

**Autoreferat, przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych,  
w szczególności określonych w art.16 ust.2 ustawy o stopniach i tytule  
w języku polskim**

dr Adam Puszkarz  
Katedra Materiałoznawstwa, Towaroznawstwa i Metrologii Włókienniczej  
Wydział Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów  
Politechnika Łódzka

Łódź, Kwiecień 2019

## Spis treści

1. Dane personalne .....	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe .....	3
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych .....	3
4. Wskazanie osiągnięcia naukowego, uzyskanego po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiącego znaczny wkład w rozwój dyscypliny Włókiennictwo zgodnie z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki .....	4
4.1 Wykaz prac naukowych stanowiących podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego - cykl jednotematycznych publikacji .....	4
4.2 Omówienie celu naukowego pracy i osiągniętych wyników i ich wykorzystanie .....	8
4.2.1 Wstęp .....	8
4.2.2 Projektowanie trójwymiarowych modeli tekstyliów .....	13
4.2.3 Symulacje transportu ciepła .....	19
4.2.4 Eksperyment .....	21
4.2.5 Komentarz wyników .....	22
4.2.6 Symulacje transportu masy .....	25
4.2.7. Eksperyment .....	28
4.2.8. Komentarz wyników .....	28
4.2.9 Podsumowanie .....	39
4.2.10 Literatura .....	41

### 1. Dane personalne

Adam Karol Puszkarczyk

### 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

03.07.2006 r.

Uzyskany stopień magistra nauk fizycznych w zakresie fizyki

Uniwersytet Łódzki

Wydział: Fizyki i Informatyki Stosowanej

Katedra Fizyki Teoretycznej

Temat pracy magisterskiej: "Płyny relatywistyczne"

Promotor: Dr hab. Krzysztof Kowalski (Uniwersytet Łódzki)

Recenzent: Dr Paweł Caban (Uniwersytet Łódzki)

20.04.2011 r.

Uzyskany stopień doktora nauk fizycznych w zakresie fizyki

Uniwersytet Łódzki

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

Katedra Fizyki Ciała Stałego

Temat rozprawy doktorskiej: "Rola Ge oraz Ta w krystalizacji metali amorficznych opartych na Fe"

Promotor: Dr hab. Marek Edward Moneta (Uniwersytet Łódzki)

Recenzenci: Dr hab. Katarzyna Brzózka (Politechnika Radomska),

Prof. dr hab. Józef Zbrozczyk (Politechnika Częstochowska)

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

Okres zatrudnienia	Jednostka naukowa	Stanowisko
05.2011–06.2012	Politechnika Łódzka Wydział Chemiczny Katedra Fizyki Molekularnej	pracownik inżynieryjno-techniczny
07.2012–obecnie	Politechnika Łódzka Wydział Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów Katedra Materialoznawstwa Towaroznawstwa i Metrologii Włókienniczej	adiunkt naukowy

4. Wskazanie osiągnięcia naukowego, uzyskanego po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiącego znaczny wkład w rozwój dyscypliny Włókiennictwo zgodnie z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Tytuł osiągnięcia naukowego:

### ***Wpływ homogenizacji na modelowanie zjawisk transportu ciepła i masy w tekstyliach stosowanych w odzieży funkcjonalnej***

- 4.1 Wykaz prac naukowych stanowiących podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego - cykl jednotematycznych publikacji.

Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie  
Journal Citation Reports (JRC)

1. A.K. Puszkarz, R. Korycki, I. Krucińska *Simulations of heat transport phenomena in a three-dimensional model of knitted fabric* **Autex Research Journal** 16(3) 128–137 (2016)

Impact Factor	Punktacja MNiSW/lista	Liczba cytowań		
		Web of Science	Scopus	Google Scholar
0,72	20/A	5	7	5

**Jestem głównym autorem publikacji.** Napisałem artykuł w oparciu o wyniki, których jestem autorem. Zaprojektowałem trójwymiarowy model rzeczywistej dzianiny jednowarstwowej stosowanej w wielowarstwowej odzieży funkcjonalnej dedykowanej przedwcześnie urodzonym niemowlętom. Parametry geometryczne modelu wyznaczyłem na podstawie m. in. obrazów uzyskanych za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej – SEM. Gotowy model poddałem symulacji (metoda objętości skończonych) transportu ciepła (na drodze przewodnictwa cieplnego, konwekcji, promieniowania cieplnego) wewnątrz dzianiny wywołanym różnicą temperatur: ciała dziecka oraz otoczenia w jakim dziecko przebywa. Na podstawie otrzymanych wyników symulacji oszacowałem termoizolacyjność rzeczywistej dzianiny. Ponadto, poddałem symulacji (w identycznych warunkach) nieistniejące w rzeczywistości dwa układy zbudowane z dwóch i trzech warstw tej samej dzianiny celem określenia wpływu liczby warstw na parametry termiczne danego układu. W artykule wykazałem przydatność zastosowanych modeli do przewidywania zjawiska transportu ciepła w dzianinach oraz parametrów termicznych odzieży do której są przeznaczone. Opracowałem graficznie wszystkie ilustracje i tabele przedstawione w artykule. Jestem autorem opisu symulacji wraz z ich interpretacją. Jestem współautorem wniosków podsumowujących otrzymane wyniki. **Mój udział w publikacji szacuję na 45 %**



2. A.K. Puszkarz, I. Krucińska *Study of multilayer clothing thermal insulation using thermography and the finite volume method* **Fibres and Textiles in Eastern Europe** 24 6(120) 129–137 (2016)

Impact Factor	Punktacja MNiSW/lista	Liczba cytowań		
		Web of Science	Scopus	Google Scholar
0,63	30/A	6	7	8

**Jestem głównym autorem publikacji.** Napisałem artykuł w oparciu o wyniki, których jestem autorem. Zaprojektowałem trójwymiarowe modele trzech rzeczywistych trójwarstwowych układów tekstylnych zbudowanych z tkanin, włókien i membrany (różniących się zarówno parametrami geometrycznymi jak i składem surowcowym) stosowanych w wielowarstwowej strażackiej odzieży ochronnej. Parametry geometryczne modeli trzech układów trójwarstwowych wyznaczyłem na podstawie m. in. obrazów wykonanych za pomocą mikroskopii optycznej oraz skaningowej mikroskopii elektronowej – SEM. Dla każdego z trzech układów stworzyłem dwa modele o zróżnicowanym stopniu odwzorowania włókien w tkaninach celem wyznaczenia wpływu geometrycznych parametrów przędzy na dokładność modelowania (metoda objętości skończonych) transportu ciepła (na drodze przewodnictwa cieplnego, konwekcji, promieniowania cieplnego) wewnątrz danego układu, wywołanym różnicą temperatur: ciała strażaka oraz otoczenia w jakim strażak przebywa. Na podstawie otrzymanych wyników symulacji oszacowałem termoizolacyjność rzeczywistych układów trójwarstwowych. Przydatność modeli zweryfikowałem na podstawie samodzielnie zaplanowanego i wykonanego eksperymentu na rzeczywistych układach trójwarstwowych z wykorzystaniem kamery termowizyjnej. W artykule wykazałem przydatność zastosowanych modeli do przewidywania zjawiska transportu ciepła w układach trójwarstwowych oraz parametrów termicznych odzieży do której są przeznaczone. Wykazałem również wpływ geometrycznych parametrów przędzy w tkaninach na proces modelowania transportu ciepła (na drodze przewodnictwa cieplnego, konwekcji, promieniowania cieplnego) wewnątrz trójwarstwowego układu tekstylnego. Opracowałem graficznie wszystkie ilustracje i tabele przedstawione w artykule. Jestem autorem opisu symulacji oraz eksperymentu wraz z ich interpretacją. Jestem współautorem wniosków podsumowujących otrzymane wyniki.

**Mój udział w publikacji szacuję na 70 %**

3. A.K. Puszkarz, I. Krucińska *The study of knitted fabric thermal insulation using thermography and finite volume method* **Textile Research Journal** 87(6) 643–656 (2017)

Impact Factor	Punktacja MNiSW/lista	Liczba cytowań		
		Web of Science	Scopus	Google Scholar
1,54	40/A	4	5	7

**Jestem głównym autorem publikacji.** Napisałem artykuł w oparciu o wyniki, których jestem autorem. Zaprojektowałem trójwymiarowe modele dziesięciu rzeczywistych dzianin dwuwarstwowych (różniących się zarówno parametrami geometrycznymi jak i składem surowcowym) stosowanych w wielowarstwowej odzieży funkcjonalnej dedykowanej przedwcześnie urodzonym niemowlętom. Parametry geometryczne modeli dziesięciu dzianin wyznaczyłem na podstawie m. in. obrazów wykonanych za pomocą mikroskopii optycznej oraz skaningowej mikroskopii elektronowej – SEM. Dla każdej z dziesięciu dzianin stworzyłem dwa modele o zróżnicowanym stopniu odwzorowania włókien celem wyznaczenia wpływu geometrycznych parametrów przędzy na proces modelowania (metoda objętości skończonych) transportu ciepła (na drodze przewodnictwa cieplnego, konwekcji, promieniowania cieplnego) wewnątrz dzianiny wywołanym różnicą temperatur: ciała dziecka oraz otoczenia w jakim dziecko przebywa. Na podstawie otrzymanych wyników symulacji oszacowałem termoizolacyjność rzeczywistych dzianin. Przydatność modeli zweryfikowałem na podstawie samodzielnie zaplanowanego i wykonanego eksperymentu na rzeczywistych dzianinach

z wykorzystaniem kamery termowizyjnej. W artykule wykazałem przydatność zastosowanych modeli do przewidywania zjawiska transportu ciepła w dzianinach oraz parametrów termicznych odzieży do której są przeznaczone. Wykazałem również wpływ geometrycznych parametrów przędzy na proces modelowania transportu ciepła (na drodze przewodnictwa cieplnego, konwekcji, promieniowania cieplnego) wewnątrz dzianiny. Opracowałem graficznie wszystkie ilustracje i tabele przedstawione w artykule. Jestem autorem opisu symulacji oraz eksperymentu wraz z ich interpretacją. Jestem współautorem wniosków podsumowujących otrzymane wyniki. **Mój udział w publikacji szacuję na 50 %**

4. A.K. Puszkarz, I. Krucińska *Modeling of air permeability of knitted fabric using the computational fluid dynamics* **Autex Research Journal** 18(4) 364–376 (2018)

Impact Factor	Punktacja MNiSW/lista	Liczba cytowań		
		Web of Science	Scopus	Google Scholar
0,96	20/A	2	2	0

**Jestem głównym autorem publikacji.** Napisałem artykuł w oparciu o wyniki, których jestem autorem. Zaprojektowałem trójwymiarowe modele dziesięciu rzeczywistych dzianin dwuwarstwowych (różniących się zarówno parametrami geometrycznymi jak i składem surowcowym) stosowanych w wielowarstwowej odzieży funkcjonalnej dedykowanej przedwcześnie urodzonym niemowlętom. Parametry geometryczne modeli dziesięciu dzianin wyznaczyłem na podstawie m. in. obrazów wykonanych za pomocą mikroskopii optycznej oraz skaningowej mikroskopii elektronowej – SEM. Dla każdej z dziesięciu dzianin stworzyłem dwa modele o zróżnicowanym stopniu odwzorowania włókien celem wyznaczenia wpływu geometrycznych parametrów przędzy na dokładność modelowania transportu powietrza (metoda objętości skończonych) przez wyroby tekstylne. Na podstawie otrzymanych wyników symulacji oszacowałem przepuszczalność powietrza rzeczywistych dzianin oraz jej zależność od grubości i gęstości pozornej danej dzianiny. Przydatność modeli zweryfikowałem na podstawie samodzielnie wykonanego eksperymentu na rzeczywistych dzianinach z wykorzystaniem testera przepuszczalności powietrza. W artykule wykazałem przydatność zastosowanych modeli do przewidywania przepuszczalności powietrza dzianin oraz przewodności odzieży do której są przeznaczone. Wykazałem również wpływ geometrycznych parametrów przędzy na proces modelowania transportu powietrza wewnątrz dzianin. Opracowałem graficznie wszystkie ilustracje i tabele przedstawione w artykule. Jestem autorem opisu symulacji oraz eksperymentu wraz z ich interpretacją. Jestem współautorem wniosków podsumowujących otrzymane wyniki. **Mój udział w publikacji szacuję na 70 %**

5. A.K. Puszkarz, I. Krucińska *Simulations of air permeability of multilayer textiles by the computational fluid dynamics* **International Journal for Multiscale Computational Engineering** 16(6) 509–526 (2018)

Impact Factor	Punktacja MNiSW/lista	Liczba cytowań		
		Web of Science	Scopus	Google Scholar
1,02	25/A	1	1	1

**Jestem głównym autorem publikacji.** Napisałem artykuł w oparciu o wyniki, których jestem autorem. Zaprojektowałem modele trzech rzeczywistych trójwarstwowych układów tekstylnych zbudowanych z tkanin, włóknin i membrany (różniących się zarówno parametrami geometrycznymi jak i składem surowcowym) stosowanych w wielowarstwowej strażackiej odzieży ochronnej. Parametry geometryczne modeli trzech układów trójwarstwowych wyznaczyłem na podstawie m. in. obrazów wykonanych za pomocą mikroskopii optycznej oraz skaningowej mikroskopii elektronowej –

SEM. Dla każdego układu trójwarstwowego stworzyłem dwa modele o zróżnicowanym stopniu odwzorowania włókien w tkaninach celem wyznaczenia wpływu geometrycznych parametrów przędzy na dokładność modelowania transportu powietrza (metoda objętości skończonych) wewnątrz badanych układów. Na podstawie otrzymanych wyników symulacji oszacowałem przepuszczalność powietrza układów trójwarstwowych. Przydatność modeli zweryfikowałem na podstawie samodzielnie wykonanego eksperymentu na rzeczywistych układach trójwarstwowych, korzystając z testera przepuszczalności powietrza. W artykule wykazałem przydatność zastosowanych modeli do przewidywania przepuszczalności powietrza trójwarstwowych układów tekstylnych oraz przepuszczalności powietrza odzieży do której są przeznaczone. Wykazałem również wpływ geometrycznych parametrów przędzy na proces modelowania transportu powietrza wewnątrz tkanin i układów trójwarstwowych, których są elementem. Opracowałem graficznie wszystkie ilustracje i tabele przedstawione w artykule. Jestem autorem opisu symulacji oraz eksperymentu wraz z ich interpretacją. Jestem współautorem wniosków podsumowujących otrzymane wyniki. **Mój udział w publikacji szacuję na 70 %**

6. A.K. Puszkarz, A. Usupov *The study of footwear thermal insulation using thermography and finite volume method* **International Journal of Thermophysics** 40: 45. <https://doi.org/10.1007/s10765-019-2509-1> (2019)

Impact Factor	Punktacja MNiSW/lista	Liczba cytowań		
		Web of Science	Scopus	Google Scholar
0,83	20/A	0	0	0

**Jestem głównym autorem publikacji.** Napisałem artykuł w oparciu o wyniki, których jestem autorem. Zaprojektowałem trójwymiarowe modele rzeczywistych butów sportowych (różniących się zarówno parametrami geometrycznymi jak i składem surowcowym). Parametry geometryczne modeli obuwia wyznaczyłem na podstawie fotografii oraz oprogramowania przeznaczonego do opracowania danych w postaci plików graficznych. Dla każdego buta stworzyłem trójwymiarowy model uwzględniający parametry geometryczne i skład surowcowy wszystkich jego elementów (podeszwa, wkładka, cholewka, język) i poddałem je symulacjom zjawiska transportu ciepła w optymalnych warunkach użytkowania. Na podstawie otrzymanych wyników symulacji oszacowałem termoizolacyjność obuwia. Przydatność modeli obuwia zweryfikowałem na podstawie samodzielnie wykonanego eksperymentu na rzeczywistym obuwiu z wykorzystaniem kamery termowizyjnej. W artykule wykazałem przydatność zastosowanych modeli do przewidywania termoizolacyjności obuwia. Wykazałem również wpływ geometrycznych parametrów oraz składu surowcowego poszczególnych elementów obuwia na proces modelowania transportu ciepła wewnątrz obuwia. Opracowałem graficznie wszystkie ilustracje i tabele przedstawione w artykule. Jestem autorem opisu symulacji oraz eksperymentu wraz z ich interpretacją. Jestem współautorem wniosków podsumowujących otrzymane wyniki. **Mój udział w publikacji szacuję na 90%**

#### Rozdziały w monografii

1. A. Puszkarz, *Modelowanie i analiza zjawisk transportu energii w tekstyliach* w książce „Wybrane zagadnienia z metrologii użytkowej odzieży funkcjonalnej” **Monografia Politechniki Łódzkiej**, ISBN 978-83-7283-808-7, Łódź (2016)

W rozdziale opisałem przykładowe metody projektowania trójwymiarowych modeli dzianin i tkanin oraz przedstawiłem przykładowe metody symulacji transportu ciepła z wykorzystaniem w/w modeli za pomocą wybranego oprogramowania. **Mój udział wynosi 100%**



2. A. Puszkarz, *Analiza zjawiska transportu energii cieplnej w odzieży ochronnej dla strażaków* w książce „Wybrane zagadnienia z metrologii użytkowej odzieży funkcjonalnej” **Monografia Politechniki Łódzkiej**, ISBN 978-83-7283-808-7, Łódź (2016)

W rozdziale opisałem przykładowe metody projektowania trójwymiarowych modeli tekstylnych układów wielowarstwowych stosowanych w odzieży strażackiej oraz przedstawiłem przykładowe metody symulacji transportu ciepła z wykorzystaniem w/w modeli za pomocą wybranego oprogramowania. *Mój udział wynosi 100%*

3. A. Puszkarz, *Analiza zjawiska transportu energii cieplnej w dzianinach dwuwarstwowych i laminatach przy użyciu oprogramowania SolidWorks* w książce „Wybrane zagadnienia z metrologii użytkowej odzieży funkcjonalnej” **Monografia Politechniki Łódzkiej**, ISBN 978-83-7283-808-7, Łódź (2016)

W rozdziale opisałem przykładowe metody projektowania trójwymiarowych modeli dzianin i laminatów stosowanych w odzieży stosowanej w funkcjonalnej odzieży przeznaczonej dla niemowląt urodzonych przedwcześnie oraz przedstawiłem przykładowe metody symulacji transportu ciepła z wykorzystaniem w/w modeli za pomocą wybranego oprogramowania. *Mój udział wynosi 100%*

## 4.2 Omówienie celu naukowego pracy i osiągniętych wyników i ich wykorzystanie

### 4.2.1 Wstęp

W pracach naukowych, wymienionych w paragrafie 5.2 autoreferatu, opisałem wykonane przeze mnie badania związane z zagadnieniem komfortu fizjologicznego jako jednego z dwóch, obok komfortu sensorycznego, parametru opisującego komfort użytkowy odzieży. Komfort fizjologiczny jest jednym z najważniejszych kryteriów oceny wyrobów odzieżowych, przyczyniającym się do zachowania równowagi bilansu cieplnego pomiędzy człowiekiem, a środowiskiem w którym przebywa. Równowaga bilansu cieplnego wynika przede wszystkim z prawidłowej regulacji temperatury organizmu człowieka oraz prawidłowej wymiany ciepła i wilgoci pomiędzy skórą człowieka. Wymiana ta odbywa się również poprzez odzież. Podstawowymi właściwościami wyrobów odzieżowych, decydującymi o komforcie fizjologicznym, są: izolacyjność cieplna, sorpcja wilgoci, przepuszczalność pary wodnej i przepuszczalność powietrza.

Dzianiny, tkaniny oraz włókniny, wchodzące w skład odzieży, są wyrobami włókienniczymi zbudowanymi z pojedynczych włókien. W dzianinach i tkaninach włókna tworzą przędzę – ciągłą, walcowaną strukturę powstałą w wyniku skręcenia pasma włókien w procesie przędzenia. Natomiast w włókninach pojedyncze włókna występują samodzielnie i tworzą chaotyczny układ przestrzenny. W dzianinach, tkaninach i włókninach wolne przestrzenie między włóknami wypełnia powietrze. Skomplikowana geometria tych trzech wymienionych wyrobów powoduje, że występujące w nich zjawiska fizyczne są uwarunkowane zarówno parametrami fizycznymi surowca danego wyrobu jak i parametrami fizycznymi powietrza, w którym ten wyrób jest zanurzony.

Modelowanie strukturalne wyrobów włókienniczych jest narzędziem wspierającym lepsze zrozumienie wpływu morfologii na ich właściwości fizyczne. Ponadto, może dostarczyć informacji o krytycznych parametrach tekstyliów, które mogą znacząco wpływać na komfort fizjologiczny wykonanej z tych materiałów odzieży. W ciągu ostatnich kilku dziesięcioleci projektowanie modeli tekstyliów jest przedmiotem wielu badań naukowych w celu lepszego zrozumienia wpływu morfologii na właściwości związane z komfortem fizjologicznym odzieży. Wraz ze wzrostem mocy obliczeniowej sprzętu komputerowego możliwe jest projektowanie lepszych modeli, które nie tylko dokładniej opisują skomplikowaną geometrię rzeczywistych materiałów ale przede wszystkim



umożliwiają prawidłowy opis i przewidywanie złożonych zjawisk fizycznych pojawiających się w rzeczywistych tekstyliach w procesie użytkowania odzieży.

Moje osiągnięcie naukowe obejmuje badania dotyczące izolacyjności cieplnej oraz przepuszczalności powietrza tekstyliów przeznaczonych do wyrobu dwóch rodzajów odzieży funkcjonalnej:

- 1) **Dzianiny dwuwarstwowe** wchodzące w skład odzieży dedykowanej przedwcześnie urodzonym niemowlętom,
- 2) **Układy trójwarstwowe** wchodzące w skład strażackiej odzieży ochronnej.

W obu przypadkach nadrzędnym celem pracy było zaprojektowanie trójwymiarowych modeli tekstyliów, uwzględniających zarówno parametry geometryczne rzeczywistych wyrobów włókienniczych jak i właściwości fizyczne surowców z których zostały wytworzone. Zarówno w przypadku badań izolacyjności cieplnej jak i przepuszczalności powietrza dla każdego rzeczywistego wyrobu opracowałem dwa modele o różnym stopniu odwzorowania włókien. W przypadku wielowarstwowej odzieży funkcjonalnej dedykowanej przedwcześnie urodzonym niemowlętom opracowałem dwa różne modele dzianin, natomiast w przypadku strażackiej odzieży ochronnej dwa różne modele tkanin. Optymalny model powinien charakteryzować się takim uproszczeniem w stosunku do rzeczywistego obiektu, które uwzględnia krytyczne właściwości rzeczywistego obiektu, mające decydujący wpływ na zachodzące w nim zjawiska, będące przedmiotem badań. W przypadku moich badań zdawałem sobie sprawę, że zaprojektowane modele o różnym stopniu odwzorowania włókien w badanych tekstyliach w różnym stopniu przyczynią się do rozbieżności pomiędzy wynikami modelowania i wynikami eksperymentalnymi zarówno w przypadku badań ich termoizolacyjności, jak i przepuszczalności powietrza. Najważniejszą cechą różniącą oba stworzone modele był sposób odwzorowania włókien, który w prostszym modelu wykluczał obecność powietrza w przędzy, która w rzeczywistości jest materiałem zbudowanym z pojedynczych włókien oddzielonych od siebie wolną przestrzenią wypełnioną właśnie przez powietrze. Obecność wolnych przestrzeni wypełnionych powietrzem (charakteryzującym się współczynnikiem przewodnictwa cieplnego o rząd mniejszym niż surowce tekstylne) w przypadku symulacji transportu ciepła musiały wpłynąć na wzrost izolacyjności cieplnej, natomiast w przypadku symulacji transportu masy musiały wpłynąć na przepuszczalności powietrza. Zdając sobie sprawę z konsekwencji zastosowanych uproszczeń w obu modelach sprawdziłem nie tyle czy ale przede wszystkim *w jakim stopniu* wpłynęły na proces modelowania obu zjawisk fizycznych. Zatem, główną intencją takiego podejścia było zbadanie wpływu geometrycznych parametrów przędzy na dokładność modelowania transportu ciepła i transportu powietrza (za pomocą metody objętości skończonych) w wybranych tekstyliach. Osobnym, nie mniej istotnym, zadaniem było zaprojektowanie dokładnych warunków symulacji odpowiadających warunkom eksperymentu z udziałem rzeczywistych tekstyliów, którego głównym celem była weryfikacja przydatności modeli.

W pierwszej kolejności przedstawiam szczegółową charakterystykę rzeczywistych tekstyliów będących przedmiotem modelowania.

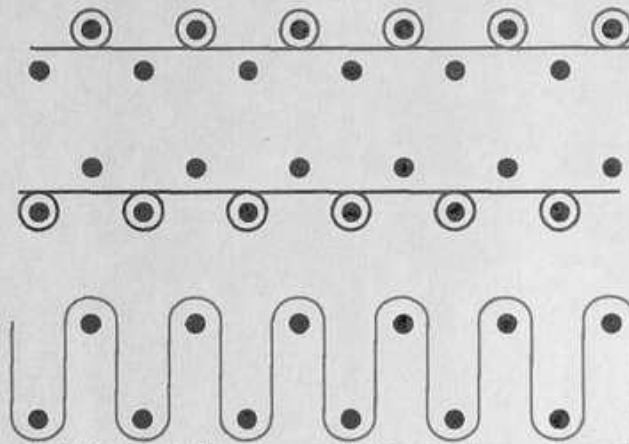
### ***Dzianiny dwuwarstwowe***

W przypadku przedwcześnie urodzonych niemowląt o wykształconej w pełni strukturze skóry tekstylia stanowiące dla nich odzież powinny zapewniać odpowiedni komfort użytkowy. Przede wszystkim powinny umożliwiać transport wilgoci na zewnątrz, tak aby utrzymywać skórę dziecka

w stanie suchym, co w przeciwnym razie może skutkować pojawianiem się ognisk zapalnych powodowanych rozwojem różnego rodzaju patogenów. W celu zapewnienia odzieży właściwości eliminujących te niekorzystne zjawiska, można zastosować konstrukcję dzianiny zbudowaną z dwóch następujących warstw:

- 1) *Warstwa dolna* (przylegająca do skóry dziecka) wykonana z przędzy konduktywno-dyfuzyjnej, której zadaniem jest odprowadzanie i transport wilgoci od ciała, zarówno w postaci fazy ciekłej jak i lotnej.
- 2) *Warstwa górna* (bez kontaktu ze skórą dziecka) wykonana z przędzy sorpcyjnej, której zadaniem jest utrzymywanie wilgoci z dala od ciała i jej odparowanie do otoczenia.

Na Rysunku 1 przedstawiłem metodę wytwarzania dzianin dwuwarstwowych, w wyniku której powstaje splot, w którym jedną stronę tworzą oczka lewe (wytwarzane z jednego rodzaju przędzy oznaczonym kolorem czerwonym), a drugą – oczka prawe (wytwarzane z drugiego rodzaju przędzy oznaczonym kolorem niebieskim). Połączenie obu warstw uzyskuje się za pomocą przędzy, która tworzy pętle nabrań (oznaczone kolorem zielonym).



Rys.1: Schemat metody wytwarzania dzianiny dwuwarstwowej [1]

Przedstawiona metoda umożliwiła wytworzenie dzianiny dwuwarstwowej zbudowanej z dwóch odrębnych splotów lewo-prawych, w której przekazywanie wilgoci z jednej warstwy do drugiej odbywa się głównie poprzez kontakt powierzchniowy, ponieważ przędza łącząca obie warstwy dzianiny nie tworzy dodatkowych oczek, ma właściwości hydrofobowe, charakteryzuje się niską masą liniową (22 dtex), a jej udział procentowy w masie powierzchniowej dzianiny nie przekracza 5%.

Przedmiotem moich badań był zestaw 10 dzianin dwuwarstwowych. W ośmiu z nich dolna warstwa została wykonana z przędzy konduktywno-dyfuzyjnej (polipropylen (PP) lub poliamid (PA) lub poliester (PET)), natomiast górna warstwa została wykonana z przędzy sorpcyjnej (bawełna lub bambus lub wiskoza) W dwóch pozostałych dzianinach obie warstwy zostały wykonane z jednego surowca (bawełna lub wiskoza). Działiny te stanowiły punkt odniesienia w badaniach dla ośmiu dzianin zbudowanych z dwóch różnych surowców. W Tabeli 1 przedstawiłem parametry fizyczne dzianin.

Tabela 1: Charakterystyka dzianin dwuwarstwowych [2]

Nr	Parametry dzianiny				Parametry przędzy					Parametry włókna	
	Skład: warstwa górna warstwa dolna	grubość [mm]	Masa powierzchniowa [g·m <sup>-2</sup> ]	Grubość warstwy [mm]	Średnica [mm]	Gęstość liniowa [tex]	Skręt [m <sup>-1</sup> ]	Długość przędzy w oczku [mm]	Powierzchnia a przędzy w oczku [mm <sup>2</sup> ]	Liczba włókien w przędzy	średnica [µm]
1	bawełna	1.34±0.01	242±16	0.70±0.01	0.25±0.01	20	770	3.19±0.05	18±1	122±5	15.2±0.2
	bawełna			0.64±0.01	0.26±0.01	20	707	3.20±0.05	19±1	122±5	15.1±0.3
2	bawełna	1.40±0.01	206±14	0.73±0.01	0.25±0.01	20	636	3.19±0.05	18±1	122±5	15.3±0.2
	PP			0.67±0.01	0.27±0.01	8	0	3.01±0.05	21±2	109±5	27.4±0.3
3	bawełna	1.44±0.01	227±15	0.75±0.01	0.26±0.01	20	855	3.16±0.05	19±1	122±5	15.1±0.2
	PET			0.69±0.01	0.30±0.01	15	0	3.12±0.05	20±1	96±4	26.2±0.1
4	bawełna	1.30±0.01	182±12	0.68±0.01	0.25±0.01	20	785	3.20±0.05	18±2	122±5	15.2±0.2
	PA			0.62±0.01	0.28±0.01	14	0	3.14±0.05	22±1	102±5	23.4±0.3
5	bambus	1.39±0.01	236±16	0.72±0.01	0.22±0.01	20	912	3.17±0.05	17±2	86±4	24.4±0.2
	PP			0.67±0.01	0.27±0.01	8	0	3.00±0.05	21±2	109±5	27.3±0.3
6	bambus	1.36±0.01	222±15	0.71±0.01	0.22±0.01	20	912	3.16±0.05	17±1	86±4	24.3±0.2
	PET			0.65±0.01	0.30±0.01	15	0	3.11±0.05	20±2	96±5	26.2±0.2
7	bambus	1.16±0.01	195±13	0.60±0.01	0.22±0.01	20	912	3.15±0.05	17±1	86±4	24.3±0.2
	PA			0.56±0.01	0.28±0.01	14	0	3.14±0.05	22±3	102±5	23.1±0.3
8	wiskoza	1.38±0.01	236±16	0.72±0.01	0.22±0.01	20	778	3.09±0.05	15±1	81±4	29.4±0.2
	PP			0.66±0.01	0.27±0.01	8	0	3.03±0.05	21±2	109±5	27.1±0.1
9	wiskoza	1.25±0.01	221±15	0.65±0.01	0.22±0.01	20	778	3.10±0.05	15±2	81±4	29.3±0.2
	PET			0.60±0.01	0.30±0.01	15	0	3.14±0.05	20±2	96±5	26.2±0.2
10	wiskoza	1.19±0.01	238±16	0.62±0.01	0.22±0.01	20	778	3.11±0.05	15±2	81±4	29.4±0.2
	wiskoza			0.57±0.01	0.21±0.01	20	778	3.12±0.05	15±2	81±4	29.3±0.2

### Układy trójwarstwowe

Strażacka odzież ochronna zabezpieczająca człowieka wykonującego niebezpieczną pracę w warunkach ekstremalnych temperatur otoczenia jest szczególnie ważnym czynnikiem wpływającym na bilans cieplny, ponieważ tworzy barierę między ciałem strażaka, a otoczeniem o warunkach termicznych skrajnie odległych od typowych dla życia człowieka. W umiarkowanym i gorącym otoczeniu ubrania chronią przed nadmiernym ciepłem i wspomagają mechanizmy termoregulacyjne, wytwarzając sztuczny "mikroklimat" w bliskim sąsiedztwie ludzkiego ciała. Wspomniane funkcje odzieży mają ogromne znaczenie nie tylko dla strażaków ale również pracowników przemysłu ciężkiego (pracowników hutniczych) lub kierowców samochodów wyścigowych, którzy mogą być narażeni na działanie płomieni i źródeł ciepła promieniowania podczas operacji gaśniczych i innych działań zawodowych (tj. metalurgii, ratownictwa). Dlatego też ich odzież musi być zaprojektowana w sposób zapewniający ochronę przed ogniem i innymi zagrożeniami termicznymi oraz w celu zapobiegania poparzeniom skóry. Aby odzież zapewniała dobrą ochronę przed ciepłem, musi posiadać pewną minimalną masę i grubość. Z drugiej jednak strony, odzież nie może być zbyt ciężka i zbyt gruba, ponieważ zmniejsza ergonomię i komfort fizjologiczny. Ponadto, w przypadku odzieży przeciwłotniczej i nieprzepuszczalnej odzieży ochronnej (np. przed ciekłymi środkami chemicznymi), jej kluczową rolę dla bezpieczeństwa użytkownika odgrywają właściwości fizykochemiczne tekstyliów.

Przedmiotem moich badań były 3 układy trójwarstwowe (UTP 6, UTP 7 i UTP 9) stosowane w strażackiej odzieży ochronnej. Układy te zostały wykonane z trzech warstw (A, B, C):

- A. warstwa zewnętrzna (tkanina),
- B. warstwa kompozytowa (membrana i włóknina),
- C. warstwa wewnętrzna (włóknina i tkanina).





#### 4.2.2 Projektowanie trójwymiarowych modeli tekstyliów

Pierwszy etap pracy polegał na zaprojektowaniu trójwymiarowych modeli rzeczywistych materiałów tekstylnych w celu poddania ich symulacjom transportu ciepła i masy (powietrza). Zarówno etap projektowania jak i etap modelowania zjawisk transportu zrealizowałem za pomocą oprogramowania SolidWorks 2014. Oprogramowanie to jest przeznaczone do projektowania trójwymiarowych modeli ciał stałych (zarówno w mikroskali jak i w makroskali) oraz wykonywania symulacji zjawisk fizycznych z udziałem w/w modeli za pomocą zaawansowanych metod obliczeniowych (metoda elementów skończonych, metoda objętości skończonych). Na podstawie wykonanego przeglądu literatury naukowej mogę wnioskować, że jestem użytkownikiem wybranego oprogramowania, który jako pierwszy zastosował je do analizy zjawisk transportu ciepła oraz transportu masy w tekstyliach.

##### *Modele dzianin dwuwarstwowych*

Dla każdej z 10 rzeczywistych dzianin dwuwarstwowych zaprojektowałem dwa trójwymiarowe modele. Modele te różniły się dokładnością odwzorowania przędzy.

Pierwszy, prostszy model, zwany w dalszej części autoreferatu jako *monofilamentowy*, nie uwzględniał pojedynczych włókien w przędzy, traktując ją jako jednoczęściowy, ciągły obiekt (podobny raczej do żyłki, a nie do rzeczywistej przędzy). Pomimo tego uproszczenia w geometrii, model ten jednak uwzględniał różnice w następujących parametrach geometrycznych dziesięciu wybranych dzianin:

- 1) grubość dzianiny,
- 2) grubość każdej z dwóch warstw dzianiny,
- 3) wzajemne położenie obu warstw dzianiny,
- 4) długość przędzy w pojedynczym oczku,
- 5) średnicę przędzy

Model monofilamentowy zakładał kołowy przekrój poprzeczny przędzy o stałej średnicy na całej długości przędzy. Było to pewne uproszczenie w geometrii przędzy, ponieważ przekrój poprzeczny rzeczywistej przędzy tworzącej dzianinę rzadko kiedy ma kołowy przekrój poprzeczny, a przede wszystkim nie jest on jednakowy na całej długości przędzy ze względu na pojawiające się naprężenia mechaniczne między sąsiednimi oczkami dzianiny, które powodują deformację przędzy. W tym celu przyjąłem tzw. średnicę równoważną, która odpowiadała polu powierzchni koła równemu polu powierzchni przekroju poprzecznego przędzy w rzeczywistej dzianinie.

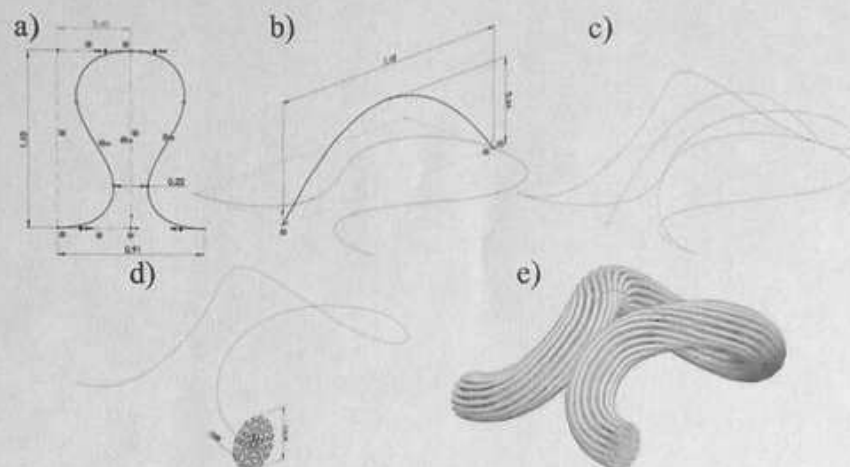
Drugi model, zwany w dalszej części autoreferatu jako *włóknisty*, uwzględniał te same pięć parametrów geometrycznych, co model monofilamentowy. Jednak w odróżnieniu od niego uwzględniał on wewnętrzną strukturę przędzy, odwzorowując dodatkowo następujące parametry geometryczne rzeczywistej dzianiny:

- 6) długość włókna w pojedynczym oczku dzianiny,
- 7) średnicę włókien,



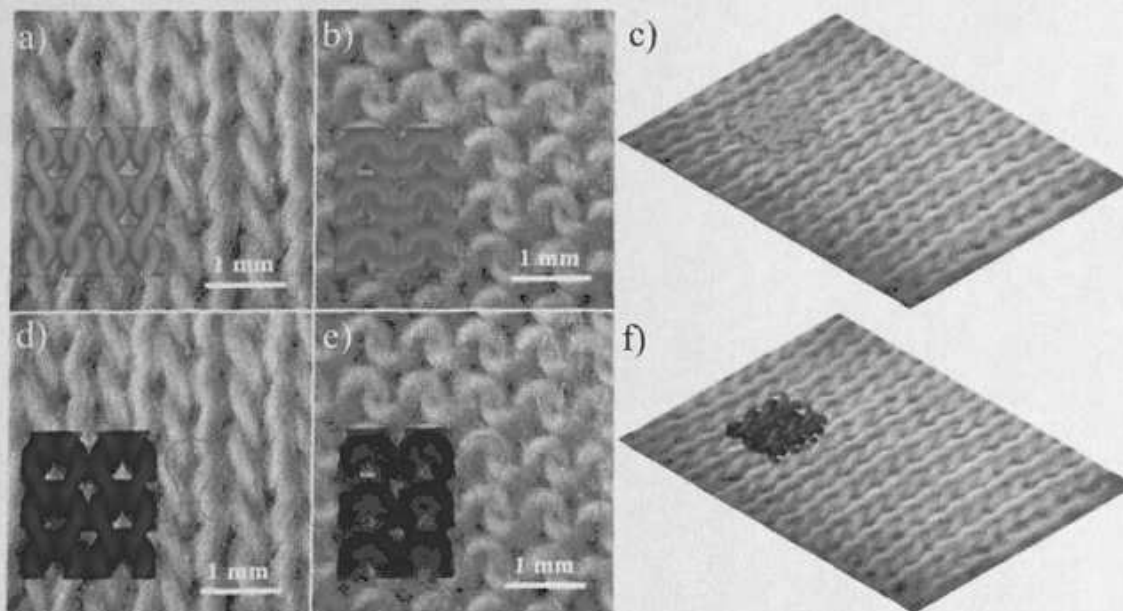


z operacji rzutowania pierwszego szkicu oczka na szkic profilu oczka, uzyskałem linię przebiegającą w trójwymiarowej przestrzeni o kształcie rzeczywistego oczka (Rysunek 4c). W kolejnym etapie wykonałem szkic przekroju poprzecznego przędzy zbudowanej z pojedynczych włókien (Rysunek 4d). Ostateczny kształt oczka dzianiny uzyskałem za pomocą operacji wyciągnięcia ostatniego szkicu wzdłuż całej długości linii otrzymanej w trzecim kroku projektowania modelu (Rysunek 4e).



Rys. 4: Etapy projektowania trójwymiarowego modelu oczka dzianiny na przykładzie modelu włóknistego [4]

Na Rysunku 5 przedstawiłem oba modele dzianin nałożone na obrazy rzeczywistych tekstyliów uzyskane za pomocą stereoskopowego mikroskopu optycznego.



Rys. 5: Model monofilamentowy (a–c) i model włóknisty (d–f) nałożony na obrazy rzeczywistych dzianin uzyskane za pomocą stereoskopowego mikroskopu optycznego [4]

### *Modele układów trójwarstwowych*

Dla każdego z 3 rzeczywistych układów trójwarstwowych zaprojektowałem dwa trójwymiarowe modele różniące się dokładnością odwzorowania włókien w tkaninie warstwy zewnętrznej (A) i w tkaninie warstwy wewnętrznej (C).

Pierwszy, prostszy model, zwany w dalszej części autoreferatu jako *monofilamentowy*, nie uwzględniał pojedynczych włókien w przędzy, traktując ją jako jednoczęściowy, ciągły obiekt (podobny raczej do żyłki, a nie do rzeczywistej przędzy). Pomimo tego uproszczenia w geometrii, model ten jednak uwzględniał różnice w następujących parametrach geometrycznych tkaniny w warstwie (A) i tkaniny w warstwie (C):

- 1) grubość tkaniny,
- 2) długość przędzy w wątku raportu tkaniny,
- 3) długość przędzy w osnowie raportu tkaniny,
- 4) średnicę przędzy.

Model monofilamentowy zakładał kołowy przekrój poprzeczny przędzy o stałej średnicy na całej długości przędzy w raporcie tkaniny. Było to pewne uproszczenie w geometrii przędzy, ponieważ przekrój poprzeczny rzeczywistej przędzy tworzącej tkaninę rzadko kiedy ma kołowy przekrój poprzeczny, a przede wszystkim nie jest on jednakowy na całej długości raportu ze względu na pojawiające się naprężenia mechaniczne między stykającymi się przebiegami przędzy w wątku i w osnowie, które powodują deformację przędzy. W tym celu przyjąłem tzw. średnicę równoważną, która odpowiadała polu powierzchni koła równemu polu powierzchni przekroju poprzecznego przędzy w rzeczywistej tkaninie.

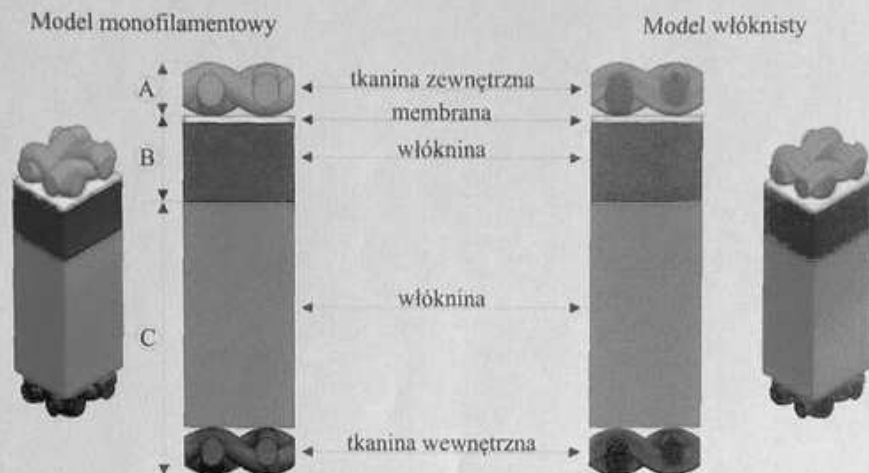
Drugi model, zwany w dalszej części autoreferatu jako *włóknisty*, uwzględniał te same cztery parametry geometryczne, co model monofilamentowy. Jednak w odróżnieniu od niego uwzględniał on wewnętrzną strukturę przędzy, odwzorowując dodatkowo następujące parametry geometryczne rzeczywistej tkaniny:

- 5) długość włókna w przędzy osnowowej w raporcie tkaniny,
- 6) długość włókna w przędzy wątkowej w raporcie tkaniny,
- 7) średnicę włókien,

Model włóknisty zakładał kołowy przekrój poprzeczny włókna o stałej średnicy na całej długości przędzy. Było to pewne uproszczenie w geometrii włókna, ponieważ przekrój poprzeczny rzeczywistych włókien tworzących przędzę rzadko kiedy ma kołowy przekrój poprzeczny (wyjątkiem mogą tu być włókna chemiczne). W tym celu przyjąłem tzw. średnicę równoważną, która odpowiadała polu powierzchni koła równemu polu powierzchni przekroju poprzecznego włókna w rzeczywistej tkaninie. Założyłem również, że wszystkie włókna posiadają jednakowy przekrój poprzeczny)

- 8) liczbę włókien w przekroju poprzecznym przędzy.

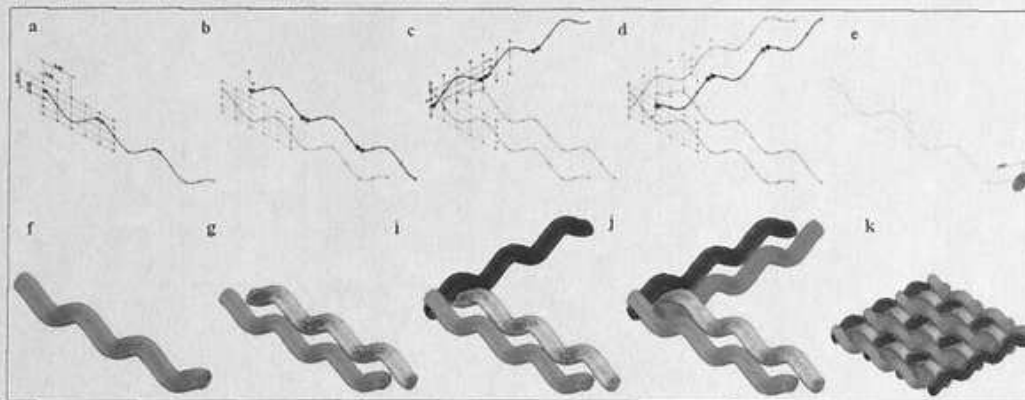
Porównanie obu modeli przedstawiłem na Rysunku 6. W modelu włóknistym średnica włókien została celowo zwiększona, natomiast liczba włókien celowo zmniejszona w stosunku do rzeczywistych parametrów (Tabela 2), w celu lepszego uwidocznienia różnicy pomiędzy modelami.



**Rys. 6:** Porównanie geometrii modelu monofilamentowego z modelem włóknistym na przykładzie modelu układu trójwarstwowego UTP6 (w modelu włóknistym średnica włókien w tkaninach została celowo zwiększona, a liczba włókien celowo zmniejszona w stosunku do rzeczywistych parametrów tkanin w celu lepszego uwidocznienia różnicy pomiędzy modelami. (Tabela 2); W obu modelach wskazano podział na 3 warstwy (A, B, C) [7]

Wartości średnie geometrycznych parametrów rzeczywistych tkanin, przedstawionych w Tabeli 2, wyznaczyłem doświadczalnie zgodnie z odpowiednimi normami. Grubość tkaniny wyznaczyłem zgodnie z [5], średnicę równoważną przędzy obliczyłem na podstawie stereoskopowych obrazów uzyskanych za pomocą mikroskopu optycznego, średnicę włókien wyznaczyłem na podstawie obrazów uzyskanych przy pomocy skaningowego mikroskopu elektronowego oraz przy użyciu oprogramowania do analizy danych w postaci plików graficznych *ImageJ*.

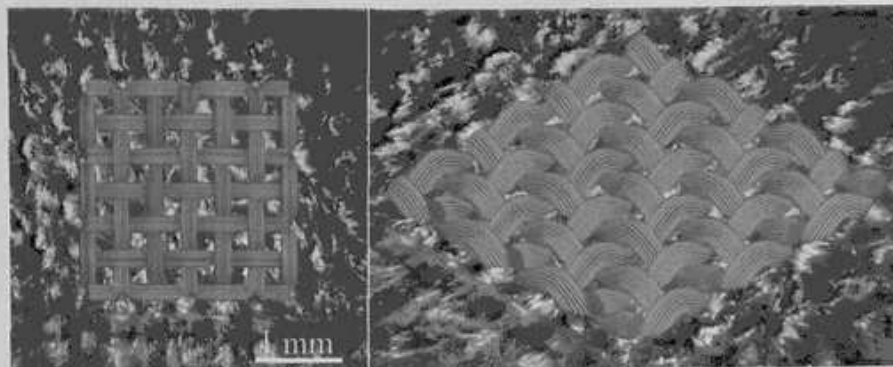
W pierwszej fazie projektowania modelu stworzyłem, na dwóch równoległych płaszczyznach dwuwymiarowe szkice odwzorowujące kształt przebiegu sąsiednich przędz w osnowie za pomocą krzywych parametrycznych (Rysunek 7a, 7b).



**Rys 7:** Etapy projektowania splotu płóciennego na przykładzie modelu włóknistego tkaniny zewnętrznej [7]

Analogicznie stworzyłem, na dwóch równoległych płaszczyznach (prostokątnych do dwóch poprzednich płaszczyzn), dwuwymiarowe szkice odwzorowujące kształt przebiegu sąsiednich przędz w wątku (Rysunek 7c, 7d). W następnej kolejności utworzyłem szkic przekroju poprzecznego przędzy zbudowanej z pojedynczych włókien (Rysunek 7e). Ostateczny kształt przędzy w osnowie i wątku uzyskałem za pomocą operacji wyciągnięcia szkicu przekroju poprzecznego przędzy wzdłuż krzywych, otrzymanych w dwóch pierwszych fazach projektowania modelu (Rysunek 7f-7k). Powielając otrzymane w ten sposób modele sąsiednich przędz w osnowie i wątku otrzymałem ostateczną postać modelu tkaniny. Na Rysunku 8 przedstawiłem model włóknisty, nałożony na obrazy rzeczywistej tkaniny zewnętrznej uzyskane za pomocą stereoskopowego mikroskopu optycznego.





Rys. 8: Model włóknisty nałożony na obrazy rzeczywistej tkaniny zewnętrznej uzyskane za pomocą stereoskopowego mikroskopu optycznego [3]

W obu modelach włókniny (ze względu na trudny do wiernego odwzorowania chaotyczny układ przestrzenny włókien) w warstwach B i C oraz membranę (folię) w warstwie B odwzorowałem jako obiekt o jednorodnej budowie wewnętrznej o izotropowej porowatości. W przypadku włókien parametr ten obliczyłem na podstawie parametrów wyznaczonych doświadczalnie: masy powierzchniowej  $M_p$  [ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ], grubości warstwy  $d$  [mm] i gęstości surowca  $\rho$  [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ], zgodnie z równaniem [8]:

$$P = \left( 1 - \frac{M_p \cdot 10^{-3}}{d \cdot \rho} \right) \cdot 100\% \quad (1)$$

W przypadku membrany, porowatość została wyznaczona dwiema niezależnymi metodami: 1) porozymetrii rtęciowej (model Auto Pore IV 9500 firmy Micromeritics, USA), 2) mikrotomografii rentgenowskiej (model  $\mu\text{CT}$  50 firmy Scanco Medical, Szwajcaria). Pierwsza metoda umożliwiała oszacowanie objętości, jaką zajmowały pory otwarte, niezbędnej do uwzględnienia w modelowaniu przepuszczalności powietrza membrany. Druga metoda pozwoliła oszacować objętość jaką zajmowały zarówno pory otwarte jak i pory zamknięte. W Tabeli 3 przedstawiłem porowatość wszystkich włókien i membran, wchodzących w skład układów trójwarstwowych, wyznaczoną za pomocą wyżej wymienionych metod.

Tabela 3: Porowatość włókien (w warstwach B i C) oraz membran (warstwa B) w układach trójwarstwowych: UPT 6, UTP 7, UTP 9 [3].

	Warstwa	Typ warstwy	Skład surowcowy	Porowatość [%]	
UTP 6	B	włóknina	Kevlar	70 <sup>a)</sup>	
		membrana	PTFE/PU	88 <sup>b)</sup>	11 <sup>c)</sup>
	C	włóknina	Kevlar	92 <sup>a)</sup>	
UTP 7	B	włóknina	Kevlar	70 <sup>a)</sup>	
		membrana	PTFE/PU	88 <sup>b)</sup>	13 <sup>c)</sup>
	C	włóknina	Kevlar	89 <sup>a)</sup>	
UTP 9	B	włóknina	Kevlar	70 <sup>a)</sup>	
		membrana	PTFE/PU	88 <sup>b)</sup>	14 <sup>c)</sup>
	C	włóknina	Kevlar	86 <sup>a)</sup>	

<sup>a)</sup> porowatość oszacowana na podstawie równania 1

<sup>b)</sup> porowatość (pory otwarte i zamknięte) oszacowana na podstawie mikrotomografii rentgenowskiej

<sup>c)</sup> porowatość (tylko pory otwarte) oszacowana na podstawie porozymetrii rtęciowej

### 4.2.3 Symulacje transportu ciepła

#### Podstawy Fizyczne

Dzianiny i tkaniny są płaskimi wyrobami włókienniczymi złożonym z wzajemnie połączonych układów przędz. Przędze są zbudowane z pojedynczych włókien, między którymi występują wolne przestrzenie, które wypełnia powietrze. W związku z tym, transport ciepła w obu tych wyrobach odbywa się zarówno poprzez włókna (ciało stałe) jak i powietrze (gaz). Zastosowane oprogramowanie umożliwia równoczesne modelowanie zjawisk transportu ciepła poprzez przewodnictwo, konwekcję i promieniowanie.

#### Przewodnictwo ciepłne w ciałach stałych

Zjawisko przewodnictwa ciepłnego w anizotropowym ciele stałym jest opisane następującym równaniem [9]:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_H, \quad (2)$$

gdzie  $e=cT$  ( $c$  – ciepło właściwe). W przypadku ośrodka izotropowego tensor przewodnictwa ciepłnego,  $T$  ma postać macierzy diagonalnej, a wartości własne spełniają warunek:  $\lambda_1=\lambda_2=\lambda_3=\lambda$ .

#### Transport ciepła w gazach

Transport ciepła w gazach opisuje poniższe równanie zachowania energii [9]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( h + \frac{u^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \rho u_i \left( h + \frac{u^2}{2} \right) \right] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ u_i (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i \right] + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho d + S_i u_i + Q_H, \quad (3)$$

gdzie:  $\rho$  – gęstość gazu,  $h$  – entalpia gazu,  $u$  – prędkość strumienia gazu,  $\tau$  – tensor lepkości gazu,  $\tau^R$  – tensor naprężeń Reynoldsa,  $q$  – gęstość strumienia ciepła,  $d$  – współczynnik rozpraszania energii kinetycznej gazu,  $S_i = S_i^{porous} + S_i^{gravity} + S_i^{rotation}$  – siła zewnętrzna przypadająca na jednostkę masy gazu, wynikająca z porowatości ośrodka ( $S_i^{porous}$ ), wyporności ośrodka ( $S_i^{gravity} = -\rho g_i$ ) oraz ruchu obrotowego ośrodka względem układu współrzędnych ( $S_i^{rotation}$ ),  $Q_H$  – ciepło właściwe gazu przypadające na jednostkę objętości. Indeksy dolne oznaczają sumowanie po współrzędnych przestrzennych. Gęstość strumienia ciepła opisuje następujące równanie [9]:

$$q_i = \left( \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial h}{\partial x_i}; \quad i = 1, 2, 3. \quad (4)$$

gdzie:

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}. \quad (5)$$

Stała  $C_\mu$  jest wyznaczana eksperymentalnie i wynosi  $C_\mu=0,09$ ; natomiast  $\sigma_c=0,9$ . Powyższe równania mają zastosowanie zarówno w przypadku laminarnego jak i turbulentnego przepływu gazu. Parametry:  $k$  i  $\mu_t$  wynoszą zero dla przepływu laminarnego.

### Promieniowanie cieplne w ciałach stałych

Powierzchnie ciał mogą wymieniać energię promieniowania cieplnego poprzez emisję, absorpcję oraz odbicie. Ilość ciepła wypromieniowanego przez powierzchnię  $Q_r^{out}$  jest opisana następującym równaniem [9]:

$$Q_r^{out} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot A + (1 - \varepsilon) \cdot Q_r^{in}, \quad (6)$$

gdzie  $\varepsilon$  jest emisyjnością powierzchni,  $\sigma$  jest stałą Stefana-Boltzmann,  $T$  jest temperaturą powierzchni ( $\varepsilon\sigma T^4$  jest strumieniem ciepła wypromieniowanym przez pole tej powierzchni,  $A$  zgodnie z prawem Stefana-Boltzmann), natomiast  $Q_r^{in}$  jest ilością ciepła zaabsorbowaną przez powierzchnię.

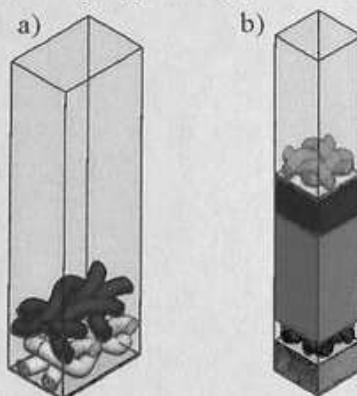
### Warunki początkowe symulacji transportu ciepła

Symulacje transportu ciepła w modelach dzianin i układach trójwarstwowych przeprowadziłem korzystając z modułu *SolidWorks Flow Simulation* stosując metodę objętości skończonych. Do każdego modelu przypisałem surowce, z których zbudowany był rzeczywisty materiał tekstylny. Dla każdego surowca przypisałem parametry fizyczne (Tabela 4), niezbędne do przeprowadzenia symulacji transportu ciepła: gęstość, ciepło właściwe, współczynnik przewodnictwa cieplnego, emisyjność.

Tabela 4: Parametry fizyczne surowców zastosowane do symulacji transportu ciepła [2,3]

Parametr	Bawełna	PA	PP	Bambus	Wiskoza	PET	Nomex	Kevlar	PTFE	PU
gęstość, $\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	1550	1230	940	1400	1520	1370	1380	1440	2200	1200
ciepło właściwe, $c$ [J·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> ]	1330	2050	1720	1300	1470	1380	1396	1200	1300	1120
współ. przew. cieplnego, $\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> ]	0,072	0,220	0,260	0,042	0,060	0,084	0,09	0,04	0,25	0,035
Emisyjność, $\varepsilon$	0,78	0,69	0,97	0,87	0,80	0,70	0,65	0,50	0,85	0,90

Korzystając z periodycznej budowy dzianin i tkanin objętość każdego modelu ograniczyłem do tzw. raportu, czyli najmniejszego powtarzalnego elementu danego materiału. Zredukowany w ten sposób model umieściłem na górnej powierzchni modelu prostopadłościennych płyty (stosowanej w tzw. modelu ludzkiej skóry przeznaczonego do badań oporu cieplnego i oporu pary wodnej rzeczywistych tekstyliów). Model płyty i model badanego materiału umieściłem na dnie prostopadłościennych domeny obliczeniowej wypełnionej powietrzem (Rysunek 9).



Rys. 9: Trójwymiarowy model dzianiny dwuwarstwowej (a) i układu trójwarstwowego (b) umieszczony na modelu płyty o stałej temperaturze znajdującej się na spodzie domeny obliczeniowej [2,3]

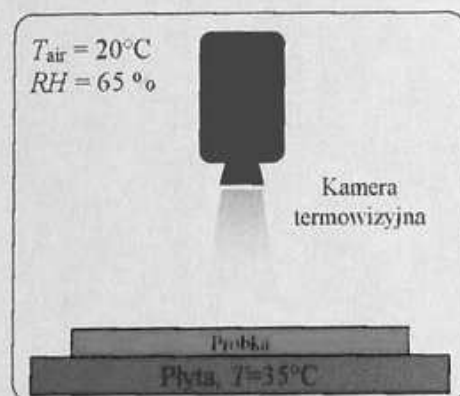


Kształt i rozmiar domeny był dostosowany do rozmiaru raportu badanego modelu. W celu wyeliminowania negatywnego wpływu warunków brzegowych na wynik obliczeń, zastosowałem tzw. periodyczne warunki brzegowe, które badany raport traktowały jako nieskończenie powtarzalny element materiału propagujący się poza domenę we wszystkich czterech kierunkach poziomych. Przyjąłem następujące warunki początkowe symulacji: temperatura modelu płyty  $T_p=35^\circ\text{C}$ , temperatura modelu dzianiny/układu trójwarstwowego  $T_m=20^\circ\text{C}$ , temperatura powietrza  $T_{\text{air}}=20^\circ\text{C}$ , ciśnienie powietrza  $p_{\text{air}}=1013,25\text{ hPa}$ , wilgotność względna powietrza  $RH=60\%$ . W wyniku tak zdefiniowanych warunków początkowych, został wymuszony transfer ciepła z obszaru o wyższej temperaturze (model płyty) do obszaru o niższej temperaturze (powietrze) w kierunku głównie pionowym (zwrocie głównie ku górze) przez model dzianiny/układu trójwarstwowego. Głównym celem obliczeń było otrzymanie rozkładu temperatur w modelu dzianiny/układu trójwarstwowego po osiągnięciu przez badany układ: (płyta/materiał tekstylny/otoczenie) stanu ustalonego.

Przed przystąpieniem do obliczeń domena obliczeniowa została podzielona na prostopadłościennie komórki (objętości skończone) trzech rodzajów: 1) komórki składające się wyłącznie z ciała stałego (dzianina/układ trójwarstwowy, płyta), 2) komórki wypełnione wyłącznie gazem (powietrze), 3) komórki zawierające zarówno ciało stałe jak i powietrze. Łączna liczba komórek była zależna od liczby, kształtu i wielkości elementów tworzących model danego materiału, a także od rodzaju modelu (monofilamentowy, włóknisty).

#### 4.2.4 Eksperyment

Badania termoizolacyjności rzeczywistych tekstyliów wykonałem w klimatyzowanym pomieszczeniu (Great Climatic Chamber firmy Weiss Technik, Niemcy) w stałej temperaturze powietrza ( $T_{\text{air}}=20^\circ\text{C}\pm 0,1^\circ\text{C}$ ) i w stałej wilgotności względnej powietrza ( $RH=65\%\pm 1\%$ ). Próbkę tekstyliów umieściłem na płaskiej płycie (Measurement Technology North West, USA) o stałej temperaturze ( $T=35^\circ\text{C}\pm 0,1^\circ\text{C}$ ). W przypadku dzianin dwuwarstwowych stroną przylegającą do płyty była warstwa dolna (przylegająca do skóry dziecka), natomiast w przypadku układów trójwarstwowych była to tkanina warstwy C (podszewki). Za pomocą kamery termowizyjnej (model FLIR SC5000, USA) i dołączonego oprogramowania (Altair - Thermal Image Analysis Software), zmierzyłem temperaturę powierzchni górnej warstwy dzianiny/układu trójwarstwowego. Pomiar temperatury przeprowadziłem dla próbek o powierzchni ok.  $25\text{ cm}^2$ , jednak w celu zredukowania wpływu warunków brzegowych zastosowałem rzeczywistą powierzchnię próbki (około  $50\text{ cm}^2$ ). Pomiary przeprowadziłem po osiągnięciu stanu ustalonego (około 10 minut). Schemat eksperymentu przedstawiłem na Rysunku 10.

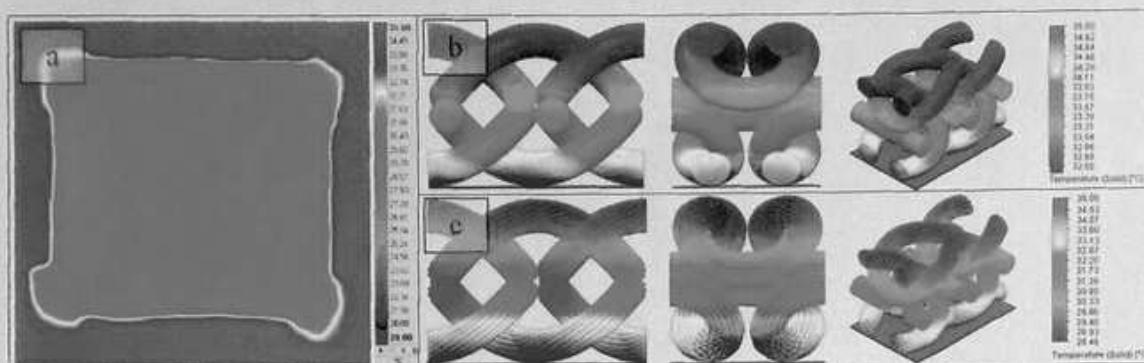


Rys. 10: Schemat pomiaru temperatury górnej powierzchni próbki za pomocą kamery termowizyjnej [2]

## 4.2.5 Komentarz wyników

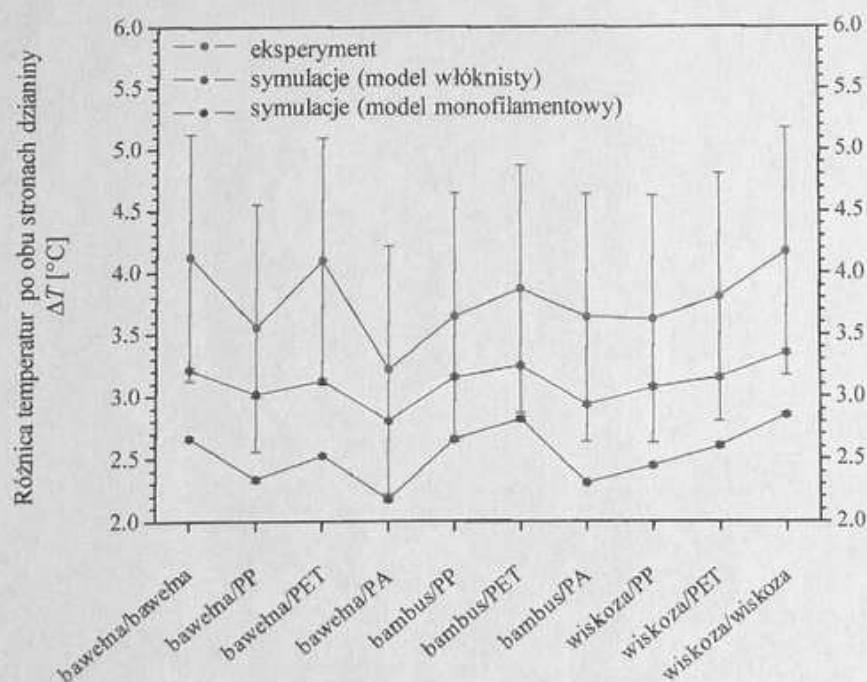
### Dzianiny dwuwarstwowe

Na podstawie przeprowadzonych symulacji otrzymałem rozkłady temperatur w obu warstwach modeli dzianin (Rysunek 11b, 11c), natomiast na podstawie pomiarów z zastosowaniem kamery termowizyjnej uzyskałem rozkłady temperatury górnej warstwy dzianin (Rysunek 11a).



**Rys. 11:** Przykładowy rozkład temperatury na górnej powierzchni dzianiny dwuwarstwowej uzyskany za pomocą pomiaru kamerą termowizyjną (a) i przykładowy rozkład temperatury na powierzchni modelu dzianiny dwuwarstwowej uzyskany w wyniku przeprowadzonych symulacji transportu ciepła dla modelu monofilamentowego (b) i dla modelu włóknistego (c); (w modelu włóknistym średnica włókien została zwiększona, a liczba włókien zmniejszona w celu lepszego uwidocznienia różnicy pomiędzy modelami [2])

Na podstawie wyników symulacji i eksperymentu dla wszystkich dzianin obliczyłem różnicę pomiędzy temperaturami obu warstw dzianiny  $\Delta T$ . Zarówno wyniki symulacji jak i eksperymentu (przedstawione na Rysunku 12 i w Tabeli 5) wykazały korelację pomiędzy izolacyjnością cieplną dzianin, a surowcami, z których zostały wykonane.



**Rys 12:** Różnica pomiędzy temperaturami obu warstw dzianiny wyznaczona podstawie eksperymentu i symulacji [2].

**Tabela 5:** Różnica pomiędzy temperaturami obu warstw dzianiny  $\Delta T$  wyznaczona podstawie eksperymentu i symulacji [2].

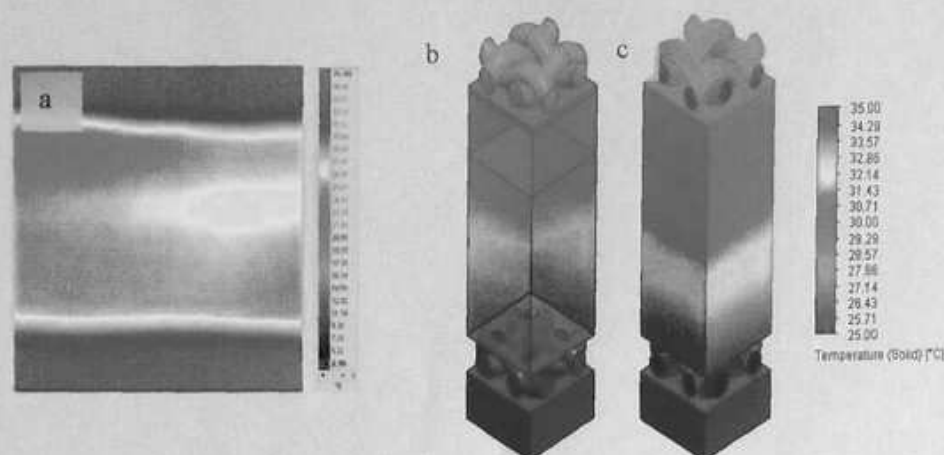
nr	dzianina	eksperyment	model monofilamentowy	model włóknisty
		$\Delta T$ [°C]	$\Delta T$ [°C]	$\Delta T$ [°C]
1	bawełna bawełna	4.12±1	2.66±0.02	3.21±0.02
2	bawełna PP	3.55±1	2.33±0.02	3.01±0.02
3	bawełna PET	4.09±1	2.52±0.01	3.12±0.02
4	bawełna PA	3.21±1	2.17±0.01	2.80±0.01
5	bambus PP	3.64±1	2.65±0.02	3.15±0.02
6	bambus PET	3.86±1	2.81±0.02	3.24±0.02
7	bambus PA	3.63±1	2.30±0.01	2.93±0.02
8	wiskoza PP	3.62±1	2.44±0.02	3.07±0.02
9	wiskoza PET	3.80±1	2.60±0.01	3.15±0.02
10	wiskoza wiskoza	4.17±1	2.85±0.01	3.35±0.02

Największą wartość  $\Delta T$  zaobserwowałem dla trzech dzianin dwuwarstwowych: wiskoza/wiskoza, bawełna/bawełna i bawełna/PET, natomiast najmniejszą dla dzianin: bawełna/PA i bambus/PA. Mniejsza termoizolacyjność ostatnich dwóch dzianin była prawdopodobnie konsekwencją obecności poliamidu, który charakteryzuje się znacznie większym współczynnikiem przewodnictwa cieplnego. Wyniki symulacji wykazały podobny związek między właściwościami termoizolacyjnymi dzianin, a ich składem surowcowym. W modelu monofilamentowym dla wszystkich materiałów otrzymałem niższe wartości  $\Delta T$  (o około 2°C) w porównaniu z wynikami eksperymentu. Różnica ta była prawdopodobnie konsekwencją uproszczenia konstrukcji przędzy w modelu monofilamentowym, w którym przędza jest ciągłym jednoelementowym obiektem, nie uwzględniającym przestrzeni między włóknami wypełnionymi powietrzem, będącym większym izolatorem cieplnym niż surowce włókiennicze. Zastosowanie modelu włóknistego zaowocowało większą zgodnością z wynikami doświadczalnymi, a różnice mieściły się w zakresie błędu pomiaru kamery termowizyjnej (tj. mniej niż 1 °C).

### *Układy trójwarstwowe*

Na podstawie przeprowadzonych symulacji otrzymałem rozkłady temperatur we wszystkich warstwach modeli układów trójwarstwowych (Rysunek 13b, 13c), natomiast na podstawie pomiarów z zastosowaniem kamery termowizyjnej uzyskałem rozkłady temperatury górnej warstwy układów (Rysunek 13a).





**Rys. 13:** Przykładowy rozkład temperatury na górnej powierzchni układu trójwarstwowego uzyskany w wyniku pomiaru kamerą termowizyjną (a) i przykładowy rozkład temperatury na powierzchni modelu układu trójwarstwowego uzyskany w wyniku przeprowadzonych symulacji transportu ciepła dla modelu monofilamentowego (b) i dla modelu włóknistego (c); (w modelu włóknistym średnica włókien w celu lepszego uwidocznienia różnicy pomiędzy modelami [3]).

Na podstawie wyników symulacji i eksperymentu dla wszystkich układów trójwarstwowych obliczyłem różnicę pomiędzy temperaturami warstwy A i warstwy C układu, oznaczoną jako  $\Delta T$ . Wyniki przedstawiłem w Tabeli 6.

**Tabela 6:** Różnica pomiędzy temperaturami obu stron układu trójwarstwowego  $\Delta T$  wyznaczona podstawie eksperymentu i symulacji [3].

Układ trójwarstwowy	Eksperyment	Model monofilamentowy	Model włóknisty
	$\Delta T$ [°C]	$\Delta T$ [°C]	$\Delta T$ [°C]
UTP 6	8.73±1	7.48±0.02	8.01±0.02
UTP 7	8.70±1	7.76±0.02	7.98±0.02
UTP 9	9.82±1	8.52±0.01	8.97±0.02

Wyniki symulacji, podobnie jak wyniki eksperymentalne wykazały zależność między wartością  $\Delta T$ , a składem surowcowym i geometrią układów trójwarstwowych. Dla modelu monofilamentowego w przypadku wszystkich układów trójwarstwowych uzyskałem niższe wartości temperatury warstwy A niż w eksperymencie (średnia różnica  $\Delta T$ : 1,16 °C). Stosując model włóknisty uzyskałem lepszą zgodność temperatury warstwy A z wynikami eksperymentalnymi (średnia różnica  $\Delta T$ : 0,76 °C). Różnice  $\Delta T$  dla wszystkich układów trójwarstwowych uzyskane w wyniku zastosowania modelu włóknistego mieściły się w zakresie błędu pomiaru kamery termowizyjnej (tj. mniej niż 1 °C).

## 4.2.6 Symulacje transportu masy

### Podstawy Fizyczne

Obliczeniowa dynamika płynów jaką wykorzystuje wybrane do badań oprogramowanie umożliwia przewidywanie przepływów zarówno laminarnych jak i turbulentnych. Przepływy laminarne są obecne przy niskich wartościach liczby Reynoldsa. W przypadku, gdy liczba Reynoldsa przekracza pewną wartość krytyczną, przepływ staje się turbulentny, tj. parametry przepływu zaczynają przyjmować wartości losowe [9]. Równanie ciągłości (7), równanie zachowania pędu (8) i równanie zachowania energii (9) dla gazu ściśliwego można wyrazić jako [9]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_i v_j + p \delta_{ij} - \tau_{ij}) = 0, \quad (8)$$

gdzie  $i, j$  są składowymi przestrzennymi i przyjmują wartości: 1, 2, 3.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( e + \frac{1}{2} v_i v_i \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho v_j \left( h + \frac{1}{2} v_i v_i \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} v_j \tau_{ij} + \frac{\partial q_j}{\partial x_j} = 0, \quad (9)$$

gdzie  $\rho$  jest gęstością gazu,  $t$  – czasem,  $x$  – położeniem gazu w przestrzeni,  $e$  jest właściwą energią wewnętrzną,  $v$  prędkością gazu,

$$h = e + \frac{P}{\rho} \quad (10)$$

jest entalpią właściwą,  $\tau_{ij}$  jest tensorem naprężeń,  $q_j$  jest wektorem strumienia ciepła, and  $p$  jest ciśnieniem gazu. Dla gazów ściśliwych,  $\tau_{ij}$  jest zdefiniowany jako:

$$\tau_{ij} = 2\mu \left( s_{ij} - \frac{1}{3} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right), \quad (11)$$

gdzie tensor naprężeń  $s_{ij}$  ma postać:

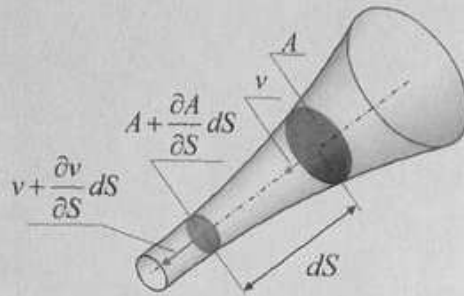
$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right). \quad (12)$$

Strumień przewodnictwa cieplnego  $q_j$  jest określony przez prawo Fouriera:

$$q_j = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j}, \quad (13)$$

gdzie  $\lambda$  jest współczynnikiem przewodnictwa cieplnego,  $T$  – temperaturą. Dla większości zastosowań technicznych nie jest możliwe rozwiązanie równań chwilowych (7–9) w sposób bezpośredni.

W przypadku moich badań dotyczących przewiedności tekstyliów przeprowadziłem symulacje dla jednowymiarowego przepływu powietrza, w którym prędkość zależy przede wszystkim od jednego wymiaru (prostopadłego do warstw dzianin czy układów trójwarstwowych). W tym celu rozważmy objętość płynu wchodzącego i wychodzącego z objętości ograniczonej przekrojami  $A$  and  $A + \frac{\partial A}{\partial S} dS$  w czasie  $dt$  (Rysunek 14) [10].



Rys 14: Schemat przepływu płynu wewnątrz kanału o zmiennym przekroju (zgodnie z [10])

Wielkość  $dS$  jest odległością od przekroju  $A$  do przekroju  $A + \frac{\partial A}{\partial S} dS$ . Masa płynu przepływającego przez przekrój  $A$  przy prędkości  $v$  w czasie  $dt$  wynosi  $\rho v A dt$  podczas gdy w tym samym czasie przez przekrój  $A + \frac{\partial A}{\partial S} dS$  wypływa masa płynu

$\left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial S} dS\right) \left(A + \frac{\partial A}{\partial S} dS\right) \left(v + \frac{\partial v}{\partial S} dS\right) dt$  z prędkością  $v + \frac{\partial v}{\partial S} dS$ . Różnica masy płynu wchodzącego i wychodzącego z elementu jest równa przyrostowi masy w czasie  $dt$ :

$$\rho A v dt - \left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial S} dS\right) \left(A + \frac{\partial A}{\partial S} dS\right) \left(v + \frac{\partial v}{\partial S} dS\right) dt = \frac{\partial \rho}{\partial t} dt A dS. \quad (14)$$

Przekształcając równanie 14 otrzymujemy równanie:

$$A \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho A v)}{\partial S} = 0. \quad (15)$$

Dla płynu nieściśliwego ( $\rho = \text{const}$ ), równanie 15 przyjmuje postać:

$$\frac{\partial(Av)}{\partial S} = 0 \quad (16)$$

Równanie (15) można również zapisać jako:

$$A \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial S} + \rho v \frac{\partial A}{\partial S} = 0 \quad (17)$$

W przypadku przepływu ustalonego równania: 15 i 16 są przekształcane w następujące:

$$\rho A v = \text{const} \quad (\text{dla gazu ściśliwego}) \quad (18)$$

i

$$A v = \text{const} \quad (\text{dla gazu nieściśliwego}). \quad (19)$$

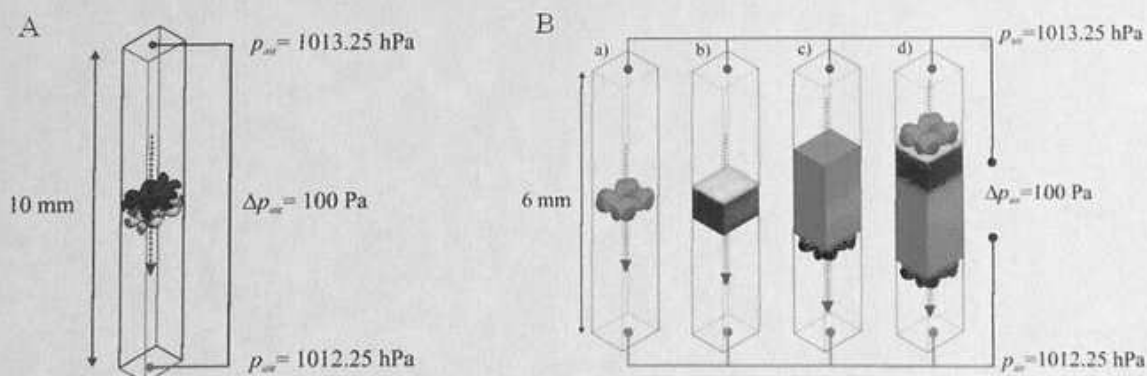
W niektórych przypadkach gazy mogą być również uważane za nieściśliwe płyny, mianowicie gdy gaz przepływa z małą i umiarkowaną prędkością w stosunku do prędkości dźwięku ( $340,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). W tym przypadku zmiany ciśnienia są niewielkie w stosunku do wartości średniej, podczas gdy zmiana objętości i zmiana gęstości są tak małe, że zwykle są pomijane. Przy liczbach Reynoldsa występujących w rzeczywistych przypadkach, te równania mają bardzo chaotyczne rozwiązania turbulентne i konieczne jest modelowanie wpływu najmniejszych skal. Większość modeli turbulencji opiera się na jednopunktowym uśrednieniu równań chwilowych. Aby przewidzieć przepływy turbulентne, oprogramowanie wykorzystuje uśrednione przez Favre równania Naviera-Stokesa, w których uwzględnia się wpływ uśrednionych czasowo skutków turbulencji przepływu na parametry przepływu, podczas gdy inne, tj. zjawiska zależne od czasu, na dużą skalę, są brane pod uwagę bezpośrednio. Na podstawie tej procedury w równaniach pojawiają się dodatkowe terminy znane jako



napężenia Reynoldsa i należy podać dodatkowe informacje. Aby zamknąć ten układ równań, oprogramowanie wykorzystuje równania transportu dla turbulენტnej energii kinetycznej i szybkości jej dyssypacji z tak zwanego modelu k-ε [9].

### Warunki początkowe symulacji transportu masy

Symulacje transportu powietrza w modelach dzianin dwuwarstwowych i układów trójwarstwowych przeprowadziłem korzystając z modułu *SolidWorks Flow Simulation* stosując metodę objętości skończonych. Ponieważ przepuszczalność powietrza tekstyliów zależy przede wszystkim od ich geometrii (a nie od surowców z których zostały wykonane) do symulacji zastosowałem modele geometryczne bez przypisywania im właściwości fizycznych, tak jak to miało miejsce w przypadku symulacji transportu ciepła. Korzystając z periodycznej budowy dzianin i tkanin objętość każdego modelu dzianiny/układu trójwarstwowego ograniczyłem do tzw. raportu, czyli najmniejszego powtarzalnego elementu danego materiału. Zredukowany w ten sposób model umieściłem w połowie wysokości kanału o prostokątnym przekroju poprzecznym. Ścianki boczne kanału były styczne do modelu, a ich wymiary były dopasowane do badanego modelu. W celu wyeliminowania negatywnego wpływu warunków brzegowych na wynik obliczeń, zastosowałem tzw. periodyczne warunki brzegowe, które badany raport traktowały jako nieskończenie powtarzalny element materiału propagujący się poza domenę we wszystkich czterech kierunkach poziomych. Przyjąłem następujące warunki początkowe symulacji (Rysunek 15): wartości ciśnienia powietrza  $p_{air}$  po obu stronach kanału były identyczne jak w eksperymencie (1013,25 hPa i 1012,25 hPa). Uzyskana w ten sposób różnica ciśnień  $\Delta p_{air}$  (100 Pa) wymuszała przepływ powietrza wzdłuż kanału, poprzez badany model dzianiny/układu trójwarstwowego. W celu zbadania wpływu przepuszczalności powietrza każdej warstwy układu trójwarstwowego symulacje przeprowadziłem dla każdego modelu warstwy osobno (A, B, C) oraz dla całego układu (A + B + C). Wszystkie symulacje przeprowadziłem w stanie ustalonym (przepływ powietrza był niezależny od czasu) czyli w warunkach eksperymentu w jakim wyznacza się przepuszczalność powietrza rzeczywistych tekstyliów.

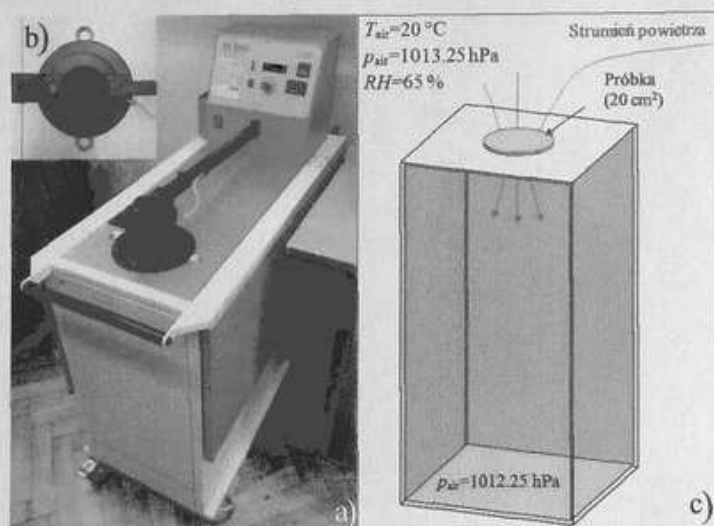


Rys 15: Warunki początkowe symulacji transportu powietrza dla dzianin dwuwarstwowych (A) i dla układów trójwarstwowych (B); linia przerywana wskazuje kierunek przepływu powietrza [4,7]

Głównym celem przeprowadzonych symulacji było obliczenie średniej prędkości powietrza przepływającego przez model tekstylny w celu porównania go z wartością zmierzoną w eksperymencie.

#### 4.2.7. Eksperyment

Badania przepuszczalności powietrza rzeczywistych tekstyliów wykonałem zgodnie z [11] w warunkach klimatu normalnego: wilgotność względna powietrza  $RH = 65\%$ , temperatura powietrza  $T_{air} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ciśnienie powietrza  $p_{air} = 1013,25\text{ hPa}$ . Badania przeprowadziłem zgodnie z [12] za pomocą testera przepuszczalności powietrza (model FX 3300 firmy Textest Instruments, Szwajcaria), przedstawionym na Rysunku 16. Podczas pomiaru przepuszczalności powietrza, próbkę o polu powierzchni  $20\text{ cm}^2$  umieściłem płasko i nieruchomo nad otworem zbiornika wypełnionego powietrzem o ciśnieniu niższym o  $100\text{ Pa}$  od ciśnienia normalnego. W wyniku stałej różnicy ciśnień (utrzymywanej przez urządzenie pomiarowe w czasie trwania całego pomiaru) przez próbkę przepływa powietrze głównie w kierunku prostopadłym do jego powierzchni. Urządzenie mierzy prędkość powietrza przepływającego przez próbkę. Przepuszczalność powietrza dla każdej próbki wyznaczyłem jako średnią z 10 niezależnych pomiarów. W przypadku dzianin dwuwarstwowych pomiary wykonałem dla obu stron próbki. W przypadku układów warstwowych, w celu zbadania wpływu każdej z trzech warstw na całkowitą przepuszczalność powietrza układu, pomiary wykonałem dla każdej warstwy osobno (A, B, C) i dla całego układu (A + B + C).

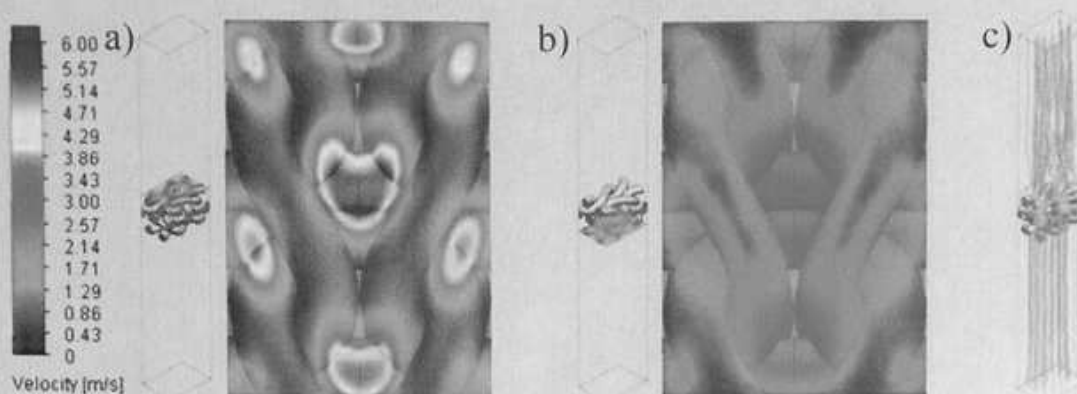


Rys. 16: a) Tester przepuszczalności powietrza (model FX 3300), b) stanowisko na próbkę o powierzchni  $20\text{ cm}^2$  (widok z góry), c) warunki klimatyczne w czasie pomiaru przepuszczalności powietrza tekstyliów [4]

#### 4.2.8. Komentarz wyników

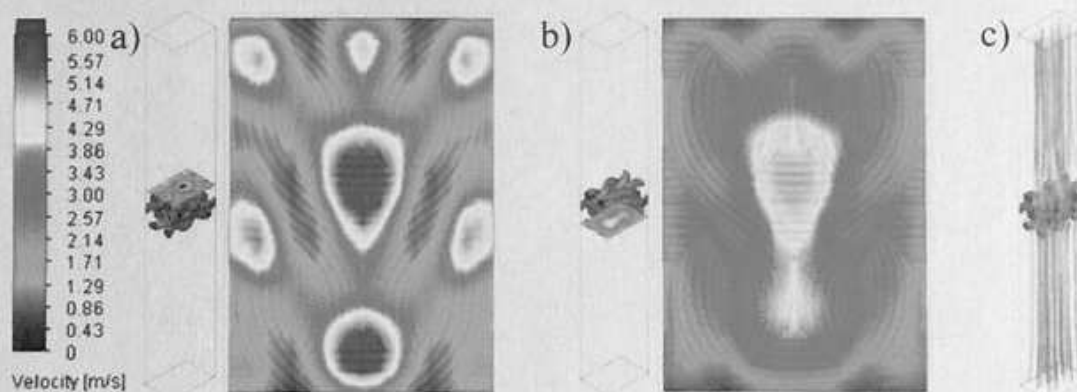
##### *Dzianiny dwuwarstwowe*

Dla każdej dzianiny wyznaczyłem rozkład prędkości powietrza na płaszczyźnie poziomej, znajdującej się bezpośrednio pod modelem dzianiny, tak jak przedstawiłem na Rysunku 17b (model monofilamentowy) i na Rysunku 18b (model włóknisty). Na obu rozkładach, zgodnie z oczekiwaniami, obszary o największej prędkości powietrza zaobserwowałem wewnątrz oczka, gdzie powietrze może swobodnie przepływać.



**Rys. 17:** Rozkłady prędkości powietrza na dwóch poziomych płaszczyznach: umieszczone bezpośrednio powyżej (a) i bezpośrednio poniżej (b) dla modelu monofilamentowego; (c) wizualizacja kształtu linii przepływu powietrza. Skala kolorów prędkości powietrza jest wspólna wszystkich rozkładów (a–c) [4].

Dla porównania wyznaczyłem rozkłady prędkości powietrza na płaszczyźnie poziomej umieszczonej bezpośrednio nad modelem tak, jak przedstawiłem na Rysunku 17a (model monofilamentowy) i na Rysunku 18a (model włóknisty). W rozkładach tych obszary o porównywalnych wartościach prędkości powietrza mają bardzo zbliżony kształt. Jednak na płaszczyźnie górnej (Rysunki: 17a i 18a) prędkość powietrza jest znacznie wyższa niż na płaszczyźnie dolnej (Rysunki: 17b i 18b), ponieważ bezpośrednio nad modelem dzianiny strumień powietrza nie wytracił jeszcze prędkości w wyniku zderzenia z dzianiną.

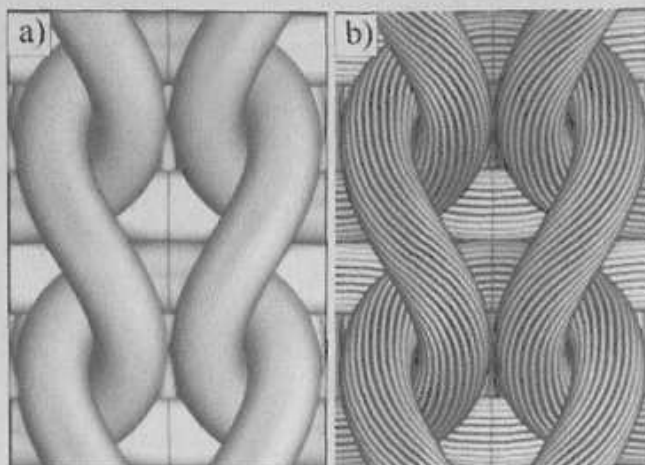


**Rys. 18:** Rozkłady prędkości powietrza na dwóch poziomych płaszczyznach: umieszczone bezpośrednio powyżej (a) i bezpośrednio poniżej (b) modelu włóknistego; (c) wizualizacja kształtu linii przepływu powietrza. Skala kolorów prędkości powietrza jest wspólna dla wszystkich rozkładów (a–c) [4].

Porównując rozkłady prędkości powietrza na poszczególnych płaszczyznach, zaobserwowałem wyższe wartości prędkości powietrza dla modelu włóknistego, co najprawdopodobniej jest wynikiem obecności wolnych przestrzeni pomiędzy poszczególnymi włóknami, tworzącymi dodatkową ścieżkę dla przepływu powietrza.

Najważniejszym analizowanym w symulacjach parametrem wpływającym na przepuszczalność powietrza była porowatość optyczna, określana jako obszar nie zajmowany przez materiał (tylko powietrze) w rzucie dzianiny w kierunku prostopadłym do warstwy (Rysunek 19). Porowatość optyczną oszacowałem na podstawie cyfrowej analizy obrazu za pomocą programowania *ImageJ*.

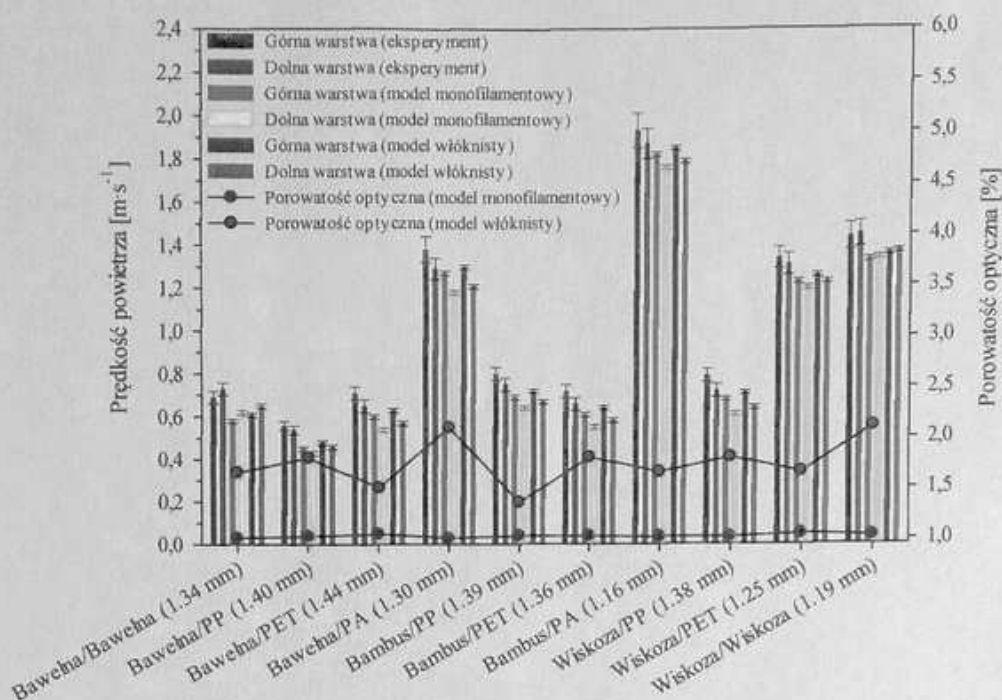




**Rys.19:** Wizualizacja porowatości optycznej dla (a) modelu monofilamentowego (obszar żółty) i (b) modelu włóknistego (obszar pomarańczowy); w modelu włóknistym średnica włókien została celowo zwiększona w stosunku do rzeczywistych rozmiarów aby lepiej uwidocznic różnicę między modelami [4]

Ze względu na konstrukcję dzianiny dwuwarstwowej (w której oczka nie są umieszczone bezpośrednio nad sobą, ale przesunięte o połowę szerokości, jak widać na Rysunku 14), wszystkie analizowane dzianiny charakteryzowały się bardzo niską porowatością optyczną. Różnica porowatości optycznej między obydwoma modelami dla danej dzianiny była niewielka, ale zauważalna (wahała się od 1,01% do 1,05% dla modelu monofilamentowego i od 1,36% do 2,11% dla modelu włóknistego). Różnice te wynikały z faktu, że w modelu monofilamentowym przędza jest odwzorowywana jako długi kręty walec z ciągłą powierzchnią wzdłuż całej długości oczka dzianiny. W modelu włóknistym przędza została uformowana z pojedynczych włókien otoczonych powietrzem. Rozważmy przekrój kołowy przędzy w modelu włóknistym. Włókna umieszczone na obwodzie przekroju przędzy określają jej średnicę. Ale między nimi jest także wolna przestrzeń. Ta przestrzeń wpływa na wyższą porowatość optyczną w porównaniu do modelu monofilamentowego, w którym nie ma wolnych obszarów na obwodzie przekroju przędzy. Niska wartość porowatości optycznej dla wszystkich dzianin pokazuje, że prawie cały strumień powietrza przenika przez materiał tekstylny za pomocą zakrzywionych ścieżek biegnących pomiędzy dwiema warstwami dzianiny.

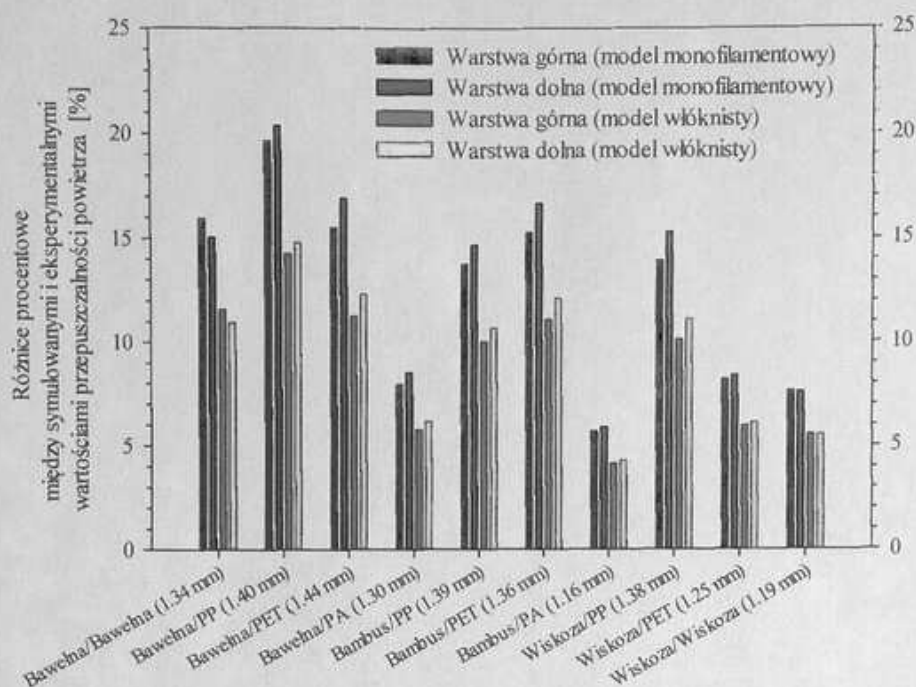
Na Rysunku 20 przedstawiłem wyniki eksperymentalne i symulacyjne prędkości powietrza dla dzianin (wykres słupkowy) oraz wyniki porowatości optycznej wyznaczone dla modelu monofilamentowego i modelu włóknistego (wykres punktowy).



**Rys.20:** Wykres słupkowy – wyniki eksperymentalne i symulacyjne prędkości powietrza dla dzianin; wykres punktowy – wyniki porowatości optycznej wyznaczone dla modelu monofilamentowego i modelu włóknistego [4].

Symulacje wykonane dla obu modeli w przypadku każdej dzianiny dały porównywalne wyniki z wynikami eksperymentu. Jednak dla modelu włóknistego uzyskałem wyniki o większej zgodności z pomiarami wykonanymi przy użyciu testera przepuszczalności powietrza. Ta powtarzająca się różnica w przypadku każdej analizowanej dzianiny jest prawdopodobnie spowodowana różnicą w dokładności odwzorowywania przędzy w obu modelach. Wolne wąskie przestrzenie między włóknami w modelu włóknistym tworzą dodatkowe kanały dla przepływu powietrza przez przędę. Fakt, że symulowana prędkość powietrza była niższa niż wartości doświadczalne dla wszystkich dzianin zarówno w modelu monofilamentowym, jak i modelu włóknistym, wynika prawdopodobnie z uproszczenia kształtu przędzy w przekroju poprzecznym. W obu modelach przyjąłem okrągły przekrój na całej długości oczka. W rzeczywistych dzianinach, w wyniku sił tarcia pomiędzy sąsiednimi oczkami, przędza jest spłaszczona, a jej przekrój jest podobny bardziej do kształtu elipsy niż okręgu. To odkształcenie przekroju rzeczywistej przędzy może prowadzić do zmniejszenia powierzchni przędzy położonej w kierunku prostopadłym do strumienia powietrza, a jednocześnie do zwiększenia obszaru powierzchni przędzy położonej równoległe do strumienia powietrza. To odkształcenie może zwiększyć porowatość optyczną rzeczywistych dzianin, a tym samym zwiększyć prędkość powietrza. W przypadku modelu monofilamentowego, różnice mieściły się w przedziale 5,7% (Bambus/PA) – 20,3% (Bawełna/PP), podczas gdy dla modelu włóknistego różnice te przyjęły wartości w zakresie 4,1% (Bambus/PA) do 14,8 % (Bawełna/PP) (Rysunek 21). Zaobserwowałem również korelację wyników symulacji (dla obu modeli) i wyników eksperymentalnych w przypadku różnic prędkości powietrza mierzonych po obu stronach dzianiny (górną i dolną warstwę). Różnice te prawdopodobnie mają swoje źródło w różnych parametrach geometrycznych dla obu warstw w dzianinie, które zostały uwzględnione w obu modelach (dla modelu monofilamentowego były to: grubość warstwy, średnica przędzy, długość przędzy

w pojedynczym oczku, a dla modelu włóknistego: grubość warstwy, średnica przędzy, długość przędzy w pojedynczym oczku, liczba włókien w przekroju poprzecznym przędzy i średnica włókien).



Rys.21: Różnice procentowe między wynikami symulacji i eksperymentu dla prędkości powietrza [4]

Co więcej, na Rysunku 20 wyraźnie widać, że w przypadku modelu włóknistego wartości porowatości optycznej są bardziej zróżnicowane względem siebie niż w przypadku modelu monofilamentowego, co może wskazywać, że oprócz odwzorowania indywidualnych włókien, ich liczba, rozmiar i skręt również pełnią istotną rolę w ocenie tego parametru.

Jedną z przyczyn dużych różnic między wynikami symulacji, a eksperymentu zaobserwowanych dla przepuszczalności powietrza trzech dzianin zawierających bawełnę może być fakt, że założenie okrągłego przekroju poprzecznego dla włókna bawełny było zbyt duże w porównaniu z dzianinami zawierającymi wyłącznie włókna chemiczne. Z drugiej strony różnice w wynikach mogą być również związane z pomiarami rzeczywistej prędkości powietrza w eksperymencie. Skomplikowana struktura geometryczna prawdziwej dzianiny nie jest idealnie periodyczna. W wyniku wzajemnych naprężeń przędza może być niejednorodna, a na powierzchni dzianiny przez którą przepływa powietrze mogą pojawiać się miejsca o różnej porowatości. Trzeba też zdawać sobie sprawę, że wzajemna odległość między dwiema warstwami dzianin nie jest stała w całym badanym obszarze (20 cm<sup>2</sup>).

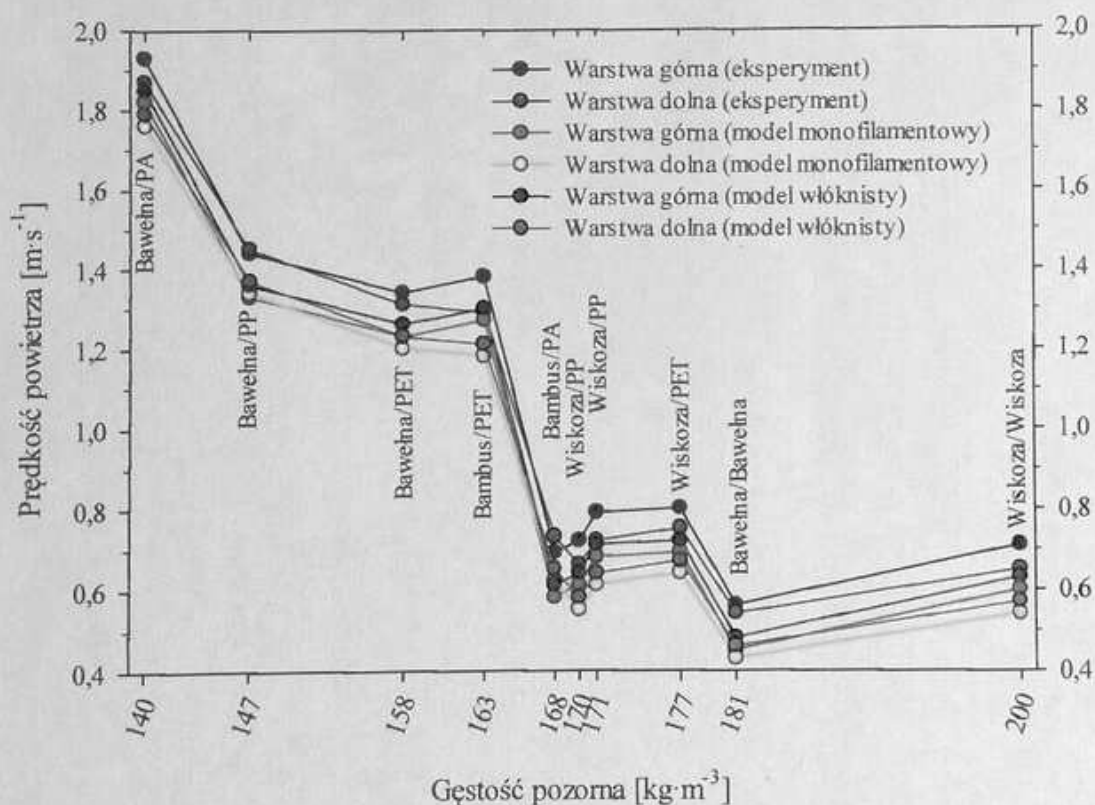
W oparciu o fakt, że częściowe wyniki eksperymentu zostały opisane za pomocą rozkładu Gaussa, dla obu modeli (monofilamentowego i włóknistego) przeprowadziłem test t-próbki z uwzględnieniem hipotezy zerowej i alternatywnej jako:

$$\begin{aligned}
 H_0 : \bar{v}_{exp} &= v_{sym} \\
 H_1 : \bar{v}_{exp} &\neq v_{sym}
 \end{aligned}
 \tag{19}$$



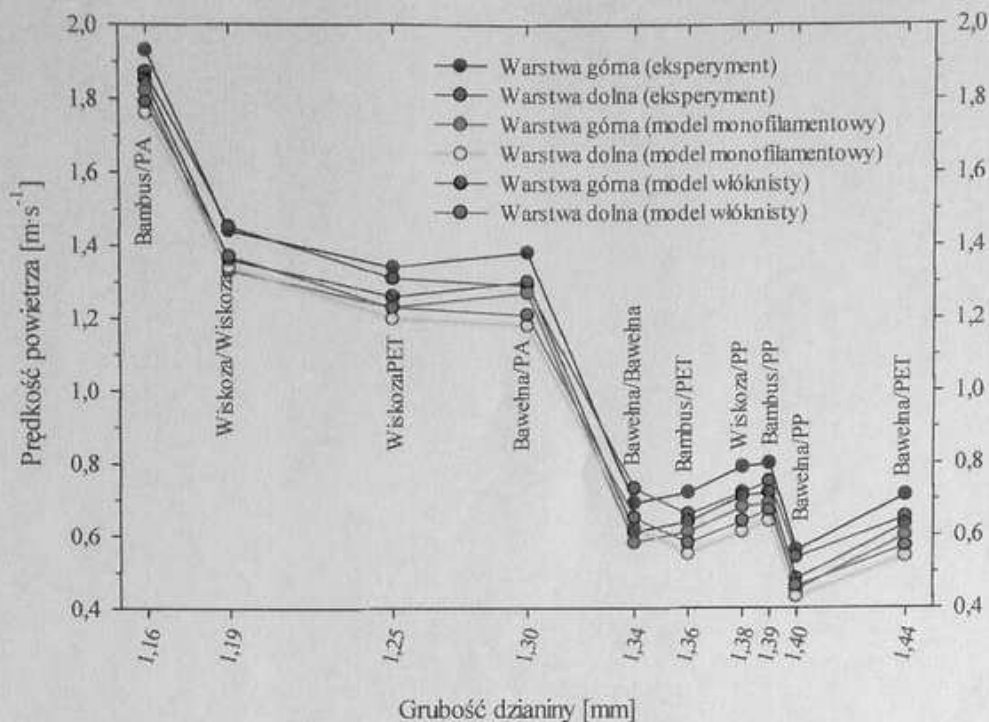
gdzie  $\bar{v}_{exp}$  jest średnią eksperymentalną prędkością powietrza danej dzianiny, natomiast  $\bar{v}_{sym}$  jest symulowaną prędkością powietrza danej dzianiny. W przypadku wszystkich dzianin, zarówno w przypadku modelu monofilamentowego, jak i włóknistego, wynik testu wskazuje, że na poziomie istotności  $\alpha=0,05$  hipoteza zerowa powinna zostać odrzucona (wartość prawdopodobieństwa,  $p$  mieści się w zakresie 0,041–0,001 w przypadku modelu monofilamentowego oraz w zakresie 0,047–0,003 dla modelu włóknistego) i należy zatwierdzić alternatywną hipotezę. Oznacza to, że różnice między wartościami doświadczalnymi i symulowanymi dla prędkości powietrza w przypadku niektórych badanych dzianin były większe niż różnice statystyczne. Może to być spowodowane artefaktami pojawiającymi się w strukturze dzianin. Oba zaproponowane modele zakładały idealnie periodyczną budowę dzianin (każde oczko było tego samego rozmiaru i kształtu). W rzeczywistości taka dzianina nie istnieje. W przypadku wszystkich dzianin średnia prędkość powietrza obliczona dla modelu włóknistego była nieco wyższa w porównaniu z modelem monofilamentowym.

Kolejnym celem mojej pracy było zbadanie wpływu gęstości pozornej dzianiny na prędkość powietrza wyznaczoną eksperymentalnie i symulacyjnie. Jak widać na Rysunku 22, zależność ta jest funkcją malejącą. Oznacza to, że najwyższe wartości prędkości powietrza uzyskano dla dzianin o najniższej gęstości pozornej (Bawełna/PA, Bawełna/PP i Bawełna/PET), a najmniejsze dla dzianin o najwyższej gęstości pozornej (Bawełna/PA i Wiskoza/Wiskoza).



Rys.22: Wpływ gęstości pozornej dzianiny na prędkość powietrza (określaną doświadczalnie i na podstawie symulacji) [4]

Rysunek 23 ilustruje wpływ grubości dzianiny na prędkość powietrza wyznaczoną doświadczalnie i za pomocą symulacji. W przypadku większości dzianin średnia prędkość powietrza maleje wraz z grubością materiału włókienniczego, ale nie jest to prosta liniowa zależność.



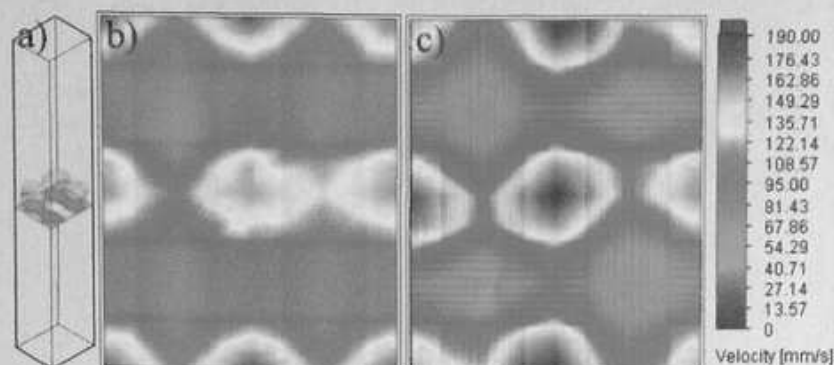
Rys.23: Wpływ grubości dzianiny na prędkość powietrza (wyznaczoną doświadczalnie i symulacyjnie) [4]

Wyjątkiem są trzy dzianiny (Wiskoza/PP, Bambus/PP i Bawełna/PET), dla których prędkość powietrza nieznacznie wzrasta. Przyczyną tego mogą być różnice w innych parametrach geometrycznych, np. wzajemna odległość dwóch warstw i/lub porowatość optyczna. Najbardziej przepuszczalnym dla powietrza materiałem była najcieńsza (grubość: 1,16 mm) dzianina Bambus/PA, mająca porowatość optyczną równą 1,02% według modelu monofilamentowego i 1,66% według modelu włóknistego, podczas gdy najmniej przepuszczalnym materiałem była dzianina: Bawełna/PP (grubość: 1,40 mm), o porowatości optycznej równą 1,03% (model monofilamentowy) i 1,81% (model włóknisty).

Eksperymentalne wartości prędkości powietrza wynosiły od  $0,56 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  do  $1,93 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (górna warstwa) i od  $0,54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  do  $1,89 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (dolna warstwa). W przypadku modelu monofilamentowego uzyskałem wartości od  $0,45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  do  $1,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (górna warstwa) i od  $0,43 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  do  $1,86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (dolna warstwa), natomiast dla modelu włóknistego, otrzymane wartości wahały się od  $0,48 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  do  $1,85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (górna warstwa) i od  $0,57 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  do  $1,79 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (dolna warstwa). Zarówno wyniki eksperymentalne, jak i symulacyjne wykazały, że prawie wszystkie dzianiny charakteryzowały się zbliżonymi wartościami prędkości powietrza zmierzonej dla obu stron.

### Układy trójwarstwowe

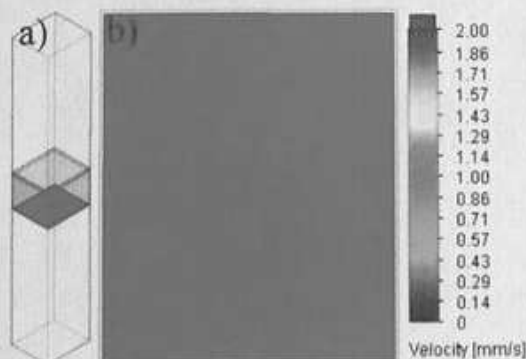
Na Rysunku 24 przedstawiłem rozkłady prędkości powietrza na płaszczyźnie poziomej umieszczonej bezpośrednio pod warstwą A (tkanina zewnętrzna) na przykładzie modelu układu trójwarstwowego UTP 6 (b – model monofilamentowy, c – model włóknisty).



**Rys.24:** Rozkłady prędkości powietrza na płaszczyźnie poziomej umieszczonej bezpośrednio poniżej modelu warstwy A układu trójwarstwowego UTP 6 umieszczonego w połowie wysokości kanału prostokątnego (a); Skala kolorów prędkości powietrza jest wspólna dla wszystkich rozkładów (a-c) [7].

Na rozkładach tych zaobserwowałem, że obszary o porównywalnych wartościach prędkości powietrza posiadały bardzo zbliżony kształt, jednak w przypadku modelu włóknistego rozkład charakteryzował się wyższymi wartościami prędkości powietrza. Na przykład obszar o największej prędkości powietrza znajdujący się w wolnej przestrzeni między przebiegami przędzy w osnowie i wątku (oznaczony kolorem czerwonym) zajął większą powierzchnię (Rysunek 24c). Wyższe wartości prędkości powietrza dla modelu włóknistego tkaniny były prawdopodobnie wynikiem obecności wolnych przestrzeni pomiędzy poszczególnymi włóknami, które tworzą dodatkową ścieżkę dla przepływu powietrza, w których powietrze przyspiesza. Prędkość powietrza osiągnęła najniższe wartości w miejscach nałożenia się przędzy osnowy i wątku (oznaczonych kolorem niebieskim), a więc obszarach o największej gęstości tkaniny.

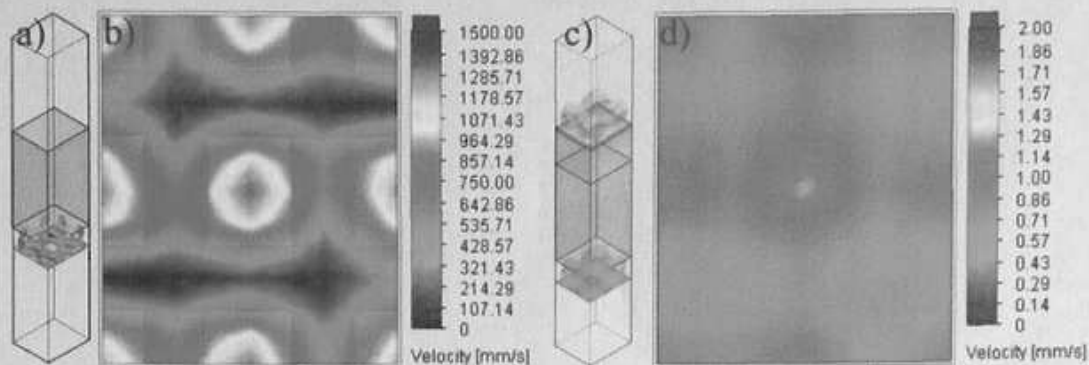
Na Rysunku 25 przedstawiłem rozkład prędkości powietrza na płaszczyźnie poziomej umieszczonej bezpośrednio pod modelem warstwy B (zbudowanej z membrany i włókniny) układu trójwarstwowego UTP 6



**Rys.25:** (b) rozkład prędkości powietrza w płaszczyźnie poziomej umieszczonej bezpośrednio poniżej modelu warstwy B układu UTP 6 umieszczonego w połowie wysokości kanału prostokątnego (a) [7]

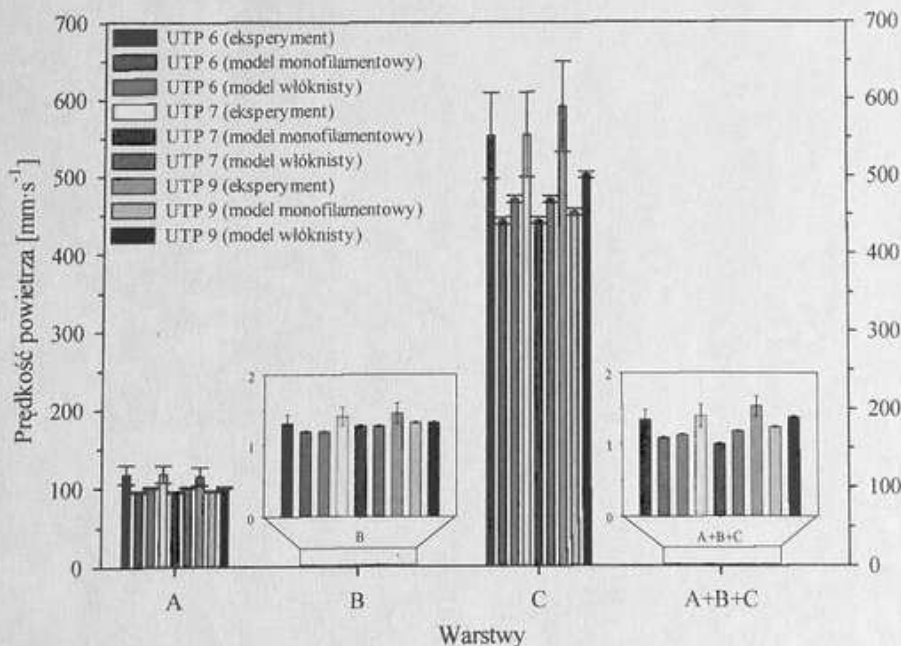


Z uwagi na to, że warstwa B składała się z membrany i włókniny (obie odwzorowane jako materiał o porowatej strukturze izotropowej) uzyskałem jednorodny rozkład prędkości. Na Rysunku 26 przedstawiłem rozkłady prędkości powietrza w płaszczyźnie poziomej umieszczonej bezpośrednio poniżej modelu monofilamentowego warstwy C układu trójwarstwowego UTP 6 i poniżej modelu monofilamentowego całego układu trójwarstwowego UTP 6 (A + B + C).



Rys.26: Porównanie rozkładów prędkości powietrza na płaszczyźnie poziomej umieszczonej bezpośrednio poniżej modelu monofilamentowego warstwy C układu trójwarstwowego UTP 6 (a, b) i modelu monofilamentowego całego układu trójwarstwowego UTP 6 (A+B+C) (c, d); Skala kolorów prędkości powietrza jest wspólna dla wszystkich rozkładów (a-d) [7].

Ponieważ w obu przypadkach bezpośrednio nad płaszczyzną znajduje się model tej samej tkaniny, kształt obu rozkładów był zbliżony. Jednak wartości prędkości powietrza w rozkładach były znacząco różne. W przypadku całego układu trójwarstwowego (A + B + C) można wyraźnie zaobserwować wpływ obecności membrany, która ze względu na małą porowatość znacznie obniżyła przepuszczalność powietrza układu UTP 6. Na Rysunku 27 i w Tabeli 7 przedstawiłem wyniki eksperymentalne i symulacyjne prędkości powietrza dla układów trójwarstwowych.

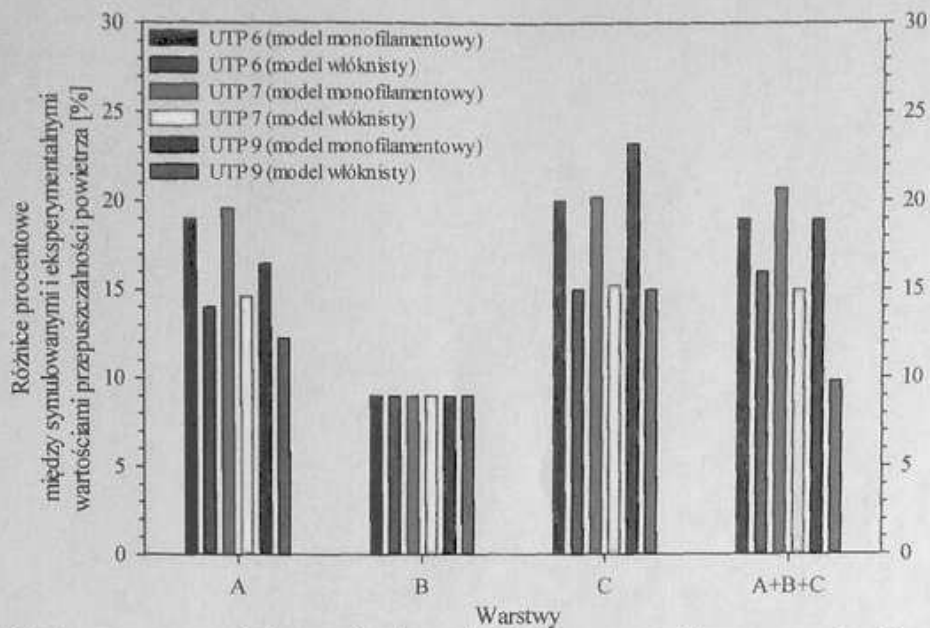


Rys.27: Eksperymentalne i symulacyjne wyniki prędkości powietrza dla układów trójwarstwowych [7]

Tabela 7: Eksperymentalne i symulacyjne wyniki prędkości powietrza dla układów trójwarstwowych [7]

Układ	Warstwa	Eksperyment $v_{\text{air}} [\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}]$	Symulacja		Masa powierzchniowa [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ]	Gęstość pozorną [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
			Model monofilamentowy $v_{\text{air}} [\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}]$	Model włóknisty $v_{\text{air}} [\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}]$		
UTP 6	A	117.67±11.82	95.31±0.95	101.20±0.94	0.210	500
	B	1.31±0.12	1.19±0.01	1.19±0.01	0.155	216
	C	551.71±56.19	441.37±4.41	468.95±4.42	0.291	124
	A+B+C	1.35±0.13	1.10±0.01	1.13±0.01	0.600	172
UTP 7	A	118.52±10.82	95.31±0.95	101.20±0.96	0.210	500
	B	1.41±0.13	1.28±0.01	1.28±0.01	0.099	183
	C	553.25±54.17	441.37±4.41	470.26±4.94	0.291	124
	A+B+C	1.40±0.16	1.11±0.01	1.19±0.01	0.656	199
UTP 9	A	115.33±11.71	96.33±0.83	101.20±0.96	0.220	499
	B	1.45±0.68	1.32±0.03	1.32±0.03	0.245	141
	C	589.5±54.88	452.60±4.33	501.08±4.11	0.281	124
	A+B+C	1.53±0.14	1.24±0.01	1.38±0.01	0.746	168

Symulacje wykonane dla obu modeli dały porównywalne wyniki z wynikami eksperymentu, jednak wyniki uzyskane dla modelu włóknistego były w lepszej zgodności z wynikami uzyskanymi przy użyciu testera przepuszczalności powietrza. Ta powtarzana różnica w przypadku każdego układu trójwarstwowego może wskazywać na istotną różnicę w precyzji odwzorowania przędzy w tkaninach w obu modelach. Wolne, wąskie przestrzenie między włóknami w modelu włóknistym tworzą dodatkowe kanały dla przepływu powietrza przez przędę. Powód dla którego symulowana przepuszczalność powietrza była niższa niż eksperymentalna dla wszystkich tkanin zarówno w modelu monofilamentowym, jak i w modelu włóknistym, był prawdopodobnie wynikiem uproszczenia kształtu przędzy w przekroju poprzecznym. W obu modelach przyjęto okrągły przekrój przędzy we wszystkich raportach tkaniny. W rzeczywistych tkaninach, w wyniku sił tarcia w miejscach, w których krzyżuje się osnowa z wątkiem przędza jest spłaszczona, a jej przekrój jest podobny do kształtu elipsy. To odkształcenie może zwiększyć przepływ powietrza przez tkaninę. Na Rysunku 28 przedstawiłem różnice procentowe między wynikami symulacji, a wynikami eksperymentu dla przepuszczalności powietrza. Można zauważyć, że dla wszystkich warstw wszystkich układów trójwarstwowych (z wyjątkiem warstwy B, która nie zawierała modelu tkaniny), istniała wyraźna różnica między prędkościami powietrza uzyskanymi dla modelu monofilamentowego i dla modelu włóknistego.



Rys.28: Różnice procentowe między wynikami symulacji i eksperymentu dla przepuszczalności powietrza [7]

Dla warstwy A różnice wynosiły od 16,47% (UTP 9) do 19,58% (UTP 7) dla modelu monofilamentowego i od 12,25% (UTP 6) do 14,61% (UTP 7) dla modelu włóknistego. W warstwie B, złożonej z membrany i włókniny (odwzorowanej zarówno w modelu monofilamentowym, jak i modelu włóknistym jako materiał jednorodny o izotropowej porowatości), różnice były prawie identyczne dla wszystkich układów warstwowych i wynosiły od 9,01% (UTP 6) do 9,04% (UTP 9) dla modelu monofilamentowego i modelu włóknistego. Dla warstwy C różnice wynosiły od 20,01% (UTP 6) do 23,22% (UTP 9) dla modelu monofilamentowego, natomiast dla modelu włóknistego: od 15,03% (UTP 6) do 15,24% (UTP 7). Dla całych układów trójwarstwowych (warstwy A+B+C) różnice wynosiły od 18,95% (UTP 9) do 20,71% (UTP 7) dla modelu monofilamentowego i od 9,80% (UTP 9) do 16,01% (UTP 6) dla modelu włóknistego. Różnica w prędkościach powietrza dla poszczególnych warstw w obu modelach była prawdopodobnie wynikiem różnic w parametrach geometrycznych warstw, takich jak porowatość, grubość, natomiast w przypadku modelu włóknistego również: liczba włókien w przekroju poprzecznym przędzy i średnica włókna. Z drugiej strony różnice między wynikami symulacji i eksperymentu mogą być również związane z pomiarami rzeczywistej prędkości powietrza w eksperymencie. Skomplikowana struktura geometryczna rzeczywistych tkanin nie jest idealnie okresowa. W wyniku wzajemnych naprężeń przędza może być niejednorodna, a gęstość tkaniny może nie być jednakowa w każdym raporcie. Należy również założyć, że wzajemna odległość poszczególnych warstw układów trójwarstwowych nie jest stała w całym obszarze badania (20 cm<sup>2</sup>). W oparciu o fakt, że częściowe wyniki eksperymentu zostały opisane rozkładem Gaussa dla obu modeli (monofilamentowym i włóknistym) przeprowadziłem test *t* (o istotności statystycznej  $\alpha = 0,05$ ) opisany równaniem:

$$t = \sqrt{n-1} \frac{\bar{v}_{\text{exp}} - v_{\text{sym}}}{s} \quad (20)$$

gdzie: *n* - liczba stopni swobody (10).  $\bar{v}_{\text{exp}}$  - eksperymentalna średnia prędkość powietrza w danym układzie warstwowym.  $v_{\text{sym}}$  - symulowana prędkość powietrza dla danego układu warstwowego, *s* -



odchylenie standardowe próbki. Dla wszystkich układów trójwarstwowych, zarówno dla modelu monofilamentowego, jak i włóknistego, wynik testu był ujemny. Jednak zarówno wyniki eksperymentu, jak i symulacje wykazały, że najbardziej przepuszczalny był układ UTP 9, a najmniej przepuszczalny układ UTP 6. Z Tabeli 7 i z Rysunku 23 można wnioskować, że na przepuszczalność powietrza układów trójwarstwowych wpłynęła przede wszystkim przepuszczalność warstwy B zawierającej membranę (prędkości powietrza w warstwie B i całym układzie A+B+C były porównywalne). Membrana w układzie UTP 9 charakteryzowała się najwyższą porowatością, co prawdopodobnie doprowadziło do większego przepływu powietrza. Oczywiście przepuszczalność powietrza warstw: A i C również wpływa na przepuszczalność powietrza całego układu A+B+C, ale w znacznie mniejszym stopniu.

#### 4.2.9 Podsumowanie

##### *Modelowanie transportu ciepła i transportu masy w dzianinach dwuwarstwowych*

- 1) Zastosowanie modelu monofilamentowego dla dzianin dwuwarstwowych umożliwiło mi przewidzieć izolacyjność cieplną z błędem na poziomie 27,2%–38,4% w zależności od struktury dzianiny.
- 2) Zastosowanie modelu włóknistego dzianin dwuwarstwowych umożliwiło mi przewidzieć izolacyjność cieplną z błędem na poziomie 12,8%–23,7% w zależności od struktury dzianiny.
- 3) Zastosowanie modelu monofilamentowego dla dzianin dwuwarstwowych umożliwiło mi przewidzieć przepuszczalność powietrza z błędem na poziomie 5,7%–20,3% w zależności od struktury dzianiny.
- 4) Zastosowanie modelu włóknistego dla dzianin dwuwarstwowych umożliwiło mi przewidzieć przepuszczalność powietrza z błędem na poziomie 4,1%–4,8% w zależności od struktury dzianiny.
- 5) Wyraźne powtarzające się różnice między wynikami symulacji przeprowadzonych dla modelu monofilamentowego i modelu włóknistego wskazały, że uwzględnienie włókien i wolnej przestrzeni między nimi jest jednym z decydujących czynników, które określają przydatność modelu do teoretycznych prognoz zarówno izolacyjności cieplnej jak i przepuszczalności powietrza w rzeczywistych dzianinach.
- 6) Próba udowodnienia wpływu przepuszczalności powietrza na porowatość optyczną poprzez zastosowanie modeli nie wytworzyła wyraźnej zależności, która może wskazywać na silniejszy wpływ innych parametrów geometrycznych dzianin.
- 7) Zaobserwowana wyraźna korelacja wyników symulacji i eksperymentu zarówno w przypadku badań izolacyjności cieplnej jak i przewodności dzianin może prowadzić do wniosku, że opracowane modele mogą być przydatne w przewidywaniu komfortu fizjologicznego użytkowników zaprojektowanej i wytworzonej odzieży.

### *Modelowanie transportu ciepła i transportu masy w układach trójwarstwowych*

- 1) W wyniku symulacji przeprowadzonych na modelu monofilamentowym i modelu włóknistym otrzymałem wyniki skorelowane z eksperymentem, którego główną rolą było sprawdzenie przydatności modeli. Jednak dla modelu włóknistego, w którym tkaniny zostały dokładniej odwzorowane, otrzymałem wyniki, które były wyraźnie bliższe eksperymentowi. Uwzględnienie pojedynczych włókien w przędzy tkanin, a tym samym przestrzeni między nimi, znacząco wpłynęło na zmianę przepuszczalności powietrza oraz na zmianę izolacyjności cieplnej w kierunku większych, bardziej rzeczywistych wartości. Wiadomo jednak, że nawet model włóknisty, pomimo odwzorowania większej ilości parametrów geometrycznych rzeczywistych tkanin, miał wiele uproszczeń w stosunku do skomplikowanej budowy prawdziwych tekstyliów, co musiało wpłynąć na końcowy wynik symulacji.
  - 2) W przypadku wszystkich 3 układów warstwowych zarówno wyniki symulacji, jak i eksperymentu wykazały kluczową rolę membrany w warstwie B w przepuszczalności powietrza całej wielowarstwowej tkaniny.
  - 3) Mniejsze różnice między wynikami eksperymentalnymi a symulacyjnymi (zarówno w przypadku izolacyjności cieplnej, jak i przewodności) dla modelu włóknistego wskazują na potrzebę korekty tego modelu, prawdopodobnie w kierunku zwiększenia jego podobieństwa do parametrów geometrycznych rzeczywistych tkanin, takich jak:
    - a) asymetryczny kształt raportu,
    - b) zmienny kształt przekroju przędzy wynikający z sił tarcia występujących między osnową a wątkiem,
    - c) eliptyczny (zamiast kołowego) kształt przekroju poprzecznego włókien,
    - d) nieperiodyczna makroskopowa struktura tkaniny (gęstość, grubość warstw)
- Ponadto, następujące czynniki mogły również wpłynąć na zgodność wyników symulacji z eksperymentem:
- 4) Dokładniejsze badania eksperymentalne i modelowanie struktury membrany w warstwie B. Obie zastosowane techniki (rentgenowska rentgenowska i porozymetria rtęciowa) pozwalają na oszacowanie porowatości w oparciu o rozkład wielkości porów. Program pozwala ustawić średnią wartość. Ponadto faktyczna porowatość nie musi być izotropowa.
  - 5) Dokładniejsze badania eksperymentalne i modelowanie włókniny skomplikowanej nieuporządkowanej struktury w warstwie B i warstwie C. Rzeczywista porowatość nie musi być izotropowa.
  - 6) Pomimo wspomnianych powyżej wielu uproszczeń (opisanych w punktach: 1, 3, 4) zastosowane oprogramowanie i opracowany model monofilamentowy układu trójwarstwowego pozwoliły mi przewidzieć przepuszczalność powietrza z błędem na poziomie 18,95%–20,71% w zależności od badanego układu, natomiast zastosowanie modelu włóknistego pozwoliło mi przewidzieć przepuszczalność powietrza z błędem na poziomie 9,80%–16,01% w zależności od badanego układu.
  - 7) Pomimo wspomnianych powyżej wielu uproszczeń (opisanych w punktach: 1, 3, 4) zastosowane oprogramowanie i opracowany model monofilamentowy układu trójwarstwowego pozwoliły mi przewidzieć izolacyjność cieplną z błędem na poziomie 10,80%–14,32%

w zależności od badanego układu, natomiast zastosowanie modelu włóknistego pozwoliło mi przewidzieć izolacyjność cieplną z błędem na poziomie 8,25%–8,66% w zależności od badanego układu.

- 8) Opracowane modele mogą być przydatne w przewidywaniu komfortu fizjologicznego projektowanych i wytwarzanych układów warstwowych zawierających tkaniny, włókniny oraz membrany.

#### 4.2.10 Literatura

- [1] I. Krucińska, R. Korycki, E. Skrzetuska, K. Kowalski, A. Puszkarz. „Wybrane zagadnienia z metrologii użytkowej odzieży funkcjonalnej”, **Monografia Politechniki Łódzkiej**, ISBN 978-83-7283-808-7, Łódź (2016)
- [2] A.K. Puszkarz, I. Krucińska *The study of knitted fabric thermal insulation using thermography and finite volume method* **Textile Research Journal** 87(6) 643–656 (2017)
- [3] A.K. Puszkarz, I. Krucińska *Study of multilayer clothing thermal insulation using thermography and the finite volume method* **Fibres and Textiles in Eastern Europe** 24 6(120) 129–137 (2016)
- [4] A.K. Puszkarz, I. Krucińska *Modeling of air permeability of knitted fabric using the computational fluid dynamics* **Autex Research Journal** 18(4) 364–376 (2018)
- [5] EN ISO 5084. Textiles - Determination of thickness of textiles and textile products
- [6] EN 12127. Textiles - Fabrics - Determination of mass per unit area using small samples
- [7] A.K. Puszkarz, I. Krucińska *Simulations of air permeability of multilayer textiles by the computational fluid dynamics* **International Journal for Multiscale Computational Engineering** 16(6) 509–526 (2018)
- [8] B. Gutarowska, W. Machnowski, L. Kowzowicz *Antimicrobial Activity of Textiles with Selected Dyes and Finishing Agents used in the Textile Industry*, **Fibers Polym.**, 14, 415–422., DOI 10.1007/s12221-013-0415-x (2013)
- [9] SolidWorks Flow Simulation – Technical Reference 2014
- [10] K. Jeżowiecka-Kabsch, H. Szewczyk, *Mechanika płynów*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2001
- [11] ISO 139. Textiles - Standard atmospheres for conditioning and testing
- [12] EN ISO 9237. Textiles - Determination of the permeability of fabrics to air



## SUMARYCZNE ZESTAWIENIE KRYTERIÓW OSIĄGNIĘĆ WNIOSKODAWCY

Wg Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 01.09.2011 r. w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego

Lp.	Kryterium według §3 p.4, §4 i §5	TAK (liczba)/BRAK
1.	Publikacje naukowe w czasopismach z bazy Journal Citation Reports (JCR)	14 (+2 przed doktoratem, razem 16)
2.	Zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne i technologiczne	1
3.	Udzielone patenty: a) międzynarodowe b) krajowe	a) 0 b) 1
4.	Wynalazki oraz wzory użytkowe i przemysłowe, które zostały wystawione na międzynarodowych lub krajowych wystawach lub targach	1
5.	Monografie, publikacje naukowe w czasopismach innych niż znajdujące się w bazie JCR	2
6.	Opracowania zbiorowe, katalogi zbiorów, dokumentacja prac badawczych, ekspertyz	1
7.	Sumaryczny <i>impact factor</i> według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania:	14,16
8.	Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS):	34
9.	Indeks Hirscha według bazy Web of Science (WoS)	4 (5 od 16.03.2019)
10.A	Kierowanie projektami badawczymi: a) międzynarodowymi b) krajowymi	BRAK a) 0 b) 0
10.B	Udział w projektach badawczych: a) międzynarodowych b) krajowych	a) 1 b) 4
11.	Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową	1
12.	Wygłoszenie referatów na tematycznych konferencjach a) międzynarodowych b) krajowych	a) 2 b) 0
13.	Uczestnictwo w programach europejskich oraz innych programach międzynarodowych i krajowych	1
14.	Aktywny udział w konferencjach naukowych: a) międzynarodowych b) krajowych	a) 5 b) 0
15.	Udział w komitetach organizacyjnych konferencji naukowych: a) międzynarodowych b) krajowych	BRAK a) 0 b) 0
16.	Otrzymane nagrody i wyróżnienia inne niż wymienione wyżej	BRAK
17.	Udział w konsorcjach i sieciach badawczych	2
18.	Kierowanie projektami realizowanymi we współpracy z: a) naukowcami z innych ośrodków polskich, b) naukowcami z ośrodków zagranicznych, c) przedsiębiorcami, innymi niż wymienione wyżej	a) ... b) ... c) 1
19.	Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism	0
20.A	Członkostwo w międzynarodowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych a) ogółem b) w tym z wyboru	BRAK a) 0 b) 0
20.B	Członkostwo w krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych a) ogółem b) w tym z wyboru	BRAK a) 0 b) 0
21.	Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki	14 prowadzonych przedmiotów 1 warsztaty 1 szkolenie
22.	Opieka naukowa nad studentami	1
23.	Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze: a) opiekuna naukowego b) promotora pomocniczego	BRAK a) 0 b) 0
24.	Staze w ośrodkach naukowych lub akademickich a) zagranicznych b) krajowych	BRAK a) 0 b) 0
25.	Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie	2
26.	Udział w zespołach eksperckich i konkursowych	1
27.	Recenzowanie projektów: a) międzynarodowych b) krajowych	BRAK a) 0 b) 0
28.	Recenzowanie publikacji w czasopismach: a) międzynarodowych b) krajowych	a) 9 b) 0
29.	Inne osiągnięcia/recenzowanie referatów konferencyjnych/zapraszane wykłady	5
<b>Łącznie liczba spełnionych kryteriów:</b>		<b>23/29</b>