



POLITECHNIKA KRAKOWSKA IM. TADEUSZA KOŚCIUSZKI
WYDZIAŁ FIZYKI MATEMATYKI I INFORMATYKI
KIERUNEK FIZYKA TECHNICZNA



MACIEJ BOROWIEC

**PRZYGOTOWANIE DRUKARKI 3D REPRAP PRUSA MEDNEL i3
DO PRACY Z NOWYMI MATERIAŁAMI O PODWYŻSZONEJ
TEMPERATURZE TOPNIENIA.
ANALIZA PARAMETRÓW CIEPLNYCH DRUKARKI**

PRACA INŻYNIERSKA
STUDIA STACJONARNE

Ocena:

Podpis promotora:

Promotor: *Dr Radosław Kycia*

Kraków 2016

Składam serdeczne podziękowania dla:

Promotora: Dr Radosława Kyci

Pana Prof. Wojciecha Otowskiego

Pani Mgr Katarzyny Karcz

Pana Dr Tomasza Majki

Spis treści

Streszczenie	5
Wstęp	6
Cel i zakres pracy	7
1. Technologia druku 3D	8
1.1. Czym jest druk 3D?	8
1.2. Budowa i zasada działania drukarki pracującej w technologii <i>FDM</i> na przykładzie urządzenia <i>Prusa Mendel i3</i> . Ogólna charakterystyka używanych materiałów drukarskich	9
2. Uruchomienie i podstawowa konfiguracja omawianej drukarki 3D	13
2.1. Wstępne informacje	13
2.2. Charakterystyka RAMPS 1.4 oraz schemat podłączenia. Pierwsza konfiguracja elementów elektronicznych: regulacja sterowników silników krokowych, ustawienie mikrokroków dla silników	13
2.3. Wstępne ustawienia oprogramowania sterującego	18
2.4. Kompilacja i wgrywanie skonfigurowanego oprogramowania <i>Marlin</i> do mikrokontrolera	24
2.5. Instalacja i uruchamianie hosta na przykładzie programu Repetier	25
2.6. Proces kalibracji	26
2.6.1. Weryfikacja liczby kroków dla silników osi: X, Y, Z	26
2.6.2. Poziomowanie osi Z oraz stołu grzewczego	28
2.6.3. Kalibracja ekstrudera	29
2.6.4. Kalibracja parametrów termicznych głowicy i stołu grzewczego	30
2.7. Ustawienie ekstruzji i retrakcji	31
2.8. Przygotowanie modelu do wydruku i pierwsze testy	32
3. Prace nad przystosowaniem drukarki do pracy w temperaturze rzędu 290 °C	34
3.1. Założenia modyfikacji	34
3.2. Podstawowa charakterystyka testowego filamentu PA6/MMT	35
3.3. Wykorzystanie oprogramowania Elmer w celu analizy rozkładu temperatury na elementach głowicy drukującej	35
4. Konceptje modernizacji głowicy drukującej firmy <i>7h7 mod. E</i>	36
4.1. Podstawowa budowa głowicy i zasada działania	36
4.2. Analiza termiczna głowicy <i>7h7 mod. E</i>	37
4.3. Podsumowanie przeprowadzonej analizy	41
5. Konceptja 1: korpus głowicy wykonany z PTFE oraz szklana rurka prowadząca	41
5.1. Założenia i opis idei	41

5.2.	Analiza termiczna rozkładu temperatury-----	42
5.3.	Testowanie zmodyfikowanej głowicy -----	44
5.4.	Podsumowanie wyników analizy i testów praktycznych -----	45
6.	Koncepcja 2: korpus głowicy wykonany z PTFE oraz rurka prowadząca z włókna węglowego-----	45
6.1.	Założenia i opis idei -----	45
6.2.	Testowanie zmodyfikowanej głowicy -----	45
6.3.	Wnioski wyciągnięte na podstawie testów -----	46
7.	Koncepcja 3: dwuczęściowy korpus (PTFE + mosiądz) oraz mosiężna rurka prowadząca -----	47
7.1.	Założenia i opis idei -----	47
7.2.	Analiza termiczna rozkładu temperatury-----	47
7.3.	Testowanie zmodyfikowanej głowicy -----	51
7.4.	Podsumowanie wyników analizy i testów praktycznych -----	51
8.	Koncepcja 4: dwuczęściowy korpus (PTFE + mosiądz) oraz kwarcowa rurka prowadząca z wykorzystaniem wymuszonego obiegu powietrza wokół elementu z PTFE i radiatora -----	52
8.1.	Założenia i opis idei -----	52
8.2.	Testowanie zmodyfikowanej głowicy -----	52
8.3.	Wyniki testów i propozycja rozwiązania problemu na podstawie przeprowadzonej analizy rozkładu temperatury w bloku grzejnym -----	53
9.	Podsumowanie i wnioski -----	56
10.	Bibliografia -----	58

Streszczenie

W niniejszej pracy opisano proces uruchomienia i kalibracji drukarki 3D wykonanej według projektu *RepRap Prusa i3*. W drukarce tej zamontowano polską głowicę firmy *7h7 mod. E*, a następnie podjęto próby związane z przystosowaniem jej do pracy w temperaturze rzędu 290 °C. Celem modyfikacji było umożliwienie druku żytką wykonaną z Poliamidu 6 z dodatkiem montmorylonitu. Materiał ten został wykonany na Politechnice Krakowskiej.

Przeprowadzono również symulacje statycznego rozkładu temperatury na głównych elementach głowicy. Do tego celu wykorzystano darmowy pakiet *Elmer*. Analizie podlegały: blok grzejny głowicy oraz jej korpus (radiator). Modernizację głowicy prowadzono pod kątem zastąpienia obecnie zastosowanych tworzyw sztucznych, materiałami mogącymi swobodnie pracować w temperaturze rzędu 290 °C.

Przeprowadzone analizy i testy pozwoliły na opracowanie wniosków dotyczących dalszych modyfikacji głowicy.

Wstęp

Druk 3D został powstał w 1986 roku, a na przestrzeni ostatnich kilku lat zaczął się dość dynamicznie rozwijać. Stało się to między innymi dlatego, że patent na przestrzenne drukowanie utracił ważność po dwudziestu latach. Prawa patentowe posiadała firma *3D System*. Otwarcie projektu umożliwiło to rozwój otwartego i „darmowego projektu *RepRap*”, zamysłem którego było rozpowszechnienie niskobudżetowych, prostych i samoreplikujących się drukarek 3D. Urządzenia te wykorzystują technologię osadzania topionego materiału (FDM), warstwa po warstwie.

Głównymi materiałami wykorzystywanymi do druku przestrzennego są ABS, PLA oraz nylon. Temperatura topnienia wyżej wymienionych materiałów mieści się w przedziale 180 - 250 °C. Powszechnie dostępne głowice drukujące są projektowane do pracy w takim zakresie temperatur.

Obecnie druk 3D jest powszechnie dostępny. W domowych warunkach można zbudować niskobudżetową drukarkę 3D. Proces urzeczywistniania modeli cyfrowych jest dość czasochłonny. W pewnych sytuacjach ma przewagę nad tradycyjnymi metodami wytwarzania, takimi jak na przykład odlewnictwo, gdzie proces dostosowania maszyn do wyprodukowania jednego prototypowego elementu jest niemalże nieopłacalny.

Druk przestrzenny stosowany jest głównie w przemyśle w celu szybkiego prototypowania. W połączeniu z profesjonalnymi skanerami 3D stwarza ogromne możliwości w branży medycznej. Za ich pomocą można wytworzyć precyzyjne element protez czy modeli przedoperacyjnych. Artyści również korzystają z dobrodziejstw druku przestrzennego, ponieważ w łatwy sposób mogą odtworzyć swoje prace wykonane na komputerze. Modelarze, czy robotycy używają takich urządzeń do wytwarzania potrzebnych elementów do budowy modeli i robotów. Nad rozwojem druku 3D nieustannie pracują profesjonalne firmy jak i hobbyści.

Cel i zakres pracy

Celem pracy jest opis budowy oraz sposobu konfiguracji drukarki 3D RepRap Prusa Mendel i3. Następnie zostanie przebadana możliwość przystosowania jej do pracy z nowymi materiałami o podwyższonej temperaturze topnienia.

Praca ma charakter badawczo - aplikacyjny.

Zakres pracy obejmuje:

- dobranie elementów budowy drukarki według projektu Mendel i3 Joseph'a Prusa,
- montaż, uruchomienie i kalibrację drukarki 3D,
- modernizację głowicy *7h7 mod. E* do pracy w temperaturze rzędu 290 °C poprzez zastosowanie do jej budowy materiałów odpornych na działanie wyżej wymienionej temperatury. Do testów sprawności głowicy użyto *PA6/MMT*¹. Ogólna charakterystyka tworzywa zostanie omówiona w punkcie 3.2.
- przeprowadzenie analizy termicznej z wykorzystaniem oprogramowania *Elmer CSC*, przy wykorzystaniu trójwymiarowych modeli głowicy opracowanych w pakiecie *SolidWorks 2016*.

¹ PA6/MMT - Poliamid 6 z dodatkiem montmorylonitu oraz barwnika (więcej informacji w punkcie 3.2).

1. Technologia druku 3D

1.1. Czym jest druk 3D?

Druk 3D jest to addytywna (przyrostowa) metoda wytwarzania fizycznych obiektów przestrzennych na podstawie cyfrowych trójwymiarowych modeli [1]. Owe modele najczęściej zapisywane są w pliku o rozszerzeniu *STL*², a następnie wirtualnie cięte (dzielone) na poziome warstwy w specjalnym oprogramowaniu zwanym „slajserem” (ang. *Slicer*) i zamieniane na kod maszynowy - *GCODE*.³

Obecnie istnieje wiele technik druku przestrzennego. Poniżej wymieniono kilka najpopularniejszych metod:

FDM (ang. *Fused Deposition Modeling*) [2] zwany również FFF⁴: drukowanie za pomocą roztopionej polimerowej żyłki zwanej filamentem. Jest to obecnie najtańsza i najpopularniejsza wśród domowych użytkowników metoda druku przestrzennego. Jest to technika, którą wykorzystuje omawiana przez nas drukarka. Jej dokładny opis znajduje się w punkcie 1.2 poniżej.

SLA (ang. *Stereolithography*) [2]: pierwsza technologia druku przestrzennego, jej twórcą jest *Charles Hull*. Drukowanie odbywa się za pomocą ciekłych żywic utwardzanych światłem laserowym. Cechuje się dużą dokładnością i wysoką jakością wydruków. Umożliwia położenie warstw rzędu kilku mikronów. Stosuje się ją do wytwarzania precyzyjnych elementów na przykład: w branży medycznej do drukowania protez.

SLS (ang. *Selective Laser Sintering*) [2]: metoda polegająca na wysokotemperaturowym spiekaniu proszku polimerowego, warstwa po warstwie. Należy do jednych z najbardziej skomplikowanych i kosztownych technik druku 3D.

² *STL* - ang. *StereoLithography*, format rozszerzenia plików stworzony w 1989 roku dla potrzeb druku 3D [3]. Jest to triangulacyjne (trójkątne) przedstawienie cyfrowego obiektu przestrzennego, przybliżone za pomocą małych trójkątów.

Następnie każdy wierzchołek opisany jest w kartezjańskim układzie współrzędnych [4].

³ *GCODE* – kod maszynowy, więcej informacji znajduje się pod adresem: www.pl.wikipedia.org/wiki/G_code

⁴ FFF – ang. *Fused Filament Fabrication* nazwa zamiennie używana z *FDM*, powstała dla potrzeb *Open Source*’owego projektu *RepRap*[3] oraz dla potrzeb handlowych [2].

Za początek druku 3D uważa się rok 1984, w którym to *Charls Hull* stworzył, a następnie w 1986 roku opatentował wcześniej wspomnianą technikę *SLA*. W tym samym czasie założył firmę o nazwie *3D System* i rozpoczął produkcję drukarek przestrzennych i świadczenie usług z nim związanych. Następnie w 1988 roku, *Scott Crump* zapoczątkował technikę *FDM*. W tymże roku powstała również metoda *SLS*. Kilkanaście lat później, w roku 2006 zrodziła się koncepcja otwartego projektu *RepRap* zapoczątkowana przez *Adriana Bowyer'a*. Zbudował on pierwszy prototyp samo replikującej⁵ się drukarki, działającej w technologii *FDM* [1].

Ideą projektu *RepRap* jest tworzenie samoreplikujących się urządzeń i darmowym udostępnianiu ich z korzyścią dla szerokiej społeczności. Drukarki *RepRap* to stosunkowo tanie urządzenia (koszt to około 2500-3000 złotych), przeznaczone dla użytkowników domowych. Rozpowszechniane są na licencji *Open Source*⁶ [3].

1.2. Budowa i zasada działania drukarki pracującej w technologii *FDM* na przykładzie urządzenia *Prusa Mendel i3*. Ogólna charakterystyka używanych materiałów drukarskich

Technologia osadzania topionego materiału (*FDM*), zwana również *FFF* jest najpopularniejszą i najtańszą metodą drukowania przestrzennego [6]. Do druku wykorzystuje termoplastyczne tworzywa sztuczne takie jak np.:

ABS (ang. *Acrylonitrile Butadiene Styrene*) - jest to prawdopodobnie najczęściej używany Filament, wykonany z akrylonitrylu, butadienu i styrenu. Znalazł zastosowanie wielu dziedzinach życia (np. *LEGO*™). Pary ABS-u mają negatywny wpływ na zdrowie, z tego powodu zaleca się stosowanie wymuszonej

⁵ Samoreplikująca drukarka – urządzenie, które jest w stanie wytworzyć części do siebie samej. Każda drukarka wykonana zgodnie z zamysłem projektu *RepRap* zawiera części wydrukowane na innej drukarce 3D.

⁶ *Open Source* – licencja oznaczająca otwarte (wolne) oprogramowanie. Ściśle określa sposób dystrybucji oprogramowania wraz z całym jego kodem źródłowym, który można dowolnie modyfikować [5].

wentylacji odprowadzenia par przy długotrwałym drukowaniu. Temperatura topnienia ABS zawiera się w zakresie 210-260 °C. Koszty druku przy wykorzystaniu tego materiału są mniej więcej takie same jak przy druku z PLA (więcej informacji na jego temat zamieszczono w dalszej części tego rozdziału). Obiekt jest zwykle drukowany na podgrzewanym do około 100-115 °C stole grzewczym. Jego powierzchnia pokryta jest wymienną taflą hartowanego szkła. Przewagą ABS nad PLA, jest to, że uzyskane obiekty są wytrzymalsze i mniej kruche, a także mogą pracować w wyższych temperaturach niż PLA. Dlatego też części do drukarek 3D wykonywane są z ABS. Obecnie filamenty z ABS-u są powszechnie dostępne w dwóch średnicach (1,75 mm i 3 mm) oraz w wielu kolorach. Od niedawna w sprzedaży pojawiła się żyłka zmieniająca swoje zabarwienie w zależności od temperatury [7, 8].

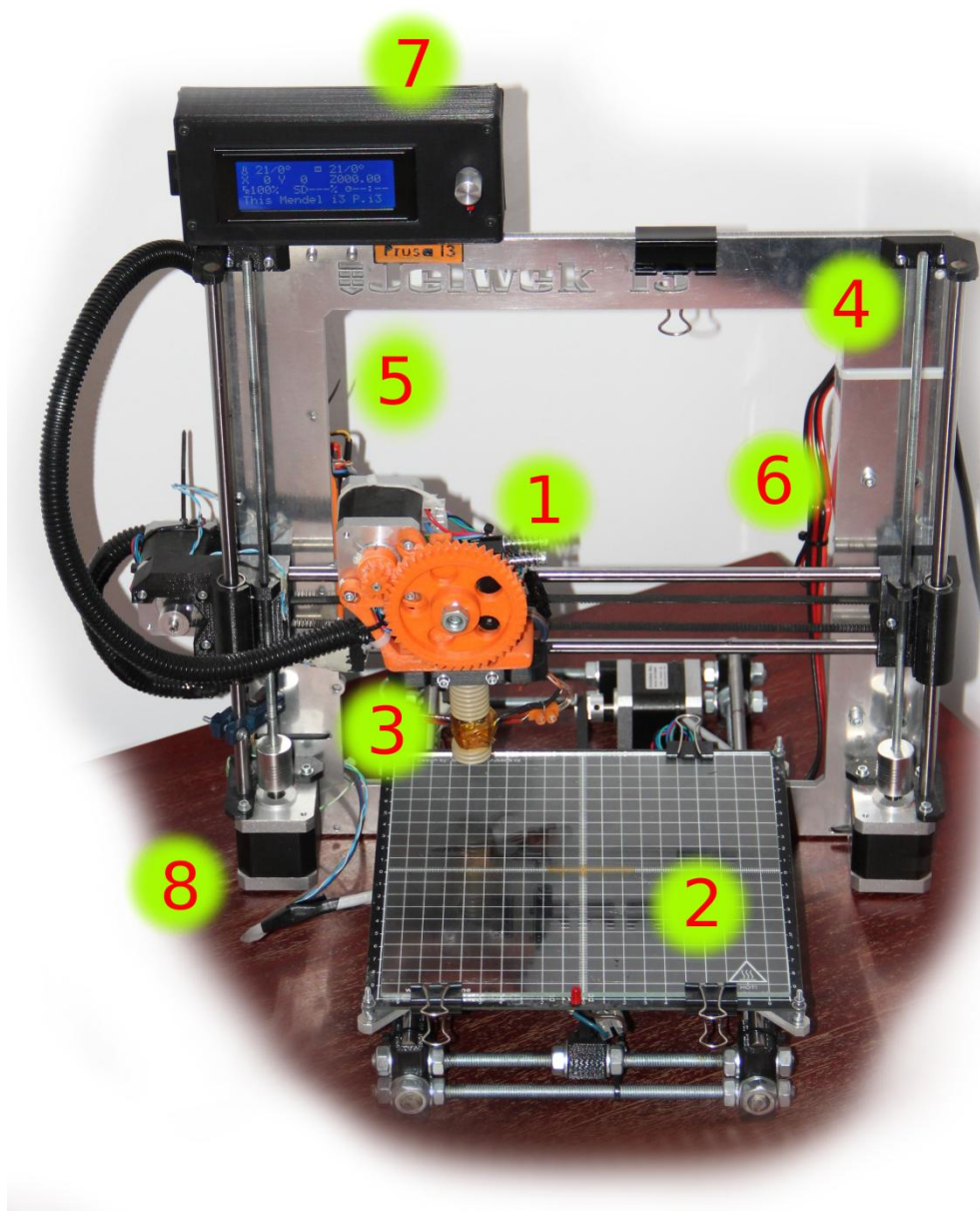
PLA (*polylactic acid*) - czyli polilaktyd, to kolejne bardzo popularne włókno tworzywa sztucznego, wykonane z kwasu mlekowego. Jest biodegradowalny i przyjazny dla środowiska. Temperatura topnienia mieści się w zakresie od 180 °C do 230 °C. Podczas drukowania nie wydziela niebezpiecznych par i zapachów, w związku z czym nie wymaga szczególnych środków bezpieczeństwa i wymuszonej wentylacji. Dobrze przykleja się do stołu w temperaturze pokojowej bez konieczności dodatkowego podgrzewania. Przedmioty drukowane z PLA są wytrzymałe, ale stosunkowo kruche i nie mogą być narażone na działanie wysokich temperatur. Żyłka PLA jest dość tania i dostępna w wielu kolorach o różnych stopniach przezroczystości. Drukowane obiekty mają gładką, połyskującą powierzchnię [7, 8].

Nylon - temperatura topnienia tego materiału mieści się w przedziale 220-250 °C. W przeciwieństwie do ABS nie wydziela par i zapachów w trakcie wydruków. Jest on używany do drukowania elementów mechanicznych, które powinny charakteryzować się wysoką odpornością na pękanie oraz bardzo niskim współczynnikiem tarcia. Potencjalne zastosowanie nylonu w druku 3D to wytwarzanie protez. Nylon jest obojętny dla środowiska – oficjalnie informacja ta nie została jeszcze potwierdzona [7]. Koszty nylonowej żyłki są niemal dwukrotnie większe niż koszt PLA lub ABS. Niestety jedynym dostępnym kolorem jest biały (naturalny) [7, 8].

Oprócz tych najpopularniejszych materiałów korzysta się również z: gumy, Laywood (plastik drewnopodobny) czy wosk [8].

Na uwagę zasługuje tutaj również **HIPS** (ang. *High Impact Polystyrene*). Jest to materiał wykorzystywany do tworzenia podpór w niskobudżetowych drukarkach 3D, pracujących w technologii FDM (FFF). Zalecany jest do druku wspólnie z ABS, ponieważ ma zbliżone do niego właściwości termiczne. Po zakończonym wydruku należy zanurzyć obiekt w specjalnym rozpuszczalniku. Proces rozpuszczania podpór jest dość długotrwały i trwa od 8 do 24 godzin [8].

Filament, czyli żyłka tworzywa sztucznego (o grubość 1,75 mm lub 3,00 mm) zostaje wprowadzona za pomocą specjalnego podajnika (ekstrudera) do rozgrzanej głowicy. Wydruk odbywa się w temperaturze topnienia użytego materiału to jest 190 °C do 250 °C. W stanie półpłynnym, materiał jest наносzony warstwa po warstwie, aż powstanie oczekiwany model [2].



Rys. 1: Drukarka 3D Prusa i3

1 – karetką wraz z ekstruderem (oś X)

2 – ruchomy, podgrzewany stół –
max. 125 °C (oś Y)

3 – głowica drukująca (7h7 mod. E)

4 – prowadnice i śruby pociągowe
osi Z

5 – Elektroniczny moduł sterujący
RAMPS⁷ 1.4

6 – zasilacz prądu stałego (12V, 360 W, 30 A)

7 – Panel sterowania (ekran LCD wraz
z czytnikiem kart pamięci SD)

8 – silnik krokowy NEMA 17

⁷ RAMPS – ang. RepRap Arduino Mega Pololu Shield

2. Uruchomienie i podstawowa konfiguracja omawianej drukarki 3D

2.1. Wstępne informacje

Omawiana drukarka jest oparta o elektronikę RAMPS 1.4 sterowana mikrokomputerem Arduino MEGA 2560 [9]. Całość rozszerzono o panel sterowania składający się z: ekranu LCD, potencjometru oraz czytnika kart pamięci SD, dzięki czemu drukarka stała się samodzielnym urządzeniem, niezależnym od zewnętrznego komputera.

Oprogramowanie mikrokontrolera (Firmware⁸) – w tym przypadku Marlin, napisane zostało w języku C++ i rozpowszechniane jest na licencji GNU⁹ [10].

2.2. Charakterystyka RAMPS 1.4 oraz schemat podłączenia. Pierwsza konfiguracja elementów elektronicznych: regulacja sterowników silników krokowych, ustawienie mikrokroków dla silników

RAMPS 1.4 jest to sterownik umożliwiający połączenie ze sobą mikrokontrolera Arduino, silników krokowych i ich sterowników (A4988) oraz szeregu innych niezbędnych elementów elektronicznych (na przykład termistory lub grzałki).

Ogólna specyfikacja [11,12]:

- napięcie zasilania: 12 V
- pobór prądu: min. 5A (pobór prądu zależy od konfiguracji urządzenia)
- pięć gniazd na sterowniki silników krokowych A4988

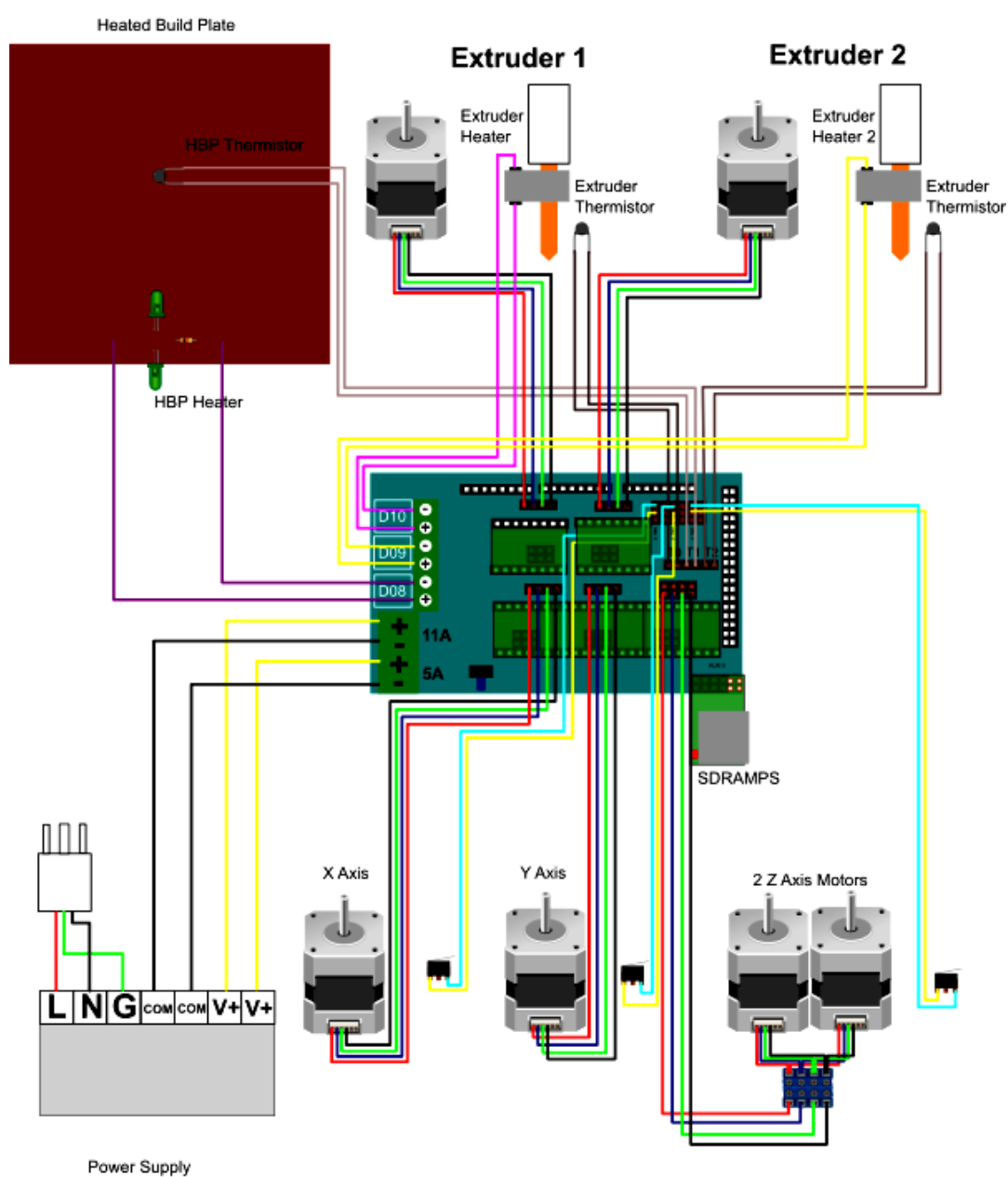
⁸ Firmware - to program, który znajduje się na płycie głównej drukarki. Umożliwia interpretację poleceń z pliku G-Code i odpowiednio kontroluje ruchy urządzenia. Konfiguracja oprogramowania jest przypisana indywidualnie do drukarki. Definiuje się w nim właściwości drukarki 3D, takie jak wymiary robocze, liczbę kroków dla silników, czy ustawienia grzewcze [9].

⁹ GNU – (ang. *General Public License*), Powszechna Licencja Publiczna. Więcej informacji można znaleźć na stronie: <http://www.gnu.org/licenses/> (data dostępu: 12.2015)

- złącze umożliwiające podpięcie zewnętrznego panelu sterownia wraz z czytnikiem kart SD i ekranem LCD.
- moduł przystosowany do pracy z kontrolerem Arduino Mega 2560

Poniżej na rysunku 2 został przedstawiony schemat połączenia elektroniki dostępny pod adresem w referencji [11]

RepRap Arduino Mega Pololu Shield 1.4



Rys. 2: Schemat połączeń elektrycznych układu RAMPS 1.4 [11]

Arduino MEGA 2560 to mikrokontroler oparty na partycie na procesorze *ATmega2560*. Stosowany jest do budowy złożonych projektów, głównie w robotyce i do obsługi drukarek 3D. Zawiera cyfrowe piny (Wejścia/Wyjścia) oraz wyjścia analogowe. Jest stosunkowo prosty w obsłudze. Komunikacja kontrolera z komputerem realizowana jest za pośrednictwem portu szeregowego. Obsługa oraz kompilacja oprogramowania odbywa się poprzez intuicyjny interfejs przygotowany przez producenta. Instalator oprogramowania można pobrać ze strony producenta¹⁰, w wersji na dowolny system operacyjny [12].

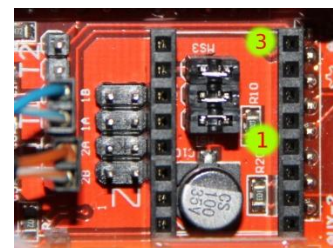
Ogólna specyfikacja techniczna [11]:

- napięcie wejściowe (zalecane): 7-12 V
- napięcie pracy: 5V
- natężenie prądu pobieranego przez układ: ~ 50 mA
- liczba cyfrowych pinów we/wy: 54 (w tym 15 wyjść PWM¹¹)
- liczba wyjść analogowych: 16
- rozmiar pamięci
 - FLASH: 256 KB (w tym 8 KB zarezerwowane dla bootloadera)
 - SRAM: 8 KB
 - EEPROM: 4 KB
- częstotliwość zegara: 16 MH

W procesie regulacji sterowników silników krokowych możemy wyróżnić dwa etapy:

a) Ustawienie mikrokroku

Zanim sterowniki zostaną wpięte w odpowiednie gniazda należy ustawić żądaną rozdzielczość. Konfigurację przeprowadza się przy pomocy zworek



Rys. 3: Zworki do regulacji wielkości mikrokroku umieszczone na płycie głównej RAMPS 1.4

¹⁰ <https://www.arduino.cc/en/Main/Software> (data dostępu: 12.2015)

¹¹ PWM – z ang. „Pulse Width Modulation”, czyli „Modulacja Szerokości Impulsu”.

umieszczonych pod sterownikami. W tabeli 1 przedstawiono odpowiednie kombinacje połączeń:

Wielkość mikrokroku	Zworka 1	Zworka 2	Zworka 3
1/1	0	0	0
1/2	1	0	0
1/4	0	1	0
1/8	1	1	0
1/16	1	1	1

Tab. 1: Tabela przedstawiająca konfiguracje zworek dla poszczególnych wielkości mikrokroku (0 – brak zworki, 1 – zworka wpięta)

- b) Dobranie odpowiedniego natężenia wyjściowego w zależności od typu sterownika i parametrów posiadanych silników krokowych.

W omawianym układzie *RAMPS 1.4* wykorzystano sterowniki *Stepstick A4988* oraz bipolarne silniki krokowe *NEMA 17 (Wantai 42BYGHW809)*.

Istotne parametry sterownika [13]:

- napięcie zasilania (V_{BB}): do 35 V
- maksymalne natężenie prądu wyjściowego dla silnika (I_{OUT}): 2 A
- napięcie referencyjne - wzorcowe (V_{ref}): max 5,5 V
- dostępne rozdzielczości: 1/2, 1/4, 1/8, 1/16

Parametry silnika [14]:

- ilość kroków na 1 obrót: 400 kroków ($0,9^\circ/\text{krok}$)
- napięcie zasilania: 2,8 V
- moment obrotowy: 47 N*cm
- natężenie pobieranego prądu: 1,7 A/fazę

Prąd wyjściowy regulowany jest niewielkim potencjometrem widocznym na płycie. Korzystając z poniższych wzorów (1 - 4) należy wyliczyć odpowiednią wartość napięcia referencyjnego (V_{REF}) na potencjometrze i taką ustawić.

$$I_{OUT} = \frac{V_{REF}}{8 \cdot R_s}, \quad (1)$$

gdzie: $R_s = 0,2 \Omega$ - opór charakterystyczny dla każdego sterownika (objaśnienie we wzorze 2)

$I_{OUT} = 1,7 A$ – prąd pobierany przez silnik

V_{REF} – napięcie referencyjne (zwane również wzorcowym lub odniesienia)

Przekształcając powyższy wzór (1) obliczono V_{REF} , które następnie ustawiono na stykach potencjometru i masy (GND) sterownika:

$$V_{REF} = I_{OUT} \cdot (8 \cdot R_s), \quad (2)$$

Ważne: wartości oporu R_s mogą się różnić w zależności od typu sterownika (Stepstick $R_s = 0,2 \Omega$ lub Pololu $R_s = 0,05 \Omega$) [13]

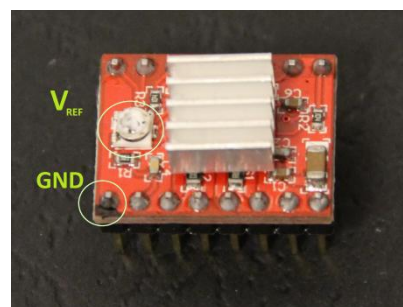
Ze wzoru (2) otrzymujemy:

$$\begin{aligned} I_{OUT} &= 1,70 A, \\ V_{REF} &= 1,70 \cdot 8 \cdot 0,20 = 2,72 [V], \end{aligned} \quad (3)$$

W celach bezpieczeństwa, aby uniknąć uszkodzenia elektroniki lub silnika, do obliczeń przyjęto nieco mniejszy prąd wyjściowy:

$$\begin{aligned} I_{OUT} &= 1,67 A, \\ V_{REF} &= 1,67 \cdot 8 \cdot 0,20 = 2,67 [V], \end{aligned} \quad (4)$$

Wyliczoną wartość (nieco mniejsza niż teoretyczną) ustawiono na każdym sterowniku. Pomiar wykonano pomiędzy punktami GND (-) a dodatnią częścią potencjometru regulowanego (środek elementu), jak pokazano na rysunku 4.



Rys. 4: Sterownik silnika krokowego wraz z oznaczeniami punktów pomiarowych.

2.3. Wstępne ustawienia oprogramowania sterującego

Po instalacji (informacje dotyczące instalacji i kompilacji omawianego oprogramowania opisano w rozdziale 2.4) interfejsu *Arduino* pobrano Firmware *Marlin* (sprawdzona, stabilna kompilacja z 2013 roku). Następnie wczytano kod źródłowy do kompilatora i przystąpiono do edycji pliku konfiguracyjnego *Configuartion.h*:

- a) Na początku wprowadzono datę kompilacji i nazwę urządzenia:

```
#define STRING_VERSION_CONFIG_H __DATE__ "2015,10,13"  
__TIME__ #define STRING_CONFIG_H_AUTHOR "(MB, Prusa i3)"
```

- b) Kolejny krok to ustawienie prędkości przesyłu danych przez port szeregowy. Domyślną wartością jest 256000. Na początku nie ma potrzeby jej zmieniać. Musi być ona taka sama jak wartość *Baudrate*¹² w konfiguracji portu szeregowego służącego do komunikacji komputera z mikrokontrolerem *Arduino*.

```
#define BAUDRATE 256000
```

- c) Ustawienie odpowiedniej wartości dla płyty głównej. W omawianym przypadku jest to *RAMPS 1.3-1.4* (z konfiguracją wyjść: ekstruder, wentylator, stół grzewczy). Zgodnie z opisem w kodzie oprogramowania odpowiada ono wartości 33:

```
#define MOTHERBOARD 33
```

- d) Zdefiniowanie liczby ekstruderów w danej drukarce:

```
#define EXTRUDERS 1
```

- e) Ustawienie typu zasilacza w tym przypadku jest to *ATX*, co odpowiada wartości 1:

```
#define POWER_SUPPLY 1
```

¹² BAUDRATE – ang. *baud rate*, czyli prędkość transmisji.

- f) Następnie należy zadeklarować rodzaj użytych termistorów w odpowiednich elementach drukarki, czyli dla termistora w głowicy grzewczej (*SENSOR_0*) oraz w podgrzewanym stole (*SENSOR_BED*). Oba termistory są typu *EPCOS 100 kΩ*, co zgodnie z opisem odpowiada wartości 1. Brak pozostałych czujników oznaczamy wartością 0:

```
#define TEMP_SENSOR_0 1
#define TEMP_SENSOR_1 0
#define TEMP_SENSOR_2 0
#define TEMP_SENSOR_BED 1
```

- g) Ustawienie wartości histerezy temperaturowej. Domyślnie jest to 3 i jest podawana w stopniach Celsjusza. To ustawienie definiuje tolerancję temperatury głowicy i stołu grzewczego. Układ utrzymuje zadana temperaturę z dokładnością +/- 3 °C. Zaleca się pozostawienie domyślnych ustawień:

```
#define TEMP_HYSTERESIS 3
```

- h) Ustawienie maksymalnych wartości temperatury. Należy dobrać takie wartości, aby po ustawieniu zadanej temperatury, żaden element nie został uszkodzony. Standardowe drukarki mogą bezpiecznie rozgrzać głowicę do maksymalnie 250 °C i stół do 120 °C. Po przekroczeniu tych wartości mogą ulec przegrzaniu elementy głowicy lub termistory. Omawiane urządzenie przystosowana do pracy w wyższych temperaturach, co pozwala na pracę przy poniższych ustawieniach:

```
#define HEATER_0_MAXTEMP 295
#define BED_MAXTEMP 120
```

- i) Ustawienia tak zwanych PID-ów są potrzebne do prawidłowego sterowania grzałkami głowicy, tak aby kontroler z odpowiednim wyprzedzeniem mógł włączyć lub wyłączyć zasilanie. Są to kolejne parametry, które mają na celu utrzymanie stałej temperatury jak najbliżej zadanej wartości. Tych ustawień na tym etapie nie można skonfigurować.

- j) Po uruchomieniu drukarki, za pomocą kodów maszynowych *GCODE* należy uruchomić funkcję „PID tuning”. Procedura zostanie opisana w kolejnym rozdziale.

```
#define DEFAULT_Kp 14.58
#define DEFAULT_Ki 0.82
#define DEFAULT_Kd 65.23

#define DEFAULT_bedKp 231.34
#define DEFAULT_bedKi 19.50
#define DEFAULT_bedKd 686.05
```

- k) Zabezpieczenie przed ekstruzją na zimnej głowicy, należy zdefiniować tutaj (wartość podana w stopniach Celsjusza):

```
#define EXTRUDE_MINTEMP 200
```

Jest to minimalna temperatura głowicy, przy której może zostać uruchomiony silnik ekstrudera.

- l) Konfiguracja użytych wyłączników krańcowych. Drukarka Prusa i3 używa tylko trzech krańcówek, które służą do ustawienia wszystkich osi w pozycji początkowej (HOME POSITION):

```
#define ENDSTOPPULLUP_XMAX
#define ENDSTOPPULLUP_YMAX
#define ENDSTOPPULLUP_ZMAX

#define ENDSTOPPULLUP_XMIN
#define ENDSTOPPULLUP_YMIN
#define ENDSTOPPULLUP_ZMIN
```

- m) W przypadku bazowania do wyłączników MIN, poniższe wartości należy ustawić na -1 (gdy do MAX: 1):

```
#define X_HOME_DIR -1
#define Y_HOME_DIR -1
#define Z_HOME_DIR -1
```

- n) Ustawienie typów poszczególnych wyłączników krańcowych. Mogą być Normalnie Otwarte (NO) lub Normalnie Zamknięte (NC). Do budowy omawianej drukarki użyto uniwersalnych wyłączników krańcowych umożliwiających podłączenie w obu wariantach. Ostatecznie połączono w konfiguracji NO:

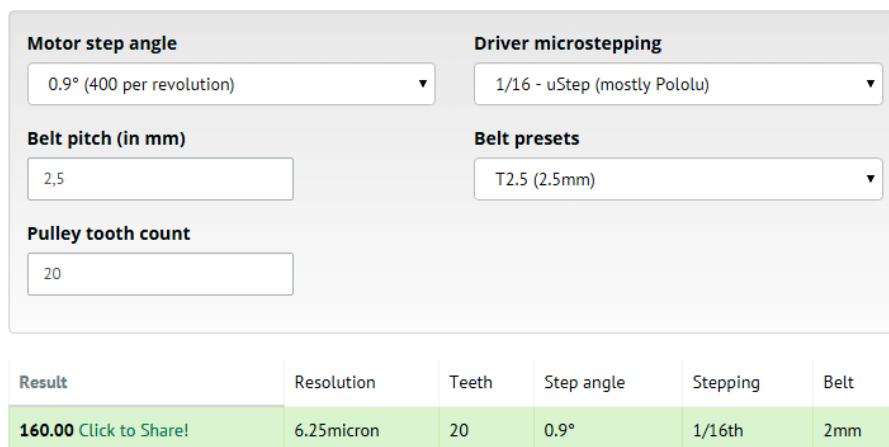
```
const bool X_MIN_ENDSTOP_INVERTING = false;  
const bool Y_MIN_ENDSTOP_INVERTING = false;  
const bool Z_MIN_ENDSTOP_INVERTING = false;
```

W przypadku połączenia NC wartości *false* należy zmienić na *true*.

- o) W przypadku braku krańcówek odpowiadających za maksymalne położenie, należy pamiętać o ustawieniu maksymalnych wychyleń osi (wartości podane w milimetrach). Precyzyjne dobranie poniższych parametrów opisano w kolejnym rozdziale. Podane odległości są właściwymi parametrami dla omawianej drukarki:

```
#define X_MAX_POS 180  
#define X_MIN_POS 0  
#define Y_MAX_POS 180  
  
#define Y_MIN_POS 0  
#define Z_MAX_POS 135  
#define Z_MIN_POS 0
```

- p) Liczbę kroków i wielkość przyspieszenia dobiera się korzystając z kalkulatora autorstwa Josepha Prus'a. Narzędzie dostępne jest online¹³. Wyniki przeprowadzonych obliczeń z wykorzystaniem wspomnianego narzędzia znajdują się na ilustracjach 5, 6 oraz 7



Result	Resolution	Teeth	Step angle	Stepping	Belt
160.00 Click to Share!	6.25micron	20	0.9°	1/16th	2mm

Rys. 5: Wyniki obliczeń dotyczących kalibracji silników krokowych osi X i Y

¹³ <http://prusaprinters.org/calculator/> (data dostępu: 12.2015)

Result	Leadscrew pitch	Step angle	Stepping	Gear ratio
8000.00 Click to Share!	0.8	0.9°	1/16th	1 : 1

Rys. 6: obliczeń dotyczących kalibracji silników krokowych osi Z

Wyliczone parametry należy wprowadzić w poniższej linii (parametry w nawiasach klamrowych odnoszą się odpowiednio do ustawień osi X, Y, Z oraz ekstrudera):

```
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT  
                                {161.00,161.00,8000.00,425.4}
```

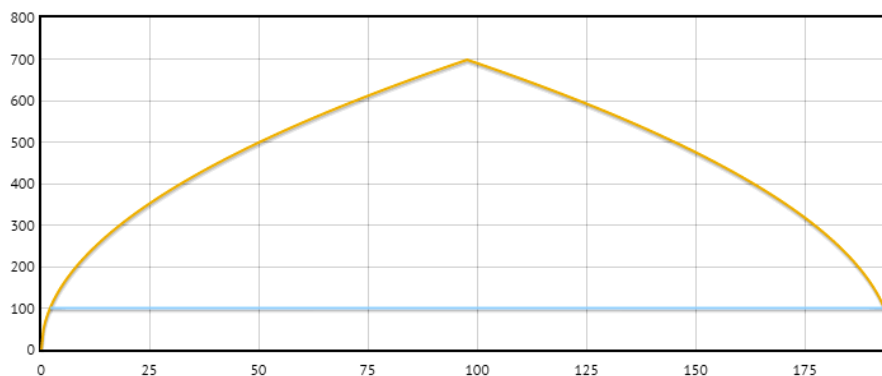
- q) Prędkość posuwu oraz przyspieszenie należy dobrać doświadczalnie po uruchomieniu drukarki tak, aby silniki nie gubiły kroków na całej długości osi. Zazwyczaj wartość przyspieszenia mieści się w przedziale $2500 - 3000$ [m/s²]:

```
#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE  
                                {100, 100, 1.20, 150.0}  
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION  
                                {2500, 2500, 2500, 3000}
```

Przy doborze powyższych parametrów może znów przydać się w/w kalkulator Prusy – podpunkt: *Acceleration*.

Znajduje się tam generator wykresów zależności prędkości od posuwu z odniesieniem do przyspieszenia.

Acceleration	<input type="text" value="2500"/> mm/s ²	Distance or axis length	<input type="text" value="195"/> mm
Desired speed	<input type="text" value="100"/> mm/s		



Rys. 7: Dobór optymalnej prędkości posuwu oraz maksymalnego przyspieszenia

- r) Ustawienia pozostałych parametrów dotyczące ruchu zaleca się pozostawić domyślne:

```
#define DEFAULT_ACCELERATION          1000
#define DEFAULT_RETRACT_ACCELERATION 2000

#define DEFAULT_XYJERK                20.0 // (mm/sec)
#define DEFAULT_ZJERK                 0.3  // (mm/sec)
#define DEFAULT_EJERK                 5.0  // (mm/sec)
```

- s) Marlin umożliwia zaprogramowanie domyślnych wartości dla druku materiałem PLA i ABS:

```
#define PLA_PREHEAT_HOTEND_TEMP  210
#define PLA_PREHEAT_HPB_TEMP     65
#define PLA_PREHEAT_FAN_SPEED    0

#define ABS_PREHEAT_HOTEND_TEMP  220
#define ABS_PREHEAT_HPB_TEMP     110
#define ABS_PREHEAT_FAN_SPEED    0
```

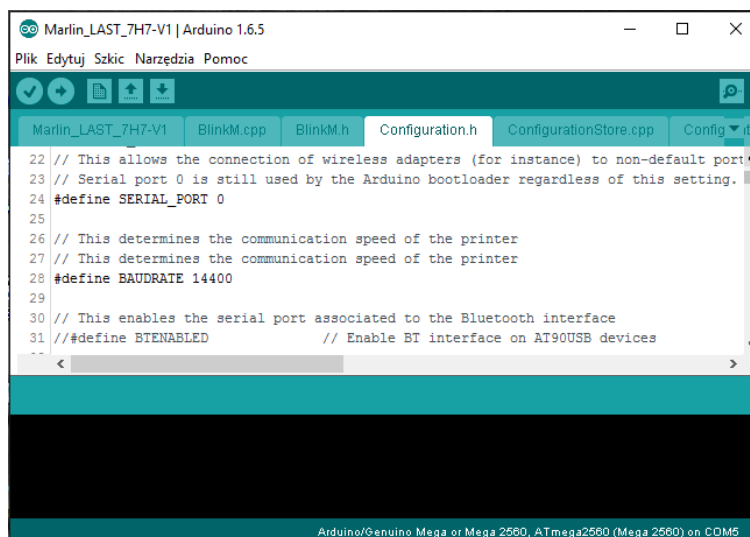
- t) W przypadku, gdy moduł RAMPS zostaje rozszerzony o ekran LCD, czytnik, kart SD, bluetooth itp. Należy aktywować linię definiującą dodane rozszerzenie. W omawianym przypadku jest to ekran LCD wraz z czytnikiem, zdefiniowany w oprogramowaniu jako:

```
#define REPRAP_DISCOUNT_SMART_CONTROLLER
```

Każda z opcji została opisana w komentarzach w kodzie źródłowym. Software Marlin daje szerokie możliwości co do regulacji i wszelkich zaawansowanych ustawień kontrolera [11, 12, 14 – 16].

2.4. Kompilacja i wgrywanie skonfigurowanego oprogramowania *Marlin* do mikrokontrolera

Po podłączeniu należy pobrać sterowniki do Arduino i zainstalować je. Następnym krokiem jest weryfikacja ustawień portu szeregowego w Menadżerze urządzeń.



```
Marlin_LAST_7H7-V1 | Arduino 1.6.5
Plik Edytuj Szkic Narzędzia Pomoc
Marlin_LAST_7H7-V1 | BlinkM.cpp | BlinkM.h | Configuration.h | ConfigurationStore.cpp | Config
22 // This allows the connection of wireless adapters (for instance) to non-default port
23 // Serial port 0 is still used by the Arduino bootloader regardless of this setting.
24 #define SERIAL_PORT 0
25
26 // This determines the communication speed of the printer
27 // This determines the communication speed of the printer
28 #define BAUDRATE 14400
29
30 // This enables the serial port associated to the Bluetooth interface
31 //#define BTENABLED // Enable BT interface on AT90USB devices
--
< >
```

Arduino/Genuino Mega or Mega 2560, ATmega2560 (Mega 2560) on COM5

Rys. 8: Zrzutek ekranu pokazujący zainstalowany interfejs Arduino

Podczas próby połączenia napotkano na problem. Połączenie było możliwe dopiero po zmianie prędkości przesyłu 256000 na 14400. Ten parametr musi być TAKI SAM jak ten w oprogramowaniu drukarki 3D. Połączenie szeregowo jest później wykorzystywane do kontrolowania pracy urządzenia, dlatego w kodzie źródłowym należy zmienić następującą stałą na tą skonfigurowaną w ustawieniach portu:

```
#define BAUDRATE 14400
```

Po ponownym uruchomieniu interfejsu Arduino trzeba wybrać typ mikrokontrolera (*Narzędzia -> Płyta -> Arduino Mega 2560*), a następnie wczytać ostatnio modyfikowane oprogramowanie Marlin. Można je skompilować i wgrać

do mikrokontrolera, klikając strzałkę „Wgraj”. W razie problemów z kompilacją oprogramowanie nie prześle plików do kontrolera [15].

2.5. Instalacja i uruchomienie hosta na przykładzie programu *Repetier*

Instalacja oprogramowania jest intuicyjna. Więcej szczegółów można znaleźć na stronie domowej projektu¹⁴.

Repetier instaluje od razu dwa slicery - *Slic3r* i *Cura*, które są uruchamiane z poziomu hosta jak i mogą pracować jako samodzielne aplikacje. W kolejnym podrozdziale zostanie omówiony *Slic3r*.

Po uruchomieniu hosta skonfigurowano ustawienia drukarki według parametrów podawanych w oprogramowaniu mikrokontrolera oraz ustawień portu szeregowo (opisano w poprzednim rozdziale).

Rys. 9: Zrzut ekranu przedstawiający konfigurację połączenia użytego hosta do obsługi omawianego urządzenia.

Gdy wprowadzono wszystkie potrzebne ustawienia, połączenie drukarki z hostem powinno zakończyć się sukcesem. Przechodząc do karty „Kontrola ręczna” możemy sterować drukarką. Aby była możliwość sprawdzenia działania

¹⁴ <http://www.repetier.com/> (data dostępu: 12.2015)

silnika ekstrudera należy wprowadzić w wierszu poleceń kod blokujący zabezpieczenie ekstruzji na zimnej głowicy: *M302* (ekstruzję należy przeprowadzić „na sucho” – bez filamentu).

Po weryfikacji ustawień Marlina poprzez kontrolę ręczną można przystąpić do kalibracji drukarki. W razie potrzeby należy wprowadzić odpowiednie korekty w pliku *Configuration.h* i powtórzyć procedurę kompilacji i wgrywania oprogramowania.

2.6. Proces kalibracji

2.6.1. Weryfikacja liczby kroków dla silników osi: X, Y, Z

W trakcie testowania różnych parametrów możliwa jest szybka ingerencja w pamięć EEPROM, ale należy pamiętać, aby ostatecznie ustawienia ponownie zapisać z poziomu kodu źródłowego Marlin'a. W ten sposób można trwale zdefiniować domyślne ustawienia dla danej drukarki. Pamięć EEPROM można w trakcie pracy drukarki zmodyfikować dla potrzeb jednorazowego wydruku, a następnie przywrócić je do wcześniej zdefiniowanych w kodzie wartości domyślnych.

W dalszej części rozdziału opisano proces kalibracji drukarki. Do przeprowadzenia pomiaru potrzebna będzie suwmiarka.

Procedura przebiega analogicznie dla każdej osi i zawiera się w kilku prostych krokach:

- a) Połączenie z drukarką.
- b) Wyzerowanie badanej osi.

Przed pomiarami dla osi Z należy zweryfikować czy dysza nie uderzy w stół grzewczy. Gdyby tak się działo, należy podnieść nieco wyżej odpowiednią końcówkę. Na tym etapie kalibracji wielkość szczeliny pomiędzy osią Z a stołem grzewczym nie ma znaczenia. Najważniejsze jest, aby oś była wypoziomowana – więcej informacji na ten temat w podrozdziale 2.6.2.

- c) Obranie punktu zerowego do pomiaru suwmiarką.

- d) Wydanie polecenia przesuwu o X mm.
- e) Pomiar odległości po przesunięciu elementu o X mm. Zaleca się wykonanie więcej niż jeden pomiar dla różnych wartości X .
- f) Weryfikacja pomiarów z suwmiarki i odległości przesuwu X . Wielkość rzeczywistego przesuwu powinna być identyczna jak ta zadana.
 W przypadku różnicy należy dokonać modyfikacji liczby kroków i wykonać pomiar ponownie.

Nową liczbę kroków można sprawnie wyliczyć z proporcji (wzór 5):

$$n = \frac{P_z \cdot k}{P_R}, \quad (5)$$

gdzie: P_z – wartość zadanego posuwu [mm],
 P_R – wartość rzeczywistego przesunięcia [mm],
 k – aktualna liczba kroków,
 n – nowa liczba kroków

W tabeli 2 przedstawiono dane z procesu kalibracji omawianej drukarki dla każdej z osi:

OŚ X			
Lp.	Liczba kroków (k)	Zadany posuw (P_z) [mm]	Rzeczywista odległość (P_R) [mm]
1.	160,0	10,0	9,90
2.		50,0	49,51
3.	161,6	10,0	10,01
4.		50,0	50,05
OŚ Y			
Lp.	Liczba kroków (k)	Zadany posuw (P_z) [mm]	Rzeczywista odległość (P_R) [mm]
1.	161,6	10,0	10,00
2.		50,0	50,01
OŚ Z			
Lp.	Liczba kroków (k)	Zadany posuw (P_z) [mm]	Rzeczywista odległość (P_R) [mm]
1.	8000,0	10,0	10,01
2.		50,0	50,05

Tab. 2: Dane z procesu kalibracji osi X, Y i Z

Czynność należy powtarzać, aż do osiągnięcia zadowalających wyników.

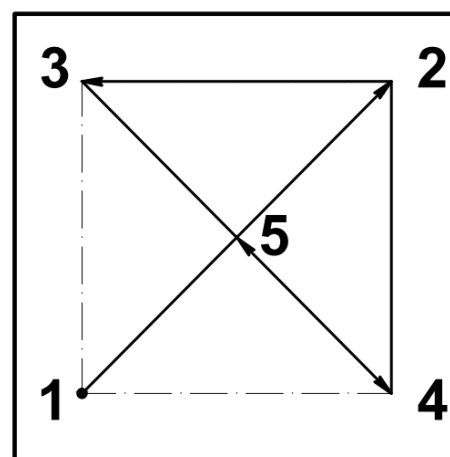
2.6.2. Poziomowanie osi Z oraz stołu grzewczego

Przed przystąpieniem do poziomowania stołu roboczego należy sprawdzić odległość osi Z względem silników napędowych (lub ich uchwytów). Odległości te muszą być takie same. Dobór wysokości osi Z przeprowadza się z zamontowaną głowicą, tak aby odległość między dyszą a stołem była możliwie jak najmniejsza (ok. 1 mm). Dopiero po dokładnym wykonaniu tej czynności można przystąpić do ustawiania stołu. Procedurę tą opisano w dalszej części bieżącego rozdziału.

Od dokładności wy poziomowania stołu zależy jakość wydruku. W przypadku niedokładnego ustawienia łoża roboczego, wydruk może być zdeformowany, a grubość warstw może się różnić. Ponadto mogą wystąpić problem z przyklejeniem się pierwszej warstwy do stołu.

Metod na poziomowania stołu jest kilka. W omawianej drukarce 3D użyto najprostszej, najtańszej i ogólnodostępnej metody z kartką papieru do drukarek. Oprócz tego można korzystać z profesjonalnych narzędzi takich jak czujniki zegarowe czy szczelinomierze, jednak są one kosztowniejsze i trudniej o dostępność tych przyrządów [2].

Grubość arkusza papieru drukarskiego o gramaturze 80 g/m² wynosi ~0,1 mm. Wycięty pasek o szerokości 1-2 cm może z powodzeniem posłużyć jako prowizoryczny szczelinomierz. Do pomiarów warto wykonać drugi pasek składający się z dwóch warstw kartki – ~0,2 mm. Odległość dyszy od stołu powinna wynosić około 0,1 mm. Cieńszy pasek musi wchodzić z lekko wyczuwalnym oporem, ale tak, by nie był jednocześnie rysowany przez dyszę. Szczelinomierz o grubości 0,2 powinien być bardzo dopasowany i lekko zarysowany przez dyszę.



Rys. 10: Schemat obrazujący kolejność i rozmieszczenie punktów pomiarowych przy kalibracji stołu roboczego.

Pomiar przeprowadzono w pięciu punktach na powierzchni stołu, leżących odpowiednio w czterech rogach z marginesem wynoszącym 1 cm oraz w centralnym punkcie – zgodnie ze schematem na rysunku 10. Przed pomiarami sprowadzono wszystkie trzy osie pozycji początkowej i rozgrzano stół do temperatury roboczej wynoszącej 105 °C, zachowując przy tym szczególną ostrożność. Następnie w ustawiono odległość dyszy od stołu operując krańcówką osi Z, tak aby dysza zbliżyła się do stołu na ok. 0,5-1,0 mm. Po wykonaniu tej czynności rozpoczęto poziomowanie stołu za pomocą papierowego szczelinomierza - kolejność i punkty pomiarowe pokazano na schemacie po prawej.

2.6.3. Kalibracja ekstrudera

Kalibracja ekstrudera podobnie jak poprzednio polega na ustawieniu odpowiedniej liczby kroków dla silnika, z tym, że w obliczeniach należy uwzględnić dodatkowo kilka ważnych parametrów. Potrzebne wielkość oraz wzory przedstawiono w tabeli 3:

Nazwa parametru	Symbol	Wartość
Ilość zębów dużego koła zębatego:	N	47
Ilość zębów małego koła zębatego:	n	9
Mikrokrok:	k	1/16
Średnica radełka ¹⁵ :	s	7,15 [mm]
Ilość kroków silnika	K	400

Tab. 3: Dane potrzebne do kalibracji ekstrudera, użyte we wzorze (6)

$$E_k = \frac{K \cdot \frac{1}{k} \cdot \left(\frac{N}{n}\right)}{\pi s}, \quad (6)$$

Ekstruder			
Lp.	Liczba kroków (E_k)	Zadany posuw (P_z) [mm]	Rzeczywista odległość (P_R) [mm]
1.	1488,04	10,0	9,33
2.		20,0	18,65
3.	1594,89	10,0	10,01
4.		20,0	20,02

Tab. 4: Wyniki kalibracji ekstrudera

¹⁵ Średnica radełka – nacięty rowek na śrubie ekstrudera; miejsce styku śruby z filamentem

Wyliczoną wartość wprowadzono do Marlina. Wartość ta może jednak ulec zmianie, ponieważ wszystko zależy od używanego filamentu.

2.6.4. Kalibracja parametrów termicznych głowicy i stołu grzewczego

Tytułowe ustawienia dobierane są automatycznie przez oprogramowanie Marlin. Regulator PID (*ang. Proportional-Integral-Derivative*) – jest to algorytm kontrolny proporcjonalno-całkowo-różniczkowy służący do ciągłego sterowania elementami grzewczymi drukarki.

PID przyjmuje odpowiednio trzy parametry K_P , K_I i K_D . Owe parametry są dobrane prawidłowo, gdy temperatura dyszy oraz stołu w trakcie pracy jest stała lub ma sporadycznie niewielkie odchylenie ($\pm 1-2$ °C) od zadanej temperatury. Autotuning uruchamia się i zatwierdza z poziomu wiersza poleceń hosta, wprowadzając odpowiednio komendy kodu maszynowego:

a) Uruchomienie:

M303 Ea Sb Cc , (7)

*gdzie: a – identyfikator badanego elementu (1 – stół grzewczy, 0 – głowica drukująca)
b – temperatura w °C
c – liczba cykli (zalecane 8-10)*

b) Zapis wygenerowanych wartości:

- dla stołu: *M304 P1 I2 D3*
- dla głowicy *M301 P1 I2 D3*

gdzie: 1,2,3 to odpowiednie wyliczone wartości

Po wymianie głowicy lub któregoś elementu należy przeprowadzić ponowną konfigurację.

Dobór współczynników K_P , K_I i K_D dla posiadanej głowicy (*7h7 mod. E*) [15]:

Uruchomienie: *M303 E0 S230 C8*

Wynik: *$K_P = 39,04$; $K_I = 3,40$; $K_D = 111,94$;*

Zapis: *M301 P39.04 I3.40 D111.94*

Dobór współczynników K_p , K_I i K_D dla stołu grzewczego [15]:

Uruchomienie: *M303 E-1 S110 C8*
Wynik: $K_p = 235,90$; $K_I = 25,53$; $K_D = 544,97$;
Zapis: *M304 P235.90 I25.53 D544.97*

2.7. Ustawienie ekstruzji i retrakcji

Ustawienie ilości wypływającego materiału (ekstruzji) oraz ilości materiału zasysanego (retrakcji) dobiera się metodą doświadczalną, w zależności od posiadanego filamentu. Każda żyłka jest inna i dlatego ustawienia ekstruzji i retrakcji dla jednego filamentu mogą być niekorzystne dla innego materiału. Przy doborze powyższych ustawień duże znaczenie ma wielkość drukowanego modelu oraz prędkość wydruku.

Na dobór ekstruzji oraz retrakcji nie ma jednoznacznej receptury. Ustawienia te definiuje się w slicerze i należy je dobrać metodą prób i błędów korygując ustawienie. Po wielu godzinach spędzonych nad ustawieniem można osiągnąć optymalne wartości dla różnych wydruków.

Przy kalibracji omawianej drukarki użyto modelu kostki prostopadłościenną (rysunek 11) o wymiarach $20 \times 20 \times 10$ milimetrów. Poniżej optymalne ustawienia *slicera* dla głowicy *7h7 mod. E* oraz filamentu ABS (producent: *efilament3d*) – sposób przygotowania modelu do wydruku opisano w punkcie 2.8.

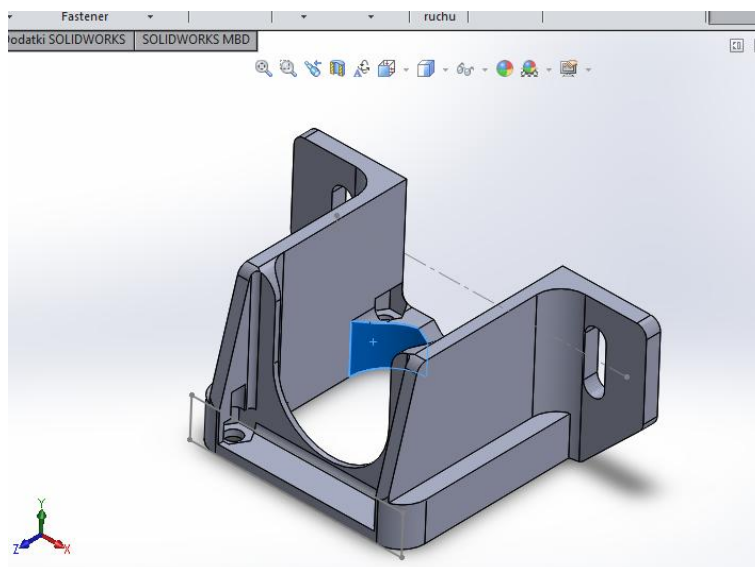


Rys. 11: Część wydruków wykonanych w trakcie kalibracji urządzenia

2.8. Przygotowanie modelu do wydruku i pierwsze testy

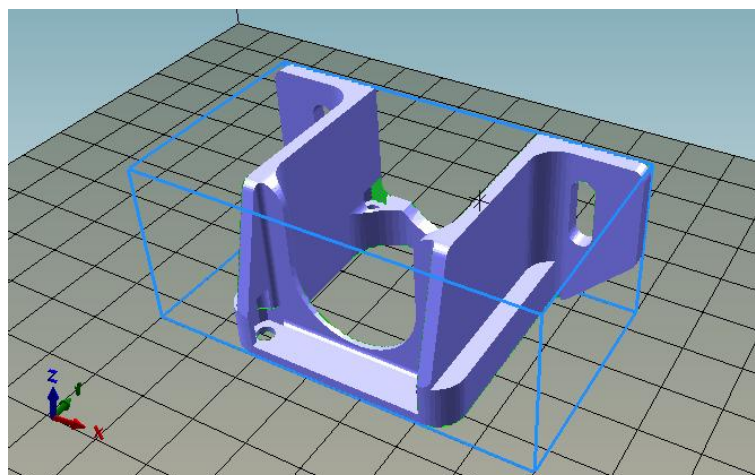
W procesie realizacji wydruku można wyróżnić kilka etapów [7]:

- a) Stworzenie modelu przestrzennego (np. w *Solidworks*, czy *SketchUP*) lub poprzez skaner 3D. Prezentowany model został zastosowany w jednym z wariantów dostosowania głowicy do pracy w wyższej temperaturze topnienia.



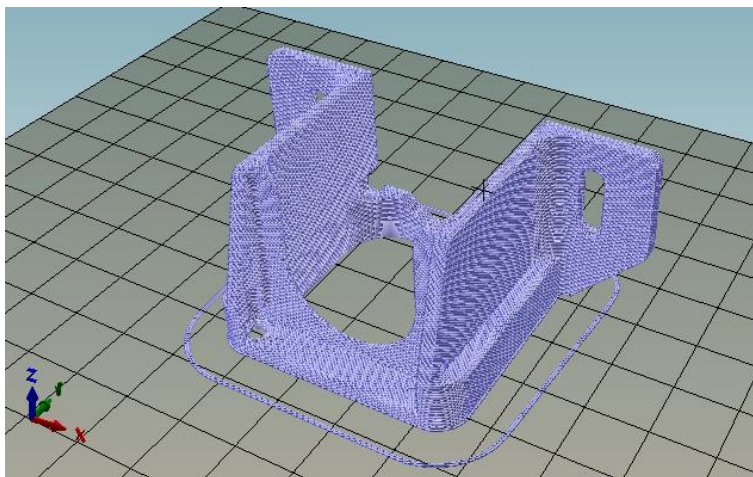
Rys. 12: Ukończony model uchwytu wentylatora, wykorzystany w dalszej części badań

- b) Wygenerowanie pliku siatki przestrzennej – STL.



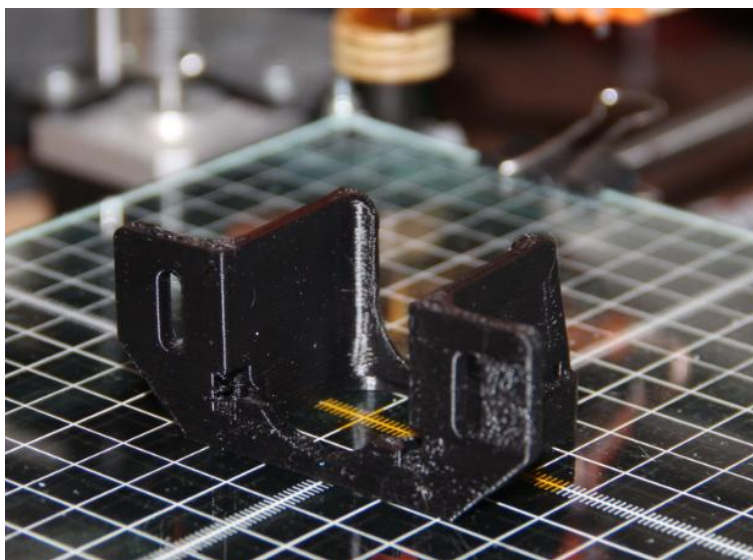
Rys. 13: Wczytany model w formacie stl do specjalistycznego oprogramowania
w celu przygotowania modelu do wydruku

- c) Dobranie odpowiednich ustawień slicera i wygenerowanie kodu maszynowego (ustawienia wprowadzone na podstawie testów przeprowadzonych w punkcie 2.7). Poniżej widoczny podgląd warstw wyświetlonych na podstawie kodu maszynowego.



Rys. 14: Przybliżony model oczekiwanego uchwytu, zasymulowany na podstawie wygenerowanego kody maszynowego.

- d) Wydruk przybliżonego modelu.



Rys. 15: Wydrukowany obiekt.

3. Prace nad przystosowaniem drukarki do pracy w temperaturze rzędu 290 °C

W tym rozdziale przedstawimy podejście do przystosowania głowicy do druku w podwyższonej temperaturze.

3.1. Założenia modyfikacji

- Zwiększenie górnej granicy zakresu temperatury pracy głowicy z max. 250 °C do max. 290 °C, poprzez zastosowanie do jej budowy materiałów i elementów odpornych na działanie wysokich temperatur (tj. rzędu 300 °C).
- Stosunkowo krótki czas nagrzewania.
- Niska podatność na utratę ciepła – odporność na schładzanie w trakcie ruchu głowicy.
- Konstrukcja głowicy musi być stosunkowo lekka.
- Uproszczona, wytrzymała i niskobudżetowa konstrukcja.
- Trwała, odporna na oddziaływania termiczne i mechaniczne.
- Czas wydruku nie może powodować przegrzewania się elementów głowicy i jej mocowania.
- Nie powinna zawierać dodatkowych elementów chłodzenia.
- Powinna umożliwić wydruk filamentem wykonanego z Poliamidu 6 z montmorylonitem (PA6/MMT) – charakterystyka materiału została podana w kolejnym podrozdziale.

3.2. Podstawowa charakterystyka testowego filamentu PA6/MMT¹⁶

- Poliamid 6 z montmorylonitem PA6/MMT
- MMT 5% + barwnik 5%
- Gęstość: $1.15 \frac{g}{cm^3}$
- pojemność cieplna $0.15 \frac{J}{K \cdot g}$
- przewodność cieplna: $0.28 \frac{W}{K \cdot m}$
- lepkość w 230 °C: 1067.6 Pa
- współczynnik rozszerzalności cieplnej:
 $95 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$



Rys. 16: Fragment żyłki PA6/MMT

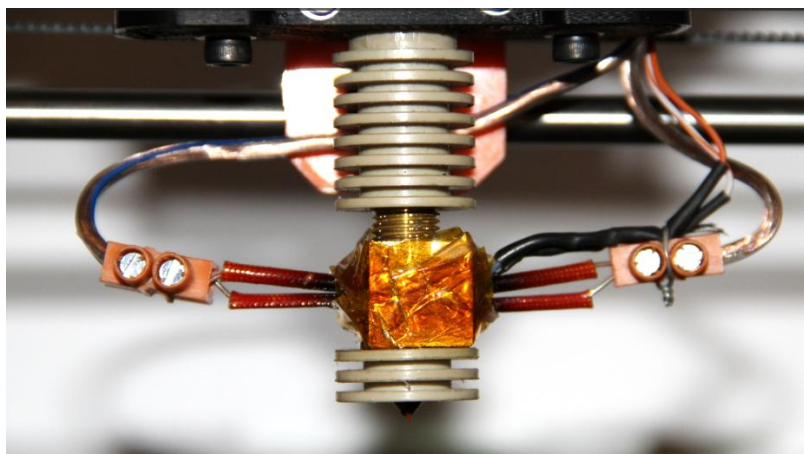
3.3. Wykorzystanie oprogramowania Elmer w celu analizy rozkładu temperatury na elementach głowicy drukującej

Elmer to oprogramowanie stworzone do przeprowadzanie symulacji komputerowych z różnych dziedzin fizyki. Opracowane zostało przez CSC – *IT Center for Science*. Rozwijane jest od 2005 roku i rozpowszechniane na licencji Open Source [17].

Narzędzie to, zawiera w sobie dynamiczne modele dynamiki płynów, mechaniki strukturalnej, elektromagnetyzmu, transferu ciepła czy fal dźwiękowych itp. Modele opisane są za pomocą równań różniczkowych cząstkowych, które rozwiązywane są metodą elementów skończonych (MES) [17].

¹⁶ Dane dostarczone przez twórcę materiału - Dr. Mgr. Inż. Tomasza Majkę, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska, (data dostępu: 12.2015)

4. Koncepcje modernizacji głowicy drukującej firmy 7h7 mod. E



Rys. 17: Oryginalna wersja głowicy 7h7 mod. E, zamontowana w omawianej drukarce.

4.1. Podstawowa budowa głowicy i zasada działania

Głowica zintegrowana jest z podajnikiem filamentu. Ten zaś może być przymocowany do karetki poruszającej się wzdłuż osi X lub być nieruchomym elementem umieszczonym na ramie drukarki, zintegrowanym z głowicą za pomocą rurki teflonowej. Omawiany sprzęt posiada ruchomy ekstruder.

Filament wciskany jest do rurki prowadzącej o średnicy wewnętrznej nieco większej niż użyty filament (~3,2 mm), aby żyłka swobodnie mogła przechodzić przez nią do bloku grzejnego. Ten z kolei musi być rozgrzany do odpowiedniej temperatury, aby podany materiał mógł zmienić stan skupienia. Ważne

jest, aby połączenie między rurką prowadzącą a dyszą w bloku grzejnym było szczelne. Ponadto strefa topnienia filamentu powinna być jak najmniejsza i nie powinna zawierać się w rurce prowadzącej. Powoduje to dodatkowe opory



Rys. 18: Model ekstrudera wraz z głowicą 7h7. Model wykonany w SolidWorks 2016.

przy wytłaczaniu miękkiego i lepkiego filamentu, a także może doprowadzić do uszkodzenia ekstrudera, głowicy lub jej mocowania – o czym będzie szerzej wspomniane w kolejnych podrozdziałach.

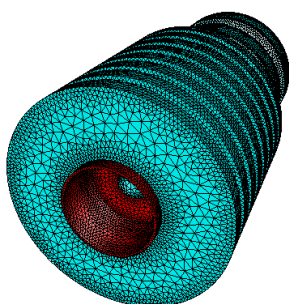
4.2. Analiza termiczna głowicy 7h7 mod. E

Z pomocą oprogramowania Elmer przeprowadzono statyczną symulację pokazującą rozkład temperatury na poszczególnych elementach wyżej wymienionej głowicy.

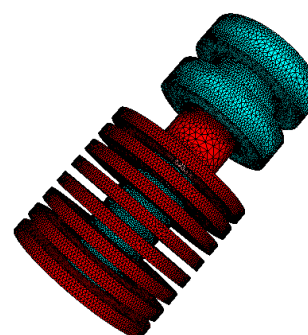
Symulację rozpoczęto od wczytania trójwymiarowych obiektów (wcześniej przygotowane modele w SolidWorks 2016), i zadania odpowiednich parametrów symulacji. W tabeli 5 opisano parametry wejściowe potrzebne do przeprowadzenia owej symulacji dla korpusu głowicy wykonanego z PEEK.

Parametr	Wartość		Jednostka
	PEEK	Mosiądz	
Gęstość	1320,00	8480,00	$\frac{kg}{m^3}$
Pojemność cieplna	1470,00	380,00	$\frac{J}{kg \cdot K}$
Przewodność cieplna	0,25	109,00	$\frac{W}{m \cdot K}$
Rozszerzalność cieplna	133,20	18,70	$\frac{\mu m}{m \cdot K}$
Temperatura pokojowa	293,00		K
Temperatura pracy	543,15		K

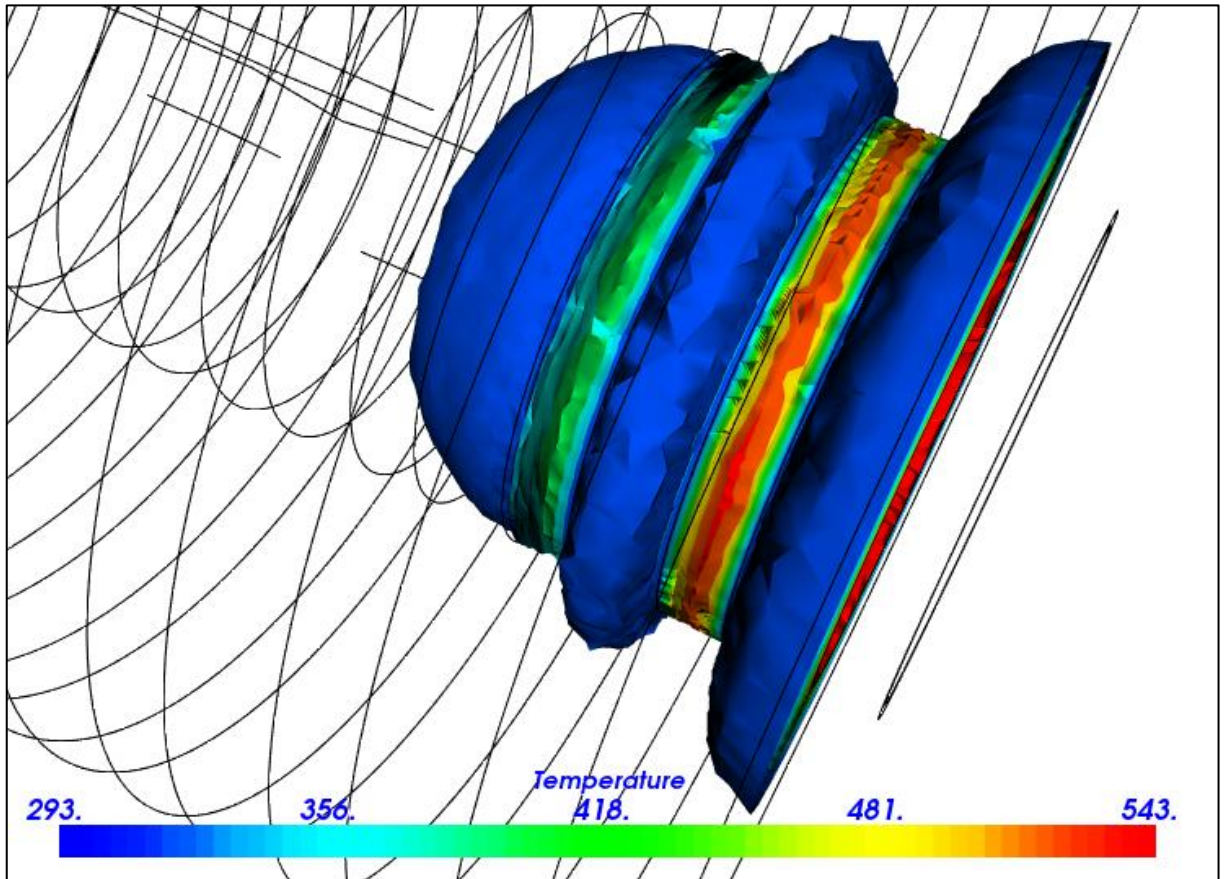
Tab. 5: Parametry symulacji dla korpusu głowicy wykonanego z PEEK oraz mosiężnego bloku grzejnego



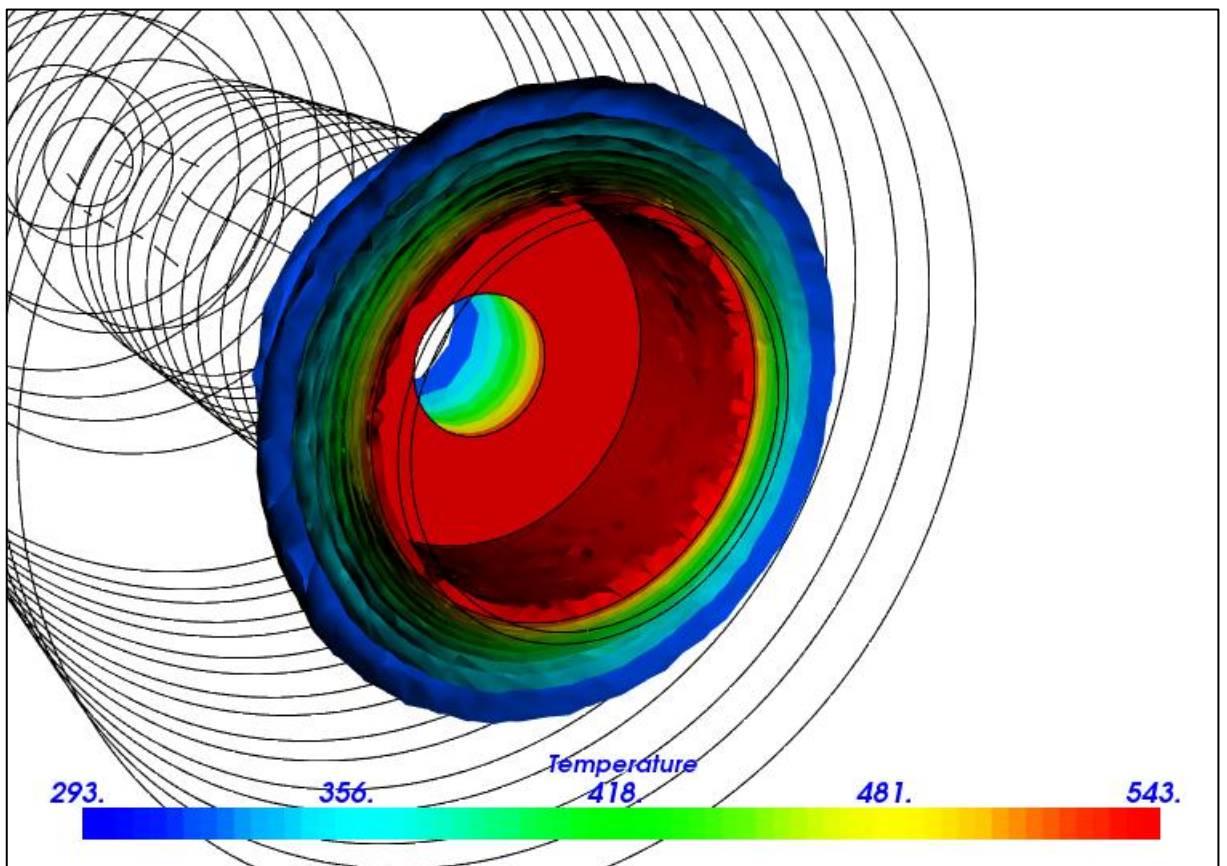
Rys. 19: Powierzchnia na której temperatura pracy (część oddziałująca termicznie z blokiem grzejnym)



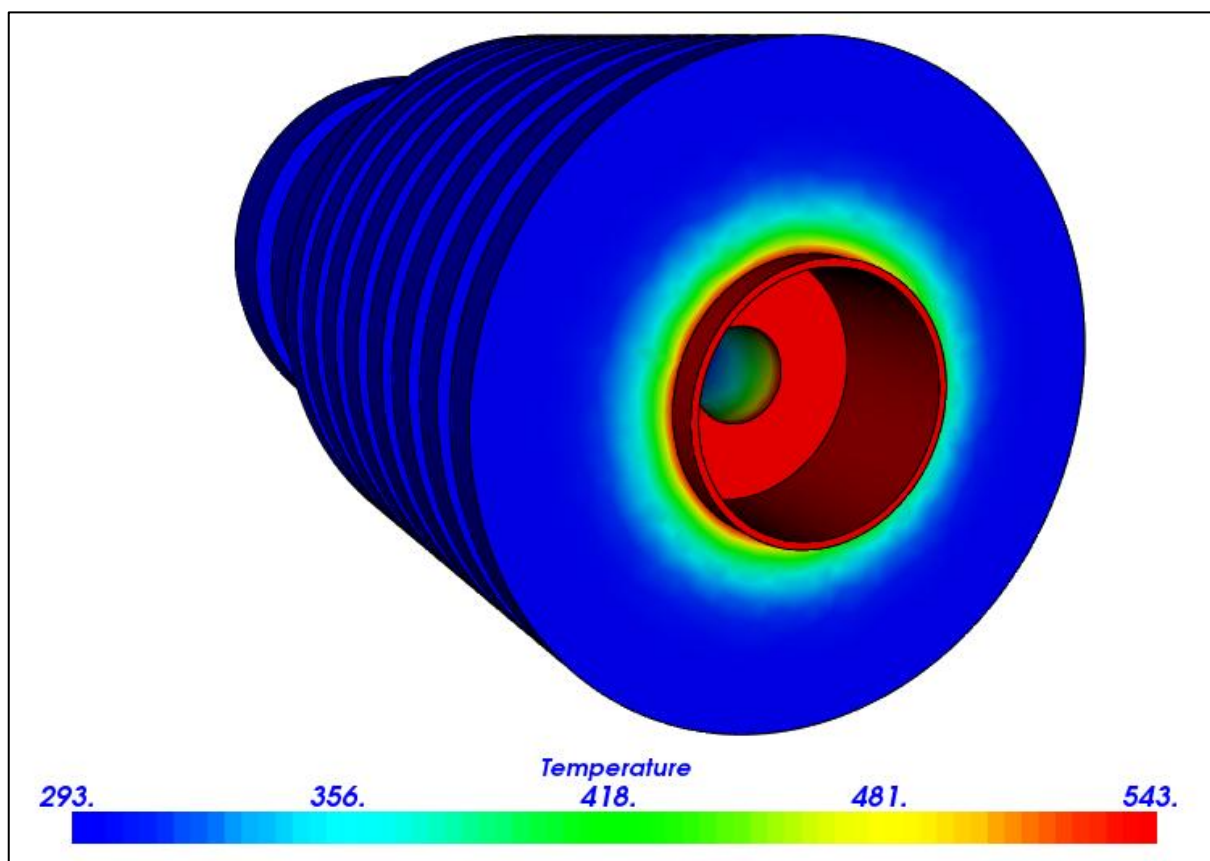
Rys. 20: Powierzchnia o stałej temperaturze pokojowej.



Rys. 21: Uzyskany statyczny rozkład temperatury wewnątrz korpusu (widok z boku)



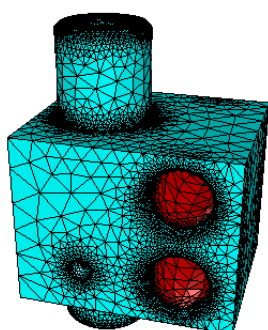
Rys. 22: Uzyskany statyczny rozkład temperatury wewnątrz korpusu (widoczna dolna część)



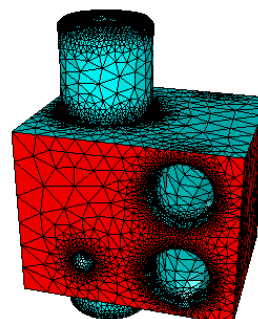
Rys. 23 Uzyskany statyczny rozkład temperatury na zewnątrz korpusu

Jak widać na powyższych ilustracjach tj. rysunki 21, 22, 23, statyczny rozkład temperatury na badanym elemencie charakteryzuje się niewielkim gradientem temperaturowym. Świadczy to o dobrej izolacyjności termicznej i niskich naprężeniach powstających na skutek rozgrzewania.

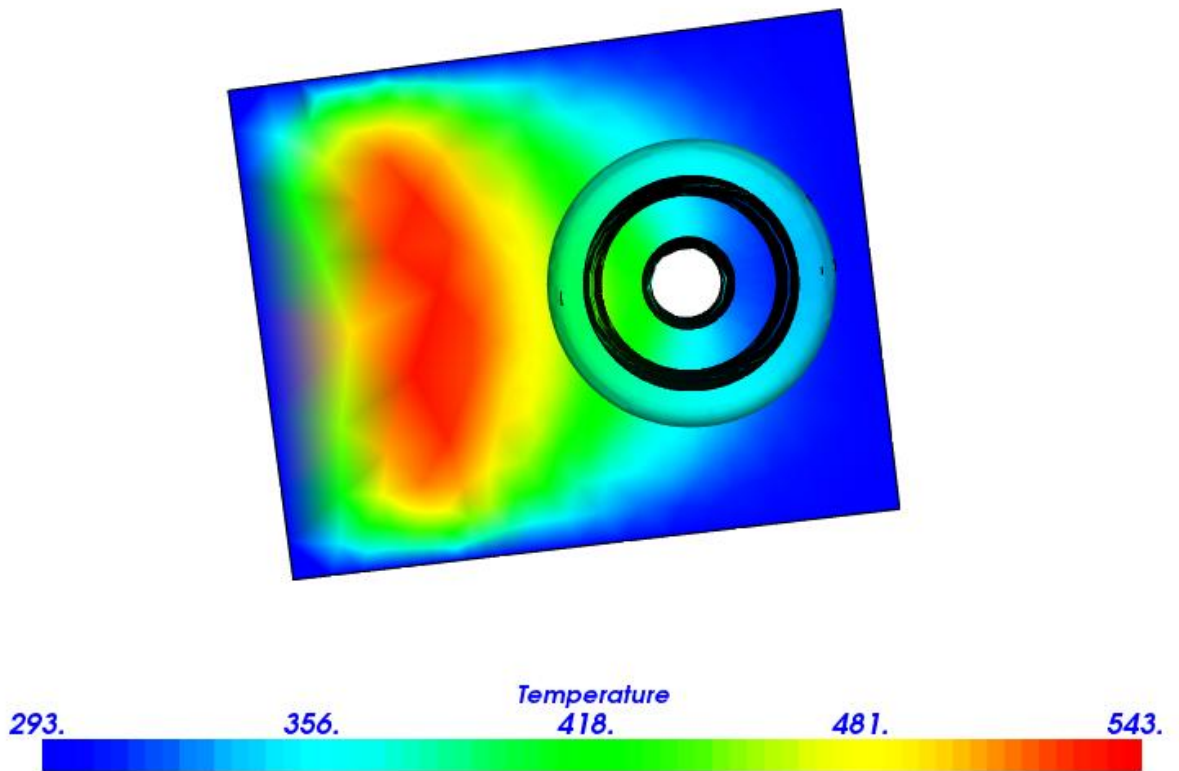
Następnie przeprowadzono symulację rozkładu termicznego na mosiężnym bloku grzejnym. Dane wejściowe podano w tabeli 5.



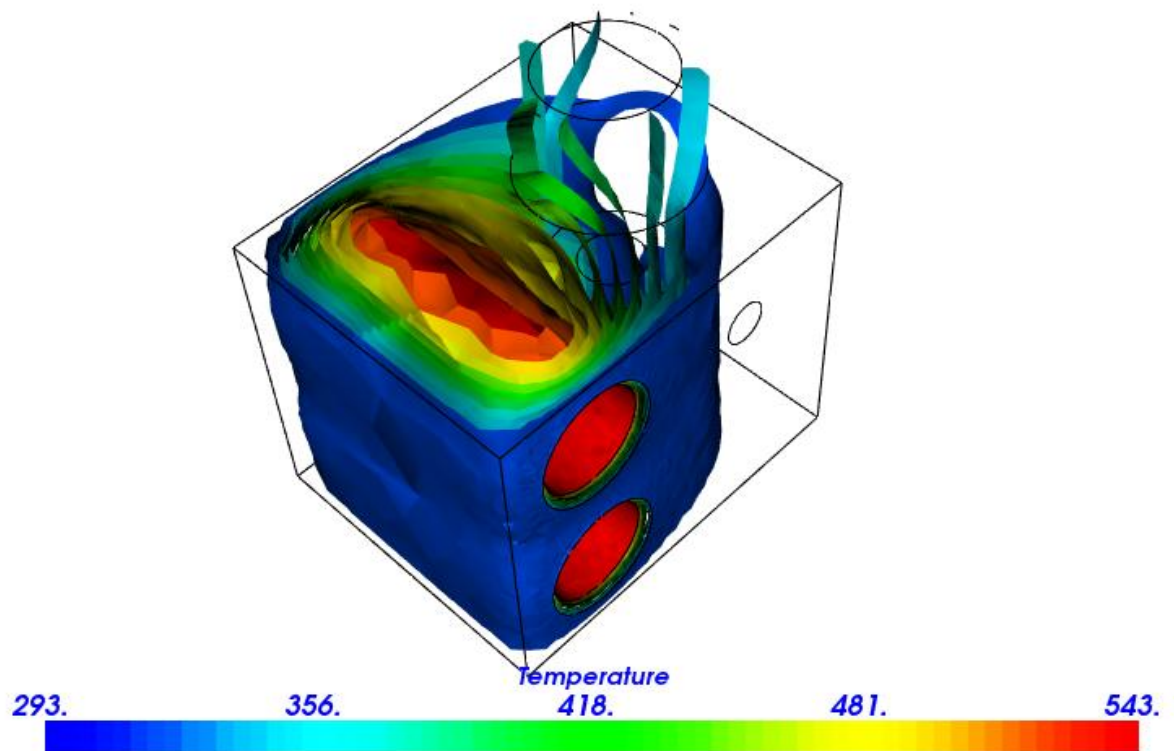
Rys. 24: Ścianki zetknięte z grzałkami (temperatura pracy)



Rys. 25: Na powierzchni bocznej modelu zaznaczono oddziaływanie z powietrzem (temperatura pokojowa)



Rys. 26: Rozkład termiczny na zewnątrz bloku grzejnego. Na uwagę zasługuje gradient widoczny wewnątrz kanału.



Rys. 27: Rozkład temperatury wewnątrz omawianego elementu

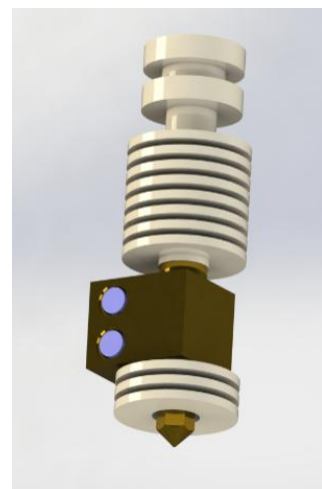
4.3. Podsumowanie przeprowadzonej analizy

Głowica w oryginalnej konfiguracji nie może pracować w temperaturze maksymalnej przekraczającej 250 °C, ponieważ maksymalna temperatura ciągłej pracy teflonu jest równa tej wartości [18]. Strefa topnienia materiału w przypadku omawianej głowicy jest stosunkowo duża z powodu zastosowania wysokiego bloku grzejnego, a to skutkuje bardzo dużym oporem wytłaczania materiału. Ponadto, dysza głowicy jest dość wysoka co powoduje znaczne obniżenie temperatury na jej końcu i zarazem jest to kolejny czynnik mający wpływ na wzrost oporu wytłaczania. Blok grzejny posiada dwie grzałki, co przyspiesza proces nagrzewania bloku, ale ich układ negatywnie wpływa na rozkład temperatury. Rozkład naprężeń powstały na skutek rozgrzewania głowicy jest bardzo niekorzystny. Otrzymany w analizie rozkład cieplny jest bardzo niejednorodny w całej objętości elementu. Można to zauważyć na ilustracjach 26 i 27.

5. Koncepcja 1: korpus głowicy wykonany z PTFE oraz szklana rurka prowadząca

5.1. Założenia i opis idei

- Szklana rurka pozyskana ze starej pipety laboratoryjnej teoretycznie dobrze nadaje się do użycia jako rurka prowadząca, ponieważ szkło jest dość dobrym izolatorem termicznym – przewodność cieplna $1,14 \frac{W}{K \cdot m}$ a pojemność cieplna wynosi $710 \frac{J}{K \cdot kg}$. Jego powierzchnia jest gładka, więc żyłka nie będzie miała dużych oporów przy przejściu. Wadą szkła jest jego kruchość. Kolejny problem, który się pojawia to szczelność połączenia rurki szklanej z krawędzią dyszy.



Rys. 28: Model głowicy z korpusem wykonanym z teflonu

- Teflonowy korpus będzie lekki i jest dobrym izolatorem termicznym. Wadą natomiast jest to, że teflon odkształca się pod wpływem naprężeń mechanicznych. Daje się go również dość dobrze obrabiać mechanicznie, ale do pewnego stopnia – w trakcie przygotowywania korpusu nie można było zrobić dokładnego gwintu o odpowiedniej wytrzymałości i dobrej jakości – co później odbiło się na wytrzymałości połączenia korpusu z blokiem grzejnym.

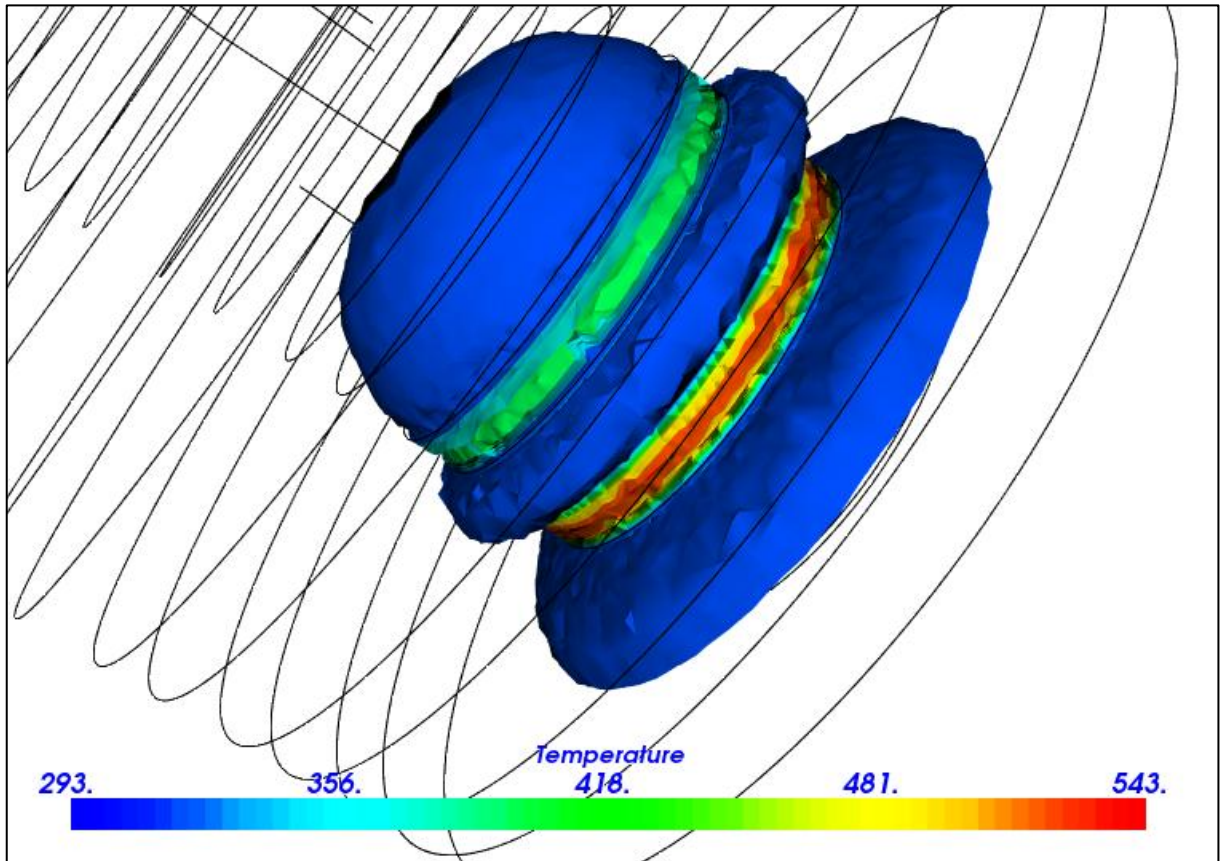
Mimo iż temperatura pracy teflonu to maksymalnie około 250 °C to nadaje się on jako materiał na wykonanie korpusu, ponieważ temperatura tego elementu nie powinna przekraczać jego temperatury granicznej.

5.2. Analiza termiczna rozkładu temperatury

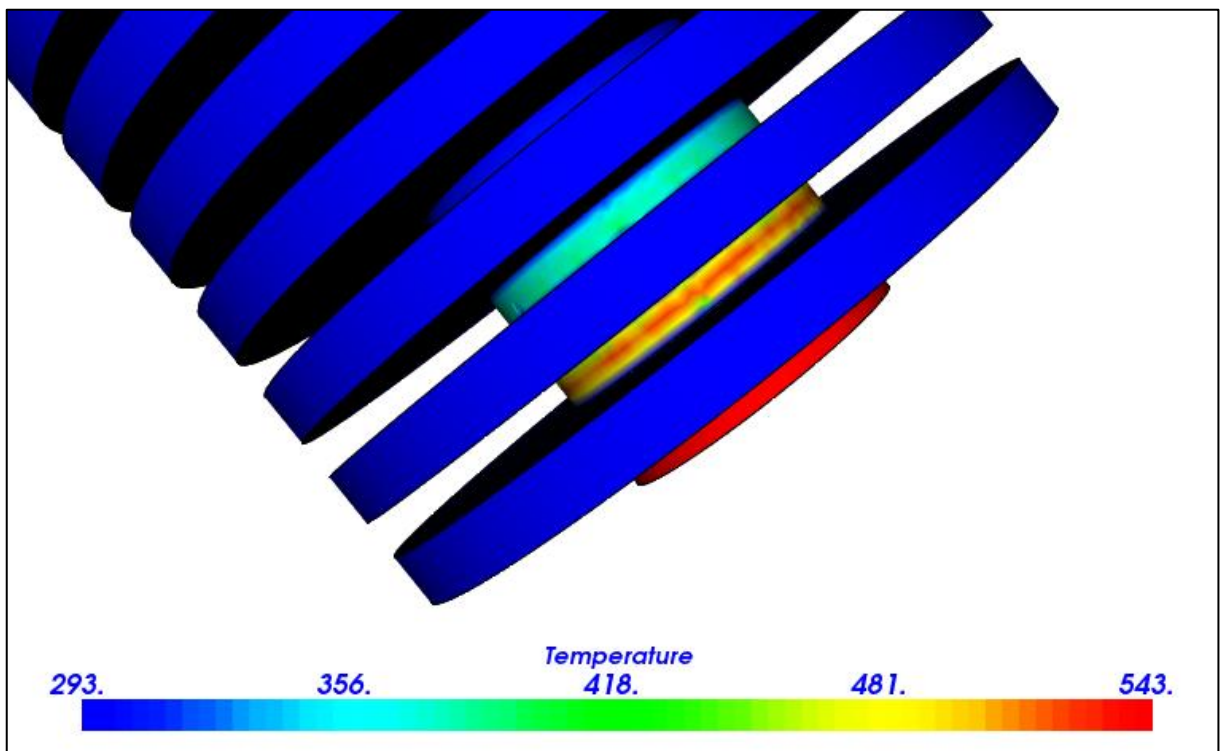
Analiza została przeprowadzona w sposób analogiczny do poprzedniej (4.2) przy czym parametry wejściowe podano w tabeli 6. Warunki brzegowe zdefiniowano tak, jak pokazano na rysunkach 19 i 20. Poniżej wyniki analizy – ilustracje 29-31.

Parametr	Wartość	Jednostka
	PTFE	
Gęstość	2200,00	$\frac{kg}{m^3}$
Pojemność cieplna	1300,00	$\frac{J}{kg \cdot K}$
Przewodność cieplna	1,14	$\frac{W}{m \cdot K}$
Rozszerzalność cieplna	185,50	$\frac{\mu m}{m \cdot K}$
Temperatura pokojowa	293,00	K
Temperatura pracy	543,15	K

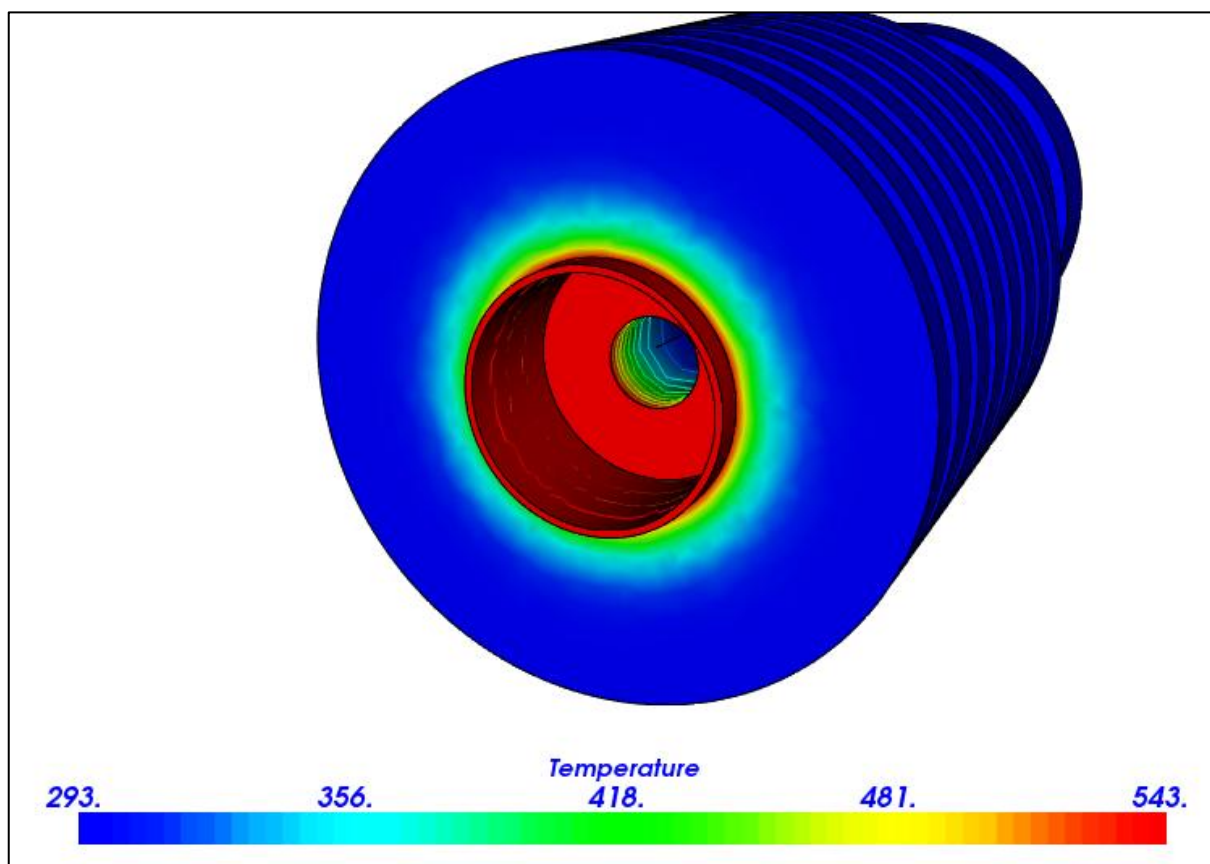
Tab. 6: Parametry wejściowe dla przeprowadzonej symulacji dla PTFE



Rys. 29: Statyczny rozkład temperatury wewnątrz teflonowego korpusu



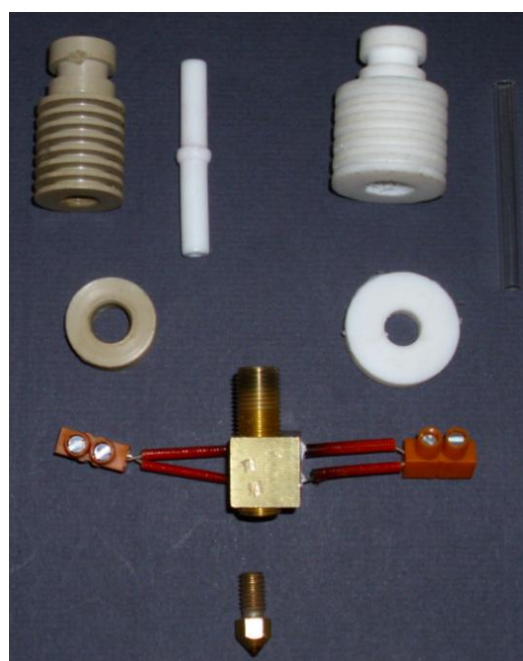
Rys. 30: Rozkład temperatury na zewnątrz teflonowego korpusu (widok z boku)



Rys. 31: Rozkład temperatury na zewnątrz teflonowego korpusu (widok z boku)

5.3. Testowanie zmodyfikowanej głowicy

Zmontowano głowicę według zamierzonego projektu. Rurka prowadzi pętkę podczas skręcania elementów. Druga zaś wytrzymała naprężenia mechaniczne, ale rozpadła się po podgrzaniu do około 260 °C. Próbę rozpoczęto od rozgrzania rurki. Początkowo do 100 °C, 150 °C, a następnie kolejno do 200 °C, 250 °C oraz 290 °C (ostatniego zadanego progu temperaturowego nie udało się osiągnąć).



Rys. 32: Zestawienie elementów głowicy. Po lewej korpus z PEEK oraz rurka teflonowa, po prawej elementy teflonowe oraz rurka ze szkła laboratoryjnego.

5.4. Podsumowanie wyników analizy i testów praktycznych

Rozkład termiczny na korpusie wykonanym z PTFE jest niemalże identyczny jak w przypadku pierwotnego korpusu z PEEK.

Rurka ze szkła laboratoryjnego nie nadaje się na rurkę prowadzącą, ponieważ jest zbyt krucha – nie wytrzymuje naprężeń mechanicznych. W drugim teście korpus skręcono z nieco mniejszą siłą. Rurka na skutek podgrzewania wydłużyła się co spowodowało powstanie dodatkowego naprężenia na złączu bloku grzejnego i rurki. Ta próba również zakończyła się tym samym skutkiem. Teflonowy korpus spełnił zamierzone postulaty.

6. Koncepcja 2: korpus głowicy wykonany z PTFE oraz rurka prowadząca z włókna węglowego

6.1. Założenia i opis idei

- Koncepcja teflonowego korpusu pozostała niezmienną.
- Krucha rurka ze szkła laboratoryjnego zostaje zastąpiona elementem wykonanym z włókna węglowego – modelarska rurka węglowa widoczna na zdjęciu 33.
- Połączenie pomiędzy dyszą i rurką prowadzącą powinno być znacznie lepszej jakości niż w przypadku rurki szklanej.

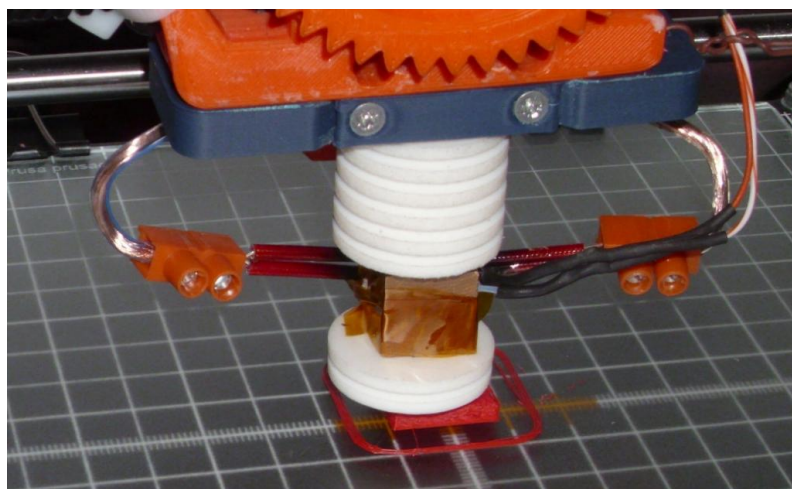


Rys. 33: Rurka teflonowa wykonana z włókna węglowego.

6.2. Testowanie zmodyfikowanej głowicy

Głowicę zmontowano według obranej koncepcji. Przez kilka minut test przebiegał pomyślnie, do momentu, gdy rurka prowadząca zatkała się. Filament „zakleszczył się”. Chwilę po tym blok grzejny wraz z rurką prowadzącą został wypchnięty z korpusu.

Przeprowadzono dwie próby i obie zakończyły się z tym samym wynikiem.



Rys. 34: Testowy wydruk przeprowadzony za pomocą zmodyfikowanej głowicy

6.3. Wnioski wyciągnięte na podstawie testów

Pary filamentu przenikały przez strukturę włóknistą rurki prowadzącej. Wnętrze zostało obklejone lepkim plastikiem co docelowo spowodowało zaklinowanie się żyłki (patrz fotografia 35). Skutkiem tego było zerwanie połączenia gwintowanego pomiędzy korpusem PTFE a mosiężnym blokiem grzejnym.

Ponadto rurka węglowa odkształciła się – spęcała. Prawdopodobnie wynika to z dość dużych naprężeń, które powstają przy rozgrzewaniu głowicy i rozszerzalności cieplnej włókna węglowego. Materiał z którego wykonano rurkę powinien posiadać odpowiednio zwartą (szczelną) strukturę nawet po podgrzaniu.

W następnej koncepcji należy zastosować inny typ połączenia głowicy z blokiem grzejnym. Konstrukcja modułu nie ma prawa ulec uszkodzeniu. W razie zablokowania żyłki, radełko ekstrudera powinno „wygryźć” szczelinę w filamencie.



Rys. 35: Zatkane i spęcałe rurki prowadzące.

7. Koncepcja 3: dwuczęściowy korpus (PTFE + mosiądz) oraz mosiężna rurka prowadząca

7.1. Założenia i opis idei

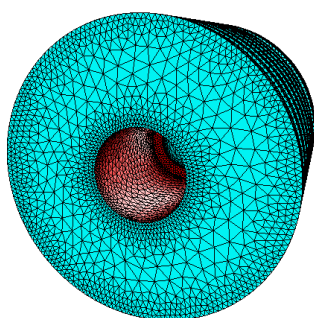
- Kołnierz wykonany z PTFE, a w nim trzy otwory.
- Mosiężny radiator wciskany w kołnierz teflonowy. Zawiera trzy otwory gwintowane w celu mocnego skręcenia kołnierza z radiatorem.
- Wykonanie powyższych elementów z mosiądzu miało na celu usztywnić konstrukcję głowicy i zwiększyć pojemność cieplną całego układu. Wydłuży to czas rozgrzewania głowicy o kilka minut, ale uodporni układ na nagłe zmiany temperatury, wywołane np. ruchami osi.



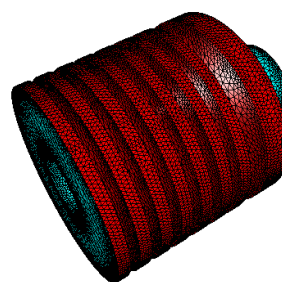
Rys. 36: Dwuczęściowy korpus wraz z mosiężną rurką prowadzącą osadzoną w bloku grzewczym.

7.2. Analiza termiczna rozkładu temperatury

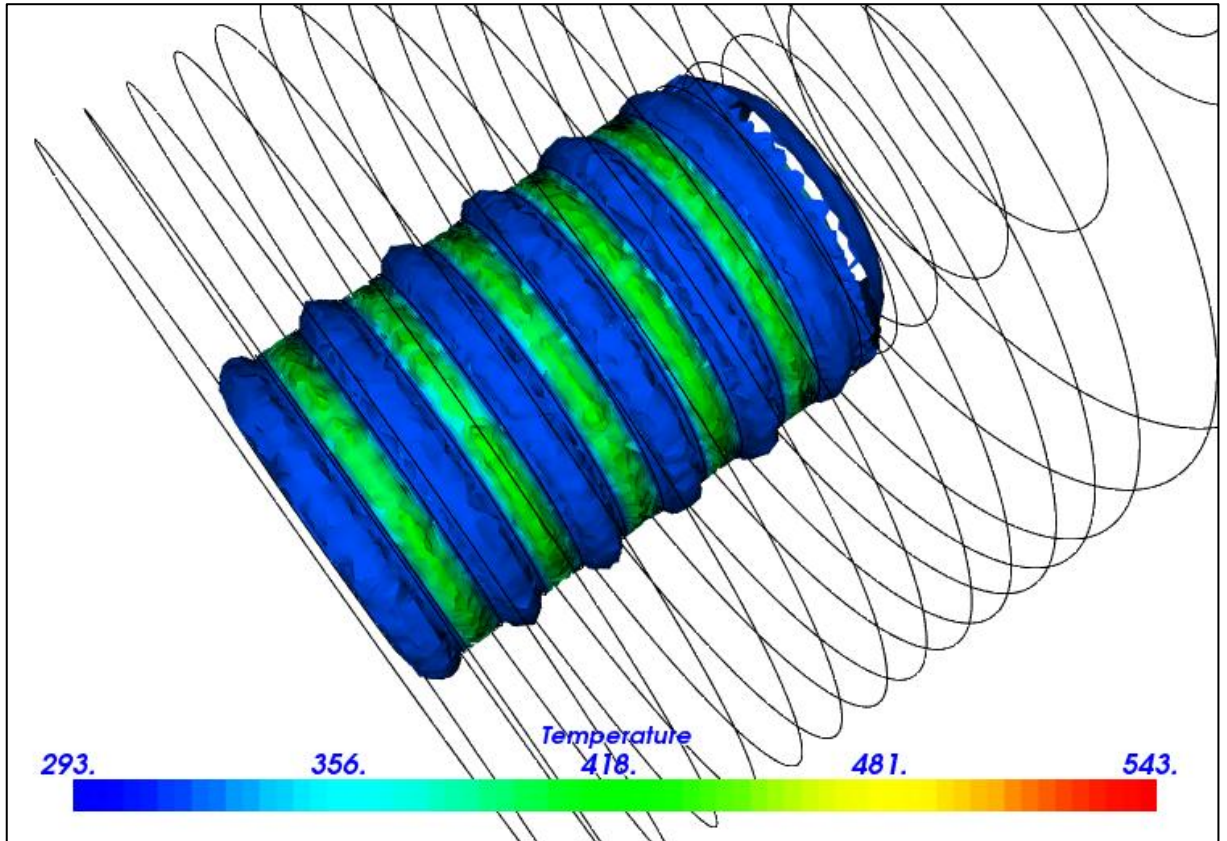
Symulację przeprowadzono z użyciem parametrów podanych w tabeli 5. Warunki brzegowe zaznaczono jak pokazano na poniższych ilustracjach – 37 i 38:



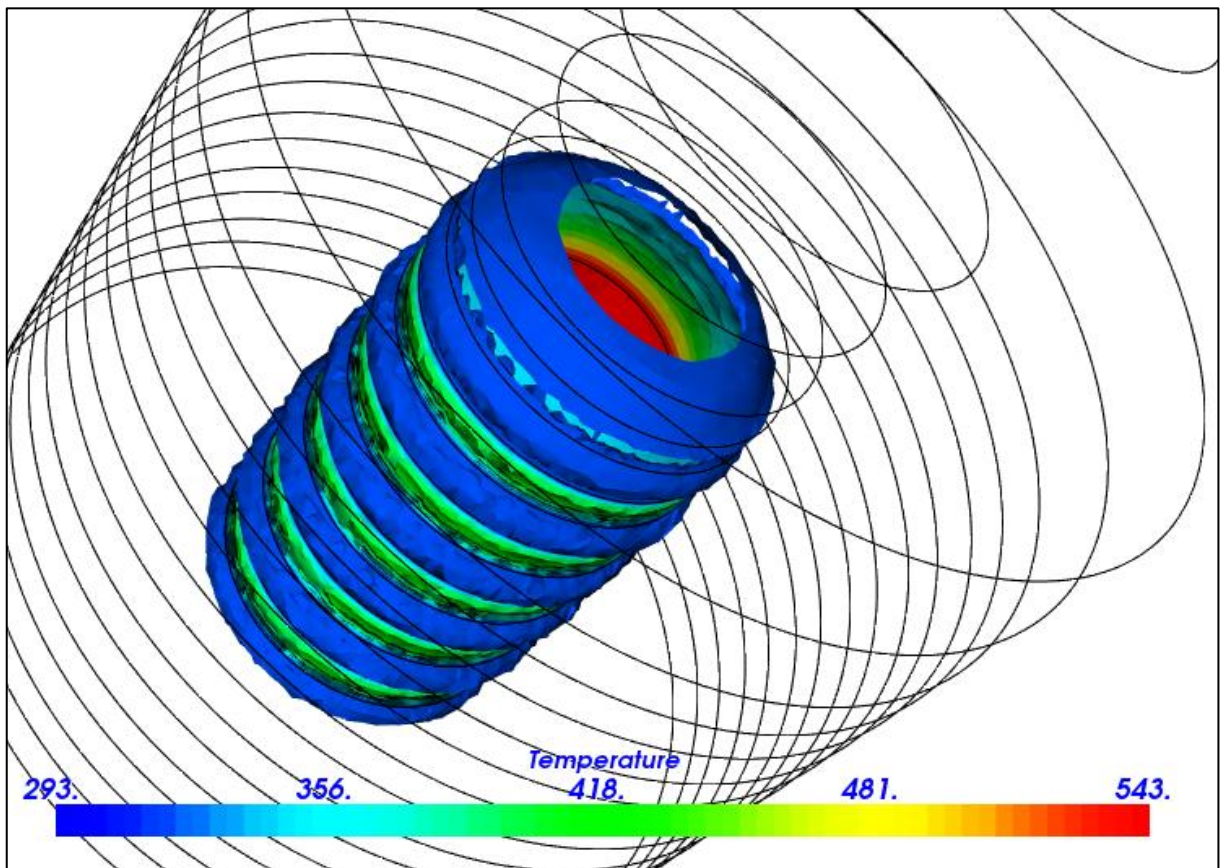
Rys. 37: Rozgrzana część



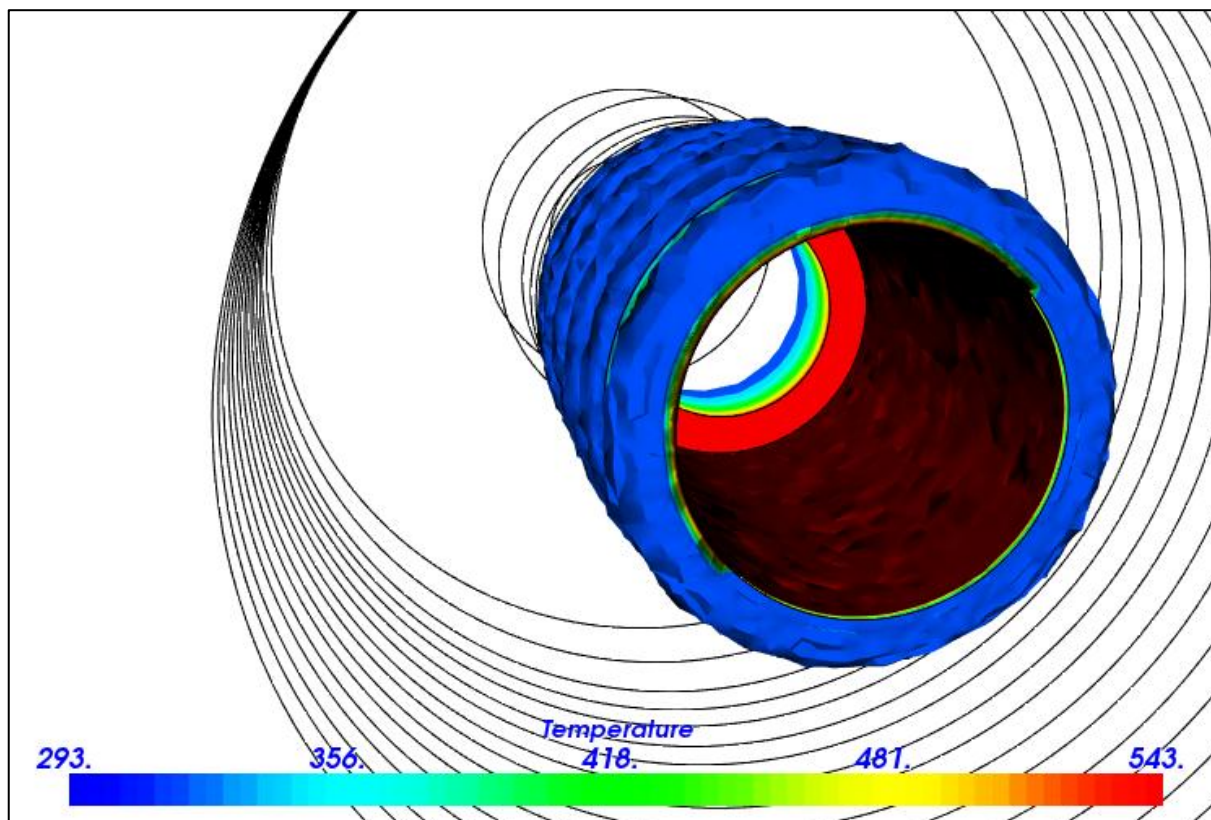
Rys. 38: Powierzchnie o temperaturze pokojowej



Rys. 39: Statyczny rozkład temperatury wewnątrz korpusu wykonanego z mosiądzu (widok z boku)

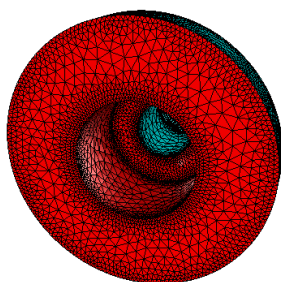


Rys. 40 Statyczny rozkład temperatury wewnątrz korpusu wykonanego z mosiądzu (widok z góry)

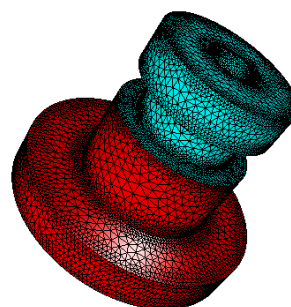


Rys. 41 Statyczny rozkład temperatury wewnątrz korpusu wykonanego z miedzi (widok z dołu)

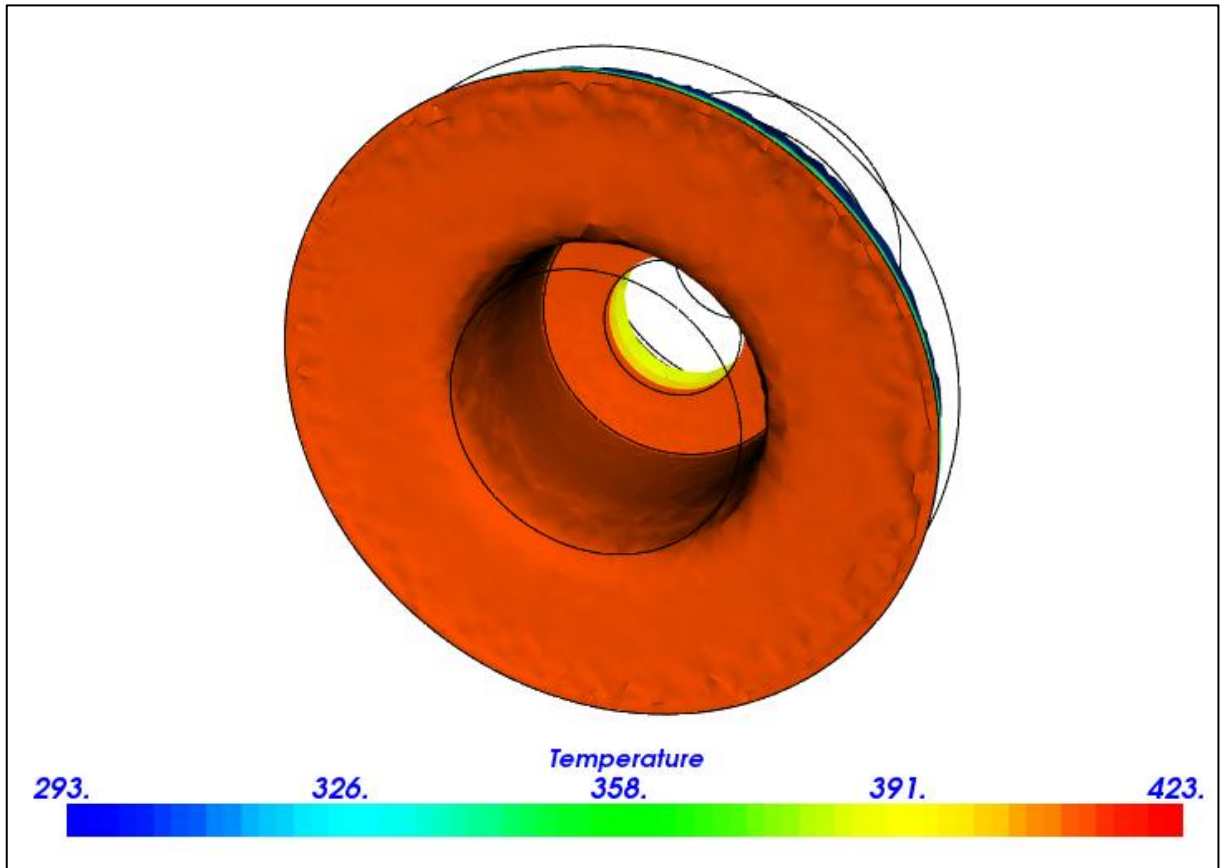
Przeprowadzono również symulację drugiego elementu korpusu wykonanego z PTFE. Parametry symulacji zadano zgodnie z tabelą 6 z jedną różnicą – mianowicie temperaturę pracy przyjęto 490 K. Przyjęto tak dlatego, że na badany element oddziałuje nieco niższa temperatura niż temperatura bloku grzejnego – część energii tracona zostaje przy przejściu przez wcześniej symulowany radiator.



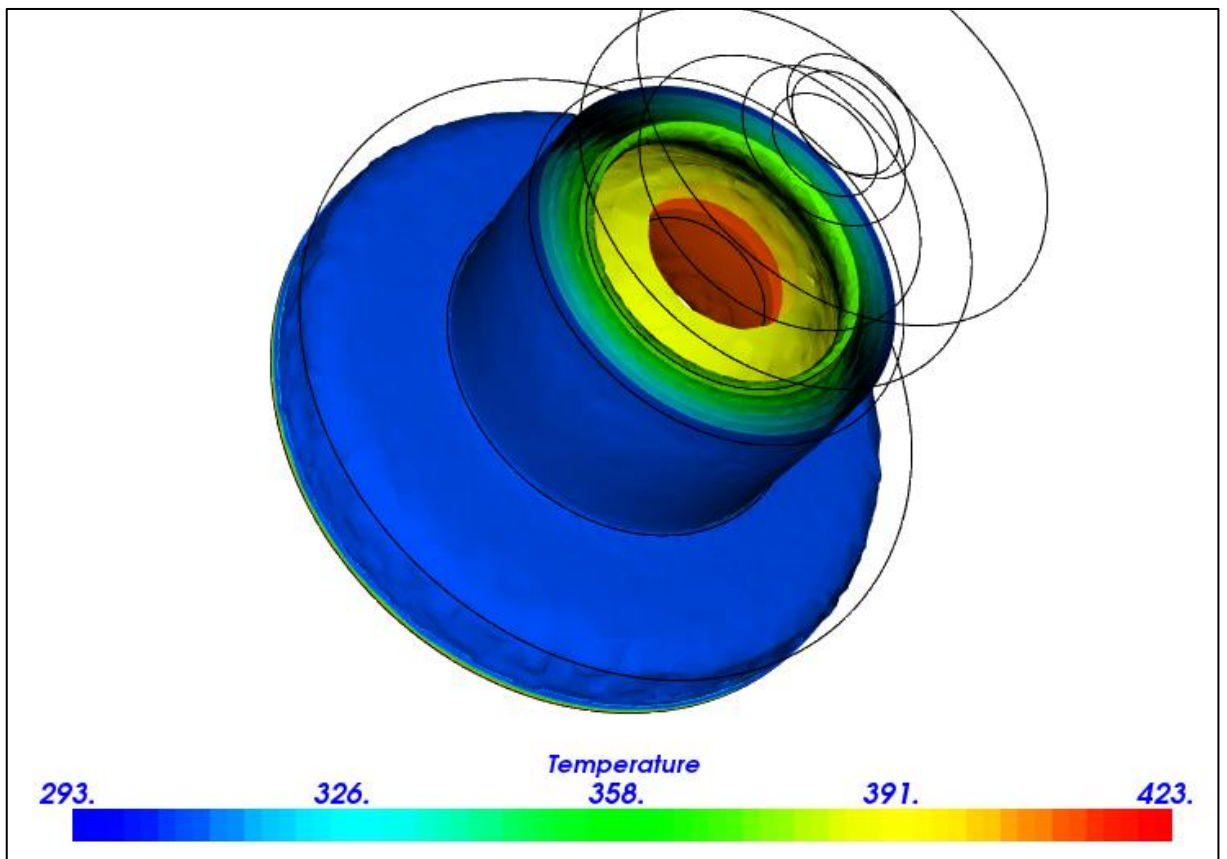
Rys. 42: Część podgrzana, na którą oddziałuje radiator



Rys. 43: Część chłodzona przez powietrze (temperatura pokojowa)



Rys. 44: Rozkład temperatury wewnątrz kołnierza (widok z dołu)



Rys. 45: Rozkład temperatury wewnątrz kołnierza (widok z góry)

7.3. Testowanie zmodyfikowanej głowicy

Układ zmontowano według obranych założeń. Czas nagrzewania znacznie się wydłużył – od 2-5 min. do 20-25 min.

Skorygowano ponownie ustawienia PID dla testowanej głowicy, poniżej wygenerowane wartości:

M301 P190.74 I20.64 D440.64

W trakcie pracy głowicy, po upływie kilku minut, uszkodzeniu uległo mocowanie głowicy do ekstrudera, co pokazano na ilustracji 46.



Rys. 46: Przegrzany uchwyt głowicy

7.4. Podsumowanie wyników analizy i testów praktycznych

Rozkład temperatury w radiatorze wykonanym z mosiądzu jest regularny, a rozkład gradientów dość łagodny. Tego typu radiator ma bardzo dużą bezwładność termiczną – bardzo długo się rozgrzewa i stygnie. Rozkład temperatury wewnątrz kołnierza widoczny jest niemalże w całej objętości bryły. Świadczy to o tym, że element po pewnym czasie może się przegrzać. Tak też się stało, a skutki tego zdarzenia widoczne są na fotografii 43. Negatywny wpływ na szybkość przegrzania tego elementu miała rurka prowadząca.

Mosiężna rurka prowadząca na całej swej długości miała temperaturę równą temperaturze bloku grzejnego – co spowodowało wydłużenie strefy topnienia filamentu, a tym samym całkowitego oporu wytłaczania filamentu. Teflonowy kołnierz powoli nagrzał się od radiatora i rurki prowadzącej

oddziałując termicznie na mocowanie głowicy wydrukowane z ABS. Spowodowało to trwałe uszkodzenie uchwytu po upływie około pół godziny.

Dotychczas najlepiej pod względem izolacyjności termicznej sprawdziła się rurka ze szkła laboratoryjnego.

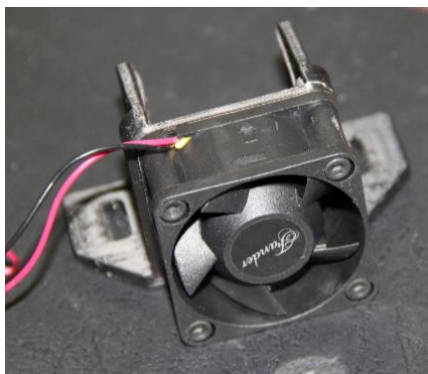
8. Koncepcja 4: dwuczęściowy korpus (PTFE + mosiądz) oraz kwarcowa rurka prowadząca z wykorzystaniem wymuszonego obiegu powietrza wokół elementu z PTFE i radiatora

8.1. Założenia i opis idei

- Mocna konstrukcja, uniemożliwiająca przegrzanie się elementów mocujących głowicę, poprzez zastosowanie szkła kwarcowego oraz wymuszonego obiegu powietrza.
- Duża pojemność cieplna całego układu, w celu łatwiejszego utrzymania stałej wysokiej temperatury układu.

8.2. Testowanie zmodyfikowanej głowicy

Przy wymuszonym obiegu powietrza głowica nie była w stanie rozgrzać się do więcej niż 207 °C. Przy samoczynnym obiegu powietrza głowica bardzo długo nagrzewała się. Maksymalna osiągnięta temperatura wynosiła 270 °C. Po



Rys. 47: Uchwyt wentylatora użytego do chłodzenia głowicy

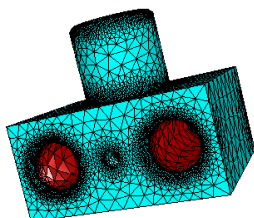
upływie kilkunastu minut, ponownie uszkodzeniu uległy mocowania głowicy na skutek nagrzania się całego układu. Mimo zastosowanej kwarcowej rurki prowadzącej, czas po którym nastąpiła destrukcja uchwytu, był o kilkanaście minut dłuższy w porównaniu

z poprzednią mosiężną rurką. Przy próbie schładzania temperatura bloku grzejnego zaczęła dość gwałtownie spadać.

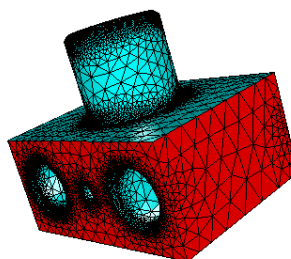
8.3. Wyniki testów i propozycja rozwiązania problemu na podstawie przeprowadzonej analizy rozkładu temperatury w bloku grzejnym

Grzałki użyte w bloku mają za małą moc, aby swobodnie utrzymywać temperaturę tak dużej objętości. Czas nagrzewania układu do temperatury 250 °C trwa kilkanaście minut (ponad 25 minut). Wymuszony obieg powietrza wokół radiatora był zbyt intensywny, co powodowało skoki temperatury i obniżenie górnej granicy temperaturowej. Po wyłączeniu chłodzenia, czas po którym uchwyt głowicy został uszkodzony był nieco dłuższy niż w przypadku zastosowania mosiężnej rurki prowadzącej. Obieg powietrza powinien być lepiej dobrany – obroty wentylatora i czas chłodzenia dobrane automatycznie na podstawie temperatury korpusu.

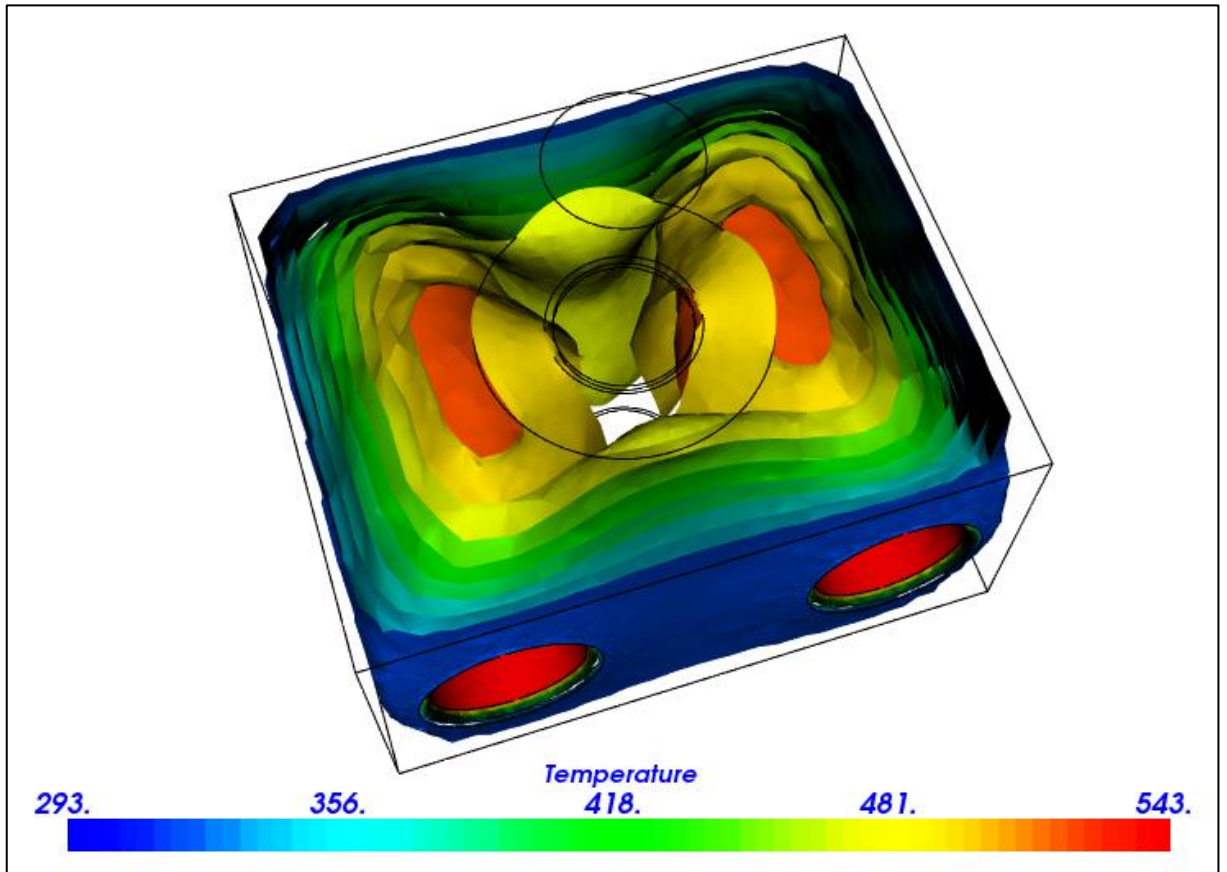
Korpus (radiator) powinien być wykonany z materiału o mniejszej bezwładności termicznej (np. aluminium). Poniżej przedstawiono proponowany kształt bloku grzejnego wykonanego z aluminium oraz rozkład termiczny przeprowadzony w sposób analogiczny jak w przypadku omawianego wcześniej bloku mosiężnego.



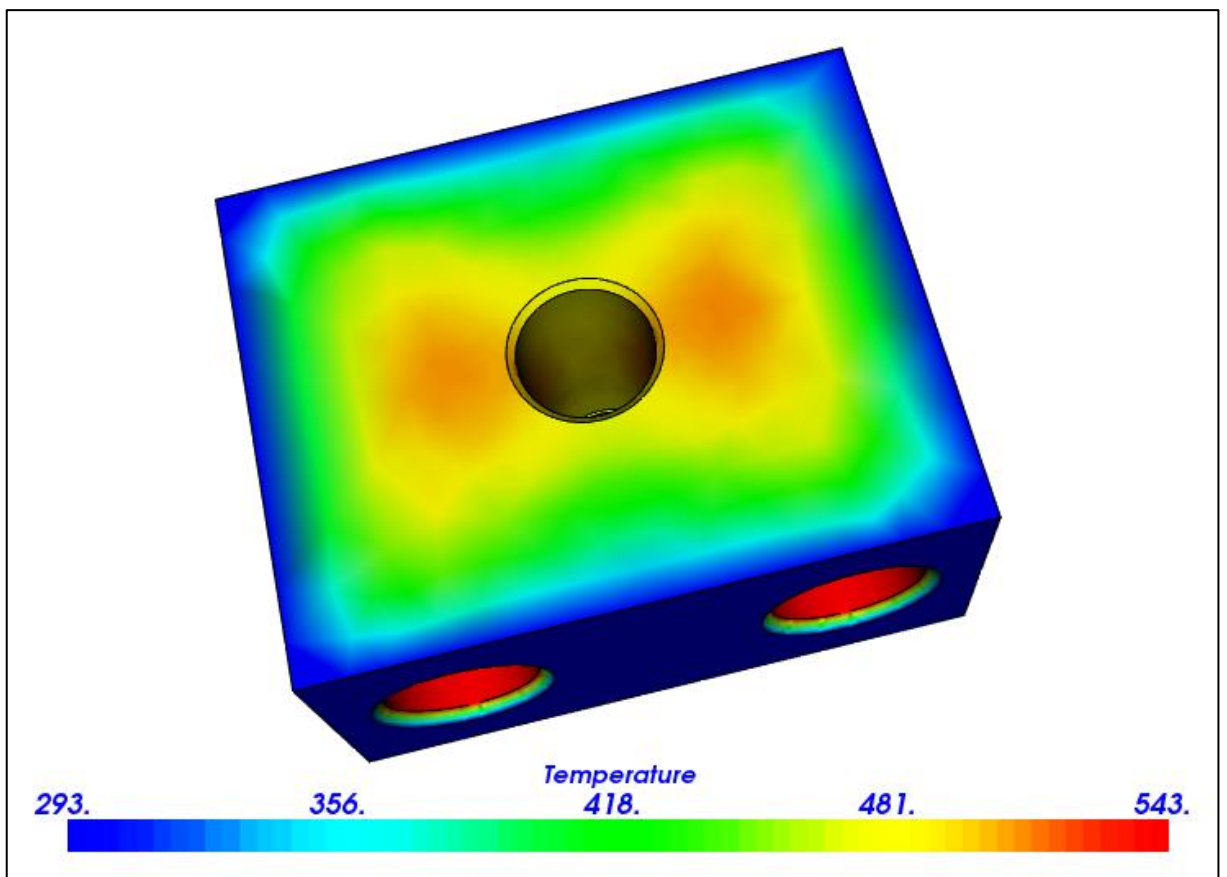
Rys. 48: Obszar o podwyższonej temperaturze



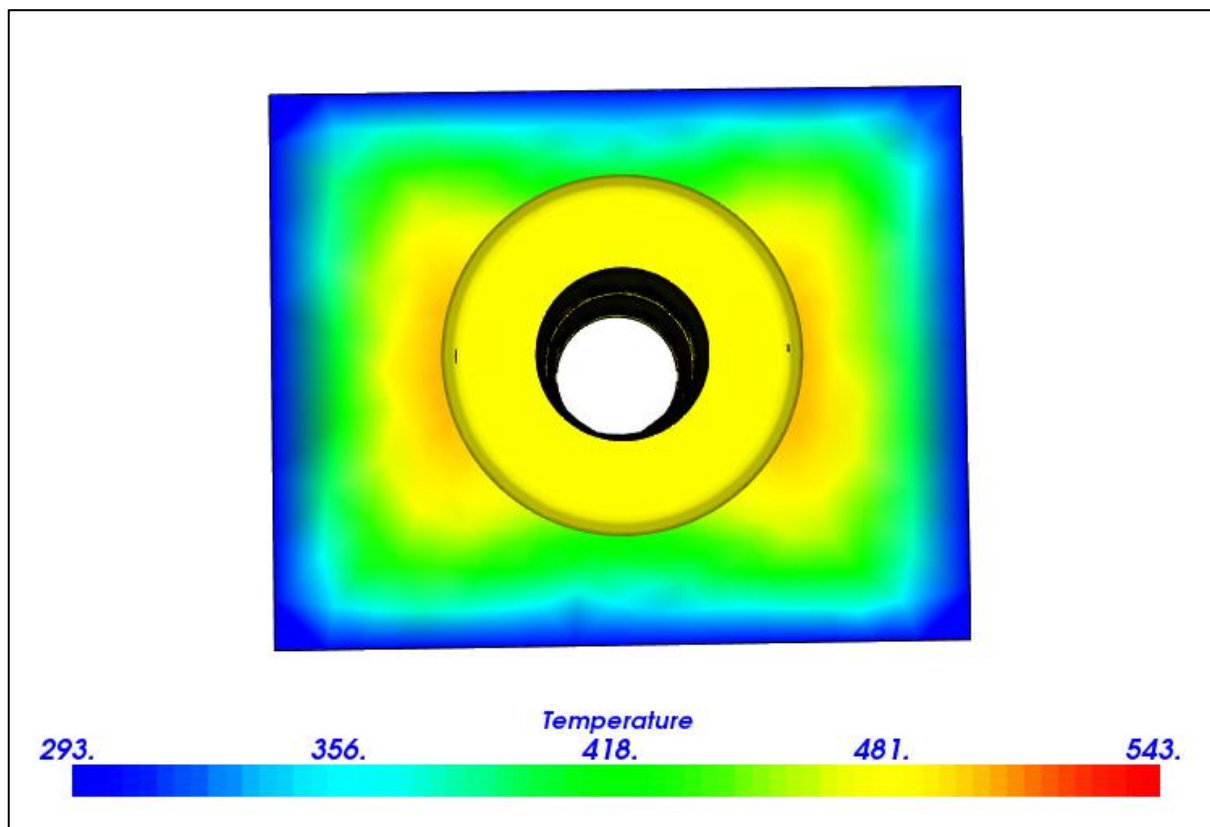
Rys. 49: Obszar oddziaływania z powietrzem o temperaturze pokojowej



Rys. 50: Rozkład termiczny wewnątrz aluminiowego bloku grzejnego



Rys. 51: Rozkład termiczny wewnątrz aluminiowego bloku grzejnego (widok z dołu)



Rys. 52: Rozkład termiczny wewnątrz aluminiowego bloku grzejnego (widok z góry)

Jak łatwo zauważyć na powyższych ilustracjach rozkład temperatury w objętości jest bardzo łagodny i dość jednorodny. Sugeruje to, że rozkład wewnętrznych naprężeń w zaprezentowanym układzie jest korzystniejszy niż w przypadku mosiężnego bloku głowicy 7h7 mod. E. Projekt bloku należy jeszcze dopracować i odpowiednio dobrać rozstaw grzałek tak, aby jeszcze lepiej dopasować rozkład gradientu temperatury wewnątrz kanału (na ilustracji 48 widoczne są niewielkie zaczerwienienia wśród żółtego odcienia).

9. Podsumowanie i wnioski

Podsumowując, w ramach pracy inżynierskiej:

1. Dobrano i skompletowano potrzebne elementy do złożenia drukarki według projektu *Prusa i3*.
2. Zmontowano, a następnie uruchomiono i skalibrowano urządzenie, z sukcesem przeprowadzając wydruki.
3. Podjęto próby związane z dostosowaniem głowicy *7h7 mod. E* do druku filamentem z PA6/MMT.
4. Przeprowadzono proste symulacje statyczne w darmowym pakiecie *Elmer*, związane z rozkładem temperatury na poszczególnych elementach głowicy.
5. Niestety wszelkie próby związane z modyfikacją głowicy zakończyły się wynikiem negatywnym.
6. Na podstawie wyników analizy termicznej i przeprowadzonych testów wyciągnięto wnioski, które pozwoliły na obranie kolejnej strategii modyfikacji głowicy w przyszłość.

Montaż i uruchomienie omawianej drukarki był procesem pracochłonnym i wymagał dokładności. Konstrukcja drukarki jest stosunkowo prosta. W sieci można znaleźć wiele modyfikacji tego urządzenia. Podstawowa instrukcja znajduje w referencji [19]. Dla początkujących ta wersja drukarki przestrzennej jest idealna. *Prusa i3* to sprawdzona, solidna konstrukcja, prosta w budowie i stosunkowo tania.

Przerobienie gotowej głowicy wydawało się być prostszym rozwiązaniem niż budowa nowego elementu. Po wykonaniu wcześniej opisanych testów okazuje się, że badana głowica nie jest odpowiednia do pracy w wyższych temperaturach. Na podstawie przeprowadzonych badań wyciągnięto następujące wnioski:

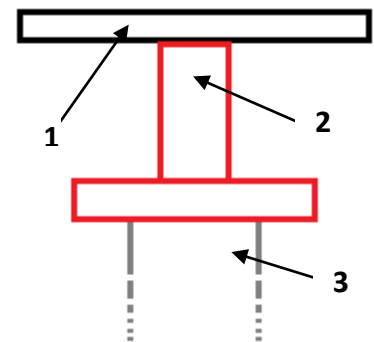
- Grzałki umieszczone w bloku grzejnym powinny być tak dobrane, aby można było sprawnie podgrzać i utrzymać temperaturę bloku grzejnego (propozycja: grzałka ceramiczna 12 V, 40 W).

- Końcówka dyszy powinna być możliwie jak najcieńsza (propozycją dla rozwiązania tego problemu może być użycia taniej i sprawdzonej krótkiej dyszy – rysunek 50 [20])



Rys. 53: Przykładowa dysza głowicy

- Radiator powinien być wykonany z aluminium, gdyż bezwładność termiczna tego materiału jest mniejsza niż miedzi. Ponadto jest on lekki i wytrzymały.
- Korpus również powinien być aluminiowy (uzasadnienie w rozdziale 8.3).
- Intensywność obiegu powietrza powinna być automatycznie dobierana do aktualnej temperatury radiatora (nie większa niż 120 °C). Istnieje możliwość wykorzystania obecnej elektroniki do tego celu.
- Rurka prowadząca może być wykonana z wytrzymałego szkła kwarcowego. Złącze szkło-blok grzejny lub szkło-dysza należałoby uszczelnić cienką uszczelką wykonaną z miękkiego metalu (np. miedzi) lub wewnątrz radiatora zastosować jako rurkę prowadzącą (sprawdzone rozwiązanie wykorzystywane w głowicach *jhead*).



Rys. 54: Schemat ideologiczny przedstawiający sposób modernizacji mocowania głowicy. Poniżej opis symboli:

- Mocowanie głowicy odsadzone od ekstrudera tuleją wykonaną z PEEK lub PTFE Obok szkic ideowy – rys. 51.
- Pozwoli to na odizolowanie termiczne mocowania ekstrudera wykonanego z ABS od gorących elementów głowicy.

1 – standardowych uchwyt głowicy .
wykonany z ABS,
2 – dodatkowa tuleja dystansowa z
PEEK lub PTFE wraz z uchwytem
głowicy,
3 – głowica drukująca)

10. Bibliografia

- [1] https://pl.wikipedia.org/wiki/Drukowanie_przestrzenne (data dostępu: 11.2015);
- [2] <http://centrumdruku3d.pl/encyklopedia-druku-3d/> (data dostępu: 11.2015);
- [3] <http://reprap.org/wiki/RepRap> (data dostępu: 11.2015);
- [4] <http://swiatdruku3d.pl/pliki-stl/> (data dostępu: 11.2015);
- [5] Przemysław Kulczycki, „Licencje wolne i otwarte”, http://aspercz.pl/asperczpl/prawo/Licencje_wolne_i_otwarte.pdf (data dostępu: 11.2015);
- [6] <http://reprap.org/wiki/FDM> (data dostępu: 11.2015);
- [7] Anna Kaziunas France, tłum. Zbigniew Waśko. *Świat druku 3D. Przewodnik. Kompendium wiedzy o druku 3D!* Gliwice: Helion, 2014;
- [8] E. Canessa C. Fonda, M. Zennaro: *L O W- C O S T 3 D P R I N T I N G F O R S C I E N C E , E D U C A T I O N & S U S T A I N A B L E D E V E L O P M E N T*, s. 51-53
- [9] http://reprap.org/wiki/Prusa_Mendel/pl (data dostępu: 11.2015);
- [10] <http://reprap.org/wiki/Marlin> (data dostępu: 11.2015);
- [11] http://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4 (data dostępu: 11.2015);
- [12] <http://www.arduino.org/products/boards/4-arduino-boards/arduino-mega-2560> (data dostępu: 11.2015);
- [13] “Allegro MicroSystem, LLC” A4988 DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection (datasheet) (data dostępu: 12.2015);
- [14] <http://technovade.pl/silnik-krokowy-nema-17-42mm-wantai-42byqhw809-reprap-3d.html> (data dostępu: 12.2015);
- [15] <http://solidutopia.com/marlin-firmware-user-guide-basic/> (data dostępu: 12.2015);
- [16] http://mojreprap.pl/index.php?route=information/information&information_id=15 (data dostępu: 11.2015);
- [17] <https://www.csc.fi/web/elmer> (data dostępu: 12.2015);
- [18] <http://www.engineeringtoolbox.com/> (data dostępu: 12.2015);
- [19] http://reprap.org/wiki/Prusa_i3_Build_Manual (data dostępu: 01.2016);
- [20] <http://technovade.pl/media/catalog/product/cache/1/image/650x/040ec09b1e35df139433887a97daa66f/3/d/3d-e3dv6nozzle-300-04.jpg> (data dostępu: 01.2016);