynięcia stwierdzono dla suszonego białka ziemniaczanego, dla którego pojedyncze granule są kształtem najbardziej oddalone od kulistego oraz mają największe średnice, a powierzchnię chropowatą. Najniższe wartości funkcji płynięcia uzyskano dla skrobi ziemniaczanej kontrolnej oraz skrobi granulowanej. W przypadku skrobi granulowanej podczas testów ścinania następowało zniszczenie aglomeratów, stąd charakterystyki były podobne jak dla materiału wyjściowego. Nie stwierdzono różnic w wartościach funkcji płynięcia dla dekstryn.

Skrobia ziemniaczana różni się znacznie morfologią pojedynczych granul i mechanicznym zachowaniem od skrobi pochodzenia zbożowego - pszennej i kukurydzianej. Pojedyncze granule skrobi ziemniaczanej są prawie dwukrotnie większe, a ich kształt wydłużony z prawie dwukrotnie większym współczynnikiem kształtu wynoszącym około 3, podczas gdy dla skrobi kukurydzianej około 1,1 a dla pszenicznej 1,57. Skutkowało to największymi wartościami gęstości usypnej i utręsionej oraz kątem nasypu. Wartości funkcji płynięcia dla skrobi ziemniaczanej były wyższe niż te otrzymane dla skrobi pochodzenia zbożowego, zwłaszcza w zakresie podwyższonej wilgotności. Prawdopodobnie jest to przyczyną większych wymiarów liniowych granul, wydłużonego kształtu granul, większej gęstości, kąta nasypu i mniejszej ściśliwości.

Wilgotność jest czynnikiem silnie modyfikującym zachowanie mechaniczne skrobi ziemniaczanej oraz kukurydzianej i pszenicznej. Gęstości nasypowa i utręsiona dla skrobi wilgotnych były mniejsze i stanowiły od 50 do 90% wartości gęstości dla suchych skrobi. Ściśliwość wilgotnej skrobi pszenicznej i ziemniaczanej była wyższa o 50% od tej dla suchych materiałów. W przypadku skrobi kukurydzianej nie zaobserwowano zmian ściśliwości wraz ze zwiększeniem wilgotności.

Wzrost wilgotności skrobi ziemniaczanej, pszennej i kukurydzianej powodował zanik efektu slip-stick w przebiegach testów bezpośredniego ścinania, w aparacie pierścieniowo-obrotowym oraz w teście jednoosiowego ściskania.

Wartość siły potrzebnej do złamania cylindrycznej, wstępnie skonsolidowanej tłoczyskiem, próbki materiału proszkowego może być prostym technologicznym indeksem sypkości. Na podstawie porównania wyników z otrzymanymi przy pomocy standardowych

metod, przyjęto wartości charakterystyczne opisujące w sposób uproszczony sypkość materiału.

## **5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych:**

W latach 1994-1999 studiowałem na kierunku Samochody i Ciągniki Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej. Tytuł magistra inżyniera uzyskałem w lipcu 1999 roku na podstawie egzaminu i pracy magisterskiej pt. „Analiza zderzenia pojazdu jednośladowego z samochodem osobowym”. Badania do pracy magisterskiej wykonałem w Katedrze Pojazdów Samochodowych pod kierunkiem dr inż. Tomasza Karczewskiego. Jeszcze przed obroną pracy magisterskiej podjąłem pracę w Instytucie Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego Polskiej Akademii Nauk w Lublinie, w Zakładzie Fizycznych Właściwości Materiałów Roślinnych. Od momentu podjęcia pracy uczestniczę w realizacji tematu „Procesy fizyczne w roślinnych ośrodkach sypkich”. W tym okresie rozpocząłem badania nad mechanicznymi właściwościami materiałów sypkich pochodzenia roślinnego pod kierunkiem prof. dr hab. Józefa Horabika. Do 2002 roku uczestniczyłem w realizacji projektu badawczego 5 P06F 021 17 pt. „Opracowanie charakterystyki właściwości fizycznych sypkich surowców spożywczych”, finansowanego przez Komitet Badań Naukowych. W projekcie zajmowałem się prowadzeniem badań, zestawianiem i uruchamianiem nowych urządzeń laboratoryjnych oraz ich projektowaniem. Prowadzone przeze mnie badania dotyczyły mechanicznych właściwości sypkich surowców spożywczych pochodzenia roślinnego. Materiały te występują w wielu operacjach technologicznych w rolnictwie i przemyśle spożywczym. Znajomość ich mechanicznych parametrów oraz charakterystyk i reakcji z materiałami konstrukcyjnymi jest niezbędną podstawą do zaprojektowania bezpiecznych i przewidywalnych urządzeń technologicznych i instalacji do ich przetwarzania i transportu. W ramach prowadzonych badań miałem okazję do wnikliwego zapoznania się z funkcjonowaniem laboratorium oraz metod pomiarowych, a także metod akwizycji danych. Po zatrudnieniu na stanowisku asystenta kontynuowałem swoje zainteresowania naukowe w zakresie charakterystyk mechanicznych materiałów sypkich pochodzenia roślinnego pod kierunkiem prof. dr hab. Marka Molendy. Szczególnym zainteresowaniem objąłem wyznaczanie charakterystyk sprężystości materiałów sypkich przy pomocy specjalnie skonstruowanego edometru z możliwością pomiaru naporu poziomego. Badanie prowadziłem na różnych materiałach sypkich pochodzenia roślinnego dla zmiennej wilgotności. Wyniki

badan z tego okresu posluzyly do przygotowania szeregu oryginalnych prac tworczych (II.D.1 – II.D.7, II.D.9, II.D.11, II.D.15, II.D.16, II.D.17, II.D.19) oraz byly przedstawiane na szeregu konferencjach naukowych krajowych i miedzynarodowych. Kolejnym kierunkiem badan, ktory realizowalem w badaniach zespolowych w poczatkowych latach mojej pracy naukowej bylo zastosowanie pomiaru predkosci propagacji fali akustycznej do wyznaczania wlasciwosci sprzystosci materialow sypkich pochodzenia roslinnego. Do badan tych uzywalem aparatu trojosowego sciskania z mozliwoscia generowania i obioru poprzecznych fal akustycznych dzeki umieszczonych w podstawie i pokrywie gornej piezoelementom. Aparat ten zostal przystosowany do pomiaru wlasciwosci materialow sypkich pochodzenia roslinnego, a oryginalnie stosowany w badaniach stabilnosci gruntow. Modul sprzystosci wyznaczalem w zakresie cisnienia hydrostatycznego od 10 do 90 kPa dla roznych wilgotnosci. Wyniki przeprowadzonych doswiadczen zawarte sa nastepujacych pracach: II.A.1, II.D.8, II.D.10, II.D.14, II.D.20, II.D.23 i prezentowane byly na kilku konferencjach naukowych.

Przewod doktorski otworzylem 8 marca 2002 roku. Z wynikiem pozytywnym zdałem egzaminy z fizyki z elementami agrofizyki, uprawy roli i roslin z elementami nasionoznawstwa oraz jezyka angielskiego, wyznaczone przez Rade Naukowa IA PAN.

Na dokończenie badan do rozprawy doktorskiej otrzymalem finansowanie z Komitetu Badan Naukowych w latach 2004-2005. W grantie promotorskim 2 P06T 107 26 pod tytułem „Zastosowanie metody pomiaru predkosci poprzecznych fal akustycznych do wyznaczania parametrów sprzystosci sypkich surowcow spozywczych” byłem glównym wykonawca. Podstawowym celem badan podjetych w celu przygotowania rozprawy doktorskiej bylo uzupelnienie wiedzy o wplywie zmiennych czynnikow technologicznych na charakterystyki mechaniczne i parametry materialowe sypkich materialow roslinnych. Zdecydowalem sie badac cztery aspekty mechaniki roslinnych materialow sypkich, spozród budzacych, wedle rozpoznania literatury, najwyzsze zainteresowanie. Po pierwsze, zdecydowalem sie zastosowac adaptowany z geotechniki model Sawickiego do opisu deformacji ziarna zbóz i nasion rzepaku w tescie jednoosiowego sciskania oraz do wyznaczenia parametrów sprzystosci materialu. Po drugie, do wyznaczenia parametrów sprzystosci ziarna zbóz i nasion rzepaku zdecydowano zastosowac intensywnie aktualnie rozwijana metode akustyczna oraz ocenic uzytecznosc dwu metod i stopien zgodnosci ich wynikow. Trzeci etap programu obejmowal badanie wplywu struktury upakowania na wytrzymałosc zloza ziarna zbóz, nasion rzepaku i soczewicy. Ostatni, czwarty etap obejmowal badania wplywu wybranych czynnikow na sypkosc proszkow – przetworow pszenicy. Znaczenie badan tego

parametru ogromnie wzrosło w ostatnich kilku latach, kiedy zyskał on wymiar podstawowego miernika jakości produktów sypkich rynku detalicznego. Realizacja postawionych celów wymagała wyznaczenia i analizy charakterystyk mechanicznych. Metodą jednoosiowego ściskania wyznaczono charakterystyki naprężenie-odkształcenie  $\varepsilon(\sigma_z)$  w zależności od wilgotności i rodzaju materiału. Metodą akustyczną w aparacie trójosiowego ściskania badano wpływ ciśnienia hydrostatycznego, wilgotności i rodzaju materiału na prędkość poprzecznych fal akustycznych  $V_s(p_h)$ . Metodą bezpośredniego ścinania analizowano wpływ struktury wewnętrznej złoża, kształtu pojedynczych nasion oraz składu granulometrycznego na charakterystyki naprężenie styczne-odkształcenie  $\tau(s)$ . Przyjęto, że badania obejmą moduł sprężystości  $E$  i stałą Poissona  $\nu$ , wyznaczone na podstawie charakterystyki  $\varepsilon(\sigma_z)$ , moduł sprężystości  $E$ , wyznaczany na podstawie charakterystyki  $V_s(p_h)$ , parametry tarcia wewnętrznego oraz sypkości, wyznaczone na podstawie charakterystyki  $\tau(s)$ .

Moja praca doktorska pt. „Charakterystyki mechaniczne wybranych materiałów sypkich pochodzenia roślinnego” otrzymała pozytywne recenzje prof. dr hab. Krzysztofa Gołackiego oraz prof. dr hab. Jerzego Tysa. Publiczna obrona pracy doktorskiej odbyła się 27 czerwca 2005 roku w Instytucie Agrofizyki przed Komisją powołaną przez Radę Naukową IA PAN.

W dniu 14 października 2005 roku nastąpiło zatwierdzenie przez Radą Naukową IA PAN stopnia doktora nauk rolniczych w zakresie agronomii-agrofizyki. Rada Naukowa zatwierdziła wniosek o wyróżnienie mojej rozprawy doktorskiej nagrodą dyrektora Instytutu Agrofizyki PAN.

Wyniki badań zawartych w doktoracie stanowiły podstawę do napisania następujących oryginalnych prac twórczych: II.A.1, II.D.14, II.D.19, II.D.23.

Po obronie pracy doktorskiej oraz zatrudnieniu na stanowisku adiunkta zająłem się problemem parametrów mechanicznych proszków spożywczych i skrobi oraz proszków przemysłowych i farmaceutycznych. Swoje zainteresowanie naukowe skierowałem zarówno w stronę metodyki wyznaczania parametrów sypkości, jak i problemów wynikających z niejednorodności i zmiennych cech fizycznych badanych materiałów i ich wpływu na właściwości mechaniczne. W swoich badaniach analizuję szeroko efekty wpływu naporu, rodzaju materiału, rozkładu granulometrycznego, zawartości drobnej frakcji, czasu konsolidacji, sztywności aparatury pomiarowej na przebiegi eksperymentalne bezpośredniego ścinania, funkcji płynięcia oraz parametry sypkości materiałów. W ramach współpracy z zespołem dr hab. inż. Ireneusza Opalińskiego z Politechniki Rzeszowskiej brałem udział w

badaniach oddziaływań adhezyjnych w sypkich materiałach roślinnych. Wyniki badań sypkości, plastycznego płynięcia oraz adhezji w materiałach sypkich zawarte są następujących pozycjach literaturowych: II.A.2, II.A.5, II.A.6, II.A.9, II.D.18, II.D.21, II.D.22 II.D.25, II.D.26, II.D.27. Wyniki tych badań prezentowane były również podczas szeregu konferencji naukowych.

W 2007 roku nawiązałem współpracę z profesorem Jurgenem Tomaszem z Uniwersytetu Otto von Guericke'a w Magdeburgu. Jest on znanym i cenionym autorytetem w dziedzinie mechaniki proszków. W ramach tej współpracy przez 13 miesięcy pracowałem na Wydziale Inżynierii Procesowej Uniwersytetu w Magdeburgu na stanowisku naukowym. W trakcie mojego pobytu realizowałem projekt TO 156/18-2 Niemieckiej Fundacji Nauki pt. „Modelowanie kompaktacji proszków kohezyjnych w prasie walcowej”. W projekcie kierowałem zespołem badawczym. Celem projektu było wyznaczenie krytycznych parametrów proszków kohezyjnych do projektowania procesu kompaktacji tabletek w prasie walcowej. Eksperymenty obejmowały wyznaczenie właściwości trzech szeroko rozpowszechnionych materiałów proszkowych używanych w tego rodzaju technologii: celulozy mikrokrystalicznej, bentonitu oraz sproszkowanego wapienia. W ramach eksperymentów przeprowadziłem szereg testów mechanicznych, takich jak testy jednoosiowego ściskania w prasie hydraulicznej oraz testy wytrzymałości aglomeratów. Przeprowadziłem testy umożliwiające wyznaczenie stałych sprężystości proszków oraz odkształcenia sprężystego tabletek stanowiącego bardzo istotne zagadnienie w technologii kompaktacji. W dalszej części projektu modelowałem proces jednoosiowego ściskania oraz kompaktacji w prasie walcowej przy pomocy Metody Elementów Dyskretnych DEM. W trakcie eksperymentów laboratoryjnych oraz numerycznych analizowałem wpływ maksymalnego obciążenia i prędkości deformacji na przebieg zagęszczania. Moduł sprężystości wyznaczany był w zależności od prędkości deformacji i maksymalnego ciśnienia konsolidującego. Badałem także wpływ zmiennych parametrów kompaktacji tabletek na ich parametry wytrzymałościowe. Szczegółowy opis badań wykonanych w trakcie pobytu na Uniwersytecie w Magdeburgu zawarty jest w publikacjach II.A.3 i II.D.25 oraz raporcie z projektu dla Niemieckiej Fundacji Nauki z 2008 roku. Wyniki prac związanych z projektem naukowym realizowanym w Magdeburgu prezentowałem również w trakcie dwóch międzynarodowych konferencji naukowych.

Po powrocie ze stażu na Uniwersytecie Magdeburskim kontynuuję swoje zainteresowania naukowe związane z wyznaczaniem cech fizycznych proszków w zależności od czynników technologicznych zmiennych. W 2010 roku uzyskałem z Komitetu Badan

*John Su*

Naukowych finansowanie projektu pt. „Wpływ czynników technologicznych na parametry mechaniczne drobnoziarnistych proszków spożywczych”. Realizację projektu zakończyłem na początku 2013 roku. Jego celem było pogłębienie wiedzy o zachowaniu się proszków spożywczych w warunkach niskich naporów normalnych analogicznych do występujących w praktyce na liniach produkcyjnych. Zbadany został wpływ czynników technologicznych na parametry mechaniczne silnie rozdrobnionych proszków spożywczych. Główny cel projektu został osiągnięty dzięki analizie wpływu wilgotności, czasu konsolidacji, rozkładu granulometrycznego, kształtu pojedynczych ziaren, zawartości domieszek uszlachetniających (w przypadku mleka również tłuszczu) na parametry mechaniczne i wytrzymałościowe proszków. W materiałach proszkowych parametry fizyczne zmieniają się w bardzo szerokim zakresie nawet w przypadku tego samego proszku. Niewielka zmiana składu granulometrycznego lub obecność dodatkowego składnika może powodować zasadniczą zmianę zachowania mechanicznego. Parametry wyznaczone w szerokim zakresie zmiennych czynników technologicznych stanowią istotną informację dla projektantów urządzeń i operacji technologicznych z udziałem proszków. Dzięki badaniom w szerokim zakresie zmienności parametrów eksperymentalnych możliwa stała się identyfikacja powstawania bardzo niekorzystnego z punktu widzenia technologii efektu drgań ciernych w proszkach. Efekt ten, mimo badań w czołowych ośrodkach światowych, nie jest dotychczas w pełni zinterpretowany. Ponadto, w ramach projektu przeprowadzono numeryczne modelowanie zachowania mechanicznego proszków w testach bezpośredniego ścinania oraz jednoosiowego ściskania Metodą Elementów Dyskretnych (DEM). Przeprowadzone testy numeryczne pozwoliły na szczegółową analizę wybranych procesów na poziomie mikrostrukturalnym oraz pełniejszą interpretację zjawisk, co byłoby niemożliwe przy zastosowaniu innych metod badawczych. Istotnym elementem projektu było także opracowanie nowej metody uproszczonego wyznaczania sypkości, polegającej na pomiarze siły potrzebnej do złamania w płaszczyźnie poprzecznej wstępnie skonsolidowanej walcowej próbki.

Dzięki przeprowadzonej szerokiej analizie wpływu czynników technologicznych na parametry materiałowe możliwa jest identyfikacja ich wpływu na zachowanie proszków, a co za tym idzie na procesy technologiczne z ich udziałem. Na podstawie otrzymanych danych procesy mogą być projektowane ściślej i przebiegać w bardziej przewidywalny sposób. Istotnym elementem przedstawianego projektu badawczego jest aspekt praktyczny. Z punktu widzenia praktyki przemysłowej bardzo istotne stają się metody uproszczonego, mniej wszechstronnego, ale szybkiego wyznaczania sypkości. Dlatego też, w ramach grantu opracowałem nową metodę pomiaru sypkości proszków spożywczych z zastosowaniem



aparatu własnego projektu. Aparat ten przeznaczony jest do porównawczego wyznaczania stopnia sypkości materiału - przydatności materiału proszkowego do zastosowań w typowych technologiach przemysłowych, w których następuje przemieszczanie warstw materiału. Z uwagi na sposób przeprowadzenia pomiaru aparat, może służyć bezpośrednio do mierzenia kohezji w materiale, przeprowadzania badań porównawczych oraz kontroli jakości proszku bezpośrednio na linii produkcyjnej lub przed użyciem danego materiału. Weryfikacja standardowymi metodami mierzenia sypkości pozwoliła na określenie granicznych wartości siły złamania cylindrycznej próbki skonsolidowanego materiału, informujących o stopniu sypkości.

Szczegółowy opis wyników zawiera raport merytoryczny z grantu oraz publikacja II.A.6 i I.B.6. Wyniki projektu przedstawiane były w trakcie konferencji i kongresów tematycznych. Dzięki otrzymanemu finansowaniu projektu dotyczącego wpływu czynników technologicznych na właściwości mam możliwość kontynuowania swoich zainteresowań naukowych w kierunku proszków i metod ich charakteryzowania również w aspekcie tworzenia nowych metod pomiarowych.

Kolejnym aspektem pracy naukowej, którym zajmuje się po obronie doktoratu jest wyznaczanie parametrów mechanicznych złóż sypkiej biomasy. Jest to nowe i istotne zagadnienie naukowe. Cechy mechaniczne i charakterystyki tych materiałów nie są w pełni rozpoznane z uwagi na ogromną rozpiętość rodzajów, pochodzenia i stanu. Złóża sypkiej biomasy przetwarzane i transportowane są na ogromną skalę w procesach związanych z energią odnawialną. Zgodnie z obowiązującym prawem, przedsiębiorstwa energetyczne mają obowiązek zwiększać udział „zielonej energii” w ogólnej produkcji energii z 12% w 2013 r. do 20% w 2021 r. Jednocześnie, aktualne rozporządzenie Ministra Gospodarki nakłada obowiązek zmiany proporcji wykorzystywanej biomasy leśnej na rzecz biomasy pochodzenia rolniczego. Duże elektrownie potrzebować będą biomasy w ilościach idących w setki tysięcy ton. Dla zakładów tych oznacza to potrzebę rozwiązania istotnego problemu zapewnienia odpowiednio dużych zasobów biomasy, a w konsekwencji, ich odpowiedniego magazynowania. W ramach tego tematu brałem udział w szeregu badaniach naukowych umożliwiających ocenę przyczyn powstałych awarii w elektrowniach i elektrociepłowniach (II.M.1.-II.M.3 i II.M5.). Ponadto wyniki mojej pracy naukowej prezentowałem na konferencjach naukowych oraz w publikacji II.A.7.

Nowym aspektem pracy naukowej, który podjąłem jest modelowanie numeryczne zachowania proszków w teście bezpośredniego ścinania oraz jednoosiowego ściskania. Dodatkowo w ramach współpracy z Uniwersytetem Otto von Guericke'a w Magdeburgu

*Kobi Gh*

uczestniczę w badaniach zniszczeniowych aglomeratów wytworzonych z tlenku glinu. Badania te obejmują testy udarowe oraz badanie współczynnika restytucji. Do tej pory jestem współautorem dwóch publikacji, II.A.4 i II.A.8, będących wynikiem tych badań.

W ramach pracy naukowej uczestniczę w opracowywaniu wynalazków i wzorów przemysłowych. Są to z reguły urządzenia, stanowiska i oprzyrządowanie stanowisk pomiarowych służących do wyznaczania właściwości materiałów sypkich i ich reakcji na obciążenia mechaniczne. Do tej pory uzyskałem ochronę na **4** wynalazki (II.B.1-II.B.4). Jestem wiodącym twórcą **3** zgłoszonych patentów oraz jednego we współpracy. Kolejne **3** wynalazki zgłoszone zostały w UPRP. Ponadto, jestem wiodącym twórcą **4** wzorów przemysłowych oraz dwóch we współpracy zespołowej (II.C.1-II.C.6). Wszystkie wzory użytkowe oraz patenty powstały w ostatnim okresie mojej pracy naukowej.

W trakcie pracy naukowej aktywnie uczestniczę w organizacji konferencji krajowych i międzynarodowych. Byłem członkiem komitetów organizacyjnych czterech Zjazdów Naukowych Polskiego Towarzystwa Agrofizycznego oraz dwóch konferencji międzynarodowych organizowanych przez Instytut Agrofizyki PAN w Lublinie. Dotychczas wygłosiłem **22** referaty i przygotowałem **22** postery na międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych. W ramach wkładu w dydaktykę i popularyzację nauki jestem autorem prezentacji przygotowanych na pokazy w ramach corocznych Pikników Naukowych w Warszawie oraz Festiwali Nauki w Lublinie.

W ramach praktyk studenckich i doktoranckich prowadzę zajęcia w Laboratorium Mechaniki Materiałów Sypkich IA PAN w Lublinie. W latach 2005-2012 pełniłem opiekę naukową nad praktykantami, a w roku 2013 nad doktorantami Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie.

Od początku pracy w IA PAN jestem członkiem Polskiego Towarzystwa Agrofizycznego, w którym obecnie pełnię funkcje członka zarządu Oddziału Lubelskiego Polskiego Towarzystwa Agrofizycznego.

Jestem również ekspertem Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. W ramach tej działalności wykonałem **3** recenzje projektów z POIG oraz **5** recenzji z PBS. Ponadto, przy opracowywaniu recenzji artykułów współpracuję z sześcioma czasopismami z listy filadelfijskiej oraz jednym o zasięgu krajowym. Wykonałem **14** recenzji artykułów do czasopism z IF oraz **3** do periodyków o zasięgu krajowym.

Mój całkowity dorobek publikacyjny, wg punktacji MNiSW, wynosi **538** punktów w tym **97** stanowi podstawę wniosku habilitacyjnego. Sumaryczny Impact Factor dla

Hofer M

opublikowanych przeze mnie prac wynosi **18,599**, z czego **3,353** posiadają publikacje będące podstawą wniosku o uzyskanie stopnia doktora habilitowanego.

Do chwili obecnej jestem współautorem **82** prac. Na mój dorobek składa się **39** oryginalnych prac twórczych w tym **12** z IF. Pozostałe **43** stanowią pozycje w różnej formie oraz w materiałach konferencyjnych. Liczba cytowań moich prac według bazy Web of Science wynosi **24**, a indeks Hirscha **3**. Uczestniczyłem w realizacji **8** projektów finansowanych ze źródeł zewnętrznych, z czego w jednym w ramach konsorcjum (II.I.1-II.I.8).

Wykaz opublikowanych prac naukowych oraz informację o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki dołączam do dokumentów.

*Mariusz Sterel*

#### Zestawienie dorobku naukowego przed i po uzyskaniu stopnia doktora

Dorobek naukowy	Przed uzyskaniem stopnia doktora	Po uzyskaniu stopnia doktora	Całkowity dorobek
Oryginalne prace twórcze w czasopismach z IF stanowiące część osiągnięcia naukowego		3	3
Oryginalne prace twórcze w czasopismach z IF		12	12
Oryginalne prace twórcze bez IF stanowiące część osiągnięcia naukowego		3	3
Oryginalne prace twórcze bez IF	15	12	27
Udzielone patenty międzynarodowe i krajowe		4	4
Zgłoszenia patentowe		3	3
Wynalazki oraz wzory użytkowe		6	6
Projekty badawcze finansowane ze źródeł zewnętrznych	1	7	8
Referaty wygłoszone na konferencjach międzynarodowych i krajowych	5	17	22
Udział w konferencjach międzynarodowych i krajowych	20	24	44
Udział w komitetach organizacyjnych konferencji międzynarodowych i krajowych	5	1	6
Wykonane ekspertyzy		5	5
Recenzje publikacji z IF		14	14
Recenzje projektów NCBiR		5	5
<b>Łącznie</b>	<b>46</b>	<b>116</b>	<b>162</b>

*Mariusz Sterel*

*Mariusz Sterel*