

Badanie rozkładu temperatury w elementach ze stali konstrukcyjnej

Opracowali:
inż. Jakub Wilczek
inż. Artur Wilczek

SPIS TREŚCI

	Strona
1 Wprowadzenie	3
1.1 Cel projektu	3
1.2 Założenia projektu	3
1.3 Wprowadzenie teoretyczne	3
2 Pomiar temperatury przy pomocy opracowanego stanowiska pomiarowego	4
2.1 Stanowisko pomiarowe	4
2.2 Geometria i materiał elementów badanych	6
2.3 Pomiar temperatury	8
2.4 Wyniki pomiarów	9
3 Analiza MES w programie ANSYS	11
3.1 Geometria	11
3.2 Siatka elementów skończonych	11
3.3 Parametry i warunki brzegowe symulacji	12
3.4 Wyniki symulacji	13
4 Analiza wyników	16
5 Wnioski	17
6 Github	18

1. Wprowadzenie

1.1. Cel projektu

Celem projektu jest badanie rozchodzenia się temperatury w elementach wykonanych ze stali konstrukcyjnej w zależności od ich geometrii. Stalowe elementy konstrukcyjne pracują w różnorakich warunkach cieplnych, często zawiesia czy podpory rurociągów, pomimo izolacji narażone są na działanie wysokich temperatur przenosząc je na rozłączne elementy montażowe co może negatywnie wpływać na ich ruchliwość.

Badanie powyższego zagadnienia ma pozwolić w sposób doświadczalny ocenić jak zmiana pola przekroju przewodzenia czy objętość całkowita próbki wpłynie na rozchodzenie się w niej temperatury w zakresie około 70°C . Temperatura wody została dobrana odpowiednio do temperatury rurociągów cieplowniczych.

1.2. Założenia projektu

Wybranym do badania elementem będzie płaskownik stalowy 30×6 mm o długości 260mm. Pomiarom temperatury poddane zostaną dwie próbki. Pierwszą z nich będzie próbka oryginalna, drugą element ze zmienioną geometrią. W próbce nr dwa zostaną wywiercone cztery otwory redukujące jego objętość, oraz zmieniające pole powierzchni przewodzenia na długości płaskownika. Element ogrzewany będzie przy pomocy zbiorniczka z wodą o odpowiednio dobranej temperaturze.

Do przeprowadzenia pomiarów temperatury zostanie opracowany układ pomiarowy sterowany przez mikrokontroler Arduino UNO. Jako elementy termoczułe zastosowane zostaną Termistory NTC 110 o rezystancji $1\text{k }\Omega$. Eksperyment będzie kierowany specjalnie opracowanymi skryptami C++ oraz Python.

Formą weryfikacji otrzymanych wyników będzie przeprowadzenie symulacji analogicznego doświadczenia używając programu Ansys Workbench i pakietu Steady-State Thermal. Modele 3D poszczególnych płaskowników wykonane zostaną przy pomocy programu Fusion 360.

1.3. Wprowadzenie teoretyczne

Przepływ ciepła jest sposobem przekazywania energii powszechnie występującym w przyrodzie. Samoczynna wymiana ciepła może zachodzić pomiędzy ciałami stałymi, płynami oraz gazami, ale zawsze dąży do wyrównania temperatur. Zjawisko przepływu ciepła występuje niemalże wszędzie, a konieczność jego analizy jest nieodłącznym elementem projektowania wielu urządzeń. Badaniem transportu ciepła interesowało się od wielu lat, ale metody rozwiązywania problemów są coraz bardziej nowoczesne. Można je podzielić na metody analityczne, numeryczne oraz eksperymentalne.

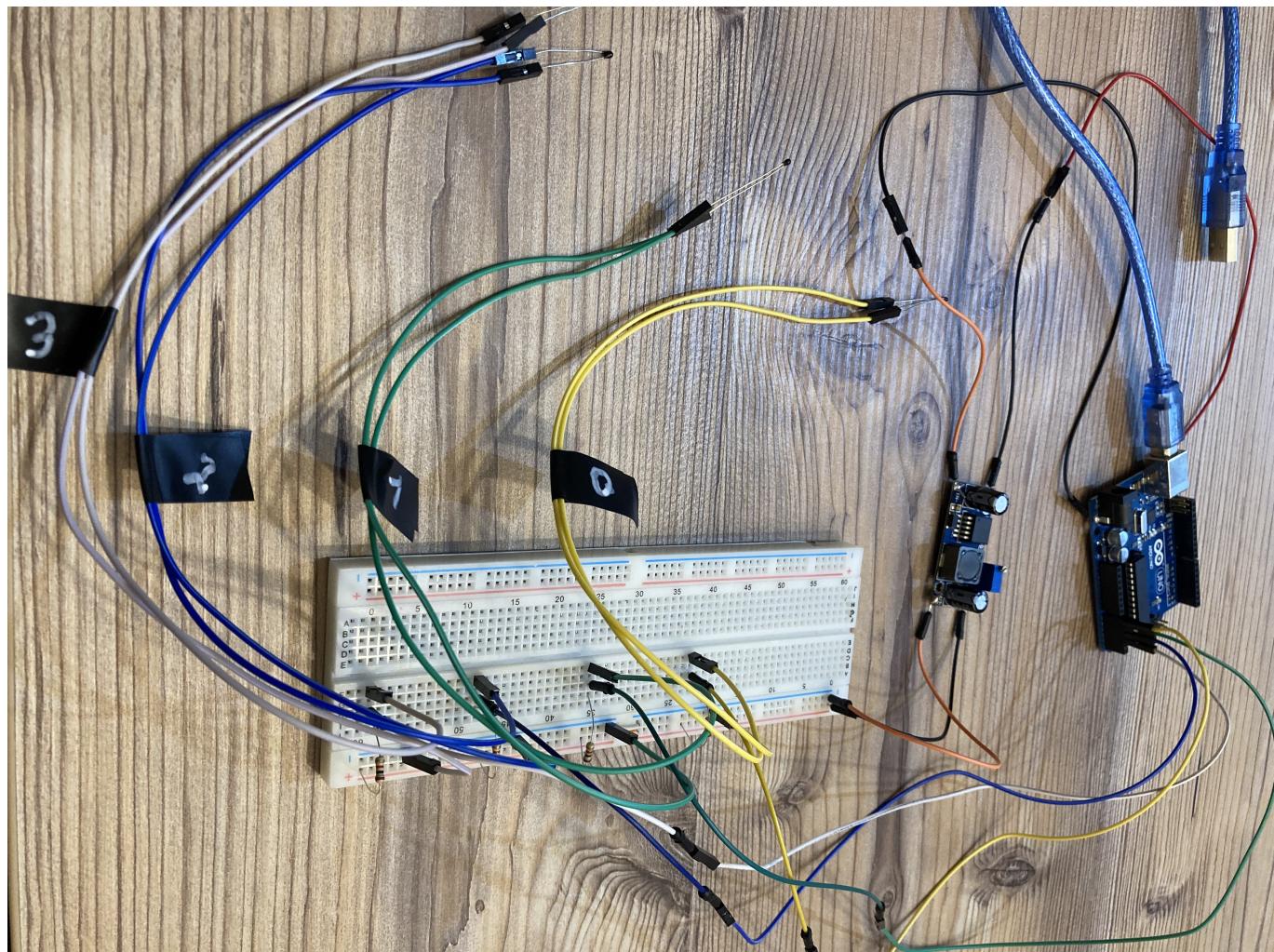
Metoda analityczna rozwiązywania zadań z przepływu ciepła opiera się na wielu założeniach upraszczających, dzięki którym można szybko uzyskać wynik. Ważne jest jednak sprawdzenie, czy zastosowane uproszczenia modelu analitycznego są uzasadnione, a także czy otrzymane wyniki są wystarczająco zgodne z modelem pełnym.

Współcześnie inżynierowie częściej sięgają do metod numerycznych, które pozwalają na precyzyjną analizę zjawisk przepływu ciepła i rozwiązywanie szerokiego zakresu problemów inżynierskich. Modelowanie numeryczne przepływu ciepła opiera się na podstawowych prawach fizyki oraz przyjętych przez projektanta założeniach modelu. Uzyskuje się układ równań różniczkowych, który doprecyzować należy warunkami jednoznaczności, takimi jak: geometria układu, dane materiałów, warunki brzegowe. Równania różniczkowe zapewniają precyzyjne matematyczne sformułowania dla fizycznych zasad i praw. Modelowanie numeryczne można zrealizować m.in. w programie ANSYS, pozwalającym na uzyskanie dokładnego rozwiązania.

Ostatnią grupą metod rozwiązywania zagadnień z przepływu ciepła jest metoda eksperymentalna, polegająca na wykonywaniu rzeczywistych pomiarów. Metoda ta wymaga zbudowania stanowiska pomiarowego oraz jak najlepszego odwzorowania naturalnych warunków, sprzyjających pracy badanego elementu.

2. Pomiar temperatury przy pomocy opracowanego stanowiska pomiarowego

2.1. Stanowisko pomiarowe

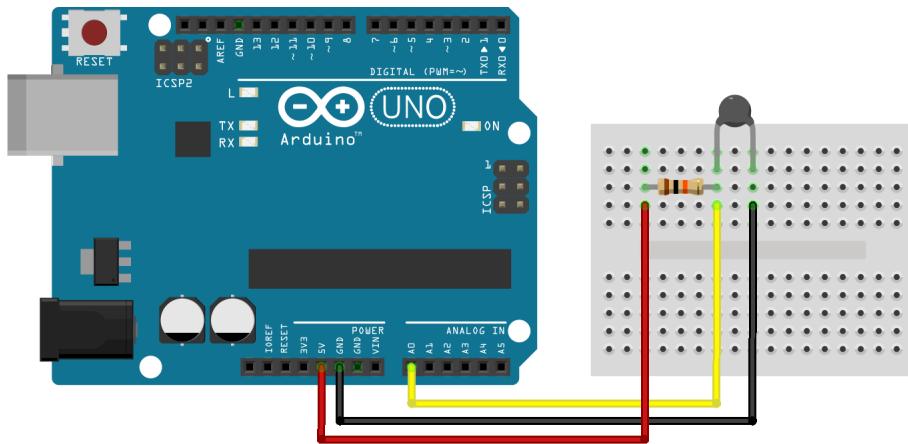


Rysunek 1: Stanowisko pomiarowe

Stanowisko pomiarowe zostało wykonane z następujących elementów:

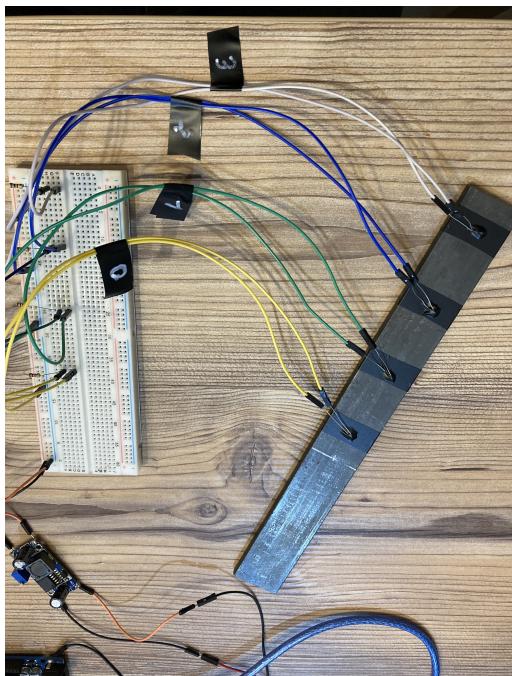
1. mikrokontroler Arduino Uno,
2. 4 termistory NTC 110,
3. 4 rezystory 1K Ω ,
4. przetwornica,
5. płytka stykowa,
6. przewody męsko - męskie,
7. przewody męsko - żeńskie,
8. kabel usb,
9. zasilacz.

Kabel zasilający został przylutowany do Arduino, aby uzyskać większe, a raczej bardziej stabilne napięcie, potrzebne do zasilenia stanowiska pomiarowego, maksymalnie ograniczając spadki napięciowe. Za pomocą przetwornicy, ustalone zostało wymagane napięcie 5V, które zasilało płytę stykową. Do płytnej tej zostały wpięte za pomocą przewodów męsko - męskich oraz męsko - żeńskich termistory wraz z odpowiadającymi im rezystorami.

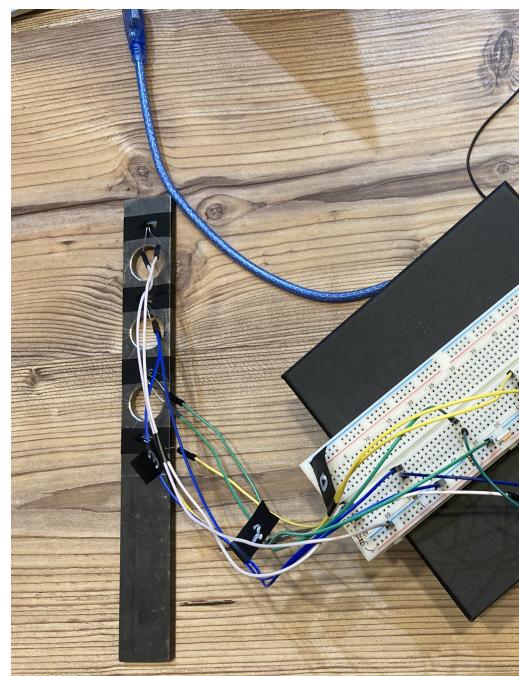


Rysunek 2: Schemat poglądowy połączenia arduino z termistorem

Do badanych elementów zostały przymocowane termistory za pomocą taśmy izolacyjnej. Termistory te zostały umieszczone w kolejności od nr 0 (kolor żółty - umieszczony najniżej) do nr 3 (kolor biały - umieszczony najwyższej) w odstępach 40 mm od siebie w taki sposób, aby znajdowały się idealnie na środku przestrzeni między otworami.



Rysunek 3: Montaż elementów pomiarowych do płaskownika bez otworów



Rysunek 4: Montaż elementów pomiarowych do płaskownika z otworami

Następnie za pomocą kabla USB, Arduino zostało podłączone do komputera, za pomocą którego, dzięki opracowanemu wcześniej programowi napisanemu w C++, udało się zarejestrować mierzone wartości oraz zimportować je do opracowanego programu w języku Python, w którym byliśmy w stanie uzyskać wykresy zmiany temperatury w czasie rzeczywistym, co znacznie ułatwiło przeprowadzenie eksperymentu.

Stabilne zasilanie oraz dobór odpowiednich rezystorów był w tego typu układzie priorytetem, ponieważ pomiar temperatury odbywa się za pomocą termistorów, których wyznaczana temperatura jest silnie powiązana z rezystancją.

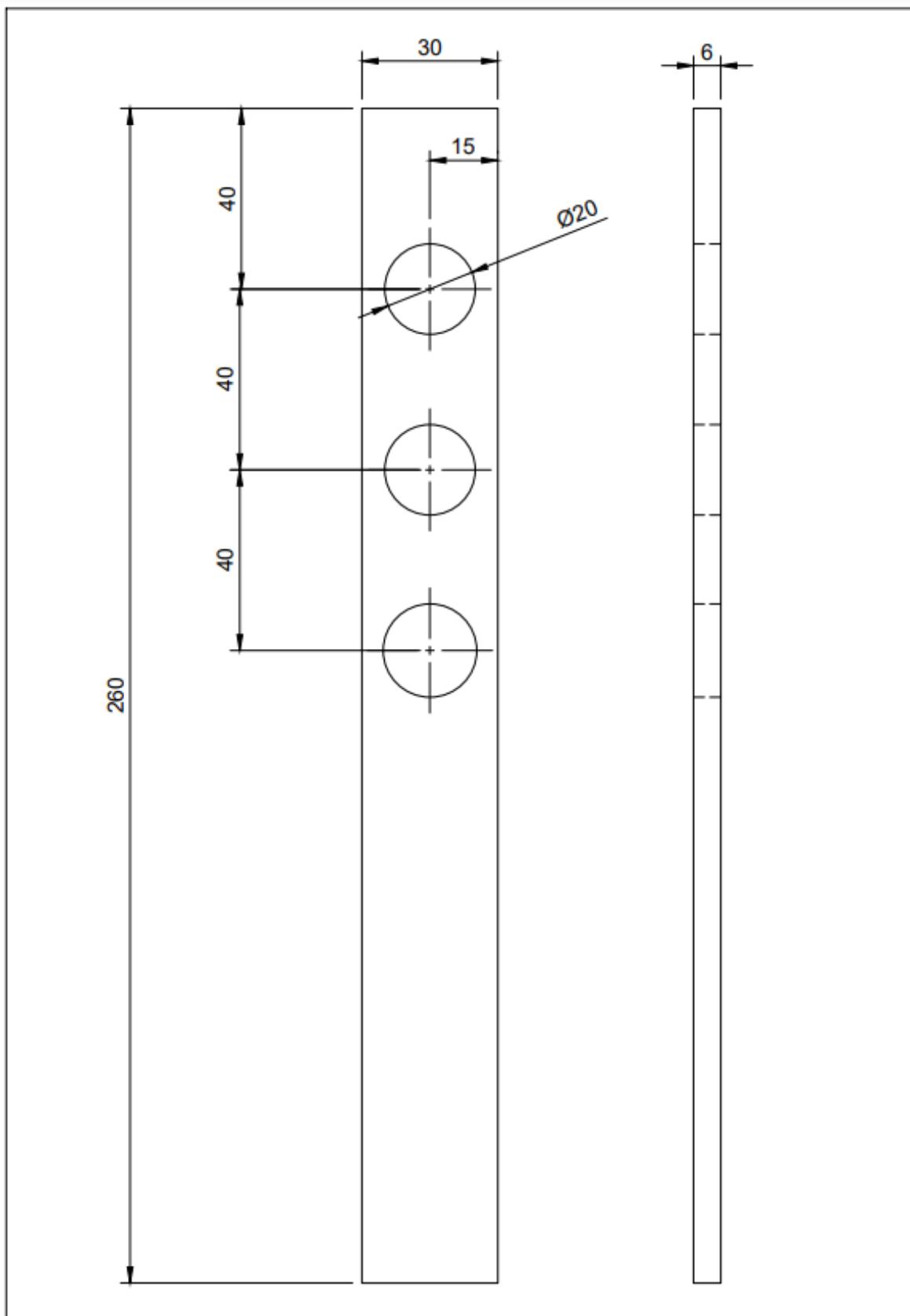
Dodatkowo uzyskanie takiej funkcjonalności jak wykresy w czasie rzeczywistym, pozwoliło monitorować przebieg eksperymentu w postaci przepływu ciepła oraz przerwać próbę eksperymentu w odpowiednim czasie, w razie niechcianego błędu, aby zminimalizować tracony czas oczekiwania przed jego powtórzeniem.

2.2. Geometria i materiał elementów badanych

Próbki wykonane zostały ze stali konstrukcyjnej S235JR według rysunku 6 przez firmę NOMAG S.C. z siedzibą w Dąbrowie Górniczej. Oba elementy zostały wykonane z tego płaskownika oznaczonego nr wytopu 129711. O CE pokazanym na rysunku 5.

Płaskownik 30x6 S235JR 6m										NR. WYTOPU: 129711 NR. PARTII: 683302N PACZEK: 1 SUMA WAG: 2,4									
B01 wyrób / product		dlugość / lenght		B14		Heat no.		B07		Lot batch no.		bundles pcs		B15		weight sum		B13	
Analiza chemiczna / Chemical analysis [%]																			
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Ti	V	As	N	CEV	NB	B	C71 - C82		
0,15	0,48	0,15	0,016	0,007	0,07	0,11	0,39	0,02	0,002	0,001	0,002	0,007	0,010	0,28	0,001				
Wyniki Badania Prób / Testing results																			
Re [MPa]	Rm [MPa]	A _s [%]	Z [%]	HB Hardness	UDARNOŚĆ / Impact Strength [J]					ZGINANIE Bending		SPECZANIE Slug test		ODWĘGLANIE [mm]				CE 08	
338	454	40,1																Nr 1436-CPR-0010	
336	457	38,8																	
Normy, tolerancje, aprobaty / Standards, tolerances, approvals: PN-EN 10025-1:2007 PN-EN 1 Gatunek / Grade: S235JR+AR Norma wymiarowa: PN-EN 10058 / PN-EN 10163-2:2 Przewidywane zastosowanie : Konstr.metalowe lub w konstr.zespolonych metalowo-betonowych																			

Rysunek 5: Płaskownik 30x6 S235JR - CE



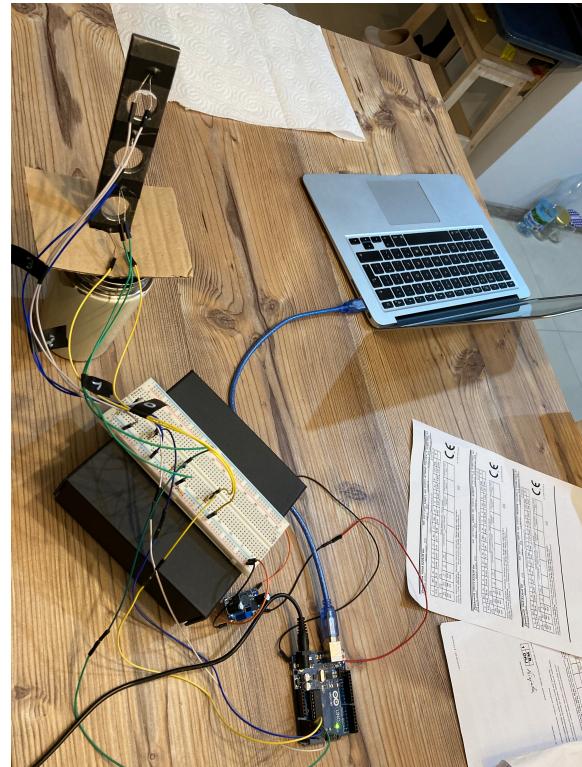
Rysunek 6: Rysunek wykonawczy płaskownika z otworami

2.3. Pomiar temperatury

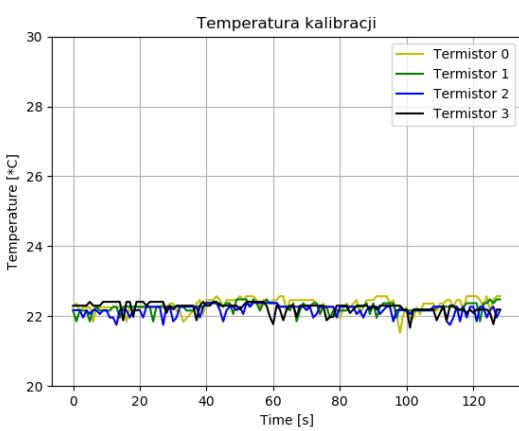
Pomiar temperatury odbył się dzięki umieszczeniu uprzednio przygotowanych płaskowników z przymocowaną aparaturą pomiarową w naczyniu z wodą nagrzaną do 70°C na głębokość 10 cm. Jednakże najważniejszą częścią przeprowadzenia pomiaru temperatury było poprawne skalibrowanie naszego systemu pomiarowego, jeszcze przed umieszczeniem płaskowników w naczyniu z wodą. Bez tego, uzyskane pomiary byłyby bezwartościowe. Kalibracja została przeprowadzona z dokładnością do $+/-. 0.5^{\circ}\text{C}$ między czterema termistorami przymocowanymi do płaskownika.



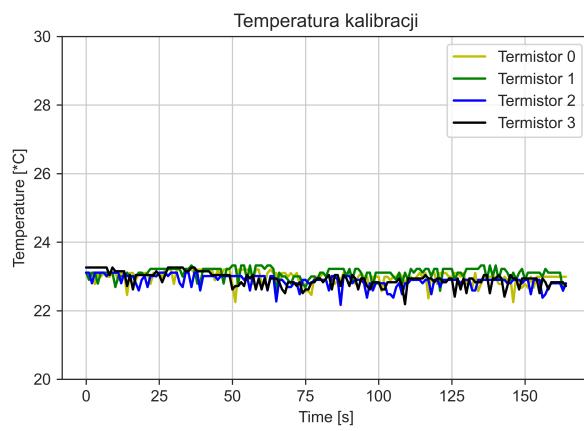
Rysunek 7: Pomiar przepływu temperatury w płaskowniku bez otworów



Rysunek 8: Pomiar przepływu temperatury w płaskowniku z otworami



(a) Płaskownik bez otworów



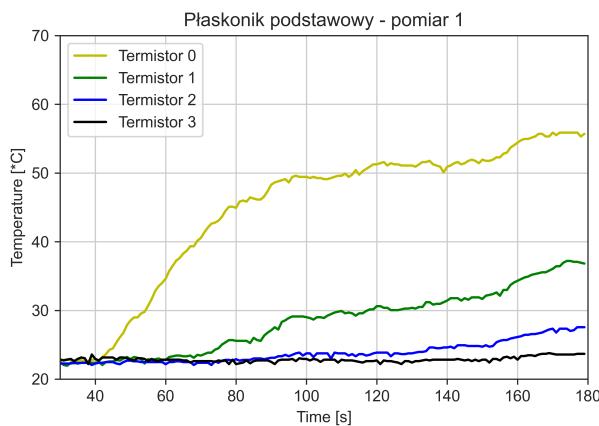
(b) Płaskownik z otworami

Rysunek 9: Kalibracja systemu pomiarowego

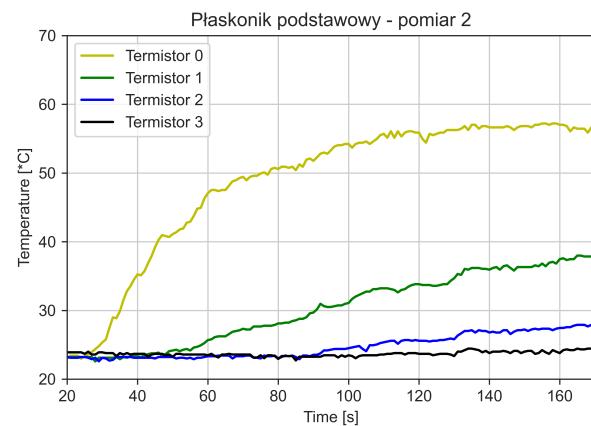
Dzięki kalibracji udało się uzyskać temperaturę pokojową na poziomie 22°C w przypadku pierwszego płaskownika oraz 23° w przypadku drugiego płaskownika. Różnica ta wynika ze zmiany temperatury otoczenia w mieszkaniu. Po odpowiednim skalibrowaniu, płaskowniki zostały umieszczone w naczyniu z wodą nagrzaną do 70°C . Otwór naczynia został przykryty kartonem, aby unosząca się para nie wpływała na pomiary termistorów oraz by maksymalnie zminimalizować konwekcję między wodą a temperaturą otoczenia.

2.4. Wyniki pomiarów

Dla każdego płaskownika zostały przeprowadzone dwa pomiary przepływu temperatury, trwające 150 sekund każdy, czyli w sumie 4 pomiary trwające 10 minut. Jednakże po każdorazowym pomiarze konieczne było doprowadzenie stanowiska pomiarowego oraz badanego elementu do odpowiedniego ostudzenia poprzez 30-45 minutową przerwę, aby wszystkie pomiary były przeprowadzane w dokładnie takich samych warunkach.

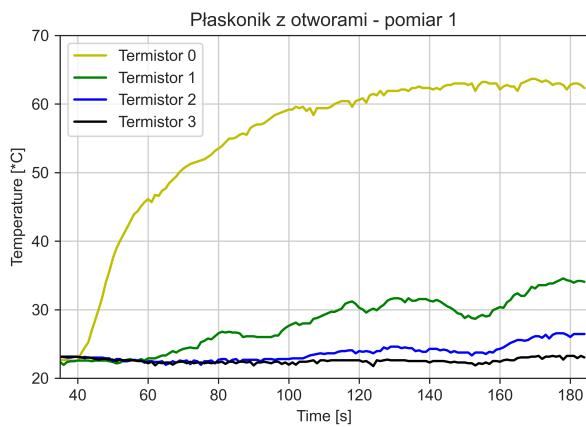


(a) Pomiar nr 1

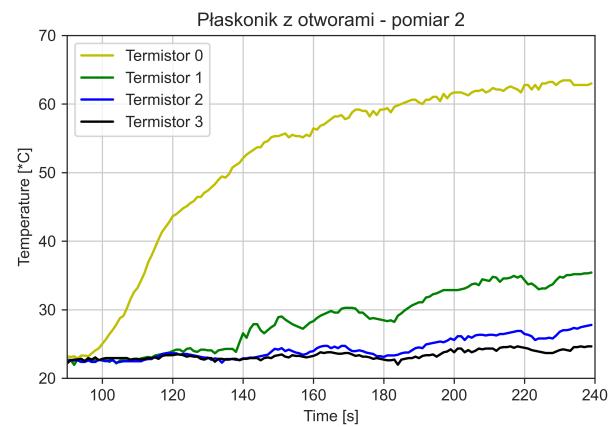


(b) Pomiar nr 2

Rysunek 10: Pomiary przepływu temperatury w płaskowniku podstawowym



(a) Pomiar nr 1



(b) Pomiar nr 2

Rysunek 11: Pomiary przepływu temperatury w płaskowniku z otworami

Analiza wizualna wykresów pozwala stwierdzić, iż wykresy są do siebie podobne, co świadczy o dobrym odwzorowaniu eksperymentu, odpowiednich przerwach między jego powielaniem oraz braku awarii któregoś z termistorów, skutkujących niepoprawnym odczytem temperatury. Zauważać można różne załamania krzywych w tym sam punkcie. Są to najprawdopodobniej skoki napięcia, których, mimo zastosowania specjalnie dobranego zasilania, nie udało się całkowicie wykluczyć.

Termistor nr 0, oznaczony kolorem żółtym, był termistorem przymocowanym najbliżej źródła ciepła, stąd też jako pierwszy zaczął uzyskiwać wyższe wartości temperatury w rozpatrywanym materiale. Wartości te zaczynały się pojawiać już w przeciągu pierwszych 10 sekund po umieszczeniu płaskownika w naczyniu z cieczą. Ta wartość jest bardzo zbliżona na wszystkich wykresach, co świadczy tylko o poprawnym przebiegu eksperymentu - bowiem termistor ten został umieszczony jeszcze przed pierwszym otworem w płaskowniku z otworami, co oznacza, że pomiary z termistora nr 0 powinny wyjść takie same, niezależnie od wybranego płaskownika.

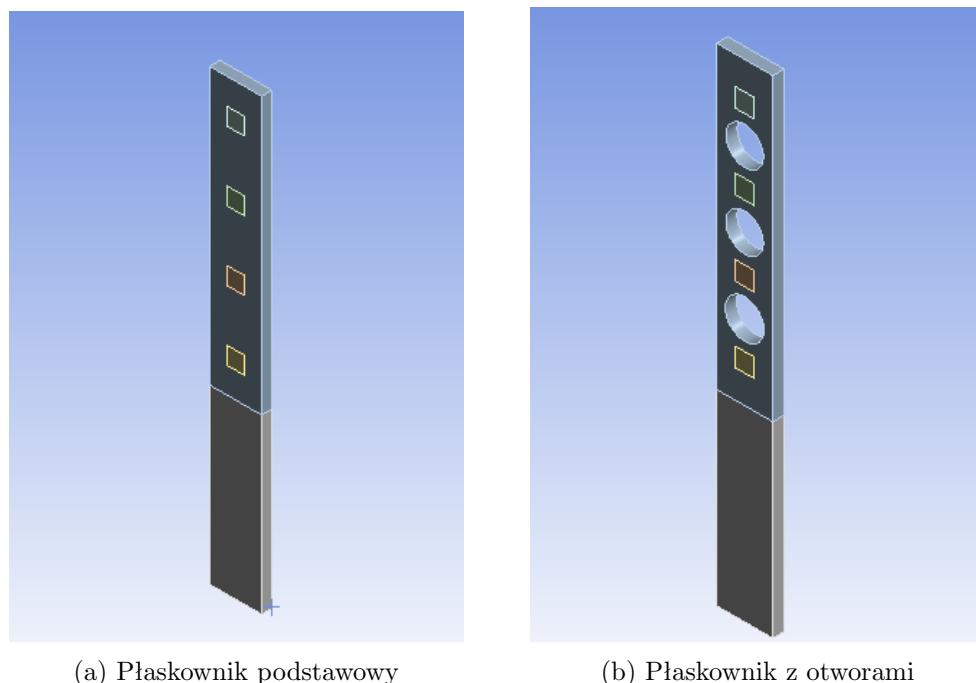
W przypadku odczytu wartości z pozostałych termistorów - wyniki te są zbyt mało widoczne na wykresie, by móc w ten sposób wyciągnąć sensowne wnioski, ba nawet nie powinniśmy tego robić tylko i wyłącznie wizualnie. Dlatego też dokładne wyniki, zapisane w plikach csv, zostaną zestawione w kolejnym rozdziale wraz z porównaniem ich do wyników z symulacji wykonanej w programie ANSYS.

3. Analiza MES w programie ANSYS

W ramach projektu przeprowadzona została analiza MES przy pomocy programu Ansys Workbench i modułu Steady-State Thermal.

3.1. Geometria

Modele 3D badanych elementów zaprojektowane zostały przy pomocy programu Fusion 360 i wyeksportowane do rozszerzenia .step w celu importowania geometrii do programu Ansys. Na rysunku 12 przedstawiającym geometrię próbek zauważać można również wyodrębnione obszary w których podczas eksperymentu zostały przyklejone termistory, warto również dodać, że w tych obszarach podczas symulacji wstrzymano się od zastosowania konwekcji.



Rysunek 12: Geometria badanych elementów

3.2. Zastosowane uproszczenia

W celu uproszczenia analizy zastosowano przyłożenie do dolnej części badanych płaskowników średniej temperatury wody w zbiorniku grzewczym, która odnotowana została podczas eksperymentu. W celu zwiększenia dokładności pomiarów, konieczne byłoby odtworzenie zbiornika grzewczego, w którym znajdywał się płaskownik.

Stale materiałowe i współczynniki zostały przyjęte w sposób uproszczony, według katalogów dla materiałów stosowanych podczas eksperimentu, ich dokładniejsze przyjęcie mogło by mieć wpływ na dokładniejsze wyniki.

W części płaskownika, która znajdowała się ponad elementem grzewczym zastosowana została konwekcja pomiędzy powietrzem a stalą. Miejsca w których przylepione były termistory zostały owinięte grubą warstwą izolacji, z powodu braku informacji na temat konwekcji w tych miejscach w symulacji, w miejscach pomiarów konwekcja nie została uwzględniona.

W celu otrzymania większej dokładności symulacji można było posłużyć się CFD jednak uznano że analiza MES na potrzeby tego modelu będzie w zupełności wystarczająca.

Pierwszy z termistorów znajdował się bezpośrednio ponad naczyniem grzewczym, pomimo próby szczelnego odizolowania go od działania gorącej pary płynącej od wody, możliwy jest niewielki jej wpływ na odczyty. Ta zależność nie została uwzględniona w symulacji komputerowej.

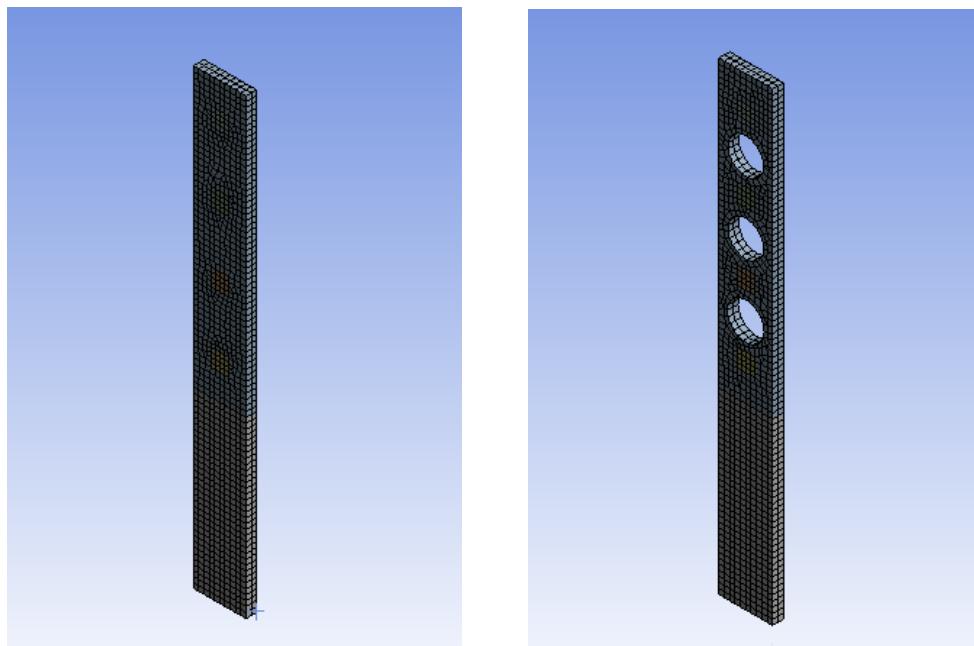
Wszystkie symulacje zostały przeprowadzone dla tej samej temperatury otoczenia która została uśredniona względem pomiarów rzeczywistych. Z powodu, że eksperyment w celu potwierdzenia wyników wykonywany był kilkukrotnie, a każda kolejna próba wymagała odstępu czasowego (około 30-45 min) w celu całkowitego ustabilizowania się temperatury płaskownika po poprzednich pomiarach, całość pomiarów trwała kilka godzin. Na przestrzeni tego czasu pod wpływem różnych czynników, między innymi podgrzewania dużej ilości wody temperatura pomieszczenia również wała się o kilka stopni.

3.3. Siatka elementów skończonych

Analizę rozpoczęto od utworzenia siatki elementów skończonych dla obu rozpatrywanych przypadków które przedstawione są na rysunku 13. Do opracowania siatki użyto ustawień zestawionych w tabeli 1.

Tabela 1: Warunki brzegowe

Element	Element order	Body Sizing - Element Size	Nodes	Elements
Płaskownik podstawowy	Linear	0,003 m	3348	1886
Płaskownik z otworami	Linear	0,003 m	3156	1716



(a) Płaskownik podstawowy

(b) Płaskownik z otworami

Rysunek 13: Siatki elementów skończonych badanych elementów

Siatka elementów skończonych została również sprawdzona dla większego rodzaju elementów (0.004 m, 0.005 m) jednakże wyniki w znaczący sposób zaczęły odbiegać od rzeczywistości. Pomniejszenie elementów (0.002 m) nie zmieniało już w znaczący sposób otrzymywanych wyników, a powodowało zbędne wydłużenie symulacji. Znaczne zmniejszenie elementów (o rząd wielkości) nie było możliwe z powodu ograniczeń studenckiej wersji programu Ansys. Były również sprawdzane różne kształty elementów dla

obu wariantów geometrii, jednakże ze względu na prostą budowę modelu zastosowana siatka była w zupełności wystarczająca i skuteczna.

3.4. Parametry i warunki brzegowe symulacji

W poniższej tabeli 2 przedstawiono przyjęte warunki brzegowe. Podczas eksperymentu element ogrzewany był przy pomocy wody w naczyniu o odpowiedniej temperaturze, w celu uproszczenia symulacji, pamiętając o zachowaniu odpowiedniego odwzorowania doświadczenia wodę zastąpiono przyłożoną jej średnią temperaturą na pierwszych 10 cm długości płaskowników. Współczynnik konwekacji w tym zakresie został pominięty ze względu na to, iż woda znajdywała się w pojemniku izolowanym, a także była od góry zakryta. Dla poprawności wyników niezbędne było zastosowanie współczynnika konwekacji pomiędzy stalą a powietrzem.

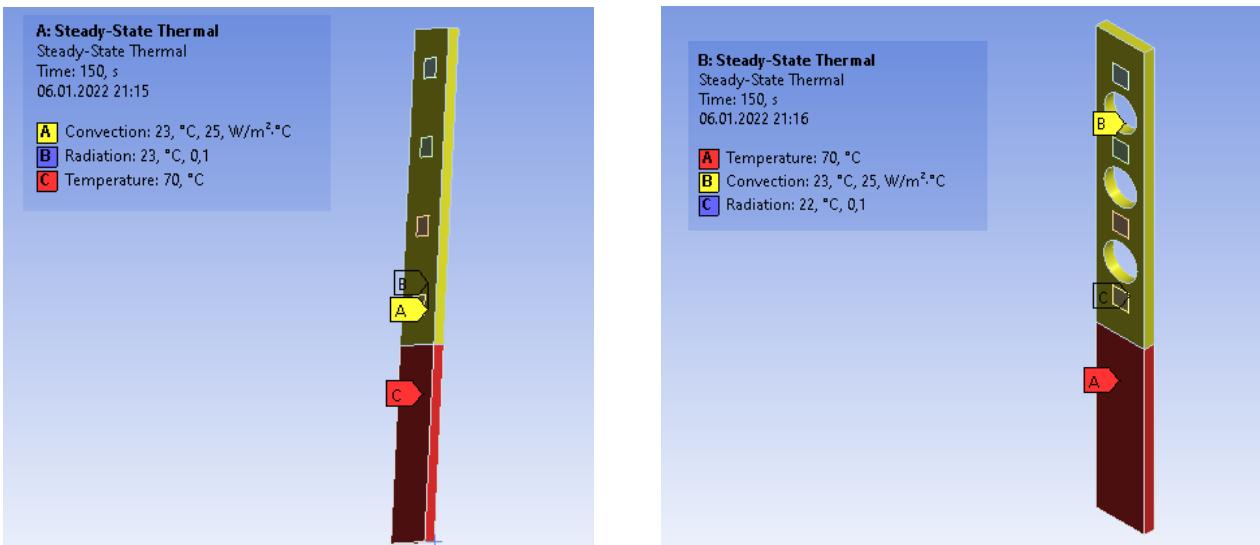
Tabela 2: Warunki brzegowe

Warunek brzegowy	Wartość
Temperatura otoczenia	23°C
Temperatura źródła ciepła	70°C
Współczynnik przenikania ciepła stal - powietrze	25 W/m ² *°C

Tabela 3: Parametry symulacji

Parametr	Wartość
Number of steps	1
Current step number	150 s
Auto Time Stepping	On
Initial Substeps	150
Minimum Substeps	150
Maximum Substeps	150

Symulacja została przeprowadzona w czasie 150s przy ustawieniach zawartych w tabeli 5.



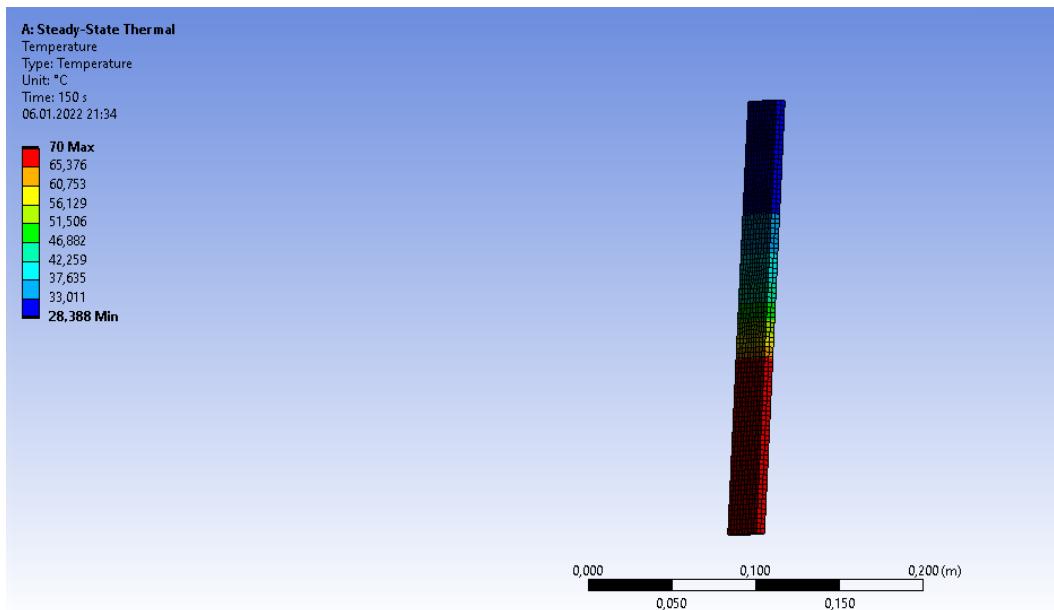
(a) Płaskownik podstawowy

(b) Płaskownik z otworami

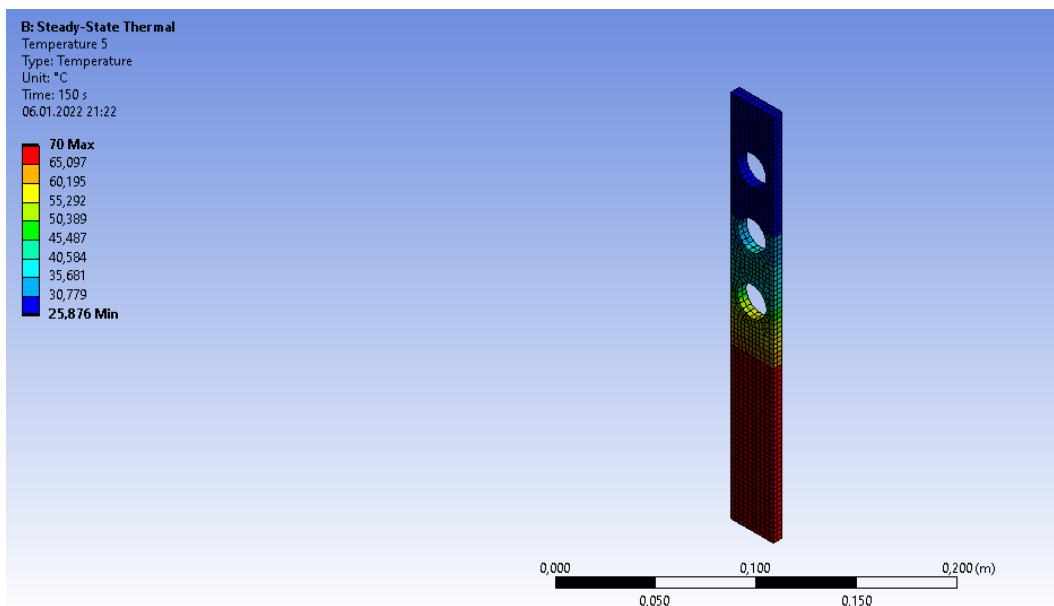
Rysunek 14: Warunki brzegowe

3.5. Wyniki symulacji

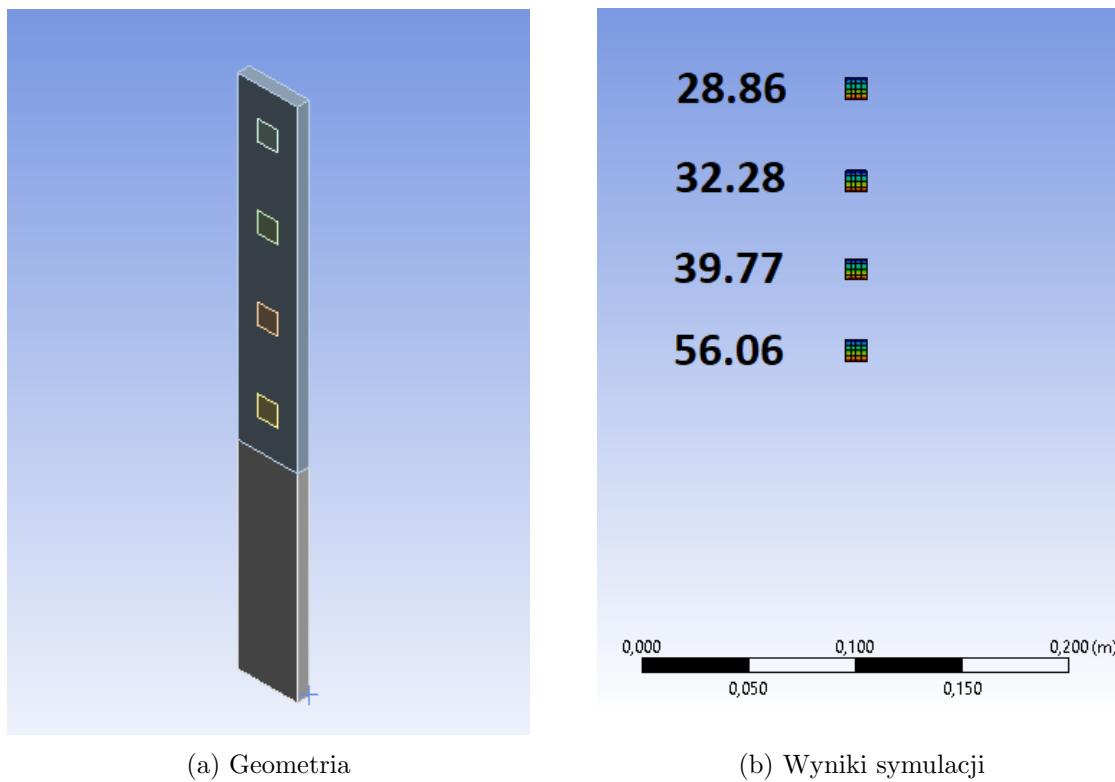
Wyniki symulacji przedstawione zostały w postaci pięciu rezultatów dla każdej z badanych próbek. Pierwsza z nich jest to rozkład temperatury po wzduż całej długości płaskowników (Rysunki 15|16). Kolejne rezultaty dotyczą poszczególnych miejsc montowania termistorów. Poniżej przedstawione są wizualizacje rozkładów temperatury dla poszczególnych miejsc, wartości wyników przedstawione zostaną w kolejnym rozdziale przy porównaniu z eksperymentem.



Rysunek 15: Płaskownik podstawowy - rozkład temperatury po 150[s]



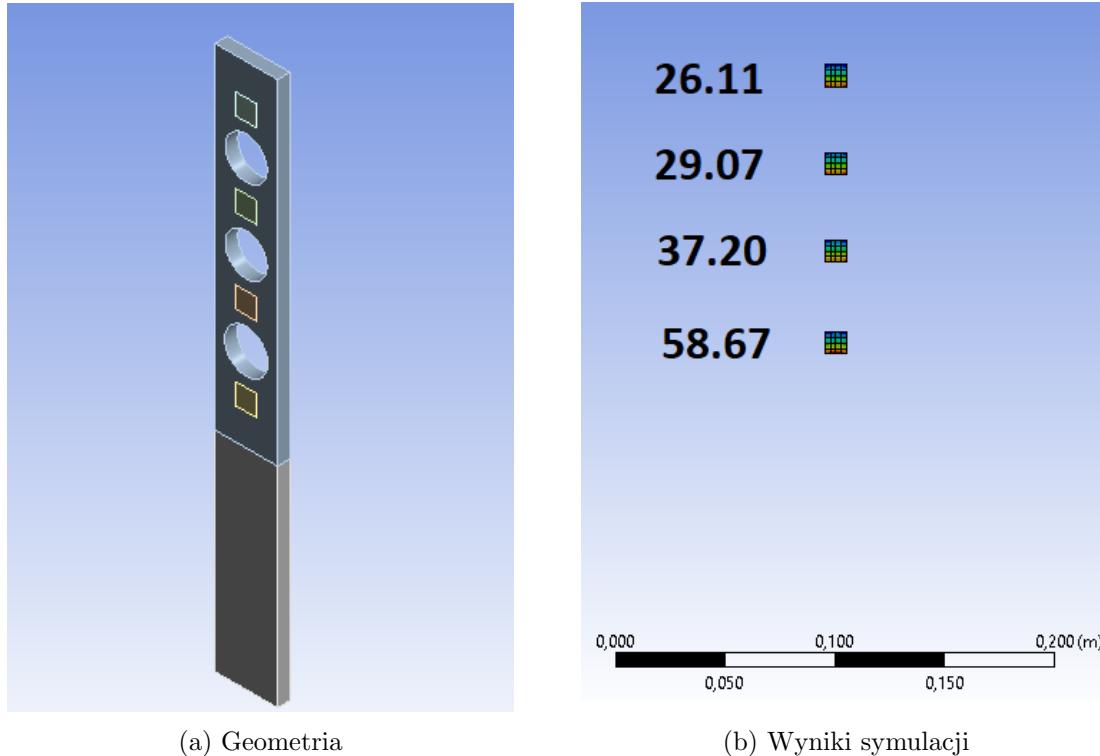
Rysunek 16: Płaskownik z otworami - rozkład temperatury po 150[s]



(a) Geometria

(b) Wyniki symulacji

Rysunek 17: Zestawienie temperatur w punktach pomiarowych po 150[s]



(a) Geometria

(b) Wyniki symulacji

Rysunek 18: Zestawienie temperatur w punktach pomiarowych po 150[s]

4. Analiza wyników

W tym rozdziale zostały zestawione wartości zebrane z metody numerycznej z wykorzystaniem programu ANSYS oraz z metody eksperymentalnej z wykorzystaniem zbudowanego stanowiska pomiarowego. Wyniki te dotyczą wartości osiągniętych po 150 sekundach dla czterech termistorów zamocowanych tak, jak zostało to przedstawione w rozdziale 2.

Tabela 4: Zestawienie wyników dla płaskownika bez otworów

Termistor	Symulacja ANSYS	Eksperyment nr 1	Eksperyment nr 2
3	28,86	23,68	24,54
2	32,28	27,56	28,12
1	39,77	37,07	38,24
0	56,06	55,88	56,07

Tabela 5: Zestawienie wyników dla płaskownika z otworami

Termistor	Symulacja ANSYS	Eksperyment nr 1	Eksperyment nr 2
3	26,11	23,04	24,00
2	29,07	26,45	27,12
1	37,20	34,07	35,05
0	58,67	62,34	63,45

Jak możemy zauważyć, w przypadku wyników z dwóch metod dla płaskownika bez otworów, wyniki otrzymane eksperymentalnie są zbliżone do tych z symulacji w Ansysie. Im termistor znajdował się bliżej źródła ciepła, tym wartości te są najbardziej sobie równe. Może to wynikać z nie do końca szczelnego zbiornika z nagrzaną ciecą, w związku z czym podczas trwania eksperymentu zbiornik ten wychłodził się bardziej niż było to założone.

Natomiast w przypadku płaskownika z otworami, zauważać możemy, że wartości z pierwszego termistora uzyskane eksperymentalnie są zawyżone względem tych otrzymanych z symulacji z Ansysa jak i do drugiego płaskownika, gdzie w przypadku akurat tego termistora, kształt nie powinien powodować żadnej różnicy. Zawyżenie tej wartości może wynikać ze wzrostu temperatury otoczenia w pokoju, która wpłynęła na wszystkie otrzymane próby dla płaskownika z otworami. W takim przypadku możnaby się pokusić o przeskalowanie tych wartości w celu uzyskania podobnej temperatury końcowej pierwszego termistora. Wtedy kolejne wartości zarejestrowane przez pozostałe termistory byłyby jeszcze niższe. Biorąc jednak pod uwagę, że nawet teraz wartości te są już niższe, w porównaniu z płaskownikiem bez otworów, jest to zbędna, nie wpływająca na wnioski operacyjne.

Podsumowując obydwie metody rozpatrywania tego samego problemu inżynierskiego, zarówno metoda numeryczna za pomocą symulacji w Ansysie jak i metoda eksperymentalna za pomocą zbudowanego stanowiska pomiarowego wykazały, że przepływ ciepła po 150 sekundach od zanurzenia 10 cm płaskowników w cieczy nagrzanej do temperatury $70^{\circ}C$, osiągnie wyższe wartości w przypadku płaskownika bez otworów.

5. Wnioski

Zjawisko przepływu ciepła występuje niemalże wszędzie, a konieczność jego analizy jest nieodłącznym elementem projektowania wielu urządzeń. Stąd też w naszym projekcie postanowiliśmy przeanalizować w jaki sposób zmiana kształtu tego samego elementu, poprzez wywiercenie otworów w jednym z nich, wpłynie na zmiany przepływu w nich ciepła. Wybrane przez nas metody rozwiązywania tego problemu to metoda numeryczna w postaci symulacji w programie ANSYS oraz metoda eksperymentalna za pomocą zbudowanego stanowiska pomiarowego.

Wykonanie tego projektu było możliwe przede wszystkim dzięki zastosowaniu różnego rodzaju uproszczeń. Jest to jeden z podstawowych czynników wykonywania projektów inżynierskich. Bez zastosowania odpowiednich uproszczeń, zarówno symulacja jak i eksperyment mogłyby być zbyt trudne do zrealizowania w tak krótkim czasie oraz przy dysponowanej mocy obliczeniowej naszych urządzeń. Trzeba mieć jednak na uwadze, że zastosowanie zbyt dużych uproszczeń jest w stanie uczynić z uzyskanych wyników, wyniki bezwartościowe. Dlatego w tego typu projektach jednym z ważniejszych, jak nie najważniejszych etapów jest zoptymalizowanie poziomu uproszczeń do posiadanych możliwości projektowych.

Wydawać by się mogło, że przepływ ciepła zależy tylko i wyłącznie od danych materiałowych, więc skoro materiał będzie ten sam, to nie powinniśmy zauważać większych różnic, niż te wynikające z niezawodności stanowiska pomiarowego. Jednakże wpływając na kształt badanego elementu w taki a nie inny sposób, w przypadku płaskownika z otworami, zawężliśmy strumień przepływu ciepła, który może go osłabić lub spowolnić. Zatem dlaczego od razu nie postawiliśmy takiej tezy? W idealnym świecie może i by tak było, w rzeczywistości nie możemy jednak zapomnieć o zjawisku konwekcji, która w tym wypadku mogła zmienić całkowicie wynik eksperymentu.

Po analizie wyników symulacji z programu ANSYS oraz przeprowadzonego rzeczywistego eksperymentu, zauważać można, że tak się jednak nie stało. Wynikać to może ze zbyt małej różnicy w powierzchni oraz małej różnicy między temperaturą otoczenia a temperaturą mierzoną. Czas eksperymentu też ma ogromne znaczenie, jednak nie byliśmy w stanie zapewnić na tyle stałego źródła ciepła, by wydłużyć ten eksperyment. Zachowanie optymalnego czasu do odpowiednich warunków brzegowych było dla nas priorytetem.

Na wynik mogą również wpływać skoki napięcia, które mimo prób wyeliminowania w postaci dodatkowego, stabilnego zasilania zewnętrznego, nie udało się całkowicie uniknąć. Skoki napięcia mają ogromny wpływ na pomiary, ponieważ wykorzystane termistory są silnie powiązane z wartością rezystancji w badanym układzie. Wyniki te, mimo pewnych niedoskonałości układu, pokryły się całkowicie z tymi uzyskanymi z programu ANSYS, co świadczy w dużym stopniu o ich poprawności.

6. Github

Cała programistyczna część projektu został opracowany z wykorzystaniem systemu kontroli wersji GIT oraz zamieszczona na portalu Github. Znajdują się tam zarówno skrypty w języku C++ z Arduino do zapisu danych oraz skrypty w języku Python do ich dalszej analizy.

Link do projektu: [Projekt z przedmiotu MES i MEB w technice](#)

Literatura

- [1] Szczygieł I, *Konwekcyjny Przepływ Ciepła. Metody Obliczeniowe*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013
- [2] Yunus A. et al., *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, Fourth Edition in SI Units, McGraw-Hill Companies 2011
- [3] Kostowski E, *Przepływ Ciepła*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006
- [4] Wojtas M, *Analiza wymiany ciepła w prętach o stałym i zmiennym przekroju*, Instytut Techniki Cieplnej, Politechnika Śląska 2018
- [5] Boxall J., *Arduino. 65 praktycznych projektów*, Wydawnictwo Helion 2014
- [6] Krzyżanowski P., *Obliczenia inżynierskie i naukowe*, Wydawnictwo Naukowe PWN 2021
- [7] McKinney W, *Python w analizie danych. Przetwarzanie danych za pomocą pakietów Pandas i NumPy oraz środowiska IPython*, Wydawnictwo Helion 2018
- [8] Srinivasa Rao C, *CFD Analysis of Heat Transfer problems: Simulation with ANSYS FLUENT*, Wydawnictwo LAP LAMBERT Academic Publishing 2021
- [9] <https://courses.ansys.com/index.php/structures/>, dostęp 3.01.2022
- [10] https://www.ijrdet.com/files/Volume2Issue3/IJRDET_0314_09.pdf, dostęp 3.01.2022