



## **Autoreferat**

wynikający art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce  
(Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.)

**dr inż. Dominik Wilczyński**

Nazwa osiągnięcia naukowego:

**Badania i modelowanie parametrów procesów technologicznych na potrzeby uzyskania produktów o określonych właściwościach fizyko-mechanicznych w aspekcie konstruowania maszyn**

Poznań, 2024

## Spis treści:

<b>1. Dane osobowe</b>	4
<b>2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe, odbyte szkolenia</b>	5
2.1. Stopnie, tytuły naukowe i zawodowe	5
2.2. Odbyte szkolenia	6
<b>3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych</b>	7
<b>4. Wskazanie osiągnięcia naukowego</b>	7
4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego	7
4.2. Zestawienie prac naukowych stanowiących osiągnięcie naukowe	9
4.3. Cel naukowy, osiągnięte wyniki oraz ich potencjalne wykorzystanie	14
4.3.1. Badania i modelowanie parametrów procesu technologicznego zagęszczania (aglomeracji) biomasy	16
4.3.1.1. Badania i modelowanie parametrów procesu technologicznego zagęszczania trocin sosnowych	17
4.3.1.2. Badania i modelowanie parametrów procesu technologicznego zagęszczania trocin dębowych	36
4.3.2. Badania i modelowanie parametrów procesu technologicznego cięcia biomasy	43
4.3.3. Badania i modelowanie parametrów procesu technologicznego zgrzewania pasów	79
4.3.4. Badania i modelowanie parametrów procesu technologicznego mechanicznej perforacji kompozytowych pasów transportujących	99
4.3.5. Badania i modelowanie parametrów procesu technologicznego cięcia kompozytowych pasów transportujących	105
4.3.6. Badania i modelowanie parametrów procesu technologicznego nakładania kleju	111
4.4. Syntetyczne ujęcie wkładu w rozwój dyscypliny naukowej: inżynieria mechaniczna	118
<b>5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej</b>	121

<b>6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę</b>	122
6.1. Pełnienie funkcji promotora pomocniczego prac doktorskich oraz praca na rzecz rozwoju młodej kadry naukowej	122
6.2. Otrzymane nagrody	123
6.3. Osiągnięcia dydaktyczne i organizacyjne	124

## **1. Dane osobowe**

Dominik Wilczyński

e-mail: dominik.wilczynski@put.poznan.pl

### **Aktualne miejsce zatrudnienia oraz stanowisko:**

Politechnika Poznańska

Wydział Inżynierii Mechanicznej

Instytut Konstrukcji Maszyn

ul. Piotrowo 3, 61-138 Poznań

Stanowisko: adiunkt w grupie pracowników badawczo-dydaktycznych

### **Obszary zainteresowań:**

- opracowywanie konstrukcji realizujących określony proces technologiczny lub jego etap,
- badania cech konstrukcyjnych elementów i zespołów maszyn w aspekcie ich eksploatacji,
- badania symulacyjne elementów i zespołów maszyn,
- badania właściwości fizyko-mechanicznych materiałów, w tym biomateriałów przeznaczonych do cięcia i późniejszego zagęszczenia celem uzyskania biopaliwa,
- badania procesu cięcia materiałów w aspekcie projektowania maszyn i urządzeń oraz określenia jego energochłonności,
- badania procesu zagęszczania biomateriałów celem określenia parametrów tego procesu na potrzeby uzyskania paliwa o określonych właściwościach fizyko-mechanicznych, również w aspekcie określenia wytycznych do procesu konstruowania urządzeń zagęszczających,
- badania procesu zagęszczania materiałów biomasy w aspekcie określenia jego energochłonności.

## **2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe, odbyte szkolenia**

### **2.1. Stopnie, tytuły naukowe i zawodowe**

#### **2005 – magister inżynier**

Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, kierunek: Mechanika i Budowa Maszyn, specjalność: Mechatronika.

Tytuł pracy: Analiza porównawcza chropowatości materiałów obrabianych taśmami mikrościernymi oraz badania doświadczalne dogładzania

Promotor: dr inż. Andrzej Auguściński

#### **2010 – doktor nauk technicznych**

Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, studia doktoranckie.

Tytuł rozprawy doktorskiej: Badanie cech konstrukcyjnych napędu pneumatycznego manipulatora równoległego typu tripod.

Promotor: prof. dr hab. inż. Marian Dudziak

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Janusz Mielniczuk – Politechnika Poznańska,  
prof. dr hab. inż. Waldemar Oleksiuk – Politechnika Warszawska.

Rozprawa doktorska tematycznie dotyczyła analizy konstrukcyjnej zastosowania napędu pneumatycznego w postaci siłowników tłokowych dwustronnego działania z jednostronnym tłoczyskiem w strukturze kinematycznej manipulatora równoległego typu tripod 3-SPS, gdzie pary kinematyczne postępowe aktywne stanowiły ww. wymienione siłowniki pneumatyczne. Wykonano badania pojedynczego siłownika pneumatycznego polegające na pomiarze zmian ciśnienia w komorach siłownika oraz pomiarze przemieszczenia tłoka podczas jego wysuwu. Uzyskane wyniki wykorzystano w budowie modelu matematycznego siłownika, na który składały się modele zmian ciśnienia w komorach roboczych siłownika oraz model ruchu tłoka. W kolejnym etapie dokonano analizy kinematycznej ruchu manipulatora, analitycznie i symulacyjnie w programie SolidWorks. Celem weryfikacji zaprojektowano i zbudowano prototyp manipulatora wraz z układem sterowania napędami zaimplementowanym w programie LabVIEW. Zbudowane stanowisko wykorzystano do przeprowadzenia badań eksperymentalnych dokładności pozycjonowania tłokowych siłowników pneumatycznych z jednostronnym tłoczyskiem sterowanych zaworami proporcjonalnymi, w warunkach zmiennego obciążenia punktu roboczego manipulatora. Na tej podstawie dokonano oceny możliwości zastosowania tego rodzaju napędu pneumatycznego w strukturze kinematycznej manipulatora równoległego.

Kopię dyplomu nadania stopnia doktora nauk technicznych umieszczono w załączniku 3.

## 2.2. Odbyte szkolenia

Kopie certyfikatów i zaświadczeń, oraz potwierdzeń ukończenia wymienionych szkoleń umieszczono w załączniku 3.

**2005** – Kurs pedagogiczny w Politechnice Poznańskiej – załącznik 3

**2009** – Szkolenie w zakresie.: *Systemy Common Rail – parametry systemów i ich diagnostyka*, podmiot szkolący: Centrum Szkolenia Motoryzacji „Autoelektronika Kędzia” – załącznik 3

**2010** – Szkolenie w zakresie: *Elektroniczne sterowanie wtryskiem paliwa w silnikach Diesla*, podmiot szkolący: Centrum Szkolenia Motoryzacji „Autoelektronika Kędzia” – załącznik 3

**2011** – Szkolenie w zakresie: *Programowanie w Sinumerik i Heidenhain*, szkolenie organizowane przez firmę FESTO na terenie Politechniki Poznańskiej

**2011** – Szkolenie w zakresie: *Ansys Podstawy MES*, podmiot szkolący: firma MESco Sp. z o.o., szkolenie odbyło się na terenie Politechniki Poznańskiej – załącznik 3

**2012** – Szkolenie w zakresie.: *Writing User Subroutines with Abaqus* z zakresu użytkowania oprogramowania ABAQUS, podmiot szkolący: firma BudSoft, Poznań – załącznik 3

**2012** – Szkolenie w zakresie.: *Introduction to Python and Scripting in Abaqus* z zakresu użytkowania oprogramowania ABAQUS, podmiot szkolący: firma BudSoft, Poznań – załącznik 3

**2020** – Szkolenie w zakresie: *Wymagania EASA Part 66 zgodnie z rozporządzeniem Komisji (UE) nr 1321/2014 z dnia 26 listopada 2014 roku*, na potrzeby prowadzenia zajęć na kierunku Lotnictwo, podmiot szkolący: MTO Politechnika Rzeszowska / Ośrodek Kształcenia Lotniczego, prowadzący mgr inż. Maciej Domiszewski, szkolenie odbyło się na Politechnice Poznańskiej – załącznik 3

**2020** – Szkolenie w zakresie: *Wymagania EASA Part 147 zgodnie z rozporządzeniem Komisji (UE) nr 1321/2014 z dnia 26 listopada 2014 roku*, na potrzeby prowadzenia zajęć na kierunku Lotnictwo, podmiot szkolący: MTO Politechnika Rzeszowska / Ośrodek Kształcenia Lotniczego, prowadzący mgr inż. Maciej Domiszewski, szkolenie odbyło się na Politechnice Poznańskiej – załącznik 3

**2020** – Szkolenie w zakresie: *Czynniki ludzkie zgodnie z rozporządzeniem Komisji (UE) nr 1321/2014 z dnia 26 listopada 2014 roku*, na potrzeby prowadzenia zajęć na kierunku Lotnictwo, podmiot szkolący: MTO Politechnika Rzeszowska / Ośrodek Kształcenia Lotniczego, prowadzący mgr inż. Maciej Domiszewski, szkolenie odbyło się na Politechnice Poznańskiej – załącznik 3

**2022** – Szkolenie w zakresie: *CATIA V5 Automotive Engineer*, podmiot szkolący: IBS Poland Sp. z o.o. jako Certyfikowany Partner Edukacyjny oraz Autoryzowany Ośrodek Certyfikacyjny Dassault Systemes, szkolenie odbyło się na Politechnice Poznańskiej – załącznik 3

**2022** – Szkolenie w zakresie: *Wymagania EASA Part 66 zgodnie z rozporządzeniem Komisji (UE) nr 1321/2014 z dnia 26 listopada 2014 roku*, na potrzeby prowadzenia zajęć na kierunku Lotnictwo, podmiot szkolący: Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, prowadzący dr inż. Łukasz Semkło, szkolenie odbyło się na Politechnice Poznańskiej – załącznik 3

**2022** – Szkolenie w zakresie: *Wymagania EASA Part 147 zgodnie z rozporządzeniem Komisji (UE) nr 1321/2014 z dnia 26 listopada 2014 roku*, na potrzeby prowadzenia zajęć na kierunku Lotnictwo, podmiot szkolący: Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, prowadzący dr inż. Łukasz Semkło, szkolenie odbyło się na Politechnice Poznańskiej – załącznik 3

**2022** – Szkolenie w zakresie: *Czynniki ludzkie zgodnie z rozporządzeniem Komisji (UE) nr 1321/2014 z dnia 26 listopada 2014 roku*, na potrzeby prowadzenia zajęć na kierunku Lotnictwo, podmiot szkolący: Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, prowadzący dr inż. Wojciech Prokopowicz, szkolenie odbyło się na Politechnice Poznańskiej – załącznik 3

**2023** – Szkolenie w zakresie: *Wsparcie w kryzysie zdrowia psychicznego – szkolenie podstawowe*, szkolenie zostało zrealizowane w ramach projektu "Politechnika Poznańska uczelnią otwartą dla wszystkich", szkolenie odbyło się na Politechnice Poznańskiej

**2023** – Szkolenie w zakresie: *Jak mądrze wybrać czasopismo*, podmiot szkolący: firma Elsevier – Paulina Milewska Customer Consultant Elsevier – załącznik 3

**2023** – Szkolenie w zakresie: *Jak rozpocząć przygodę z narzędziem SciVal?*, podmiot szkolący: firma Elsevier – Bartłomiej Więckowski Research Intelligence Consultant Elsevier – załącznik 3

**2023** – Szkolenie w zakresie: *Advanced methods in Adams*, podmiot szkolący: Authorized Training Center for MSC Adams STU Bratislava – Ing. Jozef Bucha, PhD. instructor and doc. Ing. František Palčák, PhD. Head of ATC – załącznik 3

### **3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych**

2009 – 2010 – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, asystent,

2010 – obecnie – Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu/Wydział Inżynierii Transportu/Wydział Inżynierii Mechanicznej, Instytut Konstrukcji Maszyn, adiunkt.

### **4. Wskazanie osiągnięcia naukowego**

#### **4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego**

Tytułem osiągnięcia naukowego wynikającego z art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.) jest:

**Badania i modelowanie parametrów procesów technologicznych na potrzeby uzyskania produktów o określonych właściwościach fizyko-mechanicznych w aspekcie konstruowania maszyn**

Na osiągnięcie naukowe składa się cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b w tym: publikacje w recenzowanych i indeksowanych

czasopismach naukowych, publikacje w recenzowanych i indeksowanych materiałach konferencyjnych oraz będące uzupełnieniem osiągnięcia patenty i zgłoszenia patentowe.

Do osiągnięć naukowych, które habilitant wskazuje jako wkład w dyscyplinę Inżynieria Mechaniczna zalicza się:

- opracowanie metodyki badań procesu zagęszczania biomasy w postaci trocin, celem zagospodarowania tego odpadu poprodukcyjnego w zakładach przemysłowych zajmujących się obróbką drewna mieszczących się w Wielkopolsce,
- opracowanie konstrukcji stanowisk badawczych (patent Pat.236458) umożliwiających wyznaczenie parametrów modelu Drucker-Prager-Cap (DPC) celem jego implementacji do symulacji badań numerycznych procesu zagęszczania biomasy sypkiej w postaci trocin,
- opracowanie metodyki badań umożliwiającej wyznaczenie parametrów modelu DPC celem jego implementacji w systemie Abaqus do symulacji procesu zagęszczania materiałów sypkich w postaci trocin,
- opracowanie na podstawie wyników badań eksperymentalnych modelu matematycznego kinematyki urządzenia zagęszczającego umożliwiającego dobór napędu proponowanego urządzenia,
- zbudowanie modeli matematycznych zależności pomiędzy parametrami (nastawami) wejściowymi a odpowiedziami (wynikami badań) realizacji procesu zagęszczania lub cięcia biomasy celem umożliwienia poszukiwań odpowiedzi procesu na zmianę parametrów, która nie była weryfikowana wprost w eksperymencie, co ma stanowić narzędzie w procesie projektowania tego rodzaju urządzeń realizujących ww. procesy. Modele również służą poszukiwaniu wartości parametrów wejściowych pod kątem osiągnięcia optymalnych odpowiedzi procesu w postaci sił roboczych, zużytej energii itd.,
- opracowanie metod korekcji wyników badań eksperymentalnych procesu cięcia biomasy umożliwiających zminimalizowanie negatywnego wpływu wynikającego z niejednorodności ciętego materiału,
- wyznaczenie parametrów eksploatacyjnych w procesie cięcia bębnowego i nożowego materiałów biomasy, umożliwiających poszukiwanie optymalnego doboru nastaw procesu cięcia w odniesieniu do przyjętych kryteriów optymalizacji,
- opracowanie oryginalnej konstrukcji (patenty) urządzenia do cięcia pasów transportujących wraz wykonaniem jego badań eksploatacyjnych (urządzenie wdrożone do przemysłu),
- opracowanie metodyki badań wraz ze stanowiskami badawczymi procesu zgrzewania pasów, celem poszukiwania wartości siły technologicznej procesu zgrzewania metodą gorącej płyty, w aspekcie budowy prototypu urządzenia zgrzewającego (patenty),



- opracowanie metodyki badań oraz stanowisk badawczych procesu klejenia łączenia pasów transportujących oraz budowa urządzenia nakładającego klej wdrożonego do przemysłu (karta wdrożenia),
- weryfikacja teorii umożliwiającej opracowanie modelu umożliwiającego ocenę efektywności narzędzia perforującego kompozytowe pasy transportowe na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych.

Potwierdzeniem wyżej wymienionych osiągnięć są prace naukowe wraz z korespondującymi patentami, które habilitant zgłasza w przedmiotowym wniosku jako osiągnięcie naukowe. Uszczegółowiony opis ww. osiągnięć został przedstawiony rozdziale 4.3.

## 4.2. Zestawienie prac naukowych stanowiących osiągnięcie naukowe

Zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b ustawy habilitant zgłasza cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych:

1. **Wilczyński Dominik**, Berdychowski Maciej, Talaśka Krzysztof, Wojtkowiak Dominik. *Experimental and Numerical Analysis of the Effect of Compaction Conditions on Briquette Properties*. Fuel – 2021, vol. 288, s. 119613-1-119613-19, IF = 8,035, punktacja MNiSW 140 pkt., publikacja indeksowana w bazie Scopus i WoS – udział własny 50%. Oświadczenie o wkładzie merytorycznym jest zawarte w załączniku 1.
2. **Wilczyński Dominik**, Berdychowski Maciej, Wojtkowiak Dominik, Górecki Jan, Wałęsa Krzysztof. *Experimental and Numerical Tests of the Compaction Process of Loose Material in the Form of Sawdust*. MATEC Web of Conferences – 2019, vol. 254, s. 02042-1-02042-12, punktacja MNiSW 5 pkt., publikacja indeksowana w bazie WoS – udział własny 60%. Oświadczenie o wkładzie merytorycznym jest zawarte w załączniku 1.
3. **Wilczyński Dominik**, Talaśka Krzysztof, Wojtkowiak Dominik, Krzysztof Wałęsa, Wojciechowski Szymon. *Selection of the Electric Drive for the Wood Waste Compacting Unit*. Energies – 2022, vol. 15, iss. 20, s. 7488-1-7488-20, IF = 3,2, punktacja MNiSW 140 pkt., publikacja indeksowana w bazie Scopus i WoS – udział własny 60%. Oświadczenie o wkładzie merytorycznym jest zawarte w załączniku 1.
4. Warguła Łukasz, **Wilczyński Dominik**, Wieczorek Bartosz, Palander Teijo, Gierz Łukasz, Nati Carla, Sydor Maciej. *Characterizing Sawdust Fractional Composition from Oak Parquet Woodworking for Briquette and Pellet Production*. Adv. Sci. Technol. Res. J. – 2023; 17(5):236–247, IF = 1,1, punktacja MNiSW 100 pkt., publikacja indeksowana w bazie Scopus i WoS – udział własny 20%. Oświadczenie o wkładzie merytorycznym jest zawarte w załączniku 1.
5. **Wilczyński Dominik**, Talaśka Krzysztof, Wojtkowiak Dominik, Górecki Jan, Wałęsa Krzysztof. *Research On Energy Consumption of the Biomass Cutting Process as a Process Preceding Biofuel Production*. Biosystems Engineering – 2024, vol. 237, s. 142-156. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.12.007>, IF = 5,1, punktacja

- MNiSW 100 pkt., publikacja indeksowana w bazie Scopus – udział własny 60%. Oświadczenie o wkładzie merytorycznym jest zawarte w załączniku 1.
6. **Wilczyński Dominik**, Wałęsa Krzysztof, Talaśka Krzysztof, Wojtkowiak Dominik. *Experimental Study on the Mechanical Behavior of Dry Corn Stalk Cutting*. Materials – 2023, 16, 3039. <https://doi.org/10.3390/ma16083039>, IF = 3,4, punktacja MNiSW 140 pkt., publikacja indeksowana w bazie Scopus i WoS – udział własny 60%. Oświadczenie o wkładzie merytorycznym jest zawarte w załączniku 1.
  7. **Wilczyński Dominik**, Wałęsa Krzysztof, Talaśka Krzysztof, Wojtkowiak Dominik, Bembenek Michał. *Experimental Study on the Cutting Process of Single Triticale Straws*. Materials – 2023, 16 (11), 3943. <https://doi.org/10.3390/ma16113943>, IF = 3,4, punktacja MNiSW 140 pkt., publikacja indeksowana w bazie Scopus i WoS – udział własny 50%. Oświadczenie o wkładzie merytorycznym jest zawarte w załączniku 1.
  8. **Wilczyński Dominik**, Wałęsa Krzysztof, Berdychowski Maciej, Kukła Mateusz. *Biomass Cutting Tests to Determine the Lowest Value of the Process Force*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – 2020, vol. 776, s. 012014-1-012014-6, punktacja MNiSW 5 pkt., publikacja indeksowana w bazie Scopus – udział własny 50%. Oświadczenie o wkładzie merytorycznym jest zawarte w załączniku 1.
  9. **Wilczyński Dominik**. *Multifactor Analysis of Experiment Parameters On the Example of the Biomass Cutting Process*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – 2020, vol. 776, s. 012013-1-012013-9, punktacja MNiSW 5 pkt., publikacja indeksowana w bazie Scopus – udział własny 100%. Oświadczenie o wkładzie merytorycznym jest zawarte w załączniku 1.
  10. Wałęsa Krzysztof, Talaśka Krzysztof, **Wilczyński Dominik**, Górecki Jan, Wojtkowiak Dominik. *Experimental Approach to Modeling of the Plasticizing Operation in the Hot Plate Welding Process*. Archives of Civil and Mechanical Engineering – 2022, vol. 22, iss. 1, s. 16-1-16-25, IF = 4,4, punktacja MNiSW 140 pkt., publikacja indeksowana w bazie Scopus i WoS – udział własny 10%. Oświadczenie o wkładzie merytorycznym jest zawarte w załączniku 1.
  11. Wałęsa Krzysztof, Talaśka Krzysztof, **Wilczyński Dominik**. *Designing of the Electromechanical Drive for Automated Hot Plate Welder Using Load Optimization with Genetic Algorithm*. Materials – 2022, vol. 15, iss. 5, s. 1787-1-1787-37, IF = 3,4, punktacja MNiSW 140 pkt., publikacja indeksowana w bazie Scopus i WoS – udział własny 30%. Oświadczenie o wkładzie merytorycznym jest zawarte w załączniku 1.
  12. Wałęsa Krzysztof, Malujda Ireneusz, **Wilczyński Dominik**. *Shaping the Parameters of Cylindrical Belt Surface in the Joint Area*. Acta Mechanica et Automatica – 2019, vol. 13, no. 4, s. 255-261, punktacja MNiSW 40 pkt., publikacja indeksowana w bazie Scopus – udział własny 20%. Oświadczenie o wkładzie merytorycznym jest zawarte w załączniku 1.
  13. Wojtkowiak Dominik, Talaśka Krzysztof, **Wilczyński Dominik**. *Evaluation of the Belt Punching Process Efficiency Based on the Resistance Force of the Compressed Material*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology – 2020, vol. 110, s. 717-727, IF = 3,226, punktacja MNiSW 100 pkt., publikacja indeksowana w bazie Scopus i WoS – udział własny 10%. Oświadczenie o wkładzie merytorycznym jest zawarte w załączniku 1.

14. **Wilczyński Dominik**, Malujda Ireneusz, Górecki Jan, Domek Grzegorz. *Experimental Research On the Process of Cutting Transport Belts*. MATEC Web of Conferences – 2019, vol. 254, s. 05014-1-05014-8, punktacja MNiSW 5 pkt., publikacja indeksowana w bazie WoS – udział własny 70%. Oświadczenie o wkładzie merytorycznym jest zawarte w załączniku 1.
15. Biszczyński Aleksandra, Talaśka Krzysztof, **Wilczyński Dominik**. *Analysis of the Adhesive Spread and the Thickness of the Adhesive Bonded Joint Depending on the Compressive Force Applied to Bonded Materials With Different Surface Structure*. International Journal of Adhesion and Adhesives – 2022, vol. 114, no. 103081, s. 1-32, IF = 3,4, punktacja MNiSW 100 pkt., publikacja indeksowana w bazie Scopus i WoS – udział własny 15%. Oświadczenie o wkładzie merytorycznym jest zawarte w załączniku 1.

Dopełnieniem przedstawionego powyżej cyklu artykułów są patenty i zgłoszenia patentowe związane z tematyką naukową poruszaną w wybranych ww. pozycjach:

1. *Moduł dozowania urządzenia do zautomatyzowanego zgrzewania doczołowego pasów ciągnowych*, Krzysztof Wałęsa, Jan Górecki, **Dominik Wilczyński**, Krzysztof Talaśka, Pat.243772, data zgłoszenia 15.06.2020, data publikacji WUP 09.10.2023, nr wg PP 2214, punktacja MNiSW 75 pkt., mój udział wynosi 15%. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia, oświadczenie o udziale procentowym – załącznik 1.
2. *Moduł łączenia pasów ciągnowych jako element urządzenia do zautomatyzowanego zgrzewania doczołowego pasów ciągnowych*, Krzysztof Wałęsa, Jan Górecki, **Dominik Wilczyński**, Krzysztof Talaśka, Pat.243770, data zgłoszenia 15.06.2020, data publikacji WUP 09.10.2023, nr wg PP 2212, punktacja MNiSW 75 pkt., mój udział wynosi 15%. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia, oświadczenie o udziale procentowym – załącznik 1.
3. *Urządzenie do zautomatyzowanego zgrzewania doczołowego pasów ciągnowych*, Krzysztof Wałęsa, Jan Górecki, **Dominik Wilczyński**, Krzysztof Talaśka, zgłoszenie patentowe nr Pat.243771, data zgłoszenia 15.06.2020, data publikacji WUP 09.10.2023, nr wg PP 2213, punktacja MNiSW 75 pkt., mój udział wynosi 15%. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia, oświadczenie o udziale procentowym – załącznik 1.
4. *Zespół prowadzenia i odbioru pasa, zautomatyzowanego urządzenia do zgrzewania doczołowego pasów ciągnowych*, Krzysztof Wałęsa, Jan Górecki, Dominik Wojtkowiak, **Dominik Wilczyński**, Krzysztof Talaśka, Pat.242542, data zgłoszenia 23.12.2020, data publikacji WUP 13.03.2023, nr wg PP 2245, punktacja MNiSW 75 pkt., mój udział wynosi 10%. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia, oświadczenie o udziale procentowym – załącznik 1.

5. *Głowica perforująca z dwiema krawędziami tnącymi z ruchomym stemplem do urządzenia do perforacji pasów transportujących*, Dominik Wojtkowiak, Krzysztof Talaśka, **Dominik Wilczyński**, Jan Górecki, Ireneusz Malujda, Grzegorz Domek, Pat.240069, data zgłoszenia 22.11.2019, data publikacji WUP 14.02.2022, nr wg PP 2156, punktacja MNiSW 75 pkt., mój udział wynosi 15%. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia, oświadczenie o udziale procentowym – załącznik 1.
6. *Głowica perforująca z jedną krawędzią tnącą do urządzenia do perforacji pasów transportujących*, Dominik Wojtkowiak, Krzysztof Talaśka, **Dominik Wilczyński**, Jan Górecki, Ireneusz Malujda, Grzegorz Domek, Pat.240068, data zgłoszenia 22.11.2019, data publikacji WUP 14.02.2022, nr wg PP 2155, punktacja MNiSW 75 pkt., mój udział wynosi 15%. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia, oświadczenie o udziale procentowym – załącznik 1.
7. *System mechanicznej perforacji pasów do transportu podciśnieniowego i sterowania optycznego*, Krzysztof Talaśka, Dominik Wojtkowiak, **Dominik Wilczyński**, Jan Górecki, Ireneusz Malujda, Grzegorz Domek, Pat.240074, data zgłoszenia 22.11.2019, data publikacji WUP 14.02.2022, nr wg PP 2175, punktacja MNiSW 75 pkt., mój udział wynosi 20%. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia oraz na udziale w jego budowie i uruchomieniu podczas wdrażania w zakładzie przemysłowym. Karta wdrożenia – załącznik 2, oświadczenie o udziale procentowym – załącznik 1.
8. *Urządzenie do perforacji pasów transportujących*, Dominik Wojtkowiak, Krzysztof Talaśka, **Dominik Wilczyński**, Jan Górecki, Ireneusz Malujda, Grzegorz Domek, Pat.240073, data zgłoszenia 22.11.2019, data publikacji WUP 14.02.2022 nr wg PP 2174, punktacja MNiSW 75 pkt., mój udział wynosi 15%. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia oraz na udziale podczas wdrażania w zakładzie przemysłowym. Urządzenie jest składowym systemu mechanicznej perforacji pasów napędowych, pkt. 7, oświadczenie o udziale procentowym – załącznik 1.
9. *Przyrząd do usuwania wypływkę po zgrzewaniu doczołowym polimerowych pasów ciągnowych*, Krzysztof Wałęsa, **Dominik Wilczyński**, Krzysztof Talaśka, Jan Górecki, Pat.240688, data zgłoszenia 6.08.2019, data publikacji WUP 23.05.2022, nr wg PP 2143, punktacja MNiSW 75 pkt., mój udział wynosi 25%. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia, oświadczenie o udziale procentowym – załącznik 1.
10. *Przyrząd do usuwania wypływkę po zgrzewaniu doczołowym polimerowych pasów ciągnowych*, Krzysztof Wałęsa, **Dominik Wilczyński**, Krzysztof Talaśka, Ireneusz Malujda, Aleksandra Fierek, Pat.240689, data zgłoszenia 6.08.2019, data publikacji WUP 23.05.2022, nr wg PP 2144, punktacja MNiSW 75 pkt., mój udział wynosi 20%. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym

w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia, oświadczenie o udziale procentowym – załącznik 1.

11. *Głowica perforująca z dwiema krawędziami tnącymi z ruchomą płytą*, Dominik Wojtkowiak, Krzysztof Talaśka, **Dominik Wilczyński**, Jan Górecki, Ireneusz Malujda, Grzegorz Domek, Pat.240072, data zgłoszenia 22.11.2019, data publikacji WUP 14.02.2022, nr wg PP 2173, punktacja MNiSW 75 pkt., mój udział wynosi 15%. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia oświadczenie o udziale procentowym – załącznik 1.
12. *Urządzenie do pomiaru przemieszczenia liniowego pasa transportującego*, Krzysztof Talaśka, Dominik Wojtkowiak, **Dominik Wilczyński**, Jan Górecki, Grzegorz Domek, Ireneusz Malujda, Pat.241364, data zgłoszenia 22.11.2019, data publikacji WUP 19.09.2022, nr wg PP 2152, punktacja MNiSW 75 pkt., mój udział wynosi 20%. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia, na przygotowaniu treści zgłoszenia patentowego oraz na udziale w procesie wdrażania w zakładzie przemysłowym. Urządzenie jest składowym systemu mechanicznej perforacji pasów napędowych, pkt 7, oświadczenie o udziale procentowym – załącznik 1.
13. *Urządzenie dozująco-ustalające pas transportujący w procesie jego produkcji*, Jan Górecki, Krzysztof Talaśka, **Dominik Wilczyński**, Dominik Wojtkowiak, Ireneusz Malujda, Grzegorz Domek, Pat.240070, data zgłoszenia 22.11.2019, data publikacji WUP 14.02.2022, nr wg PP 2157, punktacja MNiSW 75 pkt., mój udział wynosi 15%. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia, na przygotowaniu treści zgłoszenia patentowego oraz na udziale w procesie wdrażania w zakładzie przemysłowym. Urządzenie jest składowym systemu mechanicznej perforacji pasów napędowych, pkt. 7, oświadczenie o udziale procentowym – załącznik 1.
14. *Urządzenie buforująco-napinające pas transportujący w procesie jego produkcji*, Jan Górecki, Krzysztof Talaśka, **Dominik Wilczyński**, Dominik Wojtkowiak, Ireneusz Malujda, Grzegorz Domek, Pat. 240071, data zgłoszenia 22.11.2019, data publikacji WUP 14.02.2022, nr wg PP 2158, punktacja MNiSW 75 pkt., mój udział wynosi 15%. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia, na przygotowaniu treści zgłoszenia patentowego oraz na udziale w procesie wdrażania w zakładzie przemysłowym. Urządzenie jest składowym systemu mechanicznej perforacji pasów napędowych, pkt. 7, oświadczenie o udziale procentowym – załącznik 1.
15. *Przyrząd do usuwania wypłytki po zgrzewaniu doczołowym polimerowych pasów ciągnowych*, Krzysztof Wałęsa, **Dominik Wilczyński**, Krzysztof Talaśka, Dominik Wojtkowiak, Pat.240749, data zgłoszenia 6.08.2019, data publikacji WUP 30.05.2022, nr wg PP 2142, punktacja MNiSW 75 pkt., mój udział wynosi 25%. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia, oświadczenie o udziale procentowym – załącznik 1.

16. *Urządzenie do badania nacisków bocznych*, Ireneusz Malujda, Krzysztof Talaśka, **Dominik Wilczyński**, Dominik Wojtkowiak, Jan Górecki, patent nr Pat.236458, data zgłoszenia 26.03.2018, data publikacji WUP 25.01.2021, nr wg PP 2036, punktacja MNiSW 75 pkt., mój udział wynosi 20%. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia, na opracowaniu zgłoszenia patentowego oraz wdrożeniu w badaniach naukowych procesu zagęszczania trocin przedstawionych w artykule naukowym opublikowanym w czasopiśmie *Fuel* wymienionym w wykazie dorobku osiągnięcia naukowego, oświadczenie o udziale procentowym – załącznik 1.
17. *Głowica perforująca pasy napędowe i przenośnikowe*, Krzysztof Wałęsa, Krzysztof Talaśka, Ireneusz Malujda, Dominik Wilczyński, Pat.229837, data zgłoszenia 23.05.2016, data publikacji WUP 31.08.2018, nr wg PP 1858, punktacja MNiSW 75 pkt., mój udział wynosi 10%. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia, oświadczenie o udziale procentowym – załącznik 1.
18. *Urządzenie do cięcia poprzecznego pasów transportujących z jednym nożem*, **Dominik Wilczyński**, Krzysztof Talaśka, Jan Górecki, Dominik Wojtkowiak, Ireneusz Malujda, Grzegorz Domek, zgłoszenie patentowe nr P.432839, data zgłoszenia 5.02.2020, nr wg PP 2154, mój udział wynosi 30%. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia, na przygotowaniu treści zgłoszenia patentowego oraz na udziale w procesie wdrażania w zakładzie przemysłowym. Urządzenie jest składowym systemu mechanicznej perforacji pasów napędowych, pkt. 7, oświadczenie o udziale procentowym – załącznik 1.
19. *Urządzenie do cięcia poprzecznego pasów transportujących z dwoma nożami*, **Dominik Wilczyński**, Krzysztof Talaśka, Jan Górecki, Dominik Wojtkowiak, Ireneusz Malujda, Grzegorz Domek, zgłoszenie patentowe nr P.432838, data zgłoszenia 5.02.2020, nr wg PP 2153, mój udział wynosi 30%. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia, na przygotowaniu treści zgłoszenia patentowego oraz na udziale w procesie wdrażania w zakładzie przemysłowym. Urządzenie jest składowym systemu mechanicznej perforacji pasów napędowych, pkt. 7, oświadczenie o udziale procentowym – załącznik 1.

Prezentowane osiągnięcie naukowe jest uzupełnione dodatkowymi 30 publikacjami naukowymi związanymi z tematyką prezentowanego osiągnięcia naukowego oraz 23 publikacjami dotyczącymi innych tematów i 8 patentami, których treści dotyczą rozwiązań konstrukcyjnych niezwiązanych tematycznie z prezentowanym osiągnięciem naukowym. Zostały one przedstawione w dokumencie stanowiącym „Wykaz osiągnięć naukowych lub artystycznych”.

### **4.3. Cel naukowy, osiągnięte wyniki oraz potencjalne ich wykorzystanie**

Głównym celem naukowym prezentowanego osiągnięcia naukowego są badania i modelowanie parametrów procesów technologicznych na potrzeby kształtowania cech konstrukcyjnych produktów w procesie konstruowania maszyn i urządzeń.

Przez badania i modelowanie parametrów procesów technologicznych rozumie się poszukiwanie takich parametrów wejściowych (nastawczych) tych procesów aby na skutek ich przeprowadzenia uzyskać produkt lub inaczej zamierzony wyrób o określonych właściwościach fizyko-mechanicznych, przy zachowaniu jak najniższej energochłonności procesu i możliwie wysokiej trwałości narzędzia roboczego.

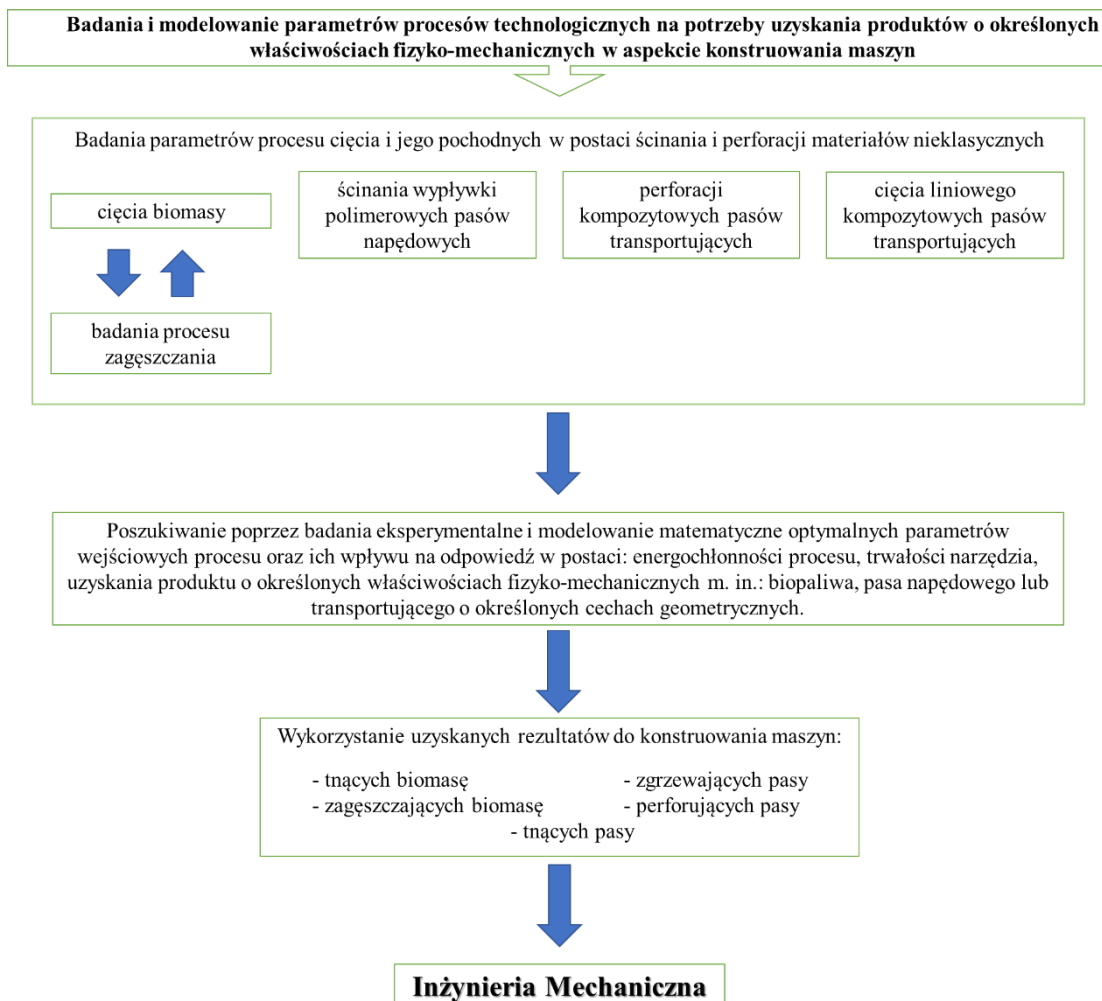
Charakteryzowane osiągnięcie naukowe wiąże w sobie wiedzę z zakresu budowy maszyn, materiałoznawstwa, procesów ciśnieniowo-kształtowego zagęszczania materiałów sypkich oraz rozdrobnionych, procesów cięcia materiałów biomasy na potrzeby ich późniejszej aglomeracji, procesów mechanicznej perforacji materiałów kompozytowych, procesów zgrzewania pasów oraz procesów nakładania warstwy kleju co sumarycznie, zdaniem autora, wnosi znaczący wkład w dyscyplinę Inżynieria Mechaniczna.

Na rysunku 1a zaprezentowano schemat przedstawiający obszary tematyczne stanowiące osiągnięcie naukowe, a na rysunku 1b wzajemne ich powiązanie.

a)



b)



Rys. 1. Schemat przedstawiający: 1a) obszary tematyczne składające się na osiągnięcie naukowe, 1b) wzajemne powiązanie przedstawionych obszarów tematycznych składających się na osiągnięcie naukowe

#### 4.3.1. Badania i modelowanie parametrów procesu technologicznego zagęszczania (aglomeracji) materiałów biomasy [1-3]

Obecnie wiele naukowców prowadzi badania procesu zagęszczania materiałów biomasy różnymi technikami (przy użyciu różnych urządzeń) celem uzyskania biopaliwa (aglomeratu) o jak najlepszych parametrach fizyko-mechanicznych, umożliwiającą jego wykorzystanie jako ekologicznego źródła energii. Jest to spowodowane ogólną światową tendencją do minimalizacji wykorzystania paliw kopalnych i zastąpienie ich odnawialnymi lub inaczej mówiąc alternatywnymi źródłami energii jakie stanowi między innymi biomasa. Cechy fizyko-mechaniczne biomasy takie jak niska gęstość usypowa, która przekłada się bezpośrednio na niską koncentrację energii, problemy z transportem i magazynowaniem, wymuszają konieczność jej zagęszczenia celem uzyskania jak najwyższego poziomu koncentracji energii ale również uzyskanie najlepszych właściwości pod kątem transportu, przechowywania oraz magazynowania. Bardzo istotny jest dobór techniki zagęszczania, biorąc pod uwagę postać początkową biomasy (rozmiar cząstek, wilgotność itp). Tak więc bardzo ważny staje się również proces przygotowawczy biomasy do zagęszczenia, w skład którego wchodzi między



innymi cięcie, rozdrabnianie, suszenie, nawilżanie, stosowanie dodatków (mieszanie z dodatkami), co ma w istocie służyć procesowi zagęszczania i uzyskaniu biopaliwa o jak najlepszych właściwościach. Ważnym aspektem jest również energochłonność procesu zagęszczania i procesów jego poprzedzających w szczególności cięcie materiału biomasy celem uzyskania odpowiedniej wielkości cząstek niezbędnej do realizacji samego procesu jak również uzyskania biopaliwa o określonych wcześniej właściwościach.

Podsumowując, ważny jest bilans ujmujący ilość energii jaką należy włożyć (aby zrealizować określone procesy) celem wytworzenia biopaliwa, do ilości energii jaką można z wytworzonego biopaliwa uzyskać.

#### **4.3.1.1. Badania i modelowanie parametrów procesu technologicznego zagęszczania trocin sosnowych**

Autor przedmiotowego referatu podjął się prac badawczych procesu zagęszczania materiałów biomasy, a także ich cięcia, celem zagospodarowania i wytworzenia biopaliwa. Badania procesu zagęszczania dotyczyły trocin sosnowych jako produktu odpadowego uzyskanego po cięciu wzdłużnym pni drzew w zakładzie tartacznym znajdującym się na terenie Wielkopolski. Materiał badawczy pobierano bezpośrednio z zasobnika maszyny tnącej. Trociny posiadały wilgotność początkową na poziomie 60-70%. Celem i jednocześnie pomysłem autora referatu było zaproponowanie sposobu zagospodarowania trocin, gdzie celowe było zmniejszenie gęstości (objętości) tego materiału i idąc dalej wytworzenie biopaliwa o określonych właściwościach fizyko-mechanicznych. Cięte pnie drzew pochodziły z lasów Puszczy Zielonki rozciągającej się na obszarze 122 km<sup>2</sup> położonej w Wielkopolsce (zachodnio-centralna Polska) w miejscu o współrzędnych geograficznych 52° 33' 12" N, 17° 6' 48" E. **W związku z powyższym na podstawie aktualnych i istotnych wyników badań innych naukowców opracowano metodykę badań procesu zagęszczania trocin sosnowych, która umożliwiła wykonanie wielokryterialnej analizy interakcji pomiędzy parametrami wejściowymi (nastawami) procesu zagęszczania/odciążania (siła zagęszczająca/naprężenie ściskające, temperatura, wilgotność materiału zagęszczanego), a odpowiedzią w postaci: gęstości wytworzonego aglomeratu, wytrzymałości na ściskanie, modułu sprężystości, relaksacji naprężenia, energochłonności procesu i pracy potrzebnej do zagęszczenia oraz współczynnika tarcia pomiędzy aglomeratem, a materiałem elementów zespołu zagęszczającego.**

Poniżej szczegółowo opisano opracowaną przez habilitanta metodykę, na podstawie której przeprowadzono badania eksperymentalne prowadzące do uzyskania przedstawionych poniżej wyników.

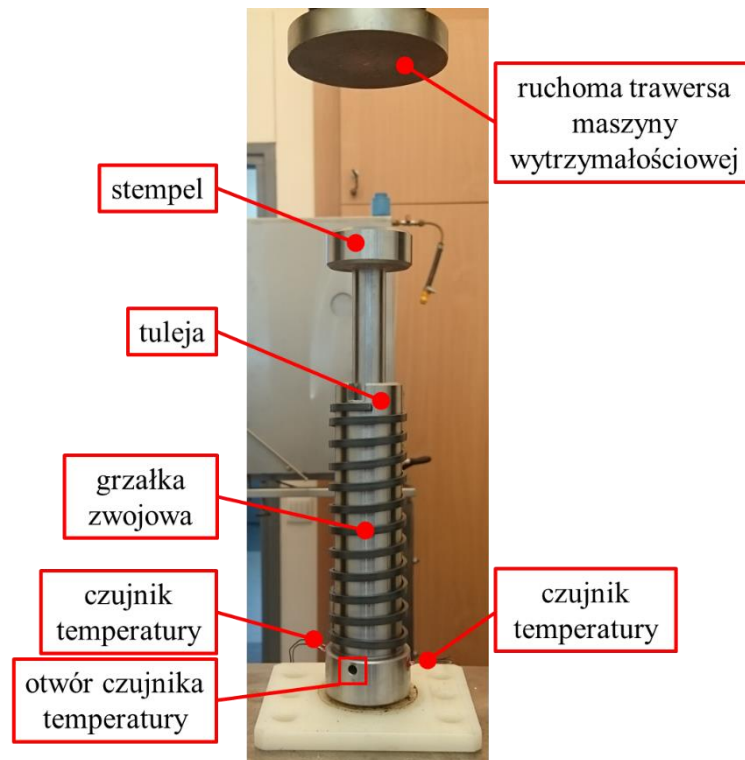
W celu wyznaczenia wpływu naprężenia zagęszczającego  $\sigma_c$ , temperatury procesu  $T$ , wilgotności trocin  $M$  na gęstość  $D$  brykietu, jego wytrzymałość na ściskanie  $CS$ , wartość modułu Younga trocin  $E1$  i brykietu  $E2$ , jego relaksację  $R$ , energochłonność procesu  $EC$  i pracę  $W$  potrzebną do zagęszczenia oraz na potrzeby wyznaczenia parametrów kalibrujących model Druckera-Pragera-Cap przeprowadzono szereg badań z wykorzystaniem specjalistycznej aparatury badawczej. W tym celu materiał trocin poddano następującym testom: cykl zagęszczanie-odciążanie (Rys. 2a), osiowe ściskanie (Rys. 2b), trójosiowe ściskanie (Rys. 2c, autorskie stanowisko objęte ochroną patentową nr 236458 pt.: *Urządzenie do badania nacisków*

*bocznych*, którego autor referatu jest współautorem, udział własny 20%), wyznaczenie siły ścinającej zagęszczoną próbkę oraz wyznaczenie współczynnika tarcia pomiędzy zagęszczonym materiałem trocin, a stalową płytą (Rys. 2d). Na potrzeby wykonania testów zagęszczania i odciążania trociny wsypywano do tulei w takiej ilości, aby wysokość próbki po zagęszczeniu wyniosła około 1,5 średnicy tulei. Średnica tulei i stempla zagęszczającego wynosiła  $\varnothing 20$  mm. Zagęszczania dokonywano z siłą odpowiednią do wytworzenia w przekroju próbki naprężenia ściskającego  $\sigma_c$  równego kolejno 3, 10, 20, 50, 75, 100 i 150 MPa. Przy czym zagęszczania dla każdej wartości ciśnienia dokonywano kolejno w temperaturach 25, 100, 150, 200, 250°C. Do podgrzewania trocin znajdujących się w tulei wykorzystano grzałkę zwojową (Rys. 2a). Badania te pozwoliły określić zmianę modułu Younga  $EI$  trocin podczas ich zagęszczania w funkcji gęstości względnej (Rys. 5a), naprężenia ściskającego  $\sigma_c$ , temperatury  $T$  i wilgotności  $M$  na potrzeby symulacji numerycznej. Każdą otrzymaną próbkę po zagęszczeniu poddawano osiowemu ściskaniu (Rys. 2b). Próba osiowego ściskania pozwoliła wyznaczyć moduł Younga  $E2$  brykietu, kąt tarcia wewnętrznego  $\beta$  (Rys. 7a) oraz wytrzymałość brykietu na ściskanie  $CS$  [1]. Test trójosiowego ściskania (Rys. 2c) wykonano na potrzeby określenia zmian współczynnika Poissona –  $\nu$  (Rys. 4). Na tym stanowisku tuleja i stempel również miały średnicę  $\varnothing 20$  mm, a każdą próbkę zagęszczano z siłą odpowiednią do uzyskania w przekroju próbki naprężenia ściskającego  $\sigma_c$  o wartościach jakie uzyskiwano podczas badań cyklu zagęszczania-odciążania. Próby opisane dotychczas zostały wykonane przy użyciu maszyny wytrzymałościowej MTS Insight 50 kN. Do badań służących określeniu siły ścinającej oraz wyznaczeniu współczynnika tarcia wykorzystano stanowisko przedstawione na rysunku 2d. Wyznaczone naprężenia ścinające dały podstawę do wyznaczenia współczynnika kohezji  $d$  (Rys. 5b) oraz wartości kąta tarcia wewnętrznego  $\beta$  (Rys. 7a). Podczas badań siły tnącej, trociny zagęszczano z siłą umożliwiającą uzyskanie w przekroju zagęszczonej próbki naprężenia ściskającego  $\sigma_c$  o wartościach jakie wymieniono wcześniej (3, 10, 20, 50, 75, 100 i 150 MPa). Zagęszczania dokonywano przy użyciu pionowego hydraulicznego siłownika (Rys. 2d). W pomiarze ciśnienia zagęszczającego wykorzystywano pomiar ciśnienia w roboczej komorze hydraulicznej siłownika z uwzględnieniem oporów ruchu siłownika wywołane uszczelnieniami na tłoku i tłoczysku. Każdą próbkę zagęszczano w określonej temperaturze (25, 100, 150, 200, 250°C). Tak zagęszczoną próbkę ścinano podczas poziomego ruchu dolnej części matrycy formującej (Rys. 2d). Przemieszczano ją przy użyciu siłownika hydraulicznego z zabudowanym na jego tłoczysku czujnikiem siły firmy HBM (Rys. 2d). W ten sposób mierzono bezpośrednio siłę tnącą, a w pomiarze uwzględniono opory ruchu tocznego wózków, po których przemieszczała się dolna część matrycy formującej. W pomiarze siły tarcia, próbkę zagęszczano wywołując zadaną wartość naprężenia ściskającego  $\sigma_c$  w określonej wcześniej temperaturze przy użyciu tego samego pionowego siłownika hydraulicznego. Jednocześnie wyznaczano wartość siły normalnej  $F_N$  (Rys. 2d) pośrednio z wartości ciśnienia oleju w komorze siłownika zagęszczającego. W chwili kiedy w próbce osiągnięto określoną wartość naprężenia  $\sigma_c$ , utrzymując ten osiowy stan obciążenia próbki, przemieszczano względem niej stalową płytę przy użyciu poziomego siłownika (Rys. 2d) i dokonywano pomiaru siły tarcia przy pomocy zabudowanego na jego tłoczysku czujnika siły. W tym badaniu uwzględniono charakterystyki sprawności pionowego siłownika zagęszczającego jak również oporu ruchu stalowej płyty poruszającej się na wózkach tocznych. Podsumowując dla każdej wartości ciśnienia

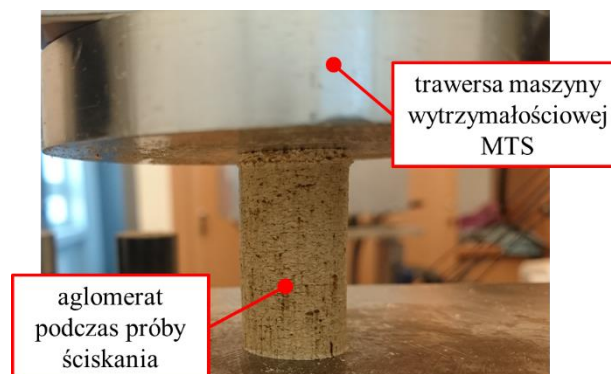
zagęszczającego i temperatury określono wartość siły tnącej i wartość współczynnika tarcia. Dla każdego określonych warunków testu i wilgotności trocin, test powtarzano dziesięciokrotnie [1].

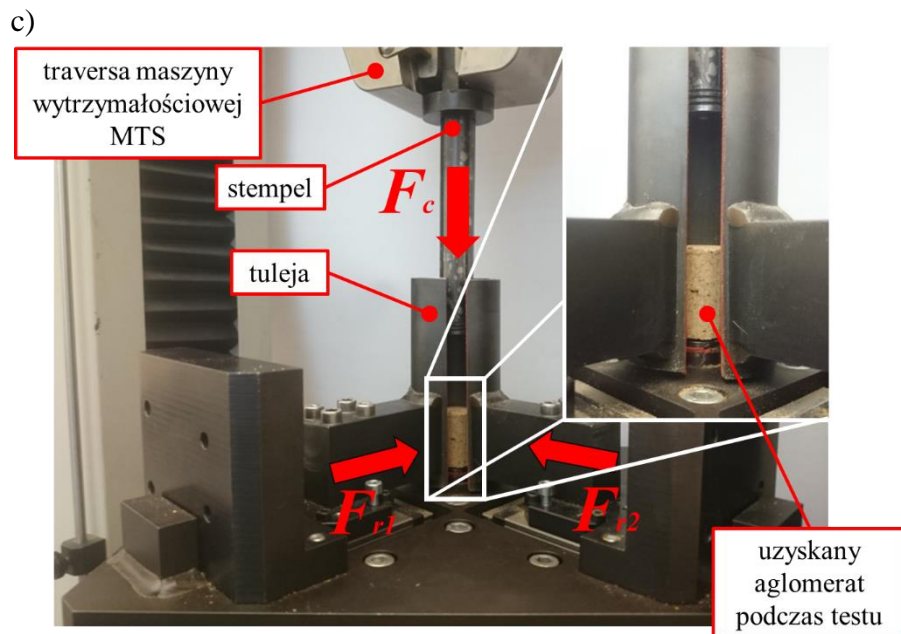
Badania procesu zagęszczania odciążania dokonano z wykorzystaniem zespołu stempel tuleja (Rys. 2a) zabudowanego na maszynie wytrzymałościowej MTS Insight 50 kN.

a)

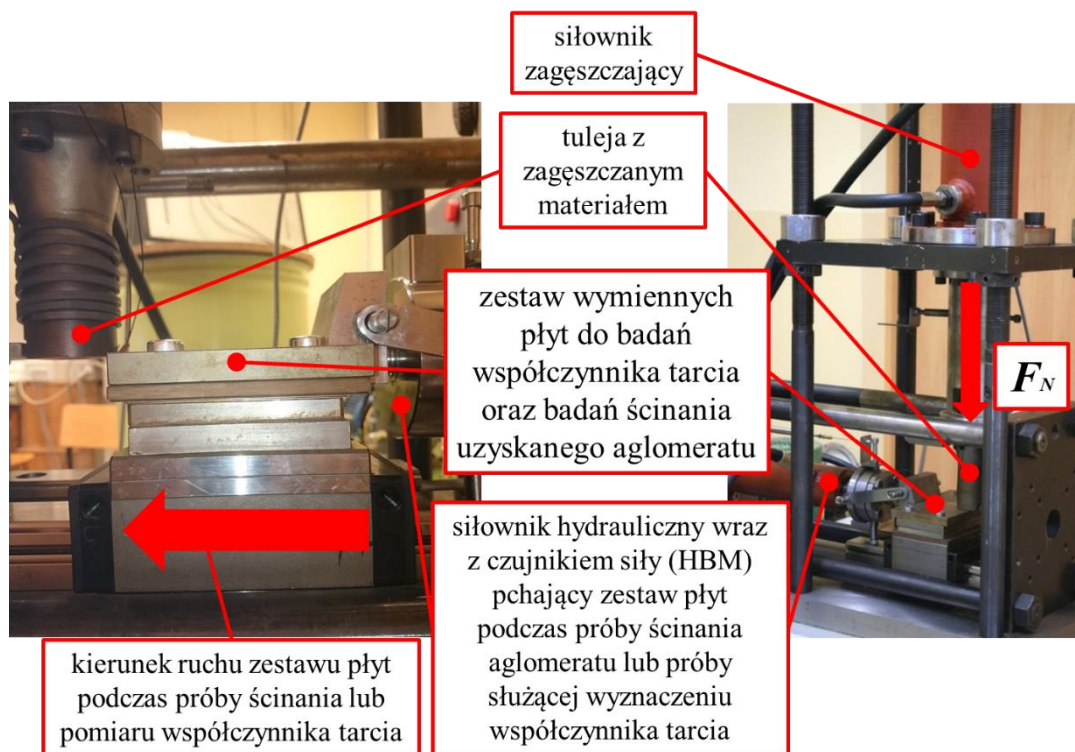


b)



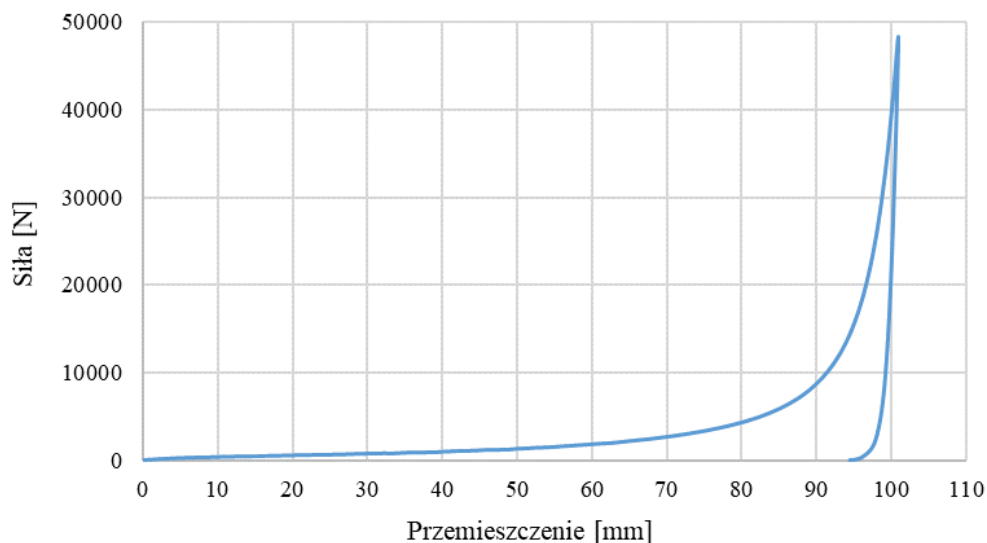


d)



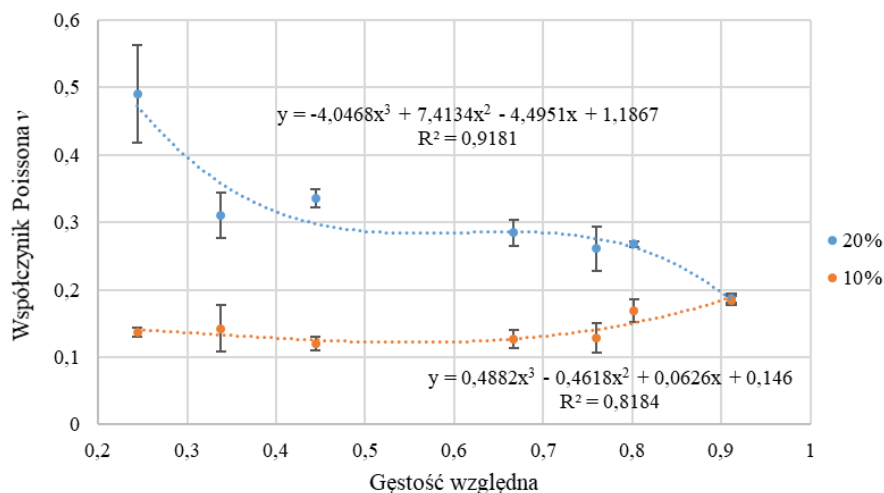
Rys. 2. Badania eksperymentalne materiału trocin: a) widok ogólny na zespół stempel tuleja wraz z elementem grzejnym, wykorzystanymi w badaniach cyklu zagęszczania-odciążania, b) widok ogólny na aglomerat tuż przed badaniem jego wytrzymałości na ściskanie, c) badania trójosiowego ściskania, d) badania ścinania i współczynnika tarcia [1]

Na rysunku 3 przedstawiono przykładową charakterystykę uzyskaną z badań cyklu zagęszczania/odciążania trocin.

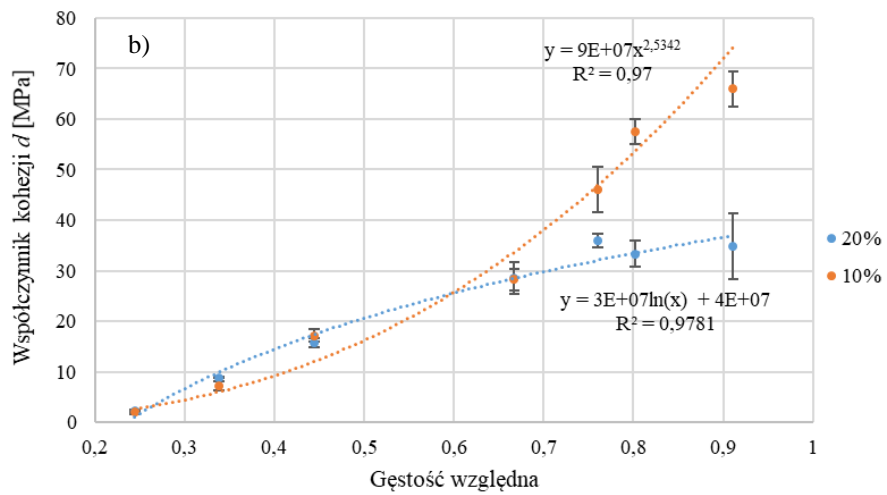
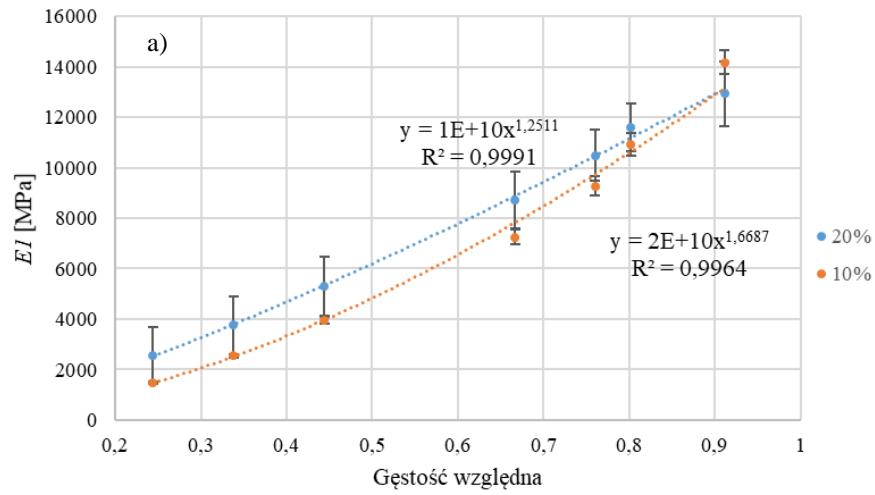


Rys. 3. Przykładowa charakterystyka zmian siły uzyskana podczas badań cyklu obciążania-odciążania dla trocin o wilgotności 10% i temperatury procesu 150°C, zadana siła zagęszczająca  $F = 50 \text{ kN}$  [1]

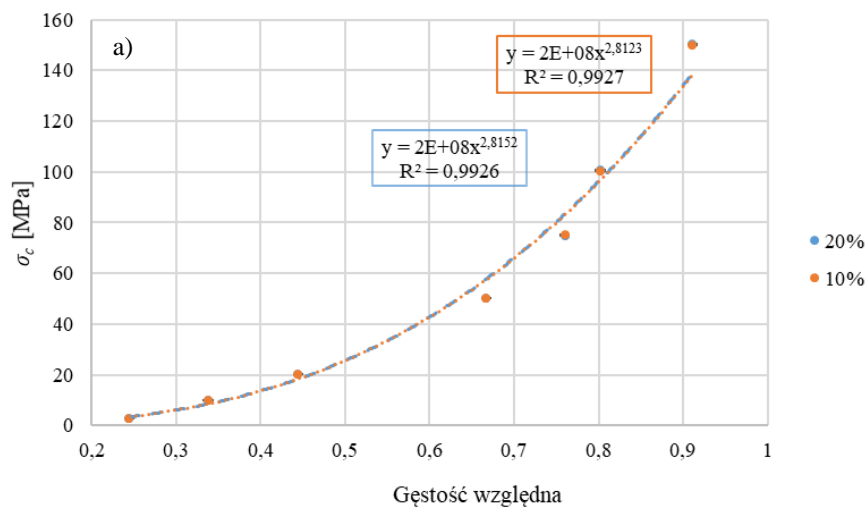
Na rysunkach 4-8 przedstawiono charakterystyki wyznaczonych parametrów modelu Druckera-Pragera-Cap (DPC) na podstawie przeprowadzonych eksperymentów dla trocin sosnowych o wilgotności 10% i 20%. Pozwoliły one na zbudowanie zdyskretyzowanego modelu procesu zagęszczania [1].

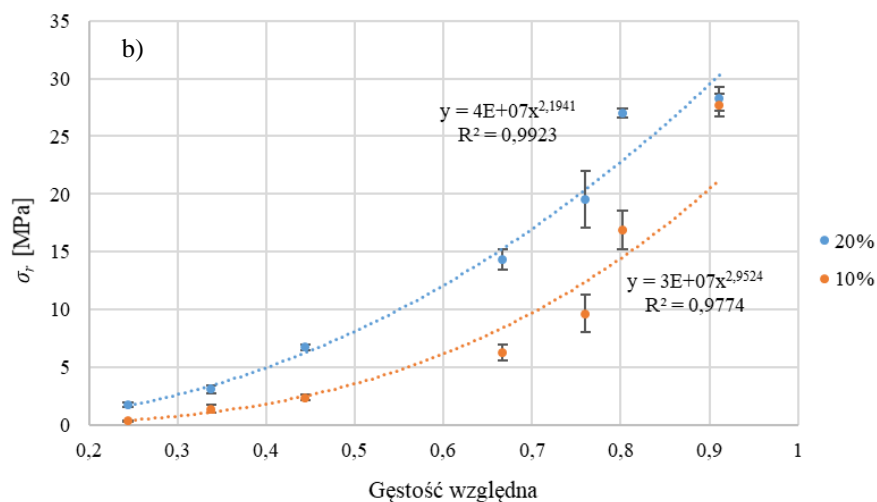


Rys. 4. Charakterystyka zmian wartości współczynnika Poissona  $\nu$  w funkcji wartości gęstości względnej dla trocin o wilgotności 10% i 20%

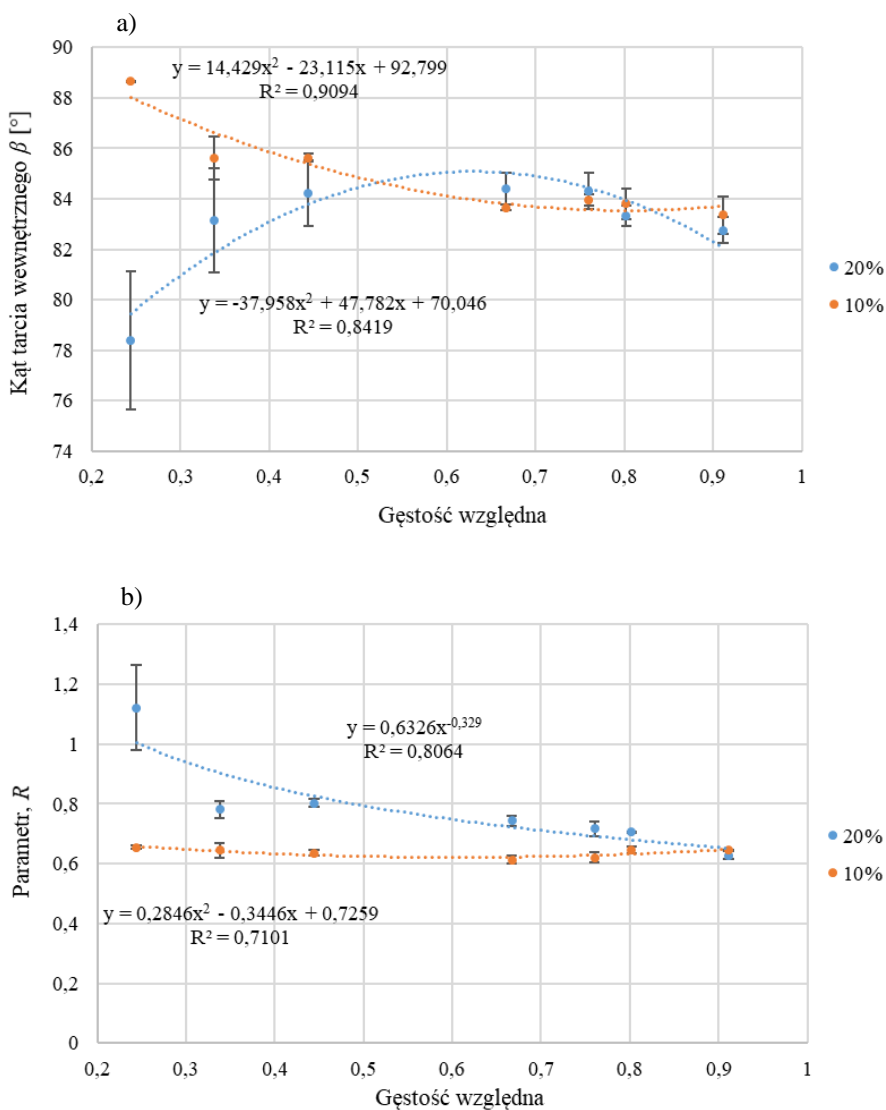


Rys. 5. Charakterystyka zmian: a) wartości modułu Younga  $EI$ , b) współczynnika kohezji  $d$ , w funkcji wartości gęstości względnej dla trocin o wilgotności 10% i 20%

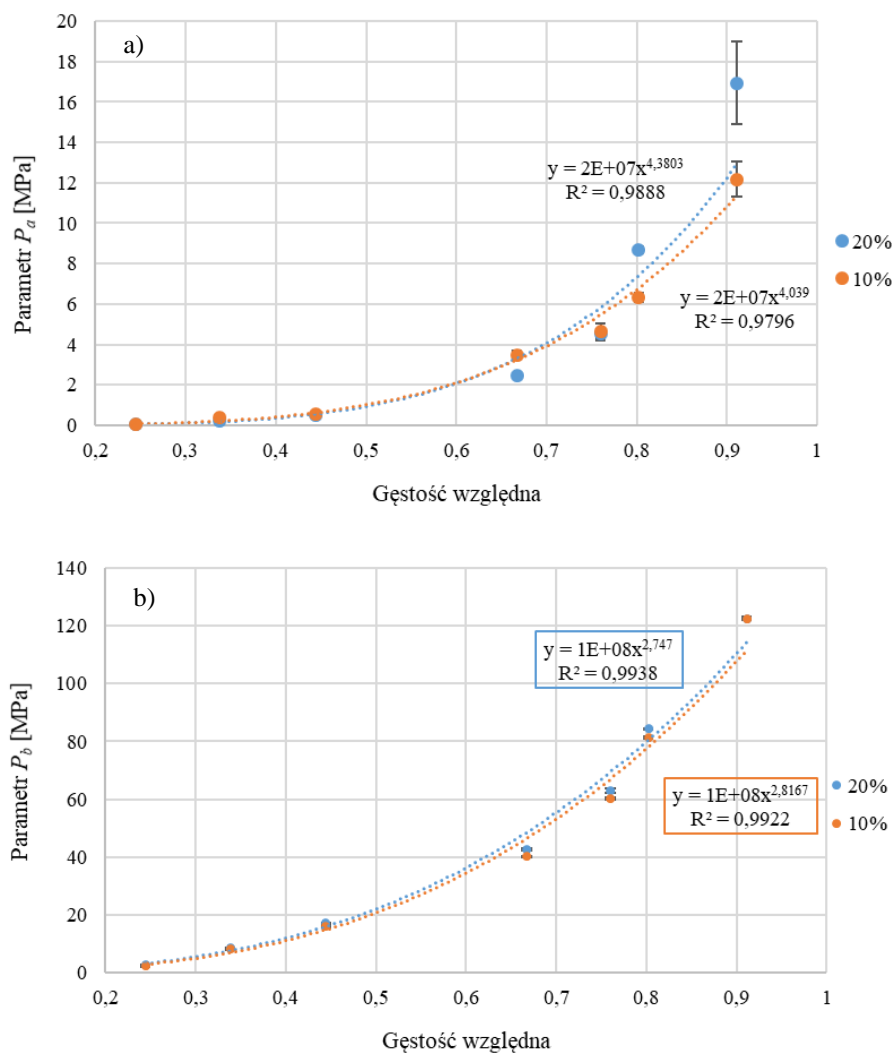




Rys. 6. Charakterystyka zmian: a) naprężenia ściskającego  $\sigma_c$ , b) promieniowego  $\sigma_r$ , w funkcji wartości gęstości względnej dla trocin o wilgotności 10% i 20%



Rys. 7. Charakterystyka zmian: a) wartości kąta tarcia wewnętrznego  $\beta$ , b) parametru  $R$ , w funkcji gęstości względnej dla trocin o wilgotności 10% i 20%



Rys. 8. Charakterystyka zmian parametrów: a)  $P_a$ , b)  $P_b$ , w funkcji gęstości względnej dla trocin o wilgotności 10% i 20%

Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych habilitant poddał analizie wariancji ANOVA dla zmiennych parametrów wejściowych ( $T$  – temperatura,  $\sigma_c$  – naprężenie ściskające,  $M$  – wilgotność) i odpowiedzi wyznaczonych na podstawie zarejestrowanych wielkości w postaci gęstości brykietu ( $D$  – gęstość [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]), jego wytrzymałości na ściskanie ( $CS$  – wytrzymałość na ściskanie [MPa]), wartości modułu Younga trocin określonych na podstawie cyklu zagęszczania-odciążania ( $EI$  [GPa]), wartości modułu Younga wytworzonego brykietu określonego na podstawie jego osiowego ściskania ( $E2$  [MPa]), relaksacji brykietu po zagęszczeniu ( $R$  [mm]) oraz energochłonności procesu zagęszczania ( $EC$  – zużycie energii [kJ/kg]) i pracy potrzebnej do wytworzenia jednego brykietu ( $W$  – praca [kJ]). Analiza ta umożliwiła poszukiwanie wzajemnych zależności pomiędzy tymi parametrami. Uzyskano w ten sposób funkcyjne zależności zmian odpowiedzi eksperymentu i wpływ na ich wartości zmiennych procesu zagęszczania. Powyższe przedstawiono i szczegółowo omówiono w publikacji [1]. W tabeli 1 przedstawiono przykładowe wyniki analizy ANOVA dla gęstości brykietu ( $D$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]) w zależności od temperatury ( $T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]), naprężenia ściskającego ( $\sigma_c$  [MPa]) i wilgotności ( $M$  [%]). W analizie wykorzystano zredukowany model dwuparametryczny (2FI) na bazie kryterium wartości poziomu istotności  $p = 0,05$ , dla którego  $R^2 = 0,8245$ . Według



tabeli 1 wartość statystyki F modelu wynosi 76,32 co oznacza, że model jest znaczący. Natomiast wartości poziomu istotności p dla poszczególnych składników modelu są mniejsze niż 0,05 co oznacza, że są znaczącymi jego składnikami. Wartość prognozowanego współczynnika determinacji wynosząca  $R^2 = 0,7947$  i skorygowanego współczynnika równa  $R^2 = 0,8137$ , oraz różnica pomiędzy nimi mniejsza niż 0,2, świadczy, że model może być wykorzystany do poruszania się w jego przestrzeni projektowej eksperymentu. Model wyrażony jest zależnością (1). Charakterystykę wykreśloną na podstawie modelu przedstawiono na rysunku 7.

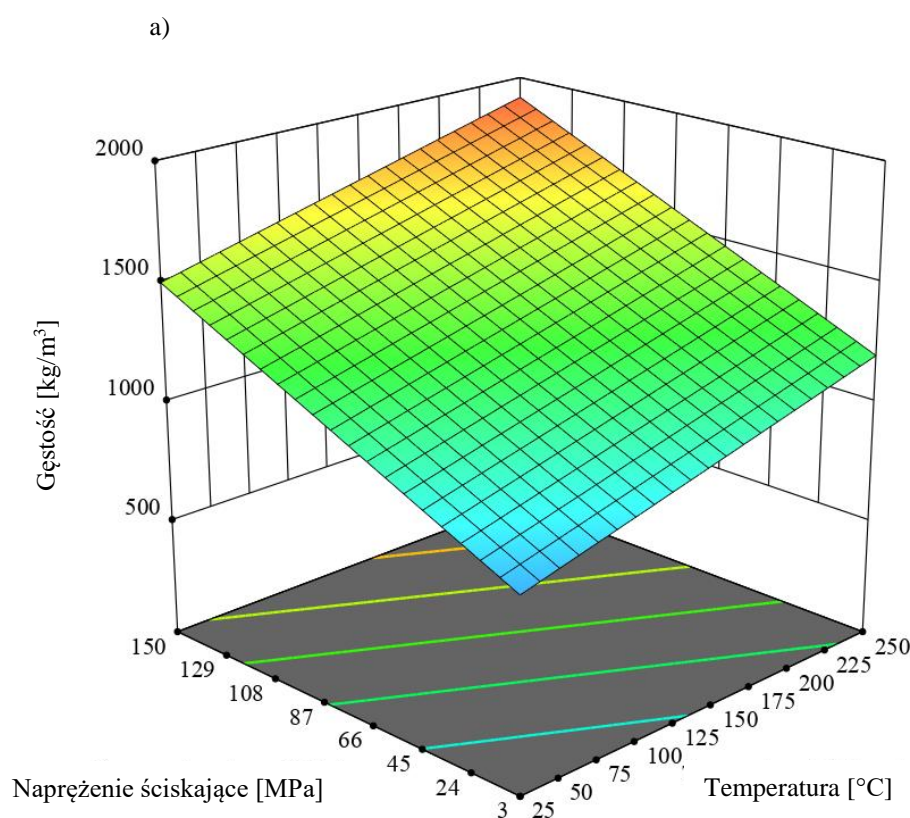
$$D = 496,927 + 2,75669 \cdot T + 4,82016 \cdot \sigma_c + 24,144 \cdot M + (-0,095474 \cdot T \cdot M) \quad (1)$$

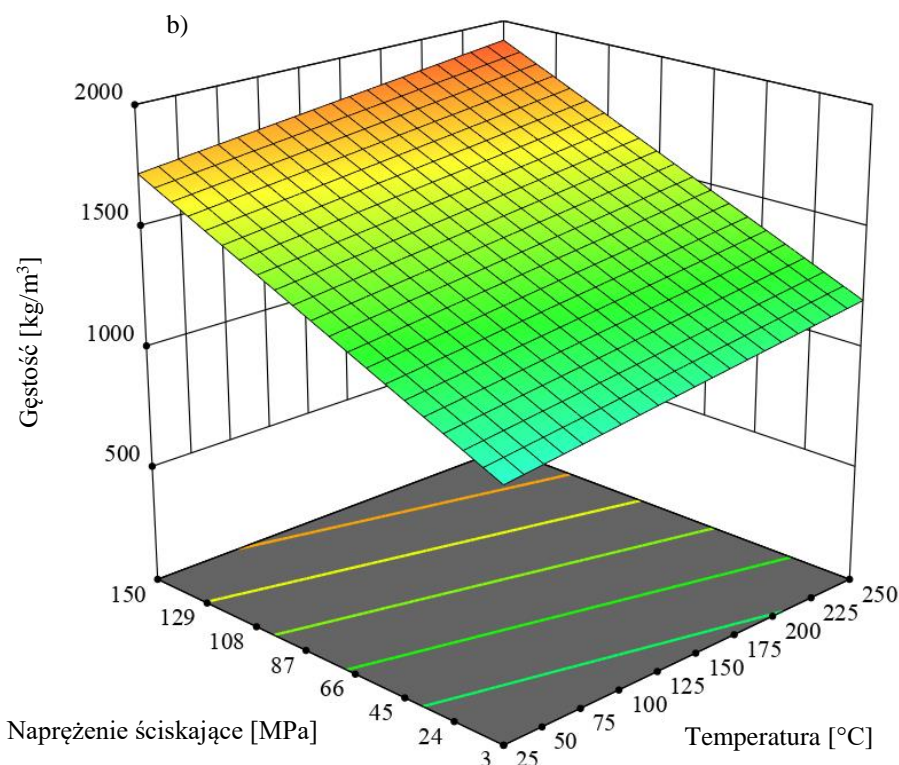
$T$  – temperatura [°C],  $\sigma_c$  – naprężenie ściskające [MPa],  $M$  – wilgotność [%]

Tabela 1. Wyniki ANOVA dla gęstości brykietu  $D$  [kg/m<sup>3</sup>]

Źródło	Suma kwadratów	df <sup>a</sup>	Średnia kwadratowa	F-wartość statystyki	p-wartość poziomu istotności	
<b>Model</b>	5,064E+06	4	1,266E+06	76,32	< 0,0001	znaczący
$T$	7,492E+05	1	7,492E+05	45,17	< 0,0001	
$\sigma_c$	4,032E+06	1	4,032E+06	243,07	< 0,0001	
$M$	2,104E+05	1	2,104E+05	12,69	0,0007	
$T \cdot M$	97305,69	1	97305,69	5,87	0,0182	

<sup>a</sup> stopień swobody





Rys. 9. Gęstość wytworzonego brykietu  $D$  w funkcji wartości naprężenia ściskającego oraz temperatury dla wilgotności trocin: a) 10%, b) 20%

Analiza wartości parametrów z tabeli 1, pokazuje, że największy wpływ na wzrost gęstości ma naprężenie ściskające  $\sigma_c$  ( $F = 243,07$ ) oraz temperatura  $T$  ( $F = 45,17$ ). Nieco wyższe wartości gęstości uzyskuje się dla 20% wartości wilgotności materiału biomasy, dla najniższych wartości naprężenia ściskającego i temperatury oraz najwyższej wartości naprężenia ściskającego i najniższej wartości temperatury. Dla pozostałych wartości  $\sigma_c$  i  $T$  różnice te są nieznaczne.

Wykonane analizy wariancji ww. parametrów umożliwiły hierarchiczne zestawienie [1] przedstawione poniżej w tabeli 2 wg wpływu na bazie wartości statystyki modelu F, składników poszczególnych modeli i interakcji pomiędzy nimi ( $T$  – temperatury [°C],  $\sigma_c$  – naprężenia ściskającego [MPa],  $M$  – wilgotności [%]) dla poszczególnych modeli odwzorowujących przestrzeń eksperymentu w odniesieniu do analizowanych odpowiedzi w postaci gęstości brykietu  $D$  [kg/m<sup>3</sup>], jego wytrzymałości na ściskanie  $CS$  [MPa], wartości modułu Younga trocin  $E1$  [GPa], wartości modułu Younga wytworzonego brykietu  $E2$  [MPa], relaksacji  $R$  [mm], energochłonności procesu zagęszczania  $EC$  [kJ/kg] oraz pracy  $W$  [kJ].

Tabela 2. Hierarchia składników modeli dla poszczególnych odpowiedzi eksperymentu sporządzona wg kryterium poziomu wartości statystyki F

Odpowiedź	1	2	3	4	5
$D$	$\sigma_c$	$T$	$M$	$T \cdot M$	-
$CS$	$\sigma_c$	$\sigma_c^2$	$M$	$\sigma_c \cdot M$	$T$
$E1$	$\sigma_c$	$T$	$M$	-	-
$E2$	$T$	$\sigma_c$	$T \cdot \sigma_c$	-	-
$R$	$\sigma_c$	$M$	$T^2$	$T \cdot M$	$T$
$EC$	$\sigma_c$	$T$	$M$	$T \cdot \sigma_c$	$T \cdot M$
$W$	$\sigma_c$	$T$	$M$	$T \cdot \sigma_c$	$\sigma_c \cdot M$

Według tabeli 2 uzyskane odpowiedzi z cyklu badań [1] trocin sosnowych pozyskanych z drzew rosnących na obszarach mieszczących się w Puszczy Zielonka w Polsce, na gęstość  $D$ , wytrzymałość na ściskanie  $CS$  i wartość modułu Younga  $EI$ , relaksację  $R$ , energochłonność  $EC$  oraz pracę  $W$  największy wpływ ma naprężenie ściskające  $\sigma_c$ . Im większa jego wartość tym większe wartości tych parametrów. Wyjątek stanowi wartość modułu Younga brykietu  $E2$ , na którego zmiany znaczący wpływ ma temperatura procesu. Spadek wartości modułu  $E2$  ze wzrostem temperatury jest spowodowany degradacją termiczną, która przekłada się na depolimeryzację. Najmniejszą odpornością na oddziaływanie wysokiej temperatury odznacza się hemiceluloza w porównaniu do celulozy i ligniny. To hemiceluloza odgrywa kluczową rolę w wytrzymałości drewna co również tłumaczy spadek wytrzymałości brykietu  $CS$  (spadek wytrzymałości dla temperatury 200°C i powyżej) [1].

W przedmiotowych badaniach wzrost gęstości ma taki sam charakter w całym zakresie wartości naprężenia ściskającego  $\sigma_c$ . W przypadku trocin o wilgotności 20% wzrost ten jest nieco bardziej łagodny, ponieważ dla najniższych wartości naprężenia  $\sigma_c$  i temperatury gęstość uzyskała większą wartość (Rys. 9) [1].

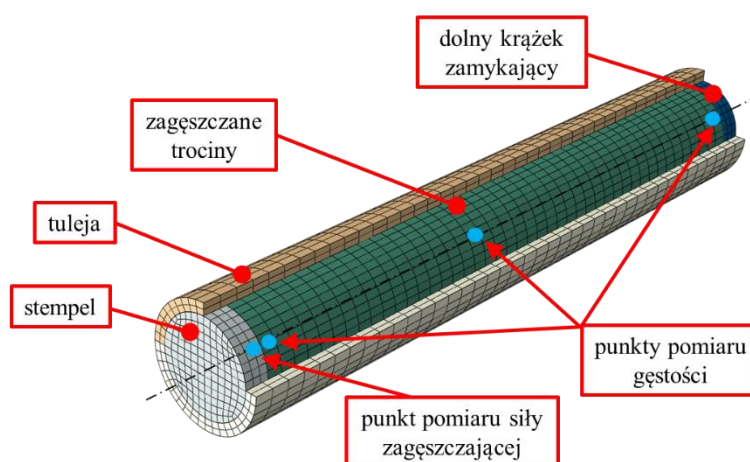
Według analizy drugorzędne, ale również istotne znaczenie ma temperatura procesu i wilgotność trocin (Tab. 2). Największą wytrzymałość brykietu  $CS$  uzyskano w temperaturze 150°C przy najwyższym naprężeniu ściskającym i wilgotności 10%. Jest to istotne pod kątem przechowywania brykietu i jego transportu. Wykonywanie procesu zagęszczania przy wyższej temperaturze procesu jest niecelowe, ponieważ wydłuża to czas podgrzewania materiału i również wpływa negatywnie na jego trwałość (obniżenie wytrzymałości na ściskanie) [1]. Spadek wytrzymałości jest widoczny najbardziej dla wilgotności 20%. Wysoka wytrzymałość brykietu uzyskana w temperaturze 150°C jest wywołana zawartością ligniny w strukturze drewna, której poziom wynosi około 20-30%. Jej temperatura topnienia wynosi około 140°C i to ona pomaga wiązać celulozę i hemicelulozę w ścianach komórkowych i wiąże je ze sobą. Po podgrzaniu trocin podczas procesu zagęszczania, lignina mięknie, a w chwili kiedy temperatura procesu osiągnie odpowiednią wartość, ta wykazuje właściwości termoutwardzalne poprawiając wytrzymałość brykietu. Białka odgrywają również ważną rolę jako środki wiążące między różnymi cząsteczkami podczas zagęszczania. Jednoczesne oddziaływanie naprężenia ściskającego i temperatury sprzyja rozprzestrzenianiu się ligniny w strukturze cząsteczek, gdzie następuje jej przenoszenie na sąsiadujące cząsteczki przez co te łączą się tym bardziej, że pod oddziałującym naprężeniem ulegają one deformacji i zmniejszają się pomiędzy nimi odległości likwidując puste przestrzenie. Podobną funkcję mogą spełniać białka i skrobia, która w obecności wody żeluje łącząc poszczególne cząsteczki. Większa wilgotność umożliwia osiągnięcie nieco większej gęstości ale miała negatywny wpływ na wytrzymałość brykietu na ściskanie oraz relaksację (relaksacja po zagęszczeniu osiągała większe wartości) [1]. Wzrost gęstości wraz ze wzrostem temperatury, a także uzyskana większa gęstość dla wilgotności trocin równej 20% (dla najniższych wartości naprężenia ściskającego i temperatury procesu) można wytłumaczyć tym, że podczas grzania woda paruje wskutek czego gęstość brykietu rośnie niezależnie od przyłożonego ciśnienia. Zmiękczający wpływ temperatury powoduje spadek wartości modułu Younga  $EI$  [1], przez co trociny są bardziej podatne na oddziałujące naprężenie ściskające co znowu przyczynia się do wzrostu gęstości brykietu. Taki wpływ wilgotności trocin na gęstość i moduł Younga  $EI$  można również

zauważyć w omawianych badaniach [1]. Analizując wpływ parametrów procesu na jego energochłonność  $EC$  i pracę  $W$  jaką trzeba wykonać podczas zagęszczania, można powiedzieć, że największy wpływ ma naprężenie ściskające (Tab. 8), potem temperatura i mało zauważalny wpływ ma wilgotność materiału [1]. Zagęszczanie trocin siłą 5 kN odpowiada naprężeniu ściskającemu próbki zagęszczanej w tulei o średnicy 20 mm, na poziomie około 16 MPa. Dla tych wartości naprężenia ściskającego (około 16 MPa) nie ma żadnej różnicy w wartościach energochłonności i pracy uzyskanych podczas zagęszczania trocin o wilgotności 10% i 20%. Wilgotność ma duży wpływ w przypadku wytrzymałości na ściskanie i relaksacji jak to powiedziano wcześniej [1].

### Badania symulacyjne procesu zagęszczania z wykorzystaniem modelu DPC [1, 2]

Opracowana i zrealizowana przez habilitanta metodyka badań eksperymentalnych procesu technologicznego zagęszczania trocin umożliwiła wyznaczenie parametrów fizyko-mechanicznych wytworzonego brykietu i również parametrów modelu Drucker-Prager-Cap, które umożliwiły zbudowanie modelu na potrzeby symulacji numerycznej procesu zagęszczania trocin sosnowych oraz określenie możliwości wykorzystania modelu Drucker-Prager-Cap do tegoż celu. Na potrzeby wykonania symulacji numerycznej procesu zagęszczania wykorzystano tak jak wspomniano, model DPC [1]. Zbudowany model numeryczny oraz jego weryfikacja na bazie eksperymentu dała możliwość uzyskania modelu, który można wykorzystać do poszerzenia zmiennych procesu zagęszczania bez konieczności wykonania badań rzeczywistych. Chodzi tutaj mianowicie o uzyskanie informacji np. na temat wpływu geometrii modułu brykietującego (np. średnicy i długości tulei) na energochłonność procesu czy też jakość uzyskanego brykietu (np. rozkład gęstości we wnętrzu brykietu). Tak uzyskane informacje mają być pomocne w procesie projektowania i planowania procesu zagęszczania materiałów zbliżonych właściwościami do trocin, ale również innych.

Zbudowany model numeryczny odzwierciedla zatem proces zagęszczania przeprowadzony przy użyciu zespołu stempel-tuleja o średnicy  $\varnothing 20$  mm (Rys. 10) [1]. Pozwoliło to na weryfikację uzyskanych wyników obliczeń numerycznych z wynikami badań eksperymentalnych [1].



Rys. 10. Widok ogólny modelu numerycznego do symulacji procesu zagęszczania

W procesie zagęszczania, właściwości materiału ulegają zmianie, co odzwierciedlają wyniki badań eksperymentalnych, które wykorzystano w symulacji numerycznej procesu [1]. Celem uzyskania jak największej zbieżności wyników symulacji z eksperymentalnymi, odwzorowano te zmiany poprzez wykorzystanie procedury obliczeniowej Abaqus Subroutines VUSDFLD, w której zdefiniowano wartości Yield Stress (Tab. 3), jako kryterium determinujące zmianę właściwości materiału. Oznacza to, że po osiągnięciu określonej w subrutynie wartości naprężenia, w następnym kroku obliczeniowym uwzględniane są nowe, zaktualizowane wartości parametrów opisujących właściwości materiału. Przeprowadzona analiza ANOVA wykazała największą wytrzymałość brykietu uzyskaną dla naprężenia ściskającego  $\sigma_c = 150$  MPa w temperaturze  $T = 150$  °C i wilgotności trocin  $M = 10\%$ . Na tej podstawie w celu porównania wpływu zmian warunków procesu przeprowadzono walidację modelu numerycznego dla tych wartości parametrów wejściowych  $\sigma_c$  i  $T = 25$  °C i 150 °C oraz dwóch wartości wilgotności 10% i 20%. Zmiany naprężenia ściskającego odzwierciedla zmiana siły zagęszczającej, którą zarejestrowano bezpośrednio z poszczególnych kroków symulacji. W tabeli 3 i 4 przedstawiono zmienne wartości parametrów wykorzystanych w symulacji numerycznej dla tych właśnie wartości naprężenia, temperatury  $T = 150$  °C i wilgotności 10 i 20% [1]. Parametry modelu DPC dla temperatury pokojowej  $T = 25$  °C przedstawiono w tabelach w pracy [1].

Tabela 3. Parametry modelu DPC dla zagęszczania trocin o wilgotności 10% w temperaturze 150°C [1]

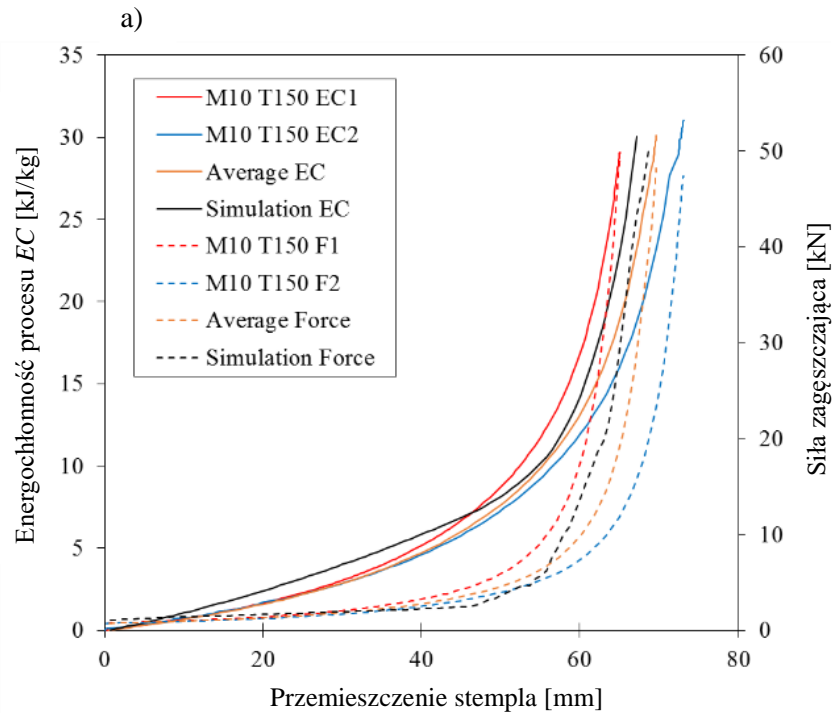
Material cohesion [MPa]	Angle of friction [deg]	Cap Eccentricity [Pa]	Init Yld Surf Pos [-]	Yield Stress [MPa]	Vol Plas Strain [-]	Young's Modulus [MPa]	Poisson's Ratio [-]	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Coef. of friction
<b>1,54</b>	84,37	0,65	0,53	1,76	0	826	0,138		
<b>9,49</b>	81,22	0,64	0,53	3,25	1,35	1765,61	0,147		
<b>18,38</b>	80,95	0,64	0,53	10,93	1,68	2983,24	0,127		
<b>31,83</b>	80,15	0,61	0,53	49,2	2,01	5878,47	0,125	322	0,34
<b>37,12</b>	79,92	0,62	0,53	136,58	2,07	7616,98	0,124		
<b>42,74</b>	80,15	0,65	0,53	282,5	2,11	8959,64	0,168		
<b>41,26</b>	79,46	0,65	0,53	1139,52	2,14	11271,36	0,186		

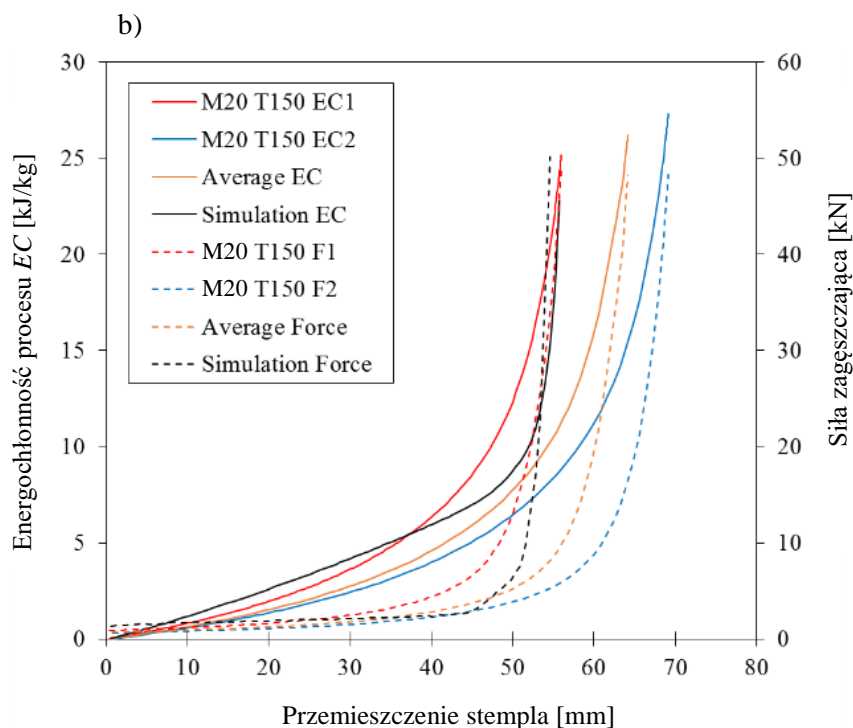
Tabela 4. Parametry modelu DPC dla zagęszczania trocin o wilgotności 20% w temperaturze 150°C [1]

Material cohesion [MPa]	Angle of friction [deg]	Cap Eccentricity [Pa]	Init Yld Surf Pos [-]	Yield Stress [MPa]	Vol Plas Strain [-]	Young's Modulus [MPa]	Poisson's Ratio [-]	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Coef. of friction
<b>1,28</b>	77,47	1,12	0,95	1,77	0	391,70	0,49		
<b>9,41</b>	81,35	0,78	0,95	5,51	2,06	1699,72	0,31		
<b>9,73</b>	80,50	0,8	0,95	18,02	2,43	3398,25	0,34		
<b>10,79</b>	78,88	0,74	0,95	52,29	2,58	7398,47	0,28	319	0,124
<b>12,56</b>	78,37	0,72	0,95	153,24	2,66	9643,09	0,26		
<b>12,33</b>	77,41	0,71	0,95	508,5	2,7	11083,86	0,27		
<b>20,57</b>	78,20	0,63	0,95	1347,63	2,73	12251,45	0,19		

W modelu zdefiniowano punkty pomiarowe, które posłużyły do odczytu obliczonych wartości. Jeden z punktów zdefiniowano na wewnętrznej powierzchni stempla zagęszczającego w jego osi symetrii (Rys. 10). Posłużył on do rejestracji wartości siły reakcji pojawiającej się na stemple podczas procesu zagęszczania oraz do pomiaru wartości przemieszczenia. Na rysunku

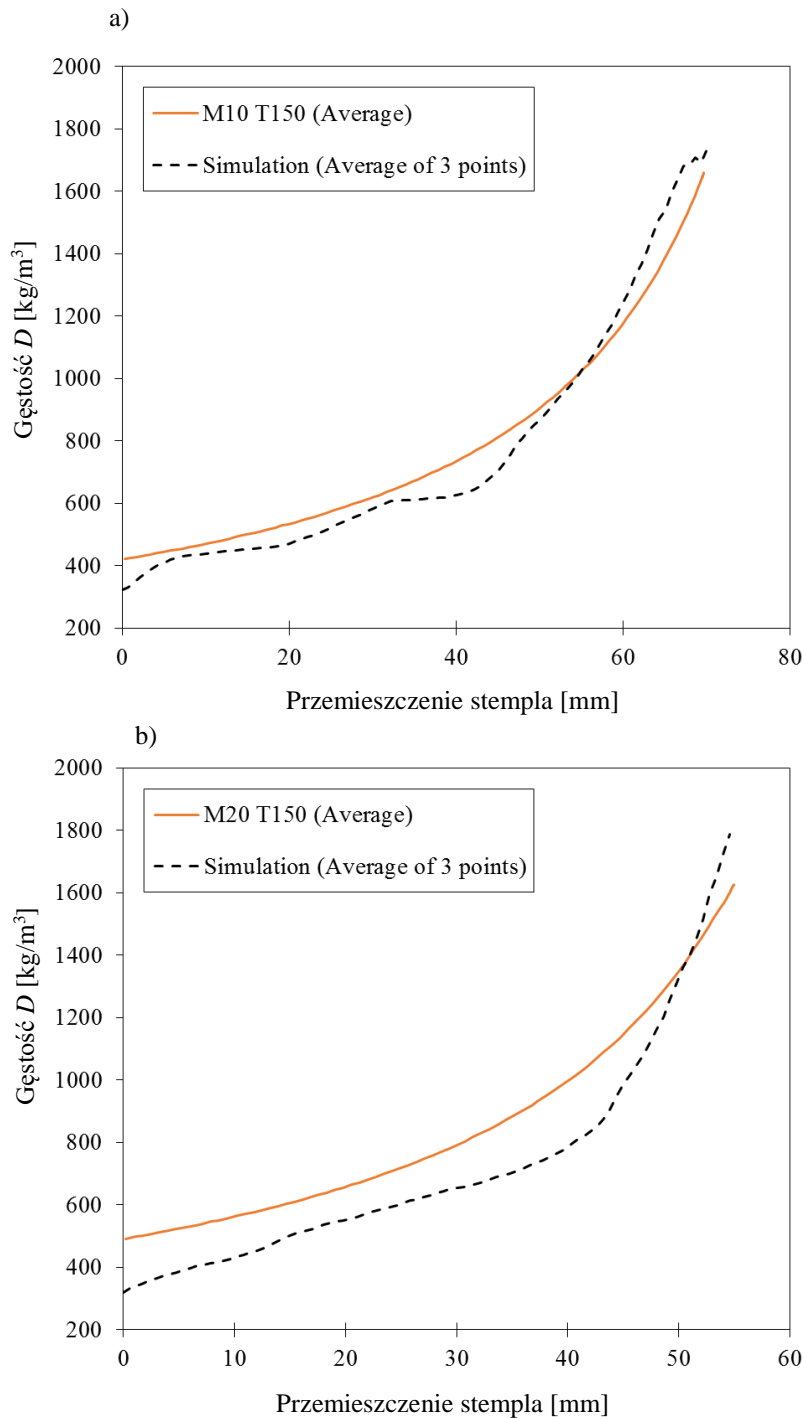
11 przedstawiono wyznaczone z wykorzystaniem tych punktów, przykładowe charakterystyki zmian wartości energochłonności procesu  $EC$  [kJ/kg] (linia ciągła) oraz siły zagęszczającej  $F$  [N] (linia przerywana) w funkcji przemieszczenia stempla zagęszczającego i zestawiono je z tymi uzyskanymi z eksperymentu. W każdym przypadku na rysunku zestawiono wyniki uzyskane z symulacji oraz wartości średnie zarejestrowane podczas eksperymentu. Dla lepszego zobrazowania zakresu zmienności wartości uzyskiwanych podczas eksperymentu, zamieszczono na wykresach także dwie najbardziej skrajne wartości zarejestrowane podczas badań [1].





Rys. 11. Zestawienie przykładowych wyników uzyskanych z symulacji i eksperymentu:  
 a) charakterystyki zmian energochłonności  $EC$  oraz siły zagęszczającej  $F$  w funkcji przemieszczenia tłoka zagęszczającego dla  $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$  i wilgotności materiału zagęszczanego 10%, b) charakterystyki zmian energochłonności  $EC$  oraz siły zagęszczającej  $F$  w funkcji przemieszczenia tłoka zagęszczającego dla  $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$  i wilgotności materiału zagęszczanego 20%, gdzie: M10 – wilgotność 10%, M20 – wilgotność 20%, T150 – temperatura  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , EC1 i EC2 skrajne wartości uzyskane z eksperymentu, F1 i F2 – skrajne wartości uzyskane z eksperymentu [1]

Kolejne punkty zdefiniowane zostały w materiale zagęszczanym. Zlokalizowane były na osi symetrii w środku długości próbki oraz na obu jej końcach (Rys. 10). W tych trzech punktach rejestrowana była gęstość materiału  $D$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ], której wartość średnią w funkcji przemieszczenia tłoka dla temperatury  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  oraz wartości wilgotności trocin 10% i 20%, przedstawiono na rysunku 12. Na każdym z przedstawionych wykresów zestawiono wartości średnie uzyskane z pomiarów oraz z symulacji. Wartości gęstości z eksperymentu wyznaczono na podstawie ilorazu masy zagęszczanej do objętości będącej funkcją wartości przemieszczenia tłoka zagęszczającego. Są to więc wartości średnie gęstości z całej objętości [1].



Rys. 12. Zestawienie charakterystyk zmian wartości gęstości  $D$  w funkcji przemieszczenia tłka zagęszczającego dla  $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a) wilgotności 10%, b) wilgotności 20% [1]

### Dyskusja nad wynikami badań symulacyjnych

Analizując uzyskane charakterystyki zmian energochłonności  $EC$  i siły zagęszczającej  $F$  zauważono, że do wartości około 5 kN energochłonność procesu zagęszczania jest na niewielkim poziomie i praktycznie jednakowym dla wszystkich symulowanych przypadków [1]. Po jej przekroczeniu rozpoczyna się nagły wzrost siły zagęszczającej i tym samym rośnie energochłonność procesu. Krzywa zmian energochłonności dla zagęszczania w temperaturze  $25^{\circ}\text{C}$  i wilgotności 10% ma największy promień krzywizny, co spowodował względnie



równomierny wzrost siły zagęszczającej. Zupełnie odmiennym charakterem zmian odznaczają się pozostałe przypadki. Siła po przekroczeniu wartości z przedziału 10-15 kN zaczyna asymptotycznie rosnąć [1].

Charakterystyki zmian siły zagęszczającej i energochłonności uzyskane z symulacji w dużym stopniu pokrywają się z wartościami średnimi uzyskanymi z eksperymentu. Dla przypadku zagęszczania w temperaturze 150 °C i wilgotności trocin 20% po przekroczeniu wartości siły zagęszczającej wynoszącej około 5 kN, siła jak i energochłonność uzyskane z symulacji rosną znacznie bardziej gwałtownie co przyczynia się do wzrostu różnicy procentowej w odniesieniu do wartości będących efektem badań eksperymentalnych. Rosnącą z przemieszczeniem tłoka rozbieżność pomiędzy wynikami symulacji i eksperymentalnymi tłumaczy się wpływem dwudziestoprocentowej wilgotności trocin. W czasie zagęszczania w temperaturze 150 °C niejednokrotnie zaobserwowano gwałtowne odparowywanie wody zawartej w trocinach, co przekłada się na nagły miejscowy wzrost ciśnienia w wolnych przestrzeniach pomiędzy cząstkami trocin. Miało to znaczny wpływ na przebieg siły zagęszczającej. W symulacji numerycznej tego zjawiska nie uwzględniono. Tym samym stwierdzono, że w przypadku modelu numerycznego potwierdza się wpływ temperatury na energochłonność procesu zagęszczania. Niewielkie różnice pomiędzy wartościami energochłonności tymi uzyskanymi z badań i symulacji numerycznej, są spowodowane tym, iż analiza symulacyjna rozpoczyna się przy wartości naprężenia ściskającego  $\sigma_c = 3$  MPa, a więc od wartości, dla której wyznaczono pierwsze parametry modelu DPC. Dla tulei o średnicy  $\varnothing 20$  mm odpowiada to sile około 1 kN, stąd też najniższe zarejestrowane podczas symulacji siły osiągały właśnie taką wartość.

Analizując wyniki stwierdzono niewielki wzrost gęstości przy wzroście wartości temperatury procesu [1]. Wilgotność materiału zagęszczanego ma mało znaczący wpływ tak jak to miało miejsce w eksperymencie (Tabela 2). Charakterystyka zależności gęstości od przemieszczenia tłoka zagęszczającego ma podobny przebieg w całym zakresie wartości. Uzyskana zbieżność wyników jest zadowalająca.

### **Wnioski końcowe i podsumowanie**

Habilitant wykonał i przedstawił na podstawie opracowanej metodyki badania procesu zagęszczania biopaliwa w postaci trocin sosnowych jako odpadu po cięciu pni drzew w tartaku. Podjęto próbę zagospodarowania tego odpadu jako biopaliwa uzyskanego na skutek jego zagęszczenia. Celem uzyskania jak najlepszych własności fizyko-mechanicznych tego paliwa podczas zagęszczania, badano wpływ temperatury zagęszczania, naprężenia ściskającego oraz wilgotności trocin. Dokonana analiza umożliwiła określenie najlepszych parametrów procesu z jednej strony biorąc pod uwagę uzyskanie najlepszych właściwości biopaliwa, z drugiej natomiast jak najniższą energochłonność procesu. Wykonane badania eksperymentalne również umożliwiły budowę modelu numerycznego rozpatrywanego procesu zagęszczania, który pozwala po jego modyfikacji na budowę modelu symulacyjnego tego procesu w innych warunkach i dla odmiennego materiału. Na podstawie uzyskanych efektów zaprezentowanych powyżej prac można wyciągnąć następujące wnioski [1]:

- (1) Największy wpływ na wszystkie odpowiedzi (poza wartością  $E2$ ) wzięte pod uwagę w eksperymencie i późniejszej analizie, ma naprężenie ściskające. Później jest to temperatura dla: gęstości  $D$ , energochłonności  $EC$ , modułu Younga  $EI$  i pracy  $W$ .

Dla wytrzymałości na ściskanie  $CS$  i relaksacji  $R$  jest to wilgotność  $M$ . Na wartość modułu Younga  $E2$  brykieta największy wpływ ma temperatura i potem naprężenie ściskające.

- (2) Na podstawie analizy ANOVA, poruszając się w przestrzeni projektowej eksperymentu można stwierdzić, że dla uzyskania brykieta o możliwie największej gęstości i wytrzymałości na ściskanie należy osiągnąć temperaturę procesu co najmniej  $150-170^{\circ}\text{C}$  i naprężenie ściskające o wartości około  $140-150\text{ MPa}$ . Trociny powinny mieć zawartość wilgoci na poziomie  $10\%$  lub nieco niższą. Osiągnięcie niższej zawartości wilgoci wiąże się z dosuszaniem co wymaga wkładu dodatkowej energii. Takie parametry procesu pozwalają osiągnąć gęstość brykieta rzędu  $1700\text{ kg/m}^3$  przy zachowaniu wytrzymałości na ściskanie rzędu około  $50\text{ MPa}$ . Dla tych parametrów energochłonność procesu wynosi około  $32\text{ kJ/kg}$ .
- (3) Wyznaczone w badaniach parametry modelu DPC umożliwiły jego wykorzystanie do symulacji numerycznej procesu zagęszczania trocin sosnowych, a uzyskane wyniki w postaci charakterystyk zmian energochłonności procesu  $EC$ , siły zagęszczającej  $F$  oraz gęstości  $D$  w funkcji przemieszczenia tłoka zagęszczającego są zbieżne z tymi uzyskanymi z eksperymentu na tyle, aby z powodzeniem można było wykorzystać model symulacyjny do poszukiwań odpowiedzi na inne wartości parametrów procesu zagęszczania, które nie były zadawane w eksperymencie.
- (4) Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych dały informacje w jakich warunkach naprężenia ściskającego, temperatury i wilgotności dokonywać proces zagęszczania trocin sosnowych, aby uzyskać z nich brykiety o najlepszych właściwościach fizyko-mechanicznych biorąc pod uwagę transport i magazynowanie oraz wykorzystanie jako ekologiczne źródło energii. Badania eksperymentalne wraz z zweryfikowanym przy ich użyciu modelem symulacyjnym stanowią cenne źródło danych wyjściowych do procesu projektowania elementów i doboru podzespołów urządzeń zagęszczających w technice tłokowej.

W związku z powyżej przedstawionymi efektami prac habilitant:

- opracował metodykę przeprowadzenia badań eksperymentalnych w związku z zagospodarowaniem odpadu poprodukcyjnego w postaci biomasy stanowiącej trociny sosnowe,
- opracował wyniki badań eksperymentalnych wykorzystując do tego celu analizę wariancji, czyli analizę interakcji pomiędzy parametrami wejściowymi (nastawami) procesu zagęszczania/odciążania (siła zagęszczająca/naprężenie ściskające, temperatura, wilgotność materiału zagęszczanego), a odpowiedzią w postaci: gęstości wytworzonego aglomeratu, wytrzymałości na ściskanie, modułu sprężystości, relaksacji naprężenia, energochłonności procesu i pracy potrzebnej do zagęszczenia oraz współczynnika tarcia o materiał elementów zespołu zagęszczającego. Analiza ta umożliwiła zbudowanie modeli analitycznych charakterystyk zmian tych parametrów w zależności od wartości nastaw procesu zagęszczania,

- na podstawie przeprowadzonej analizy wariancji habilitant sklasyfikował parametry (nastawy) procesu technologicznego zagęszczania w aspekcie stopnia ich wpływu na otrzymane poszczególne ww. odpowiedzi tegoż eksperymentu,
- zaprojektował i zbudował wybrane stanowiska badawcze służące przeprowadzeniu określonego rodzaju eksperymentu np. stanowisko objęte ochroną patentową nr Pat.236458 pt.: *Urządzenie do badania nacisków bocznych*, którego autor referatu jest współautorem, udział własny 20%,
- wyznaczył eksperymentalnie parametry modelu DPC i udowodnił możliwość jego wykorzystania do symulacji procesu zagęszczania takiego materiału jak trociny sosnowe. Model symulacyjny został zweryfikowany pozytywnie na podstawie porównania wyników symulacji z badaniami eksperymentalnymi. Należy tu podkreślić, że tak przygotowany i zweryfikowany model symulacyjny może stanowić narzędzie do poszukiwań odpowiedzi procesu zagęszczania dla innych jego parametrów wejściowych (nastaw),
- określił parametry procesu technologicznego zagęszczania tłokowego trocin sosnowych, dzięki któremu możliwe będzie uzyskanie brykietu o dobrych właściwościach fizyko-mechanicznych pod kątem jego transportu i przechowywania oraz wykorzystania jako ekologicznego źródła energii.

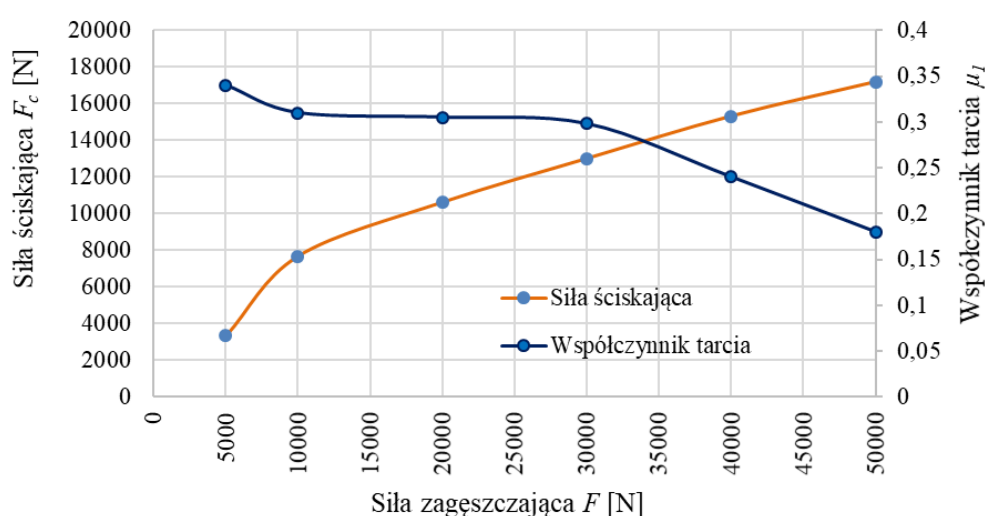
Przedstawione powyżej efekty pracy naukowej habilitanta zostały opublikowane w czasopiśmie *Fuel* (**Dominik Wilczyński**, Maciej Berdychowski, Krzysztof Talaśka, Dominik Wojtkowiak. Experimental and numerical analysis of the effect of compaction conditions on briquette properties. *Fuel*, 2021, vol. 288, s. 119613-1-119613-19, IF = 8,035, 140 pkt. – **udział własny 50%**). W zakresie wymienionej publikacji na **indywidualany wkład habilitanta składa się odpowiedzialność organizacyjna i koordynacyjna dotycząca planowania i realizacji działalności badawczej, pomysł i koncepcja powstania pracy na cele zagospodarowania materiału odpadowego w postaci trocin powstającego w procesie produkcyjnym lokalnego tartaku. Opracowanie metodyki badawczej wraz z wykonaniem badań eksperymentalnych, pozyskaniem materiału do badań i jego przygotowaniem oraz także zaprojektowaniem (Patent nr Pat.236458 pt.: *Urządzenie do badania nacisków bocznych*) i przygotowaniem poszczególnych stanowisk badawczych. Opracowanie wyników badań w formie pozyskania właściwych charakterystyk dla oceny prawidłowości przebiegu spodziewanych/prognozowanych zmian wielkości badanych w danym eksperymencie i na danym stanowisku. Opracowanie wyników badań z wykorzystaniem wielokryterialnej analizy interakcji ANOVA z wykorzystaniem metody Response Surface. Autor przedmiotowego referatu przygotował treść manuskryptu w tym opis metodyki badań, opis przygotowania materiału do badań, opisy wykorzystanych w badaniach stanowisk badawczych, wizualizacje wyników badań i wielkości pochodnych od nich. Habilitant był również odpowiedzialny za odpowiedzi na uwagi recenzentów i wprowadzanie zmian wynikających z tych uwag. Habilitant miał znaczący wkład w budowę modelu symulacyjnego procesu zagęszczania trocin, który to stanowił zaimplementowany w programie Abaqus model Drucker-Prager-Cap. Model ten został skalibrowany poprzez wykorzystanie wyników badań przez co udowodniono, że model ten można wykorzystać do symulacji procesu zagęszczania takiego materiału jak trociny. Jednocześnie model ten**

został zweryfikowany badaniami eksperymentalnymi, dzięki czemu może on służyć jako narzędzie do doboru parametrów procesu technologicznego w postaci zagęszczania trocin, celem uzyskania aglomeratu o wymaganych właściwościach fizyko-mechanicznych bez konieczności wykonywania złożonych i czasochłonnych badań eksperymentalnych. W efekcie tego, w ocenie habilitanta może to przyspieszyć proces konstruowania urządzenia do zagęszczania tego typu materiału działającego na zasadzie współpracy elementów takich jak stempel-tuleja.

Efektom opracowanej i wykorzystanej metodyki badań procesu zagęszczania, ale także badań na potrzeby wyznaczenia parametrów modelu DPC z wykorzystaniem biomasy w postaci mieszaniny trocin sosnowo-dębowych w udziale 50/50 %, jest publikacja w materiałach konferencyjnych MATEC Web of Conferences – **Wilczyński Dominik**, Berdychowski Maciej, Wojtkowiak Dominik, Górecki Jan, Wałęsa Krzysztof. Experimental and numerical tests of the compaction process of loose material in the form of sawdust. *MATEC Web of Conferences* - 2019, vol. 254, s. 02042-1-02042-12 vol. 254, punktacja MNiSW 5 pkt. – **udział własny 60%**, gdzie indywidualny wkład habilitanta obejmował zakres jak wymieniony powyżej dla publikacji w czasopiśmie *Fuel*.

#### 4.3.1.2. Badania i modelowanie parametrów procesu technologicznego zagęszczania trocin dębowych [3]

Opracowana i omówiona powyżej metodyka badań zagęszczania materiału biomasy w postaci trocin została również wykorzystana w badaniach procesu zagęszczania trocin dębowych. Na tym materiale wykonano również omówiony powyżej cykl badań gdzie uzyskano właściwe charakterystyki przedstawione w publikacji [3]. Uzyskane charakterystyki przebiegu zmian siły ściskającej  $F_c$  oraz współczynnika tarcia w funkcji wartości siły zagęszczającej  $F$  umożliwiły przeprowadzenie optymalizacji gdzie na bazie przyjętego kryterium określono optymalne parametry (nastawy) procesu zagęszczania (Rys. 13 i Tab. 5). Wykorzystano do tego celu program Design Expert.



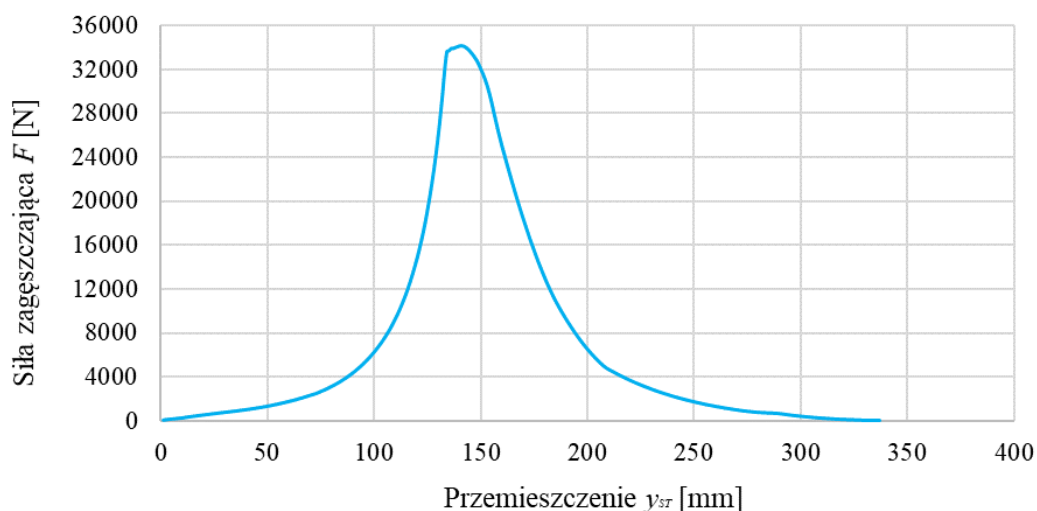
Rys. 13. Charakterystyki zmian siły ściskającej  $F_c$  próbki trocin dębowych oraz wartości współczynnika tarcia  $\mu$  w funkcji siły zagęszczającej  $F$  [3]

Tabela 5. Zestawienie kryterium optymalizacji parametrów procesu zagęszczania jako siły zagęszczającej  $F$ , współczynnika tarcia  $\mu$  oraz właściwości otrzymanego brykietu w postaci siły  $F_c$

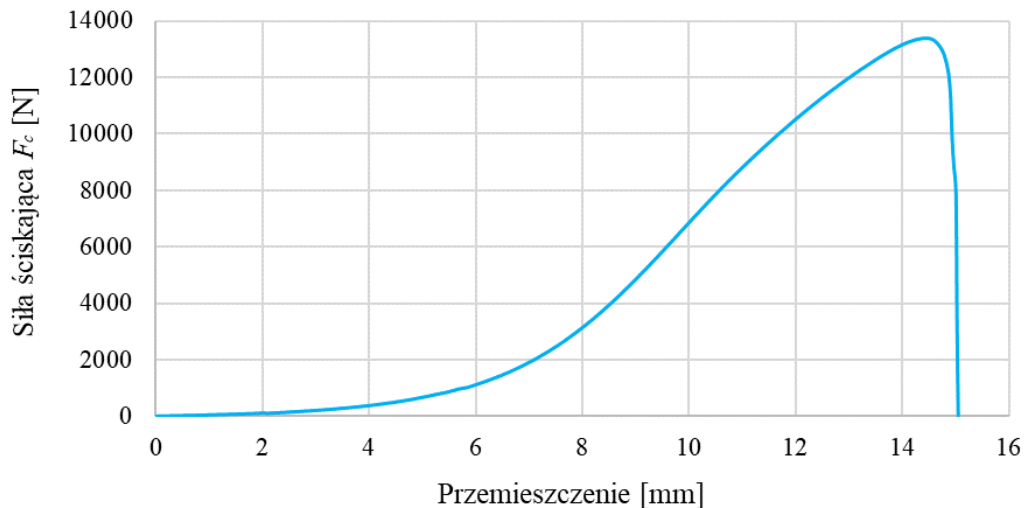
Zmienna wejściowa/wyjściowa	Kryterium	Dolna granica wartości	Górna granica wartości
$F$ [kN]	minimalizuj	5000	50000
$F_c$ [kN]	maksymalizuj	3300	17200
$\mu$ [-]	minimalizuj	0,18	0,34

Parametry te posiadają następujące wartości:  $F = 34000$  N,  $F_c = 13500$  N i współczynnik tarcia  $\mu = 0,25$ . To właśnie dla tych wartości parametrów zaproponowano konstrukcję elektrycznego układu napędowego zagęszczającego zespołu stempel-tuleja (Rys. 16 i 17) wraz z jego modelem matematycznym co umożliwiło dobór silnika elektrycznego na podstawie wyznaczonej z modelu wartości momentu  $M_s$ . Do tego celu wykorzystano równania Lagrange'a drugiego rodzaju [3].

Celem potwierdzenia powyższej optymalizacji przeprowadzono dziesięć prób zagęszczania-odciążania trocin z siłą  $F = 34$  kN oraz ściskania uzyskanej próbki dla wyznaczenia siły  $F_c$ . Przykładowe charakterystyki zmian siły zagęszczającej  $F$  oraz ścisniającej  $F_c$  przedstawiono na rysunkach 14 i 15 [3].

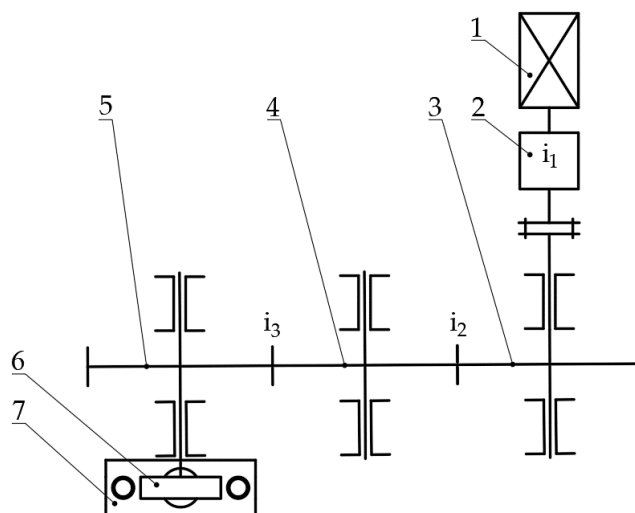


Rys. 14. Charakterystyka zmian siły zagęszczającej podczas procesu zagęszczania-odciążania trocin dębowych przy zagęszczaniu siłą  $F = 34$  kN [3]

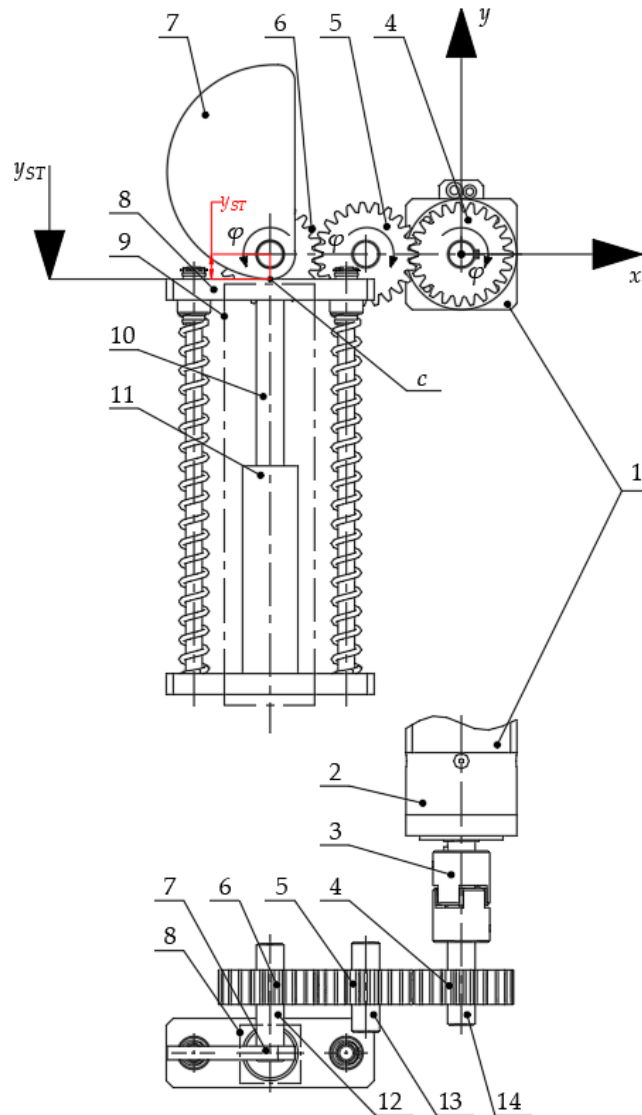


Rys. 15. Charakterystyka zmian siły ściskającej  $F_c$  próbki trocin dębowych uzyskanej podczas zagęszczania siłą  $F = 34$  kN [3]

Zaproponowano budowę układu zagęszczającego z napędem elektrycznym składającym się z silnika, kół zębatych, krzywki oraz stempla zagęszczającego, co przedstawiono na rysunku 16 i 17.

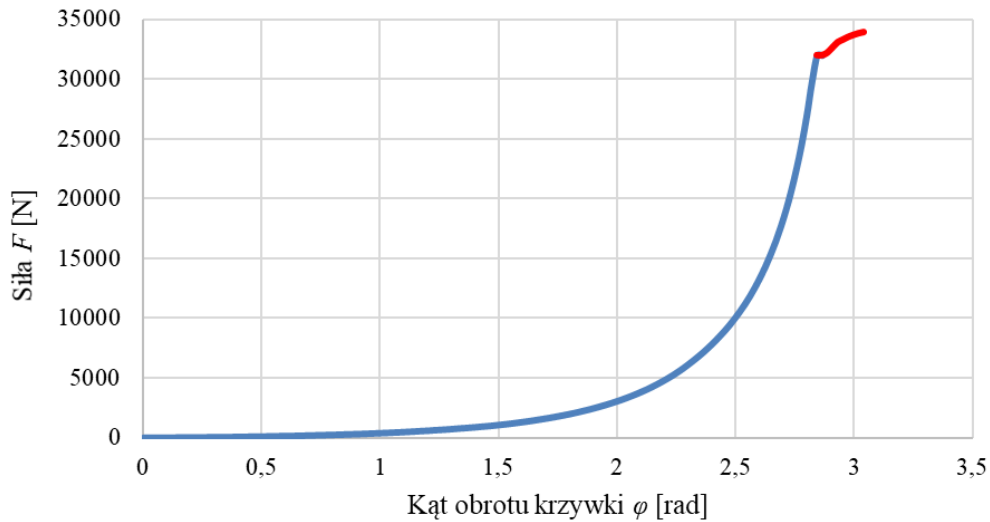


Rys. 16. Schemat kinematyczny układu napędowego zespołu zagęszczającego stempel-tuleja gdzie:  
 1 – silnik elektryczny, 2 – przekładnia redukcyjna, 3 – koło zębate 1, 4 – koło zębate 2, 5 – koło zębate 3, 6 – krzywka, 7 – zespół zagęszczający stempel tuleja z prowadnicami i sprężynami naciskowymi,  
 $i_1$  – przełożenie przekładni połączonej bezpośrednio z silnikiem [3]



Rys. 17. Schemat kinematyczny układu napędowego zespołu zagęszczającego stempel-tuleja gdzie: 1 – silnik elektryczny, 2 – przekładnia redukcyjna, 3 – sprzęgło, 4 – koło zębate 1, 5 – koło zębate 2, 6 – koło zębate 3, 7 – krzywka, 8 – ruchoma płyta górną poruszająca się wzdłuż prowadnic, 9 – zespół zagęszczający stempel tuleja z prowadnicami i sprężynami naciskowymi, 10 – stempel, 11 – tuleja, 12, 13, 14 – wały, na których osadzone są koła zębate 1, 2 i 3,  $i_1$  – przełożenie przekładni połączonej bezpośrednio z silnikiem,  $i_2 = i_3 = 1$  – wartość przełożenia współpracujących par kół zębatach,  $y_{ST}$  – skok stempla,  $\varphi$  – kąt obrotu krzywki [3]

Kluczowym w proponowanej konstrukcji układu napędowego było odpowiednie zaprojektowanie odpowiedniej geometrii krzywki 7 (Rys. 18), która umożliwi odwzorowanie przebiegu charakterystyki zmian siły zagęszczającej wyznaczonej w eksperymencie, w funkcji obrotu tej krzywki [3].



Rys. 18. Charakterystyka zmian siły zagęszczającej  $F$  uzyskanej j na podstawie badań eksperymentalnych w funkcji kąta obrotu krzywki 7 (Rys. 17) [3]

Dobór parametrów procesu zagęszczania oraz napędu jest kluczowy dla energochłonności procesu, co wpływa na bilans energetyczny czyli na stosunek energia włożona do energii uzyskanej z wytworzonego brykietu. Celem doboru układu napędowego zbudowano model matematyczny, w którym wykorzystano uzyskane wcześniej wyniki badań eksperymentalnych. Model ten pozwolił na wyznaczenie maksymalnej wartości momentu obrotowego  $M_s$ , jaki jest potrzeby do napędu zaproponowanego układu zagęszczającego [3].

$$M_s = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial E_k}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial \varphi} + \frac{\partial E_p}{\partial \varphi} + (F_T \cdot y_{ST}) + \left( F \cdot \frac{\partial y_{ST}}{\partial \varphi} \right) \quad (1)$$

gdzie:

$M_s$  – moment napędowy układu zagęszczającego

$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial E_k}{\partial \dot{\varphi}} \right)$  – pochodna po czasie pochodnej energii kinetycznej w funkcji zmiany kąta obrotu

krzywki  $\varphi$  w czasie,

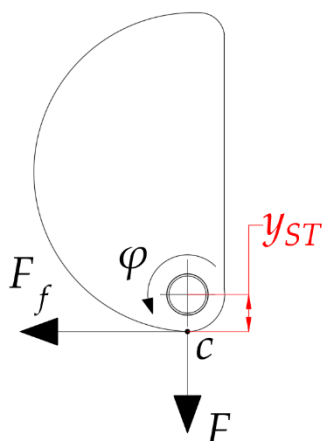
$\frac{\partial E_k}{\partial \varphi}$  – pochodna energii kinetycznej w funkcji kąta obrotu krzywki  $\varphi$ ,

$\frac{\partial E_p}{\partial \varphi}$  – pochodna energii potencjalnej  $E_p$  w funkcji kąta obrotu  $\varphi$  krzywki,

$F_T \cdot y_{ST}$  – dyssypacja energii  $Q_{jR}$  jako składnika równania Lagrange'a II rodzaju, którą stanowi moment siły tarcia  $F_f$ , której wektor jest styczny do krzywizny krzywki 7 i jednocześnie prostopadły do osi stempla 10 (Rys. 29), gdzie  $Q_{jR} = M_T = F_f \cdot y_{ST}$  (Rys. 19),

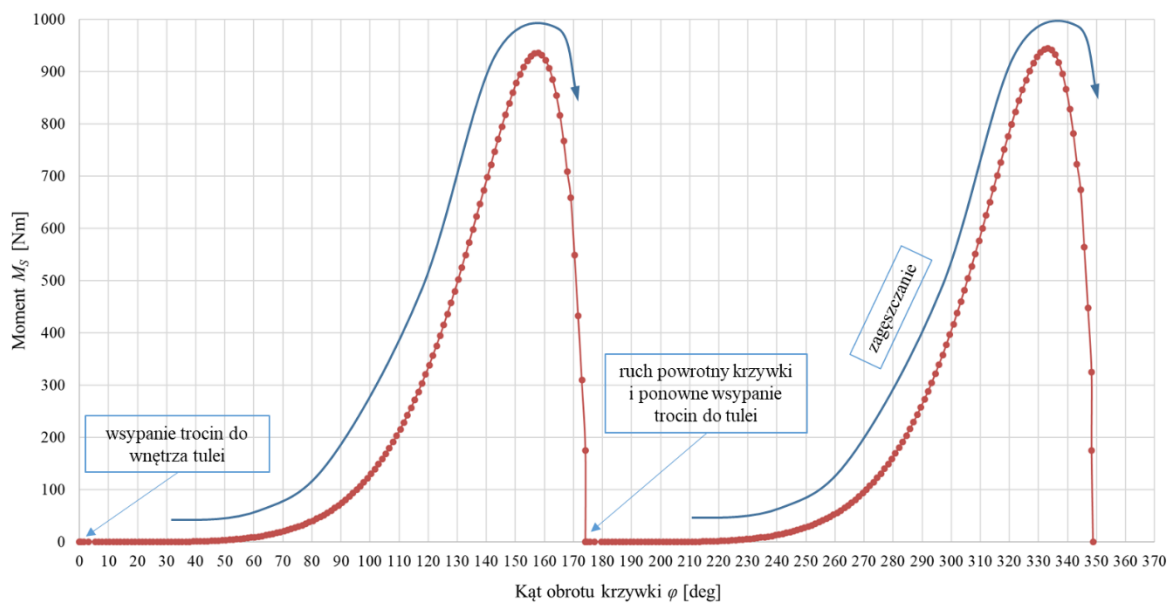
$Q_j^* = F \cdot \frac{\partial y_{ST}}{\partial \varphi}$  – moment siły zagęszczającej  $F$  względem początku układu współrzędnych urządzenia zagęszczającego, który stanowi oś silnika elektrycznego (Rys. 18 i 19) [3].





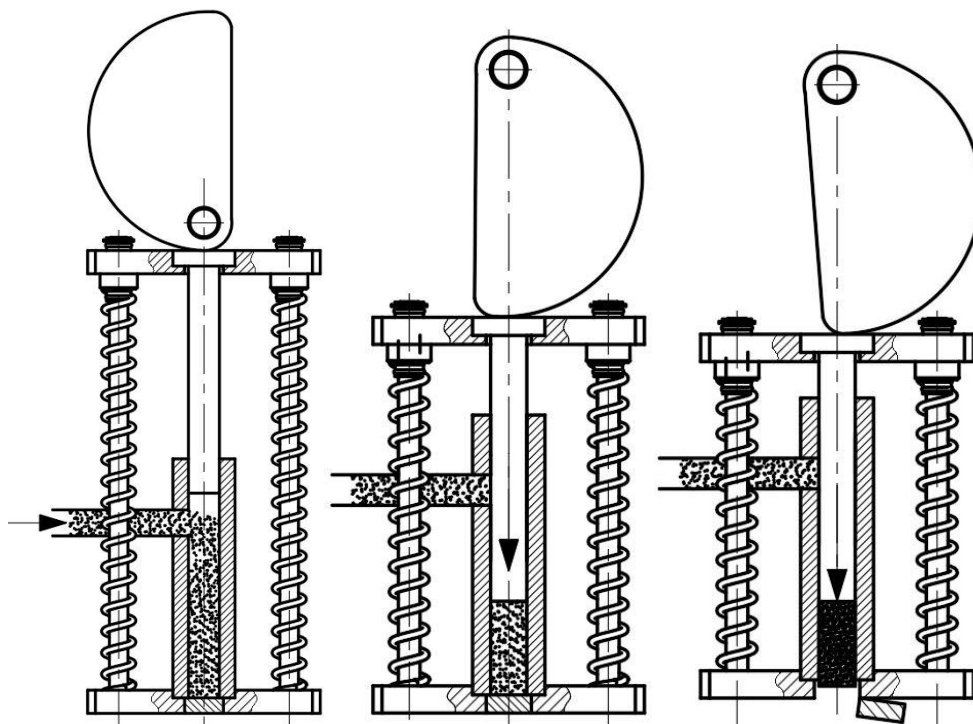
Rys. 19. Schemat rozkładu sił na krzywce, gdzie siła zagęszczająca  $F$  jest siłą normalną siły tarcia  $F_f$  na styku powierzchni krzywizny krzywki i stempla, natomiast iloczyn siły tarcia  $F_f$  oraz ramienia  $y_{ST}$  równy jest momentowi tarcia  $M_T$  [3]

Na rysunku 20 przedstawiono charakterystykę zmian momentu  $M_s$  układu napędowego urządzenia zagęszczającego wyznaczonego na podstawie rozwiązania równania Lagrange'a zapisanego powyżej (1).



Rys. 20. Zmiana momentu  $M_s$  na jaki jest zapotrzebowanie podczas cyklu zagęszczania biomasy w postaci trocin dębowych w funkcji kąta obrotu krzywki  $\varphi$  [3]

Powyższa charakterystyka pozwala zrealizować powtarzający się cyklicznie proces zagęszczania materiału sypkiego, w tym przypadku trocin. Fazy pojedynczego cyklu zagęszczania przedstawiono poglądowo na rysunku 21.



Rys. 21. Fazy pojedynczego cyklu zagęszczania trocin, gdzie począwszy od lewej strony faza napełniania komory tulei, kolejno faza zagęszczania i ostatnia faza wypchnięcia zagęszczonego materiału [3]

Zaproponowany przez habilitanta model układu napędowego urządzenia zagęszczającego może stanowić elastyczne narzędzie do doboru parametrów układu napędowego urządzenia zagęszczającego w postaci momentu obrotowego, prędkości obrotowej oraz przełożenia przekładni redukcyjnej w procesie konstruowania urządzenia do realizacji procesu technologicznego w postaci zagęszczania tłokowego.

Przedstawione powyżej efekty pracy naukowej habilitanta zostały opublikowane w czasopiśmie *Energies* (**Dominik Wilczyński**, Krzysztof Talaśka, Dominik Wojtkowiak, Krzysztof Wałęsa, Szymon Wojciechowski. Selection of the Electric Drive for the Wood Waste Compacting Unit. *Energies* - 2022, vol. 15, iss. 20, s. 7488-1-7488-20, IF = 3,2, 140 pkt. – **udział własny 60%**). W zakresie wymienionej publikacji na **indywidualny wkład habilitanta** składa się: **odpowiedzialność organizacyjna i koordynacyjna dotycząca planowania i realizacji działalności badawczej, pomysł i koncepcja powstania pracy na cele zagospodarowania materiału odpadowego w postaci trocin powstającego w procesie produkcyjnym lokalnego zakładu produkującego parkiety, opracowanie metodyki badawczej wraz z wykonaniem badań eksperymentalnych, pozyskanie materiału do badań i jego przygotowanie oraz przygotowanie stanowiska badawczego, opracowanie wyników badań w formie pozyskania właściwych charakterystyk dla oceny prawidłowości przebiegu spodziewanych/prognozowanych zmian wielkości badanych w danym eksperymencie i na danym stanowisku. Autor przedmiotowego referatu przygotował treść manuskryptu w tym opis metodyki badań, opis przygotowania materiału do badań, opisy wykorzystanych w badaniach stanowisk badawczych wizualizacje wyników badań i na ich podstawie wyznaczonych wielkości. Następnie był odpowiedzialny za odpowiedzi na uwagi recenzentów i wprowadzanie zmian**

wynikających z tych uwag. **Habilitant zbudował model matematyczny służący doborowi parametrów układu napędowego zespołu zagęszczającego zweryfikowanego badaniami eksperymentalnymi. Może on służyć jako narzędzie w procesie konstruowania urządzenia realizującego proces technologiczny zagęszczania sypkich materiałów biomasy i nie tylko, celem uzyskania aglomeratu o wymaganych właściwościach fizyko-mechanicznych. W efekcie może to przyspieszyć proces konstruowania urządzenia do zagęszczania tego typu materiału działającego na zasadzie współpracy elementów takich jak stempel-tuleja.**

Rozmiar wielkości cząstek trocin drewna jako pozostałości procesów poprodukcyjnych ma istotne znaczenie pod kątem wytwarzania biopaliwa stałego w procesie zagęszczania. Habilitant podjął się takich badań analizując rozkład wielkości cząstek drewna jako pozostałości po obróbce drewna realizowanego w różnych zakładach produkujących parkiety. Materiał badawczy stanowiły trociny dębowe o różnej wilgotności. W badaniach wykorzystano metodę analizy sitowej, która umożliwiła określenie rozkładu danej próbki na frakcje o określonych wielkościach cząstek. Każdą próbkę dzielono na cztery frakcje o rozmiarach <1,0 mm, 1,0–2,5 mm, 2,5–5,0 mm i >5 mm. Kolejno wyznaczano udział masowy każdej frakcji w próbce pobranego materiału. Przeprowadzone badania wykazały podobieństwo próbek pochodzących z różnych zakładów produkcyjnych, biorąc pod uwagę rozkład frakcyjny jak również kaloryczność i gęstość usypową. Omówione badania pozwolą na przeprowadzenie kolejnych w postaci określenia najlepszego rozmiaru cząstek trocin pod kątem uzyskania biopaliwa o jak najlepszych właściwościach fizycznych, ale również pod kątem energochłonności procesu zagęszczania [4].

Omówione powyżej badania zostały opublikowane w czasopiśmie Warguła Łukasz, **Wilczyński Dominik**, Wieczorek Bartosz, Palander Teijo, Gierz Łukasz, Nati Carla, Sydor Maciej: Characterizing Sawdust Fractional Composition from Oak Parquet Woodworking for Briquette and Pellet Production, Adv. Sci. Technol. Res. J. 2023; 17(5):236–247, IF = 1,1, punktacja MNiSW 100 pkt., publikacja indeksowana w bazie Scopus i WoS – **udział własny 20%**. **W zakresie wymienionej publikacji na indywidualny wkład habilitanta składa się: odpowiedzialność organizacyjna i koordynacyjna dotycząca planowania i realizacji działalności badawczej, pomysł i koncepcja powstania pracy na cele zagospodarowania materiału odpadowego w postaci trocin powstającego w procesie produkcyjnym zakładów produkujących parkiety, opracowanie metodyki badawczej wraz z wykonaniem badań eksperymentalnych, pozyskanie materiału do badań i jego przygotowanie oraz przygotowanie stanowiska badawczego, opracowanie wyników badań w formie pozyskania właściwych charakterystyk dla oceny prawidłowości przebiegu spodziewanych/prognozowanych zmian wielkości badanych w danym eksperymencie i na danym stanowisku.**

#### **4.3.2. Badania i modelowanie parametrów procesu technologicznego cięcia materiałów biomasy [5-9]**

Obecnie wiele naukowców prowadzi badania procesu cięcia lub rozdrabniania materiałów biomasy celem zmniejszenia wymiarów początkowych wynikających z naturalnego wzrostu i cech biologicznych. Biomasa jest cięta lub rozdrabniana na cząstki/fragmenty o mniejszych wymiarach. Robi się to głównie na potrzeby bezpośredniego przeznaczenia do spalania lub

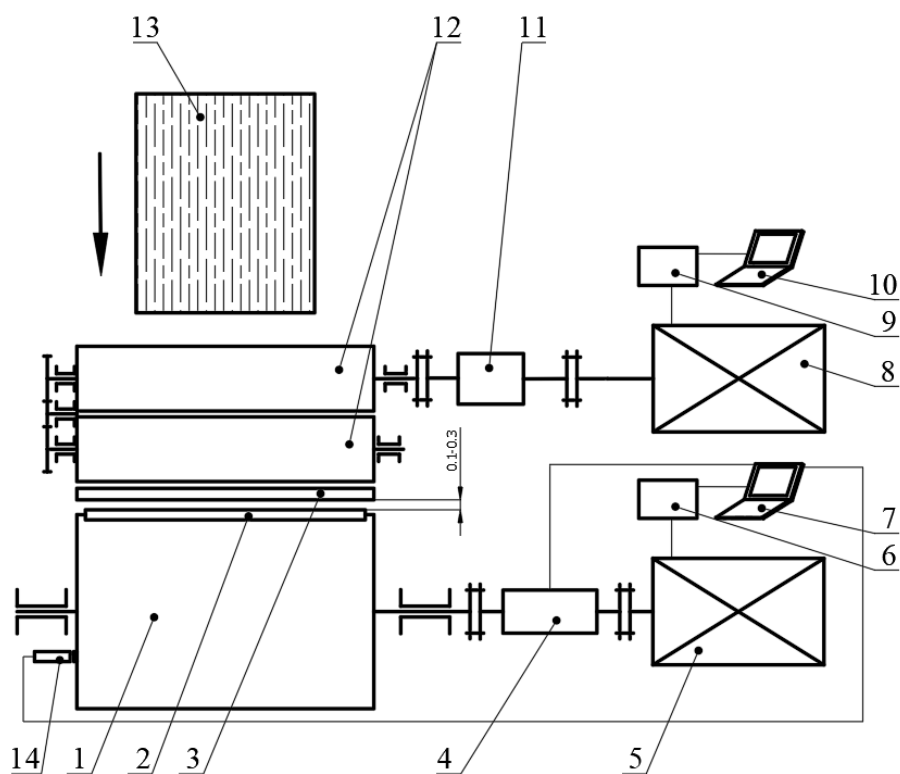
zagęszczania różnymi technikami (urządzeniami) celem uzyskania biopaliwa (aglomeratu) o jak najlepszych parametrach fizyko-mechanicznych umożliwiającym jego wykorzystanie jako ekologicznego źródła energii. Proces cięcia (rozdrabniania) biomasy ma duży wpływ na właściwości biopaliwa uzyskanego z biomasy, jak również na magazynowanie i sam proces jej zagęszczania. Należy go traktować jako jeden z pierwszych etapów, który wpływa na ogólną wydajność i ekonomikę procesu wytwarzania zagęszczonego biopaliwa z biomasy odpadowej. Cięcie lub rozdrabnianie można określić inaczej dezintegracją mechaniczną, który zmniejsza rozmiar cząstek i powoduje obniżenie krystaliczności celulozy. Obniżenie wielkości cząstek przyczynia się do wzrostu przepływu ciepła i masy w procesie zagęszczania co bezpośrednio przekłada się na większą wydajność tego procesu. Dalszą konsekwencją tego jest obniżenie energochłonności procesu zagęszczania co podnosi ekonomiczność.

Parametry pociętej lub rozdrobnionej biomasy mają bezpośredni wpływ na efektywność jej zagęszczania oraz właściwości mechaniczne i energetyczne brykiety lub peletu. Opisuje to w swoich pracach wielu badaczy. Chodzi tu mianowicie o osiągnięcie jak największego współczynnika koncentracji energii ( $MWh/m^3$ ) oraz odporność na uszkodzenia mechaniczne podczas transportu.

Dla uzyskania odpowiednich właściwości biopaliwa uzyskanego w procesie zagęszczania tłokowego, bądź ślimakowego konieczna jest modyfikacja właściwości fizyko-chemicznych luźnej biomasy celem zwiększenia jej zdolności do poddania się procesowi aglomeracji. Chodzi tu głównie i między innymi o dobór właściwego rozmiaru cząstek. Wielu badaczy zajmuje się problematyką cięcia i rozdrabniania biomasy, a dokładniej mówiąc wpływem parametrów tych procesów takich jak geometria ostrzy noży tnących, układ kinematyczny urządzenia tnącego, wilgotność ciętej biomasy, stopień jej deformacji itp.

Autor przedmiotowego referatu podjął się prac badawczych procesu cięcia materiałów biomasy, celem oceny wpływu parametrów wejściowych procesu na siłę potrzebną do przecięcia określonego materiału, oceny energochłonności procesu cięcia oraz stanu obciążenia ostrza noża.

Habilitant przeprowadził proces konstruowania specjalistycznego stanowiska badawczego, wykonał dokumentację w postaci rysunków złożeniowych i wykonawczych. Dokonał doboru i zakupu elementów znormalizowanych po czym złożył stanowisko badawcze, którego schemat przedstawiono na rysunku 22. Składa się ono z dwóch zespołów [5]. Pierwszym z nich jest zespół wałów wciągających 12 napędzanych silnikiem elektrycznym 8 poprzez przekładnię redukcyjną 11. Parametry pracy silnika 8, takie jak napięcie, prąd i moment obrotowy, rejestrowano za pomocą falownika 9 oraz sterującego nim komputera 10 z zainstalowanym dedykowanym oprogramowaniem. Wały wciągające 12 stykają się swoimi powierzchniami walcowymi pokrytymi poliuretanem o twardości 60 Sh (Rys. 22). Moc silnika 8 napędzającego zespół wałów wciągających wynosiła 3,0 kW [5].



Rys. 22. Schemat przedstawiający budowę stanowiska badawczego wykorzystanego w badaniach procesu cięcia biomasy w postaci słomy pszen-żyta gdzie: 1 – bęben obrotowy, 2 – noże tnące, 3 – przeciw-ostrze, 4 – czujnik momentu obrotowego, 5 – silnik elektryczny zespołu tnącego, 6 – falownik, 7 – komputer, 8 – silniki elektryczny zespołu wciągającego, 9 – falownik, 10 – komputer, 11 – reduktor, 12 – wały wciągające, 13 – próbka słomy pszen-żyta poddawana cięciu [5]

Widok ogólny stanowiska do badań procesu technologicznego cięcia biomasy przedstawiono na rysunku 23 [5].



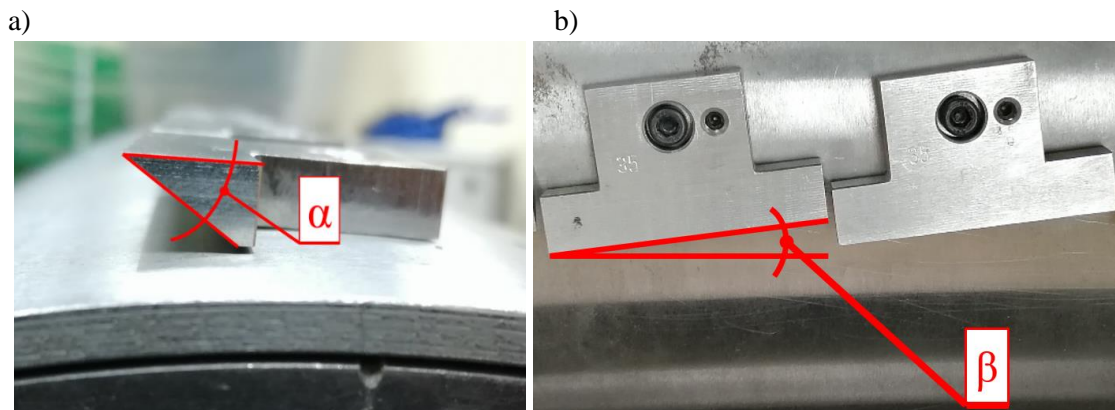
Rys. 23. Widok ogólny stanowiska do badań procesu cięcia biomasy [5]

Drugi zespół stanowi zespół tnący składający się z obrotowego bębna 1, do którego przykręcone są noże tnące 2 (Rys. 24). Zespół ten napędzany jest bezpośrednio z silnika elektrycznego 5 o mocy 2,2 kW, sterowanego falownikiem 6 i jednostką komputerową 7 (Rys. 22). Czujnik momentu obrotowego 4 został zabudowany pomiędzy wałem bębna 1 z nożami 2, a wałem silnika elektrycznego 5. Sygnał napięciowy z czujnika jest rejestrowany za pomocą karty pomiarowej zabudowaną w komputerze stacjonarnym 7. Prędkość bębna nożowego 2 jest mierzona za pomocą czujnika indukcyjnego 14, którego sygnał jest rejestrowany za pomocą karty pomiarowej. Noże tnące wykonano ze stali narzędziowej 1.2311 (40CrMnMo7) i połączono z bębniem tnącym za pomocą połączeń gwintowych (Rys. 24).



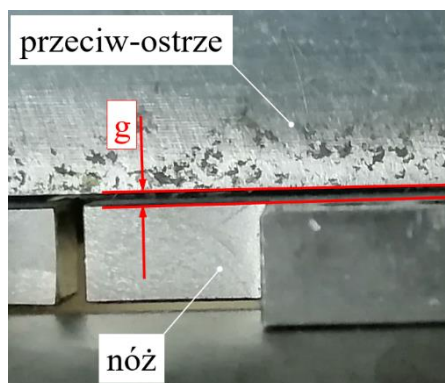
Rys. 24. Widok ogólny na obrotowy bęben z przymocowanymi nożami [5]

Jak wspomniano powyżej do obrotowego bębna są przykręcane zaprojektowane przez habilitanta noże o specjalnej geometrii gdzie możliwe jest ich przymocowanie do powierzchni bębna. Noże posiadają zróżnicowany kąt ostrza  $\alpha$  z przedziału  $30-90^\circ$  z gradacją co  $5^\circ$  (Rys. 25). Możliwy jest również kątowny obrót noży celem wprowadzenia kolejnego zmiennego parametru procesu cięcia w postaci kąta natarcia  $\beta$  ostrza noża (Rys. 25).



Rys. 25. Widok noży tnących: (a) widok pojedynczego noża z zaznaczonym kątem ostrza  $\alpha$ , (b) widok pojedynczego noża z zaznaczonym kątem natarcia  $\beta$  [5]

Stanowisko badawcze umożliwia płynną regulację odległości pomiędzy ostrzami noży, a przeciw-ostrzem (Rys. 26).



Rys. 26. Widok odległości  $g$  między ostrzem jednego z noży a przeciw-ostrzem [5]

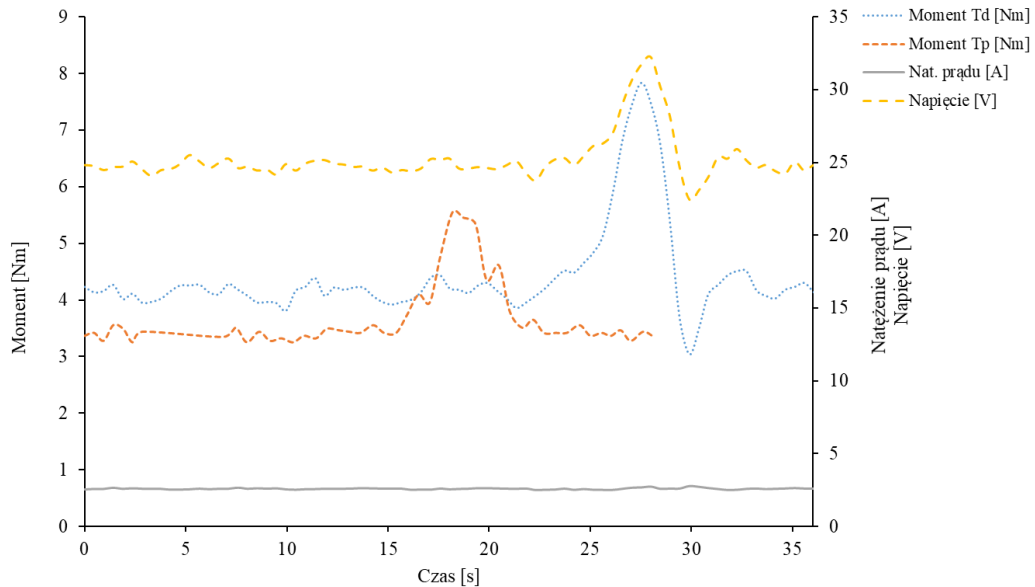
Stanowisko badawcze umożliwia wprowadzenie w przestrzeń wałów wciągających próbki w postaci na przykład zbioru łodyg słomy zboża. Rysunek 27 przedstawia próbkę słomy przygotowaną do pocięcia w pojedynczym teście.



Rys. 27. Widok na odważoną próbkę słomy przed wsunięciem jej w przestrzeń wałów wciągających [5]

Celem wykorzystania przedstawionego powyżej stanowiska do badań cięcia biomasy, habilitant opracował metodykę badań procesu cięcia. W związku z czym w pierwszej kolejności pozyskano materiał badawczy w postaci słomy pszenżyta z terenów Wielkopolski. Materiał ten sezonowano przez okres 6 miesięcy w zamkniętym pomieszczeniu w warunkach temperatury i wilgotności pokojowej. Zbadana wilgotność słomy przy użyciu wago-suszarki wynosiła średnio 7,09%. Przed przystąpieniem do badania ustawiano prędkość obrotową zespołu wałów wciągających wynoszącą 18 obr/min co dawało prędkość liniową próbki wynoszącą około 94 mm/sec. Prędkość obrotowa bębna 1 z nożami 2 wynosiła 150 obr/min. W kolejnym kroku wsuwano odmierzoną wagowo próbkę słomy (Rys. 27), której masa wynosiła  $50\text{ g} \pm 1\text{ g}$ , w przestrzeń wałów wciągających. Tak przygotowany wstępnie materiał posłużył do badań procesu technologicznego jego cięcia. Wartość odległości pomiędzy ostrzem noży, a przeciw-ostrzem wynosiła kolejno  $g = 0,1, 0,2$  i  $0,3$  mm. Dla każdej wartości kąta ostrzy noży  $\alpha$  zmieniano podczas badań wartość odległości pomiędzy ostrzem i przeciw-ostrzem. W ten sposób dla jednej kombinacji wartości kąta ostrzy  $\alpha$  i odległości pomiędzy ostrzami i przeciw-ostrzem, badanie powtarzano dziesięciokrotnie rejestrując wyżej wymienione parametry

procesu. Wsunęta próbka była przemieszczana za pośrednictwem wałów wciągających 12 do przestrzeni ostrzy noży i przeciw-ostrza, gdzie następowało cięcie. Na rysunku 28 przedstawiono przykładowy przebieg zmian rejestrowanych parametrów procesu podczas cięcia jednej próbki słomy [5].



Rys. 28. Przykładowe charakterystyki zmian momentu na wale bębna noży tnących  $T_c$ , na wale silnika wałów wciągających  $T_d$  oraz zmian prądu i napięcia silnika elektrycznego napędzającego bęben noży tnących uzyskane podczas cięcia próbki słomy dla parametrów  $\alpha = 35^\circ$ ,  $\beta = 0^\circ$  oraz  $g = 0,1$  mm [5]

Na podstawie zarejestrowanych wartości natężenia prądu oraz napięcia wyznaczono wartość mocy potrzebnej do przecięcia próbki słomy. Zarejestrowany sygnał z czujnika indukcyjnego umożliwił określenie zmiany prędkości obrotowej bębna noży tnących, a w konsekwencji zmiany (spadku) energii kinetycznej obracającego się bębna z nożami. Uzyskane wartości momentu na wale bębna noży tnących  $T_c$  oraz wałów wciągających  $T_d$  były bezpośrednią odpowiedzią eksperymentu przy czym wartość  $T_d$  posłużyła do korekcji wartości wyżej wymienionych parametrów procesu cięcia pod kątem niejednorodności odważonej już próbki słomy [5].

Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych poddano analizie wariancji ANOVA dla zmiennych parametrów wejściowych ( $\alpha$  – kąt ostrza noży,  $g$  – odległość pomiędzy ostrzami noży i przeciw-ostrzem) i odpowiedzi wyznaczonych na podstawie zarejestrowanych wielkości w postaci: momentu silnika wałów wciągających  $T_d$  [Nm], momentu na wale bębna z nożami  $T_c$  [Nm], straty energii kinetycznej obracającego się bębna z nożami zużytej na potrzebę przecięcia próbki słomy  $E_c$  [kJ/t] oraz mocy zużywanej podczas cięcia  $P$  [kW/t]). Wartość  $E_c$  wyznaczono na podstawie zmiany energii kinetycznej obracającej się masy w postaci bębna z nożami. Zmianę tej energii określano na podstawie zmierzonego bezpośrednio spadku prędkości obrotowej bębna podczas cięcia próbki słomy. Z kolei wartość mocy elektrycznej potrzebnej do przecięcia próbki określono na podstawie zmierzonej wartości napięcia  $U$  [V] i prądu  $I$  [A] silnika elektrycznego napędzającego bezpośrednio bęben z nożami (Rys. 22 i 23). Analiza wariancji ANOVA umożliwiła poszukiwanie wzajemnych zależności pomiędzy ww. parametrami wejściowymi (zmiennymi wejściowymi eksperymentu), a odpowiedziami tegoż



eksperymentu. Uzyskano w ten sposób funkcyjne zależności zmian odpowiedzi eksperymentu i wpływ na ich wartości zmiennych procesu cięcia. Zarejestrowany moment silnika elektrycznego napędzającego zespół wałów wciągających  $T_d$  posłużył do korekty wartości momentu na wale zespołu tnącego  $T_c$ , straty energii kinetycznej obracającego się bębna z nożami zużytej na potrzebę przecięcia próbki słomy  $E_c$  oraz mocy zużywanej podczas cięcia  $P$ . Jest to spowodowane tym, że mimo odważania próbek przeznaczonych do badań każda z nich była niejednorodna, co wpływało na niewielkie odchylenia wyznaczanych parametrów. Dowodzą temu zestawione w poniższej tabeli wartości momentu na wale silnika elektrycznego 8 napędzającego zespół wałów wciągających (Rys. 22 i 23) [5].

Tabela 6. Średnie wartości momentu silnika elektrycznego napędzającego zespół wałów wciągających zarejestrowane podczas cięcia nożami o kątach ostrzy w zakresie 30-85° dla wartości  $g = 0,1$  mm [5]

Kąt ostrza $\alpha$ [°]	Moment $T_p$ [Nm]
85	5,06
80	5,1
75	5,29
70	5,57
65	5,81
60	5,75
55	5,26
50	5,66
45	5,25
40	5,63
35	5,61
30	6,09

Zestawione w powyższej tabeli zróżnicowanie zarejestrowanego momentu  $T_d$  na wale wałów wciągających próbkę słomy świadczy o zmiennym oporze jakie dana próbka dawała podczas jej wciągania. Stanowi to o niejednorodnym (zróżnicowanym) składzie danej próbki, na którą składają się łodygi chociażby o odmiennym przekroju poprzecznym łodygi, budowie itd. Habilitant zaproponował sposób wykorzystania zróżnicowanych wartości momentu  $T_d$  do korekty zarejestrowanej wartości momentu na wale bębna noży tnących  $T_c$ , ale również wielkości, które zostały pośrednio wyznaczonego na podstawie wyników uzyskanych w eksperymencie. Korekcję tą dokonano wg poniższej zależności (2):

$$\begin{aligned}
 T_{da} &= \left\{ \left[ \left( \frac{T_{pmax} - T_{pmin}}{2} \right) - T_{px} \right] \div T_{px} \cdot T_{dx} \right\} + T_{dx} ; \text{ if } T_{px} < \frac{T_{pmax} - T_{pmin}}{2}, \\
 T_{da} &= \left\{ \left[ \left( \frac{T_{pmax} - T_{pmin}}{2} \right) - T_{px} \right] \div T_{px} \cdot T_{dx} \right\} - T_{dx} ; \text{ if } T_{px} > \frac{T_{pmax} - T_{pmin}}{2},
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

gdzie:

$x$  – i-ta próba cięcia dla określonych wartości  $\alpha$  i  $g$ ,

$T_{pmin}$  – minimalna zarejestrowana wartość momentu na wale silnika elektrycznego napędzającego wały wciągające,

$T_{pmax}$  – maksymalna zarejestrowana wartość momentu na wale silnika elektrycznego napędzającego wały wciągające,

$T_{px}$  – zarejestrowana wartość momentu na wale silnika wałów wciągających dla określonych wartości  $\alpha$  i  $g$ ,

$T_{dx}$  – zarejestrowana wartość momentu na wale bębna noży tnących dla określonych wartości  $\alpha$  i  $g$ ,

$T_{da}$  – skorygowana wartość momentu na wale bębna noży tnących [5].

Według habilitanta stanowi to wiarygodne narzędzie korekcji wyników przez co skorygowano rozrzut wyników badań, a zarazem błąd jaki wprowadza w badaniach tego typu materiałów ich niejednorodność. Należy tutaj również wspomnieć, że stanowisko badawcze umożliwia indywidualne ustawienie prędkości przesuwu liniowego wprowadzanej próbki słomy do pocięcia oraz prędkości obrotowej bębna z nożami tnącymi. W efekcie jest możliwa regulacja w szerokim zakresie wartości długości odcinków na jakie ma zostać pocięty materiał biomasy. Zatem można uzyskać pocięty materiał słomy o odpowiedniej wyjściowej wielkości cząstek do przeprowadzenia procesu technologicznego ich zagęszczania celem uzyskania biopaliwa. W przeprowadzonych powyżej badaniach wartości te były stałe. Wyniki badań cięcia poddano analizie wariancji ANOVA co przedstawiono poniżej. Uzyskano w ten sposób modele matematyczne zmian poszczególnych odpowiedzi eksperymentu w funkcji odległości pomiędzy ostrzem i przeciw-ostrzem oraz kąta ostrza [5].

W tabeli 7 przedstawiono przykładowe wyniki analizy ANOVA dla momentu na wale bębna noży tnących zarejestrowanego bezpośrednio podczas badań. W analizie wykorzystano zredukowany model kwadratowy (Reduced Quadratic model) na bazie kryterium wartości poziomu istotności  $p = 0,1$ , dla którego  $R^2 = 0,6369$ . Według tabeli 3 wartość statystyki F modelu wynosi 28,95 co oznacza, że model jest znaczący. Natomiast wartości poziomu istotności  $p$  dla poszczególnych składników modelu są mniejsze niż 0,05 co oznacza, że są znaczącymi jego składnikami. Wartość prognozowanego współczynnika determinacji wynosząca  $R^2 = 0,5742$  i skorygowanego współczynnika  $R^2 = 0,6149$ , oraz różnica pomiędzy nimi mniejsza niż 0,2, świadczy, że model może być wykorzystany do poruszania się w jego przestrzeni projektowej eksperymentu. Model wyrażony jest zależnością (3). Charakterystykę wykreśloną na podstawie modelu przedstawiono na rysunku 29 [5].

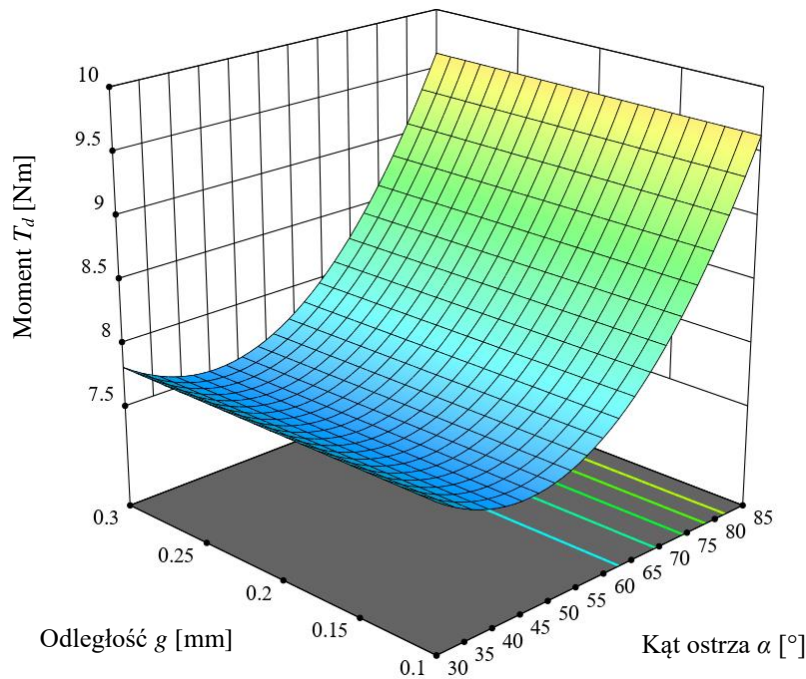
$$T_d = 10,0958 - 0,114559 \cdot \alpha + 0,00128378 \cdot \alpha^2, \quad (3)$$

$T_d$  – moment na wale bębna noży tnących [Nm],  $\alpha$  – kąt ostrza [°]

Tabela 7. Wyniki analizy ANOVA dla wartości momentu na wale bębna noży tnących  $T_d$  [Nm] [5]

Źródło	Suma kwadratów	df <sup>a</sup>	Średnia kwadratowa	F-wartość statystyki	p-wartość poziomu istotności	
Model	15,86	2	7,93	28,95	< 0,0001	znaczący
$\alpha$	15,11	1	15,11	55,16	< 0,0001	
$\alpha^2$	4,12	1	4,12	15,06	0,0005	

<sup>a</sup> stopnie swobody.



Rys. 29. Moment  $T_d$  w funkcji kąta ostrzy noży  $\alpha$  i odległości  $g$  pomiędzy ostrzami noży i przeciw-ostrzem [5]

Analizując wartości parametrów z tabeli 14, znaczący wpływ na wzrost wartości momentu ma wartość kąta ostrzy noży tnących  $\alpha$  ( $F = 55,16$ ). Dla wartości kąta ostrza noża przekraczających około  $50^\circ$  wartość momentu  $T_d$  gwałtownie rośnie.

Pozostałe wyniki analizy ANOVA dla zużycia energii  $E_c$  podczas procesu cięcia oraz mocy potrzebnej do przecięcia próbki słomy dla  $P$  [kW/t] w zależności od kąta ostrza noży  $\alpha$  [°] i odległości pomiędzy ostrzem i przeciw-ostrzem  $g$  [mm] przedstawiono w artykule naukowym [5].

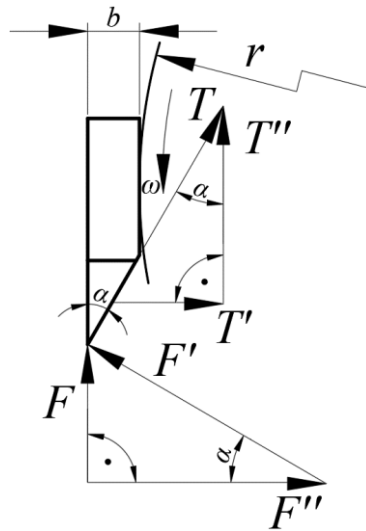
W tabeli 8 zestawiono hierarchicznie wg wpływu na bazie wartości statystyki modelu F, składniki i interakcje pomiędzy nimi ( $\alpha$  – kąt ostrza [°],  $g$  – odległość pomiędzy ostrzem i przeciw-ostrzem [mm]) dla poszczególnych modeli odwzorowujących przestrzeń eksperymentu w odniesieniu do analizowanych odpowiedzi w postaci momentu na wale zespołu tnącego  $T_d$  [Nm], zużycia energii  $E_c$  [kJ/t] oraz mocy  $P$  [kW/t] [5].

Tabela 8. Hierarchiczne zestawienie parametrów (nastaw) procesu cięcia w zależności od wartości statystyki F [5]

Odpowiedź	1	2	3	4	5
$T_d$	$\alpha$	$\alpha^2$	-	-	-
$E_c$	$\alpha^6$	$g$	$\alpha^4$	$\alpha^2 \cdot g$	$\alpha^5$
$P$	$\alpha$	$\alpha^2$	-	-	-

Uzyskano w ten sposób informację, że kluczową zmienną procesu jest kąt ostrza noża  $\alpha$ , natomiast zmienna  $g = 0,1, 0,2, 0,3$  mm (Rys. 26) jako wartość odległości pomiędzy ostrzem i przeciw-ostrzem nie wpływa znacząco na wartości siły tnącej  $F$ . Dało to możliwość wprowadzenia w badaniach zmiennej w postaci kąta natarcia ostrza noża  $\beta$  w takim zakresie wartości gdzie wartość odległości  $g$  zmieniała się w zakresie 0,1-0,3 mm. Należy tu zwrócić uwagę na fakt, że zmiana kąta natarcia ostrza noża  $\beta$  ( $\beta > 0$ ) przymocowanego do powierzchni

walcowej bębna obrotowego powoduje zmianę odległości  $g$  pomiędzy ostrzem noża a przeciw-  
ostrzem mierząc tę odległość w różnych punktach leżących na linii ostrza noża. Ze względu na  
to, że odległość  $g$  nie miała znaczącego wpływu na rejestrowane wartości odpowiedzi  
eksperymentu (Tabela 8), zmieniano wartości kąta natarcia  $\beta$  (Rys. 25) w takim zakresie aby  
odległość  $g$  zmieniała się w przedziale wartości  $g = 0,1-0,3$  mm. Interesującym elementem tej  
pracy badawczej jest analiza rozkładu sił na ostrzu noża (Rys. 30). Na tej podstawie  
wyznaczono wartość parametru eksploatacyjnego  $f$  zależnego od kąta ostrza  $\alpha$  określającego  
procentowy udział momentu tarcia  $T_f$  w wartości momentu cięcia  $T_c$  zmierzonego  
w eksperymencie [5].



Rys. 30. Model analizowanego rozkładu sił oddziałujących na ostrzu pojedynczego noża gdzie:  
 $F$  – siła tnąca,  $F'$  – składowa siły tnącej, normalna do powierzchni ostrza,  $F''$  – składowa pozioma siły  
tnącej,  $T$  – siła tarcia na powierzchni bocznej ostrza noża,  $T'$  – składowa pozioma siły tarcia  $T$ ,  
 $T''$  – składowa pionowa siły tarcia  $T$ ,  $\alpha$  – kąt ostrza noża,  $b$  – grubość noża,  $r$  – promień bębna, do  
którego przymocowane są noże,  $\omega$  – prędkość kątowna bębna noży tnących [5]

Analizując rozkład sił na ostrzu pojedynczego noża przedstawiony na rysunku 30, tak jak  
wcześniej wspomniano można zapisać zależność na moment na wale noży tnących  $T_d$  jako  
sumę momentu cięcia  $T_c$  i momentu tarcia  $T_f$  [5]:

$$T_d = T_c + T_f, \quad (4)$$

Ostatecznie zależność na moment tarcia można zapisać w postaci [5]:

$$T_f = F \cdot \mu \cdot \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \cdot (r + 0,5 \cdot b). \quad (5)$$

Po podstawieniu i przekształceniu zależność na wartość  $T_d$  jest następująca [5]:

$$T_d = T_c \cdot \left(1 + \frac{\mu \cdot \cos \alpha}{\sin \alpha} \cdot \frac{r + 0,5 \cdot b}{r + b}\right), \quad (6)$$

gdzie można wyróżnić wartość parametru  $f$  zależnego od kąta ostrza  $\alpha$  określającego procentowy udział momentu tarcia  $T_f$  w wartości momentu  $T_d$  zmierzonego w eksperymencie [5]:

$$f = \frac{\mu \cdot \cos\alpha}{\sin\alpha} \cdot \frac{r + 0,5 \cdot b}{r + b}, \quad (7)$$

zależność na wartość momentu cięcia  $T_c$  przyjmuje postać:

$$T_c = \frac{T_d}{1 + \frac{\mu \cdot \cos\alpha}{\sin\alpha} \cdot \frac{r + 0,5 \cdot b}{r + b}}. \quad (8)$$

Powyższe zależności (7) oraz (8) zostały wyznaczone dla poszczególnych wartości kąta ostrzy  $\alpha$  oraz wartości odległości pomiędzy ostrzem i przeciw-ostrzem przy wykorzystaniu zarejestrowanej podczas badań wartości momentu na wale noży tnących  $T_d$ . Współczynnik tarcia pomiędzy słomą, a materiałem noży przyjęto o wartości  $\mu = 0,13$  na podstawie wyników badań przedstawionych w publikacji [Afzalnia, S. & Roberge, M. (2007). Physical and mechanical properties of selected forage materials. Canadian Biosystems Engineering, 49, 2.23-2.27. Według powyższych zależności (7) i (8) ze wzrostem wartości kąta ostrza  $\alpha$ , rośnie wartość  $T_c$  natomiast wartość parametru  $f$  maleje. Zależność wyrażającą parametr  $f$  można więc traktować jako funkcję przeciwną do funkcji wyrażającej wartość  $T_c$ . Uzyskane wartości momentu cięcia  $T_c$  oraz parametru  $f$  uwzględniono w kolejnej analizie wariancji ANOVA. Umożliwiło to weryfikację wyników badań przedstawionych powyżej poprzez dokonanie optymalizacji w poszukiwaniu wartości parametrów wejściowych procesu cięcia, a mianowicie kąta  $\alpha$  oraz odległości  $g$ , celem zminimalizowania wartości energochłonności  $E_c$ , mocy  $P$ , oporów cięcia w postaci momentu tarcia  $T_f$  i momentu cięcia  $T_c$ . Przed dokonaniem tego, przeprowadzono analizę wariancji ANOVA dla wyznaczonej powyżej wartości momentu cięcia  $T_c$  oraz parametru  $f$ . W tabeli 9 przedstawiono wyniki analizy wariancji dla wartości momentu cięcia  $T_c$ , w której wykorzystano zredukowany model kwadratowy (Reduced Quadratic model) na bazie kryterium wartości poziomu istotności  $p = 0,1$ , dla którego  $R^2 = 0,8085$ . Wartość statystyki F modelu wynosi 131,71 co oznacza, że model jest znaczący (Tabela 9). Natomiast wartości poziomu istotności  $p$  dla poszczególnych składników modelu są mniejsze niż 0,05 co oznacza, że są znaczącymi jego składnikami. Wartość prognozowanego współczynnika determinacji równa  $R^2 = 0,7742$  i skorygowanego współczynnika wynosząca  $R^2 = 0,7968$ , oraz różnica pomiędzy nimi mniejsza niż 0,2, świadczy, że model może być wykorzystany do poruszania się w jego przestrzeni projektowej eksperymentu. Model wyrażony jest zależnością (18). Charakterystykę wykreśloną na podstawie modelu przedstawiono na rysunku 31 [5].

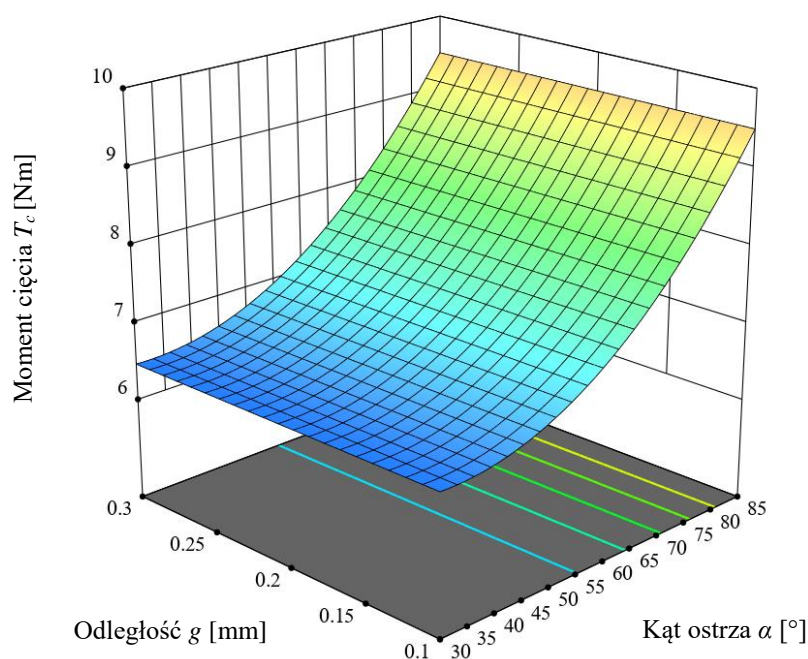
$$T_c = 7,56946 - 0,0688981 \cdot \alpha + 0,00107734 \cdot \alpha^2, \quad (9)$$

$T_c$  – moment cięcia [Nm],  $\alpha$  – kąt ostrza [°].

Tabela 9. Wyniki analizy ANOVA dla momentu cięcia –  $T_c$  [Nm] [5]

Źródło	Suma kwadratów	df <sup>a</sup>	Średnia kwadratowa	F-wartość statystyki	P-wartość poziomu istotności	
Model	35,34	2	17,67	69,64	< 0,0001	znaczący
$\alpha$	35,32	1	35,32	139,19	< 0,0001	
$\alpha^2$	2,90	1	2,90	11,45	0,0019	

<sup>a</sup> stopnie swobody



Rys. 31. Moment cięcia  $T_c$  w funkcji kąta ostrzy noży  $\alpha$  i odległości  $g$  pomiędzy ostrzami noży i przeciw-ostrzem [5]

Wartość momentu cięcia  $T_c$  spada w funkcji kwadratowej wraz ze spadkiem wartości kąta ostrza  $\alpha$  i to ona ma znaczący wpływ na jego wartość (Tabela 9 i Rys. 31).

Wykonano analizę wariancji wartości parametru  $f$ . W tabeli 10 przedstawiono wyniki tej analizy, w której wykorzystano zredukowany model kwadratowy (Reduced Quadratic model) na bazie kryterium wartości poziomu istotności  $p = 0,1$ , dla którego  $R^2 = 0,9963$ . Model wyrażony jest zależnością (10). Charakterystykę wykreśloną na podstawie modelu przedstawiono na rysunku 32 [5].

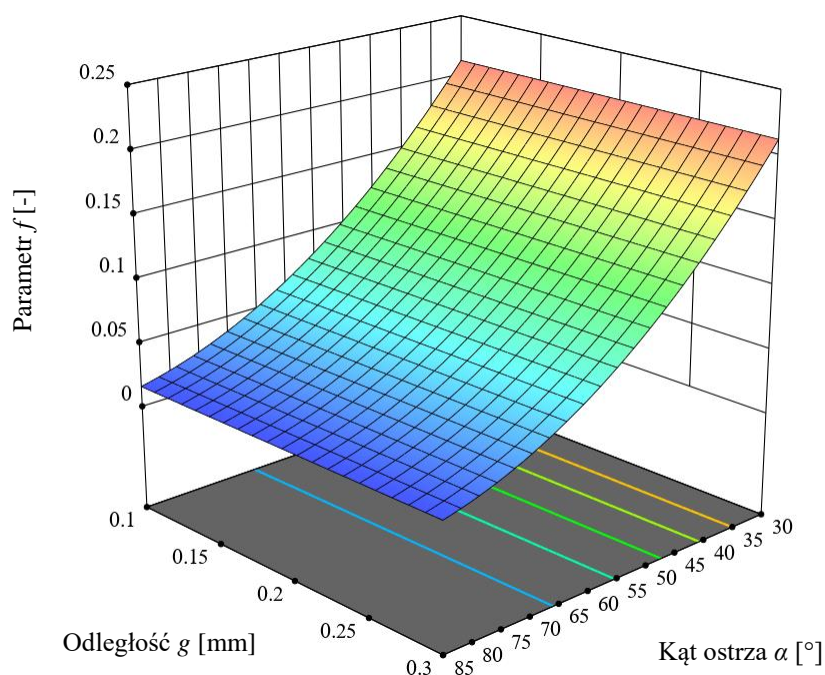
$$f = 0,436297 - 0,00881739 \cdot \alpha + 4,55682e - 0,5 \cdot \alpha^2, \quad (10)$$

$f$  – parametr opisujący udział momentu tarcia  $T_f$  w wartości zarejestrowanego momentu  $T_d$  [-],  
 $\alpha$  – kąt ostrza [°]

Tabela 10. Wyniki analizy ANOVA dla parametru  $f$  [-]

Źródło	Suma kwadratów	df <sup>a</sup>	Średnia kwadratowa	F-wartość statystyki	P-wartość poziomu istotności	
Model	0,1424	2	0,0712	4427,17	< 0,0001	znaczący
$\alpha$	0,1087	1	0,1087	6755,32	< 0,0001	
$\alpha^2$	0,0052	1	0,0052	323,05	< 0,0001	

<sup>a</sup> stopnie swobody



Rys. 32. Charakterystyka zmian wartości parametru  $f$  w zależności od zmian kąta ostrzy noży  $\alpha$  i odległości  $g$  pomiędzy ostrzami noży i przeciw-ostrzem [5]

Analizując wg tabeli 10 i rysunku 32 wartość parametru  $f$  spada ze wzrostem wartości kąta ostrzy noży  $\alpha$  i to wartość tego kąta ma znaczący wpływ na jego wartość.

Wyznaczona charakterystyka zmian parametru  $f$  z wykorzystaniem analizy wariancji ANOVA umożliwiła przeprowadzanie optymalizacji numerycznej przy użyciu programu Design Expert z uwzględnieniem parametrów w postaci kąta ostrza  $\alpha$ , odległości  $g$ , momentu cięcia  $T_c$ , zużycia energii  $E_c$ , potrzebnej mocy  $P$  oraz parametru  $f$ . Otrzymano odpowiedź w postaci najlepszych wartości parametrów wejściowych procesu cięcia w postaci kąta ostrza noża  $\alpha$  oraz wartości  $g$  pod kątem minimalizacji energochłonności tego procesu (tabela 12) [5].

Tabela 11. Kryteria optymalizacji [5]

Zmienna wejściowa/wyjściowa	Kryterium	Wartość min.	Wartość maks.
$\alpha$ [°]	w zakresie	30	90
$g$ [mm]	w zakresie	0,1	0,3
$T_c$ [Nm]	minimum	6,03	10,25
$E_c$ [kJ/t]	minimum	334,04	518,6
$P$ [W/t]	minimum	5694,7	8658,5
$f$ [-]	minimum	0,01112	0,22015

W wyniku optymalizacji numerycznej funkcja celu określona w powyższej tabeli zostaje spełniona dla zbioru wartości parametrów wejściowych eksperymentu przedstawionych w tabeli 12.

Tabela 12. Parametry procesu spełniające kryteria optymalizacji numerycznej [5]

Kąt ostrza $\alpha$ [°]	Odległość $g$ [mm]	$T_d$ [Nm]	$E_c$ [kJ/t]	$P$ [kW/t]	$T_c$ [Nm]	$f$ [-]
55	0,3	7,702	374,2	6118,1	7,083	0,086

Kryteria optymalizacji są spełnione dla wartości odległości pomiędzy ostrzem i przeciw-ostrzem  $g = 0,3$  mm oraz dla wartości kąta ostrza  $\alpha = 55^\circ$  (Tabela 12). Przeprowadzono więc serię badań dla tych parametrów wejściowych procesu z wprowadzeniem trzeciej zmiennej w postaci kąta natarcia ostrzy noży oznaczonego symbolem  $\beta$ . Wyniki eksperymentu z uwzględnieniem zmiany kąta natarcia  $\beta$  porównano z wartościami odpowiedzi uzyskanymi z eksperymentu dla kąta natarcia równego  $\beta = 0^\circ$  (Rys. 25b). Ustawienie noża gdzie wartość kąta natarcia  $\beta$  będzie różna od zera dla noża przytwierdzonego do powierzchni walcowej bębna obrotowego, powoduje zmianę wartości odległości  $g$  po długości ostrza noża. Dlatego też wartość kąta natarcia  $\beta$  dobrano w taki sposób, aby odległość  $g$  przyjmowała wartości w zakresie 0,1-0,3 mm. W ten sposób wykonano badania, jak wcześniej wspomniano, dla wartości kąta ostrza  $\alpha = 55^\circ$  oraz kątów natarcia  $\beta = 9^\circ, 18^\circ$  i  $27^\circ$ . Porównanie wyników badań dla wartości kąta natarcia  $\beta = 0^\circ$  z wynikami uzyskanymi dla wartości  $\beta = 9^\circ, 18^\circ$  i  $27^\circ$  dokonano przy użyciu zestawienia tabelarycznego (Tabela 13) [5].

Tabela 13. Zestawienie porównawcze wyników badań [5]

Kąt ostrza $\alpha$ [°]	Kąt natarcia $\beta$ [°]	Odległość $g$ [mm]	$T_d$ [Nm]	$E_c$ [kJ/t]	$P$ [kW/t]	$f$ [-]
55	0	0,3	7,702	374,2	6118,1	0,086
55	9	0,1-0,3	7,49	402,9	5870,8	
55	18	0,1-0,3	7,20	359,2	5797,4	
55	27	0,1-0,3	7,46	411,2	5789,2	

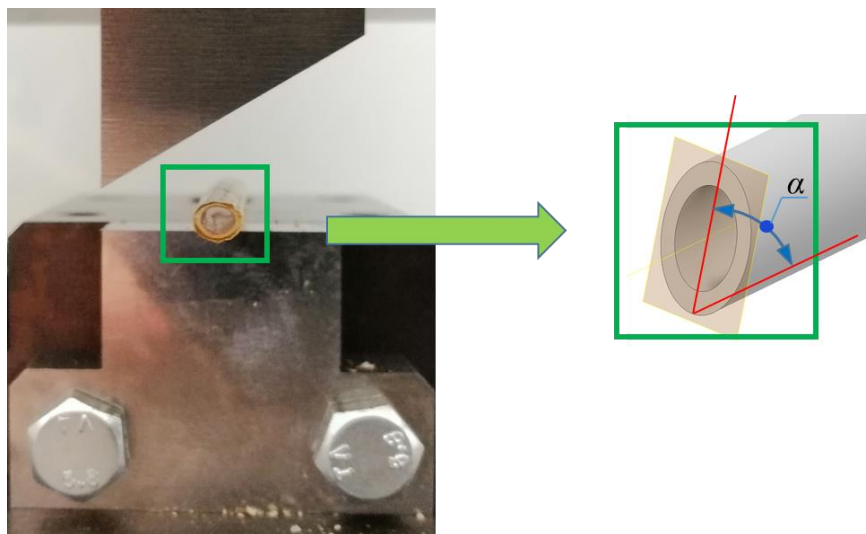
Analizując zastawienie w tabeli 13 można zauważyć niewielką tendencję spadkową wartości momentu  $T_d$ , zużycia energii  $E_c$  oraz mocy  $P$  dla wartości kąta natarcia  $\beta = 18^\circ$ . Jest to około 6,5 % spadku dla  $T_d$ , około 4% dla  $E_c$  oraz niewiele ponad 5% dla mocy  $P$ . Nie wyznaczano dla zmiennej wartości kąta natarcia wartości  $T_c$  oraz  $f$  ponieważ wymagałoby to analizy



odmiennego rozkładu sił na ostrzu pojedynczego noża. Habilitantowi zależało jedynie na zbadaniu możliwości zmniejszenia wartości odpowiedzi eksperymentu dla wartości kąta natarcia noża  $\beta$  różnej od zera. Udało się to osiągnąć dla wartości  $\beta = 18^\circ$ . Należy tutaj podkreślić, że dla niezerowej wartości kąta natarcia odległość  $g$  pomiędzy ostrzami noży i przeciw-ostrzem zmieniała się w zakresie 0,1-0,3 mm mierząc tę wartość wzdłuż długości ostrza pojedynczego noża. Stąd też wynikają jego wartości przyjęte w eksperymencie ponieważ dla tych właśnie wartości  $\beta = 9^\circ, 18^\circ$  i  $27^\circ$  wartość  $g$  mieściła się w przedziale 0,1-0,3 mm. Odnotowano tę informację również w tabeli 13. Wynika to z faktu przytwierdzenia płaskiego noża do walcowej powierzchni obrotowego bębna (Rys. 24 i 25). Mogło to wprowadzić niejednoznaczny spadek wartości odpowiedzi eksperymentu przy zmianie (ze wzrostem) wartości kąta natarcia  $\beta$  (Tabela 13) [5].

Na skutek dokonanej powyżej analizy optymalną wartością kąta ostrza jest  $\alpha = 55^\circ$ , odmiennie w odniesieniu do analizy samych wyników eksperymentu przedstawionych wcześniej. Uzasadnia się w ten sposób ograniczenie górnej i dolnej granicy wartości kąta ostrza na  $85^\circ$  i  $30^\circ$  [5].

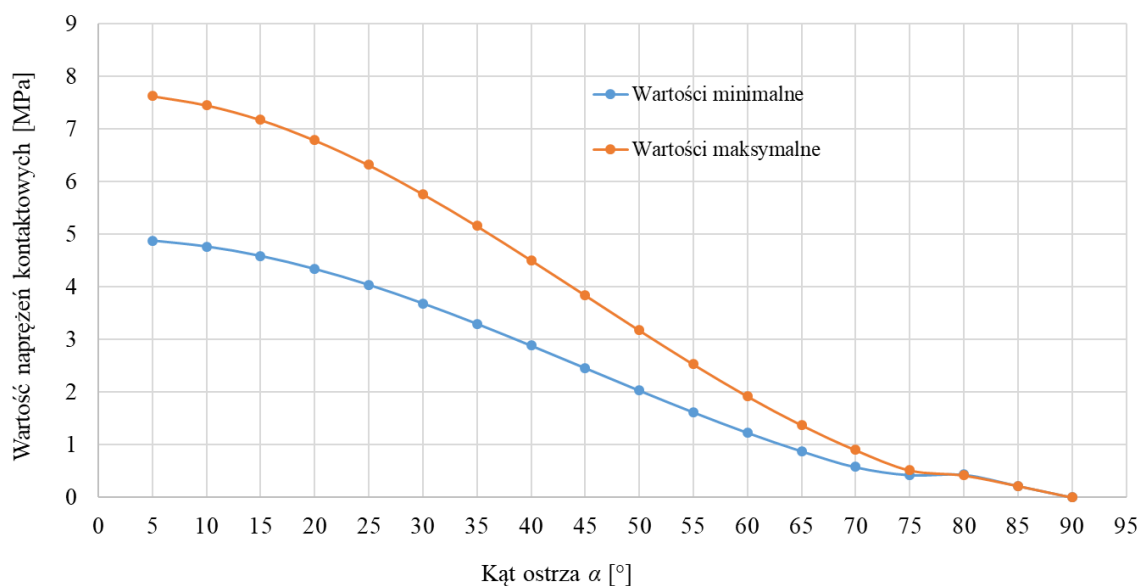
Wyznaczony analitycznie rozkład sił na ostrzu noża oraz ich wartości wykorzystano do budowy modelu numerycznego w systemie Abaqus mający służyć określeniu maksymalnych i minimalnych naprężeń kontaktowych oddziałujących na ostrzu noża, w zależności od wartości kąta ostrza  $\alpha$  (Rys. 33). Dało to uzasadnienie do odrzucenia z badań eksperymentalnych noży o wartości kąta ostrza  $\alpha$  z zakresu  $5-25^\circ$  oraz mniejszych od wartości  $5^\circ$ , ze względu na duże i niedopuszczalne wartości ugięcia ostrza noża [5].



Rys. 33. Widok przekroju rurki tuż po jej przecięciu oraz eliptycznego (modelowego) kształtu jej przekroju dla kąta ostrza różnego od  $90^\circ$  – pochylona płaszczyzna leżąca w płaszczyźnie przekroju modelu rurki odpowiada pochylej płaszczyźnie ostrza noża [5]

Rozkład wartości naprężeń kontaktowych maksymalnych i minimalnych dla poszczególnych wartości kąta ostrza noża  $\alpha$  przedstawiono na rysunku 34. Minimalne wartości naprężeń kontaktowych wyznaczono dla przypadku kontaktu całkowitego pola przekroju poprzecznego rurki z powierzchnią ostrza noża. Dla lepszego zobrazowania zmian wartości naprężeń

kontaktowych, wyznaczono ich wartości dla kąta ostrza noża z zakresu 5-90° z gradacją co 5° [5].



Rys. 34. Rozkład wartości naprężeń kontaktowych w zależności od wartości kąta ostrza noża  $\alpha$  [5]

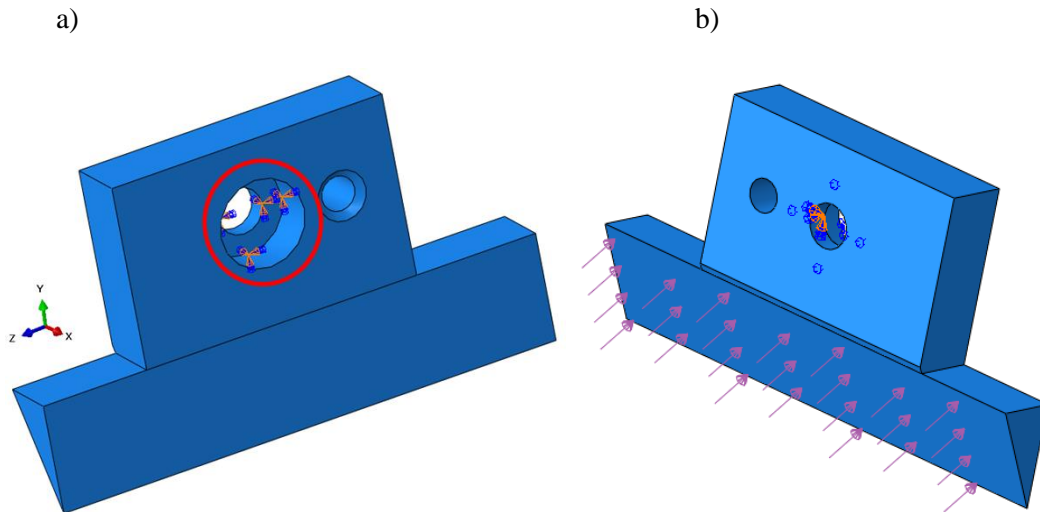
Wartość naprężeń kontaktowych osiąga najwyższe wartości dla najniższej wartości kąta ostrza  $\alpha = 5^\circ$  (Rys. 34). Spadają one ze wzrostem kąta ostrza. Odnosząc wartości naprężeń kontaktowych do wartości granicy plastyczności, która wynosi  $R_e = 821$  MPa (dla stali 1.2311) stwierdza się, że są one pomijalnie małe [5].

W celu oszacowania wartości naprężeń kontaktowych pochodzących od oddziaływania siły  $F'$  (Rys. 30) jako normalnej siły tarcia pochodzącej od wciskania się słomy pod ostrze noża (Rys. 35), zbudowano model symulacyjny w programie Abaqus. Zbadano w ten sposób wpływ naprężeń kontaktowych na ugięcie ostrza noża i rozkład naprężeń zredukowanych von Misesa [5].



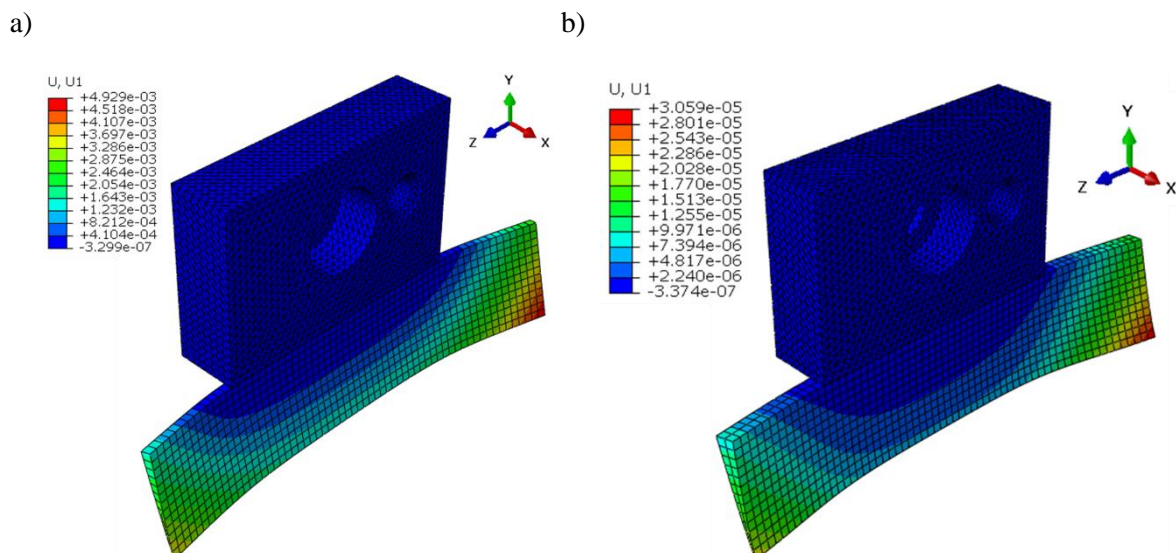
Rys. 35. Efekt wciskania słomy pod ostrze noża [5]

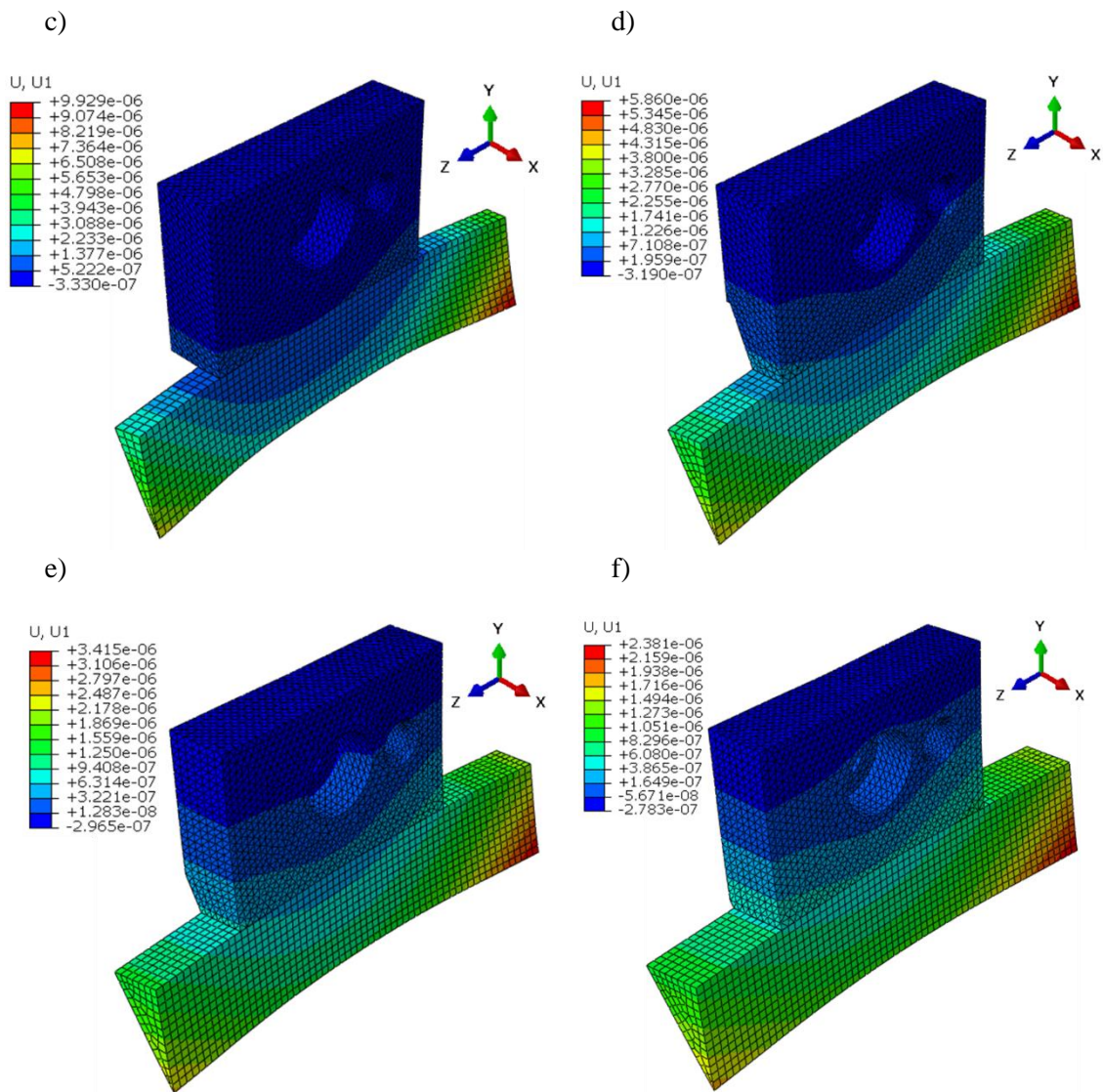
Na rysunku 36 przedstawiono w jaki sposób przyjęto warunki brzegowe.



Rys. 36. Warunki brzegowe przyjęte w modelu symulacyjnym: a) powierzchnia utwierdzenia, której odebrano wszystkie stopnie swobody, b) powierzchnia ostrza noża, do której przyłożono obciążenie od siły  $F'$  (Rys. 30) [5]

Na rysunku 36a kolorem czerwonym zaznaczono powierzchnię, przez którą w rzeczywistości nóż jest pośrednio dociskany do powierzchni walcowej obrotowego bębna poprzez walcowy łeb śruby, która z kolei jest wkręcana w gwintowany otwór tego bębna (Rys. 24 i 25). Na rysunku 36b przedstawiono przyłożone powierzchniowo obciążenie odzwierciedlające oddziaływanie siły  $F'$  jako składowej siły  $F$  (Rys. 30), która jest siłą normalną siły tarcia słomy o powierzchnię ostrza. Na rysunku 37 przedstawiono wyniki analizy numerycznej przedstawiające ugięcie ostrza noża, dla noży o kątach ostrza 5-30° z gradacją co 5°. Wartości ugięcia podane na rysunku są wyrażone w metrach [5].





Rys. 37. Wyniki analiz numerycznych w postaci ugięcia ostrza dla jego kątów a) 5° b) 10°, c) 15°, d) 20°, e) 25° i f) 30° [5]

W tabeli 14 zestawiono wartości ugięcia i naprężeń dla noży o kątach ostrza noża  $\alpha = 5-30^\circ$  [5].

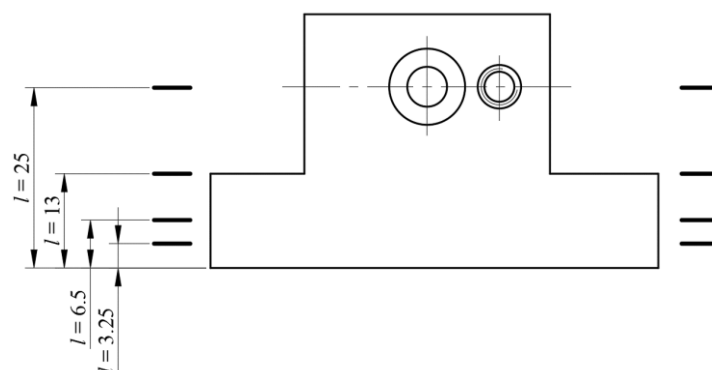
Tabela 14. Zestawienie porównawcze wyników badań symulacyjnych [5]

Kąt ostrza $\alpha$ [°]	Ugięcie ostrza [mm]	Naprężenie von Misesa [MPa]
5	4,929	431,2
10	0,03059	49,47
15	0,009929	21,6
20	0,00586	19,76
25	0,003415	15,71
30	0,002381	21,55

Dla noża o kącie ostrza 5° zachodzi ugięcie o największej wartości i wynosi ono około 5 mm co całkowicie eliminuje możliwość stosowania ostrza o tym kącie (Rys. 37a, tabela 14). Mimo,

że dla kąta ostrza  $\alpha = 10^\circ$  ta wartość jest znacznie mniejsza to i tak dla odległości pomiędzy ostrzem stosowanych w badaniach z zakresu 0,1-0,3 mm jest ona niedopuszczalna ponieważ przy odległości 0,1 mm ugięcie to powoduje zmniejszenie jej o 30%. Dla kąta ostrza  $15^\circ$  ugięcie to wynosi już 10% ale i tak uważa się, że jest to zbyt wiele. Wartość ugięcia dla kąta ostrza  $20^\circ$  i wyższych można traktować jako pomijalną, która nie wpłynie na zmianę warunków procesu cięcia, a przez to wzrost chociażby energochłonności procesu. Dla kąta ostrza  $5^\circ$  zarejestrowano największą wartość naprężenia von Misesa wynoszącą 431,2 MPa, która jest o połowę mniejszą od granicy plastyczności ( $R_e = 821$  MPa dla stali 1.2311). Ze wzrostem wartości kąta ostrza  $\alpha$  wartość maksymalna naprężenia zmniejsza się gwałtownie, a obszar koncentracji przesuwa z obszaru ostrza ku górze, ku otworom mocującym nóż do obrotowego bębna. Niewielki wzrost naprężenia dla noża o kącie ostrza  $30^\circ$  (w odniesieniu do noża o kącie ostrza  $25^\circ$ ) tłumaczy się faktem, że ze wzrostem kąta ostrza wzrosła jego sztywność i miejsce koncentracji naprężenia przesunęło się w miejsce powierzchni gdzie śruba z łbem walcowym mocująca nóż, dociska go swym łbem za pośrednictwem tej powierzchni do powierzchni walcowej obrotowego bębna. W tym miejscu występuje otwór o stopniowanej średnicy, a ścianka ma grubość 2,5 mm. Obliczenia symulacyjne dla pozostałych kątów ostrza zakresu  $35-90^\circ$  uznano za niecelowe ponieważ przy wzroście kąta ostrza jego sztywność wzrasta, co ogranicza wartość ugięcia i naprężenia.

Habibant przeprowadził analizę wpływu wartości naprężenia w przekroju poprzecznym pojedynczego noża (Rys. 38) powstałych na skutek oddziałującej siły tarcia (Rys. 30), gdzie składowa pozioma siły tarcia  $T'$  wywołuje naprężenie gnące  $\sigma_g$ , a składowa pionowa siły tarcia  $T''$  wywołuje naprężenie ściskające  $\sigma_c$ . Naprężenia te sumują się i są normalne do przekroju poprzecznego noża. Są wynikiem wciskania słomy pod ostrze noża podczas cięcia i są dodatkowymi naprężeniami pojawiającymi się obok naprężeń pochodzących od oddziaływania siły tnącej  $F$  i jej składowych (Rys. 30). Celem wyeliminowania lub zminimalizowania tego zjawiska zaproponowano wykonanie wyfrezowania pod ostrzem każdego noża w powierzchni walcowej bębna, do której te noże są przytwierdzone. Ma to powodować samoczynne uwalnianie się słomy znajdującej się pod ostrzem (Rys. 40) [5]. Strzałka w kolorze pomarańczowym na rysunku 40 sugeruje kierunek przejścia wciskanej słomy co ma prowadzić do jej wysunięcia [5].



Rys. 38. Rysunek poglądowy pojedynczego noża ze wskazaniem przekrojów, w których wyznaczono sumę naprężeń gnących i ściskających [5]

Na rysunku 39 przedstawiono zmianę wartości sumy naprężeń gnących  $\sigma_g$  i ściskających  $\sigma_c$  w zależności od zmiany kąta ostrza noży tnących  $\alpha$ . Dla pełnego zobrazowania charakteru zmian tych naprężeń w zależności od wartości kąta ostrza w obliczeniach uwzględniono zakres wartości tego kąta w zakresie  $\alpha = 5-90^\circ$ . Do obliczeń naprężeń przyjęto średnią wartość siły  $F$  wyznaczoną z badań eksperymentalnych z zarejestrowanej wartości momentu  $M_b$  dla wszystkich wartości kąta ostrza noży tnących  $\alpha$  oraz odległości  $g$  pomiędzy ostrzem i przeciw-ostrzem. Składowa  $F'$  siły tnącej  $F$ , która jest prostopadłą do powierzchni bocznej ostrza noża jest siłą normalną siły tarcia  $T$  [5]:

$$T = \mu \cdot F', \quad (11)$$

gdzie:

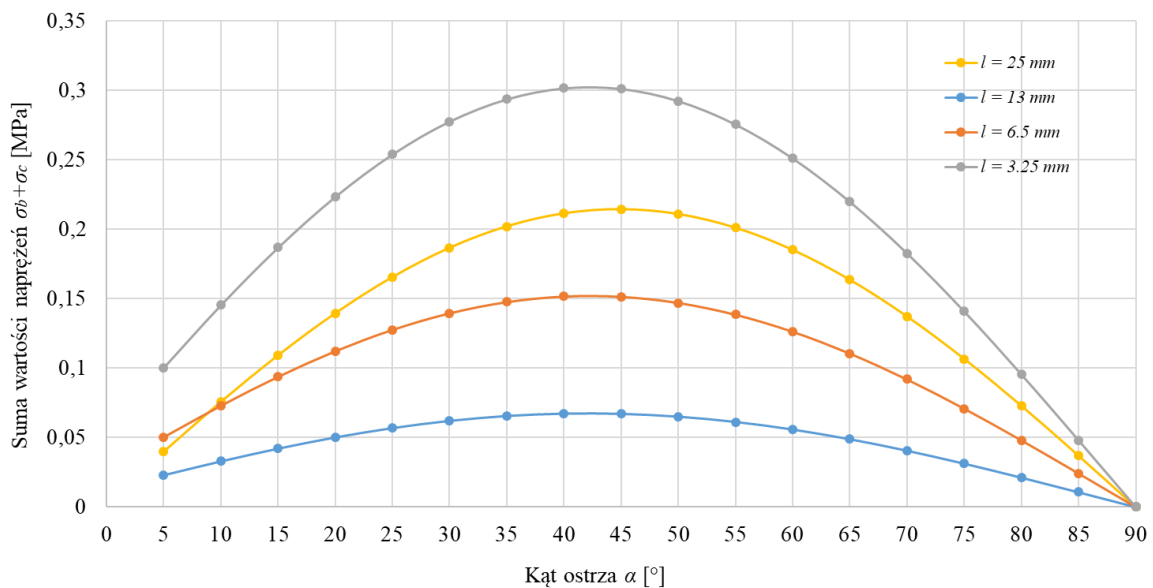
$\mu = 0,13$  przyjęto na podstawie literatury.

Z kolei:

$$\sigma_g = \frac{M_g}{W_x} = \frac{T' \cdot l}{W_x}, \quad (12)$$

$$\sigma_c = \frac{T''}{A}, \quad (13)$$

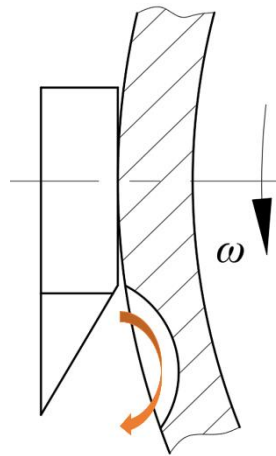
gdzie:  $l$  – odległość przekroju od punktu przyłożenia siły  $T'$ .



Rys. 39. Charakterystyka zmian wartości sumy naprężenia gnącego i ściskającego w wybranych przekrojach pojedynczego noża [5]

Maksymalna wartość naprężeń występuje dla kąta ostrza  $\alpha = 40$  i  $45^\circ$  w poszczególnych przekrojach (Rys. 39). Wartość ta rośnie wraz ze zmniejszaniem odległości przekroju do punktu przyłożenia składowych siły  $T$ . Dla optymalnej wartości kąta ostrza  $\alpha = 55^\circ$  wartości te są niższe. Maksymalne wartości sumy naprężeń wynoszą około 0,3 MPa dla przekroju najbliższego położonego w odniesieniu do punktu przyłożenia składowej poziomej  $T'$  i pionowej  $T''$  siły tarcia  $T$  (rozkład sił Rys. 30) wywołującej kolejno naprężenia gnące i ściskające. Ich wartość

jest mało znacząca biorąc pod uwagę granicę plastyczności materiału noży (stal 1.2311/40CrMnMo7), która wynosi  $R_e = 821 \text{ MPa}$  [5].



Rys. 40. Rysunek poglądowy przedstawiający wyfrezowane zagłębienie, które może umożliwić wysuwanie się słomy z przestrzeni pod ostrzem noża [5]

### Podsumowanie

W związku z powyżej przedstawionymi efektami prac habilitant:

- opracował metodykę przeprowadzenia badań eksperymentalnych w związku z zagospodarowaniem słomy celem jej pocięcia na potrzeby późniejszego jej zagęszczenia,
- opracował konstrukcję stanowiska badawczego wraz z realizacją jego budowy wliczając w to konstrukcję noży tnących,
- pozyskał materiał do badań, przygotował go, przeprowadził badania eksperymentalne procesu cięcia oraz opracował wyniki wykorzystując do tego celu analizę wariancji ANOVA, która umożliwiła zbudowanie modeli analitycznych charakterystyk zmian odpowiedzi procesu technologicznego w funkcji wartości parametrów wejściowych (nastaw),
- habilitant zaproponował metodę korekcji wyników celem zmniejszenia negatywnego wpływu na ich rozrzut zróżnicowanych właściwości fizyko-mechanicznych poszczególnych próbek wybranych i odważonych w poszczególnych testach,
- na podstawie przeprowadzonej analizy wariancji habilitant sklasyfikował parametry (nastawy) procesu technologicznego cięcia biomasy w postaci słomy w aspekcie stopnia ich wpływu na otrzymane poszczególne odpowiedzi tegoż eksperymentu,
- habilitant wyznaczył wartość parametru eksploatacyjnego  $f$  zależnego od kąta ostrza  $\alpha$  określającego procentowy udział momentu tarcia  $T_f$  w wartości momentu cięcia  $T_c$  zmierzonego w eksperymencie oraz przeprowadził analizę stanu obciążenia ostrza, biorąc pod uwagę wpływ określonych naprężeń co umożliwiło przeprowadzenie optymalizacji doboru parametrów wejściowych procesu technologicznego cięcia słomy. Wyznaczony parametr  $f$  stanowił funkcję przeciwną w przeprowadzonej

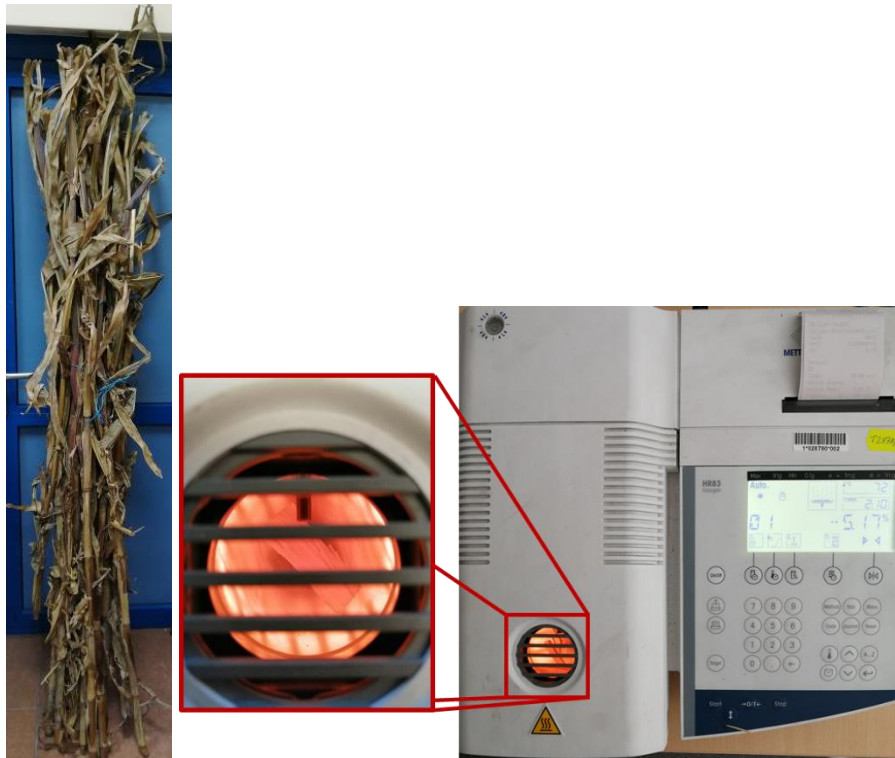
optymalizacji, który może być stosowany do porównywania przewidywanej trwałości ostrzy o różnej geometrii,

- na podstawie analizy i obserwacji procesu cięcia słomy bębnowym zespołem tnącym habilitant zaproponował sposób poprawy warunków pracy noży polegający na wyeliminowaniu zjawiska „wciskania” słomy w przestrzeń znajdująca się pod ostrzem noża.

Przedstawione powyżej efekty pracy naukowej habilitanta zostały opublikowane w czasopiśmie *Biosystems Engineering* (**Dominik Wilczyński**, Krzysztof Talaśka, Dominik Wojtkowiak, Jan Górecki, Krzysztof Wałęsa. Research on energy consumption of the biomass cutting process as a process preceding biofuel production. *Biosystems Engineering*, 2024, vol. 237, s. 142-156. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.12.007>, IF = 5,1, punktacja MNiSW 100 pkt., publikacja indeksowana w bazie Scopus – **udział własny 60%**). W zakresie wymienionej publikacji na **indywidualny wkład habilitanta składa się odpowiedzialność organizacyjna i koordynacyjna dotycząca planowania i realizacji działalności badawczej, pomysł i koncepcja powstania pracy na cele zagospodarowania materiału odpadowego w postaci słomy. Opracowanie metodyki badawczej wraz z wykonaniem badań eksperymentalnych, pozyskaniem materiału do badań i jego przygotowaniem oraz także zaprojektowaniem i przygotowaniem stanowiska badawczego. Opracowanie wyników badań w formie pozyskania właściwych charakterystyk dla oceny prawidłowości przebiegu spodziewanych/prognozowanych zmian wielkości badanych w eksperymencie. Opracowanie wyników badań z wykorzystaniem wielokryterialnej analizy interakcji ANOVA z wykorzystaniem metody Response Surface. Autor przedmiotowego referatu przygotował treść manuskryptu w tym opis metodyki badań, opis przygotowania materiału do badań, opis wykorzystanego w badaniach stanowiska badawczego, wizualizacje wyników badań i na ich podstawie wyznaczonych wielkości, dyskusję oparto o uzyskane efekty i wnioski końcowe. Następnie był odpowiedzialny za odpowiedzi na uwagi recenzentów i wprowadzanie zmian wynikających z tych uwag.**

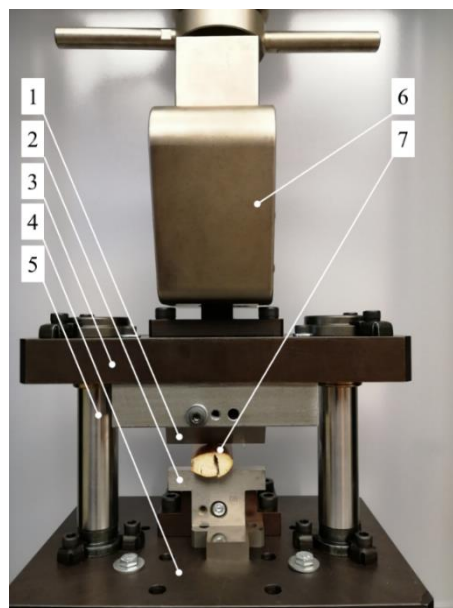
Opracowaną i przedstawioną powyżej metodykę habilitant wykorzystał na potrzeby zagospodarowania łądyg kukurydzy na cele energetyczne. Oznaczało to konieczność przeprowadzenia procesu ich cięcia celem zmniejszenia rozmiarów dla umieszczenia w komorze spalania pieca. W związku z powyższym habilitant pozyskał materiał pochodzący z lokalnego gospodarstwa rolnego. Ten był sezonowany przez okres 12 miesięcy osiągając w tym czasie średnią wilgotność na poziomie 9,01%, co potwierdzono pomiarami wilgotności z wykorzystaniem wagosuszarki (Rys. 41) [6].





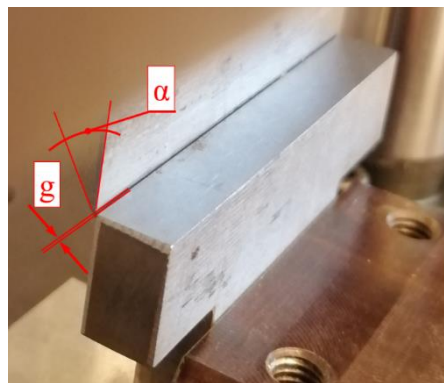
Rys. 41. Widok ogólny na sezonowane łodygi kukurydzy (po lewej), badania wilgotności łodyg kukurydzy z wykorzystaniem wagosuszarki (po prawej) [6]

Habilitant zaprojektował stanowisko do badań cięcia łodygi kukurydzy, które zostało zabudowane na maszynie wytrzymałościowej MTS Insight 50 kN, co przedstawiono na rysunku 42.



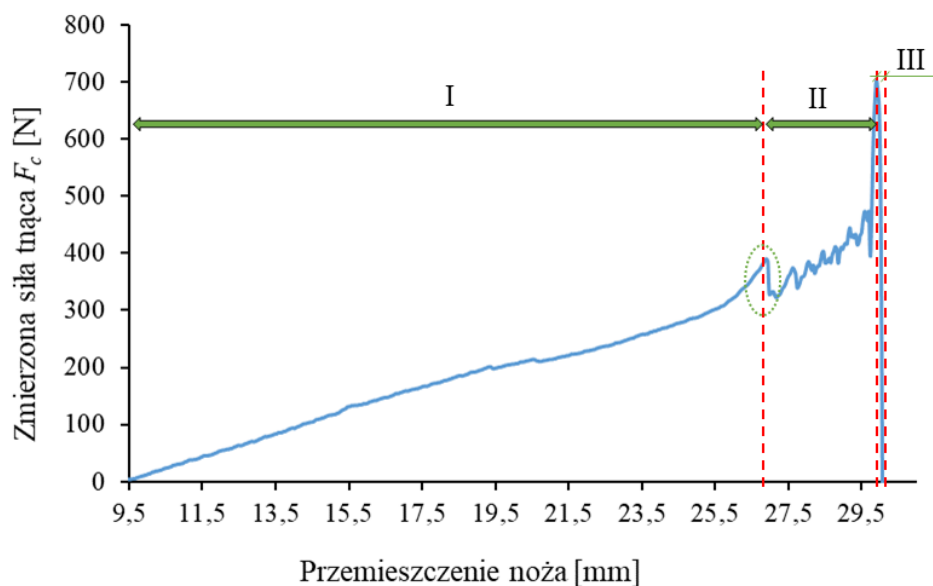
Rys. 42. Budowa stanowiska badawczego wykorzystanego w badaniach procesu cięcia łodygi kukurydzy gdzie: 1 – ostrze noża tnącego, 2 – przeciw-ostrze, 3 – płyta górna, 4 – płyta dolna, 5 – prowadnica toczna, 6 – szczęki maszyny wytrzymałościowej MTS, 7 – łodyga kukurydzy poddawana cięciu [6]

Podczas badania dokonywano rejestracji siły tnącej  $F_c$  łądęgę kukurydzy 7 wraz z przemieszczeniem, rejestrowanym przez czujniki maszyny wytrzymałościowej MTS. Pomiaru tych wielkości dokonywano dla zmiennej wartości kąta ostrza  $\alpha$ , odległości pomiędzy ostrzem 1 i przeciw-ostrzem 2 określonej jako  $g$  oraz prędkości liniowej ostrza 1 oznaczonej symbolem  $V$  (Rys. 42) [5]. Wartości kąta ostrza  $\alpha$  (Rys. 43) wynosiły kolejno  $\alpha = 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$  oraz  $80^\circ$ . Wartości odległości pomiędzy ostrzem 1 i przeciw-ostrzem 2 miały wartości  $g = 0,1, 0,2, 0,3$  mm oraz wartości prędkości liniowej ostrza noża 1 były następujące  $V = 1$  mm/s, 4 mm/s i 8 mm/s. Dla każdej wartości kąta ostrza  $\alpha$  badano wpływ każdej z wartości odległości pomiędzy ostrzem 1 i przeciw-ostrzem 2,  $g$  (Rys. 43) oraz każdej wartości prędkości  $V$ . Dla każdego zestawu parametrów wejściowych procesu cięcia  $\alpha$ ,  $g$  oraz  $V$  próbę powtarzano dziesięciokrotnie. W ten sposób wykonano 540 prób cięcia łądgy kukurydzy [6].



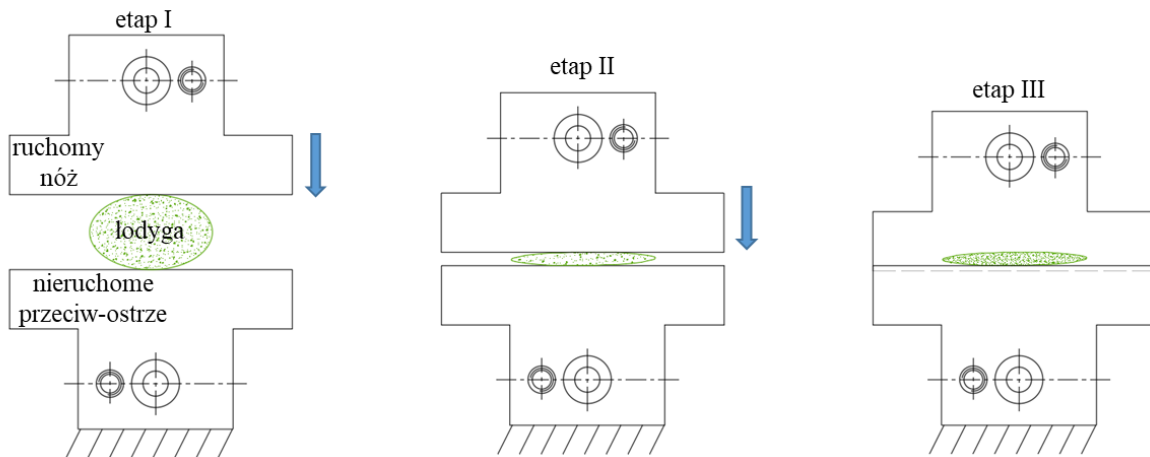
Rys. 43. Widok ogólny na kąt ostrza noża  $\alpha$  oraz szczelinę  $g$  między ostrzem 1 i przeciw-ostrzem 2 stanowiska do badań procesu cięcia łądgy kukurydzy [6]

Na rysunku 44 przedstawiono przykładowy przebieg zmian rejestrowanej siły  $F_c$  podczas cięcia łądgy kukurydzy.



Rys. 44. Przykładowa charakterystyka zmian zmierzonej siły tnącej  $F_c$  łądęgę kukurydzy dla parametrów  $\alpha = 40^\circ, g = 0,1$  mm oraz  $V = 1$  mm/s [6]

Habilitant zaproponował, że proces cięcia można podzielić na trzy etapy (Rys. 45). Pierwszy etap to ściskanie łądygi kukurydzy przez ostrze noża. W tym etapie zachodzi łagodny i proporcjonalny przyrost siły do przemieszczenia liniowego ostrza noża. W drugim etapie następuje gwałtowny spadek siły o wartość około kilkadziesiąt niutonów (Rys. 44, oznaczono elipsą) i następnie gwałtowny przyrost siły  $F_c$  do wartości maksymalnej na niewielkiej drodze ostrza noża, które zagłębia się we wcześniej ściśnięty materiał łądygi kukurydzy. Ostatni trzeci etap to gwałtowny spadek siły  $F_c$  na skutek ostatecznego rozdelenia materiału łądygi kukurydzy (Rys. 44 i 45) [6].



Rys. 45. Etapy procesu cięcia łądygi kukurydzy [6]

Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych poddano analizie wariancji ANOVA dla zmiennych parametrów wejściowych ( $\alpha$  – kąt ostrza noża,  $g$  – odległość pomiędzy ostrzem i przeciw-ostrzem,  $V$  – prędkość liniowa ostrza) i odpowiedzi wyznaczonych na podstawie zarejestrowanych wielkości w postaci siły tnącej  $F_c$ . Analiza wariancji ANOVA umożliwiła poszukiwanie wzajemnych zależności pomiędzy ww. parametrami wejściowymi (zmiennymi wejściowymi eksperymentu), a odpowiedziami tegoż eksperymentu. Uzyskano w ten sposób funkcyjne zależności zmian odpowiedzi eksperymentu i wpływ na jej wartości zmiennych procesu cięcia.

Zanim jednak to zrobiono, habilitant zaproponował zastosowanie metody korekcji uzyskanych wyników badań w celu wyeliminowania rozrzutu zarejestrowanej wartości siły  $F_c$  spowodowanego zróżnicowanym polem przekroju  $A$  łądygi miejscu cięcia. Założono, że wprowadzona korekcja pozwoli zmniejszyć negatywny wpływ tego zróżnicowania na zarejestrowaną siłę tnącą  $F_c$ , a także na wyznaczone po dokonanej korekcji tej siły wartości pozostałych parametrów procesu jako odpowiedzi w postaci naprężenia ścinającego  $\tau$ , całkowitej energii cięcia  $E_{tce}$ , energii właściwej cięcia  $E_{sce}$ . W tabeli 15 przedstawiono przykładowe wartości pola przekroju łądygi (kształt elipsy) wyznaczone dla kąta ostrza  $\alpha = 30^\circ$ , odległości  $g = 0,1, 0,2, 0,3$  mm oraz prędkości ostrza  $V = 1$  mm/s, 4 mm/s i 8 mm/s.

Tabela 15. Przykładowe wartości pola przekroju łodygi kukurydzy o kształcie elipsy dla kąta ostrza  $\alpha = 30^\circ$ , wartości odległości  $g = 0,1, 0,2, 0,3$  mm oraz prędkości ostrza  $V = 1$  mm/s, 4 mm/s i 8 mm/s [6]

Kąt ostrza $\alpha$ [°]	Odległość $g$ [mm]	Prędkość ostrza $V$ [mm/s]	Pole przekroju łodygi $A$ [mm <sup>2</sup> ]
30	0,1	1	516,90
30	0,2	1	607,75
30	0,3	1	689,45
30	0,1	4	442,39
30	0,2	4	578,69
30	0,3	4	594,76
30	0,1	8	322,86
30	0,2	8	347,96
30	0,3	8	410,54

W związku z powyższym zaproponowano zależność, która może posłużyć tej korekcji [6]:

$$F_{cc} = \left\{ \left[ \left( \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_n}{n} \right) - A_n \right] \div A_n \cdot F_{cn} \right\} + F_{cn} ; \text{if } A_n < \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_n}{n} \quad (14)$$

$$F_{cc} = \left\{ \left[ \left( \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_n}{n} \right) - A_n \right] \div A_n \cdot F_{cn} \right\} - F_{cn} ; \text{if } A_n > \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_n}{n}$$

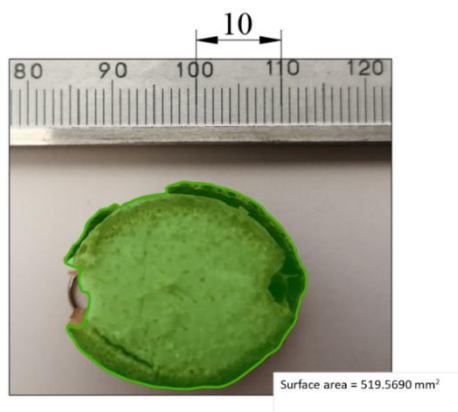
gdzie:

$A_n$  – n-ty przekrój łodygi cięty podczas n-tej próby cięcia przy określonych wartościach  $\alpha$ ,  $g$  i  $V$

$F_{cn}$  – maksymalna wartość siły tnącej uzyskana z n-tej próby cięcia przy określonych wartościach  $\alpha$ ,  $g$  i  $V$ ,

$F_{cc}$  – skorygowana maksymalna wartość siły tnącej podczas cięcia łodygi przy określonych wartościach  $\alpha$ ,  $g$  i  $V$  [6].

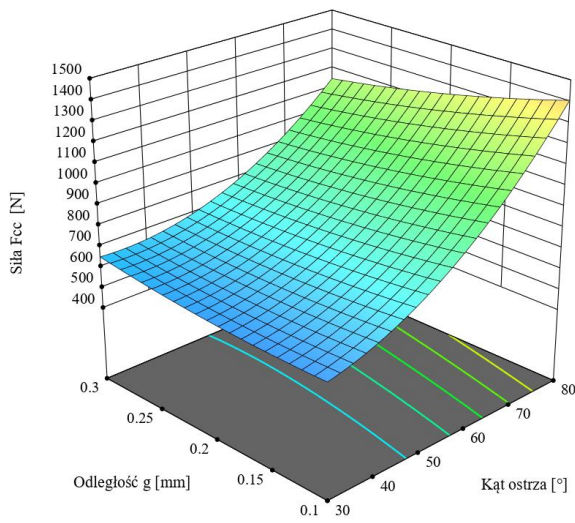
Autor referatu zaproponował metodę wyznaczenia wartości pola przekroju łodygi kukurydzy z wykorzystaniem programu AutoCAD z wykorzystaniem współczynnika skali (Rys. 46).



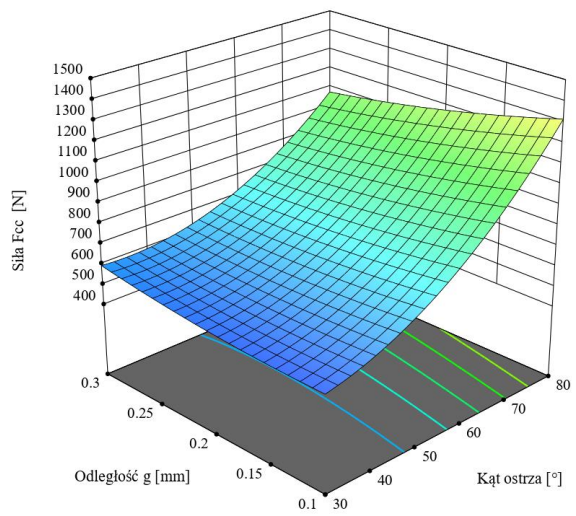
Rys. 46. Metoda precyzyjnego wyznaczenia pola przekroju łodygi kukurydzy [6]

Jak wcześniej wspomniano skorygowane wartości odpowiedzi eksperymentu poddano analizie ANOVA czego efekty przedstawiono na poniższych rysunkach.

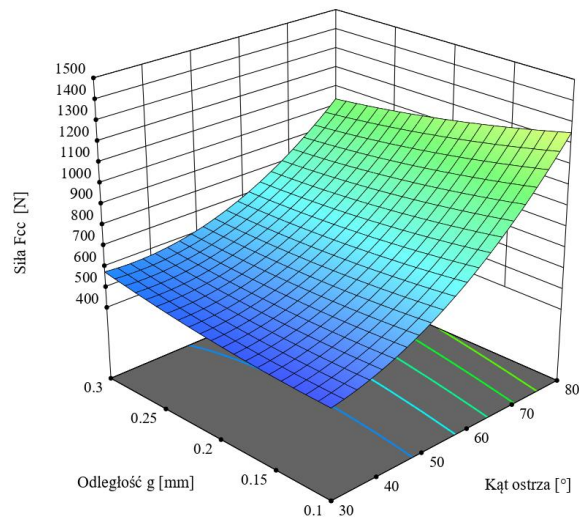
a)



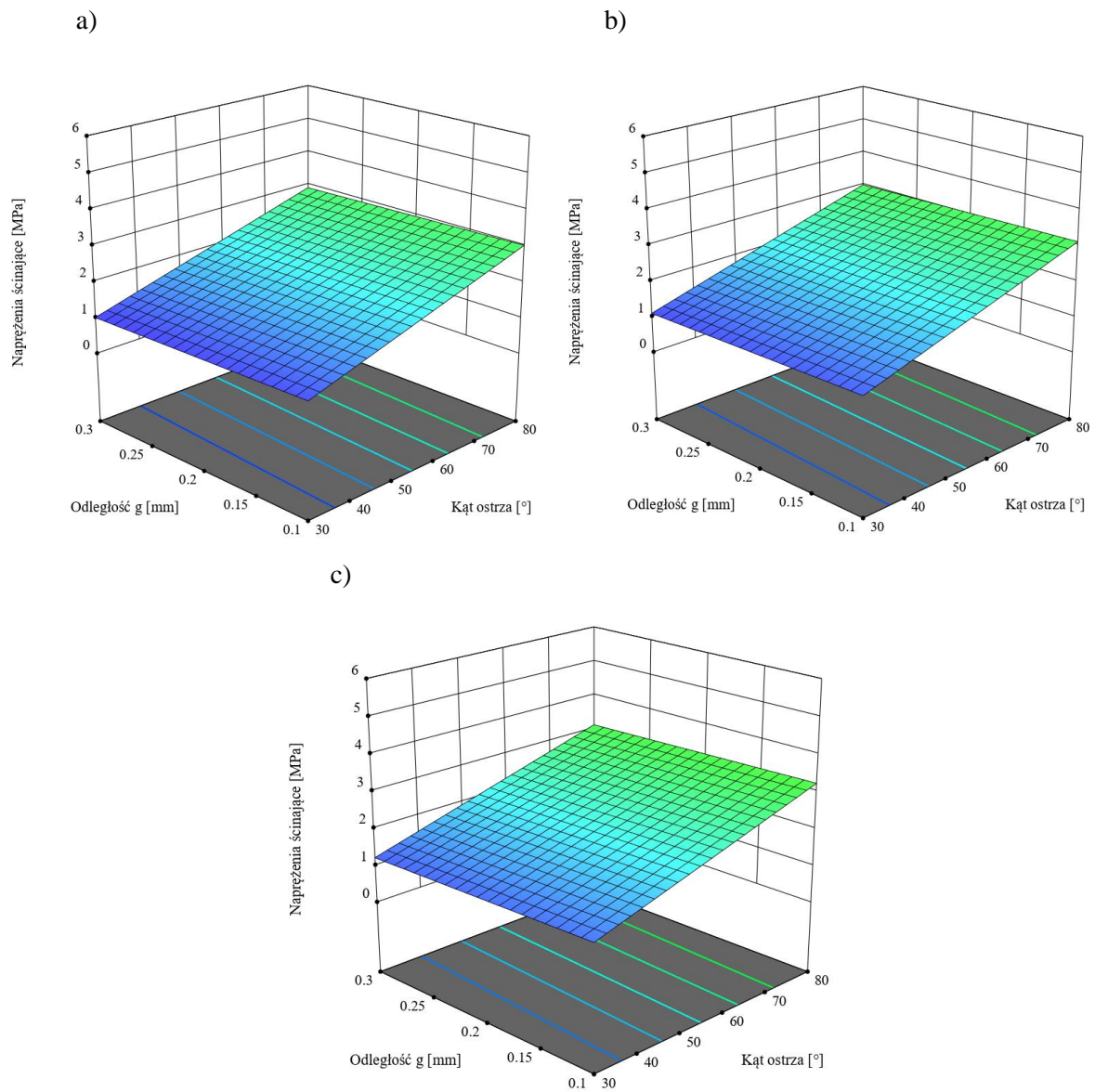
b)



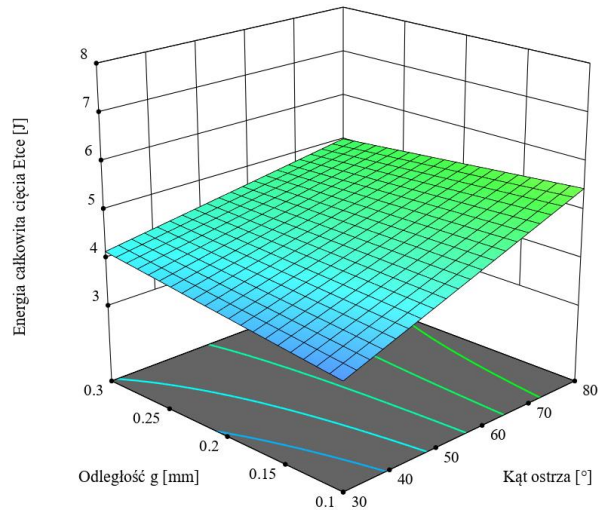
c)



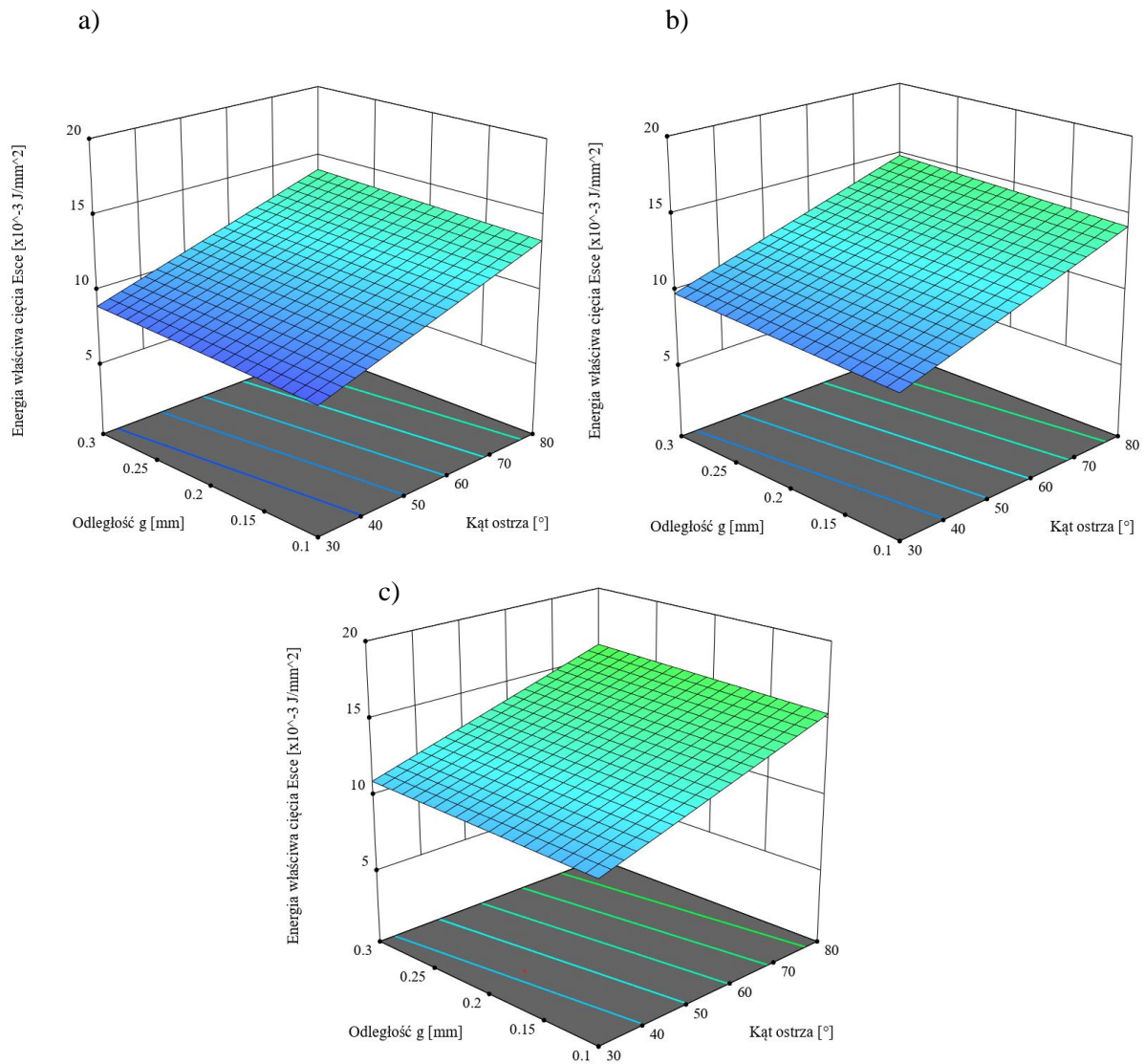
Rys. 47. Charakterystyka zmian siły tnącej  $F_{cc}$  w funkcji kąta ostrza  $\alpha$  odległości  $g$  prędkości o wartościach: a)  $V = 1$  mm/s, b)  $V = 4$  mm/s and c)  $V = 8$  mm/s [6]



Rys. 48. Charakterystyka zmian maksymalnej wartości napężenia ścinającego  $\tau$  w funkcji kąta ostrza  $\alpha$ , odległości  $g$  dla prędkości ostrza: a)  $V = 1$  mm/s, b)  $V = 4$  mm/s and c)  $V = 8$  mm/s [6]



Rys. 49. Charakterystyka zmian całkowitej energii cięcia  $E_{tce}$  w funkcji kąta ostrza  $\alpha$ , odległości  $g$  dla prędkości ostrza: a)  $V = 1$  mm/s, b)  $V = 4$  mm/s and c)  $V = 8$  mm/s [6]



Rys. 50. Charakterystyka zmian właściwej energii cięcia  $E_{sce}$  w funkcji kąta ostrza  $\alpha$ , odległości  $g$  dla prędkości ostrza: a)  $V = 1$  mm/s, b)  $V = 4$  mm/s and c)  $V = 8$  mm/s [6]

Powyżej przedstawione charakterystyki opisano modelami opisanymi zależnościami (poniżej) [6]:

$$F_{cc} = 633,614 + (-6,24546 \cdot \alpha) + 344,845 \cdot g + (-36,2416 \cdot V) + (-32,3887 \cdot \alpha \cdot g) + (-0,0937412 \cdot \alpha \cdot V + 30,2669 \cdot g \cdot V + 0,236325 \cdot \alpha^2 + 2342,17 \cdot g^2 + 2,13318 \cdot V^2 \quad (15)$$

gdzie:  $F_{cc}$  – siła tnąca [N],  $\alpha$  – kąt ostrza [°],  $g$  – odległość pomiędzy ostrzem i przeciw-ostrzem [mm],  $V$  – prędkość liniowa ostrza noża [mm/s]

$$\tau = 0,0232326 + 0,0381565 \cdot \alpha + (-0,583048 \cdot g) + 0,0299192 \cdot V \quad (16)$$

gdzie:  $\tau$  – maksymalne naprężenie ścinające [MPa],  $\alpha$  – kąt ostrza [°],  $g$  – odległość pomiędzy ostrzem i przeciw-ostrzem [mm],  $V$  – prędkość liniowa ostrza noża [mm/s]

$$E_{tce} = 1,70871 + 0,0497732 \cdot \alpha + 6,37737 \cdot g + (-0,107243 \cdot \alpha \cdot g) \quad (17)$$

gdzie:  $E_{tce}$  – całkowita energia cięcia (J),  $\alpha$  – kąt ostrza [°],  $g$  – odległość pomiędzy ostrzem i przeciw-ostrzem [mm]

$$E_{sce} = 4,66959 + 0,101064 \cdot \alpha + 3,23599 \cdot g + 0,288363 \cdot V \quad (18)$$

gdzie:  $E_{sce}$  – właściwa energia cięcia [J/mm<sup>2</sup>],  $\alpha$  – kąt ostrza [°],  $g$  – odległość pomiędzy ostrzem i przeciw-ostrzem [mm],  $V$  – prędkość liniowa ostrza noża [mm/s]

W tabeli 16 habilitant zaproponował hierarchiczne zestawienie na bazie wartości statystyki modelu F, parametry, które mają największy wpływ na odpowiedzi wykonanego eksperymentu cięcia łodygi kukurydzy bazując oczywiście na zrobionej wcześniej analizie interakcji ANOVA (modele wyrażone zależnościami 15-18).

Tabela 16. Hierarchicznie zestawione składniki poszczególnych modeli charakterystyk interakcji pomiędzy odpowiedziami a parametrami (nastawami) procesu technologicznego cięcia łodygi kukurydzy [6]

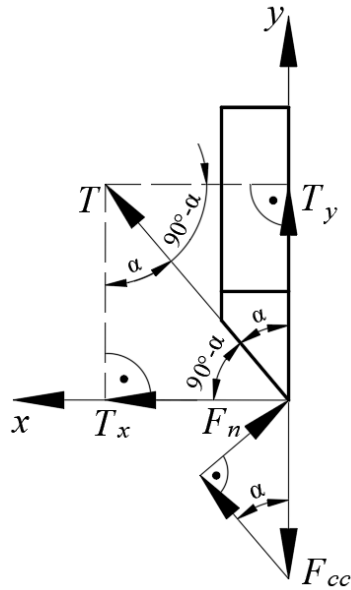
Odpowiedź	1	2	3	4	5
$F_{cc}$	$\alpha$ (159,41)	$\alpha^2$ (11,54)	$V$ (7,07)	$\alpha \cdot g$ (6,77)	$g$ (2,91)
$\tau$	$\alpha$ (94,05)	$V$ (1,63)	$g$ (0,5019)		
$E_{tce}$	$\alpha$ (32,90)	$\alpha \cdot g$ (3,14)	$g$ (0,2151)		
$E_{sce}$	$\alpha$ (27,63)	$V$ (6,34)	$g$ (0,6475)		

Habilitant postawił następujące wnioski wg tabeli 16 uzyskanych odpowiedzi z cyklu badań cięcia łodygi kukurydzy pozyskanej z pól uprawnych położonych w Wielkopolsce (zachodnio-centralna Polska). Na wartość siły tnącej  $F_{cc}$  łodygę kukurydzy największy wpływ ma kąt ostrza noża  $\alpha$  (Tabela 16) i zmienna ta jest znaczącym składnikiem modelu opisanego zależnością



(15) na podstawie wartości poziomu istotności  $p < 0,0001$ . Ponadto wg rysunku 47 ze wzrostem prędkości liniowej ostrza noża  $V$  następuje spadek wartości siły  $F_{cc}$  w całym zakresie wartości odległości  $g$  oraz kąta ostrza  $\alpha$ . Najniższą wartość siły odnotowano dla kąta ostrza  $\alpha = 30^\circ$ , odległości  $g = 0,1$  mm i prędkości liniowej ostrza  $V = 8$  mm/s. Na wartość naprężenia tnącego  $\tau$  (Tabela 16) największy wpływ ma kąt ostrza noża  $\alpha$  ( $p < 0,0001$ ). Ponadto ze wzrostem prędkości liniowej ostrza noża  $V$  zachodzi niewielki wzrost wartości naprężenia ścinającego  $\tau$  w całym zakresie wartości odległości  $g$  oraz wartości kąta ostrza  $\alpha$ . Najniższą wartość naprężenia  $\tau$  odnotowano dla kąta ostrza  $\alpha = 30^\circ$ , odległości  $g = 0,1$  mm i prędkości liniowej ostrza  $V = 1$  mm/s (Rys. 48). Na wartości energii całkowitej  $E_{tce}$  nie ma wpływu prędkość liniowa  $V$  ostrza tylko wartość kąta ostrza  $\alpha$ , która jest jednocześnie znaczącym składnikiem modelu opisanego zależnością (17). Najniższą wartość  $E_{tce}$  osiągnęła dla kąta ostrza  $\alpha = 30^\circ$ , odległości  $g = 0,1$  mm (Rys. 49). Energia właściwa cięcia  $E_{sce}$  (specific cutting energy) jest przede wszystkim zależna od wartości kąta ostrza  $\alpha$  (Tabela 16) i kąt ten także jest znaczącym składnikiem modelu ( $p < 0,0001$ ) opisanym zależnością (18). Hierarchicznie na drugiej pozycji znajduje się prędkość liniowa  $V$  (Tabela 16) i to z jej wzrostem rośnie wartość  $E_{sce}$  w całym zakresie wartości odległości  $g$  oraz kąta ostrza  $\alpha$  (Rys. 50). Najniższą wartość  $E_{sce}$  odnotowano dla kąta ostrza  $\alpha = 30^\circ$ , odległości  $g = 0,1$  mm i prędkości liniowej ostrza  $V = 1$  mm/s (Rys. 50) [6].

Analizując omawiany proces cięcia łodygi kukurydzy autor niniejszego referatu zaproponował schemat rozkładu sił na ostrzu celem określenia wzajemnych korelacji pomiędzy poszczególnymi siłami i ich zmianami w zależności od wartości kąta ostrza  $\alpha$  (Rys. 51). Analiza ta ma posłużyć określeniu korelacji pomiędzy trwałością noża, a kątem ostrza  $\alpha$ . Oparto się tu na wielu przykładach literaturowych, w których autorzy zaprezentowali korelację pomiędzy zużyciem narzędzia, a siłami skrawania. Habilitant podjął próbę przełożenia tego na ostrze do cięcia słomy. Ponieważ żywotność narzędzia zależy od zużycia ciernego, co można oszacować mierząc promień krawędzi skrawającej  $r$  (w przypadku noża tnącego łodygę będzie to jego krawędź tnąca), przyjęto, że większa wartość siły tarcia przyczyni się do szybszego zużycia i skróci żywotność narzędzia. Takie założenie poczyniono na podstawie pracy, której autorzy stwierdzili, że zwiększone zużycie narzędzia zachodzi przy wzroście powierzchni kontaktu i wartości współczynnika tarcia. To odniesiono do przypadku noża użytego w przedmiotowych badaniach cięcia łodygi kukurydzy. Wyznaczono iloraz sił  $F_{cc}/T_x$  na podstawie dokonanej analizy stanu obciążenia ostrza w drugim etapie cięcia łodygi kukurydzy (Rys. 51), w którym to następuje cięcie ściśniętej w pierwszym etapie łodygi kukurydzy. To wartość tego ilorazu ma być wskaźnikiem trwałości noża tnącego łodygę. Na rysunku 64 przedstawiono rozkład sił na ostrzu noża celem wyznaczenia składowej siły tarcia  $T_x$  [6].



Rys. 51. Rozpatrywany rozkład sił na ostrzu noża, gdzie:  $F_{cc}$  – skorygowana wartość zmierzonej siły tnącej [N],  $T$  – siła tarcia [N],  $T_y$  – składowa pionowa siły tarcia [N],  $T_x$  – składowa pozioma siły tarcia [N],  $F_n$  – siła normalna siły tarcia [N],  $\alpha$  – kąt ostrza noża [°] [6]

Należy przypomnieć, że zmierzona bezpośrednio w badaniach siłę cięcia oznaczono jako  $F_c$ , natomiast jej skorygowana wartość wg zależności (14) posiada oznaczenie  $F_{cc}$ . Na podstawie analizowanego rozkładu sił określono składową poziomą  $T_x$  siły tarcia  $T$  (Rys. 51) wg zależności (19) [6]:

$$\frac{T_x}{T} = \sin \alpha \quad (19)$$

gdzie:

$T_x$  – składowa pozioma siły tarcia  $T$  (N),

$T$  – siła tarcia (N),

$\alpha$  – kąt ostrza (°).

Z kolei zależność na siłę tarcia  $T$  można zapisać następująco:

$$T = F_n \cdot \mu \quad (20)$$

gdzie:

$T$  – siła tarcia (N),

$F_n$  – siła normalna siły tarcia  $T$  (N),

$\mu$  – współczynnik tarcia, wg Richter (1954)  $\mu = 0,82$ .

Zależność na siłę normalną siły tarcia zapisano wg zależności (31) (Rys. 51)[6]:

$$\frac{F_n}{F_{cc}} = \cos (90 - \alpha) \quad (21)$$

czyli:

$$F_n = F_{cc} \cdot \cos (90 - \alpha) \quad (22)$$

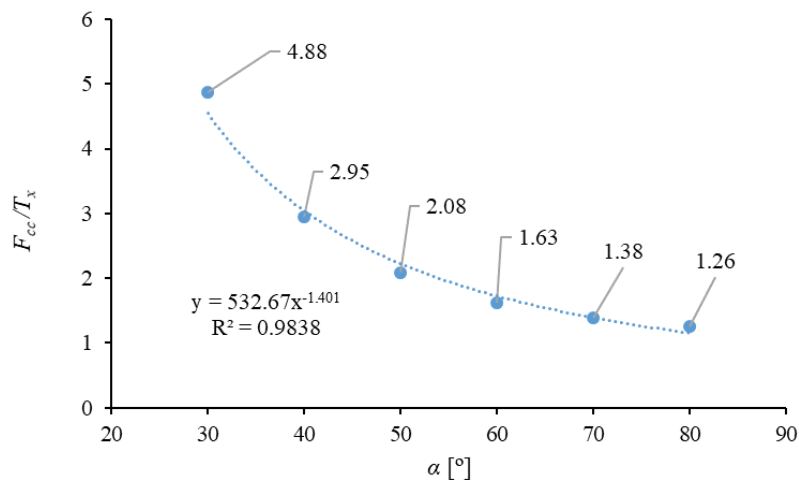
Zależność na siłę tarcia  $T$  można zapisać w następujący sposób:

$$T = F_{cc} \cdot \cos \cdot (90^\circ - \alpha) \cdot \mu \quad (23)$$

Stąd składową poziomą  $T_x$  siły tarcia  $T$  ostatecznie można zapisać zależnością (24):

$$T_x = F_{cc} \cdot \cos \cdot (90^\circ - \alpha) \cdot \mu \cdot \sin \alpha \quad (24)$$

Na tej podstawie wyznaczono wartość ilorazu siły tnącej  $F_{cc}$  do składowej poziomej siły tarcia  $T_x$ ,  $F_{cc}/T_x$ . Na rysunku 52 przedstawiono rozkład wartości tego ilorazu w funkcji zmiany wartości kąta ostrza noża  $\alpha$  [6].



Rys. 52. Charakterystyka zmian wartości ilorazu sił  $F_{cc}/T_x$  [6]

Należy tutaj podkreślić, że wartości ilorazu  $F_{cc}/T_x$  są identyczne dla różnych wartości odległości pomiędzy ostrzem i przeciw-ostrzem  $g$  i wartości prędkości liniowej  $V$  dla jednej wartości kąta ostrza  $\alpha$ . Według powyższej charakterystyki i jednocześnie bazując na założeniu przedstawionym powyżej można powiedzieć, że im mniejsza wartość ilorazu  $F_{cc}/T_x$  tym większa trwałość na zużycie noża tnącego łądygę kukurydzy [6].

Na podstawie powyższych rozważań, których efektem jest określenie korelacji pomiędzy siłą tnącą  $F_{cc}$  oraz składową poziomą siły tarcia  $T_x$  otrzymano charakterystykę przedstawioną na rysunku 52. Dało to podstawę to przeprowadzenia dyskusji związanej z optymalizacją, w której wzięto pod uwagę dwie funkcje. Pierwsza to charakterystyka zmian siły tnącej w funkcji zmiany kąta ostrza  $\alpha$  oraz odległości pomiędzy ostrzem i przeciw-ostrzem  $g$  dla prędkości  $V = 8$  mm/s, ponieważ dla tej prędkości siła tnąca w całym zakresie wartości kąta ostrza i odległości była mniejsza niż dla pozostałych dwóch prędkości  $V = 1$  mm/s i  $V = 4$  mm/s.

Druga to charakterystyka przedstawiona na rysunku 52. Na tej podstawie przyjęto kryterium optymalizacji przedstawione w tabeli 26.

Tabela 17. Przyjęte kryteria optymalizacji [6]

Zmienna wejściowa/wyjściowa	Kryterium	Dolna granica wartości	Górna granica wartości
$\alpha$ [°]	w zakresie	30	90
$g$ [mm]	w zakresie	0,1	0,3
$V$ [mm/s]	w zakresie	1	8
$F_{cc}$ [N]	minimum	434,1	1629,5
$F_{cc}/T_x$ [-]	minimum	1,26	4,88

Wyniki optymalizacji przedstawiono w tabeli 18, w funkcji zmiennej wartości wagi dla siły  $F_{cc}$  oraz kryterium w postaci ilorazu  $F_{cc}/T_x$ . Wagę zmieniano zwiększając ją dla wartości siły  $F_{cc}$  jednocześnie o tę samą wartość zmniejszając wagę dla kryterium stanowiący iloraz  $F_{cc}/T_x$ . Wzrost wagi dla siły  $F_{cc}$  oznacza zwiększony priorytet dążności do minimalizacji siły tnącej.

Tabela 18. Parametry procesu spełniające kryteria optymalizacji numerycznej [6]

Waga $F_{cc}$ / ( $F_{cc}/T_x$ )	Kąt ostrza $\alpha$ [°]	$g$ [mm]	$V$ [mm/s]	$F_{cc}$ [N]	$F_{cc}/T_x$
0,5/0,5	60,2	0,29	7,74	717,4	1,47
0,6/0,4	57,1	0,27	7,82	681,4	1,63
0,7/0,3	53,4	0,24	7,94	640,7	1,88
0,8/0,2	48,7	0,21	7,99	595	2,27
0,9/0,1	42,1	0,17	7,99	540,4	2,96

W powyższej tabeli przedstawiono wyniki, które są wartościami wyznaczonymi na podstawie optymalizacji o zadanych wg tabeli 17, kryteriach. Na tej podstawie można powiedzieć, że optymalny zakres kąta ostrza noża  $\alpha$  mieści się w zakresie 40-60°. Jaka to będzie wartość z tego zakresu to zależy od tego czy ważniejsza jest minimalizacja siły tnącej. Wówczas dla wagi 0,9 siła  $F_{cc}$  osiąga minimalną wartość co jest równoznaczne z minimalizacją energii jaką należy włożyć celem przecięcia łądygi kukurydzy. Odbywa się to jednak kosztem trwałości noża. Jeżeli jednak nóż będzie wykonany z bardzo dobrego materiału o dużej wytrzymałości i odporności na zużycie może mieć kąt ostrza równy  $\alpha = 40-42^\circ$ . Jeżeli natomiast koszt wykonania noża ze stali o dobrych właściwościach mechanicznych będzie mało opłacalny wówczas może być on wykonany z materiału niższej jakości o kącie ostrza  $\alpha = 60^\circ$ , ale wiąże się to ze zwiększeniem jego trwałości oraz wzrostem siły potrzebnej do przecięcia łądygi kukurydzy. Dla całego zakresu wartości wag wartość  $g$  zmienia się w przedziale od 0,3 dla wartości wag 0,5/0,5 do około 0,2 dla wartości wag 0,9/0,1 (Tabela 18). Wartość prędkości liniowej ostrza noża wynosi dla całego zakresu zmienności wag  $V = 8$  mm/s. Odpowiednio wartość trwałości ostrza jest największa dla wartości wag 0,5/0,5 i jest równa  $F_{cc}/T_x = 1,47$  i najmniejsza dla wartości 0,9/0,1 wynosząc  $F_{cc}/T_x = 2,96$  [6].

## Wnioski habilitanta z przeprowadzonych badań eksperymentalnych cięcia łądygi kukurydzy

Na podstawie uzyskanych wyników z badań eksperymentalnych, przeprowadzonych analiz oraz optymalizacji można postawić następujące wnioski [6]:

- 1) Korekta siły tnącej  $F_c$  bezpośrednio zarejestrowanej w badaniach eksperymentalnych pozwoliła wyeliminować negatywny wpływ zmiennego pola przekroju łądygi kukurydzy na analizę wpływu na proces cięcia oraz wzajemnej interakcji poszczególnych parametrów wejściowych procesu cięcia.
- 2) Analiza wariancji ANOVA uzyskanych wyników badań eksperymentalnych pokazuje, że najmniejszą siłę  $F_{cc}$  potrzebną do przecięcia łądygi kukurydzy można uzyskać dla  $\alpha = 30^\circ$ ,  $g = 0,1$  mm oraz  $V = 8$  mm/s. Biorąc pod uwagę naprężenia ścinające  $\tau$  są to wartości parametrów w postaci  $\alpha = 30^\circ$ ,  $g = 0,1$  mm oraz  $V = 1$  mm/s. Dla energii całkowitej cięcia  $E_{tce}$  to wartości  $\alpha = 30^\circ$ ,  $g = 0,1$  mm niezależnie od wartości prędkości liniowej ostrza noża  $V$ . Dla energii właściwej  $E_{sce}$  nastawy parametrów procesu cięcia łądygi kukurydzy wynoszą kolejno  $\alpha = 30^\circ$ ,  $g = 0,1$  mm oraz  $V = 1$  mm/s.
- 3) Biorąc pod uwagę analizę rozkładu sił na ostrzu noża prowadzącą do wyznaczenia ilorazu sił  $F_{cc}/T_x$  na podstawie przyjętego kryterium eksploatacyjnego oraz przeprowadzonej optymalizacji można określić optymalny kąt ostrza noża  $\alpha$  mieszczący się w przedziale wartości 40-60°. Jaka to będzie wartość z tego przedziału, jest zależne od wartości wagi przyjętej w optymalizacji. Biorąc pod uwagę skrajne przyjęte wartości wag dla przyjętych kryteriów optymalizacji (Tabela 17), optymalna wartość kąta ostrza to 60° dla wartości wag 0,5 i 0,5 odpowiednio dla  $F_{cc}$  i ilorazu  $F_{cc}/T_x$ . Natomiast jeżeli najbardziej istotna będzie minimalizacja siły celem zmniejszenia energochłonności procesu cięcia łądygi kukurydzy, przyjmując wagę 0,9 dla  $F_{cc}$  oraz 0,1 dla ilorazu  $F_{cc}/T_x$  optymalną wartością kąta ostrza noża będzie wartość 40°.

## Podsumowanie

W związku z powyżej przedstawionymi efektami prac habilitant:

- opracował metodykę przeprowadzenia badań eksperymentalnych w związku z zagospodarowaniem łądyg kukurydzy celem jej pocięcia na potrzeby późniejszego umieszczenia w komorze spalania pieca,
- opracował konstrukcję stanowiska badawczego wraz z realizacją jego budowy wliczając w to konstrukcję noży tnących,
- pozyskał materiał do badań, przygotował go, przeprowadził badania eksperymentalne procesu cięcia oraz opracował wyniki wykorzystując do tego celu analizę wariancji ANOVA, która umożliwiła zbudowanie modeli analitycznych charakterystyk zmian odpowiedzi procesu technologicznego cięcia w funkcji wartości parametrów wejściowych (nastaw),
- zaproponował metodę korekcji wyników celem zmniejszenia negatywnego wpływu na ich rozrzut zróżnicowanych właściwości fizyko-mechanicznych i wielkości pola przekroju w miejscu cięcia poszczególnych łądyg kukurydzy,
- na podstawie przeprowadzonej analizy wariancji habilitant sklasyfikował parametry (nastawy) procesu technologicznego cięcia biomasy w postaci łądyg kukurydzy w

aspekcie stopnia ich wpływu na otrzymane poszczególne odpowiedzi tegoż eksperymentu,

- określił współczynnik eksploatacyjny wyrażony ilorazem  $F_{cc}/T_x$ , który umożliwił przeprowadzenie optymalizacji doboru parametrów wejściowych procesu,
- przeprowadził analizę stanu obciążenia ostrza, biorąc pod uwagę wpływ określonych naprężeń co umożliwiło przeprowadzenie optymalizacji doboru parametrów wejściowych procesu technologicznego cięcia łodyg kukurydzy biorąc pod uwagę kryterium zużycia ostrza wyrażonego ilorazem  $F_{cc}/T_x$ .

Przedstawione powyżej efekty pracy naukowej habilitanta zostały opublikowane w czasopiśmie *Materials* (**Dominik Wilczyński**, Krzysztof Wałęsa, Krzysztof Talaśka, Dominik Wojtkowiak. Triticale Straws on the Mechanical Behavior of Dry Corn Stalk Cutting. *Materials*, 2023, 16, 3039, s. 1-24, IF = 3,4, 140 pkt. – **udział własny 60%**). W zakresie wymienionej publikacji na **indywidualny wkład habilitanta** składa się **odpowiedzialność organizacyjna i koordynacyjna dotycząca planowania i realizacji działalności badawczej, pomysł i koncepcja powstania pracy na cele zagospodarowania materiału odpadowego w postaci łodyg kukurydzy. Opracowanie metodyki badawczej wraz z wykonaniem badań eksperymentalnych, pozyskaniem materiału do badań i jego przygotowaniem oraz także zaprojektowaniem i przygotowaniem stanowiska badawczego. Opracowanie wyników badań w formie pozyskania właściwych charakterystyk dla oceny prawidłowości przebiegu spodziewanych/prognozowanych zmian wielkości badanych w eksperymencie. Opracowanie wyników badań z wykorzystaniem wielokryterialnej analizy interakcji ANOVA z wykorzystaniem metody Response Surface. Przeprowadzenie optymalizacji z wykorzystaniem kryterium zużycia ostrza z uwzględnieniem zmienności wag dla przyjętych kryteriów optymalizacji. Autor przedmiotowego referatu przygotował treść manuskryptu w tym opis metodyki badań, opis przygotowania materiału do badań, opis wykorzystanego w badaniach stanowiska badawczego, wizualizacje wyników badań i na ich podstawie wyznaczonych wielkości, dyskusję oparto o uzyskane efekty i wnioski końcowe. Następnie był odpowiedzialny za odpowiedzi na uwagi recenzentów i wprowadzanie zmian wynikających z tych uwag.**

Szczegółowo opisaną powyżej metodykę prowadzenia badań, analizy wyników, poszukiwań modeli zależności pomiędzy parametrami wejściowymi procesu oraz zarejestrowanymi wynikami, poszukiwań wartości parametrów eksploatacyjnych umożliwiających przeprowadzenie optymalizacji doboru parametrów procesu, habilitant wykorzystał również w badaniach procesu cięcia pojedynczej łodygi słomy zboża oraz słomy co zostało opublikowane w artykułach naukowych [7-9]:

- **Wilczyński Dominik**, Wałęsa Krzysztof, Talaśka Krzysztof, Wojtkowiak Dominik, Bemberek Michał. Analysis of triticale straw cutting parameters. *Materials* – 2023, 16 (11), 3943. <https://doi.org/10.3390/ma16113943>, IF = 3,4, punktacja MNiSW 140 pkt., publikacja indeksowana w bazie Scopus – udział własny 50%. Oświadczenie o wkładzie merytorycznym jest zawarte w załączniku 1.
- **Wilczyński Dominik**, Wałęsa Krzysztof, Berdychowski Maciej, Kukła Mateusz. Biomass cutting tests to determine the lowest value of the process force. *IOP*

*Conference Series: Materials Science and Engineering* – 2020, vol. 776, s. 012014-1-012014-6, punktacja MNiSW 5 pkt., publikacja indeksowana w bazie Scopus – udział własny 50%. Oświadczenie o wkładzie merytorycznym jest zawarte w załączniku 1.

- **Wilczyński Dominik.** Multifactor analysis of experiment parameters on the example of the biomass cutting process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* – 2020, vol. 776, s. 012013-1-012013-9, punktacja MNiSW 5 pkt., publikacja indeksowana w bazie Scopus – udział własny 100%.

#### **4.3.3. Badania i modelowanie parametrów procesu technologicznego zgrzewania pasów [10-12]**

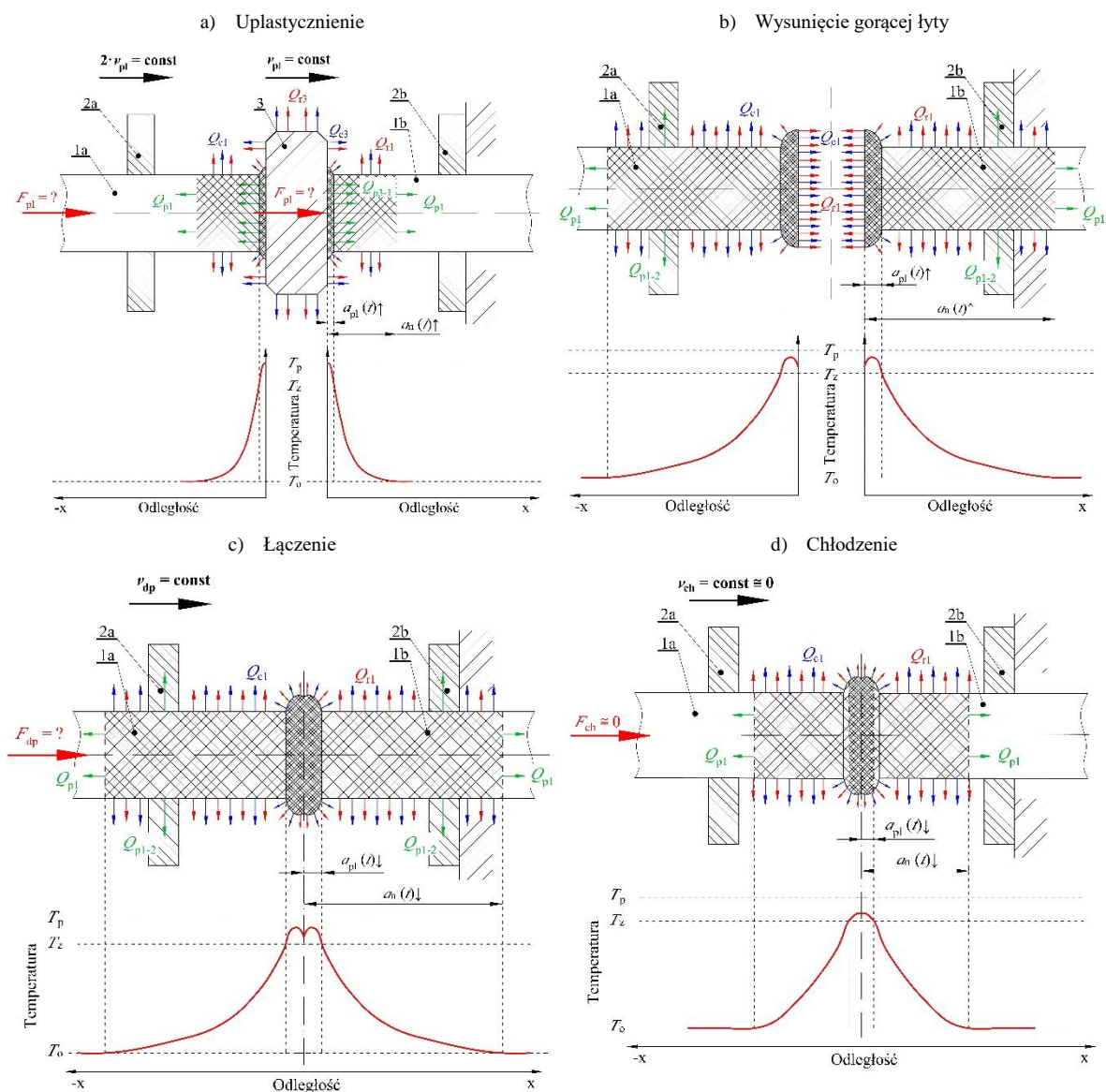
Podjęta problematyka jest problematyką przemysłową, wynikającą z potrzeby zautomatyzowania procesu zgrzewania pasów napędowych, celem zwiększenia wydajności procesu produkcji pasów oraz dokładności wykonywanego produktu w postaci pasa bezkońcowego. Omówione poniżej efekty pracy naukowej są jednym z etapów prac badawczo rozwojowych prowadzących do powstania zautomatyzowanego urządzenia realizującego proces zgrzewania końców pasa, czego potwierdzeniem są patenty wymienione w osiągnięciu naukowym, przytoczone ponownie na końcu tego rozdziału.

Wkład habilitanta w tym obszarze polegał na współtworzeniu metodyki badań procesu technologicznego zgrzewania pasów, jej nadzorze merytorycznym podczas opracowywania oraz nadzorze uzyskanych wyników badań, konstrukcji stanowisk badawczych oraz współdziałanie w procesie projektowania prototypowego urządzenia do zgrzewania pasów testowanego w zakładzie przemysłowym.

W pierwszym etapie podejścia do problematyki dokonano analizy procesu zgrzewania doczołowego końców pasów i zaproponowano jego czteroetapowy przebieg w odróżnieniu od dotychczasowego podejścia, który jest pięcioetapowy. Zaplanowano wykonanie cyklu badań eksperymentalnych właściwości termomechanicznych materiału, z którego wykonany jest pas. Na rysunku 53 przedstawiono graficznie przeanalizowane etapy procesu technologicznego zgrzewania końców pasa [10].

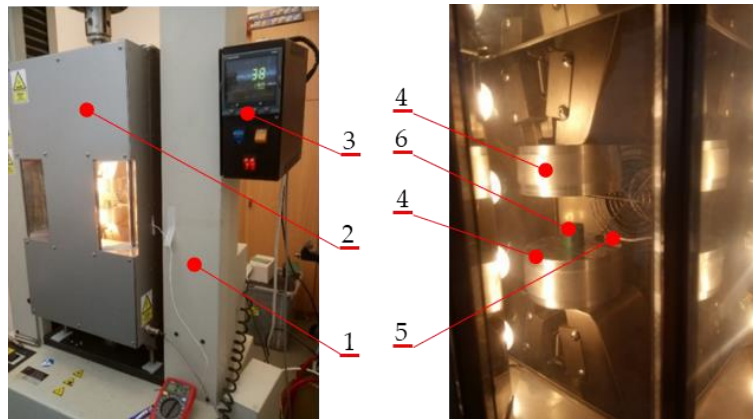
Przeprowadzono badania ściskania próbek walcowych pobranych z pasa, z dwiema różnymi prędkościami. Ich wynikiem jest zależność naprężeń ściskających  $\sigma_c$  i modułu sprężystości wzdłużnej  $E_c$  przy ściskaniu od: odkształcenia  $\varepsilon_c$ , wartości temperatury  $T$ , a także prędkości ściskania  $v_c$  [10].

Próbki przed badaniem kondycjonowano w komorze klimatycznej (Rys. 54), w której potem wykonywano próbę ściskania, w celu wyrównania temperatury w całej objętości. Próby przeprowadzono dla dwóch grup parametrów (Tabela 19), których wartości zostały dobrane na podstawie norm PN-EN ISO 604 oraz PN-80/C-04246. Wykonano po 5 prób dla wszystkich parametrów. Rejestrowano wykresy zależności naprężenia ściskającego  $\sigma_c$  od odkształcenia  $\varepsilon_c$ . Do badań wykorzystano uchwyt do ściskania próbek (Rys. 55), wyposażony w podcięcie walcowe o średnicy 25 mm i głębokości 1 mm, co zapobiegało wysuwaniu się próbek, nie krępując odkształcenia ich powierzchni bocznych. Powierzchnie czołowe próbek były nawilżane smarem silikonowym, przeznaczonym do pracy w temperaturze o wartości do 200°C. Dzięki temu utrzymano osiowy stan naprężenia próbek podczas ściskania [10].



Rys. 53. Schemat procesu zgrzewania doczołowego pasa ciągnowego metodą gorącej płyty z podziałem na 4 fazy i oznaczonym oczekiwanym rozkładem temperatury w osi pasa: 1a – ruchoma końcówka pasa, 1b – nieruchoma końcówka pasa, 2a – ruchomy uchwyt pasa, 2b – nieruchomy uchwyt pasa, 3 – gorąca płyta;  $v_{pl}$  – prędkość uplastyczniania materiału pasa,  $v_{dp}$  – prędkość docisku podczas łączenia,  $v_{ch}$  – prędkość docisku podczas chłodzenia,  $F_{pl}$  – siła docisku podczas uplastyczniania pasa,  $F_{dp}$  – siła docisku podczas łączenia końcówek pasa,  $F_{ch}$  – siła docisku podczas chłodzenia złącza,  $T_p$  – temperatura gorącej płyty,  $T_z$  – temperatura zgrzewania,  $T_0$  – temperatura otoczenia,  $a_{pl}$  – odległość uplastycznienia pasa,  $a_h$  – odcinek nagrzwany do temperatury wyższej od temperatury otoczenia;  $Q_{p3-1}$  – ciepło przewodzone pomiędzy gorącą płytą, a pasem,  $Q_{p1-2}$  – ciepło przewodzone pomiędzy pasem a uchwytem,  $Q_{p1}$  – ciepło przewodzone wewnątrz materiału,  $Q_{r1}$  – ciepło oddane do otoczenia od pasa na drodze radiacji,  $Q_{r3}$  – ciepło oddane do otoczenia od gorącej płyty na drodze radiacji,  $Q_{c1}$  – ciepło oddane do otoczenia od pasa na drodze konwekcji,  $Q_{c3}$  – ciepło oddane do otoczenia od gorącej płyty na drodze konwekcji [10, 11]

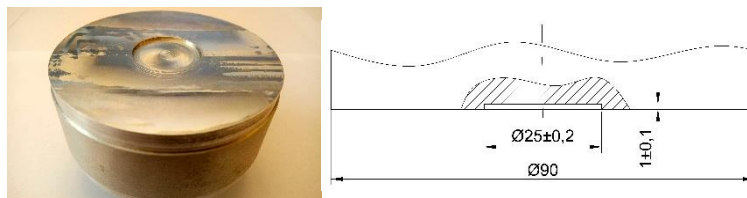




Rys. 54. Stanowisko do badań właściwości termomechanicznych pasów ciągnowych z maszyną wytrzymałościową MTS Insight 50 i komorą klimatyczną w trakcie badań: 1 – maszyna wytrzymałościowa, 2 – komora klimatyczna, 3 – sterownik komory klimatycznej, 4 – uchwyty do ściskania, 5 – czujnik temperatury, 6 – próbka przed badaniem [10]

Tabela 19. Parametry próby ściskania pasa w warunkach zmiennej temperatury [10]

Parametr	Oznaczenie	Wartość
Średnica próbki	$d$ [mm]	$18 \pm 0,2$
Wysokość próbki	$h$ [mm]	$20 \pm 0,5$
Prędkość badania	$v_c$ [mm/min]	1; 10
Temperatura próbek	$T$ [°C]	$25 \pm 1$ ; $40 \pm 1$ ; $55 \pm 1$ ; $70 \pm 1$ ; $85 \pm 1$ ; $100 \pm 2$ , $125 \pm 2$ ; $150 \pm 2$ ; $175 \pm 2$ ; $200 \pm 2$
Granica zakończenia badania	$\varepsilon_{\max}$ [%]	30



Rys. 55. Uchwyt do ściskania próbek z najważniejszymi wymiarami podcięcia walcowego [10]

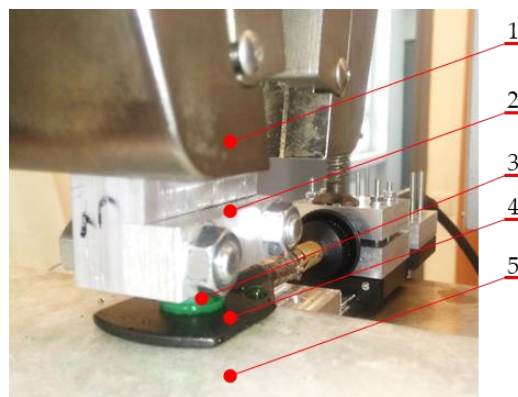
W kolejnym kroku przeprowadzono próby dynamicznej analizy termomechanicznej DMTA, na reometrze rotacyjnym Anton Paar MCR302. Do badań wykorzystano próbki pobrane z pasa o przekroju kołowym i średnicy  $d = 18$  mm, poddane obróbce skrawaniem do postaci prostopadłościennych belek o wymiarach  $53,50 \pm 0,31 \times 10,21 \pm 0,20 \times 3,74 \pm 0,33$  mm.

Metodyka badań polegała na wprowadzaniu w kontrolowane oscylacje prostopadłościennych belek, poprzez zadawanie odkształceń wywołujących skręcanie, w zmiennych warunkach temperaturowych. Cykl zmiany wartości temperatury  $T$  obejmował jednokrotne nagrzewanie:

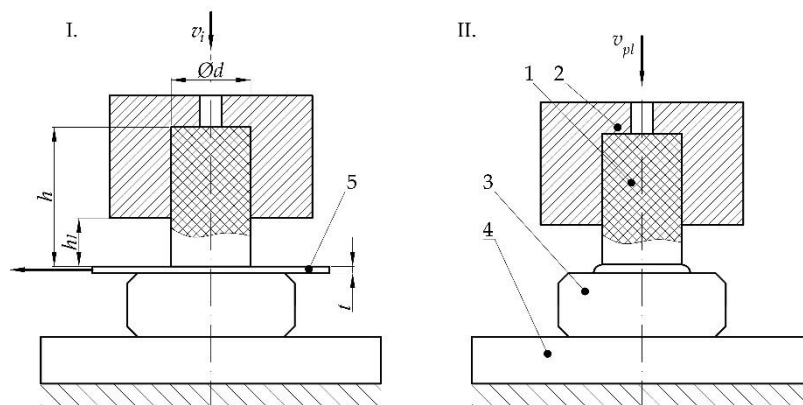
- zakres wartości temperatury od  $-30$  °C do  $+180$  °C, rejestrowanej w sposób ciągły,
- szybkość zmiany wartości temperatury  $|\nabla T| = +5$  °C/min,
- amplituda oscylacji  $A = 0,02\%$ ,
- częstotliwość oscylacji  $f = 1$  Hz [10].

Układ pomiarowy urządzenia rejestrował odpowiedź próbki na wymuszone oscylacje oraz aktualne warunki temperaturowe. Na podstawie otrzymanych wyników dokonano określenia lepkości dynamicznej  $\eta$  przy obciążeniach skręcających.

Końcowy etap badań dotyczył testów osiowego uplastycznienia końcówki pasa na gorącej płycie, w warunkach zbliżonych do tych panujących w zakładzie przemysłowym gdzie wykonuje się zgrzewanie pasów ręcznie. Badania wykonywano przy stałej prędkości przesuwu pasa względem urządzenia grzejnego  $v_{pl}$ , w całym przedziale czasu  $t$  uplastyczniania. Testy wykonywano w warunkach jej zróżnicowanej wartości. W badaniach użyto maszynę wytrzymałościową MTS Insight 50 kN, której szczęka (1) i uchwyt (2) dociskały końcówkę pasa (3) do płyty grzejnej (4). Element (4) stanowiło elektryczne urządzenie zgrzewające do pasów ciągnowych Multi-TC firmy BEHABelt, o mocy 70W. Płyta (4) przylegała dolną powierzchnią do podkładki termoizolacyjnej (5), wykonanej z płyty ceramicznej (Rys. 56) [10].



Rys. 56. Widok stanowiska badawczego podczas badania: 1 – szczęka maszyny wytrzymałościowej MTS, 2 – uchwyt próbki, 3 – próbka, 4 – urządzenie grzejne z gorącą płytą, 5 – podkładka termoizolacyjna [10]



Rys. 57. Schemat stanowiska badawczego do dociskania pasa do gorącej płyty: I – etap kalibracji, II – etap właściwego badania; 1 – próbka pasa, 2 – uchwyt, 3 – gorąca płyta, 4 – podkładka termoizolująca, 5 – przekładka termoizolująca,  $v_i$  – prędkość wstępna kalibracji,  $v_{pl}$  – prędkość badania [10]

Każdorazowo przed pomiarem przeprowadzano kalibrację (I) (Rys. 57), która polegała na tym, że próbka pasa (1) o wysokości  $h$  (której swobodny koniec wysunięty jest z uchwytu na odległość  $h_1$ ) i średnicy  $d$ , zamocowana w uchwycie (2), była zbliżana ze stałą prędkością  $v_i$  do

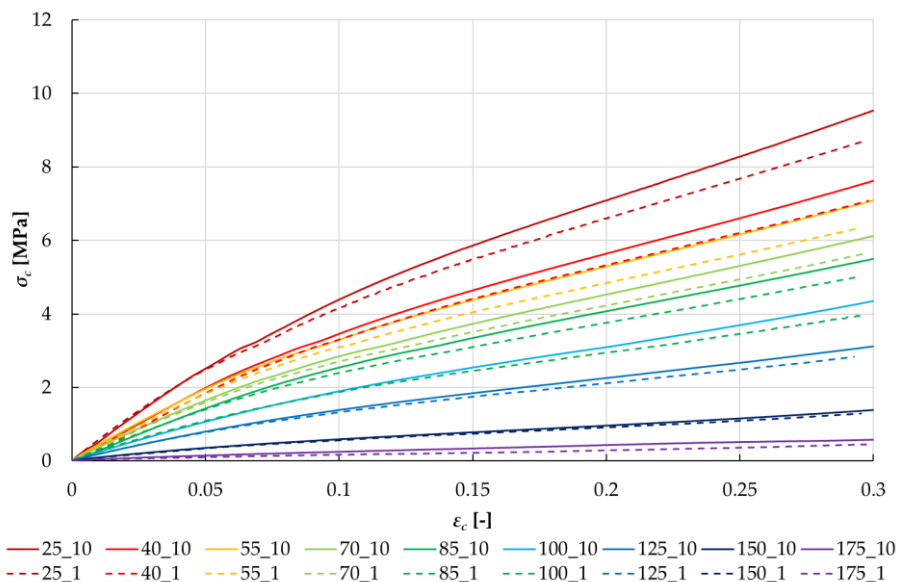
płytki termoizolującej (5), o stałej grubości  $t = 0,5$  mm, aż do fizycznego kontaktu (wykrywano go za pomocą układu pomiaru siły maszyny wytrzymałościowej). Płytką (5) przylegała do gorącej płyty (3), leżącej na podkładce ceramicznej (4). Następnie zatrzymywano ruch trawersy i wyjmowano płytkę (5) [10].

W następnej kolejności rozpoczynano właściwe badanie (II), w którym pas był dociskany do gorącej płyty z prędkością roboczą  $v_{pl}$ , jednocześnie prowadząc pomiar: przemieszczenia  $s$  trawersy maszyny wytrzymałościowej, czasu uplastyczniania  $t$ , siły docisku  $F_{pl}$  oraz wartości temperatury gorącej płyty  $T_p$ . Wykonano 50 prób, dla: 5 prędkości docisku pasa do płyty  $v_{pl}$  i dwóch średnic próbek  $d$ . Uplastycznianie wykonywano w zakresie znacznie przekraczającym rzeczywiste odkształcenia podczas zgrzewania – aż do 50% długości swobodnego końca  $h_l$ . Parametry przeprowadzonych badań przedstawiono w tabeli 20 [10].

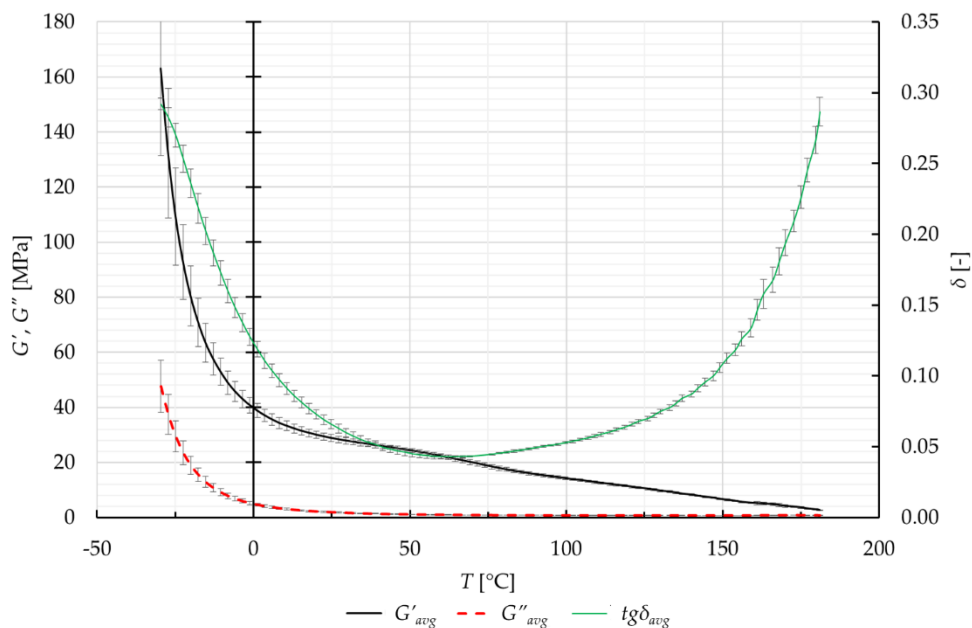
Tabela 20. Parametry badania uplastyczniania pasa [10]

Parametr	Oznaczenie	Wartość
Średnica pasa	d [mm]	12, 18
Prędkość badania	$v_{pl}$ [mm/min]	2, 4, 8, 12, 16
Temperatura gorącej płyty	$T_p$ [°C]	300±1
Wysokość próbki	h [mm]	25±0,1
Wysunięcie próbki z uchwytu	$h_1$ [mm]	10±0,1
Maksymalne przemieszczenie próbki	s [mm]	5,5

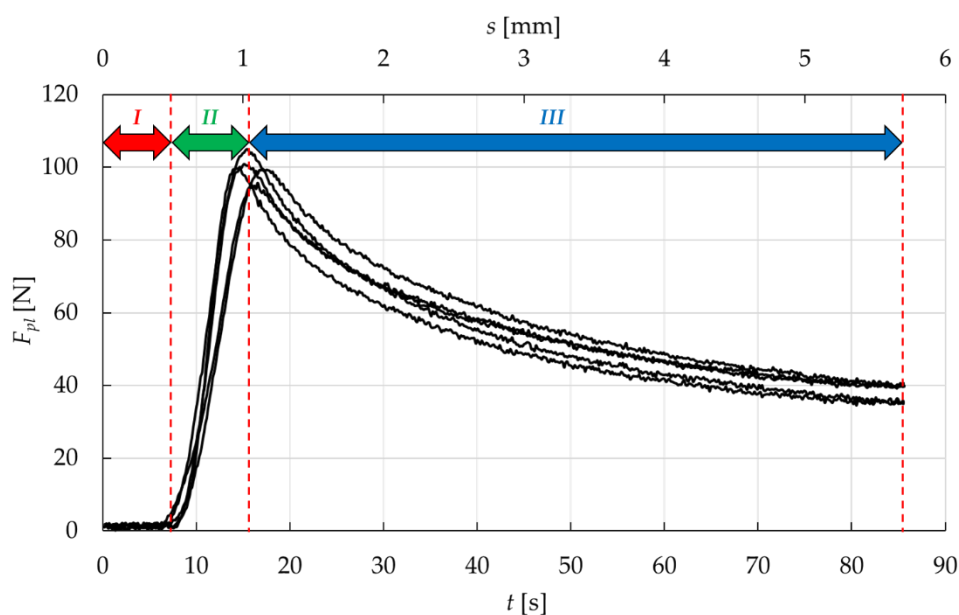
Wprowadzenie etapu kalibracji (I) umożliwiło kompensację niedokładności wymiaru wysokości próbki  $h$ . Zastosowanie przekładki termoizolującej ograniczyło nagrzewanie konwekcyjne próbki w fazie kalibracji, przed rozpoczęciem właściwego badania. Na poniższych rysunkach przedstawiono przykładowe wyniki badań [10].



Rys. 58. Przykładowe wykresy krzywej ściskania (naprężenie  $\sigma_c$  – odkształcenie  $\varepsilon_c$ ) dla: prędkości ściskania  $v_{c1} = 1$  mm/min oraz  $v_{c10} = 10$  mm/min do odkształcenia granicznego  $\varepsilon_{max}$  30% w przy temperaturze  $T$  o różnych wartościach (25, 40, 55, 70, 85, 100, 125, 150 i 175 [°C]) [10]



Rys. 59. Charakterystyka składowych modułu sprężystości poprzecznej  $G$ : zachowawczej  $G'_{avg}$  oraz strat  $G''_{avg}$ , a także współczynnika strat  $tg\delta_{avg}$  w zależności od temperatury materiału  $T$  [10]



Rys. 60. Charakterystyka siły uplastyczniania pasa  $F_{pl}$  na gorącej płycie w zależności od czasu  $t$  oraz przemieszczenia  $s$  końcówki pasa względem gorącej płyty, dla pasa o średnicy  $d = 18$  mm oraz prędkości uplastyczniania  $v_{pl} = 4$  mm/min: *I* – kasowanie luzu powstałego w wyniku zastosowania podkładki izolacyjnej, *II* – etap wyraźnego i powtarzalnego wzrostu siły uplastyczniającej  $F_{pl}$ , *III* – etap zmiennego przebiegu siły w zależności od prędkości uplastyczniania [10]

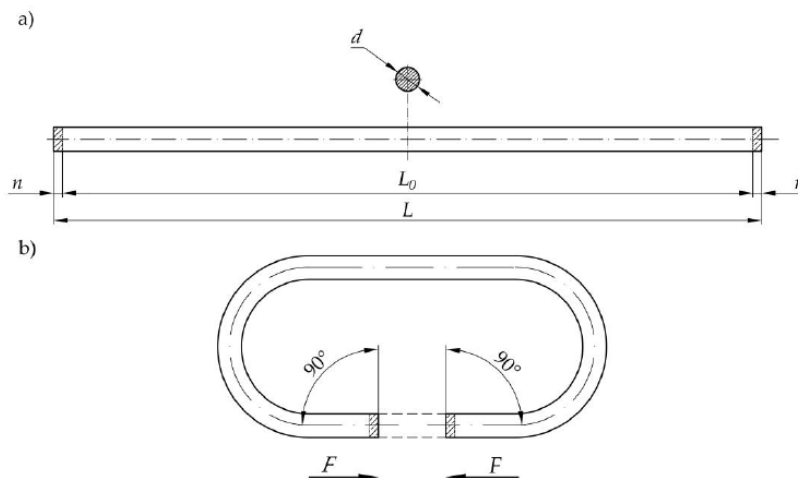
Przeprowadzone prace badawcze, pozwoliły rozpoznać podstawowe właściwości termomechaniczne pasów ciągnowych poddawanych zgrzewaniu. Ich wartości posłużyły do sformułowania modelu matematycznego operacji uplastyczniania pasa, jako najważniejszej fazy procesu technologicznego zgrzewania doczołowego. Wyznaczone charakterystyki:

- naprężeń ściskających  $\sigma_c$  oraz modułu proporcjonalności przy ściskaniu  $E_c$  od prędkości odkształcenia  $\varepsilon_c$  i temperatury  $T$ ,
- lepkości dynamicznej wzdłużnej  $\eta_e$  od wartości temperatury przy określonej prędkości odkształcenia,
- wartości siły uplastyczniania  $F_{pl}$  w zależności od czasu  $t$  lub przemieszczenia  $s$  przy stałej prędkości uplastyczniania  $v_{pl}$ ,

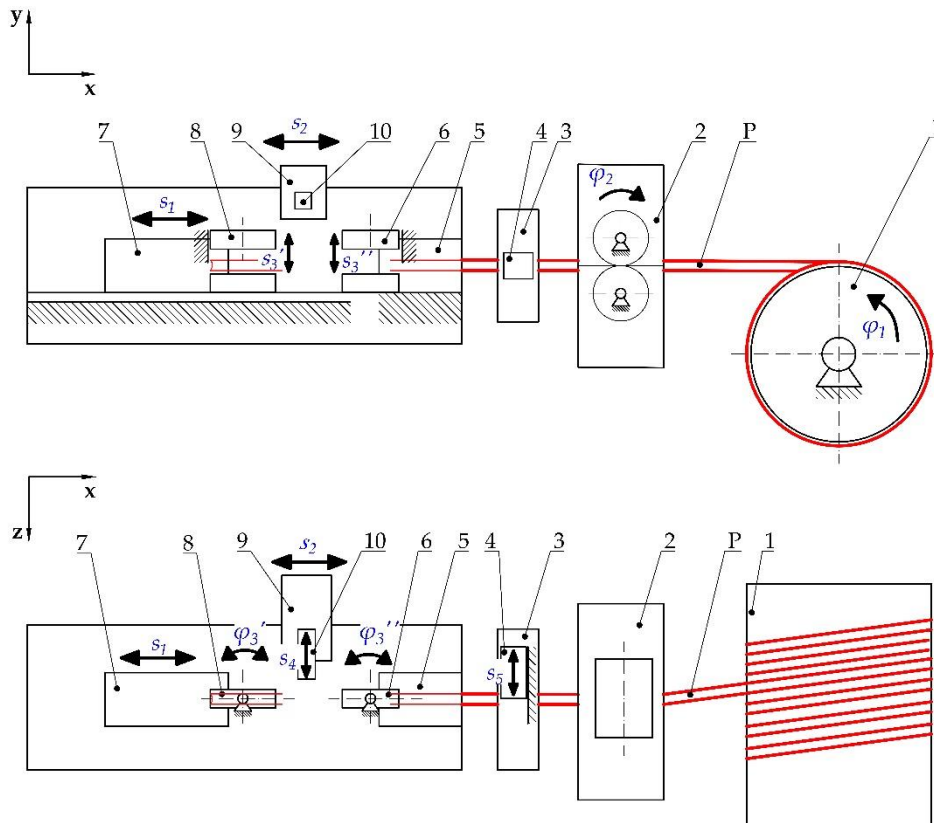
pozwołyły na sformułowanie modelu mechanicznego materiału podczas procesu uplastyczniania, z wykorzystaniem odpowiedniej kombinacji modeli podstawowych: Newtona, Hooke'a oraz St. Venanta [10].

Przedstawione powyżej efekty (Rys. 58-60) zostały wykorzystane do budowy prototypowego urządzenia realizującego proces technologiczny zgrzewania w cyklu automatycznym. Jednym z etapów procesu projektowego było opracowanie rozwiązania elektromechanicznego układu napędowego. W związku z powyższym między innymi na podstawie wyników uzyskanych badań eksperymentalnych (Rys. 58-60) dokonano doboru jego elementów, w szczególności elektromechanicznych zespołów wykonawczych. Z uwzględnieniem kryteriów jakie powinno spełniać urządzenie opracowano strukturę kinematyczną układu napędowego (Rys. 62). Wykonane badania i uzyskane wyniki oraz opracowana struktura układu napędowego, umożliwiły określenie zapotrzebowania na moc. Umożliwił to przede wszystkim zbudowany model matematyczny, który określił korelację pomiędzy siłą uplastyczniania, a parametrami technologicznymi procesu technologicznego jakie powinno realizować prototypowe urządzenie (Rys. 60). Wykorzystując optymalizację doboru parametrów technologicznych przy użyciu algorytmu genetycznego dokonano doboru efektywnego silnika elektrycznego, który jest głównym elementem projektowanego układu napędowego [11].

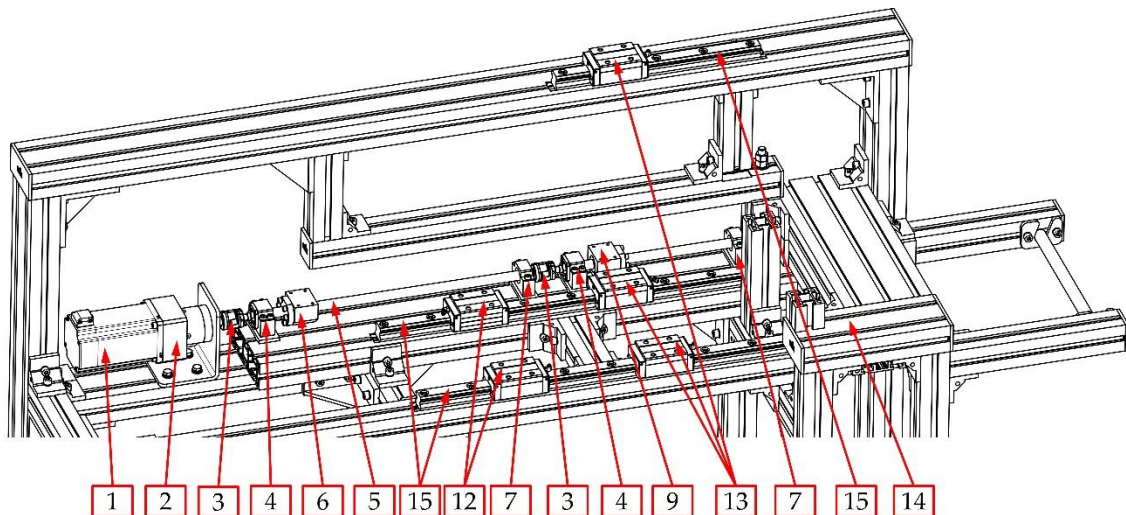
Proces technologiczny ręcznego zgrzewania końców pasa napędowego metodą gorącej płyty składa się z dwóch głównych etapów (Rys. 61): przygotowanie taśmy polegające na odwinięciu taśmy ze szpuli, pomiarze, docięciu na odpowiednią długość i wreszcie umieszczeniu przeciętej taśmy w odpowiednim mechanizmie, co umożliwia wykonanie odpowiedniej manipulacji umożliwiającej wykonanie łączenia, przeprowadzenie operacji zgrzewania (Rys. 61) [11].



Rys. 61. Przygotowanie taśmy przed operacją zgrzewania gorącą płytą: a) przycięcie na odpowiednią długość oraz b) manipulacja końcami taśmy w celu uzyskania ich właściwej orientacji [11]

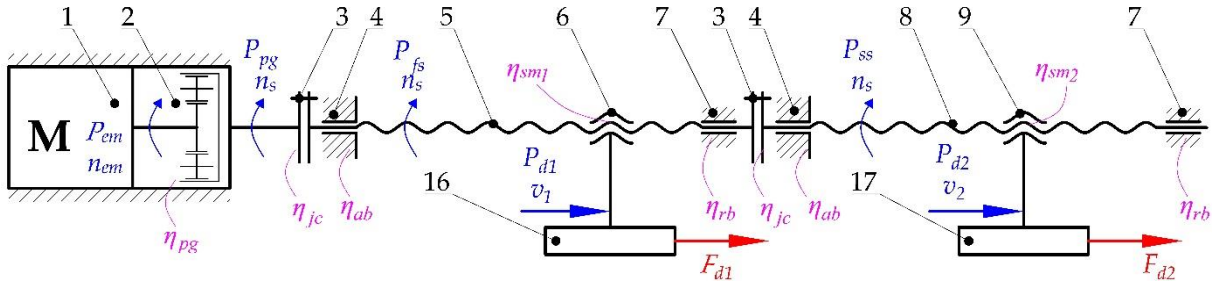


Rys. 62. Koncepcja zgrzewarki automatycznej z gorącą płytą: P – pas, 1 – szpula z nawiniętym pasem, 2 – podajnik rollowy, 3 – zespół tnący, 4 – układ tnący noża, 5 – nieruchomy element przewodzący końcówkę pasa, 6 – nieruchomy zacisk końcówki pasa, 7 – ruchomy uchwyt końca pasa, 8 – ruchomy zacisk końca pasa, 9 – element grzewczy, 10 – płyta grzewcza;  $s_1 \dots s_5$  – przemieszczenie liniowe,  $\varphi_1 \dots \varphi_3$  – przemieszczenie kątowe [11]



Rys. 63. Napęd główny i układ prowadzenia pasa urządzenia do zgrzewania pasów: 1 – silnik elektryczny BLDC, 2 – przekładnia planetarna, 3 – sprzęgło kłowe z wkładką elastyczną, 4 – zespół łożyska skośnego (mocowanie), 5 – śruba kulowa o skoku p1, 6 – nakrętka kulowa o skoku p1, 7 – zespół łożyskowy promieniowy (pływający), 8 – śruba kulowa o skoku p2, 9 – nakrętka kulowa o skoku p2, 12 – wózki prowadzenia uchwytu paska ruchomego, 13 – wózki prowadzenia element grzewczy, 14 – rama konstrukcyjna, 15 – szyna profilowana [11]

Właściwy dobór podzespołów urządzenia zgrzewającego, w szczególności silnika elektrycznego, ma kluczowe znaczenie. Celem określenia wymaganej mocy projektowanego układu napędowego przeanalizowano obciążenie w układzie (Rys. 64) [11].



Rys. 64. Budowa kinematyczna głównego układu napędowego automatu spawalniczego: 1 – silnik elektryczny BLDC, 2 – przekładnia planetarna, 3 – sprzęgło kłowe z wkładką elastyczną, 4 – zespół łożyska skośnego (mocowanie), 5 – śruba kulowa o skoku  $p_1$ , 6 – nakrętka kulowa o skoku  $p_1$ , 7 – łożysko promieniowe (pływające), 8 – śruba kulowa o skoku  $p_2$ , 9 – nakrętka kulowa o skoku  $p_2$ , 16 – uchwyt uchwytu paska ruchomego, 17 – uchwyt zespołu grzewczego;  $P_{em}$  – moc wyjściowa silnika,  $P_{pg}$  – moc wyjściowa przekładni planetarnej,  $P_{fs}$  – moc w pierwszej śrubie kulowej,  $P_{ss}$  – moc w drugiej śrubie kulowej,  $P_{d1}$  – moc w ruchomym mechanizmie uchwytu paska,  $P_{d2}$  – moc w ogrzewaniu mechanizm zespołu,  $n_{em}$  – prędkość obrotowa silnika elektrycznego,  $n_s$  – prędkość obrotowa ślimaków,  $v_1$  – prędkość liniowa uchwytu paska ruchomego,  $v_2$  – prędkość liniowa zespołu grzewczego,  $F_{d1}$  – siła potrzebna do napędzania paska ruchomego uchwytu,  $F_{d2}$  – siła potrzebna do napędzania zespołu grzewczego,  $\eta_{em}$  – sprawność przekładni planetarnej,  $\eta_{jc}$  – sprawność sprzęgła kłowego,  $\eta_{ab}$  – sprawność łożyska kąтового,  $\eta_{rb}$  – sprawność łożyska poprzecznego,  $\eta_{sm1}$  – sprawność pierwszego mechanizmu śrubowego,  $\eta_{sm2}$  – sprawność drugiego mechanizmu śrubowego [11]

W kolejnym kroku zbudowano model wartości siły uplastyczniającej  $F_{pl\_mod}$  w zależności od parametrów technologicznych ( $T_p$  oraz  $v_{pl}$ ) a także przemieszczenia  $s$ , który można wyrazić w następujący sposób [11]:

$$F_{pl\_mod} = \{[(a_{tavasa} \cdot T_p + b_{tavasa}) \cdot v_{pl} + (a_{tbvasa} \cdot T_p + b_{tbvasa})] \cdot s + (a_{tavbsa} \cdot T_p + b_{tavbsa}) \cdot v_{pl} + (a_{tbvbsa} \cdot T_p + b_{tbvbsa})\} \cdot s + \{[(a_{tavasb} \cdot T_p + b_{tavasb}) \cdot v_{pl} + (a_{tbvasb} \cdot T_p + b_{tbvasb})] \cdot s + (a_{tavbsb} \cdot T_p + b_{tavbsb}) \cdot v_{pl} + (a_{tbvbsb} \cdot T_p + b_{tbvbsb})\} \quad (24)$$

gdzie:  $a_{tavasa}$ ,  $b_{tavasa}$ ,  $a_{tbvasa}$ ,  $b_{tbvasa}$ ,  $a_{tavbsa}$ ,  $b_{tavbsa}$ ,  $a_{tbvbsa}$ ,  $b_{tbvbsa}$ ,  $a_{tavasb}$ ,  $b_{tavasb}$ ,  $a_{tbvasb}$ ,  $b_{tbvasb}$ ,  $a_{tavbsb}$ ,  $b_{tavbsb}$ ,  $a_{tbvbsb}$ , i  $b_{tbvbsb}$  są współczynnikami uwzględniającymi zmiany temperatury płyty grzewczej  $T_p$  dla wcześniej wyznaczonych współczynników ogólnego modelu siły plastyfikacji  $a_{vasa}$ ,  $b_{vasa}$ ,  $a_{vbsa}$ ,  $b_{vbsa}$ ,  $a_{vasb}$ ,  $b_{vasb}$ ,  $a_{vbsb}$  and  $b_{vbsb}$  [11].

Po wyznaczeniu funkcji opisującej zależność siły uplastyczniającej  $F_{pl}$  od podstawowych parametrów technologicznych podczas uplastyczniania (prędkości uplastyczniania  $v_{pl}$ , temperatury gorącej płyty  $T_p$  oraz przemieszczenia podczas uplastyczniania  $s_{pl}$ ) możliwe jest wykonanie optymalizacji parametrów technologicznych uplastyczniania w celu uzyskania pożądanego przebiegu tej operacji [11].

Na podstawie tak postawionych wniosków, można określić następujące funkcje celu do przeprowadzenia optymalizacji:

– minimalizacja wartości siły uplastyczniania  $F_{pl}$ , którą można opisać jako:

$$\min F_{pl}(s_{pl}) \quad (25)$$

Biorąc pod uwagę możliwość wykorzystania wcześniej określonych punktów kontrolnych o współrzędnych  $s_i$ , w sposób matematyczny tę funkcję celu można zrealizować poprzez sprawdzanie maksymalnej wartości siły uplastyczniającej:

$$\max F_{pli} \quad (26)$$

w poszczególnych punktach kontrolnych:

$$i = 1 \dots 5$$

i porównywanie uzyskanych wartości do wyników dla innych parametrów technologicznych. Operacja ta pozwoli na wyznaczenie wartości nastaw ( $v_{pl}$  i  $T_p$ ), przy której maksymalna wartość siły uplastyczniającej  $F_{pl}$  będzie jak najniższa,

– stała wartość siły uplastyczniania  $F_{pl}$  w całym badanym zakresie przemieszczenia  $s_{pl}$  (w drugiej fazie uplastyczniania), przy założeniu odchyłek od wartości średniej nie większych niż 10%. Tę funkcję celu, w ujęciu ogólnym można zapisać jako:

$$F_{pl}(s) \cong const \quad (27)$$

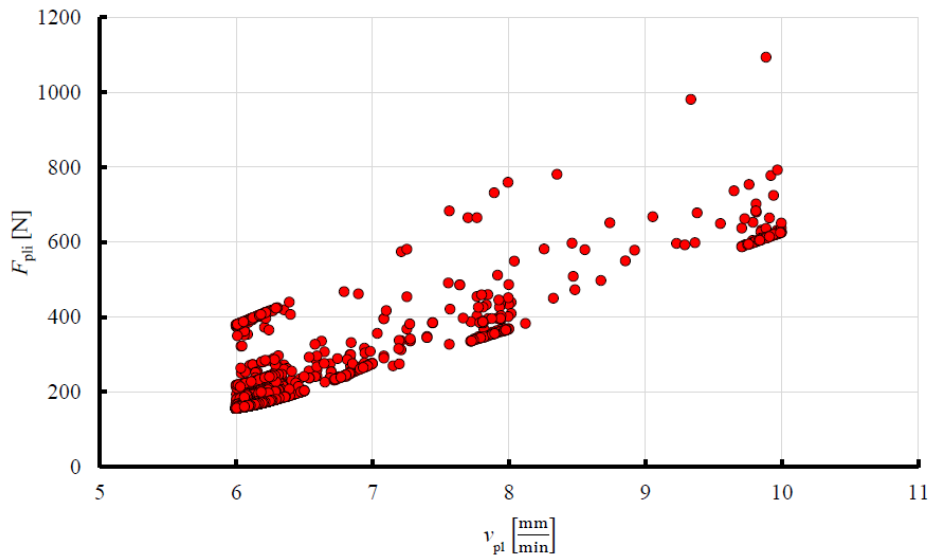
Biorąc po uwagę możliwość wykorzystania punktów kontrolnych  $s_i$ , w sposób matematyczny tę funkcję celu można opisać jako:

$$\delta F_{pli}(s) = \frac{|F_{mod\_c\_i} - F_{mod\_c\_j}|}{F_{mod\_c\_i}} \cdot 100\% < 10\% \quad (28)$$

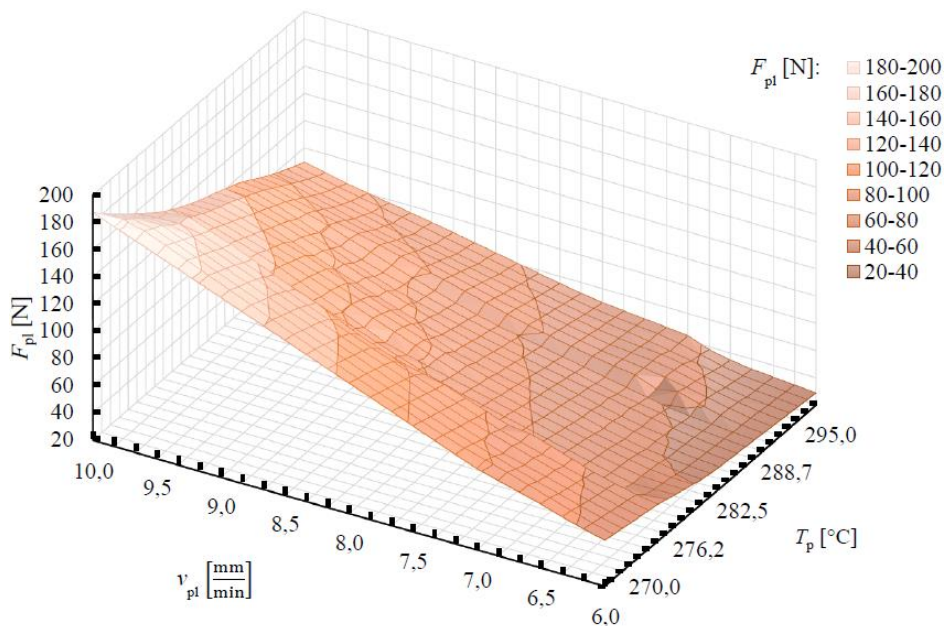
przy czym jej rozpatrywanie można sprowadzić do sekwencyjnego sprawdzania spełnienia tego warunku matematycznego. Na potrzeby dalszych rozważań funkcja ta może być określona jako funkcja kontrolna.

Na rysunku 65 przedstawiono przykładowy zbiór punktów obliczeniowych stanowiących wartości siły uplastyczniającej  $F_{pli}$  (w poszczególnych punktach kontrolnych) w zależności od parametrów technologicznych operacji ( $v_{pl}$  oraz  $T_p$ ), na podstawie przeliczenia modelu w poszczególnych punktach kontrolnych podczas optymalizacji. Wzrost wartości siły uplastyczniającej  $F_{pl}$ , wraz ze zwiększeniem prędkości uplastyczniania  $v_{pl}$  oraz zmniejszeniem temperatury gorącej płyty  $T_p$  jest efektem spodziewanym, co potwierdzono w badaniach eksperymentalnych [11].





Rys. 65. Przykładowa mapa rozmieszczenia punktów obliczeniowych podczas obliczeń z wykorzystaniem algorytmu genetycznego NCGA, w postaci korelacji pomiędzy otrzymywanymi wartościami siły uplastyczniającej  $F_{pl}$  w poszczególnych punktach kontrolnych, w funkcji prędkości uplastycznienia  $v_{pl}$ , przy stałej wartości temperatury gorącej płyty  $T_p$  oraz średnicy pasa  $d = 18$  mm [11]



Rys. 66. Przykładowe wyniki optymalizacji z wykorzystaniem algorytmu genetycznego NCGA dla pasa o średnicy  $d = 18$  mm, w formie powierzchni wyznaczonej przez wartości siły uplastyczniającej  $F_{pl}$  w zależności od wartości temperatury gorącej płyty  $T_p$  oraz prędkości uplastycznienia  $v_{pl}$  [11]

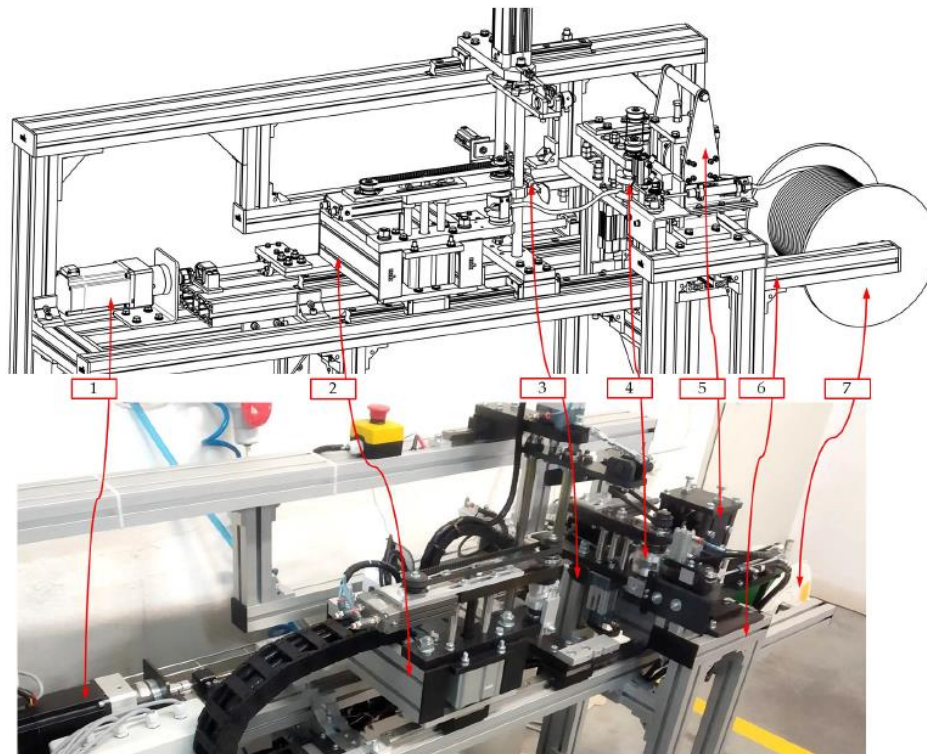
Uwzględniając powyższą analizę z wykonaną optymalizacją oraz bazując na danych producentów elementów i zespołów składających się na budowę układu napędowego odnośnie ich sprawności i współczynników tarcia (Rys. 64) określono zależność na wyznaczenie zapotrzebowania na moc silnika dla proponowanego układu napędowego prototypowego

urządzenia zgrzewającego, co zestawiono w Tabeli 21 dla trzech różnych średnic zgrzewanego pasa [11].

Tabela 21. Wyniki wyznaczenia mocy potrzebnej do napędu urządzenia [11]

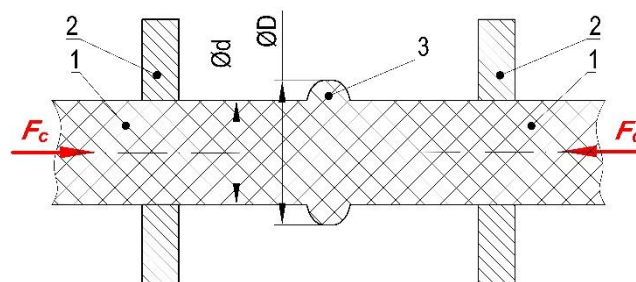
Parametr	Oznaczenie	Wartość		
Średnica pasa	$d$ [mm]	12	15	18
Efektywna temperatura gorącej płyty	$T_p$ [°C]	277,5	292,5	300
Efektywna prędkość uplastyczniana	$v_{pl}$ [mm/min]	6,45	6,49	6,29
Siła uplastyczniana	$F_{pl}$ [N]	56,90	107,55	179,86
Siła potrzebna do przesunięcia uchwytu pasa	$F_{d1}$ [N]	57,98	108,63	180,94
Siła potrzebna do przesunięcia jednostki grzejącej	$F_{d2}$ [N]	57,44	108,09	180,40
Wymagana prędkość obrotowa dla śrub napędowych	$n_s$ [rpm]	1,290	1,298	1,258
Ogólna moc potrzebna do napędu (wymagana moc silnika elektrycznego)	$P_{em}$ [W]	0,0231	0,0437	0,0706

W efekcie zbudowano prototyp urządzenia do realizacji procesu technologicznego zgrzewania końców pasów napędowych, który przedstawiono na rysunku 67.



Rys. 67. Prototyp automatu spawalniczego: 1 – główny zespół napędowy urządzenia, 2 – zespół uchwytu taśmy ruchomej, 3 – zespół grzejny, 4 – zespół uchwytu taśmy stałej, 5 – zespół podajnika rolkowego z zespołem tnącym, 6 – rama, 7 – szpula z nawiniętym paskiem [11]

Wkład habilitanta miał również postać udziału merytorycznego w rozwiązaniu problematyki usunięcia wypływki jako niepożądanego efektu zgrzania końcówek pasa, aby uzyskany pas bezkońcowy mógł być wykorzystany zgodnie z jego przeznaczeniem. Na poniższym rysunku przedstawiono powstałą wypływkę na skutek zgrzania końców pasa.



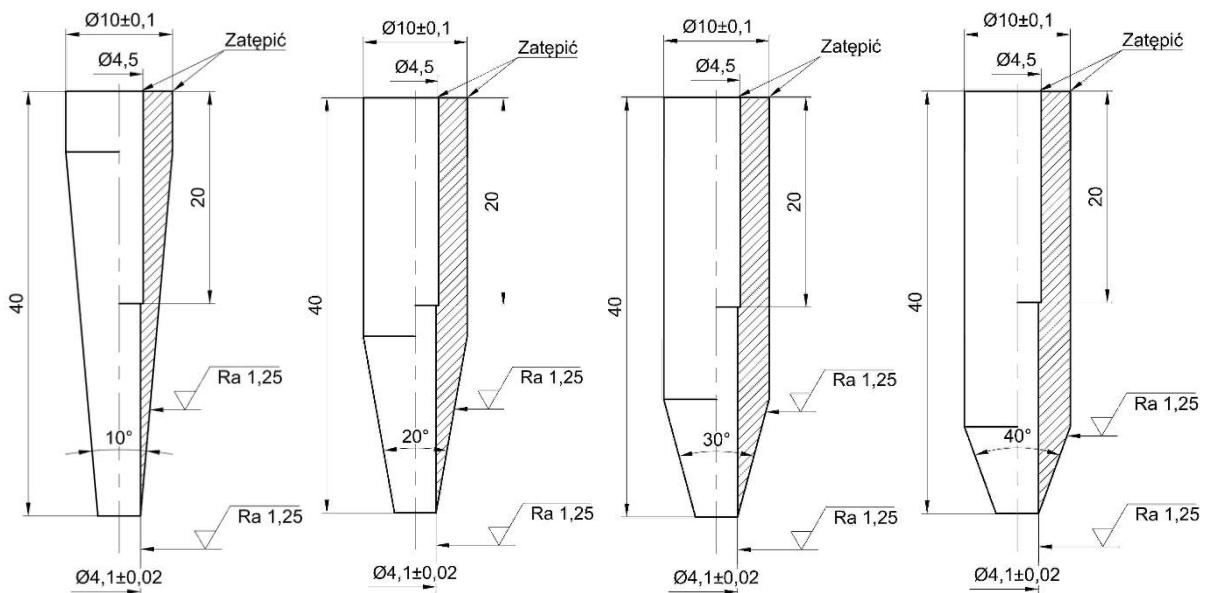
Rys. 68. Powstawanie wypływki w końcowym etapie zgrzewania doczołowego pasów:  
 1 – zakończenia pasa, 2 – uchwyty, 3 – wypływka;  $F_c$  – siła docisku pasa w końcowej fazie zgrzewania,  $d$  – średnica pasa,  $D$  – średnica zewnętrzna wypływki [12]

Wypływkę stanowi nadmiar materiału, w formie pierścienia o średnicy  $D$  obejmującego spoinę, powstałego w wyniku dociskania uplastycznionych końców pasa do gorącej płyty z siłą  $F_c$ . Usuwanie wypływki jest istotnym problemem w aspekcie automatyzacji procesu wytwarzania takich pasów, tym bardziej że pas na skutek jego zgrzania stanowi zamknięty obwód. W związku z tym, operacja ta często jest przeprowadzana ręcznie, przy użyciu prostych

narzędzi np. nożyc. Dążąc do automatyzacji całego procesu produkcji pasów, opracowano metodę usuwania wyływki po zgrzewaniu, która polega na jej ścinaniu za pomocą profilowanych tulejek tnących, a także zaprojektowano niezbędne oprzyrządowanie. W celu poprawnego doboru komponentów układu napędowego, niezbędne jest oszacowanie wartości sił technologicznych podczas tej operacji technologicznej [12].

W celu określenia wartości siły, niezbędnej do wykonania tej operacji, przeprowadzono obliczenia analityczne i badania eksperymentalne procesu ścinania wyływki. Prowadzą one do wyznaczenia charakterystyki przebiegu usuwania wyływki tą metodą, ze szczególnym zwróceniem uwagi na maksymalną wartość siły technologicznej ścinania. Przeprowadzono próby ścinania dla trzech przypadków opracowanego rozwiązania konstrukcyjnego oprzyrządowania, a także wykonano obliczenia analityczne prowadzące do uzyskania maksymalnej siły cięcia, dla jednej z nich [12].

Badania wykonano wykorzystując autorskie, stożkowe ostrza tnące, o różnych kątach rozwarcia stożka:  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  i  $40^\circ$ , wykonane ze stali hartowanej do 58 HRC (Rys. 69).



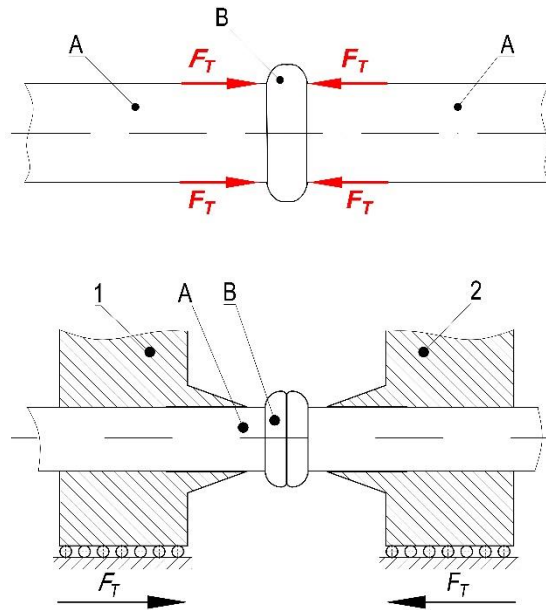
Rys. 69. Rysunki wykonawcze ostrzy wykorzystanych w badaniach, o kątach rozwarcia:  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  i  $40^\circ$

Dla przyjętej stałej geometrii ostrzy tnących, założono trzy sposoby usuwania wyływki [12]:

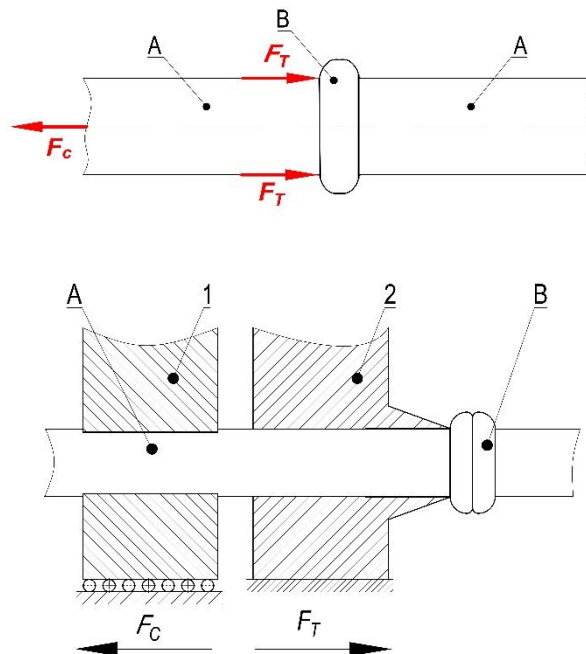
- dwustronne ścinanie wyływki, przeciwnie zwróconymi wektorami sił tnących  $F_T$ , rozmieszczonymi równomiernie na obwodzie pasa, działającymi stycznie do walcowej powierzchni zewnętrznej cięgna (Rys. 70),

- jednostronne ścinanie wyływki, za pomocą sił tnących  $F_T$ , rozmieszczonych równomiernie na obwodzie pasa, działających stycznie do walcowej powierzchni zewnętrznej cięgna, z dodatkową siłą  $F_c$  działającą wzdłuż osi pasa, o przeciwnym zwrocie (Rys. 71),

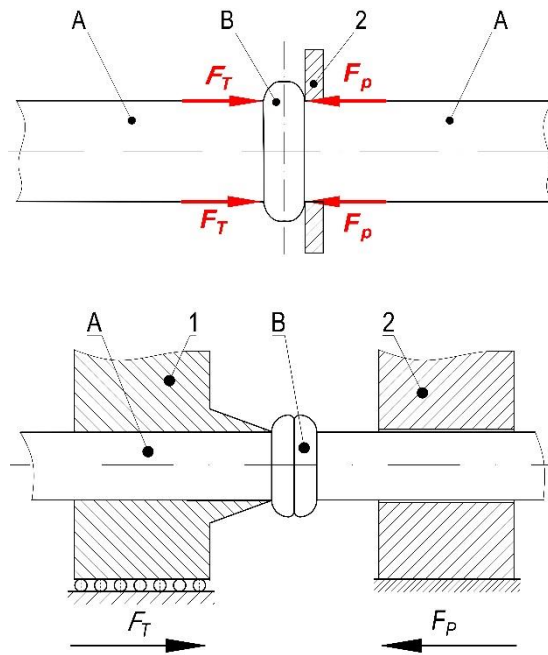
- jednostronne ścinanie wyływki, za pomocą sił tnących  $F_T$ , rozmieszczonych równomiernie na obwodzie pasa, działających stycznie do walcowej powierzchni cięgna, z podparciem wyływki za pomocą dodatkowej płytki (Rys. 72) [12].



Rys. 70. Dwustronne ścinanie wypływki przeciwnie skierowanymi siłami tnącymi, wraz z przykładem realizacji: A – zakończenia pasa, B – wypływka, 1 i 2 – tulejki tnące;  $F_T$  – siły ścinające wypływkę [12]

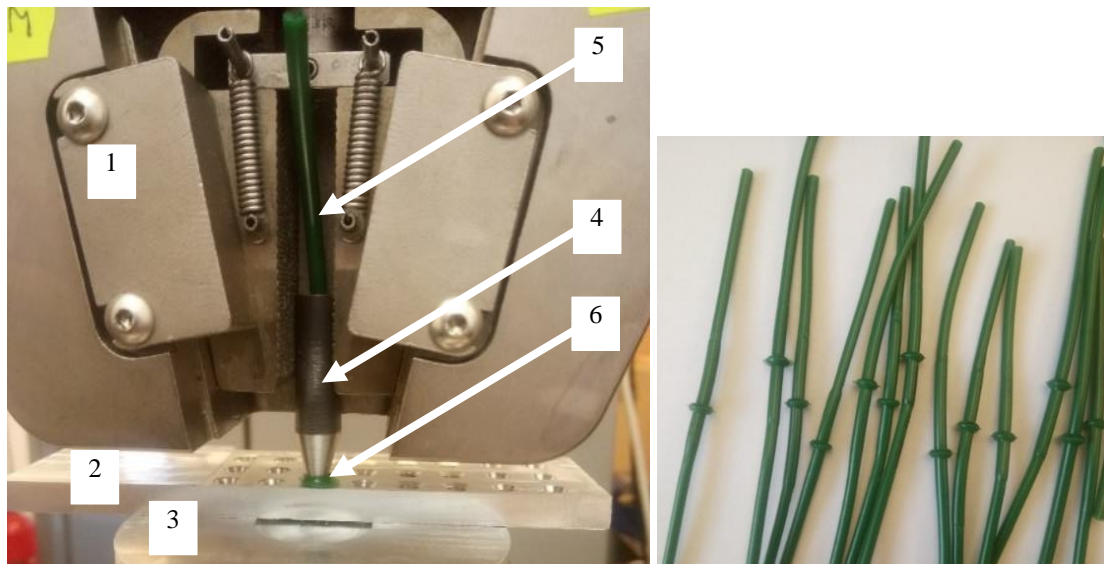


Rys. 71. Jednostronne ścinanie wypływki z przeciwnie działającą siłą przeciągającą pas: A – zakończenia pasa, B – wypływka;  $F_T$  – siły ścinające wypływkę,  $F_C$  – siła przeciągająca pas przez tulejkę, 1 – tulejka przeciągająca, 2 – tulejka ścinająca [12]



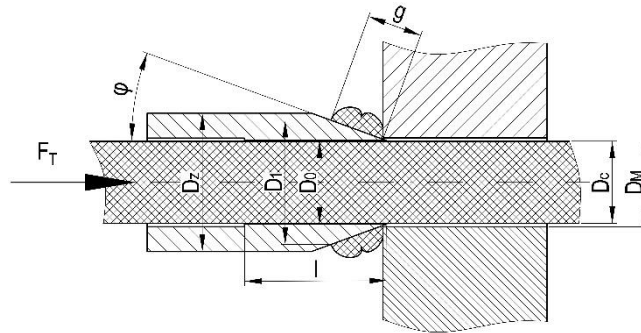
Rys. 72. Jednostronne ścinanie wyływki z podporą: A – zakończenia pasa, B – wyływka, 1 – tulejka ścinająca, 2 – płytkę podporającą;  $F_T$  – siły ścinające wyływkę,  $F_p$  – siły reakcji płytki podporującej [12]

Do badań wykorzystano maszynę wytrzymałościową MTS Insight 50 kN, ze standardowymi uchwytami zaciskowymi, płaską płytkę podporową z otworami oraz talerz podporający (Rys. 73). Próbki miały formę zgrzanych odcinków pasa (Rys. 73) [12].

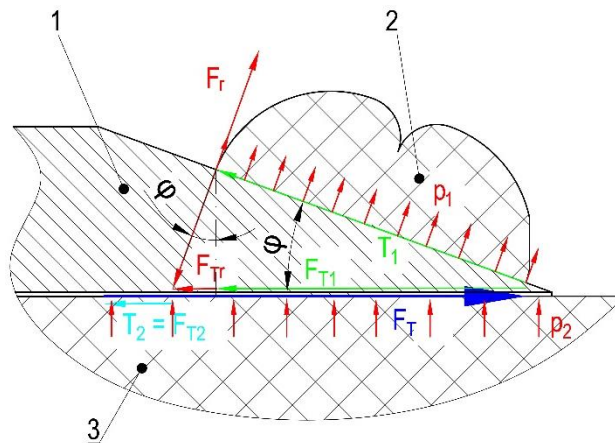


Rys. 73. Stanowisko badawcze podczas badań ścinania wyływki z wykorzystaniem trzeciej metody (po lewej): 1 – uchwyt maszyny wytrzymałościowej, 2 – płytkę podporowa z otworami, 3 – talerz podporający, 4 – tulejka ścinająca, 5 – pas, 6 – wyływka. Próbki pasa z wyływką, przygotowane do badań (po prawej) [12]

Habilitant jako promotor pomocniczy miał znaczący wkład w weryfikację modelu analitycznego na podstawie, którego wyznaczono siłę potrzebną do ścinania wyływki (Rys. 74 i 75).



Rys. 74. Wymiary przyjęte do obliczeń analitycznych:  $\varphi$  – kąt pochylenia ścianki ostrza,  $D_z$  – średnica zewnętrzna tulejki tnącej,  $D_0$  – średnica otworu tulejki tnącej,  $D_c$  – średnica zewnętrzna pasa,  $D_M$  – średnica otworu w podporze,  $g$  – grubość wyływki,  $F_T$  – siła niezbędna do ścinania wyływki,  $l$  – długość powierzchni kontaktu pasa z ostrzem [12]



Rys. 75. Zależność pomiędzy wektorami sił podczas ścinania wyływki: 1 – ostrze, 2 – wyływka, 3 – pas;  $F_T$  – siła technologiczna ścinania wyływki,  $F_{Tr}$  – składowa siły ścinania pochodząca od rozciągania wyływki na powierzchni stożkowej ostrza,  $F_{T1}$  – składowa siły pochodząca od tarcia wyływki na powierzchni stożkowej ostrza,  $F_{T2}$  – składowa pochodząca od tarcia pasa wewnątrz otworu ostrza,  $F_r$  – jednostkowa siła rozciągająca wyływkę,  $\varphi$  – kąt pochylenia ścianki ostrza,  $p_1$  – nacisk powierzchniowy wyływki na powierzchnię ostrza,  $T_1$  – sumaryczna siła tarcia na powierzchni ostrza, pomiędzy wyływką, a stożkową powierzchnią ostrza,  $T_2$  – sumaryczna siła tarcia pomiędzy powierzchnią pasa, a otworem w ostrzu [12]

Siłę technologiczną niezbędną do ścinania wyływki  $F_T$  można opisać za pomocą wyrażenia:

$$F_T = F_{Tr} + F_{T1} + F_{T2} \quad (29)$$

gdzie:  $F_T$  – siła technologiczna ścinania wyływki,  $F_{Tr}$  – składowa siły ścinania pochodząca od rozciągania wyływki na powierzchni stożkowej ostrza,  $F_{T1}$  – składowa siły ścinania

pochodząca od tarcia wypływki na powierzchni stożkowej ostrza,  $F_{T2}$  – składowa pochodząca od tarcia pasa wewnątrz otworu ostrza [12].

Przy czym rozważając siłę  $F_{Tr}$ , zgodnie z rozkładem sił (Rys. 75), można zapisać, że:

$$F_{Tr} = F_r \cdot \sin\varphi = p_1 \cdot A_s \quad (30)$$

ostatecznie zależność (30) przyjmuje postać:

$$F_{Tr} = \frac{g^2 \cdot \sin^2\varphi \cdot E_p \cdot \pi}{D_0} \cdot (D_0 + g \cdot \sin\varphi) \quad (31)$$

gdzie:  $F_r$  – jednostkowa siła rozciągająca wypływkę,  $\varphi$  – kąt pochylenia ścianki ostrza,  $p_1$  – nacisk powierzchniowy wypływki na powierzchnię ostrza,  $A_s$  – powierzchnia tworzącej stożka, stanowiącej ściankę ostrza, na której znajduje się odkształcona wypływka [12].

Zależność na składową  $F_{T1}$  jest następująca:

$$F_{T1} = \frac{g^2 \cdot \cos^2\varphi \cdot E_p \cdot \pi}{D_0} \cdot (D_0 + g \cdot \sin\varphi) \quad (32)$$

Składowa  $F_{T2}$  technologicznej siły cięcia  $F_T$ , pochodząca od tarcia pasa na walcowej powierzchni otworu ostrza może być wyznaczona z zależności:

$$F_{T2} = p_2 \cdot \pi \cdot D_0 \cdot l \cdot \mu \quad (33)$$

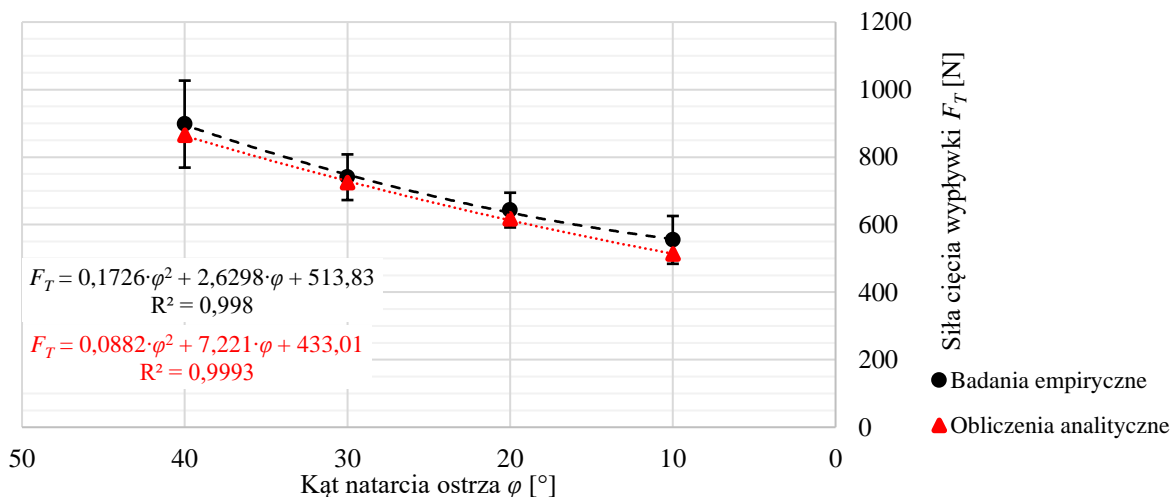
przy czym:  $\mu$  – współczynnik tarcia pomiędzy pasem, a tulejką tnącą,  $p_2$  – nacisk powierzchniowy pasa w otworze ostrza.

Badania z wykorzystaniem trzeciej metody tzn. z dociskiem wypływki poprzez ostrze do płaskiej podpory z otworem przyniosły spodziewany rezultat. Wypływka za każdym razem usuwana była w całości. Wyniki badań empirycznych oraz obliczeń analitycznych zestawiono w tabeli 22 oraz na Rys. 76. Dla rozpatrywanej metody uzyskano dość dobre przybliżenie rzeczywistych wyników badań, za pomocą modelu analitycznego. Różnica w uzyskanych wynikach, sięgająca maksymalnie około 8% spowodowana jest prawdopodobnym pojawianiem się oddziaływań zginających podczas procesu ścinania. Uzyskano również dobrą powtarzalność wyników badań empirycznych [12].



Tabela 22. Wyniki obliczeń analitycznych i badań empirycznych jednostronnego ścinania wyływki z płytką podporową [12]

<b>Obliczenia analityczne</b>				
Kąt rozwarcia ostrza $2\varphi$ [°]	10	20	30	40
Składowa siły pochodząca od rozciągania wyływki $F_{Tr}$ [N]	3,80	18,23	46,01	98,19
Składowa siły pochodząca od tarcia pomiędzy wyływką, a ostrzem $F_{Tl}$ [N]	496,19	586,40	640,87	741,20
Składowa siły pochodząca od tarcia pomiędzy pasem, a otworem tulei $F_{T2}$ [N]	12,56	12,56	37,69	25,12
<b>Sumaryczna siła ścinania wyływki obliczeniowa <math>F_T</math> [N]</b>	<b>512,55</b>	<b>617,19</b>	<b>724,57</b>	<b>864,50</b>
<b>Badania empiryczne</b>				
<b>Średnia siła ścinania wyływki <math>F_T</math> [N]</b>	<b>554,85</b>	<b>643,10</b>	<b>740,45</b>	<b>897,74</b>
Odchylenie standardowe populacji $\sigma$ [N]	70,81	51,43	67,65	128,84
Różnica procentowa pomiędzy wynikami empirycznymi i analitycznymi [%]	8,25	4,20	2,19	3,84



Rys. 76. Wyniki badań empirycznych oraz obliczeń analitycznych siły potrzebnej do ścienania wyływki w zależności od kąta natarcia ostrza [12]

### Podsumowanie

W związku z powyżej przedstawionymi efektami prac badawczo-rozwojowych habilitant:

- opracował w roli promotora pomocniczego ze współautorami w tym z doktorantem jako głównym autorem, metodykę przeprowadzenia badań eksperymentalnych,
- nadzorował merytorycznie interpretację uzyskanych wyników badań,
- wspomagał merytorycznie wraz z nadzorem prace projektowe prototypowego urządzenia do realizacji procesu technologicznego zgrzewania pasów napędowych,
- wspomagał merytorycznie prace na modelowaniem charakterystyk zmian poszczególnych badanych parametrów procesu zgrzewania wraz z modelowaniem procesu ścinania wyływki jako efektu zgrzania dwóch końców pasa,

- współpracował merytorycznie podczas pisania zgłoszeń patentowych związanych z rozwiązaniami konstrukcyjnymi dotyczącymi urządzenia do zgrzewania pasów jak i usuwania wyływki.

Należy podkreślić, że badania zostały wykonane przez Pana mgr inż. Krzysztofa Wałęsę, doktoranta, która realizował ww. badania jako cele szczegółowe w ramach realizacji doktoratu. Tematyka jest związana z problematyką przemysłową dotyczącą łączenia końców pasów do postaci pasów bezkońcowych w procesie produkcyjnym w zakładzie przemysłowym Wilhelm Herm Müller zlokalizowanym w Bydgoszczy. Habilitant miał swój wkład w roli promotora pomocniczego.

Przedstawione wyżej efekty pracy naukowej habilitanta zostały opublikowane w poniższych pracach naukowych:

- Krzysztof Wałęsa, Krzysztof Talaśka, **Dominik Wilczyński**, Jan Górecki, Dominik Wojtkowiak. Experimental approach to modeling of the plasticizing operation in the hot plate welding process. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2022, vol. 22, iss. 1, s. 16-16-25, IF = 4,4, 140 pkt. – **udział własny 10%**,
- Krzysztof Wałęsa, Krzysztof Talaśka, **Dominik Wilczyński**. Designing of the electromechanical drive for automated hot plate welder using load optimization with Genetic Algorithm. *Materials* - 2022, vol. 15, iss. 5, s. 1787-1-1787-37, IF = 3,4, 140 pkt. – **udział własny 30%**),
- Krzysztof Wałęsa, Ireneusz Malujda, **Dominik Wilczyński**. Shaping the Parameters of Cylindrical Belt Surface in the Joint Area. *Acta Mechanica et Automatica*. 2019, vol. 13, no. 4, s. 255-261, 40 pkt. – **udział własny 20%**.

**W zakresie wymienionych publikacji na wkład habilitanta składa się współodpowiedzialność organizacyjna i koordynacyjna dotycząca planowania i realizacji działalności badawczej w omówionym powyżej zakresie. Opracowanie wraz ze współautorami metodyki badawczej z opieką merytoryczną dotyczącą wykonania badań eksperymentalnych, pozyskania materiału do badań i jego przygotowaniem oraz także zaprojektowaniem i przygotowaniem stanowiska badawczego. Konsultacja merytoryczna nad opracowaniem wyników badań w formie pozyskania właściwych charakterystyk dla oceny prawidłowości przebiegu spodziewanych/prognozowanych zmian wielkości badanych w eksperymencie. Habilitant był także odpowiedzialny za nadzór merytoryczny przygotowania treści manuskryptów z późniejszym nadzorem odnośnie przygotowania odpowiedzi na uwagi recenzentów i naniesienia właściwych zmian.**

Habilitant jest współautorem następujących patentów związanych z procesem technologicznym zgrzewania pasów:

- Moduł dozowania urządzenia do zautomatyzowanego zgrzewania doczołowego pasów ciągnowych, Krzysztof Wałęsa, Jan Górecki, **Dominik Wilczyński**, Krzysztof Talaśka, Pat.243772, data zgłoszenia 15.06.2020, data publikacji WUP 09.10.2023, nr wg PP 2214, punktacja MNiSW 75 pkt., **mój udział wynosi 15%**. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia.

– Moduł łączenia pasów ciągnowych jako element urządzenia do zautomatyzowanego zgrzewania doczołowego pasów ciągnowych, Krzysztof Wałęsa, Jan Górecki, **Dominik Wilczyński**, Krzysztof Talaśka, Pat.243770, data zgłoszenia 15.06.2020, data publikacji WUP 09.10.2023, nr wg PP 2212, punktacja MNiSW 75 pkt., **mój udział wynosi 15%**. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia.

– Urządzenie do zautomatyzowanego zgrzewania doczołowego pasów ciągnowych, Krzysztof Wałęsa, Jan Górecki, **Dominik Wilczyński**, Krzysztof Talaśka, zgłoszenie patentowe nr Pat.243771, data zgłoszenia 15.06.2020, data publikacji WUP 09.10.2023, nr wg PP 2213, punktacja MNiSW 75 pkt., **mój udział wynosi 15%**. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia.

– Zespół prowadzenia i odbioru pasa, zautomatyzowanego urządzenia do zgrzewania doczołowego pasów ciągnowych, Krzysztof Wałęsa, Jan Górecki, Dominik Wojtkowiak, **Dominik Wilczyński**, Krzysztof Talaśka, Pat.242542, data zgłoszenia 23.12.2020, data publikacji WUP 13.03.2023, nr wg PP 2245, punktacja MNiSW 75 pkt., **mój udział wynosi 10%**. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia.

– Przyrząd do usuwania wypływki po zgrzewaniu doczołowym polimerowych pasów ciągnowych, Krzysztof Wałęsa, **Dominik Wilczyński**, Krzysztof Talaśka, Jan Górecki, Pat.240688, data zgłoszenia 6.08.2019, data publikacji WUP 23.05.2022, nr wg PP 2143, punktacja MNiSW 75 pkt., **mój udział wynosi 25%**. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia.

– Przyrząd do usuwania wypływki po zgrzewaniu doczołowym polimerowych pasów ciągnowych, Krzysztof Wałęsa, **Dominik Wilczyński**, Krzysztof Talaśka, Ireneusz Malujda, Aleksandra Fierek, Pat.240689, data zgłoszenia 6.08.2019, data publikacji WUP 23.05.2022, nr wg PP 2144, punktacja MNiSW 75 pkt., **mój udział wynosi 20%**. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia.

– Przyrząd do usuwania wypływki po zgrzewaniu doczołowym polimerowych pasów ciągnowych, Krzysztof Wałęsa, **Dominik Wilczyński**, Krzysztof Talaśka, Dominik Wojtkowiak, Pat.240749, data zgłoszenia 6.08.2019, data publikacji WUP 30.05.2022, nr wg PP 2142, punktacja MNiSW 75 pkt., **mój udział wynosi 25%**. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia.

#### **4.3.4. Badania i modelowanie parametrów procesu technologicznego mechanicznej perforacji kompozytowych pasów transportujących [13]**

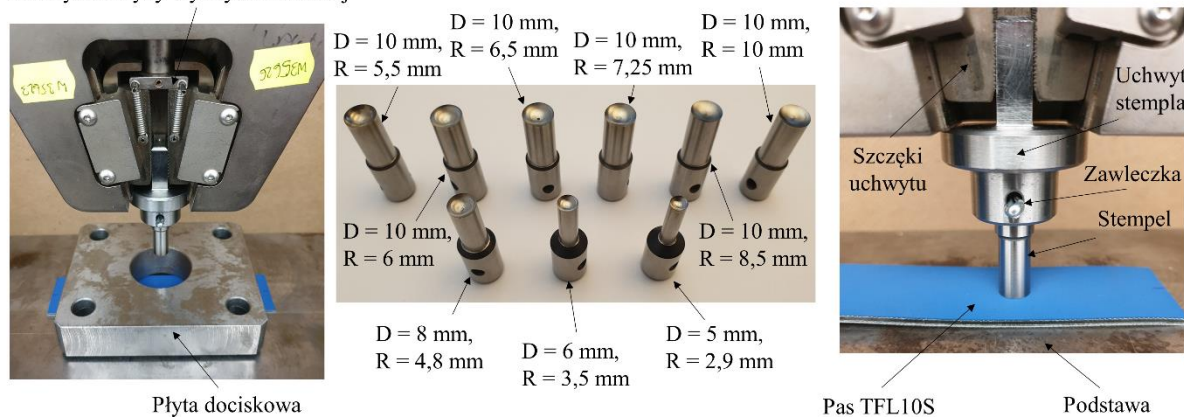
Podjęta problematyka jest problematyką przemysłową, wynikającą z potrzeby zautomatyzowania procesu perforacji pasów transportujących, celem zwiększenia dokładności

wykonywanych otworów oraz dokładności wzajemnego ich położenia na powierzchni pasa. Omówione poniżej efekty pracy naukowej są jednym z etapów na drodze do powstania automatu realizującego proces perforacji pasów o różnej strukturze co stanowi między innymi treść patentu wymienionego w osiągnięciu naukowym, pkt. 7 zestawienia patentów.

Wkład habilitanta w tym obszarze polegał na udziale w badaniach eksperymentalnych procesu technologicznego mechanicznej perforacji kompozytowych pasów transportowych oraz weryfikacji teorii umożliwiającej opracowanie modelu do oceny efektywności narzędzia perforującego.

Badania dotyczyły określenia siły perforacji inaczej mówiąc siły potrzebnej do przebicia materiału pasa stemplem o określonej geometrii, jak i określenia siły oporu ściśniętego materiału pasa danym stemplem. Obydwa testy przeprowadzono z wykorzystaniem pięciu różnych stempli o jednej średnicy  $D = 10$  mm, różniących się wartościami promienia stempla wynoszącymi kolejno  $R = 5,5, 6,5, 7,25, 8,5$  i  $10$  mm. Każdy test powtórzono pięciokrotnie. Na rysunku 77 przedstawiono stanowisko badawcze oraz narzędzia wykorzystane w badaniach [13].

Uchwyt maszyny wytrzymałościowej

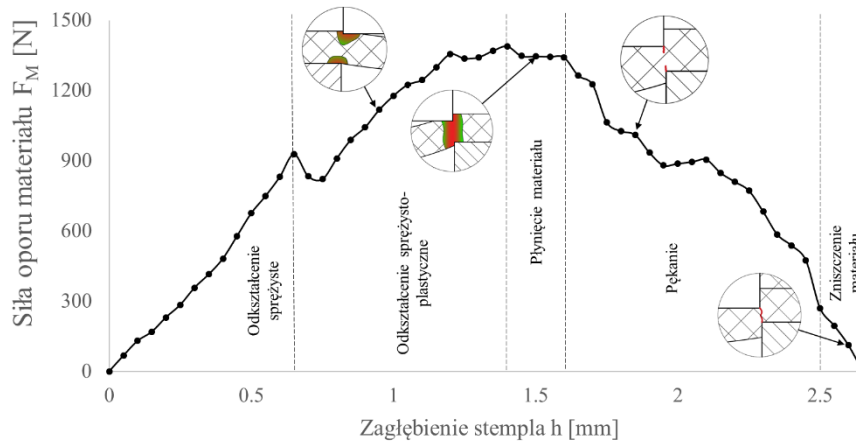


Rys. 77. Stanowisko do pomiaru siły oporu ściskania materiału wraz z badanymi narzędziami [13]

Przyjęto, że musi istnieć korelacja między tzw. siłą oporu ściskanego materiału kompozytowego pasa podczas wykrawania, a wydajnością procesu, którą można określić na podstawie siły perforacji. Takie podejście powinno umożliwić opracowanie prostej metodyki oceny stanu narzędzia wykrawającego w procesie kontroli jakości na podstawie prostej próby ściskania pasa tym właśnie narzędziem. Przedstawione na rysunku 77 stanowisko badawcze składa się maszyny wytrzymałościowej MTS Insight 50 kN wraz ze szczękami, w których zamontowano uchwyt stempla. Dane narzędzie jest osadzone w gnieździe uchwytu, a jego samoczynny wysuw jest zabezpieczony zawleczką (Rys. 77). Pas leży na płycie nośnej zamocowanej w dolnym uchwycie maszyny wytrzymałościowej. Podczas testu mierzono wartość siły ściskającej w funkcji przemieszczenia liniowego stempla. Test kończył się wówczas, gdy stempel zagłębił się na określoną głębokość w materiale pasa. Główną wartością dodaną prezentowanej metodyki jest brak konieczności stosowania specjalistycznej maszyny, a uzyskane wyniki umożliwiają szybką analizę.

Na podstawie wykonanych badań eksperymentalnych określono charakterystykę siły oporu materiału pasa w funkcji przemieszczenia stempla dla wszystkich analizowanych stempli i pasa

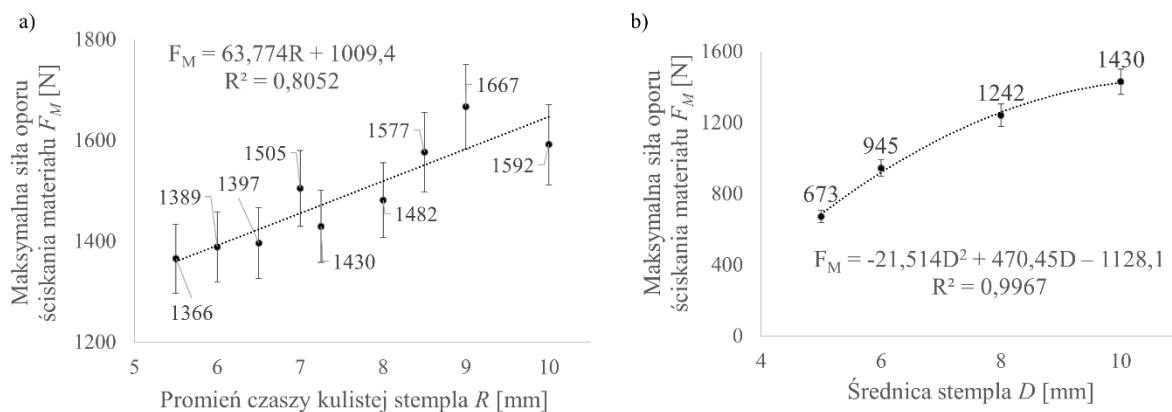
typu TFL10S (oznaczenie wg producenta Nitta). Przykładową charakterystykę przedstawiono na rysunku 78 dla stempla o średnicy  $D = 10$  mm i promieniu  $R = 6$  mm [13].



Rys. 78. Charakterystyka zmian siły oporu materiału pasa w funkcji przemieszczenia stempla dla pasa typu TFL10S podczas testu stemplem sferycznym o średnicy  $D = 10$  mm i promieniu  $R = 6$  mm [13]

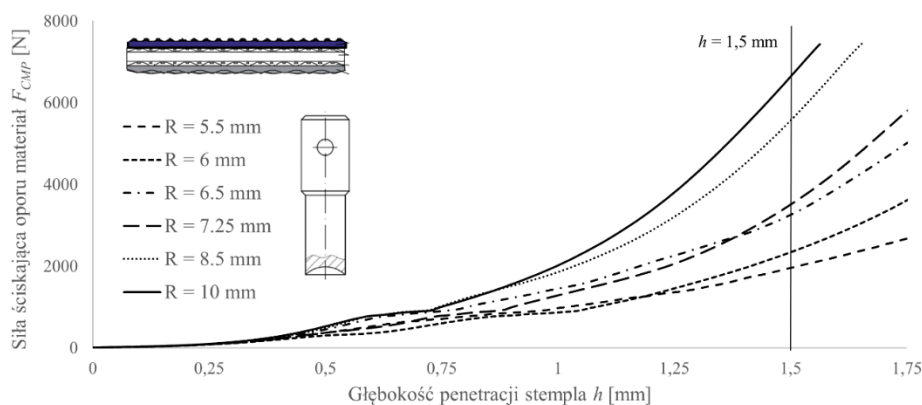
Jak można zaobserwować, opór materiału wzrasta do momentu kiedy stempel zagłębi się w materiale pasa na odcinku równym połowie jego grubości. Dla Pasa typu TFL10S jest to połowa odcinka równego  $t = 2,65$  mm. Po przekroczeniu tej wartości wartość siły maleje (Rys. 78). Jest to skutkiem przerwania rdzenia pasa przez krawędź tnącą stempla co jest związane z przekroczeniem granicy odkształcenia. Należy więc analizować charakterystykę zmian siły na odcinku przemieszczenia stempla równemu połowie grubości pasa co jest równoznacznie z osiągnięciem granicznej wytrzymałości pasa [13].

Celem określenia korelacji pomiędzy geometrią stempla, a siłą oporu ścisnienia materiału zestawiono maksymalną wartość siły oporu ścisnienia materiału z promieniem czaszy kulistej  $R$  (Rys. 72a) oraz ze średnicą stempla (Rys. 72b). Uzyskane wyniki wykazały tendencję wzrostu wartości siły oporu ze wzrostem promienia czaszy a także średnicy. Pierwszy przypadek opisano zależnością w postaci funkcji liniowej. Drugi przypadek opisano wielomianem drugiego stopnia, co jest równoznaczne z podwójnym wpływem zmiany średnicy stempla przy stałym promieniu  $R$ . Podsumowując, stwierdza się, że istnieje zależność pomiędzy geometrią stempla, a siłą oporu ścisnienia. Zostało to wykorzystane w opracowanej metodyce ewaluacji efektywności stempla [13].

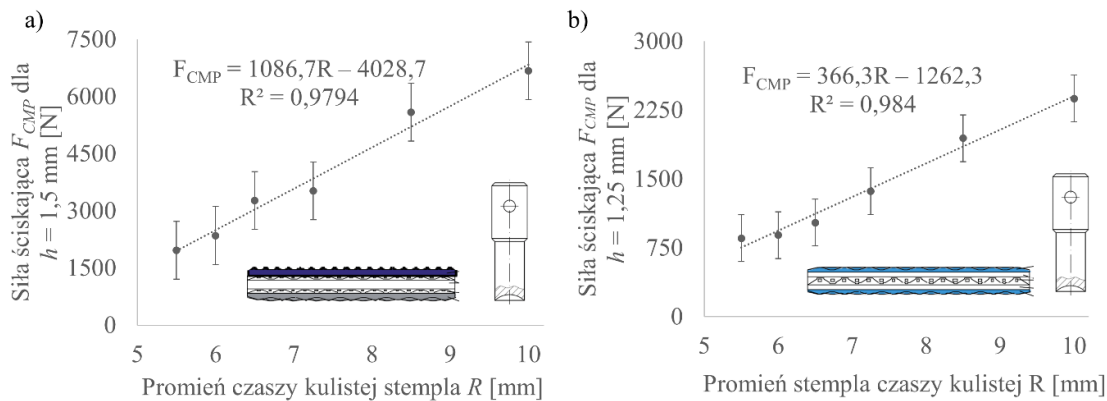


Rys. 79. Zestawienie maksymalnej siły oporu ściskania materiału uzyskanej z symulacji MES z promieniem czaszy kulistej stempla (a) oraz średnicy stempla (b) dla pasa TFL10S [13]

W celu udowodnienia istnienia tej zależności wykonano badania polegające na zmierzeniu siły ściskającej oporu materiału pasa TFL10S dla 6 różnych promieni czaszy i średnicy stempla  $D = 10$  mm. Wyniki przedstawiono na rysunku 80. Tu można zauważyć zbieżność w początkowym zakresie oraz duże różnice w wartości siły dla wartości zagłębienia ostrza stempla wynoszącej 1,5 mm. Wartości te w funkcji promienia czaszy stempla przedstawiono na rysunku 81a. Rysunek 81b obrazujący wyniki badań wykonanych na innym pasie typu LAB12E potwierdza liniową korelację pomiędzy tymi wielkościami.



Rys. 80. Wyniki pomiarów siły ściskającej oporu materiału w funkcji głębokości penetracji stempla dla pasa TFL10S [13]



Rys. 81. Zależność pomiędzy promieniem czaszy kulistej stempla a siłą oporu ściskania dla pasa TFL10S (a) lub LAB12E (b) [13]

Powyższe efekty dowodzą temu, że jest możliwe wykorzystanie wartości siły do ewaluacji jakości wykonania stempla. Wartością dodaną jest prostota badania oraz wyeliminowanie nadmiernego zużycia pasa podczas testu co czyni ten test możliwym w aplikacji przemysłowej na potrzeby kontroli jakości wykonania stempla.

Przedstawione wyżej efekty pracy naukowej habilitanta zostały opublikowane w czasopiśmie *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (Dominik Wojtkowiak, Krzysztof Talaśka, **Dominik Wilczyński**. Evaluation of the belt punching process efficiency based on the resistance force of the compressed material. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 110, s. 717-727, IF = 3,226, 100 pkt. – **udział własny 10%**). W zakresie wymienionej publikacji na **wkład habilitanta składa się udział w przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych, weryfikacji teorii umożliwiającej opracowanie modelu do oceny efektywności narzędzia perforującego, opracowaniu ostatecznej postaci artykułu i udziale w weryfikacji treści zawartych w pracy po naniesieniu uwag recenzentów.**

Habilitant w zakresie badania i modelowania parametrów procesu technologicznego mechanicznej perforacji kompozytowych pasów transportowych był wykonawcą w projekcie nr 05/53/PRJG/0087 pt.: Opracowanie innowacyjnej technologii systemu precyzyjnej mechanicznej perforacji pasów do transportu podciśnieniowego i sterowania optycznego – systemu automatyzującego proces produkcyjny pasów transportowych, Wilhelm Herm Müller Polska Sp. z o.o., ul. Solna 20, 85-862 Bydgoszcz czego efektem jest wdrożenie wymienionej w tytule technologii (karta wdrożenia – załącznik 2), której rozwiązania konstrukcyjne zostały opatentowane i wymienione poniżej:

– Głowica perforująca z dwiema krawędziami tnącymi z ruchomym stemplem do urządzenia do perforacji pasów transportujących, Dominik Wojtkowiak, Krzysztof Talaśka, **Dominik Wilczyński**, Jan Górecki, Ireneusz Malujda, Grzegorz Domek, Pat.240069, data zgłoszenia 22.11.2019, data publikacji WUP 14.02.2022, nr wg PP 2156, punktacja MNiSW 75 pkt., **mój udział wynosi 15%**, oświadczenie załącznik 1. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia.

- Głowica perforująca z jedną krawędzią tnącą do urządzenia do perforacji pasów transportujących, Dominik Wojtkowiak, Krzysztof Talaśka, **Dominik Wilczyński**, Jan Górecki, Ireneusz Malujda, Grzegorz Domek, Pat.240068, data zgłoszenia 22.11.2019, data publikacji WUP 14.02.2022, nr wg PP 2155, punktacja MNiSW 75 pkt., **mój udział wynosi 15%**, oświadczenie załącznik 1. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia.
- System mechanicznej perforacji pasów do transportu podciśnieniowego i sterowania optycznego, Krzysztof Talaśka, Dominik Wojtkowiak, **Dominik Wilczyński**, Jan Górecki, Ireneusz Malujda, Grzegorz Domek, Pat.240074, data zgłoszenia 22.11.2019, data publikacji WUP 14.02.2022, nr wg PP 2175, punktacja MNiSW 75 pkt., **mój udział wynosi 20%**, oświadczenie załącznik 1. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia oraz na udziale w jego budowie i uruchomieniu podczas wdrażania w zakładzie przemysłowym. Karta wdrożenia – załącznik 2.
- Urządzenie do perforacji pasów transportujących, Dominik Wojtkowiak, Krzysztof Talaśka, **Dominik Wilczyński**, Jan Górecki, Ireneusz Malujda, Grzegorz Domek, Pat.240073, data zgłoszenia 22.11.2019, data publikacji WUP 14.02.2022 nr wg PP 2174, punktacja MNiSW 75 pkt., **mój udział wynosi 15%**, oświadczenie załącznik 1. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia oraz na udziale podczas wdrażania w zakładzie przemysłowym. Urządzenie jest składowym systemem mechanicznej perforacji pasów napędowych, pkt. 7.
- Głowica perforująca z dwiema krawędziami tnącymi z ruchomą płytą, Dominik Wojtkowiak, Krzysztof Talaśka, **Dominik Wilczyński**, Jan Górecki, Ireneusz Malujda, Grzegorz Domek, Pat.240072, data zgłoszenia 22.11.2019, data publikacji WUP 14.02.2022, nr wg PP 2173, punktacja MNiSW 75 pkt., **mój udział wynosi 15%**, oświadczenie załącznik 1. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia.
- Urządzenie do pomiaru przemieszczenia liniowego pasa transportującego, Krzysztof Talaśka, Dominik Wojtkowiak, **Dominik Wilczyński**, Jan Górecki, Grzegorz Domek, Ireneusz Malujda, Pat.241364, data zgłoszenia 22.11.2019, data publikacji WUP 19.09.2022, nr wg PP 2152, punktacja MNiSW 75 pkt., **mój udział wynosi 20%**, oświadczenie załącznik 1. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia, na przygotowaniu treści zgłoszenia patentowego oraz na udziale w procesie wdrażania w zakładzie przemysłowym. Urządzenie jest składowym systemem mechanicznej perforacji pasów napędowych, pkt 7.
- Urządzenie dozująco-ustalające pas transportujący w procesie jego produkcji, Jan Górecki, Krzysztof Talaśka, **Dominik Wilczyński**, Dominik Wojtkowiak, Ireneusz Malujda, Grzegorz Domek, Pat.240070, data zgłoszenia 22.11.2019, data publikacji WUP 14.02.2022, nr wg PP 2157, punktacja MNiSW 75 pkt., **mój udział wynosi 15%**, oświadczenie załącznik 1. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia, na przygotowaniu treści zgłoszenia patentowego oraz na udziale w procesie wdrażania w zakładzie przemysłowym. Urządzenie jest składowym systemem mechanicznej perforacji pasów napędowych, pkt. 7.

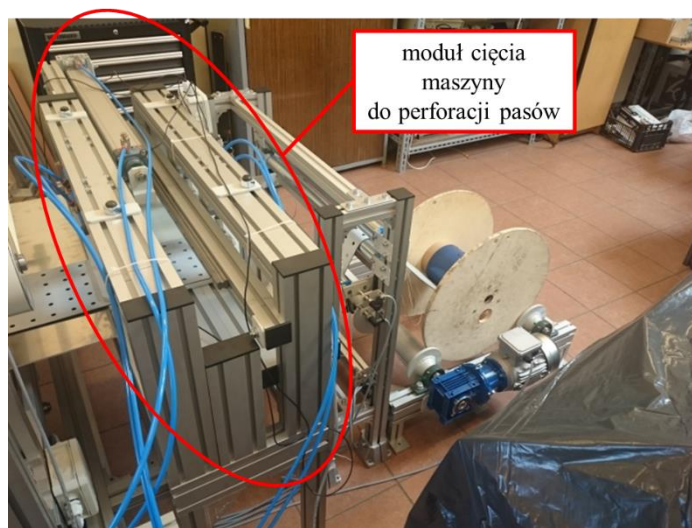


– Urządzenie buforująco-napinające pas transportujący w procesie jego produkcji, Jan Górecki, Krzysztof Talaśka, **Dominik Wilczyński**, Dominik Wojtkowiak, Ireneusz Malujda, Grzegorz Domek, Pat. 240071, data zgłoszenia 22.11.2019, data publikacji WUP 14.02.2022, nr wg PP 2158, punktacja MNiSW 75 pkt., **mój udział wynosi 15%**, oświadczenie załącznik 1. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia, na przygotowaniu treści zgłoszenia patentowego oraz na udziale w procesie wdrażania w zakładzie przemysłowym. Urządzenie jest składowym systemem mechanicznej perforacji pasów napędowych, pkt. 7.

– Głowica perforująca pasy napędowe i przenośnikowe, Krzysztof Wałęsa, Krzysztof Talaśka, Ireneusz Malujda, **Dominik Wilczyński**, Pat.229837, data zgłoszenia 23.05.2016, data publikacji WUP 31.08.2018, nr wg PP 1858, punktacja MNiSW 75 pkt., **mój udział wynosi 10%**, oświadczenie załącznik 1. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia.

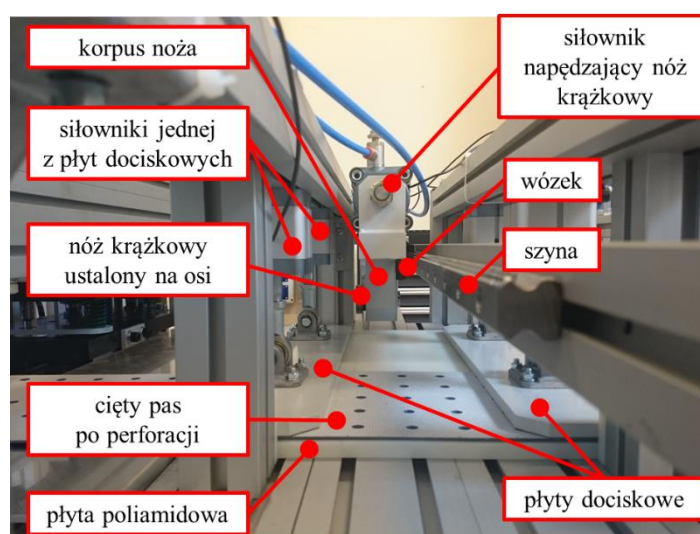
#### **4.3.5. Badania i modelowanie parametrów procesu technologicznego cięcia pasów transportujących [14]**

Wkład habilitanta polegał na zaprojektowaniu i zbudowaniu prototypowego urządzenia do cięcia kompozytowych pasów transportujących w roli wykonawcy w projekcie nr 05/53/PRJG/0087 pt.: Opracowanie innowacyjnej technologii systemu precyzyjnej mechanicznej perforacji pasów do transportu podciśnieniowego i sterowania optycznego – systemu automatyzującego proces produkcyjny pasów transportowych, realizowanego dla przedsiębiorstwa Wilhelm Herm Müller Polska Sp. z o.o., ul. Solna 20, 85-862 Bydgoszcz, który stanowił jeden z modułów maszyny do perforacji pasów transportujących. To rozwiązanie konstrukcyjne, jak i temu pochodne zostały objęte treścią dwóch zgłoszeń patentowych, które zostały wymienione poniżej. Zadaniem przedmiotowego urządzenia było wykonanie procesu technologicznego cięcia pasa po wykonaniu procesu technologicznego jego perforacji. Habilitant przeprowadził testy urządzenia pod kątem oceny czy realizuje ono proces technologiczny cięcia zgodnie z założeniami projektowymi. W związku z powyższym habilitant opracował metodykę przeprowadzenia badań eksperymentalnych procesu technologicznego cięcia pasów z wykorzystaniem ww. prototypu. Przystosował urządzenie do możliwości pomiaru zmian ciśnienia w komorze roboczej siłownika pneumatycznego oraz przemieszczenia jego tłoka. Na rysunku 82 przedstawiono moduł cięcia maszyny realizującej proces technologiczny perforacji.



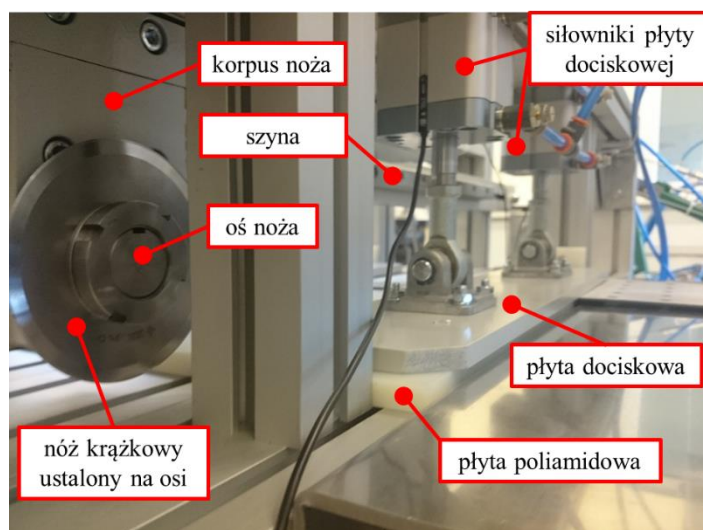
Rys. 82. Widok ogólny maszyny do perforacji pasów transportowych ze wskazaniem na moduł cięcia, który wykorzystano w badaniach eksperymentalnych [14]

Na rysunku 83 przedstawiono widok modułu cięcia ze wskazaniem na poszczególne, główne elementy jego budowy [14].



Rys. 83. Widok ogólny modułu cięcia pasów transportowych [14]

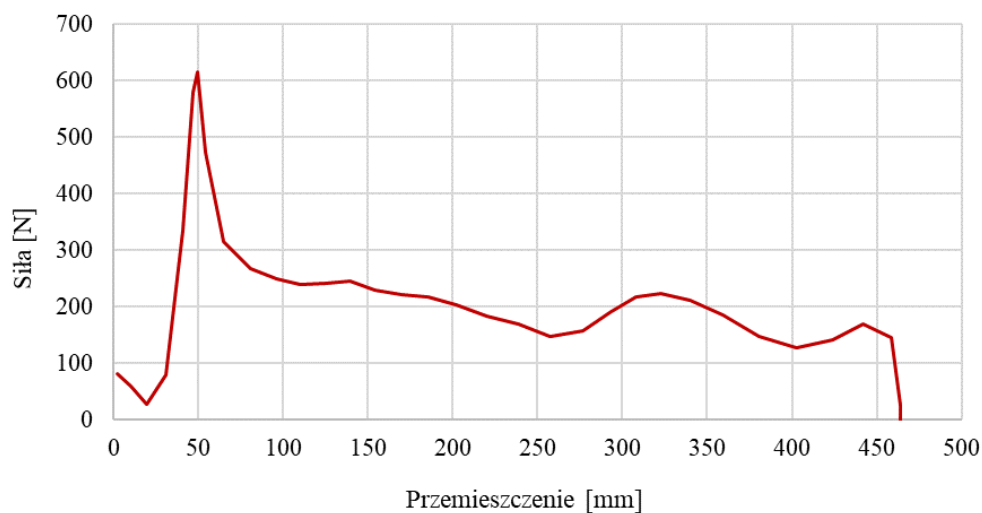
Według powyższego nóż krążkowy o średnicy  $\varnothing 100$  mm jest osadzony na nieobrotowej osi (Rys. 84), która jest z kolei zabudowana w korpusie (Rys. 83 i 84). Korpus jest połączony z wózkiem prowadnicy oraz z tłoczyskiem siłownika zapewniającego ruch posuwisto-zwrotny noża (Rys. 83 i 84). Ostrze noża jest zagłębione na głębokość 3 mm w płycie poliamidowej, na której leży pas. Przed rozpoczęciem procesu technologicznego cięcia, pas jest dociskany jednocześnie przed linią cięcia (lewa strona) i za linią cięcia (prawa strona, Rys. 83 i 84) za pomocą płyt dociskowych, których ruch w kierunku dolnym i górnym zapewniają po dwa siłowniki pneumatyczne na każdą z nich [14].



Rys. 84. Widok modułu cięcia od strony noża krążkowego [14]

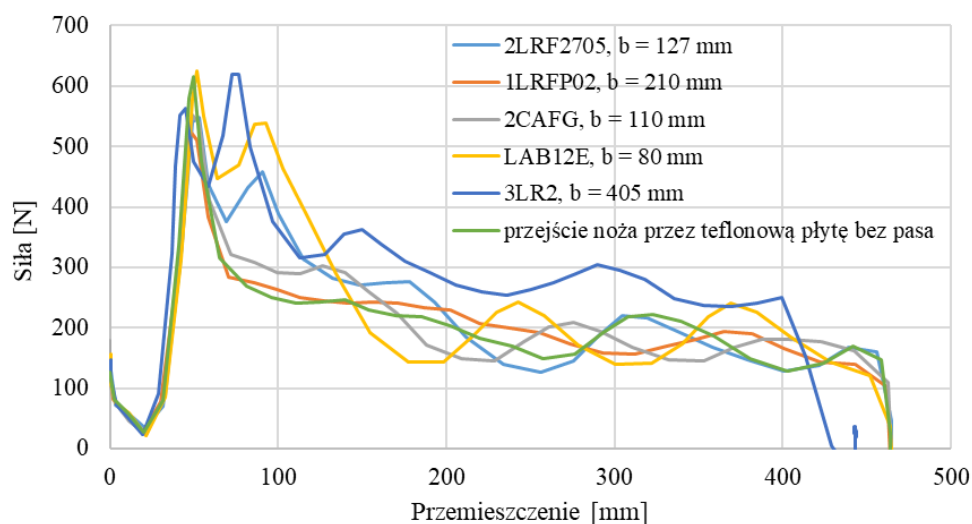
Na króćcu przyłączeniowym do komór roboczych siłownika zapewniającego ruch posuwisto-zwrotny noża, zamontowano piezorezystancyjne czujniki ciśnienia marki Keller o sygnale wyjściowym napięciowym, podłączone bezpośrednio do karty pomiarowej. Dało to możliwość rejestracji danych i ich późniejszą obróbkę. Przemieszczenie noża rejestrowano przy użyciu potencjometru linkowego (enkoder), którego ciężko było przytwierdzone do tłoczyska siłownika napędzającego nóż. Czujnik ten również przekazywał sygnał wyjściowy do karty pomiarowej. Jednoczesna rejestracja sygnałów z czujników ciśnienia i potencjometru pozwoliła na uzyskanie charakterystyk siła-przemieszczenie, które przedstawiono na kolejnych rysunkach [14].

Badania posłużyły do wyznaczania siły potrzebnej do przecięcia pasów transportowych o różnej budowie (różne materiały i struktura wewnętrzna) oraz grubości. Wykorzystane pasy należą do trzech grup: elastyczne pasy o dużej wytrzymałości z rdzeniem poliuretanowym wzmocnionym włóknami aramidowymi (sznur), sztywne pasy o dużej wytrzymałości z rdzeniem poliamidowym i elastyczne pasy z rdzeniem poliuretanowym wzmocnionym tkaniną poliestrową. Próbę cięcia dla każdego pasa jako przedstawiciela danej grupy powtarzano trzykrotnie. Siłę wyznaczano pośrednio z uzyskanych przebiegów zmian ciśnienia w komorach roboczych siłownika. W analizie wyników wzięto pod uwagę siłę oporu ruchu ostrza noża, który jest częściowo zagłębiony w płycie poliamidowej. W tym celu dokonano trzy próby rejestracji zmian ciśnienia w komorach roboczych podczas przejścia noża w płycie bez obecności pasa. Na rejestrowaną siłę oporów ruchu noża składa się siła tarcia ostrza noża o poliamidową płytę, siła tarcia w uszczelnieniu tłoka i tłoczyska siłownika oraz opory ruchu wózka, który porusza się po szynie (Rys. 83 i 84). Wózek jest połączony z korpusem noża, natomiast szyna z korpusem modułu. Wózek i szyna stanowią prowadnicę dla tłoczyska siłownika, jak i pośrednio noża. Zagłębienie ostrza noża jest celowe, ponieważ ma pełnić funkcję jego prowadzenia, co ma poprawić jakość przeciętej krawędzi pasa (prostoliniowość krawędzi). Na rysunku 85 przedstawiono charakterystykę zmian średniej wartości siły w funkcji przemieszczenia dla przejścia ostrza noża w płycie poliamidowej bez obecności pasa [14].



Rys. 85. Charakterystyka zmian siły w funkcji przemieszczenia ostrza noża dla jego przejścia w płycie poliamidowej bez obecności pasa [14]

Na rysunku 86 przedstawiono przykładowe zestawienie charakterystyk siły tnącej pasy z grupy light flexible belts. W tej grupie zbadano pięć różnych pasów [14].



Rys. 86. Zestawienie charakterystyk zmian siły tnącej pasy z grupy light flexible belts [14]

W tabeli 23 zestawiono rzeczywiste wartości sił potrzebne do przecięcia pasów każdej z grup [14].

Tabela 23. Zestawienie rzeczywistych wartości sił tnących dla poszczególnych pasów [14]

Typ pasa	Oznaczenie pasa	Grubość pasa [mm]	Maks, wartość siły cięcia [N]
Light flexible belt	1LRFP02	0,9	30
	2LRF2705	2	200
	2CAFG	2,1	60
	LAB12E	2	280
	3LR2	3	370
Strong rigid belts	XH500 - 3	3 (0,5)	450
	TFL15S	3,1 (1,5)	600
	2LL	5 (1)	520
	M350	2,35 (0,35)	330
Aramid fibres reinforced poliurethane belt	T10K	4,5	300

Na podstawie uzyskanych wyników badań można sformułować następujące wnioski:

- wartość oporu ruchu noża stanowi około 50% siły cięcia większości pasów, dlatego konieczne jest zbadanie wpływu głębokości penetracji ostrza noża w płytkę poliamidową,
- główny wpływ na wartość siły cięcia ma wytrzymałość warstwy nośnej pasa (dla wszystkich typów), a w przypadku pasów z rdzeniem poliamidowym można zaobserwować liniową zależność pomiędzy grubością rdzenia a wartością maksymalnej siły,
- maksymalna siła cięcia występuje na początku penetracji materiału przez ostrze, co oznacza, że szerokość taśmy nie wpływa na jej wartość [14].

### **Podsumowanie wkładu habilitanta**

W związku z powyżej przedstawionymi efektami prac habilitant:

- opracował metodykę przeprowadzenia badań eksperymentalnych,
- opracował uzyskane wyniki badań,
- przeprowadził prace projektowe prototypowego urządzenia do realizacji procesu technologicznego cięcia pasów napędowych,

- opracował dwa zgłoszenia patentowe związane z rozwiązaniami konstrukcyjnymi dotyczącymi urządzenia do realizacji procesu technologicznego cięcia pasów.

Przedmiotowe urządzenie jest modułem składowym maszyny do perforacji pasów transportujących, która została wdrożona w procesie produkcyjnym zakładu przemysłowego Wilhelm Herm Muller zlokalizowanym w Bydgoszczy (karta wdrożenia – załącznik 2).

Przedstawione wyżej efekty pracy naukowej habilitanta zostały opublikowane w wydawnictwie MATEC Web of Conferences (**Dominik Wilczyński**, Ireneusz Malujda, Jan Górecki, Grzegorz Domek Experimental research on the process of cutting transport belts. *MATEC Web of Conferences* - 2019, vol. 254, s. 05014-1-05014-8 – **udział własny 70%**).

W zakresie wymienionej publikacji na wkład habilitanta składa się odpowiedzialność organizacyjna i koordynacyjna dotycząca planowania i realizacji działalności badawczej w omówionym powyżej zakresie, opracowanie metodyki badawczej wraz z wykonaniem badań co ściśle się wiąże z opieką merytoryczną dotyczącą wykonania badań eksperymentalnych, z przygotowaniem materiału do badań oraz także zaprojektowaniem, zbudowaniem i przygotowaniem stanowiska badawczego, konsultacja merytoryczna nad opracowaniem wyników badań w formie pozyskania właściwych charakterystyk dla oceny prawidłowości przebiegu spodziewanych/prognozowanych zmian wielkości badanych w eksperymencie. Habilitant był także odpowiedzialny za przygotowanie treści manuskryptu z późniejszym nadzorem odnośnie przygotowania odpowiedzi na uwagi recenzentów i naniesienia właściwych zmian w manuskrypcie.

Habilitant jest współautorem następujących zgłoszeń patentowych związanych z procesem technologicznym cięcia pasów, które jak wcześniej wspomniano są efektem prac w projekcie pt.: Opracowanie innowacyjnej technologii systemu precyzyjnej mechanicznej perforacji pasów do transportu podciśnieniowego i sterowania optycznego – systemu automatyzującego proces produkcyjny pasów transportowych, realizowanego dla przedsiębiorstwa Wilhelm Herm Müller Polska Sp. z o.o., ul. Solna 20, 85-862 Bydgoszcz:

- Urządzenie do cięcia poprzecznego pasów transportujących z jednym nożem, **Dominik Wilczyński**, Krzysztof Talaśka, Jan Górecki, Dominik Wojtkowiak, Ireneusz Malujda, Grzegorz Domek, zgłoszenie patentowe nr P.432839, data zgłoszenia 5.02.2020, nr wg PP 2154, **mój udział wynosi 30%**. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia, na przygotowaniu treści zgłoszenia patentowego oraz na udziale w procesie wdrażania w zakładzie przemysłowym. Urządzenie jest składowym systemem mechanicznej perforacji pasów napędowych, pkt. 7.

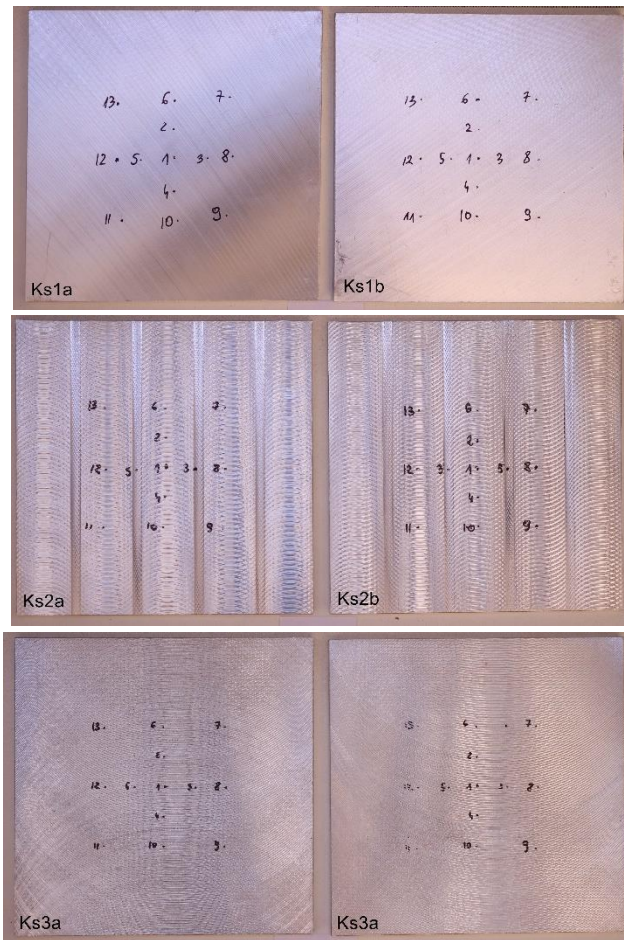
- Urządzenie do cięcia poprzecznego pasów transportujących z dwoma nożami, **Dominik Wilczyński**, Krzysztof Talaśka, Jan Górecki, Dominik Wojtkowiak, Ireneusz Malujda, Grzegorz Domek, zgłoszenie patentowe nr P.432838, data zgłoszenia 5.02.2020, nr wg PP 2153, **mój udział wynosi 30%**. Mój wkład w powstanie wynalazku polegał na udziale merytorycznym w opracowaniu koncepcji i konstrukcji przedmiotowego urządzenia, na przygotowaniu treści zgłoszenia patentowego oraz na udziale w procesie wdrażania w zakładzie przemysłowym. Urządzenie jest składowym systemem mechanicznej perforacji pasów napędowych, pkt. 7.

#### 4.3.6. Badania i modelowanie parametrów procesu technologicznego nakładania kleju [15]

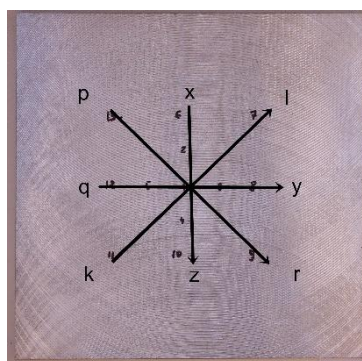
Wkład habilitanta w tym obszarze polegał na współtworzeniu metodyki oraz na nadzorze merytorycznym podczas opracowania jej, a także uzyskanych wyników badań, konstrukcji stanowiska badawczego, na nadzorze nad badaniami eksperymentalnymi dotyczącymi rozchodzenia się kleju pomiędzy łączonymi płytkami pod wpływem docisku w funkcji chropowatości, w procesie technologicznym nakładania kleju. Należy podkreślić, że problematyka stanowi przemysłową wynikającą ze współpracy z przedsiębiorstwem Wilhelm Herm Müller Polska Sp. z o.o., związaną z łączeniem pasów transportujących w pasy bezkońcowe. Do badań wybrano połączenie płytek aluminiowych o kształcie kwadratu o wymiarze boku 100 mm i grubości 5 mm gdzie łącznik stanowił klej poliuretanowy. Pod uwagę wzięto również sztywność materiału oraz łatwość obróbki aluminium w celu uzyskania określonych parametrów chropowatości powierzchni. Na rysunku 87 przedstawiono pary płytek aluminiowych wykorzystanych w badaniach z oznaczeniami naniesionymi do pomiarów chropowatości: 1. Ks1a i Ks1b – bez obróbki, o chropowatości powierzchni najniższej; 2. Ks2a i Ks2b – po frezowaniu w celu uzyskania chropowatości pośredniej pomiędzy Ks1 i Ks3; 3. Ks3a i Ks3b – po frezowaniu w celu uzyskania najwyższej chropowatości w odniesieniu do pozostałych płytek [15].

Klejem wykorzystanym w badaniu był klej poliuretanowy Bonapur RZ45/PU. Jego gęstość względna podana w karcie charakterystyki wynosiła  $0,868 \text{ g/cm}^3$  w  $40^\circ\text{C}$ , lepkość kinematyczna  $410,3 \text{ mm}^2/\text{s}$  w  $40^\circ\text{C}$ , a lepkość dynamiczna  $468 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ .

Pomiar chropowatości powierzchni płytek aluminiowych wykonano przyrządem pomiarowym (profilometrem) Hommel Tester T1000, dla odcinka pomiarowego 4,8 mm i zakresu pomiarowego  $80 \mu\text{m}$ . Filtr zastosowany w urządzeniu oparty jest na normie ISO 11562 (M1). Czujnik stykowy użyty do pomiaru to model T1E. Badania wykonano w temperaturze otoczenia [15]. Do badań wybrano 13 punktów pomiarowych, z których pierwszy stanowił punkt symetrii (miejsce naniesienia kropli kleju). Pozostałe rozmieszczone tak, jak jest to widoczne na rysunku 88 (co 10 mm lub 20 mm od siebie). Pomiarów wykonywano w każdym punkcie w 4 kierunkach co  $45^\circ$  (xz, kl, qy, pr), rysunek 88 [15].



Rys. 87. Pary płytek aluminiowych wykorzystanych w badaniach eksperymentalnych:  
 Ks1a i Ks1b – bez obróbki, o najniższej wartości chropowatości powierzchni, Ks2a i Ks2b – po obróbce frezowaniem o pośredniej wartości chropowatości pomiędzy chropowatościami płytek Ks1 i Ks3, Ks3a i Ks3b – po obróbce frezowaniem celem uzyskania najwyższej wartości chropowatości w odniesieniu do pozostałych płytek [15]



Rys. 88. Kierunki pomiaru chropowatości powierzchni na płytce [15]

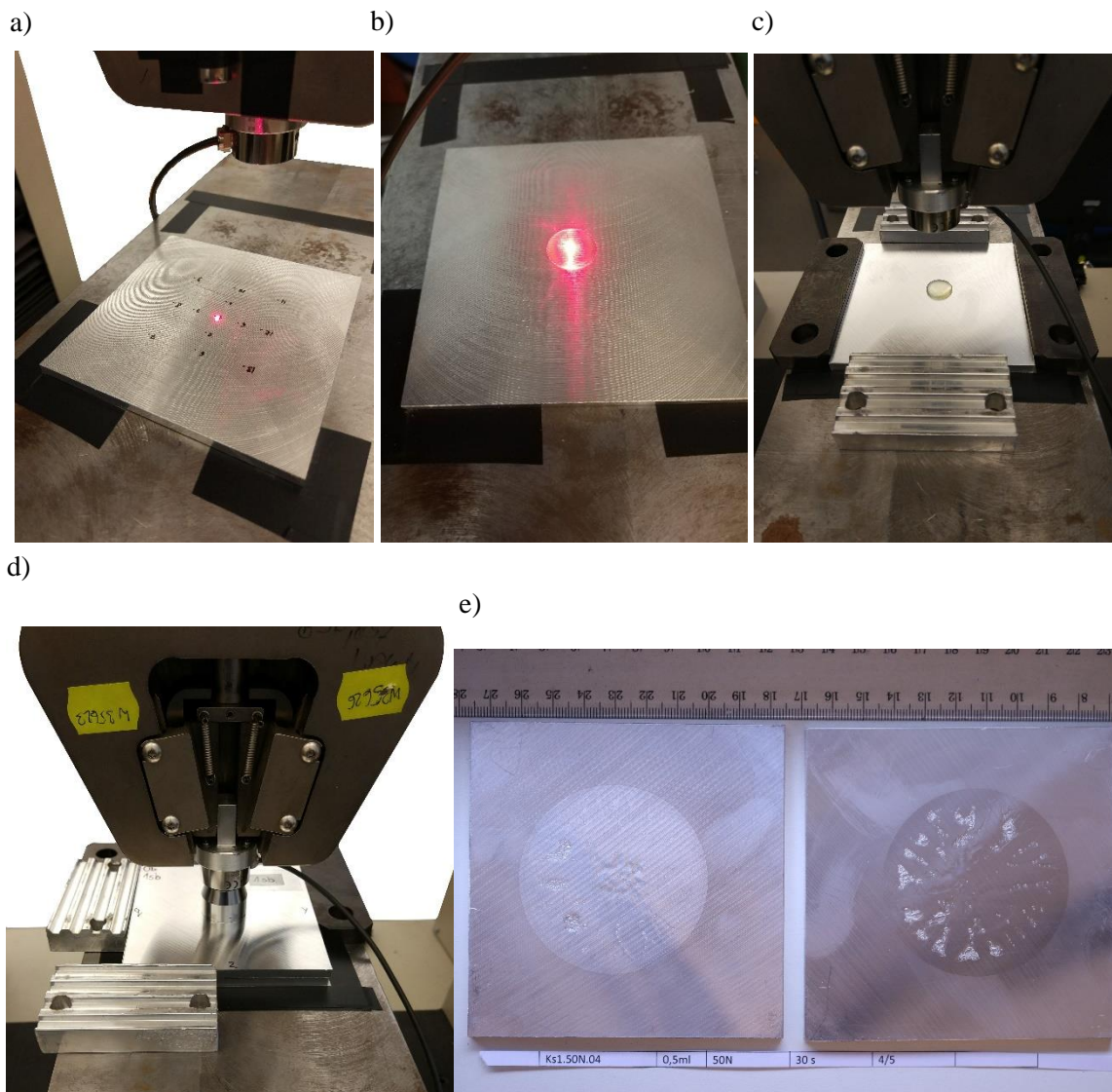
Badane płytki aluminiowe układano na płaskiej powierzchni. Usunięto z nich ewentualne zanieczyszczenia. Umiejscowiono część urządzenia z czujnikiem w badanym obszarze płytki, po czym wykonano pomiary w 4 kierunkach w każdym z 13 punktów i odczytywano wartości parametrów  $R_a$ ,  $R_z$  i  $R_{max}$ .

W celu określenia maksymalnej możliwej do uzyskania grubości warstwy kleju podczas pomiarów, określono przy pomocy szczelinomierza szczelinę występującą pomiędzy dwiema



złożonymi płytkami. Do ściśnięcia płytek z klejem umieszczonym pomiędzy nimi wykorzystano maszynę wytrzymałościową MTS Insight 50 kN. Ze względu na znaczny zakres pomiarowy maszyny i przewidywany pomiar niskich wartości sił, zamontowano dodatkowo czujnik przeznaczony do pomiaru siły ściskającej C9C firmy HBM o zakresie pomiarowym do 1 kN. Docisk prowadzono prędkością 0,1 mm/s do uzyskania ustalonej siły, którą utrzymywano minimum 30 s. Wykonano badania dla siły docisku: 50 N, 100N, 250 N oraz 500 N. Dla każdej pary płytek wykonano po 5 powtórzeń. Podczas docisku rejestrowano przebieg siły w czasie wykorzystując czujnik podłączony do karty pomiarowej Spider 8 oraz oprogramowania Catman Easy firmy HBM. Synchronizację czasów pomiaru osiągnięto poprzez podłączenie czujnika siły C9C oraz czujnika maszyny wytrzymałościowej do jednej karty pomiarowej i jednoczesną rejestrację tych parametrów [15].

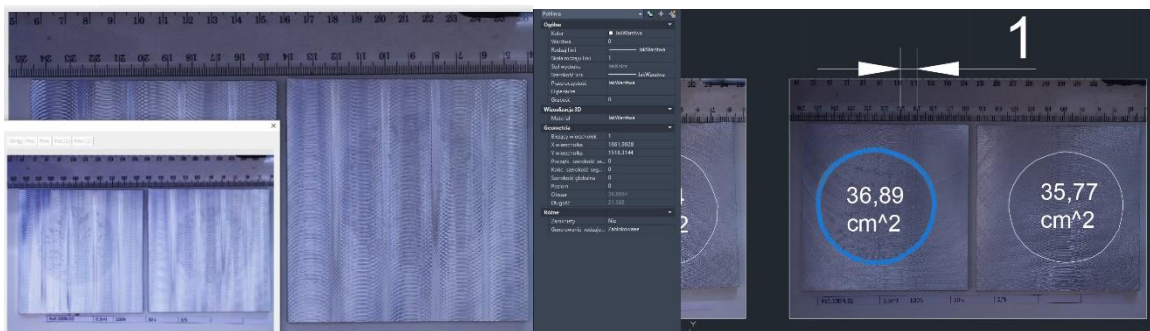
Sposób przygotowania próbek z rozprowadzonym na powierzchni klejem zilustrowano na rysunku 89 i 90. Na stanowisku pomiarowym ustawiono wskaźnik laserowy tak, by po położeniu płytki aluminiowej na stole maszyny wskazany był jej środek celem nałożenia kleju (Rys. 89a). Płytki były odtłuszczone i oczyszczone. Kolejną płytkę ustawiano na płycie maszyny. W miejscu położenia wiązki lasera (punkt symetrii płytki) nakładano 0,5 ml kleju (Rys. 89b). Objętość kleju odmierzano strzykawką. Po nałożeniu kleju, płytkę ustawiano w osi maszyny, zabezpieczano przed przesunięciem i nakładano drugą płytkę (Rys 89c i d). Następnie włączano pomiar siły i opuszczano szczękę maszyny wytrzymałościowej wraz z czujnikiem w celu docisku płytek z określoną siłą (Rys. 89d). Po osiągnięciu zadanej siły docisku trawersa maszyny zatrzymywała się i po czasie 30 sekund wycofywała. Następnie płytki były wyciągane i rozdzielane po czym wykonywano zdjęcia śladów pozostawionych przez klej (Rys. 89e).



Rys. 89. Przebieg wykonania próbek: a) ustawienie wskaźnika w punkcie symetrii płytki, b) naniesienie 0,5 ml kleju, c) ustawienie ograniczników zapobiegających przesunięciu się drugiej nakładanej płytki, d) docisk płytek przy użyciu maszyny wytrzymałościowej, e) widok na warstwę kleju po wykonanej próbie [15]

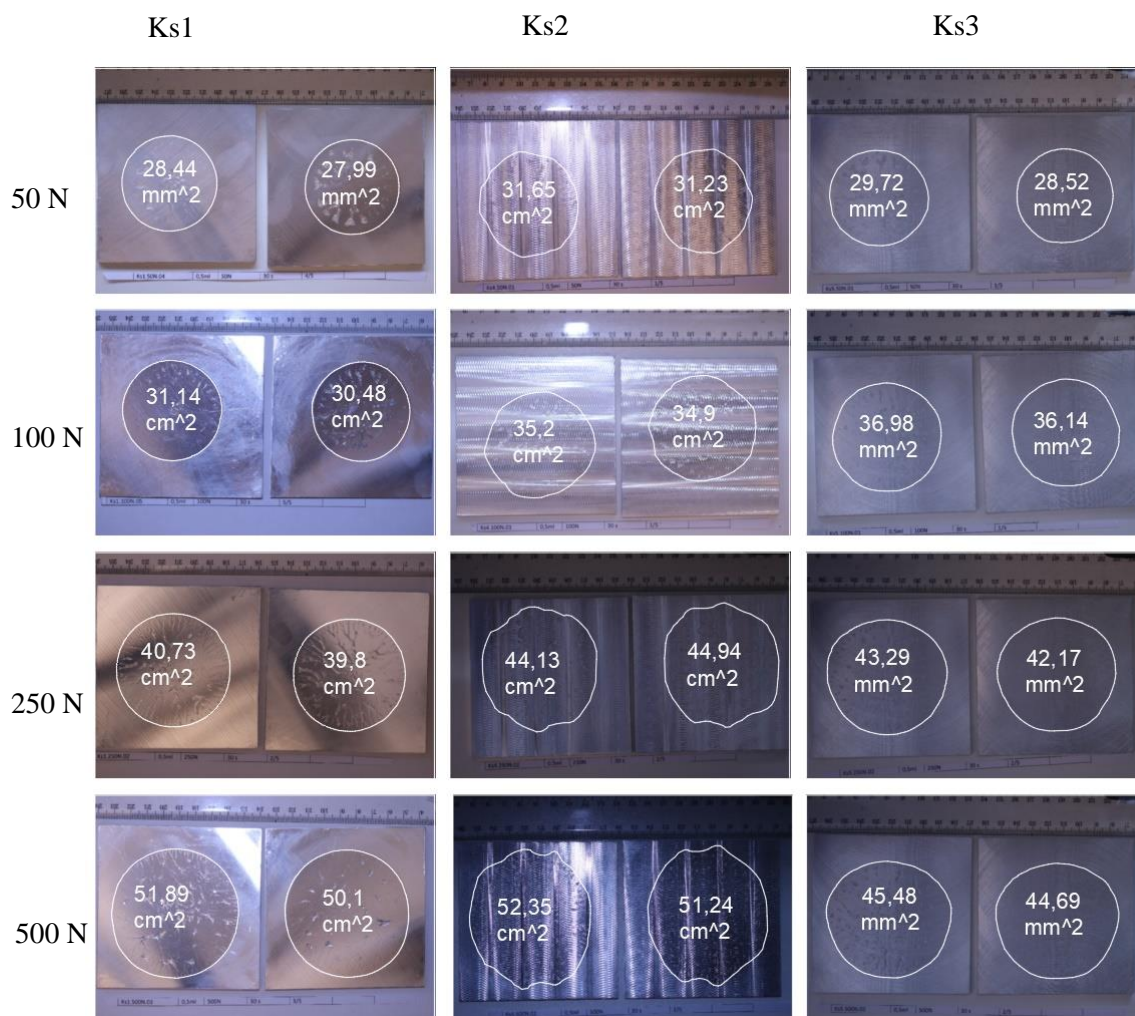
Zdjęcia wykonano aparatem ustawionym na statywie, aby zapewnić stałą odległość oraz równoległe ustawienie obiektywu względem powierzchni próbek. Zdjęcia, jeśli była taka potrzeba, wyostrano dla lepszego uwidocznienia śladu w programie graficznym, a w programie AutoCAD obrysowywano ślad w celu wyznaczenia powierzchni, na którą rozprowadzony został klej (Rys. 90). Znając ilość nałożonego kleju  $V_k = 0,5$  ml oraz powierzchnię  $A_k$ , na którą klej został rozprowadzony oszacowano grubość warstwy kleju  $g_k$  wytworzoną pomiędzy płytkami na podstawie zależności (33):

$$g_k [mm] = \frac{V_k [mm^3]}{A_k [mm^2]} \quad (33)$$



Rys. 90. Obróbka zdjęć w celu wyznaczenia powierzchni na którą rozszedł się klej [15]

Na rysunku 91 przedstawiono obrysowane w programie AutoCAD ślady kleju otrzymane w wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych.



Rys. 91. Porównanie śladów kleju na płytkach kolejno Ks1, Ks2 i Ks3 dla docisku z siłą 50N, 100N, 250N i 500 N [15]

Otrzymane wyniki badań umożliwiły wyciągnięcie poniższych wniosków:

1. Przedstawiona metoda pozwoliła wyznaczyć szacunkową grubość warstwy kleju uzyskiwaną pod wpływem docisku z określoną siłą, przy założeniu, że klej nie wnika w szczeliny i posiada równomierną grubość. Niestety po ściśnięciu próbek z 0,5 ml kleju dla wybranych sił w zakresie 50 – 500 N uzyskano szacowane grubości jego warstwy w zakresie od 0,195 do 0,088 mm, co dla klejów poliuretanowych jest grubością znacznie mniejszą niż zalecana w literaturze od 0,5 mm do 1 mm dla uzyskania stosunkowo najlepszej wytrzymałości. Taki wynik sugeruje, że aby uzyskać tym sposobem pożądaną grubość warstwy kleju należałoby przeprowadzić testy dla mniejszych wartości sił docisku i/lub większej ilości kleju.
2. Siła docisku ma wpływ na wielkość powierzchni rozchodzenia się kleju, ale nie zauważono znacznego wpływu struktury i chropowatości powierzchni na uzyskiwaną grubość warstwy kleju i wielkości śladu, a jedynie na jego kształt. Dla badanych niewielkich ilości kleju i przy niskich wartościach sił 50 N, 100 N oraz 250 N chropowatość powierzchni nie wpływa znacząco na wielkość powierzchni pokrytej przez klej. Niewielkie różnice zauważalne były dopiero przy sile 500 N, gdzie dla próbek Ks2 i Ks3 pokryta powierzchnia była mniejsza w stosunku do Ks1, co mogło wynikać z wypełniania zagłębień w płytce klejem, dlatego stwierdzenie, że chropowatość nie ma znaczącego wpływu na wielkość śladu kleju może nie być prawdziwe dla pokrywania znacznie większych powierzchni.
3. Największy wpływ na kształt na jaki rozplynie się klej ma regularność występujących zagłębień w materiale, a nie sama wartość parametrów chropowatości powierzchni. Jak wykazano obróbka powierzchni, która pozostawia widoczny ślad powoduje rozchodzenie się kleju nierównomiernie. Wynika to ze zmiennych oporów powierzchni i jak wykazują badania w literaturze, zmiennej zwilżalności powierzchni. Im bardziej regularna struktura powierzchni tym klej rozplywa się bardziej równomiernie i uzyskiwany kształt jest zbliżony do okręgu. Odpowiednie ukształtowanie struktury powierzchni materiału i już niewielkie różnice w wysokości występujących zagłębień na powierzchni mogą pozwolić ukierunkować przepływ kleju, przy czym bruzdy nie powinny być zbyt głębokie, by nie wpływać znacząco na miejscową grubość warstwy. Te informacje mogą zostać wykorzystane przy planowaniu obróbki powierzchni sklejących elementów np. pasów przenośnikowych.
4. Aluminium jest materiałem sztywnym, a szybkość i wielkość relaksacji naprężeń w nim oraz w kleju są znacząco różne. Płytki aluminiowe nie wchodzi również w reakcję ze stosowanym klejem, dlatego kolejne badania uwzględniają porównanie sposobu rozchodzenia się kleju w przypadku ściskania go pomiędzy płytami wykonanymi z poliuretanu (materiał mniej sztywny) o zbliżonej chropowatości powierzchni do obecnie stosowanych płytek aluminiowych.

### **Podsumowanie wkładu habilitanta**

W związku z powyższymi przedstawionymi efektami prac habilitant:

- opracował w roli promotora pomocniczego ze współautorami w tym z doktorantem (główny autor), metodykę przeprowadzenia badań eksperymentalnych,
- nadzorował merytorycznie interpretację uzyskanych wyników badań.

Należy podkreślić, że badania zostały wykonane przez Panią mgr inż. Aleksandrę Biszczyk, doktorantkę, która realizowała etap badań w ramach realizacji celów swojego doktoratu. Tematyka jest związana z problematyką przemysłową dotyczącą łączenia końców pasów transportujących do postaci pasów bezkońcowych w procesie produkcyjnym w zakładzie przemysłowym Wilhelm Herm Muller zlokalizowanym w Bydgoszczy. Habilitant wspólnie z doktorantem zaprojektowali i zbudowali maszynę do nakładania natryskowego warstwy kleju na łączone pasy i ich końce, pracującą na linii produkcyjnej ww. firmy (Rys. 92). Projekt maszyny został zrealizowany w ramach zlecenia nr 05/53/PRJG/0102 pt.: Projektowanie, montaż, uruchomienie, opracowanie dokumentacji techniczno-rozruchowej i szkolenie pracowników w zakresie obsługi systemu aktywacji, systemu natryskiwania i zgrzewarki tarciowej tworzyw sztucznych, gdzie habilitant był wykonawcą i jednocześnie, kierownikiem projektu dot. systemu natryskiwania.



Rys. 92. Widok ogólny wdrożonej maszyny do nakładania natryskowego kleju na kompozytowe pasy transportujące znajdującej się w siedzibie przedsiębiorstwa WHM Müller w Bydgoszczy

Przedstawione wyżej efekty pracy naukowej habilitanta zostały opublikowane w czasopiśmie *International Journal of Adhesion and Adhesives* (Aleksandra Biszczyk, Krzysztof Talaśka, **Dominik Wilczyński**. Analysis of the adhesive spread and the thickness of the adhesive bonded joint depending on the compressive force applied to bonded materials with different surface structure. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2022, vol. 114, s. 103081-1-103081-32, IF = 3,4, 100 pkt. – **udział własny 15%**). W zakresie wymienionej publikacji na wkład habilitanta składa się odpowiedzialność organizacyjna i koordynacyjna dotycząca planowania i realizacji działalności badawczej w omówionym powyżej zakresie. Opracowanie wraz ze współautorami metodyki badawczej z opieką merytoryczną dotyczącą wykonania badań eksperymentalnych, pozyskania materiału do badań i jego przygotowaniem oraz także zaprojektowaniem i przygotowaniem stanowiska badawczego. Konsultacja merytoryczna nad opracowaniem wyników badań w formie pozyskania właściwych charakterystyk dla oceny prawidłowości przebiegu spodziewanych/prognozowanych zmian wielkości badanych w eksperymencie. Habilitant był także odpowiedzialny za nadzór merytoryczny przygotowania treści manuskryptu

**z późniejszym nadzorem odnośnie przygotowania odpowiedzi na uwagi recenzentów i naniesienia właściwych zmian w manuskrypcie.**

#### **4.4. Syntetyczne ujęcie wkładu w rozwój dyscypliny naukowej: inżynieria mechaniczna**

Tematyka badań i modelowania parametrów procesów technologicznych na potrzeby uzyskania produktów o określonych właściwościach fizyko-mechanicznych w aspekcie konstruowania maszyn jest wieloaspektowa. Ogólnie rzecz ujmując, zrealizowane przez habilitanta prace badawcze z tego obszaru tematycznego sprowadzają się do:

- rozwijania istniejących modeli procesów technologicznych poprzez prowadzenie badań materiałów coraz to nowocześniejszymi i bardziej dokładnymi urządzeniami pomiarowymi, ale także urządzeniami dedykowanymi dla danej grupy materiałów stanowiącymi jednocześnie opracowania autorskie i oryginalne,
- poszukiwanie nowych modeli procesu na podstawie własnych obserwacji i badań eksperymentalnych danego procesu technologicznego,
- przystosowania i modyfikacji istniejących modeli opisujących procesy np. zagęszczania ale innych materiałów niż tych, do których zostały zbudowane.

W związku z tym, można wyszczególnić dwa główne cele działalności naukowej w zakresie poszerzania, rozwijania istniejących modeli i w następstwie tworzenie i budowanie nowych:

- identyfikacja i interpretacja parametrów wejściowych procesu wraz z oceną ich wpływu i sposobu powiązania z parametrami wyjściowymi inaczej mówiąc odpowiedziami procesu. Można do nich zaliczyć: wartości wymuszeń siłowych niezbędnych do realizacji danego procesu technologicznego, prędkości i przemieszczenia elementów roboczych mających realizować dany proces, właściwości fizyko-mechaniczne ostatecznej postaci produktu, który ma zostać wytworzony,
- opis zjawisk towarzyszących przebiegowi procesu dla identyfikacji cech konstrukcyjnych elementów roboczych maszyny, a mianowicie cech geometrycznych elementów głównego zespołu roboczego, wartości parametrów napędu koniecznych do realizacji procesu np.: sił roboczych, momentów i przemieszczeń oraz określenia warunków otoczenia, jako niezbędnych do poprawnej realizacji procesu.

Obok wyżej wymienionych badań i modelowania zjawisk należy postawić konieczność projektowania coraz to nowszych specjalizowanych konstrukcji elementów, zespołów maszyn i urządzeń realizujących określone procesy technologiczne jak również modernizacji poprzez ciągły rozwój konstrukcji już istniejących.

Biorąc pod uwagę konieczność zagospodarowania biomasy w postaci trocin jako odpadu poprodukcyjnego na podstawie badań doświadczalnych z zastosowaniem autorskiego opatentowanego stanowiska badawczego, wykazano, że możliwe jest skalibrowanie i przez to zaadoptowanie modelu Druckera-Pragera-Cap do symulacji numerycznej procesu tłokowego zagęszczania trocin celem wytworzenia biopaliwa zgodnie z obecną i powszechną tendencją do poszukiwania paliw ekologicznych i alternatywnych. Zaproponowana metodyka przeprowadzenia badań doświadczalnych wraz z autorskim stanowiskiem badawczym (Pat.236458 pt.: Urządzenie do badania nacisków bocznych, data WUP 25.01.2021) oraz

zbudowany model numeryczny stanowi dobre narzędzie do wyznaczania parametrów technologicznych procesu zagęszczania innych materiałów biomasy w postaci sypkiej, celem uzyskania biopaliwa o wymaganych właściwościach fizyko-mechanicznych. W efekcie tego możliwy jest dobór wyjściowych parametrów procesu technologicznego zagęszczania, ale również cech konstrukcyjnych układu roboczego umożliwiających jego realizację. Daje to również podstawę do budowy uniwersalnego urządzenia do zagęszczania w technice tłokowej, ale również urządzenia umożliwiającego przeprowadzenie szybkiego (krótkiego) testu, który pozwoli na określenie nastaw urządzenia realizującego proces zagęszczania dla uzyskania konglomeratu o wymaganych właściwościach fizyko-mechanicznych.

Proces technologiczny cięcia biomasy na potrzeby uzyskania cząstek o rozmiarach właściwych pod kątem uzyskania z tej właśnie biomasy paliwa stałego (aglomeratu) o określonych właściwościach fizyko-mechanicznych w aspekcie transportu, przechowywania (oddziaływanie czynników zewnętrznych takich jak wilgoć itd.) oraz uzyskania jak najlepszej jego kaloryczności, jest procesem bardzo złożonym pod kątem doboru parametrów urządzenia tnącego. Habilitant ma na myśli m. in. prędkość obrotową, moment obrotowy, wydajność, energochłonność, geometrię ostrza noża/y, skończywszy na trwałości ostrza noża/y. Dotyczy to zarówno urządzeń typu bębnowego, ale także urządzeń gdzie ostrze noża porusza się ruchem prostoliniowym. Proces ten jest bardzo istotny biorąc pod uwagę ogólny bilans energetyczny, tzn. ile musimy włożyć energii w proces cięcia lub rozdrabniania, ponieważ koszt energii włożonej w ten proces wchodzi w ogólny koszt uzyskania biopaliwa na skutek jego późniejszego zagęszczenia. Problematyka tego procesu jest poruszana i omawiana przez wielu naukowców, którzy skupiają się często na materiale energetycznym (czyli takim, z którego można uzyskać biopaliwo), który można pozyskać z terenów lokalnych. Stąd też wynika zróżnicowanie wachlarza badań cięcia różnych materiałów i urządzeń realizujących proces technologiczny cięcia pod kątem: kinematyki ruchu elementu roboczego jakim jest nóż lub noże, rodzaju napędu, prędkości, sił i wreszcie geometrii ostrza noża/y. Habilitant podjął się również rozpoznania tegoż procesu technologicznego skupiając się na analizie procesu cięcia materiałów biomasy dostępnych na rynku lokalnym, takich które można zagospodarować na cele energetyczne, czyli pociąć i spalić lub pociąć następnie zagęścić i spalić. W związku z powyższym zaproponowano autorską konstrukcję stanowiska badawczego urządzenia do cięcia słomy (i nie tylko) umożliwiającą pomiar parametrów eksploatacyjnych celem określenia energochłonności procesu. W badaniach zastosowano opracowaną metodykę badawczą z uwzględnieniem autorskiej propozycji metody korekcji uzyskanych wyników na podstawie zarejestrowanego podczas badań parametru w postaci momentu obrotowego na wale wałów wciągających odważoną uprzednio próbkę słomy przeznaczoną do pocięcia (to umożliwiła konstrukcja stanowiska do badań procesu cięcia zgodnie z założeniem habilitanta). Habilitant uznał, że proponowana metoda korekcji pozwoli odfiltrować zarejestrowane wyniki badań od negatywnego wpływu zróżnicowania składu pojedynczej próbki słomy przeznaczonej do pocięcia. Podobne podejście zastosowano podczas analizy i obróbki wyników badań eksperymentalnych procesu technologicznego cięcia łodygi kukurydzy. Tu z kolei badania prowadzono na stanowisku, gdzie nóż wykonywał ruch prostoliniowy i siła cięcia mierzona był bezpośrednio przez maszynę wytrzymałościową, na której stanowisko badawcze było zabudowane. Korekty rozrzutu wyników badań dokonano na podstawie zróżnicowanego pola przekroju łodygi kukurydzy. Przyniosło to spodziewany, pozytywny efekt w postaci

zmniejszenia rozrzutu wyników badań wynikającego z niejednorodności badanego materiału. Wykorzystane w badaniach procesu cięcia stanowiska badawcze umożliwiały regulację odległości pomiędzy ostrzem i przeciw ostrzem, prędkości noża zarówno w ruchu obrotowym jak i prostoliniowym, zmianę kąta ostrza oraz natarcia. Wykorzystane metody analizy wyników w postaci analizy wariancji ANOVA umożliwiły budowanie modeli matematycznych wzajemnych relacji pomiędzy parametrami wejściowymi procesu technologicznego cięcia a parametrami mierzonymi (odpowiedziami) procesu. Dokonane analizy rozkładu obciążenia ostrza noża/y dały podstawę do wyznaczenia parametrów eksploatacyjnych noża/y umożliwiających określenie sprawności procesu, trwałości noża (kryterium trwałości noża dla cięcia kukurydzy) oraz parametru  $f$  określającego procentowy udział momentu tarcia  $T_f$  w momencie cięcia  $T_c$ , zmierzonym na wale bębna noży tnących. Habilitant wykorzystując ww. przeprowadził optymalizację doboru cech geometrycznych noży z uwzględnieniem kosztów wykonania noża co przekłada się bezpośrednio na jego trwałość i sprawność procesu. Przeprowadzona i proponowana metodyka analizy wyników badań procesu może stanowić w ocenie habilitanta efektywne narzędzie dla konstruktorów podobnych urządzeń do cięcia biomasy.

Proces technologiczny cięcia nie dotyczy tylko biomasy jest on również istotny w wielu innych gałęziach przemysłu. Habilitant w ramach współpracy z przemysłem (Przedsiębiorstwo Wilhelm Herm. Müller w Bydgoszczy) jest współautorem rozwiązania konstrukcyjnego urządzenia do cięcia poprzecznego pasów kompozytowych. Urządzenie to stanowi jeden z modułów innowacyjnej linii technologicznej do perforacji pasów transportujących gdzie zarówno przedmiotowe urządzenie do cięcia, jak i pozostałe moduły linii stanowią rozwiązania oryginalne, które zostały objęte ochroną patentową, i których habilitant również jest współautorem. Należy wspomnieć, że przedmiotowa linia technologiczna została wdrożona w zakładzie przemysłowym WHM w Bydgoszczy. Moduł realizujący proces technologiczny cięcia poprzecznego pasów został przebadany pod kątem oceny spełnienia kryteriów stanowiących dane wyjściowe do procesu konstruowania tegoż urządzenia. Testy zostały zakończone powodzeniem, a ich wyniki zostały przedstawione w publikacji w formie materiałów konferencyjnych.

Procesy technologiczne łączenia pasów napędowych i transportowych do postaci pasów bezkońcowych pracujących na liniach produkcyjnych w różnych gałęziach przemysłu są zagadnieniami realizowanymi przez wiele zakładów produkcyjnych pasy, ale problematyka ich łączenia, a dokładniej mówiąc klejenia lub zgrzewania jest tematem poruszonym naukowo na niewielką skalę. Jest to problematyka ściśle przemysłowa i często stanowi tajemnicę zakładów produkcyjnych, które dobrze mają ją rozpoznaną i traktują ją jako swoje Know How.

W tym zakresie przeprowadzone prace są efektem propozycji czteroetapowego procesu zgrzewania poliuretanowych pasów napędowych, gdzie parametrem sterowanym jest prędkość dosuwu uplastycznionych końców pasa do siebie, co doskonale przekłada się na realizację tego procesu w trybie automatycznym. Dowodzą temu przeprowadzone badania eksperymentalne procesu uplastyczniania końców pasa jak również realizacja automatycznego urządzenia, który został sprawdzony i przetestowany w warunkach przemysłowych wytwarzając pasy bezkońcowe, które zostały odebrane i przetestowane przez właściwych odbiorców. Wartością dodaną wdrożonego urządzenia jest wyeliminowanie konieczności ręcznego łączenia końców



pasów. Efektem dodanym jest uzyskane patenty Pat.243771, Pat.243770, Pat.243772, Pat.242542.

Prace prowadzone w tym zakresie były związane również z realizacją procesu usuwania wyływki powstałej na skutek docisku uplastycznionych końców pasa w procesie ich łączenia. Chodzi tutaj również o automatyzację tego procesu. W związku z tym zaproponowano trzy autorskie metody jej usunięcia (patenty nr Pat.240749, Pat.240688, Pat.240689) gdzie metoda z dociskiem wyływki poprzez ostrze do płaskiej podpory z otworem daje wymagany efekt zgodnie z założeniem akceptowanym przez odbiorców produktu. Zbudowano model analityczny rozkładu sił podczas usuwania wyływki i zweryfikowano go z badaniami empirycznymi, które jednocześnie dały dowód poprawności proponowanego modelu analitycznego. Uzyskana maksymalna rozbieżność na skutek porównania wartości siły potrzebnej do usunięcia wyływki uzyskanej z modelu i badań wyniosła 8%. Jak wcześniej wspomniano przeprowadzone zaowocowały patentami uzyskanymi dla proponowanych metod usuwania wyływki i jednocześnie urządzeń umożliwiających ich realizację.

Badania procesu klejenia docelowo związanego z łączeniem pasów kompozytowych stanowią badania pilotażowe, które dały jednoznaczną odpowiedź związaną z przygotowaniem powierzchni złącza klejowego, a dokładniej mówiąc chodzi tu o parametry chropowatości, charakter śladu obróbki oraz określenie ilości kleju nakładanego na powierzchnie łączone. Jest to bardzo istotne w automatycznej realizacji tego procesu w zakładzie przemysłowym, gdzie precyzyjne dawkowanie kleju jest bardzo istotne pod kątem ekonomii, oddziaływania na środowisko naturalne ale także ze względu na uzyskanie żądanych właściwości mechanicznych złącza. Przeprowadzone prace badawcze nawiązują do opracowanej i wdrożonej konstrukcji urządzenia do natrysku kleju.

## **5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej**

1. Habilitant dotychczas współpracował z Institut National des Sciences Appliquées Centre Val de Loire, Bourges, Francja z profesorem Antoine Ferreira (mechatronika, robotyka, nanobioinżynieria) w obszarze badań naukowych związanych z agregacją magnetycznych mikro i nanocząstek stosowanych w medycynie jako nośniki leków, sterowane polem magnetycznym. Zaowocowała ona publikacją pt. Computational methodology for drug delivery to the inner ear using magnetic nanoparticle aggregates, autorów Krzysztof Talaśka, Dominik Wojtkowiak, **Dominik Wilczyński**, Antoine Ferreira, Computer Methods and Programs in Biomedicine - 2022, vol. 221, s. 106860-1-106860-13, IF = 6,100, 100 pkt.
2. Współpraca z Panią Dr. Carlą Nati z Institute of BioEconomy, National Research Council (CNR-IBE) we Włoszech, z Panem Profesorem Teijo Palander z Faculty of Science, Forestry and Technology, University of Eastern Finland, oraz z Panem Dr-em Maciejem Sydor z Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu co zaowocowało publikacją: Warguła Ł., **Wilczyński D.**, Wieczorek B., Palander T., Gierz Ł., Nati C., Sydor M., Characterizing Sawdust Fractional Composition from Oak Parquet Woodworking for Briquette and Pellet Production. Advances in Science

and Technology Research Journal, 2023, vol. 17, iss. 5, <http://www.astroj.com/Characterizing-Sawdust-Fractional-Composition-from-Oak-Parquet-Woodworking-for-Briquette,172534,0,2.html>, IF = 1,1, 100 pkt.

3. Publikacja pt. Application of Generalized Regression Neural Network and Gaussian Process Regression for Modelling Hybrid Micro-Electric Discharge Machining: A Comparative Study, autorstwa Siddhartha Kumar Singh, Harlal Singh Mali, Deepak Rajendra Unune, Szymon Wojciechowski, **Dominik Wilczyński**, Processes - 2022, vol. 10, iss. 4, s. 755-1-755-16 jest owocem współpracy z ośrodkami Malaviya National Institute of Technology, Jaipur 302017, Indie oraz The LNM Institute of Information Technology, Jaipur 302031, Indie.
4. Współpraca z Uniwersytetem w Zielonej Górze oraz Belarusian National Technical University co zaowocowało publikacją: Feldshtein E., Devojno O., Wojciechowski S., Kardapolava M., Lutsko N., **Wilczyński D.**, On the effectiveness of Ni alloy-bronze composite lattice structures used in slide bearings operated under heavy loads. Journal of Materials Research and Technology, 2022, vol. 19, s. 2235-2246, DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.05.169, IF = 6,4, 100 pkt.
5. Współpraca z Wydziałem Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie, która zaowocowała stażem naukowym oraz publikacją: **Wilczyński D.**, Wałęsa K., Talaśka K., Wojtkowiak D., Bembenek M. Experimental Study on the Cutting Process of Single Triticale Straws. Materials – 2023, 16 (11), 3943. <https://doi.org/10.3390/ma16113943>, IF = 3,4, punktacja MNiSW 140 pkt.

## **6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę**

### **6.1. Pełnienie funkcji promotora pomocniczego prac doktorskich oraz praca na rzecz rozwoju młodej kadry naukowej**

Habilitant był powołany przez Dziekana Wydziału Inżynierii Transportu do pełnienia funkcji promotora pomocniczego podczas postępowania o nadanie stopnia doktora nauk technicznych Pana mgr inż. Krzysztofa Wałęsy. W listopadzie 2018 roku otwarto przewód doktorski Panu mgr-owi Wałęsie nt.: Analiza zautomatyzowanego procesu czołowego zgrzewania pasów ciągnowych i transportowych (powołanie na promotora pomocniczego – załącznik 5). Temat został doprecyzowany w listopadzie 2020 roku (załącznik 5) i brzmiał on w następujący sposób: Analiza zautomatyzowanego procesu doczołowego łączenia termozgrzewalnych pasów napędowych i transportujących. Rozprawa Pana mgr Wałęsy została obroniona we wrześniu 2022 roku z wyróżnieniem (załącznik 5). Praca związana była z problematyką przemysłową zgrzewania pasów poliuretanowych do postaci pasów bezkońcowych. Efektem współpracy habilitanta z doktorantem w roli promotora pomocniczego są publikacje [10-12] oraz patenty [1-4, 9, 10 i 15] stanowiące wymienione wyżej dopełnienie cyklu publikacji.

Habilitant współpracuje również w roli promotora pomocniczego z Panią mgr inż. Aleksandrą Biszczyk, która otworzyła przewód doktorski w 2019 na Wydziale Inżynierii Transportu pracując na stanowisku asystenta w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn. Proponowany temat brzmiał wówczas: Analiza zautomatyzowanego procesu nanoszenia powłok adhezyjnych na komponenty siedzeń pojazdów komunikacji zbiorowej. Temat ten został zaktualizowany na Wydziale Inżynierii Mechanicznej w listopadzie 2020 roku zyskując brzmienie: Analiza wpływu parametrów procesu nanoszenia powłok adhezyjnych na właściwości eksploatacyjne pasów transportujących (powołanie na promotora pomocniczego – załącznik 5). Efektem współpracy z Panią Aleksandrą Biszczyk jest szereg publikacji, z których [15] został zgłoszona w cyklu publikacji w przedmiotowym wniosku. Pani mgr Aleksandra Biszczyk w dalszym ciągu pracuje nad realizacją zadań postawionych we wszczętym przewodzie doktorskim.

W 2019 roku podanie o otwarcie przewodu doktorskiego na Wydziale Inżynierii Transportu, złożył Pan mgr inż. Michał Wilczyński proponując temat rozprawy doktorskiej związanej tematycznie z problematyką przemysłową łączenia pasów napędowych. Temat brzmiał: Analiza problematyki zmian właściwości mechanicznych pasów zębatych w obszarze połączenia. Habilitant we wniosku został zaproponowany w roli promotora pomocniczego. Do dnia dzisiejszego doktorant realizuje poszczególne etapy w ramach realizacji rozprawy doktorskiej (powołanie na promotora pomocniczego – załącznik 5).

Również w 2019 roku przewód doktorski otworzyła Pani mgr Katarzyna Pietrzak, na Wydziale Inżynierii Transportu, gdzie Dziekan tegoż wydziału powołał osobę habilitanta do pełnienia roli promotora pomocniczego. Tematyka doktoratu ściśle związana była z problematyką konserwatorską urządzeń dźwigowych, a jego tytuł brzmiał: Historyczne urządzenia dźwigowe jako problem konserwatorski zabytków sztuki inżynierskiej. Doktorat został obroniony w październiku 2022 roku (powołanie na promotora pomocniczego – załącznik 5).

## **6.2. Otrzymane nagrody**

Habilitant otrzymał 7 nagród Rektora Politechniki Poznańskiej:

- Nagroda Rektora za osiągnięcia organizacyjne uzyskane w roku akademickim 2012/2013,
- Nagroda Rektora za osiągnięcia dydaktyczne uzyskane w roku akademickim 2013/2014,
- Nagroda Rektora za osiągnięcia dydaktyczne uzyskane w roku akademickim 2015/2016,
- Nagroda Rektora za osiągnięcia organizacyjne dydaktyczne w roku akademickim 2017/2018,
- Nagroda Rektora za osiągnięcia organizacyjne uzyskane w roku akademickim 2018/2019,
- Nagroda Rektora za osiągnięcia naukowe uzyskane w roku akademickim 2021/2022,
- Nagroda Rektora za osiągnięcia naukowe uzyskane w roku akademickim 2022/2023.

Kopie pism o przyznaniu ww. nagród znajdują się w załączniku 4.

### 6.3. Osiągnięcia dydaktyczne i organizacyjne

Od początku objęcia stanowiska nauczyciela akademickiego w strukturach Politechniki Poznańskiej intensywnie angażowałem się w organizację procesu dydaktycznego organizowanego i realizowanego przez Katedrę Podstaw Konstrukcji Maszyn. Od 2013 roku byłem opiekunem prowadzonej przez Katedrę PKM specjalności Mechatronika w Środkach Transportu na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania, obecnie Wydziale Inżynierii Mechanicznej. Od 2014 roku koordynowałem obciążenia dydaktyczne pracowników Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn na Wydziale Inżynierii Transportu do końca 2019 roku, a od stycznia 2020 do chwili obecnej, pracowników Instytutu Konstrukcji Maszyn na Wydziale Inżynierii Mechanicznej (Katedra PKM oraz jej pracownicy na skutek zmian strukturalnych przeniosła się na Wydział Inżynierii Mechanicznej stając się Instytutem Konstrukcji Maszyn od stycznia 2020 roku). Od 2020 roku pełnię funkcję Zastępcy Dyrektora Instytutu Konstrukcji Maszyn ds. Dydaktyki (powołanie do pełnienia tej funkcji znajduje się w załączniku 5) i koordynuję funkcjonowanie profilu dyplomowania Instytutu KM na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn, kierunku Mechatronika i specjalności na drugim stopniu kierunku Mechatronika na Wydziale Inżynierii Mechanicznej. Od stycznia 2020 roku jako zastępca dyrektora Instytutu KM pełnię funkcję członka Wydziałowej Komisji ds. Kształcenia oraz Wydziałowej Komisji ds. Jakości Kształcenia (powołania do wymienionych komisji znajdują się w załączniku 5). Jako członek Wydziałowej Komisji ds. Jakości Kształcenia zajmowałem się dotychczas:

- przeprowadzaniem hospitacji technicznych podczas nauczania zdalnego w okresie pandemii,
- planowaniem i koordynowaniem przebiegu hospitacji merytorycznych w ramach procesu samodoskonalenia procesu dydaktycznego realizowanego przez pracowników Wydziału Inżynierii Mechanicznej,
- tworzeniem procedur hospitacji,
- tworzeniem, ustalaniem zasad prowadzenia polityki współpracy z otoczeniem społeczno-gospodarczym,
- analizą wyników ankiet studentów dot. prowadzących zajęcia i prowadzonych przedmiotów i na jej podstawie typowaniem prowadzących zajęcia do kolejnych hospitacji merytorycznych,
- uczestnictwem w wizytacjach Polskiej Komisji Akredytacyjnej,
- koordynacją systemu zapewnienia jakości kształcenia na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej.

Jako członek Wydziałowej Komisji ds. Kształcenia zajmowałem się dotychczas:

- wprowadzaniem zmian i aktualizowaniem programów studiów na kierunkach Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej,
- przygotowaniem dokumentów na Komisję Senacką dot. wprowadzenia zmian w programie studiów drugiego stopnia na kierunkach Mechatronika i Mechanika i Budowa Maszyn realizowanych na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej,

- Koordynacją prowadzenia i aktualizacji kart ECTS dot. wybranych modułów przedmiotów na kierunkach Mechanika i Budowa Maszyn oraz Mechatronika realizowanych na Wydziale Inżynierii Mechanicznej.

Ponadto od 2020 roku jako zastępca Dyrektora Instytutu KM biorę czynny udział w komisjach rekrutacyjnych na studia stacjonarne i niestacjonarne II stopnia kierunku Mechatronika.

W 2022 roku brałem czynny udział we wprowadzeniu nowej specjalności na drugim stopniu studiów kierunku Mechatronika o nazwie „Projektowanie Mechatroniczne Maszyn i Pojazdów”, co wiązało się z koniecznością przeprowadzenia zmian w programie studiów na tym kierunku, a później z przygotowaniem wniosku (dokumentów) na Komisję Senacką. Czyniłem to w roli zastępcy dyrektora Instytutu KM i jednocześnie w roli członka Komisji ds. Kształcenia. Ponadto w 2021 roku w tych ww. rolach brałem czynny udział we wprowadzaniu nowych przedmiotów obieralnych na pierwszym stopniu kierunku Mechanika i Budowa Maszyn. Obecnie od roku 2022 do chwili obecnej trwają prace, w których również biorę czynny udział, nad całkowitym przebudowaniem programu studiów pierwszego i drugiego stopnia kierunku Mechanika i Budowa Maszyn oraz studiów pierwszego stopnia kierunku Mechatronika.

W ramach realizowanego procesu dydaktycznego, od 2006 roku, prowadziłem następujące przedmioty:

- Rysunek Techniczny (w różnych odmianach programowych) prowadzony na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu, Wydziale Elektrycznym, Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania obecnie Wydziale Inżynierii Mechanicznej, Wydziale Elektrycznym,
- Podstawy Konstrukcji Maszyn (projekty, ćwiczenia) – Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, obecnie Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu oraz Wydział Inżynierii Mechanicznej,
- Podstawy Konstrukcji Maszyn i CAD (wykład, projekty) – Wydział Inżynierii Zarządzania, studia stacjonarne i niestacjonarne,
- Komputerowe Projektowanie Konstrukcji (wykład i ćwiczenia) – Wydział Inżynierii Zarządzania, studia stacjonarne,
- Projektowanie Układów Hydraulicznych i Pneumatycznych (wykład, ćwiczenia, laboratoria) – Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, obecnie Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu,
- Metodologia Prowadzenia Prac Badawczo-Rozwojowych – Wydział Inżynierii Mechanicznej, studia II stopnia stacjonarne i niestacjonarne na kierunku Mechatronika,
- Budowa Maszyn i Urządzeń Przemysłowych (przedmiot obieralny) – Wydział Inżynierii Mechanicznej, studia stacjonarne I stopnia na kierunku Mechatronika,
- Automatyczne Układy Transportu Bliskiego – Wydział Inżynierii Mechanicznej, studia stacjonarne II stopnia na kierunku Mechatronika,
- Seminarium Dyplomowe – Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Wydział Inżynierii Mechanicznej studia stacjonarne i niestacjonarne I i II stopnia,

- Mechatronika w Środkach Transportu – Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, obecnie Wydział Inżynierii Mechanicznej,
- Mechanika Techniczna – Wydział Elektrotechniki obecnie Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki,
- Mechanika Stosowana – Wydział Inżynierii Transportu, obecnie Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu,
- Podstawy Projektowania Mechatronicznego – Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, obecnie Wydział Inżynierii Mechanicznej,
- Komputerowe Wspomaganie Projektowania – Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, obecnie Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu,
- prowadzenie prac dyplomowych inżynierskich i magisterskich studentów kończących kierunek Mechanika i Budowa Maszyn, specjalność Mechatronika/Mechatronika Przemysłowa na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu (obecnie Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu), kierunek Mechanika i Budowa Maszyn oraz Mechatronika na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania (obecnie Wydział Inżynierii Mechanicznej). Byłem promotorem 101 prac dyplomowych, w tym 69-iu prac inżynierskich i 32-óch prac magisterskich.
- Ponadto prowadziłem zajęcia dydaktyczne w ramach projektów „Era Inżyniera. Rozbudowa Potencjału Rozwojowego Politechniki Poznańskiej”, „Mechanika i Budowa Maszyn kierunkiem twoich sukcesów”.

Byłem współorganizatorem szeregu edycji organizowanego przez Katedrę Podstaw Konstrukcji Maszyn (obecnie Instytutu IKM) seminarium pt.: „Projektowanie Mechatroniczne”. W tym roku, 25 kwietnia odbędzie się jego 26-ta edycja.

Brałem czynny udział w organizowaniu stanowisk pokazowych w ramach „Nocy Naukowców” w latach 2009-2016. Jestem opiekunem laboratorium badań właściwości termomechanicznych materiałów nieklasycznych. Ponadto byłem współtwórcą i jestem współopiekunem Laboratorium Podstaw Konstrukcji Maszyn i Laboratorium Projektowania Maszyn i Urządzeń Mechatronicznych w Instytucie Konstrukcji Maszyn.

Za osiągnięcia dydaktyczne jak i organizacyjne byłem wielokrotnie nagradzany przez Rektora Politechniki Poznańskiej.

Byłem współorganizatorem i uczestnikiem V Międzyuczelnianej Konferencji Studenckich Kół Naukowych i Studiów Doktoranckich “Inżynieria wytwarzania” Kalisz 2014, VI Międzyuczelnianej Konferencji Studenckich Kół Naukowych i Studiów Doktoranckich “Inżynieria wytwarzania” Kalisz 01-02 XII 2016, oraz VII Międzyuczelnianej Konferencji Studenckich Kół Naukowych i Studiów Doktoranckich “Inżynieria wytwarzania”, Kalisz 29-30 XI 2018. Mój udział polegał na promocji Seminarium wśród studentów Politechniki Poznańskiej, pomocy merytorycznej w weryfikacji tematów zgłoszeń uczestnictwa i przygotowywanych prezentacji, opieka nad studentami uczestniczącymi oraz pełnienie roli recenzenta podczas procesu publikacji prac naukowych studentów i doktorantów w monografii pt.: „Inżynieria Wytwarzania”.

Jestem autorem rozdziałów skryptu dydaktycznego wydawanego w latach 2014-2020:

1. Wilczyński Dominik (autor rozdziałów I i V), Grafika Komputerowa dla mechaników pod red. Piotra Krawca, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2020, wydanie szóste rozszerzone, Poznań 2020, ISBN 978-83-7775-572-3
  - rozdział I pt.: Wprowadzenie do programu AIP, s.7-23
  - rozdział V pt.: Modelowanie złożzeń, s.106-112.
2. Wilczyński Dominik (autor rozdziałów I i V), Grafika Komputerowa dla mechaników pod red. Piotra Krawca, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2019, wydanie piąte rozszerzone, Poznań 2019, ISBN 978-83-7775-531-0
  - rozdział I pt.: Wprowadzenie do programu AIP, s.7-23
  - rozdział V pt.: Modelowanie złożzeń, s.104-110.
3. Wilczyński Dominik (autor rozdziałów I i V), Grafika Komputerowa dla mechaników pod redakcją Piotra Krawca, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2018, wydanie czwarte rozszerzone, Poznań 2018, ISBN 978-83-7775-479-5
  - rozdział I pt.: Wprowadzenie do programu AIP, s.7-23
  - rozdział V pt.: Modelowanie złożzeń, s.104-110.
4. Wilczyński Dominik (autor rozdziałów I i V), Grafika Komputerowa dla mechaników pod redakcją Piotra Krawca, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2017, wydanie trzecie popr. i rozszerzone, Poznań 2017, ISBN 978-83-7775-444-3
  - rozdział I pt.: Wprowadzenie do programu AIP, s.7-23
  - rozdział V pt.: Modelowanie złożzeń, s.104-110.
5. Wilczyński Dominik (autor rozdziałów I i V), Grafika Komputerowa dla mechaników pod redakcją Piotra Krawca, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2016, wydanie drugie rozszerzone, Poznań 2016, ISBN 978-83-7775-402-3
  - rozdział I pt.: Wprowadzenie do programu AIP, s.7-23
  - rozdział V pt.: Modelowanie złożzeń, s.104-110.
6. Wilczyński Dominik (autor rozdziałów I i V), Grafika Komputerowa dla mechaników pod redakcją Piotra Krawca, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2014 wydanie I, Poznań 2014, ISBN 978-83-7775-347-7
  - rozdział I pt.: Wprowadzenie do programu AIP, s.7-23
  - rozdział V pt.: Modelowanie złożzeń, s.104-110.

W 2014 roku zostałem nagrodzony jako promotor pracy dyplomowej magisterskiej, która otrzymała pierwsze miejsce w konkursie organizowanym przez firmę Astor, na najlepszą pracę dyplomową w 2014 roku. Autor pracy Gackowski Andrzej student kierunku Mechatronika na Wydziale Inżynierii Mechanicznej (wtedy jeszcze Wydziału Budowy Maszyn i Zarządzania. Tytuł pracy dyplomowej brzmiał: Projekt systemu monitoringu zużycia mediów w zakładzie przemysłowym (dyplom – załącznik 4).

Angażowałem się w promocję Politechniki Poznańskiej będąc organizatorem spotkania z uczniami Zespołu Szkół Ponadgimnazjalnych w Grodzisku Wielkopolskim. Spotkanie miało na celu prezentację laboratoriów Instytutu KM oraz Biblioteki Technicznej PP – wrzesień 2013. Byłem również jednym z organizatorów szkoły letniej dla studentów z Indii w 2019 roku na terenie Politechniki Poznańskiej w ramach projektu UG Fellowship Program Vishwaniken-

Politechnika Poznańska zakończone publikacją pt.: Designing of the machine for cutting transport belts: conceptual works, Aashutosh Kale, Aleksandra Biszczanik, Krzysztof Wałęsa, Mateusz Kukla, Maciej Berdychowski, **Dominik Wilczyński**, Acta Mechanica et Automatica - 2020, vol. 14, no. 3, s. 144-153, 100 pkt, udział własny 10%.

W okresie 28.06.2021 do 31.07.2021 byłem opiekunem stażu naukowego Pani dr inż. Weroniki Kruszelnickiej z Katedry Maszyn i Systemów Technicznych na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy. Staż odbył się w Instytucie Konstrukcji Maszyn Politechniki Poznańskiej, którego jestem pracownikiem (Podanie o staż Pani dr inż. Weroniki Kruszelnickiej – załącznik 5).

W okresie czerwiec-wrzesień 2022 roku byłem współopiekunem (Co-supervisor, strona 1 załącznika 5 nazwa pliku: Co-supervisor Erasmus Learning) stażu w ramach programu Erasmus Plus Pana H. Serpil Yayla z Iskenderun Technical University (załącznik 5, nazwy plików „Co-supervisor Erasmus\_Learning agreement.pdf” i „Co-supervisor Erasmus\_Letter of acceptance.pdf”).

W ciągu przebiegu lat po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych nawiązywałem liczne kontakty z firmami oferującymi praktyki i staże dla studentów: RW Swiss Automation filia w Poznaniu, Retnig w Gostyniu, Keller poligrafia dla przemysłu Dąbrówka koło Poznania, Kiel Nowy Tomyśl, Pro-ZAP w Ostrowie Wielkopolskim (w maju roku 2024, wspólnie z tą firmą Instytut KM organizuje dla studentów PP, Seminarium pt.: Projektowanie Mechatroniczne, gdzie mam znaczący i czynny udział w jego organizacji), MSProjekt-Plus Maciej Szulc w Opalenicy, Brocar sp. z o.o. w Poznaniu, Pawo-Alu System w Poznaniu, Trepko w Gnieźnie.

Jestem współautorem następujących artykułów i patentów napisanych wspólnie ze studentami:

- Rybarczyk J. (MCH), **Wilczyński D.**: Konstrukcja symulatora obrotów kół w samochodzie, Inżynieria Wytwarzania, Wydawnictwo Uczelniane Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Kaliszu, Kalisz 2018
- Magdziak Ł.(MCH), Malujda I., **Wilczyński D.**, Wojtkowiak D.: Concept of improving positioning of pneumatic drive as drive of manipulator, Procedia Engineering 177 (2017) 331-338, indeksowane na WoS,
- Mańczyński M. (MCH), Zieliński Ł. (MCH), Talaśka K., **Wilczyński D.**: Projekt skanera 3D wykorzystującego metodę triangulacji laserowej, Inżynieria Wytwarzania, Wydawnictwo Uczelniane Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Kaliszu, Kalisz 2016
- Magdziak Ł. (MCH), Malujda I., **Wilczyński D.**: Analiza kinematyczna manipulatora planarnego w systemie CAD, Inżynieria Wytwarzania, Wydawnictwo Uczelniane Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Kaliszu, Kalisz 2016
- Zieliński Ł. (MCH), Mańczyński M. (MCH), Talaśka K., **Wilczyński D.**: Hamulec magnetyczny w zastosowaniu do trenażera rowerowego, Inżynieria Wytwarzania, Wydawnictwo Uczelniane Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Kaliszu, Kalisz 2016
- Bożek Sz. (MCH), **Wilczyński D.**: Analiza numeryczna wytrzymałości ramy konstrukcyjnej platformy gaśnicowej na upadek, Inżynieria Wytwarzania,



Wydawnictwo Uczelniane Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Kaliszu, Kalisz 2014

- Magdziak Ł. (MCH), **Wilczyński D.**: Analiza termiczna układu zgrzewającego maszyny do pionowego pakowania, Inżynieria Wytwarzania, Wydawnictwo Uczelniane Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Kaliszu, Kalisz 2014
- Sikorski S. (MCH), **Wilczyński D.**, Malujda I., Talaśka K.: Wpływ parametrów wydruku drukarką 3D wykonanego w technologii RepRap na właściwości wytrzymałościowe modelu, Mechanik 12/2013, s. 1056-1057,
- Socha B. (MCH), Tarkowski P. (MCH), **Wilczyński D.**, Talaśka K.: Robot inspekcyjny do przewodów wentylacyjnych poziomych – sterowanie automatyczne, Mechanik 12/2013, s. 1058-1059,
- Tarkowski P. (MCH), Socha B. (MCH), **Wilczyński D.**, Malujda I.: Robot inspekcyjny do przewodów wentylacyjnych poziomych – sterowanie manualne, Mechanik 12/2013, s. 1060-1061.
- Zespół łóżka szpitalnego, Szymon Bożek, Łukasz Magdziak, Ireneusz Malujda, Krzysztof Talaśka, **Dominik Wilczyński**, Pat.233440, data zgłoszenia 5.12.2016, data publikacji WUP 31.10.2019, nr wg PP 1960, punktacja MNiSW 75 pkt., mój udział wynosi 20%.
- Głowica perforująca pasy napędowe i przenośnikowe, Krzysztof Wałęsa (Pan Krzysztof Wałęsa był studentem w chwili zgłoszenia wynalazku), Krzysztof Talaśka, Ireneusz Malujda, **Dominik Wilczyński**, Pat.229837, data zgłoszenia 23.05.2016, data publikacji WUP 31.08.2018, nr wg PP 1858, punktacja MNiSW 75 pkt., mój udział wynosi 10%.
- Uchwyt do holowania motocykla, Krzysztof Talaśka, Maciej Kabaciński, **Dominik Wilczyński**, Pat.236803, data zgłoszenia 15.11.2016, data publikacji WUP 22.02.2021, nr wg PP 1953, punktacja MNiSW 75 pkt., mój udział wynosi 10%.

Wykaz pozostałych informacji dotyczących kariery zawodowej przedstawiono w „Wykazie osiągnięć naukowych”.

  
(podpis wnioskodawcy)