

POLITECHNIKA POZNAŃSKA

Wydział Inżynierii Mechanicznej



mgr inż. Tomasz Kapłon

Rozprawa Doktorska

**Konstrukcja i sterowanie przetwornika
zbudowanego na bazie kompozytu
silikon-etanol**

Rozprawa wykonana pod kierunkiem:

Prof. dr inż. Andrzeja Mileckiego

W Zakładzie Urządzeń Mechatronicznych

Poznań 2023

Spis treści

Streszczenie	4
Najważniejsze oznaczenia i skróty użyte w pracy.....	5
Wstęp.....	6
1. Przegląd aktualnego stan wiedzy.....	7
1.1. Materiały zmieniające fazę	7
1.2. Przetworniki bazujące na przemianie ciec-z-gaz	10
1.3. Materiały kompozytowe zmieniające fazę.....	12
1.4. Wytwarzanie kompozytu silikon-etanol oraz cykl jego pracy.....	14
1.5. Właściwości kompozytu silikon-etanol	15
1.6. Podstawy teoretyczne działania kompozytu silikon-etanol	18
1.7. Zastosowanie kompozytu silikon-etanol w przetwornikach.....	22
1.8. Metody nagrzewania kompozytu	26
1.9. Podsumowanie przeglądu stanu wiedzy	27
2. Cel i tezy pracy	29
2.1. Wprowadzenie	29
2.2. Koncepcja przetwornika na bazie kompozytu silikon-etanol	30
2.3. Cele i tezy pracy	31
3. Konstrukcja i badanie przetworników na bazie kompozytu silikon-etanol.....	33
3.1. Materiał kompozytowy silikon-etanol	33
3.2. Koncepcje budowy przetwornika	35
3.3. Stanowiska do badań	36
3.4. Badania przetwornika rurkowego	39
3.5. Badania przetwornika mieszkowego	44
3.6. Podstawy projektowania przetworników mieszkowych.....	55
4. Badanie symulacyjne przetwornika.....	63
4.1. Model przetwornika mieszkowego	63

5.	Badania sterowania w układzie zamkniętym.....	70
5.1.	Badanie pozycjonowania liniowego napędu na bazie kompozytu silikon-etanol	70
6.	Podsumowanie i wnioski	93
6.1.	Podsumowanie badań	93
	Perspektywy dalszych badań	94
	Literatura	96
	ABSTRACT	100

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań przetworników zbudowanych na bazie kompozytu silikon-etanol. Jest to nowy materiał, który można uznać za kompozytowy materiał zmiennofazowy (PCM- ang. *phase change materials*), ponieważ zachodzi w nim przemiana fazowa, można go też zaklasyfikować jako materiał z termiczną pamięcią kształtu, gdyż pod wpływem temperatury ma on zdolność do znaczących zmian wymiarów, osiągając nawet wydłużenie o 100%. Kompozyt składa się z osnowy z gumy silikonowej, w której osadzone są mikropęcherzyki wypełnione etanolem. Mechanizm zmian wymiarów kompozytu silikon-etanol bazuje na przemianie ciecz-gaz etanolu zachodzącej pod wpływem temperatury. W trakcie tej przemiany gwałtownie wzrasta objętość właściwa etanolu powodując wzrost ciśnienia wewnątrz pęcherzyków i w konsekwencji ekspansję całego materiału. W trakcie chłodzenia natomiast etanol ponownie się skrapla a materiał kompozytu powraca do pierwotnego kształtu pod wpływem sił sprężystości osnowy. Zdolność do dużych odkształceń w połączeniu z niewysokim kosztem surowców potrzebnych do wytworzenia kompozytu w połączeniu z łatwością jego formowania przez odlewanie czyni go potencjalnie atrakcyjnym materiałem do budowy przetworników termomechanicznych albo elektromechanicznych. Bazując na informacjach przedstawionych w literaturze na temat budowy przetworników na bazie kompozytu silikon etanol zbudowano dwa rodzaje prototypów przetworników na bazie tego materiału kompozytowego – rurowe oraz mieszkowe. Dla obu przeprowadzono badania wstępne określające możliwe do osiągnięcia przez nie przemieszczenia oraz jakie siły mogą być przez nie wygenerowane. Następnie na podstawie tych badań sformułowano zalecenia odnośnie konstrukcji przetworników mieszkowych. W dalszej części pracy na bazie drugiej koncepcji przetwornika zbudowano napęd liniowy pozycjonujący pracujący w układzie pętli zamkniętej. Przeprowadzono na nim badania pozycjonowania z zastosowaniem regulatorów P oraz PI oraz oceniono jakość regulacji pozycjonowania. Następnie poddano napęd modyfikacjom mającym na celu poprawę jego pracy przez dodanie zewnętrznego chłodzenia w postaci wentylatora, przyspieszającego odprowadzanie ciepła z przetwornika, oraz dodając możliwość forsowania napięciem w fazie pracy napędu. Zmodyfikowano także sam regulator dodając wewnętrzne sprzężenie zwrotne od temperatury.

Najważniejsze oznaczenia i skróty użyte w pracy

T	– temperatura [K]
ΔH	– ciepło utajone [J]
M	– masa molowa
c	– koncentracja molowa
p	– ciśnienie pary etanolu
t	– czas
κ	– moduł ściśliwości osnowy – silikonu
μ	– moduł ścinania osnowy – silikonu
α	– współczynnik rozszerzalności termicznej
κ_e	– efektywny moduł ściśliwości kompozytu
μ_e	– efektywny moduł ścinania kompozytu
α_e	– efektywny współczynnik rozszerzalności termicznej
l_0	– długość początkowa
Δl	– wydłużenie bezwzględne
ε	– wydłużenie względne
D	– średnica
F_b	– siła blokująca
σ	– naprężenie
$\boldsymbol{\sigma}$	– tensor naprężeń
$\boldsymbol{\varepsilon}$	– tensor odkształceń
e	– uchyb
y	– wartość wyjściowa
$G(s)$	– transmitancja
PCM	– ang. <i>phase change material</i> - materiał zmieniający fazę

Wstęp

W urządzeniach technicznych często jako elementy wykonawcze stosuje się różnego rodzaju przetworniki zamieniające elektryczny sygnał wejściowy na pożądany wyjściowy sygnał mechaniczny, taki jak siła, moment obrotowy, prędkość czy przemieszczenie. Najczęściej takimi przetwornikami są różne silniki elektryczne, siłowniki pneumatyczny i hydrauliczna, a także elektromagnesy. W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat prowadzone były różne badania nad zastosowaniem przetworników opartych na tak zwanych materiałach inteligentnych, które mogą zmieniać swoje właściwości fizyczne, a szczególnie geometryczne, pod wpływem sygnałów fizycznych, takich jak np. pole elektryczne albo magnetyczne, czy też temperatura. Zgodnie z definicjami zawartymi w pracach [1]–[4] materiał inteligentny „poddany działaniu stymulującego zewnętrznego oddziaływania dokonuje jego rozpoznania, przetworzenia i odpowiada w sposób charakterystyczny dla siebie wytwarzając efekt użyteczny, przy czym, wartość swojej odpowiedzi modyfikuje tak aby swoją strukturę optymalnie dopasować do panujących warunków”. Należy przy tym zauważyć, że określenie „inteligentne” w odniesieniu do materiałów jest nieprecyzyjne, bowiem ich inteligencja polega tylko na zmianie wymiarów. Takie materiały stwarzają jednak nowe możliwości konstruowania przetworników, w których w porównaniu do tradycyjnych przetworników elektromechanicznych, nie występują części ruchome, takie jak wirniki, łożyska czy tłoki, w związku z czym przesuwana masa elementu ruchomego jest mniejsza. Do grupy tzw. materiałów inteligentnych (ang. smart) można zaliczyć także materiały zmieniające fazę skupienia (ang. Phase Change Materials-PCM), czyli materiały, w których wykorzystuje się w celach funkcjonalnych, zachodzącą w nich przemianę fazową na skutek której, zmieniają się ich właściwości fizyczne i geometryczne. Do tej kategorii zalicza się między innymi materiały, które zmieniają stan skupienia pod wpływem temperatury.

Obecnie dostępnych jest wiele substancji, które podczas przemiany ciec-z-gaz, mają duży potencjał do generowania sił i przemieszczeń. Do budowy przetworników najlepiej wykorzystać, takie materiały, które charakteryzują się stosunkowo dużą różnicą pomiędzy ich objętością w stanie ciekłym i gazowym. Jednym z czynników ograniczających możliwości konstrukcyjne przetworników z materiałami zmieniającymi fazę jest zapewnienie odpowiedniej szczelności, która zapobiegnie niepożądanemu ucieczce czynnika roboczego, występującego w postaci cieczy albo gazu.

W roku 2017. opracowano nowy materiał kompozytowy, składający się z elastycznej osnowy z gumy silikonowej, w której umieszczone były rozproszone mikro pęcherzyki wypełnione płynnym etanolem [5]. Kompozyt ten zmieniał swoje wymiary pod wpływem temperatury, wykorzystując przemianę ciec-z-gaz etanolu. Był w stanie wykonywać takie przemiany wielokrotnie, dzięki pozostawianiu etanolu wewnątrz kompozytu tj. przetwornika. Badania nad możliwościami zastosowania kompozytu silikon-etanol są dopiero w początkowej fazie. Z tego powodu w niniejszej pracy podjęto prace nad zbudowaniem i przebadaniem przetworników z zastosowaniem tego kompozytu. Głównym celem pracy jest opracowanie podstaw teoretycznych projektowania i modelowania oraz wykonania badań przetworników na bazie kompozytu silikon-etanol. Kolejnym celem jest zbudowanie serwo napędu z takim przetwornikiem oraz zaproponowanie metod sterowania nimi.

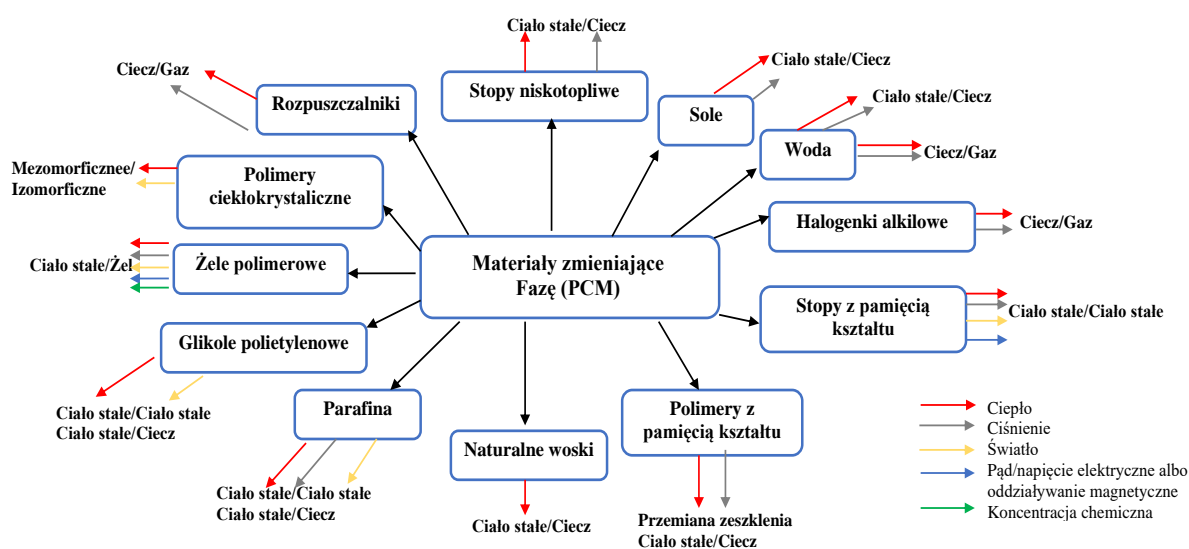
1. Przegląd aktualnego stan wiedzy

1.1. Materiały zmieniające fazę

Przemianę fazową można zdefiniować, jako indukowaną z zewnątrz zmianę układu cząstek, cząsteczek lub atomów substancji o ustalonym składzie chemicznym, która przejawia się nowymi właściwościami materiału. [6]. Materiałem zmieniającym fazę jest materiał, w którym może zajść co najmniej jedna przemiana fazowa [7]. Do materiałów zmieniających fazę można także zaklasyfikować stopy z termiczną pamięcią kształtu. Efekt pamięci kształtu uzyskuje się w nich dzięki powtarzalnej przemianie austenit-martenzyt [8]. Ciec-zy elektro- i magneto-reologicznych, pomimo że zmieniają lepkość pod wpływem pola elektrycznego albo magnetycznego, nie zalicza się do PCM, ponieważ zmiana właściwości nie wynika ze zmiany struktury cząstek, ale z uporządkowania cząstek zawieszonych w cieczy wzdłuż linii pola elektrycznego albo magnetycznego. Podobnie sprawa wygląda z piezoelektrykami, które nie zmieniają swojej struktury pod wpływem pola elektrycznego, a jedynie ustawianie mikrokryształków.

Koncepcja zastosowania zmiany stanu skupienia do przemiany ciepła w energię mechaniczną była powszechnie stosowana w praktyce już na progu rewolucji przemysłowej, a mianowicie w maszynach parowych, których działanie opierało się na przemianie wody w parę. Innym przykładem znanych przetworników bazujących na zmianie stanu skupienia są siłowniki parafinowe, powszechni znane jako tzw. „aktuatory” aktywowane termicznie [9].

Wykorzystuje się w nich zmiany objętości właściwej aktywnego medium, będącej wynikiem zmiany jego stanu skupienia. W przypadku siłowników parafinowych, na skutek wzrostu temperatury, następują dwie odwracalne przemiany tj.: jedna między dwiema fazami ciała stałego oraz druga ciało stałe-ciecz [7]. W przypadku zastosowania cieczy, przykładowo wody, alkoholi albo stopionych soli jako aktywnego medium [10]–[12], występuje przemiana ciecz-gaz. Wiele różnych rodzajów przemian fazowych, z którymi wiąże się istotna zmiana objętości zastosowano już w wykonanych badaniach nad opracowaniem przetworników [7]. Badano możliwości aplikacyjne nie tylko przemian fazowych zachodzących pod wpływem temperatury, ale także przemian powodowanych innymi czynnikami, np. oddziaływaniem magnetycznym. Klasyfikacja materiałów zmieniających fazę jest bardzo rozległa tzn. obejmuje dużą liczbę materiałów, co ilustruje rysunek 1 [7].



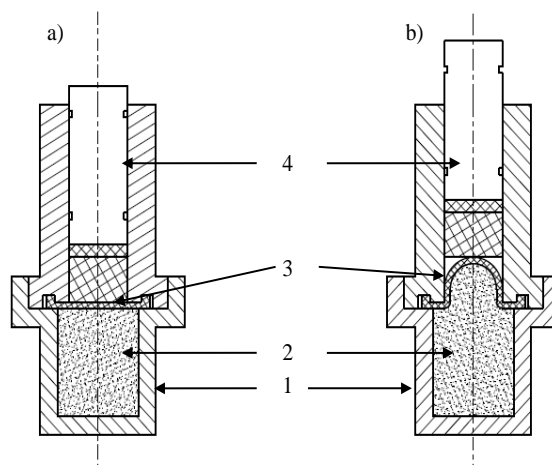
Rysunek 1. Klasyfikacja materiałów zmieniających fazę (opracowano na podstawie [7])

Kompozyty typu PCM znalazły już zastosowanie w wielu urządzeniach technicznych. Spotyka się je między innymi w mikroukładach elektromechanicznych (ang. microelectromechanical systems – MEMEs), ponieważ w małej skali często okazują się efektywniejsze od konwencjonalnych mechanizmów. Znajdują także zastosowanie w układach do magazynowania ciepła [13], w inteligentnych tekstyliach [14], czy też służą do przechowywania danych [15]. Bardzo ciekawym jest ich użycie w elastycznych robotach (ang. soft robotics) [16]–[18].

W budowie urządzeń wykorzystujących PCM stosuje się zazwyczaj następujące rozwiązania konstrukcyjne [7]:

- sztywną obudowę z ukierunkowanym wylotem, pozwalającym na wypłynięcie materiału,

- elastyczną obudowę, rozszerzającą i kurczącą się w różnych kierunkach,
- sztywną obudowę z ruchomym tłokiem albo membraną (rysunek 2).



Rysunek 2. Schemat przetwornika parafinowanego jako przykład urządzenia z materiałem PCM z sztywną obudową i ruchomą membraną, w stanach: a) dla parafiny chłodnej tj. w stanie stałym, b) dla parafiny podgrzanej do stanu ciekłego; gdzie: 1 – sztywna obudowa, 2 – parafina, 3 – membrana, 4 – tłok (opracowano na podstawie [19])

W przypadku materiału zamkniętego w sztywnej komorze, po jego podgrzaniu dochodzi do przemiany fazowej jego części aktywnej z cieczy do gazu, skutkującej wzrostem objętości, w rezultacie czego następuje wzrost ciśnienia. Ten wzrost może przykładowo zostać wykorzystany do ukierunkowanego przemieszczenia części materiału bądź elementu przetwornika. W tym celu jego komora musi posiadać otwór odgrywający rolę dyszy. Takie rozwiązanie znalazło dość powszechne zastosowanie w technice termicznego drutu atramentowego. W materiale tuszu zachodzi przemiana ciec-z-gaz generująca ciśnienie, wyrzucające krople tuszu [20]–[22]. Zmiany objętości mogą zostać wykorzystane w sztywnych konstrukcjach z otworami wlotowymi i/albo wylotowymi. Przykładem mogą być proste mikropompy z zaworem zwrotnym. W takiej mikropompie zaopatrzonej w grzałkę, w trakcie grzania, część cieczy ulega przemianie w gaz, powodując wzrost ciśnienia wypychający płyn (zwykle 1. kroplę) przez wylot. Po wyłączeniu grzania, na skutek ubytku cieczy oraz chłodzenia, następuje spadek ciśnienia, co prowadzi do otwarcia wlotu i napełnienia komory roboczej mikropompy [23].

W niektórych zastosowaniach PCM mogą być zamknięte w obudowie, która jest częściowo elastyczna. Przykładem mogą być mikrosfery ekspandujące [7], [24]. Są one zbudowane z termoplastycznego polimeru wypełnionego cieczą o niskiej temperaturze wrzenia. Po podgrzaniu, termoplastyczna sfera przechodzi przemianę szklistą, stając się łatwo odkształcalną, natomiast wypełniająca go ciecz zmieniając się w gaz, generuje ciśnienie

powodujące rozszerzanie się sfery. Podczas chłodzenia materiał termoplastyczny ponownie twardnieje powodując, że tzw. mikro-cela zachowuje swoje zwiększone wymiary. Ponieważ proces ten jest jednorazowy, mikro-cele mogą znaleźć zastosowanie w takich urządzeniach jak pompy albo zawory jednokrotnego użycia [24]. Przykładem konstrukcji o obudowach częściowo elastycznych mogą być mikrozawory, służące do sterowania kierunkiem przepływu. W takich elementach odginające się elastyczne części odkształcają się pod naporem materiału PCM zwiększającego swoją objętość. Na skutek wygenerowanego odkształcenia dochodzi do blokowania kanalików tj. ich zamykania [25]. Elastyczność materiału obudowy zamykającego materiał PCM zastosowano także w koncentratorze samo-śledzącym promienie słoneczne. W rozwiązaniu tym promieniowanie podczerwone nagrzewało materiał parafinowy, który zwiększając swoją objętość odkształcał warstwę odbijającą promienie słoneczne, dzięki czemu odbijały się one w pożądanym kierunku, co zwiększało ilość generowanej energii elektrycznej [26], [27].

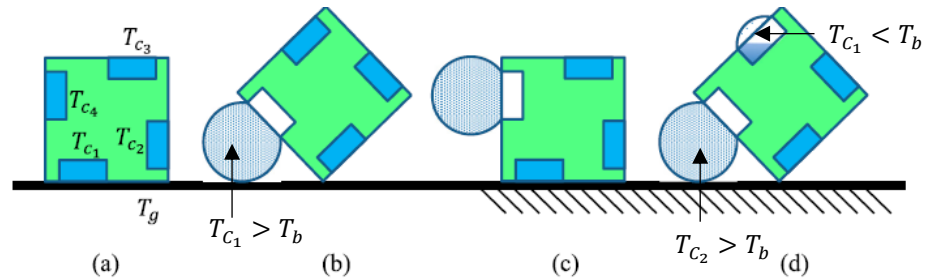
W konstrukcjach z ruchomym tłokiem albo membraną, w komorze umieszczony jest materiał zmieniający fazę, a jedna ze ścian obudowy zastępowana jest membraną albo ruchomym tłokiem. Rozwiązanie takie występuje już od dawna w parafinowych przełącznikach termostatycznych, stosowanych w motoryzacji. Można je także znaleźć w nowszych napędach, opartych o przemianę ciec-z-gaz [10], [12].

1.2. Przetworniki bazujące na przemianie ciec-z-gaz

W jednej z koncepcji budowy przetwornika bazującego na przemianie ciec-z-gaz zastosowano stosunkowo duże bo o pojemności 0,5 ml zbiorniki, wykonane z elastycznego materiału takiego jak guma silikonowa, wypełnione ciekłym etanolem [28]. Dzięki temu możliwe było uzyskiwanie dużych odkształceń, dochodzących do 160% długości początkowej, przy pełnej przemianie cieczy w gaz. W takich rozwiązaniach istotnym problemem jest jednak żywotność tj. sił i przemieszczeń, ze względu na dużą lotność aktywnego medium w stanie gazowym oraz na dużą przepuszczalność materiałów, z których zbudowano elastyczne zbiorniki. W przypadku elastycznego robota, w którym zastosowano gumowe baloniki wypełnione etanolem, potrafił on stracić możliwość poruszania się już po upływie 7 dni, na skutek „ucieczki” aktywnego medium [29].

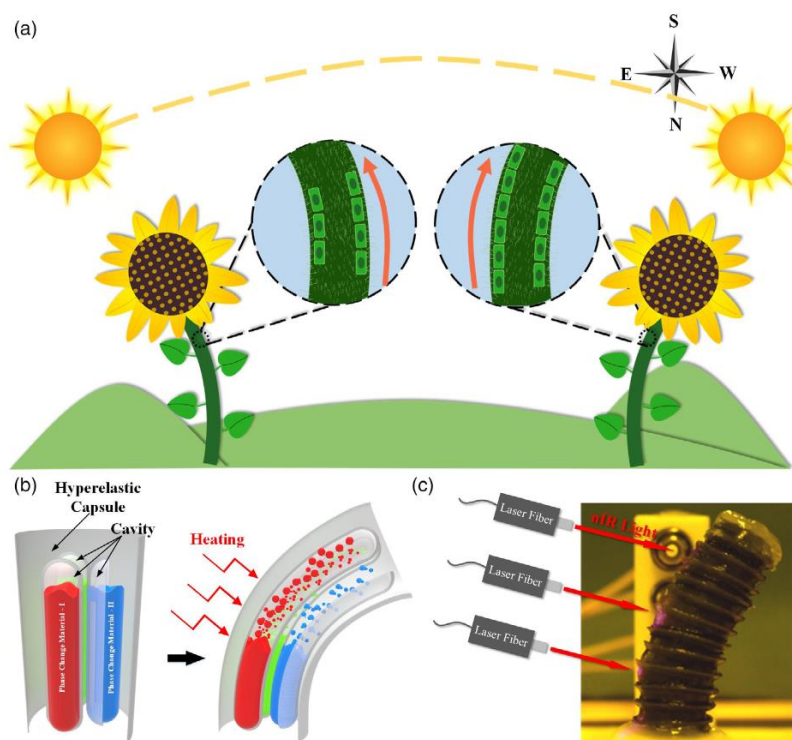
Jak wspomniano wyżej, jednym z obszarów potencjalnego zastosowania materiałów PCM są roboty elastyczne. Przykładowo, przemiana ciec-z-gaz może zostać zastosowana w robocie poruszającym się po rozgrzanej powierzchni [29]. W tym rozwiązaniu na bokach

prostokątnej obudowy umieszczono baloniki wypełnione cieczą o niskiej temperaturze wrzenia. Kontakt z rozgrzanym podłożem powodował rozgrzanie cieczy i w konsekwencji tego, wyrzucenie się balonika oraz ruch całego robota, jak to zaprezentowano na rysunku 3.



Rysunek 3. Przemieszczanie się robota po powierzchni nagrzanej do temperatury przekraczającej o 40 stopni wartość temperatury wrzenia zastosowanej aktywnej substancji ulegającej przemianie ciecz-gaz [29]: a) robot zostaje położony na rozgrzanej powierzchni, b) temperatura cieczy w zbiorniczku na boku przyległym do rozgrzanej powierzchni przekracza temperaturę wrzenia cieczy T_b , na skutek czego ciecz przemienia się w gaz, a rozszerzający się zbiornik zaczyna przechylać całego robota, c) robot przewraca się na drugi bok, d) ciecz z zbiorniczka na drugim boku na skutek nagrzania ulega przemianie ciecz-gaz, natomiast w pierwszym zbiorniku substancja po ochłodzeniu powraca do stanu ciekłego

Innym przykładem wykorzystania przemiany ciecz-gaz jest robot, wzorowany na słoneczniku, zawierający kilka komórek wypełnionych etanolem, które w wyniku selektywnego podgrzewania promieniami lasera, rozszerzały się pod wpływem ciśnienia par etanolu, powodując zginanie się całej konstrukcji w pożądany sposób, tak jak to pokazano na rysunku 4 [28].



Rysunek 4. Robot wzorowany na słoneczniku z komorami wypełnionymi etanolem [28]: a) słonecznik zgina się w

stronę słońca na skutek zmian objętości w lodydze wynikających z asymetrycznego namnażania się komórek po stronie oświetlonej i nieoświetlonej, b) schemat przetwornika zginającego się na skutek rozszerzania się selektywnego podgrzewanych komór wypełnionych substancją zmieniającą fazę pod wpływem ciepła, c) prototyp takiego przetwornika z zastosowaniem podgrzewania promieniowaniem podczerwonym

Istotnym problemem do rozwiązania w prezentowanych powyżej konstrukcjach, jest zapobieganie ucieczce etanolu ze zbiorników.

Oprócz zastosowań etanolu w literaturze opisano także badania nad innymi cieczami, które można zastosować w elastycznych przetwornikach, działających w oparciu o przejście ze stanu ciekłego w gazowy. Takimi cieczami były: woda [30], [31], płyn na bazie fluorów Novec 7000 [32]–[34] oraz aceton [18].

1.3. Materiały kompozytowe zmieniające fazę

W celu nadania nowych właściwości materiałom zmieniającym fazę łączy się je z dodatkami, nie rozpuszczającymi się w nich, tworząc w ten sposób materiały kompozytowe. Przykładem takiego materiału może być kompozyt wosku z dodatkiem ferrofluidów, który po stopieniu może być kontrolowalny, tzn. zmieniany przez magnes [35]. Innym przykładem jest stosowanie dodatków, dzięki którym generowanie ciepła powodującego przemianę staje się możliwe w samym materiale, bez stosowania dodatkowych zewnętrznych grzałek. Dodatki grafitu oraz sadzy nadawały parafinie zdolność przewodzenia prądu elektrycznego, oraz umożliwiały jej nagrzewanie się na skutek oporowego wydzielania się ciepła przy przepływie tego prądu. Dzięki takiej modyfikacji, uzyskiwano szybsze nagrzewanie w porównaniu ze stosowaniem grzałek zewnętrznych [36], [37]. Jako dodatek zaproponowano także nanocząstki tlenku żelaza, dodawane do parafiny. W takim kompozycie oświetlonym promieniem lasera, generowało się ciepło powodujące jego topnienie [38].

W ostatnich latach pojawiła się koncepcja materiałów kompozytowych, w których aktywne medium ulegające przemianie fazowej jest otoczone elastyczną osnową. Jedną z pierwszych koncepcji zaproponowanych, był kompozyt parafiny w osnowie elastomeru z dodatkami umożliwiającymi przewodnictwo prądu elektrycznego. Określony został przez twórców, jako elektro-aktywny materiał hydrauliczny w stanie stałym (EAHS-Electro-active Hydraulic Solid) [39]. W tym materiale mikrocząstki parafiny są rozpraszane w obrębie osnowy elastomerowej, w której także znajdują się dodatki grafitowe, umożliwiające przepływ prądu. Przyłożenie napięcia do tego materiału powoduje przepływ przez niego prądu, co skutkuje

wydzielaniem się ciepła Joule’a-Lenza i podgrzaniem materiału. Na skutek wzrastającej temperatury, cząstki parafiny ulegają przemianom w ciecz, generując ciśnienie rozszerzające cały kompozyt. Przykładowa badana próbka cylindryczna o średnicy 14 mm i długości 50 mm mogła osiągnąć wydłużenie względne 3% oraz wygenerować siłę 4500 N [39].

W ramach dalszego rozwoju, powstała też koncepcja kompozytów, składających się z cieczy umieszczonej w elastycznej osnowie [40]. Taki materiał kompozytowy był zdolny do dużych odkształceń, ze względu na znaczące zwiększanie się objętości właściwej przy przejściu materiału aktywnego ze stanu ciekłego w gazowy. Po raz pierwszy przedstawiono taki materiał w 2017 roku w pracy *Soft material for soft actuators*. Był nim kompozyt silikon-etanol [5]. Jako materiał osnowy zastosowano gumę silikonową, a aktywnym medium był etanol. W tym kompozycie możliwe jest zastosowanie także innych cieczy o stosunkowo niskiej temperaturze wrzenia. W Tabeli 1 przedstawiono właściwości różnych cieczy o niskiej temperaturze wrzenia. Przykładowo, w literaturze opisano kompozyty silikonu z cieczą na bazie fluoru (o temperaturze wrzenia 34°C) albo z wodą [41] a także z alkoholami i rozpuszczalnikami [42]. Zaletami etanolu jest jego niski koszt oraz mała toksyczność.

Tablica 1. Ciecze do potencjalnego zastosowania w kompozytach ciecz-elastomer [42]

Ciecz	Temperatura wrzenia T	Ciepło utajone ΔH	Gęstość ρ	Próg toksyczności
	°C	kJ/mol	g/dm ³	ppm
Novec	34	28,4	1400	250
FC72	56	29,7	1680	Nie określony
Metanol	64,5	35,2	792	200
Etanol	78,2	38,6	789	1000
Izopropanol	80,3	39,9	786	400

W literaturze zaproponowano także kompozyt składający się z ciekłego metalicznego stopu, elastomeru silikonowego i etanolu [43]. Jako ciekłego metalu użyto eutektycznego stopu galu i indu, który jest w stanie ciekłym w temperaturze pokojowej. Użycie metalu umożliwiło bezpośrednie indukcyjne nagrzewanie kompozytu.

Koncepcje połączenia zdolności elastomerów silikonowych, do dużych odkształceń z potencjałem etanolu do znacznej zmiany objętości właściwej przy przemianie ciec-z-gaz, zastosowano także w zginającym się przetworniku o strukturze kompozytu warstwowego [44]. W rozwiązaniu tym, pomiędzy warstwami o różnej sztywności, umiejscowiono warstwę z maty nasączonej etanolem, wykonanej z nanowłókien. Dzięki asymetryczności rozmieszczenia warstw, uzyskiwano pożądany kierunek zginania przetwornika.

1.4. Wytwarzanie kompozytu silikon-etanol oraz cykl jego pracy

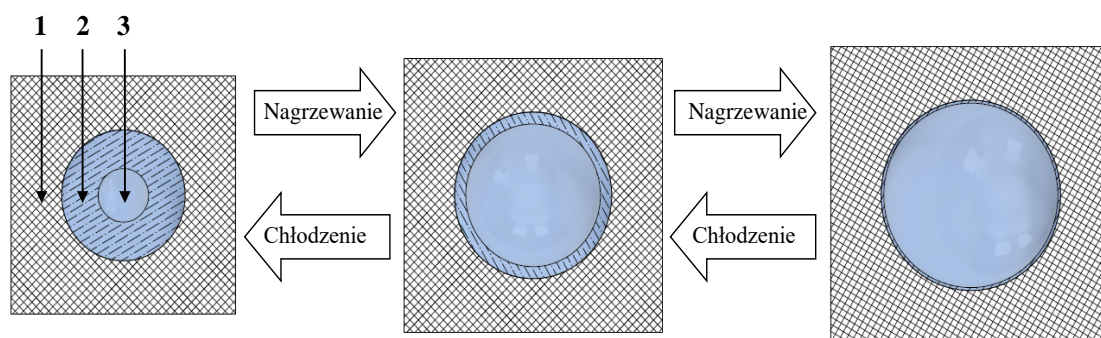
Kompozyt silikon-etanol najczęściej otrzymywany jest w procesie odlewania elastomeru silikonowego, zmieszanego z etanolem. Jako surowców używa się elastomerów silikonowych dwuskładnikowych, których składniki pozostają ciekłe do momentu zmieszania, oraz etanolu o czystości 99,9%. Wśród silikonów dotychczas używane były głównie różniące się właściwościami mechanicznymi, takie typy, jak Ecoflex 00-50, Ecoflex 00-35, Ecoflex 00-30 [5], [45], [46], które są używane w robotach elastycznych. Cechują się one stosunkowo małą lepkością, co ułatwia ich odlewanie.

Typowy sposób wytwarzania kompozytu polega na zmieszaniu silikonu i etanolu jeszcze w stanie stałym. Czasami etanol jest dodawany najpierw do składnika A silikonu, przed dodaniem składnika B., W innym podejściu, etanol jest dodawany tuż po zmieszaniu składników A i B, zanim proces zestalania się silikonu uniemożliwi wymieszanie z nim etanolu. W porównaniu do zwykłego odlewania silikonów nie stosuje się odpowietrzania, co skutkowałoby ucieczką par etanolu z materiału przed jego zestaleniem. W podstawowej procedurze po zakrzepnięciu silikonu materiał kompozytowy uważa się za gotowy. Istnieje jednak podejście, w którym po zakrzepnięciu pozostawia się materiał kompozytowy, aby gazy znajdujące się w mikropęcherzykach wydostały się poprzez dyfuzję na zewnątrz. Następnie zanurza się materiał w etanolu, aby poprzez dyfuzję wypełnić na nowo pęcherzyki. Procedura ta ma zapewnić większą jednorodność próbek, jednakże znacząco wydłuża czas przygotowania materiału [42].

W literaturze zademonstrowano także możliwość zastosowania wytwarzania addytywnego przetworników z kompozytu silikon-etanol, określanego jako drukowanie 3D [5], [47]. W tym przypadku, przed nałożeniem na podłoże, w specjalnym mieszalniku, w głowicy drukującej mieszane były ze sobą składniki A i B silikonu [47].

Cykl pracy kompozytu obejmuje zmianę jego wymiarów geometrycznych podczas najpierw nagrzewania a potem chłodzenia. Schemat tego cyklu został przedstawiony na rys. 5.

W nagrzewanym kompozycie, po osiągnięciu temperatury wrzenia etanolu wynoszącej około 78,4 °C, w warunkach ciśnienia atmosferycznego, rozpoczyna się przemiana ciec-z-gaz. Część etanol zmieniając stan skupienia z ciekłego w gazowy znacząco zwiększa swoją objętość właściwą, powodując rozciągnięcie pęcherzyków, w których się znajduje i tym samym ekspansję całego materiału. Jednocześnie zwiększaniu objętości pęcherzyków przeciwdziałają siły sprężystości osnowy, powodując zwiększenie ciśnienia wewnątrz pęcherzyków, co skutkuje podwyższeniem temperatury wrzenia i ustaniem procesu przemiany ciec-z-gaz. Z tego powodu, warunkiem kontynuowania przemiany jest dalsze podgrzewanie kompozytu, dzięki któremu reszta etanolu w pęcherzykach może ulec przemianie, powodując dalsze rozszerzanie kompozytu. Po przemienieniu całego ciekłego etanolu, dalsza ekspansja materiału może następować poprzez zwiększanie objętości nagrzewanej pary etanolu. W trakcie ochładzania następuje proces odwrotny, stygnący etanol powraca do stanu ciekłego, a siły sprężystości osnowy, którym nie przeciwdziała ciśnienie wewnątrz pęcherzyków, powodują powrót materiału do pierwotnych wymiarów [5], [48] .

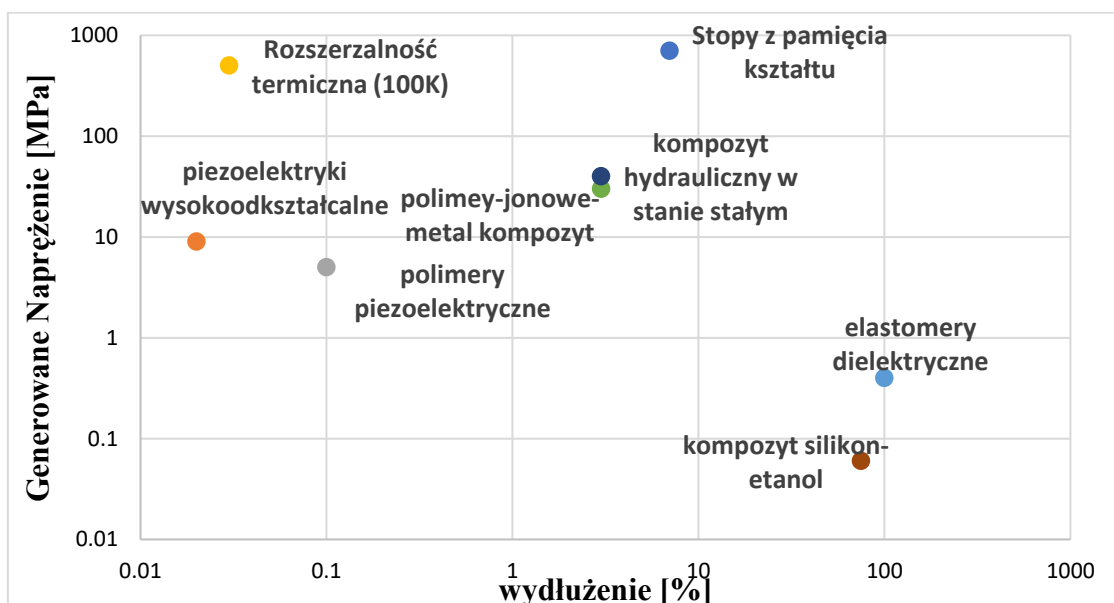


Rysunek 5. Cykl pracy kompozytu (1- materiał osnowy, 2- ciekły etanol, 3- pary etanolu)

1.5. Właściwości kompozytu silikon-etanol

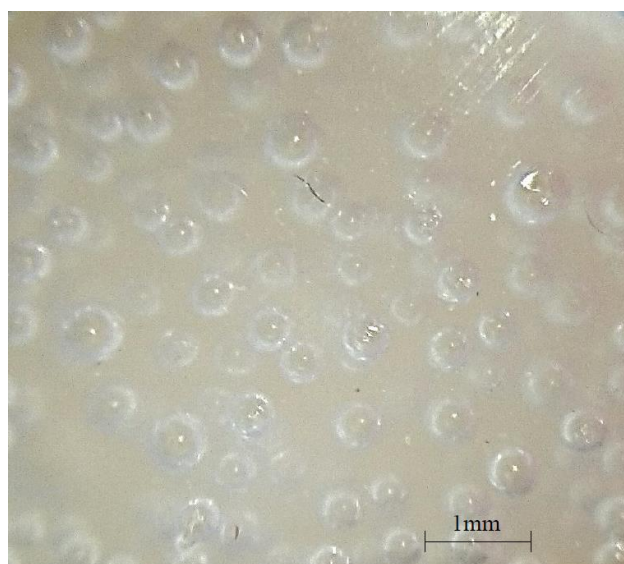
Główną cechą kompozytu silikon-etanol, czyniącą go potencjalnie atrakcyjnym materiałem na przetwornik napędowy, jest jego zdolność do powtarzalnych dużych odkształceń, występujących pod wpływem temperatury. W jednej z pierwszych publikacji poświęconej temu materiałowi kompozytowemu [5] podano, że dla próbki kompozytu o zawartości 20% objętościowych etanolu, po podgrzaniu go w kąpielii wodnej do temperatury 90°C zmierzone odkształcenie objętościowe wyniosło około 900 % objętości początkowej. Jako możliwe określono osiągnięcie liniowego wydłużenia do 140% długości początkowej [5]. Wartości możliwych do uzyskania sił generowanych przez badany kompozyt oraz odkształceń,

zależą od zawartości etanolu w kompozycie oraz od wartości wzrostu temperatury kompozytu w odniesieniu do temperatury otoczenia. Wraz ze wzrostem ilości etanolu generowane siły i przemieszczenia osiągają większe wartości, jednakże już w pierwszych pracach poświęconych kompozytowi określono optymalną zawartość etanolu, tylko jako 20% objętości w stosunku do silikonu [5]. Powyżej tej wartości występują bowiem trudności z prawidłowym zmieszaniem etanolu z silikonem, w związku z czym występują problemy z otrzymywaniem powtarzalnych właściwości wytwarzanego materiału. Właśnie, dla tej zawartości etanolu w kompozycie silikon-etanol prowadzona jest większość badań opisywanych w literaturze. Podobnie im większa wartość wzrostu temperatury tym większe generowane są siły i odkształcenia. W pracy [40] zbadano siłę blokującą dla próbek o średnicy 20 mm i wysokości 50 mm zależnie od temperatury nagrzania. Dla 80°C uzyskano siłę blokującą wynoszącą 130 N, dla 125°C było to 670 N, dla 155°C uzyskano 950N, a dla 270°C aż 1700N [48]. Ustalono, że górna granica optymalnego zakresu pracy wynosiła 85°C, ponieważ powyżej tej temperatury następowała szybka degradacja materiału. Poniżej 50°C reakcja na wzrost temperatury była natomiast stosunkowo słaba [48]. W badaniach nad kompozytem nagrzewanym pośrednio tj. indukcyjnie, dla nagrzania do temperatury 85°C uzyskano wartość wydłużenia liniowego wynoszącą 76%. Naprężenie blokujące wyniosło ok. 0,06 MPa. W pracy [49], przy temperaturze 86°C określono naprężenie blokujące na około 0,13 MPa. Na rysunku 6 i w Tabeli 2 zestawiono parametry tj. wydłużenie i naprężenie omawianego kompozytu silikon-etanol z innymi materiałami inteligentnymi. Widoczne jest, że zdolność do dużych odkształceń czyni ten kompozyt szczególnie atrakcyjnym do budowy przetworników.



Rysunek 6. Właściwości kompozytu silikon etanol w odniesieniu do innych materiałów inteligentnych [45]

Po wytworzeniu, w osnowie silikonowej znajdują się pęcherzyki wypełnione ciekłym etanolem oraz mieszaniną par etanolu i powietrza, co widoczne jest w makrostrukturze materiału widocznej na rys. 7. Oprócz dużych pęcherzy w materiale znajdują się także liczne mikropęcherzyki wypełnione etanolem [48].



Rysunek 7. Makrostruktura kompozytu silikon-etanol [zdjęcie własne]

Tabela 2. Właściwości wybranych materiałów inteligentnych

Materiał przetwornika	Wydłużenie [%]	Napężenie [MPa]
Stopy z pamięcią kształtu [50]	7,0	700
Piezoelektryki wysokoodkształcalne [50]	0,02	9
Polimery piezoelektryczne [50]	0,1	5,0
Rozszerzalność termiczna (100K) [50]	0,03	500
Elastomery dielektryczne [5], [51]	100	0,4
Polimery jonowe-metal kompozyty [51]	3,0	30
Kompozyt hydrauliczny w stanie stałym [39]	3	40
Kompozyt silikon-etanol	75	0,06

Jedną z największych słabości przetworników zbudowanych na bazie kompozytów silikon-etanol, jest ich mała szybkość ich działania. Wynika to z faktu, że podstawą ich funkcjonowania są procesy cieplne nagrzewania i chłodzenia, które są zazwyczaj długotrwałe. W tym przypadku zachodzące wolno także na skutek niskiej przewodności cieplnej kompozytu. Próby poprawy dynamiki powiązane są właśnie z przyspieszeniem procesu grzania i

chłodzenia. Poprawę obu tych parametrów próbuje się uzyskać dzięki wprowadzaniu do kompozytu dodatków zwiększających jego przewodność cieplną [52], [53]. Szybkość nagrzewania próbuje się także polepszyć stosując modyfikacje sposobów grzania.

Istotnym problemem kompozytu jest ucieczka z niego etanolu wraz z upływem czasu [16], [17]. Następuje to na skutek dyfuzji par etanolu poprzez silikon do otaczającej atmosfery. Ulatnianie się etanolu jest związane z faktem, że cząsteczki etanolu oraz PDMS-Polidimetylosiloksanu, na bazie których powstają silikony są zbliżonych rozmiarów, przez co silikon nie stanowi dobrej bariery nieprzepuszczanej dla etanolu w postaci gazowej [5], [42]. Proces ucieczki znacząco przyspiesza wraz ze wzrostem temperatury, w związku z czym stosowanie temperatury w okolicach nasycenia, nie tylko skutkuje już tylko małym wzrostem odkształcenia, ale dodatkowo także przyspiesza zużycie przetwornika i pogorszenie jego osiągnięć na skutek ucieczki etanolu [48].

Ze względu na ucieczkę etanolu, w literaturze sugerowano zastosowanie dodatkowego uszczelnienia kompozytu. Zazwyczaj jest to dodanie dodatkowej zewnętrznej warstwy nieprzepuszczalnej, izolującej od atmosfery zewnętrznej [5], [41].

Ponieważ etanol może także dyfundować do wnętrza kompozytu, istnieje możliwość regeneracji siłowników. Realizować to można poprzez zanurzenie kompozytu w etanolu i pozostawieniu go w kąpieli przez czas potrzebny na regenerację [54]. Proces ten jest długotrwały, a ponadto czas potrzebny na ponowne nasycenie próbki kompozytu silikon-etanol zależy od jej rozmiarów. Jednakże ta możliwość pozwala na regenerację przetworników na bazie kompozytu silikon-etanol, o ile zapewni się możliwość wymiany elementów wytworzonych z kompozytu.

1.6. Podstawy teoretyczne działania kompozytu silikon-etanol

Czynnikiem wywołującym zmiany wymiarów kompozytu jest zmiana ciśnienia Δp pary etanolu wewnątrz pęcherzyków, rozproszonych w kompozycie, będącego różnicą pomiędzy ciśnieniem pary etanolu przy temperaturze początkowej $p(T_0)$ a ciśnieniem przy temperaturze, do jakiej został nagrzany kompozyt $p(T)$.

Wzór pozwalający na wyznaczenie ciśnienia pary etanolu uwzględnia parametry krytyczne etanolu tj. [49], [55]:

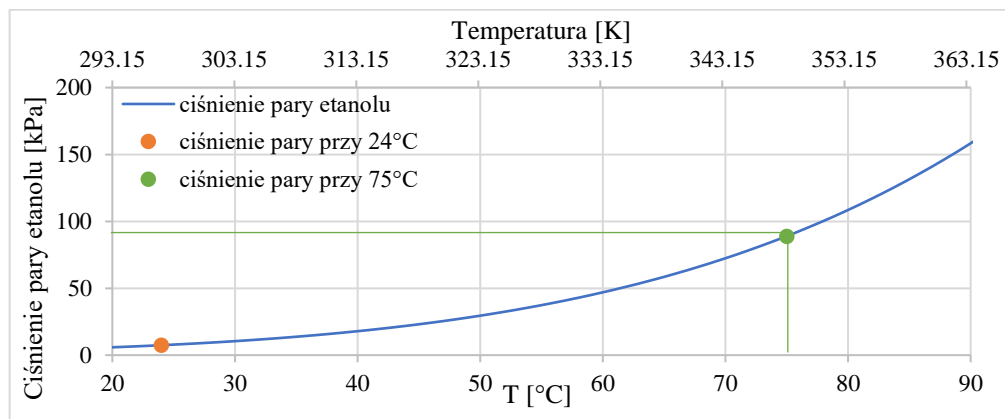
$$p(T) = p_c e^{\frac{T_c}{T}(-0.051477\theta^{1/2} - 8.27075\theta - 5.49245\theta^3 + 5.64829\theta^{11/2})} \quad (1)$$

$$\theta = 1 - \frac{T}{T_c} \quad (2)$$

gdzie:

T – temperatura etanolu w Kelwinach, p_c – ciśnienie krytyczne etanolu wynoszące 6,15 MPa, T_c – temperatura krytyczna etanolu wynosząca 513,9 K, $p(T)$ – ciśnienie etanolu.

Równanie to łączy ciśnienie pary z parametrami takimi jak temperatura krytyczna etanolu T_c i jego ciśnienie krytyczne p_c , które opisują tzw. krytyczny punkt etanolu. Jest to punkt końcowy krzywej temperatura-ciśnienie opisującej warunki współistnienia stanu gazowego i ciekłego. Zależność pomiędzy temperaturą a ciśnieniem pary etanolu zgodnie z równaniami (1) i (2) w zakresie 20°C÷90°C została przedstawiona na rysunku 8.



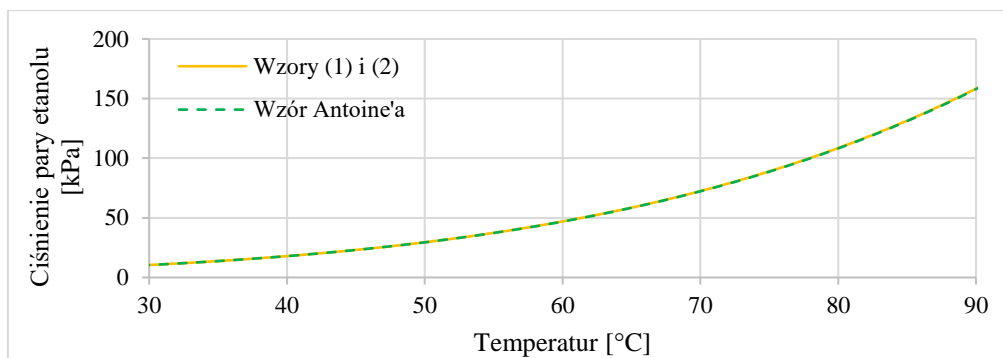
Rysunek 8. Ciśnienie pary etanolu obliczone według równań (1) i (2)

Do obliczenia ciśnienia pary etanolu można użyć także równania Antoine'a [56], którego przykładowa forma jest następująca:

$$p(T) = 0,133 \cdot 10^{8,04494 - \frac{1554,3}{T+222,65}} \text{ [kPa]} \quad (3)$$

gdzie: $p(T)$ - ciśnienie pary etanolu [kPa], T - temperatura etanolu [°C].

Dla etanolu, zależnie od zakresu temperaturowego opracowano różne wersje równania Antoine, różniące się wartościami parametrów liczbowych. W zasadniczym dla działania przetwornika na bazie kompozytu silikon-etanol zakresie temperatur tj 30÷90°C, równania (1) i (2) oraz (3) dają podobne rezultaty – rysunek 9.



Rysunek 9. Ciśnienie pary etanolu obliczone na podstawie równań (1) i (2), oraz wzoru Antoine'a

Wzrost ciśnienia wewnętrznego etanolu w kompozycie silikon-etanol na skutek zmiany temperatury można opisywać z prostym równaniem:

$$\Delta p = p(T) - p_0(T_0) \quad (4)$$

gdzie: $p_0(24^\circ\text{C})$ równe 7,4 kPa jest ciśnieniem pary etanolu przy temperaturze początkowej T_0 , którą jest temperatura pokojowa wynosząca około 24°C .

Właściwości kompozytu silikon-etanol są wynikiem kombinacji właściwości silikonowej osnowy oraz wpływu pęcherzyków wypełnionych etanolem. Z tego powodu parametry kompozytu silikon-etanol określa się jako efektywne.

Autorzy publikacji [49] wyprowadzili następujące teoretyczne formuły opisujące właściwości i parametry użytkowe kompozytu:

α_e – zależny od temperatury efektywny współczynnik rozszerzalności termicznej kompozytu silikon-etanol

$$\alpha_e = \frac{\kappa - \kappa_e}{3\kappa\kappa_e} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta T} + \alpha = \frac{3\kappa + 4\mu}{12\kappa\mu} \cdot \frac{f}{1-f} \cdot \frac{\Delta p}{T - T_0} + \alpha, [1/\text{K}] \quad (5)$$

κ_e – efektywny moduł ścisłości kompozytu silikon-etanol [Pa]

$$\kappa_e = (1 - f) \frac{4\mu}{3f\kappa + 4\mu} \kappa \text{ [Pa]}, \quad (6)$$

μ_e – efektywny moduł ścinania kompozytu silikon-etanol [Pa],

$$\mu_e = (1 - f) \frac{9\kappa + 8\mu}{9\kappa + 8\mu + 6f(\kappa + 2\mu)} \mu \text{ [Pa]}, \quad (7)$$

gdzie:

$\kappa = 423$ kPa – moduł ścisłości wynoszący dla silikonowej osnowy Ecoflex-00-03;

$\mu = 21,6$ kPa – moduł ścinania wynoszący dla silikonowej osnowy Ecoflex-00-03;

$\alpha = 0,000284$ K^{-1} – współczynnik rozszerzalności termicznej dla materiału silikonowej osnowy Ecoflex-00-03;

f – udział objętościowy etanolu w kompozycie silikon-etanol (typowo $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^3$);

$\kappa_e = 85,9 \text{ kPa}$ – efektywny moduł ścisłości kompozytu silikon-etanol (dla kompozytu z udziałem objętościowym etanolu $f = 0,2$);

$\mu_e = 15,2 \text{ kPa}$ – efektywny moduł ścinania kompozytu silikon-etanol (dla kompozytu z udziałem objętościowym etanolu $f = 0,2$);

α_e – efektywny współczynnik rozszerzalności termicznej kompozytu silikon-etanol K^{-1} ;

$\Delta T(t)$ – wzrost temperatury w czasie od temperatury pokojowej $24 \text{ }^\circ\text{C}$, tj.

$$\Delta T(t) = T(t) - T_0$$

W tej samej publikacji zaproponowano także równanie konstytutywne dla kompozytu, opisujące zależność między jego naprężeniem a odkształceniem:

$$\boldsymbol{\sigma} = \left(\kappa_e - \frac{2}{3} \mu_e \right) \text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon}) \mathbf{I} + 2\mu_e \boldsymbol{\varepsilon} - 3\kappa_e \alpha_e \Delta T \mathbf{I} \quad (8)$$

gdzie:

$\boldsymbol{\sigma}$ i $\boldsymbol{\varepsilon}$ są macierzami tensorów odpowiednio naprężenia i odkształceń w trzech osiach,

$\text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon})$ – ślad macierzy odkształceń ,

\mathbf{I} – tensor jednostkowy tożsamości

Rozwiązując równanie (8) dla kompozytu umieszczonego w rurce, której konstrukcja (o dużej sztywności) uniemożliwia rozszerzanie się w kierunku obwodowym określonym promieniem r , ale umożliwia swobodne przemieszczenie się kompozytu w kierunku wzdłużnym (w osi obrotu), określonym jako z , przy przyjętych warunkach brzegowych $\sigma_{zz} = 0 \text{ Pa}$ (w osi) oraz $\varepsilon_{rr} = 0$ (odkształcenie promieniowe), można uzyskać równanie na swobodne względne wydłużenie termiczne:

$$\varepsilon_{zz} = \frac{3\kappa_e \alpha_e \Delta T}{\kappa_e + 4\mu_e/3} = \left[1 - \frac{3f(3\kappa - 4\mu)}{3(3+5f)\kappa + 8\mu} \right] \frac{9\kappa}{3\kappa + 4\mu} \alpha_e \Delta T, \quad (9)$$

Po wprowadzeniu do równania (9), że $\varepsilon_{zz} = \Delta l/l_0$ absolutna wartość wydłużenia w czasie może być obliczona za pomocą poniższego równania:

$$\Delta l(t) = l_0 \cdot \varepsilon_{zz}(t) = \frac{3\kappa_e l_0}{\kappa_e + \frac{4\mu_e}{3}} \cdot \alpha_e(t) \Delta T(t), \quad (10)$$

gdzie:

ε_{zz} – swobodne wydłużenie termiczne wzdłuż osi wzdłużnej rurki, l_0 – długość początkowa kompozytu, Δl – przyrost długości.

W pracy [49] z równania (8) wyprowadzono także równanie opisujące naprężenie blokujące występujące na dwóch końcach zablokowanego kompozytu. Zostało ono uzyskane dla warunków brzegowych $\varepsilon_{zz} = \varepsilon_b$ (wydłużenie osiowe) i $\varepsilon_{rr} = 0$ (wydłużenie promieniowe):

$$\sigma_{zz}(t) = \left(\kappa_e + \frac{4}{3} \mu_e \right) \varepsilon_b - 3\kappa_e \alpha_e(t) \Delta T(t) \quad (11)$$

gdzie:

$\sigma_{zz} = F_b/A$ – naprężenie blokujące, F_b – siła blokująca, A – powierzchnia przekroju.

W tym równaniu występuje wydłużenie względne $\varepsilon_b = \Delta l/l_0$, które oznacza wydłużenie względne, przy którym dalsze przemieszczenie kompozytu jest zablokowane,

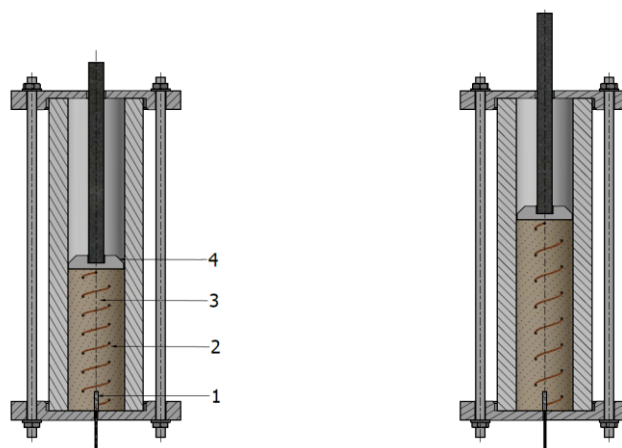
Pierwszy komponent równania (11) opisuje wpływ wydłużenia kompozytu na naprężenie. Drugi komponent opisuje natomiast liniową zmianę naprężenia wynikającą ze zmian temperatury.

Równanie to można stosować do wyznaczenia naprężenia tylko wtedy gdy wydłużenie odpowiadające miejscu zablokowania Δl_b jest mniejsze od maksymalnego możliwego wydłużenia Δl_{\max} . Jeżeli kompozyt zostanie zablokowany w stanie zimnym, tzn. gdy jego temperatura jest równa temperaturze pokojowej co oznacza, że nie ma możliwości wydłużenia czyli $\Delta l_b = 0$ i $\varepsilon_b = \Delta l_b/l_b = 0$, to pierwszy składnik po prawej stronie równania (11) jest także równy 0.

Podana wyżej zależność na swobodne wydłużenie termiczne była zaproponowana w formie teoretycznej bez potwierdzenia doświadczalnego.

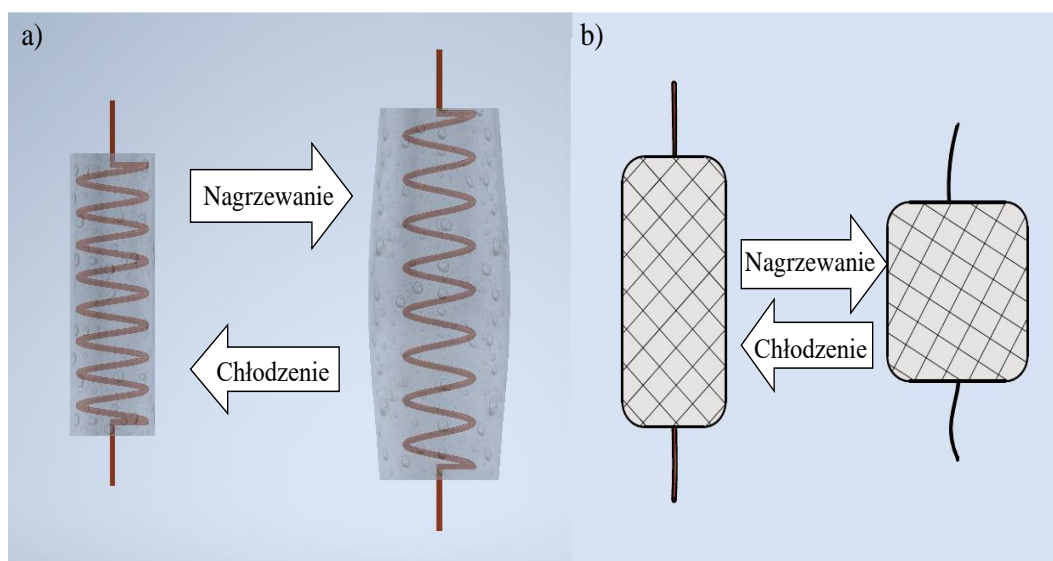
1.7. Zastosowanie kompozytu silikon-etanol w przetwornikach

Do tej pory w literaturze zaproponowano kilka form przetworników z zastosowaniem kompozytu silikon-etanol. Głównym obszarem badań było zastosowanie ich w postaci siłowników elastycznych robotów. Wśród proponowanych konstrukcji można tu wymienić siłowniki jednokierunkowe, wzorowane na siłownikach McKibbena oraz zginające się. Siłowniki te [45], [48] są w zasadzie najprostszymi siłownikami, w których kompozyt zamknięty w cylindrycznej obudowie. W trakcie rozszerzania się popycha tłok wykonujący ruch liniowy (rysunek 10). W większości przypadków takich napędów badano głównie ruch w jedną stronę, tj. w trakcie rozszerzania się kompozytu przy jego nagrzewaniu. Istotną wadą tego rozwiązania występowanie tarcia pomiędzy ścianką cylindra a kompozytem, które zaburza jego ruch. Szczególnie podatny na zakłócenia, a przez to, trudno kontrolowalny jest ruch powrotny, dlatego siłowniki te są wykorzystywane jedynie jako jednokierunkowe [5].

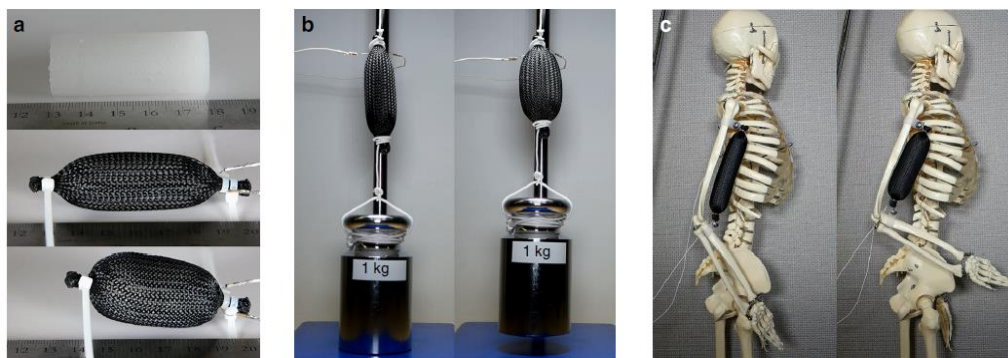


Rysunek 10. Przykład koncepcji siłownika jednokierunkowego w którym kompozyt popycha tłok, 1- czujnik temperatury, 2-grzałka, 3-kompozyt, 4 - popychany tłok [oprac. własne]

Najwięcej badań poświęcono siłownikom wzorowanym na siłownikach McKibbena [5], [48], [57]. Są one inspirowane koncepcją pneumatycznych, sztucznych mięśni. Różnica polega na tym, że w oplocie podlegającym kurczeniu się i rozszerzaniu zamiast balonów wypełnianych sprężonym powietrzem, umieszczany jest walec z kompozytu z zamontowaną wewnątrz grzałką. Rozszerzanie się podgrzanego kompozytu w przypadku zablokowania możliwości wydłużenia wzdłużnego, powoduje zwiększanie średnicy opłotu, pociągającego za sobą skrócenie jego długości tak jak pokazano na rysunku 11, co imituje skurczową reakcję mięśni. Siłowniki takie mogą wykonywać bezpośrednio ruch ciągnący. Ruch powrotny może być wykonywany przez obciążenie siłą, np. ciężkości. Przetworniki takie w stanie początkowym i po wydłużeniu, przedstawiono na rysunku 12.

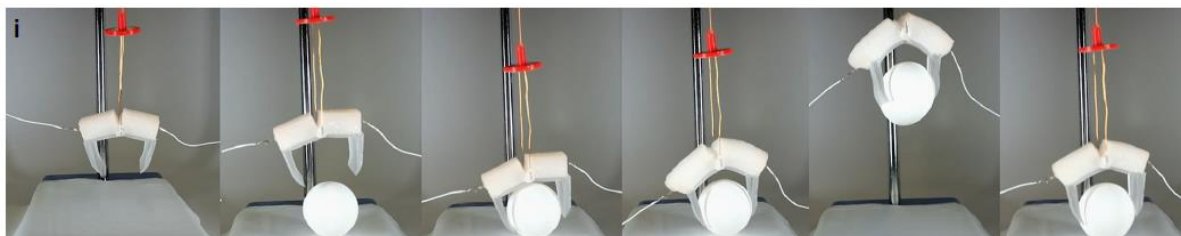


Rysunek 11. Sztuczne mięśnie w stanie chłodnym i ciepłym: a) materiał kompozytowy z grzałką, b) wzorowane na sztucznych mięśniach McKibbena

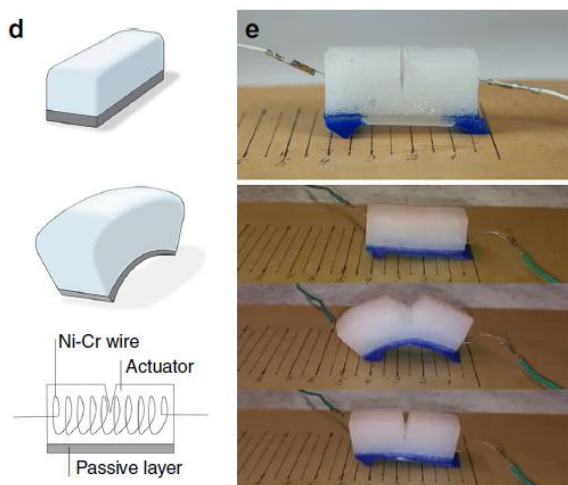


Rysunek 12. Przetworniki wzorowane na sztucznych mięśniach McKibbena [5]: a) prototyp przed nagraniem i po podgrzaniu, b) podnoszenie obciążnika o masie 1 kg przez siłownik, c) zastosowanie przetwornika jako napędu stawu łokciowego

Opracowano także przetworniki w których kierunek ruchu oraz sposób jego wykonania wynika ze sposobu ukształtowania kompozytu. W pracy [49] opisano siłowniki, w których wykonywany jest ruch zginający. Zastosowano je w budowanych chwytakach oraz prostych robotach przemieszczających się liniowo, co zaprezentowano na rysunkach 13 i 14 [5]. Rysunek 15 przedstawia natomiast przemieszczającą się samo-rozkładającą się konstrukcję.

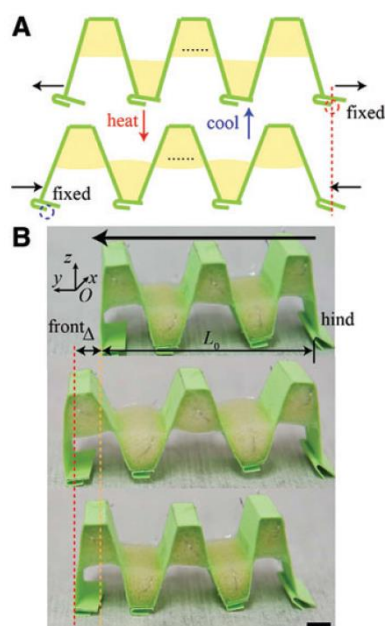


Rysunek 13. Działanie chwytaka zbudowanego na bazie kompozytu silikon-etanol [5]

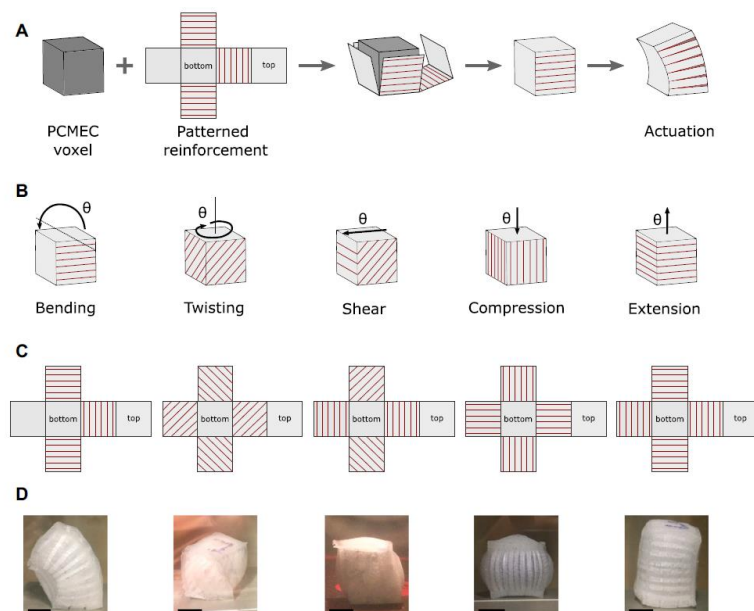


Rysunek 14. Przykładowy siłownik zbudowany na bazie kompozytu silikon-etanol wykorzystany w prostym robocie przemieszczającym się liniowo [5]

W celu uzyskania pożądanego ruchu przedstawione były koncepcje robotów elastycznych stosujących kompozyt silikon-etanol w połączeniu z metodami znanymi z techniki kirigami [42]. Przykład zastosowania tych technik zilustrowano na rysunku 16.



Rysunek 15. Przykład przemieszczającej się samorozkładającej się konstrukcji [49]



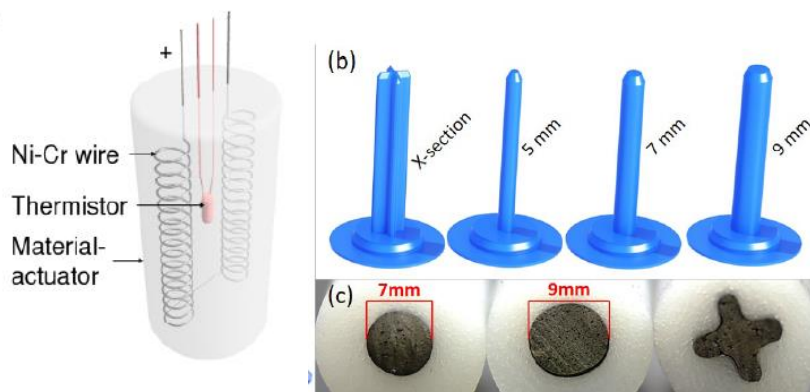
Rysunek 16. Zastosowanie metod kirigami do ukierunkowania odkształceń materiału [42]

Jedną z możliwości budowy siłownika na bazie silikon-etanol jest wykonanie go w formie metalowego mieszka wypełnionego kompozytem. Może on wykonywać ruch pchający. W tym przypadku nie występuje tarcie kompozytu o ścianki cylindra. Metalowy mieszek nadaje silnikowi sztywność wymaganą do wykonania ruchu pchającego bez wyboczenia, ponadto siła sprężystości mieszka może być wykorzystana do wykonania ruchu powrotnego. Wadą tego rozwiązania jest to, że przy podgrzewaniu siła generowana przez kompozyt musi być wykorzystana do pokonania sprężystości mieszka, co ogranicza maksymalne przemieszczenie możliwe do osiągnięcia przez siłownik. Zaletą zastosowania mieszka jest to, że jego powierzchnia jest, dzięki czemu ułatwione (zwiększone) jest odprowadzanie ciepła [46].

1.8. Metody nagrzewania kompozytu

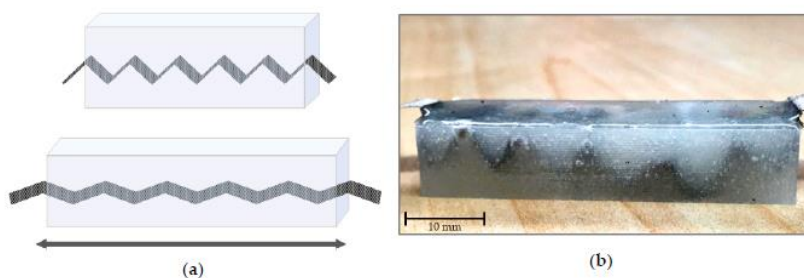
W przypadku większości dotychczas proponowanych przetworników na bazie kompozytu silikon-etanol, temperatura kompozytu była podwyższana poprzez przekazywanie do niego ciepła przez element grzejący. Najpowszechniejszym rozwiązaniem było zastosowanie grzałki, najczęściej w postaci spirali wykonanej z drutu oporowego, zatopionej wewnątrz kompozytu. Typowa grzałka wykonana jest z cienkiego drutu w formie sprężyny, dzięki czemu może się wydłużać wraz z rozszerzającym się kompozytem. Pewną wadą tego rozwiązania jest to, że materiał bezpośrednio przylegający do drutu oporowego ulega znacznemu nagrzanemu i szybszej degeneracji. Jest to wynikiem niskiego przewodnictwa cieplnego materiału.

Inną koncepcją było wykonanie grzałki jako rdzenia z elastycznego materiału przewodzącego, który tworzył z kompozytem monolityczną całość. Sam rdzeń był wykonany podobnie jak reszta kompozytu, jako mieszanina silikonu z etanolem ale także z dodatkiem ekspandowanego interkalowanego grafitu [57]. Taki materiał, miał zdolność przewodzenia prądu, stawiając jednak duży opór, dzięki czemu w trakcie przepływu prądu następowała znaczna emisja ciepła. Ponieważ był on oparty na silikonie, to po odlaniu połączył się z nim i mógł przemieszczać się razem z resztą kompozytu. Dodatkową zaletą tak formowanego rdzenia grzejącego, była możliwość uformowania go w kształt zwiększający powierzchnię przewodzenia. Koncepcję zastosowania grzałki w postaci drutu oporowego oraz w formie elastycznego rdzenia przewodzącego przedstawiono na rysunku 17.

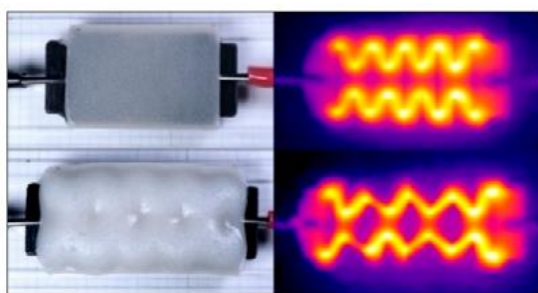


Rysunek 17. Nagrzewanie grzałką z drutu oporowego oraz koncepcja elastycznego rdzenia przewodzącego [57]

W pracy [58] zaproponowano także zastosowanie specjalnej tkaniny przewodzącej. Uzyskano dzięki temu zwiększenie powierzchni przewodzenia ciepła między elementem grzejnym a kompozytem. Na rysunku 18 przedstawiono ideę tej koncepcji oraz zdjęcie jej realizacji. Na rysunku 19 przedstawiono taki przetwornik w stanie chłodnym i po rozgrzaniu.



Rysunek 18. Zastosowanie tkaniny przewodzącej w przetworniku do nagrzewania: a) koncepcja, b) realizacja [58]



Rysunek 19. Przetwornik z tkaniną przewodzącą zastosowaną do nagrzewania w trakcie nagrzewania, od góry początek nagrzewania, wydłużenie nieznaczne, u dołu widoczne wydłużenie po nagrzaniu [58]

1.9. Podsumowanie przeglądu stanu wiedzy

W ramach niniejszej pracy zapoznano się z 61. pracami dotyczącymi tzw. materiałów inteligentnych. Wśród nich było 41. dotyczących przetworników z zastosowaniem materiałów

zmieniających stan skupienia z lat 1985–2022. Spośród nich tylko 9 z lat 2017–2022 dotyczyło kompozytu silikon-etanol. Były to publikacje anglojęzyczne, publikowane w czasopiśmie wydawanych między innymi przez Elsevier, MDPI, IEEE, Nature.

Przedstawiony przegląd literatury zawiera opisy działania i podstawy teoretyczne dotyczące działania materiałów zmieniających fazę. Materiały PCM są obecne w technice od wielu lat, zastosowanie ich typowego przedstawiciela jakim jest parafina w termostatach sięga co najmniej 1929 roku [59], [60], natomiast pierwszy przetwornik elektromechaniczny, wyposażony w grzałkę elektryczną służącą do podgrzania parafiny został zaproponowany w 1957 roku [59], [60]. Obecnie materiały PCM są ciągle rozwijane i znajdują zastosowanie w nowych obszarach. W ramach przeglądu omówiono publikacje, w których zostały pokazane typowe konstrukcje przetworników z zastosowaniem materiałów PCM oraz tendencje w tworzeniu nowych kompozytowych materiałów zmieniających fazę.

Najwięcej uwagi poświęcono na omówienie kompozytu silikon-etanol, jego struktury, sposobu wywarzania, podstawowych właściwości i podstawy jego działania, jako materiału mogącego powtarzalnie zmieniać swoje wymiary. Na tej podstawie można stwierdzić, że niezwykle atrakcyjną cechą kompozytu silikon-etanol, spośród innych tzw. materiałów inteligentnych, jest jego zdolność do powtarzalnych odkształceń względnych rzędu kilkudziesięciu procent.

Przegląd literatury obejmował również zaproponowane do tej pory koncepcje budowy przetworników, w których zastosowano kompozyt silikon etanol. Stwierdzono, że w żadnej publikacji nie sformułowano i nie opisano wystarczająco wnikliwie, zasad to jest wzorów, które mogą być wykorzystane do projektowania przetworników na bazie kompozytu silikon-etanol. W dostępnych autorowi publikacjach praktycznie nie przedstawiono żadnych badań symulacyjnych i doświadczalnych, dotyczących sterowania tymi przetwornikami. Dotyczy to w szczególności budowy serwonapędu, w którym występuje sprzężenie zwrotne i regulator. W większości przypadków, działanie prezentowanych przetworników wynikało tylko z ukształtowania ich konstrukcji, dzięki której generowały przemieszczenia w mniej lub bardziej zamierzony sposób. Ponadto, nigdzie nie podjęto szerszych badań nad minimalizacją albo kompensacją wad zastosowanego kompozytu, poprzez na przykład odpowiednią konstrukcję albo odpowiednie sterowanie.

Z przeglądu literatury wynika, że badania nad konstrukcją i sterowaniem przetworników wykonanych na bazie kompozytu silikon-etanol, nie zostały dotychczas wystarczająco dokładnie przeprowadzone. Dlatego tematyka ta jest aktualna i potrzebna. W związku z tym podjęto decyzję o przeprowadzeniu takich badań w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej.

2. Cel i tezy pracy

2.1. Wprowadzenie

Jednym z dość intensywnie rozwijanym obecnie obszarem badań są zagadnienia związane z budową robotów elastycznych, w tym z napędami, które mogą być w nich zastosowane. Związane jest to z poszukiwaniem alternatywy dla napędów o sztywnej konstrukcji, złożonych z silników elektrycznych i mechanizmów transformujących i zamieniających ich ruch obrotowy na liniowy. Celem tych prac jest uproszczenie konstrukcji napędów a często także zmniejszenie ich rozmiarów i masy. Z tego powodu wzrasta zainteresowanie badawcze materiałami, które ze względu na swoje właściwości, są w stanie same generować siły i przemieszczenia liniowe. Szczególnie intensywnymi obszarami, w których obserwuje się zainteresowanie takimi materiałami są: mikromechanika oraz elastyczna robotyka. W tym pierwszym jest to związane z poszukiwaniem możliwości: budowy małych gabarytowo urządzeń, które są potrzebne w różnych zastosowaniach związanych z miniaturyzacją. Celem tych prac jest także zwiększenie ich efektywności, trwałości oraz poprawienie dynamiki. W drugim przypadku, szczególnie poszukiwane są możliwości zastąpienia rozwiązań pneumatycznych, wymagający dodatkowych źródeł generujących czynniki potrzebnych do generowania odkształceń, takich jak instalacji generujących ciśnienie albo podciśnienie oraz doprowadzających czynnik roboczy (sprężone powietrze) do przetworników.

W przypadku wielu materiałów inteligentnych istotnym ich ograniczeniem jest możliwość uzyskiwania tylko stosunkowo małych odkształceń względnych, co ogranicza możliwości budowanych na ich bazie urządzeń. Z tego powodu kompozyt silikon-etanol mogący uzyskiwać kilkudziesięcioprocentowe odkształcenie względne, jest potencjalnie atrakcyjnym materiałem. Pod względem uzyskiwanych odkształceń z dostępnych materiałów, przewyższają go elastomery dielektryczne, osiągające odkształcenia wynoszące nawet około 100%, wymagają one jednak do działania źródeł napięcia o wartości kilku kV [16].

Pomimo że sama koncepcja zastosowania przemian fazowych do generowania dużych przemieszczeń jest znana od dawna, to idea jej użycia w materiale kompozytowym łączącym fazę ciekłą (ulegającą przemianie w gazową) ze stałą do generowania odwracalnych odkształceń, została zaprezentowana niedawno bo w 2017 [5]. Dlatego problematyka budowania przetworników opartych na kompozycie silikon-etanol pozostaje obszarem badań, będących na początkowym etapie.

Do tej pory zaprezentowano tylko kilka koncepcji przetworników, zbudowanych na bazie kompozytu silikon-etanol. Większość badań poświęcona była przetwornikom wzorowanym na sztucznych mięśniach McKibbona. W literaturze zaprezentowano także, bazujący na tym kompozycie chwytak, wyginający się przetwornik, czy też prosty robot poruszający się w sposób naśladujący gąsienice, przez kurczenie się i wydłużanie odpowiednich sekcji. W wykonanych dotychczas napędach, badano kilka rozwiązań nagrzewania kompozytu, przy czym wszystkie były różnymi wariantami grzania oporowego.

W przypadku przedstawionych do tej pory badań wszystkie przetworniki oparte na kompozycie silikon-etanol sterowane były w pętli otwartej, a wykonywane przez nie ruchy wynikały z ukształtowania ich konstrukcji i nie podlegały regulacji. Jednym z zasadniczych celów niniejszej pracy jest opracowanie własnych przetworników na bazie kompozytu silikon-etanol oraz zaproponowanie dla nich metod sterowania i regulacji.

2.2. Koncepcja przetwornika na bazie kompozytu silikon-etanol

W ramach zaplanowanych prac zostaną podjęte badania nad opracowaniem własnych przetworników na bazie kompozytu silikon-etanol. Zaproponowany zostanie serwonapęd z tym przetwornikiem oraz opracowane zostaną metody jego regulacji. Kompozyt silikon-etanol może osiągać odkształcenia wynoszące kilkadziesiąt procent swoich wymiarów początkowych, będące porównywalne z odkształceniami uzyskiwanymi przez elastomery dielektryczne. Jednakże w przeciwieństwie do nich, nie wymaga on zasilania napięciem rzędu kilku kilowoltów. Ponieważ działanie kompozytu opiera się o przemianę fazową spowodowaną zmianami temperatury, to może ona być aktywowana poprzez źródło ciepła w postaci grzałki nagrzewanej oporowo prądem ze źródła o niskiej wartości napięcia. Inne materiały zdolne do odkształceń pod wpływem sygnałów elektrycznych osiągają wydłużenia w większości wielokrotnie mniejsze od omawianego tutaj kompozytu silikon-etanol. Przykładowo termiczne stopy z pamięcią kształtu są w stanie osiągnąć odkształcenia rzędu 7% swoich wartości początkowych. Z tego powodu przetworniki oparte na tych materiałach do osiągnięcia podobnych przemieszczeń jak przetworniki z zastosowaniem kompozytu silikon-etanol wymagałyby zastosowania dodatkowego mechanicznego wzmocnienia, co komplikowałoby ich konstrukcję.

Istotnym ograniczeniem zastosowania kompozytu silikon-etanol jest mała dynamika jego działania wynikająca z faktu, że bazuje on na przemianie aktywowanej cieplnie. W publikowanych do tej pory badaniach, cykl pracy przetworników bazujących na kompozycie wynosił od kilkunastu do nawet kilkuset sekund. Z tego powodu zastosowanie takich

przetworników może dotyczyć tylko urządzeń wymagających przemieszczeń rzędu kilku centymetrów, wykonywanych z małymi prędkościami, tj. kilku mm/s. Przykładami zastawianych kompozytów mogą być konstrukcje samo-rozkładające się, albo pompy infuzyjne.

W ramach prac zaplanowano zbudowanie prototypów dwóch koncepcji konstrukcji przetwornika na bazie kompozytu silikon-etanol. Badania nad pierwszą mają posłużyć zdobyciu wiedzy o materiale, która posłuży rozwinięciu drugiej koncepcji. Dla drugiej koncepcji przetwornika planowane jest opracowanie układu sterowania.

2.3. Cele i tezy pracy

W ramach niniejszej pracy zaplanowano przeprowadzenie szeregu badań związanych z budową przetwornika na bazie kompozytu silikon-etanol.

Cel główny określono następująco:

„pozyskanie wiedzy oraz sformułowanie podstaw teoretycznych dotyczących działania i projektowania oraz modelowania przetwornika, w którym zastosowano kompozyt silikon-etanol”.

Cele szczegółowe są następujące:

1. Wykonanie wstępnych badań doświadczalnych kompozytu silikon-etanol i opracowanie dwóch wersji przetworników (napędów).
2. Zaprojektowanie wykonanie i przeprowadzenie badań doświadczalnych przetworników na bazie kompozytu silikon-etanol.
3. Opracowanie modelu komputerowego przetwornika bazującego na kompozycie silikon-etanol i wykonanie badań symulacyjnych.
4. Opracowanie układu regulacji serwonapędu z przetwornikiem opartym na kompozycie silikon-etanol i przeprowadzenie badań doświadczalnych potwierdzających tezy.

Realizacja powyższych celów pozwoli wykazać prawidłowość następującej tezy głównej:

„Możliwe jest zbudowanie napędu z przetwornikiem wykonanym na bazie kompozytu silikon-etanol, który może generować siły rzędu kilkudziesięciu N i przemieszczenia liniowe rzędu kilku mm”.

oraz tezy szczegółowej:

„Serwonapęd, w którym zastosowany jest przetwornik mieszkowy o długości początkowej 57,6 mm i średnicy 27 mm, może generować siłę 35 N i uzyskiwać wydłużenie ok. 6 mm oraz uzyskiwać dokładność pozycjonowania $\pm 0,1$ mm”

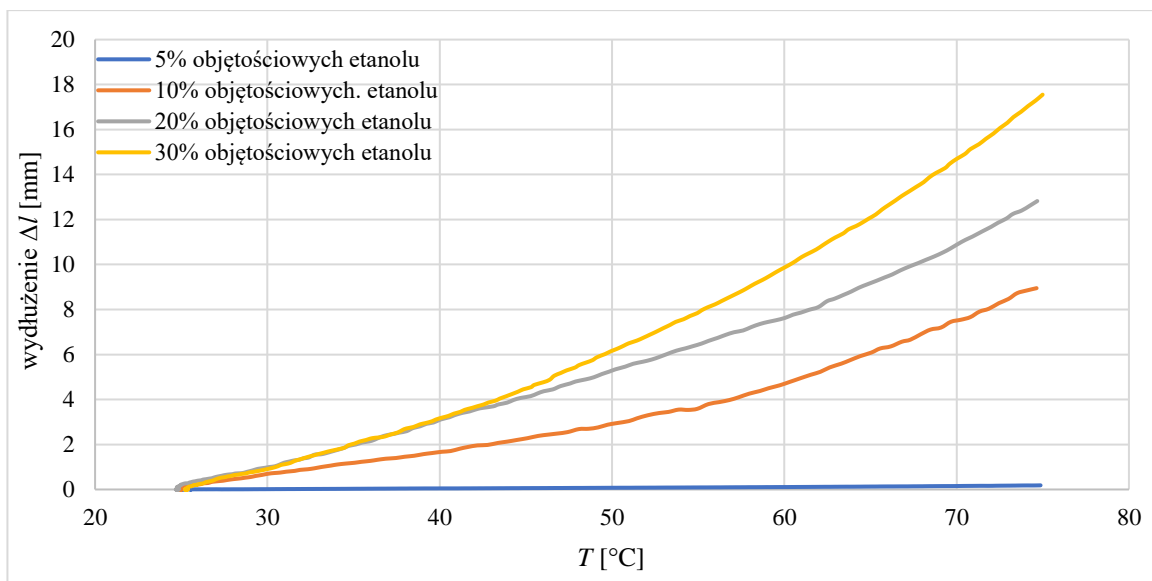
3. Konstrukcja i badanie przetworników na bazie kompozytu silikon-etanol

3.1. Materiał kompozytowy silikon-etanol

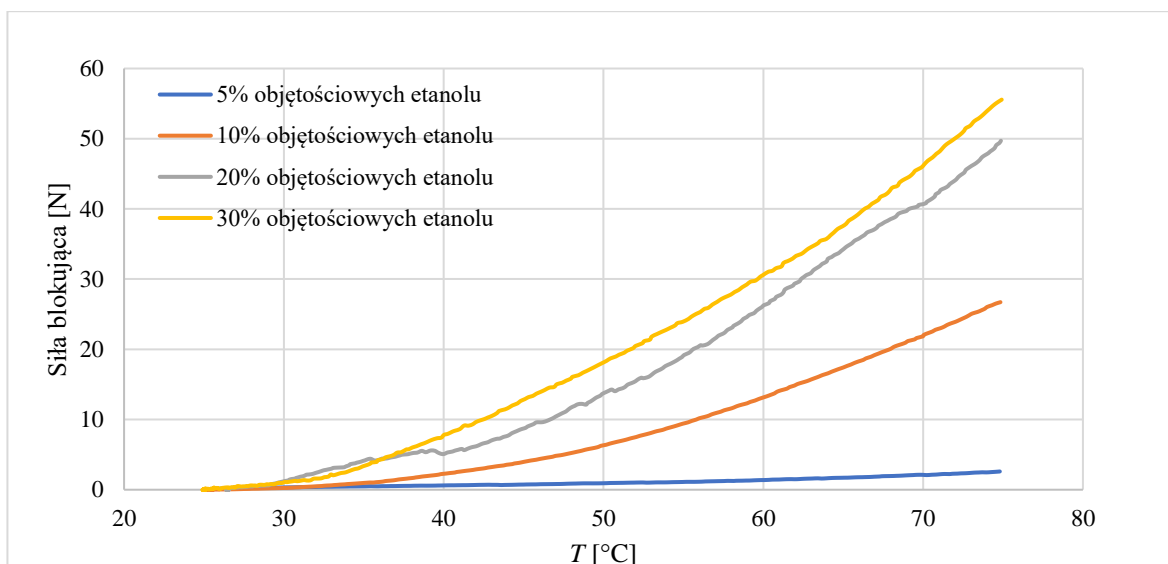
W przypadku wszystkich opisanych w niniejszej pracy badań, jako materiał osnowy zastosowano kauczuk silikonowy Ecoflex-003. Jest to silikon dwuskładnikowy, dostarczany w postaci dwóch składników oznaczanych przez producenta jako A i B będących w stanie płynnym. Po ich zmieszaniu następuje zastygnięcie materiału w stanie stałym. Moduł Younga silikonu Ecoflex 00-30 wynosi 0,07 MPa, jego gęstość $1,07 \text{ g/cm}^3$, wytrzymałość na rozciąganie 1,38 MPa [61], a jego współczynnik rozszerzalności termicznej wynosi $284,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [62]. Jako aktywnego materiału użyto etanolu o czystości 99,9%. Zgodnie z danymi literaturowymi optymalną ilością dodawanego etanolu do silikonu jest 20% objętościowych. Dla takiej proporcji, uzyskuje się największe siły i wydłużenia względne. Jednocześnie nie występują trudności związane z mieszaniem składników, które występują w przypadku zastosowania większej zawartości etanolu w kompozycje [5], [48].

W przypadku wszystkich zbudowanych przetworników, kompozyt silikon-etanol był wytwarzany w sposób standardowy, tj. przez odlewanie. Na początku do odpowiednio odważonego składnika A silikonu dodawany był odważony etanol, po czym odbywało się ich mieszanie aż do uzyskania postaci homogenicznej. Następnie dodawany był składnik B silikonu, po czym następowało krótkie, 3 minutowe mieszanie ręczne. W ostatnim kroku zalewana była forma, w której wcześniej umieszczana była spiralna grzałka z drutu oporowego.

Przed przystąpieniem do właściwych badań postanowiono poddać weryfikacji, występujące w literaturze [5] stwierdzenie o optymalnej ilości etanolu dla kompozytu. W tym celu sporządzono kompozyty o zawartościach objętościowych etanolu równych: 5%, 10%, 20% i 30%. Następnie zalano nim formy o średnicy 20,5 mm, do wysokości 40 mm. W formach tych umieszczone zostały wcześniej grzałki i termopary. Po zastygnięciu, próbki były rozformowywane i umieszczane w rurkach o średnicy wewnętrznej 20,5 mm. Następnie nagrzewano kompozyt do temperatury 75°C i mierzono jego wydłużenie w trakcie tego procesu. W następnych próbach, przeprowadzonych na świeżo sporządzonych kompozytach zablokowano możliwość wydłużania się próbki w rurce. W trakcie nagrzewania mierzono wartość siły blokującej. Wyniki pomiarów wydłużeń i sił blokujących dla różnej zawartości etanolu, przedstawiono na rysunkach 20 i 21.



Rysunek 20. Wydłużenie kompozytu silikon-etanol o różnej zawartości etanolu



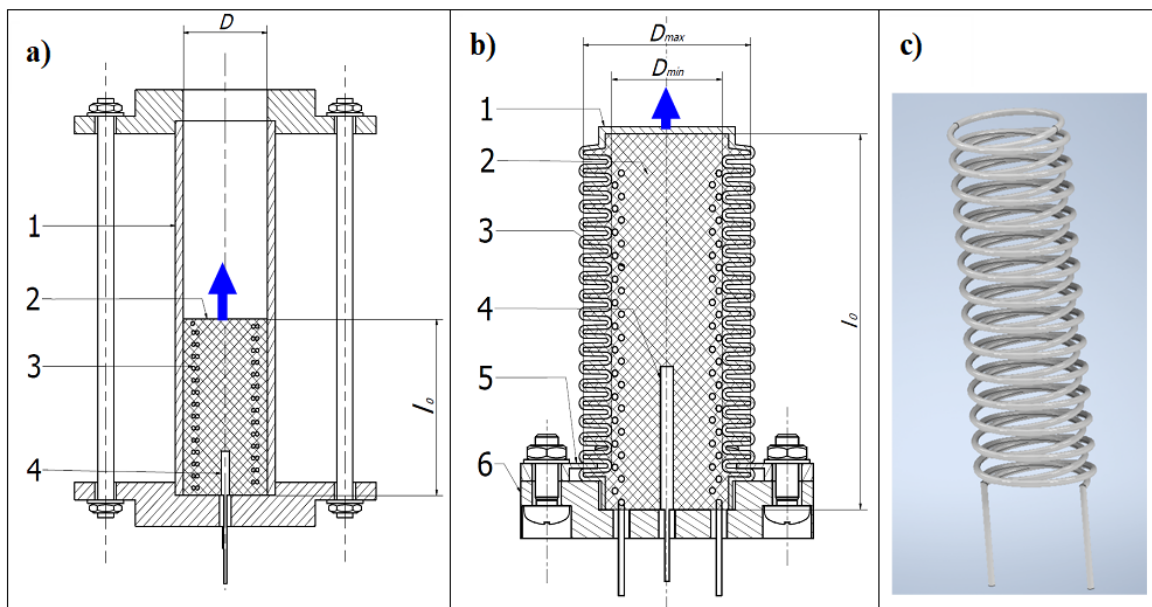
Rysunek 21. Siła blokująca dla kompozytu silikon-etanol o różnej zawartości etanolu

Dla próbek o zawartości etanolu 30% uzyskano największe wartości wydłużenia i siły blokującej. Dla próbek o zawartości 5% zarówno wartość wydłużenia jak i siła blokująca były najmniejsze. Jednakże w trakcie rozformowywania tzn. wyjmowania z obudowy (rurki) próbki kompozytu silikon-etanol, dla której dodano 30% objętościowych etanolu stwierdzono, że część etanolu pozostała poza materiałem. Świadczyło to o tym, że przy tej zawartości etanolu nie doszło do dobrego, czyli całkowitego jego wymieszania z silikonem. Z tego powodu do dalszych badań sporządzano kompozyt o zawartości 20% objętościowych etanolu. Tym samym potwierdzono twierdzenie znalezione w literaturze, że optymalny procent zawartości etanolu w silikonie powinien wynosić 20%.

3.2. Koncepcje budowy przetwornika

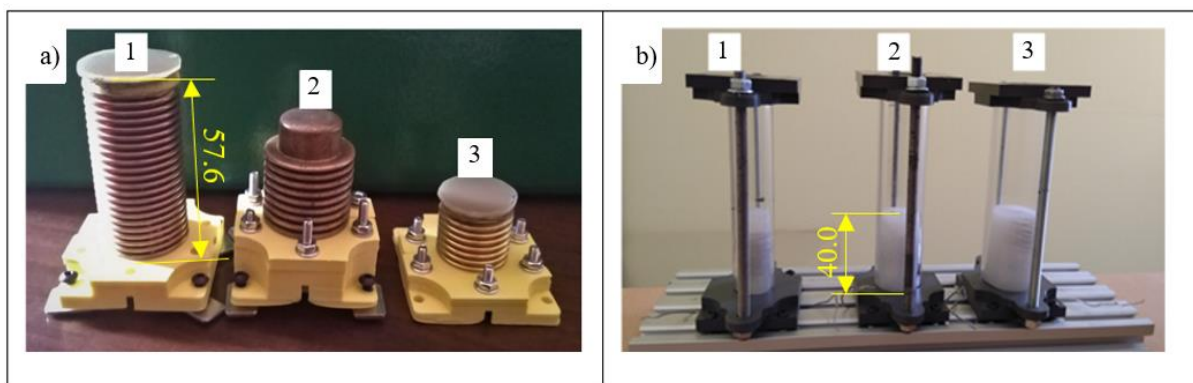
W trakcie prac wstępnych, zbudowano prototypy dwóch konstrukcji przetwornika na bazie kompozytu silikon-etanol o różnych koncepcjach budowy. Pierwszą z nich był przetwornik rurkowy, w którym rolę tłoka mógł pełnić sam kompozyt przesuwający się wewnątrz rurki. W samym kompozycie znajdowała się zatopiona w nim spiralna grzałka. W środku kompozytu osadzana była także termopara. Koncepcję takiego przetwornika przedstawia rysunek 22a. Jako materiał na grzałkę zastosowano drut wykonany z FeCrAl 135, o rezystancji właściwej $10,7 \Omega/\text{m}$. Drut ten był otoczony osnową teflonową. Jego rdzeń metaliczny miał średnicę $0,4 \text{ mm}$ a cały przewód $0,9 \text{ mm}$. Grzałka ta miała formę podwójnej spirali o rezystancji 11Ω . Zastosowanie drutu z osnową teflonową miało na celu zapobieżenie przypadkowym zwarciom drutu.

Drugą badaną koncepcją był przetwornik mieszkowy, przedstawiony na rysunku 22b. Składa się on z metalowego mieszka w wypełnionego kompozytem silikon-etanol. We wnętrzu znajduje się także spiralna grzałka z drutu oporowego, zatopiona w kompozycie. W trakcie wytwarzania jest ona umiejscawiana wewnątrz mieszka przed zalaniem ciekłym kompozytem. We wnętrzu przetwornika umiejscawiany jest także czujnik temperatury, w celu mierzenia temperatury. Sam worek po zalaniu i zastygnięciu kompozytu jest umieszczany w gnieździe podstawy, w którym jest blokowany kształtowo za pomocą dwóch płytek przytrzymujących go.



Rysunek 22. Koncepcje przetwornika na bazie kompozytu silikon-etanol a) przetwornik rurkowy 1- rura z poliwęglanu, 2-kompozyt silikon-etanol, 3-grzałka w postaci podwójnej spirali, 4- czujnik temperatury, b) przetwornik mieszkowy 1- metalowy worek, 2-kompozyt silikon-etanol 3-grzałka w postaci podwójnej spirali, 4-czujnik temperatury, termopara, 5- płytki mocujące worek, 6- podstawa przetwornika z gniazdem na worek, c) kształt grzałki

Zbudowano w sumie 6 prototypów przetworników rurowych oraz 3 mieszkowe. Spośród rurowych zbudowano trzy o takiej samej długości początkowej rdzenia kompozytowego i o różnych średnicach oraz trzy o takiej samej objętości rdzenia kompozytowego i o różnych średnicach. Przetworniki mieszkowe różniły się między sobą geometrią (wymiarami) zastosowanych mieszkań. Prototypy tych przetworników zostały przedstawione na rysunku 23.

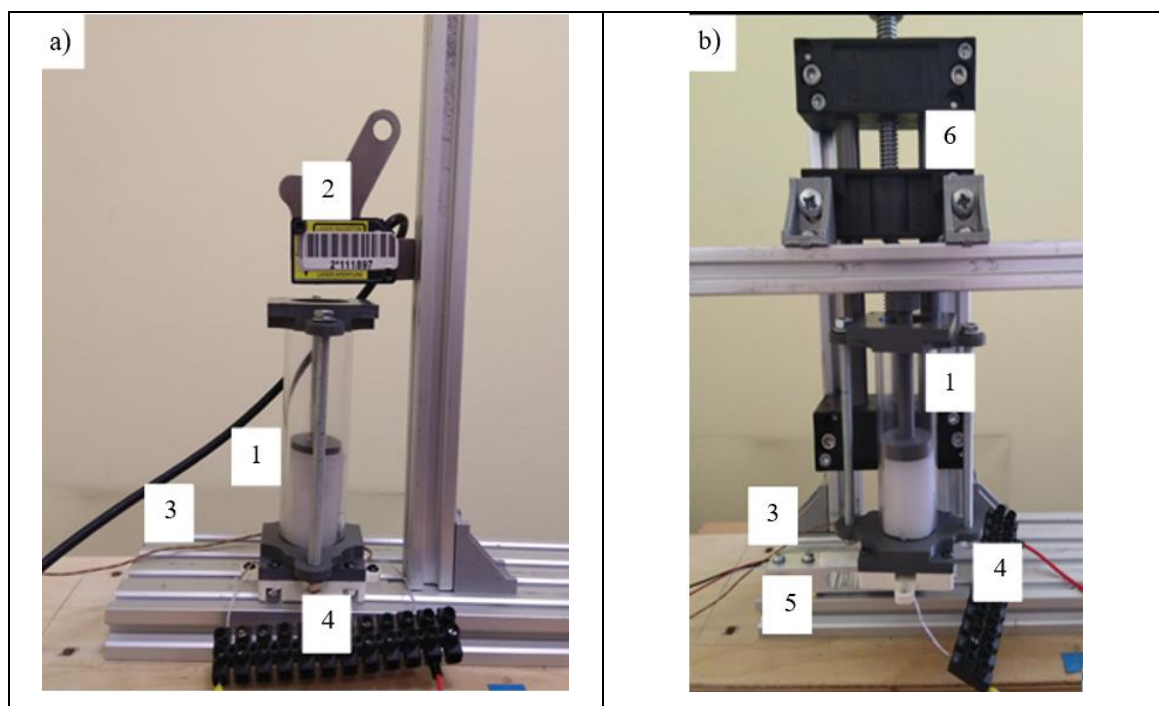


Rysunek 23. Realizacja przetworników a- przetworniki mieszkowe 1- duży (B), 2-średni (M), 3-mały(S), b-przetworniki rurkowe o równej początkowej wysokości kompozytu $l_0=40$ mm i różnych średnicach wewnętrznych D 1- $D=15,5$ mm, 2- $D= 20,5$ mm, 3- $D=25,0$ mm.

3.3. Stanowiska do badań

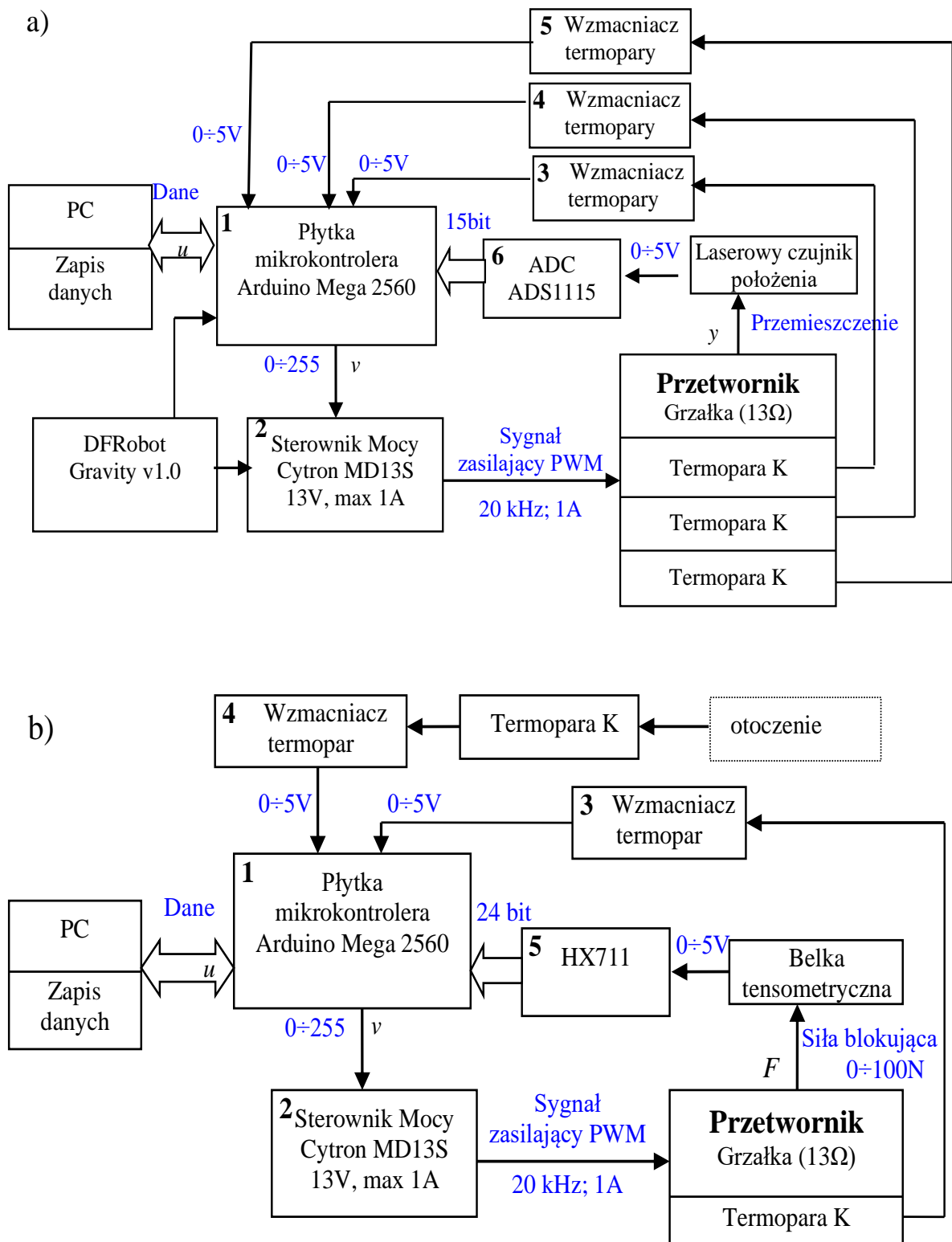
W celu przebadania przetworników zbudowano dwie wersje stanowisk badawczych. Jedno przeznaczone było do badania przemieszczenia bez obciążenia a drugie do badania siły blokującej przemieszczenie. Stanowiska te pokazano na rysunku 24. Do badania przemieszczenia zastosowano laserowy czujnik firmy Panasonic typu HG-C1050 o zakresie pomiarowym + 15 mm, ze środkiem tego zakresu położonym 50 mm od czoła czujnika. Powtarzalność pomiaru z tego czujnika wynosiła 30 μ m. Generował on na wyjściu sygnał analogowy o napięciu 0÷5V, który był następnie przetwarzany przez 15-bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy. W przypadku stanowiska do badania siły blokującej, przetwornik był montowany na belce tensometrycznej o zakresie pomiarowym do 10 kg. Sygnał z tej belki był wzmacniany i przetwarzany przez układ pomiarowy dla belek tensometrycznych. Belka blokująca ruch była zamocowana na osi liniowej z śrubą trapezową, dzięki czemu można było zmieniać odległość, na której przemieszczenie miało być zablokowane. Rysunek 24 pokazuje oba stanowiska. W przypadku pomiaru wydłużenia na czole kompozytu umieszczany był cienki krążek z tworzywa sztucznego w celu właściwego odbicia wiązki światła laserowego. Sama powierzchnia kompozytu nie dawała pewności poprawności odbicia. W przypadku natomiast

pomiaru siły blokującej na górze kompozytu umieszczony był dodatkowy tłoczek w celu przeniesienia siły do elementu blokującego ruch.



Rysunek 24. Stanowisko do pomiaru wydłużenia-a oraz siły blokującej-b przetwornika tłokowego. 1-przetwornik, 2-laserowy czujnik położenia, 3-przewód termopary, 4-podłączenie grzałki do zasilania, 5- belka tensometryczna, 6-oś liniowa z śrubą trapezową z zamontowaną belką blokującą przemieszczenie.

Do pomiaru temperatury wewnątrz przetwornika zastosowano termopary umieszczone w jego wnętrzu. W trakcie badań, w niektórych przypadkach wewnątrz przetwornika były umieszczane nawet trzy termopary. Do sterowania załączaniem zasilania grzałki i zbierania danych pomiarowych zastosowano układ elektroniczny zbudowany na bazie płytki Arduino Mega 2600. Za jej pośrednictwem dane były też przesyłane do komputera. Schematy blokowe systemu kontrolno-pomiarowego obu stanowisk przedstawia rysunek 25.



Rysunek 25. Schematy blokowe stanowisk: a) w wersji do pomiaru przemieszczenia, b) do pomiaru siły blokującej

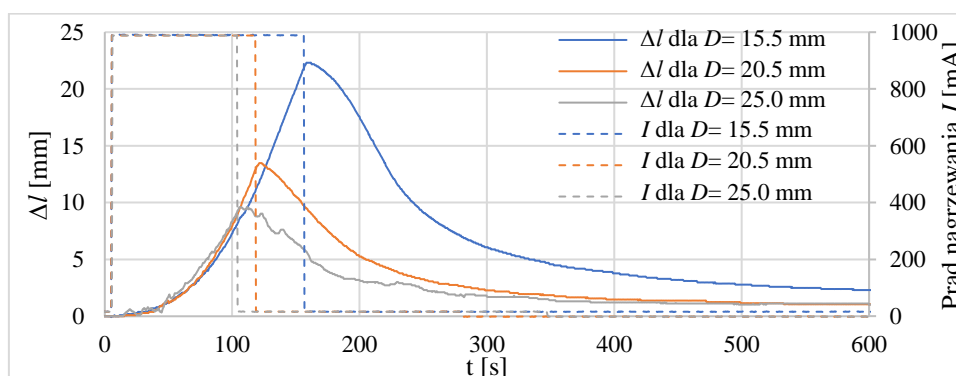
3.4. Badania przetwornika rurkowego

Wykonane przetworniki rurkowe na bazie kompozytu sporządzono w kilku wariantach średnicy i długości początkowej. Generalnie można było podzielić je na sporządzone z równą długością początkową rdzenia kompozytowego l_0 oraz na takie o równej objętości początkowej. Ich wymiary podano w Tabelicy 3.

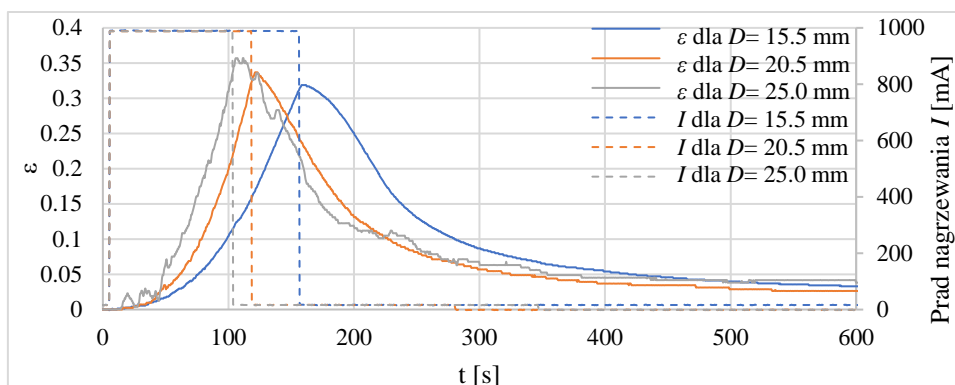
Tabelica 3. Wymiary rdzeni z kompozytu silikon-etanol

	Średnica d [mm]	Długość początkowa l_0 [mm]	Objętość [cm ³]
Równa długość początkowa	15,5	40	19,63
	20,5	40	13,2
	25	40	7,55
Równa początkowa objętość	15,5	26,9	13,2
	20,5	40	13,2
	25	70	13,2

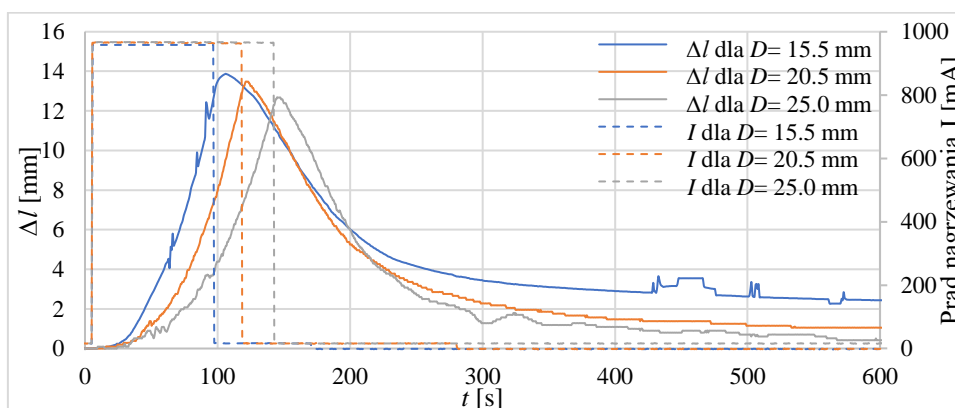
Pierwsze badania przemieszczenia polegały na nagrzewaniu przetworników do osiągnięcia temperatury 75°C wewnątrz kompozytu, a następnie wyłączeniu zasilania i chłodzeniu ich w powietrzu otoczenia. Badania te prowadzono dla prądu grzania około 1 A, dla przetworników o różnych wymiarach. Na rysunkach 26 i 27 przedstawiono wyniki badania wydłużenia dla przetworników o takiej samej początkowej objętości kompozytu, odpowiednio ich wydłużenie bezwzględne i względne. Natomiast na rysunkach 28 i 29 pokazano zmiany wydłużenia bezwzględnego i względnego, uzyskane dla przetworników o równej początkowej długości kompozytu.



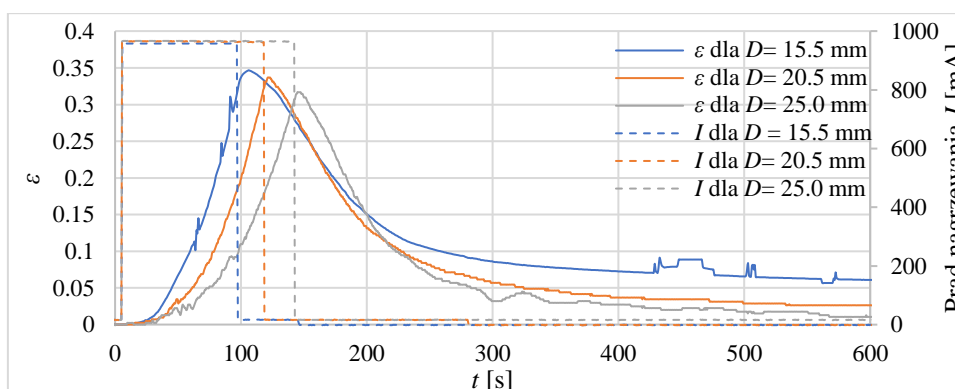
Rysunek 26. Odpowiedzi impulsowe próbek o tej samej objętości kompozytu, tj. wydłużenia przy nagrzewaniu próbki do 75°C



Rysunek 27. Odpowiedzi impulsowe próbek o tej samej objętości kompozytu, wydłużenie względne przy nagrzewaniu próbki do 75°C



Rysunek 28. Odpowiedzi impulsowe przetworników o tej samej wysokości, ale o różnych objętościach kompozytu i o różnych średnicach, wydłużenia przy nagrzewaniu próbki do 75°C



Rysunek 29. Odpowiedzi impulsowe przetworników o tej samej wysokości ale różnej objętości i różnych średnicach, wydłużenie względne przy nagrzewaniu próbki do 75°C

W przypadku badanych przetworników uzyskane przemieszczenia wyniosły w granicach między 30-36% długości początkowej. Było to mniej niż można było przewidywać na podstawie równania (10). Trzeba jednak zwrócić uwagę na fakt, że równanie to opisuje

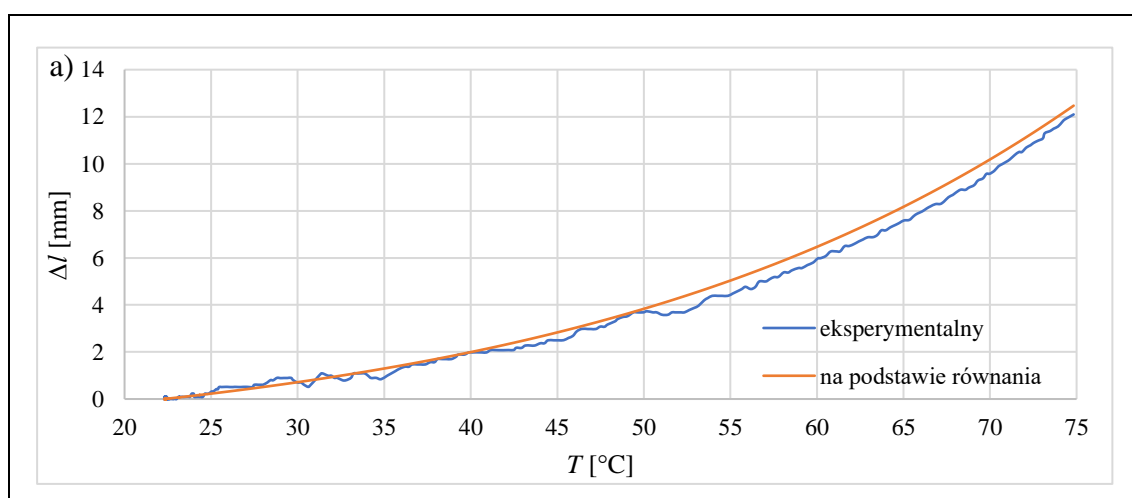
zależność wydłużenia od temperatury, jednak bez uwzględnienia tarcia. Przy jego formułowaniu zakładano, że kompozyt może się swobodnie, tj. bez żadnych przeszkód odkształcać w kierunku osi wzdłuż rury tworzącej obudowę. W rzeczywistości trakcie tworzenia przetwornika umieszczano odlany rdzeń z kompozytu w rurce, do której ciasno przylegał. Na skutek tego, podczas jego ruchu występowała siła tarcia utrudniająca wydłużanie się kompozytu. Ponieważ przy zmianach temperatury rurka odkształca się inaczej niż kompozyt, to zmienia się także siła wzajemnego oddziaływania pomiędzy kompozytem a ścianką wewnętrzną rurki, co wpływa także na wartość siły tarcia. Z tego powodu równanie (10) powinno być uzupełnione przez dodanie komponentu, uwzględniającego występowanie i wpływ siły tarcia na przemieszczenie kompozytu. Wzrost temperatury skutkuje wzrostem ciśnienia wewnętrznego kompozytu, które zwiększa nacisk i tym samym tarcie między kompozytem a ścianką rurki. Wzrost ciśnienia wewnętrznego $\Delta p(t)$ może być obliczony za pomocą równań (1), (2) oraz (4). Poniżej podano równanie, w którym uwzględniono występowanie tarcia omówionego wyżej:

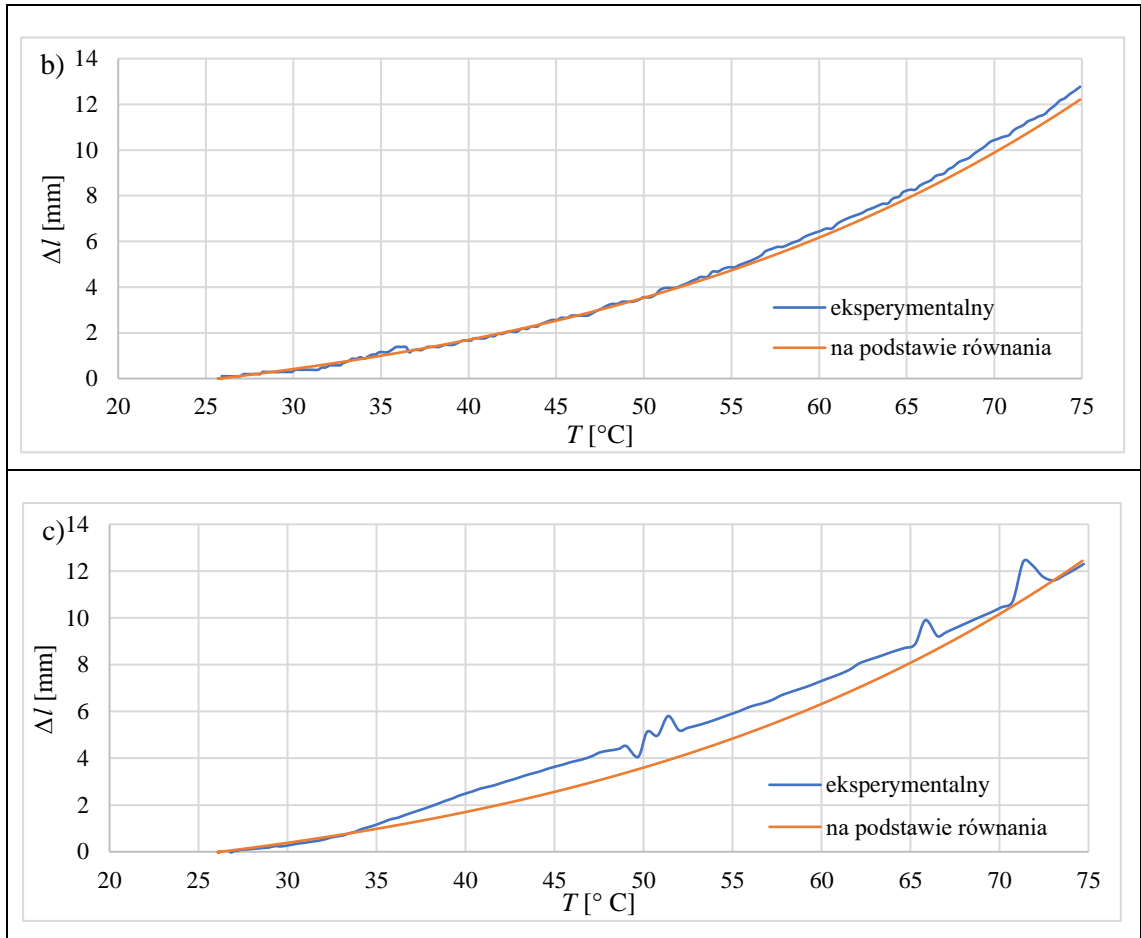
$$\Delta l(t) = l_0 \cdot \varepsilon_{zz}(t) - N_F \cdot \Delta p(t) \quad (12)$$

gdzie:

N_F – współczynnik [m/Pa] charakteryzujący wpływ tarcia na wydłużenie, Δp – przyrost ciśnienia pary etanolu [Pa].

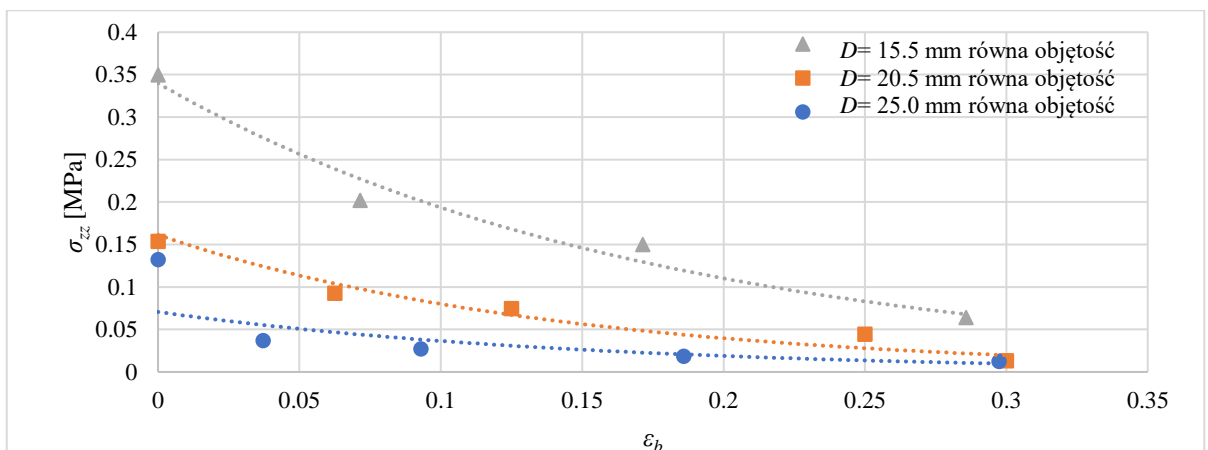
Zmierzone eksperymentalnie i obliczone za pomocą równania (12) zmiany wydłużenia przetwornika w funkcji temperatury zostały przedstawione na rysunku 30. Współczynnik N_F występujący w powyższym równaniu został określony doświadczalnie jako $0,165 \cdot 10^{-6}$ m/Pa [63].



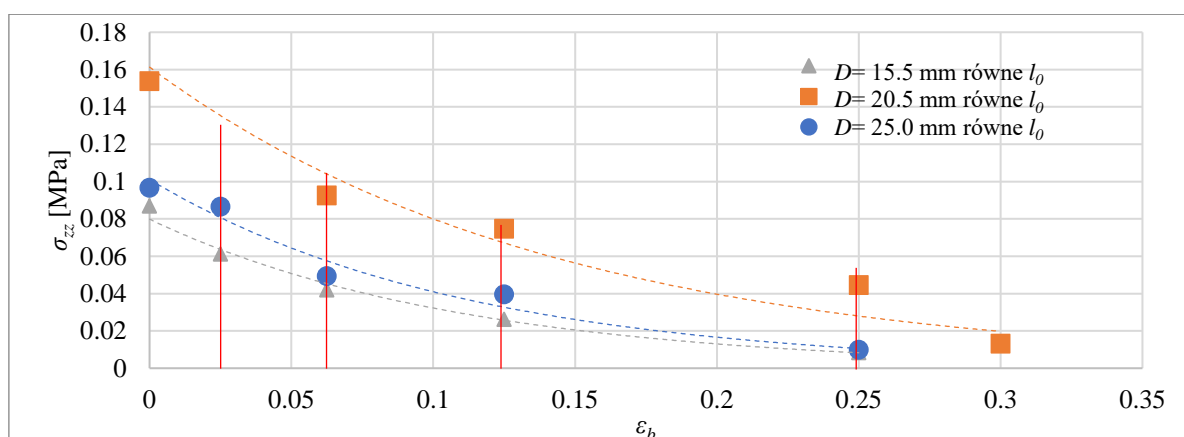


Rysunek 30. Wyznaczone eksperymentalne i obliczone za pomocą wzoru (12) wydłużenia podczas nagrzewania przetworników rurkowych o różnej średnicy i równej długości początkowej $l_0 = 40.0$ mm. Wydłużenie dla przetwornika o: a) $D = 25,0$ mm, b) $D = 20,5$ mm, c) $D = 15,5$ mm

W ramach przeprowadzonych badań zmierzono także siłę blokującą przetworników rurkowych. Ponieważ różniły się one średnicą, to obliczono naprężenie blokujące dla każdego z nich dzieląc siłę blokującą przez pole powierzchni przekroju poprzecznego. Wyniki uzyskane przy temperaturze 75° dla przetworników o równej objętości przedstawiono na rysunku 31, natomiast dla przetworników o równej wysokości początkowej na rysunku 32.



Rysunek 31. Naprężenie blokujące dla przetworników o równej objętości

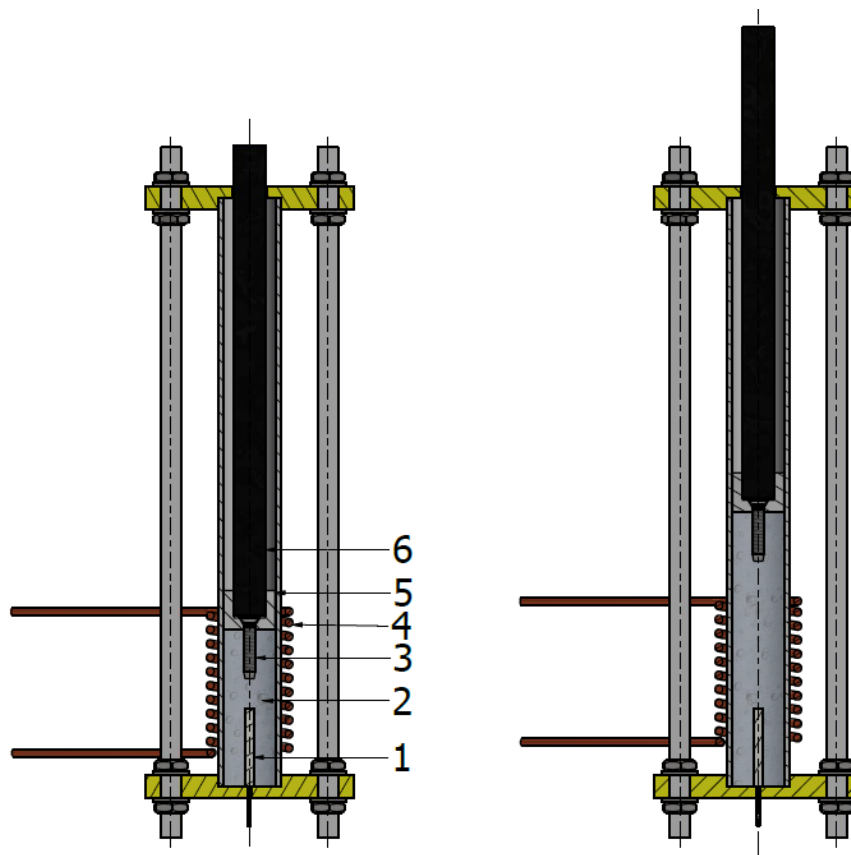


Rysunek 32. Naprężenie blokujące dla przetworników o równej wysokości

Wykonane badania pokazały, że przetworniki rurkowe na bazie kompozytu silikon-etanol po nagrzaniu do 75°C , są w stanie osiągnąć wydłużenie względne w granicach 30-35% długości początkowej rdzenia kompozytowego. Z tego powodu testowane przetworniki były w stanie osiągnąć postulowaną w tezie odległość przemieszczenia 6 mm w temperaturach niższych niż 75°C , a więc pracując poniżej maksymalnej dopuszczalnej temperatury określonej na 85°C . Oznacza to więc, że przetwornik o odpowiedniej długości początkowej byłby w stanie osiągnąć wymaganą odległość. Ponadto w badaniach tych zweryfikowano wzór (11) będący dostosowaną do warunków panujących w przetworniku rurowym modyfikacją zależności na wydłużenie swobodne jednoosiowe kompozytu silikon-etanol opisanej równaniem (10). W przypadku badanych przetworników przy całkowicie zablokowanym przemieszczeniu, a więc przy $\varepsilon_b = 0$, spośród badanych przetworników najmniejszą wartość naprężenia blokującego otrzymano dla przetwornika o najmniejszej objętości zastosowanego kompozytu silikon-etanol. Wartość σ_{zz} po nagrzaniu do 75° wyniosła w jego przypadku około 0,087 MPa, co odpowiadało sile 16,4 N. Była to wielkość bliska tej z postawionej tezy.

W ramach dalszych prac rozwinięto koncepcję przetwornika rurkowego poprzez zastosowanie nagrzewania indukcyjnego. Kompozyt umieszczono w metalowej rurce, która była otoczona cewką indukcyjną. Po zasileniu grzałki pulsującym prądem generowała ona zmienne pole magnetyczne, które indukowało w metalowej rurce pądy wirowe, powodujące jej podgrzewanie. W rezultacie przewodzenia ciepła do kompozytu ulegał on nagrzewaniu. W ten sposób wyeliminowano konieczność zatapiania grzałki z drutu oporowego wewnątrz kompozytu, co uprościło wykonanie przetwornika. Dzięki temu, że kompozyt wewnątrz rurki miał formę walca, to stykał się całą swoją powierzchnią boczną tj. ścianką zewnętrzną z

wewnętrzną powierzchnią rurki. Tym samym uzyskano zwiększenie powierzchni przewodzenia między elementem grzejnym a kompozytem, w porównaniu do zastosowania spiralnego drutu wewnątrz kompozytu. Koncepcję takiego przetwornika przedstawia rysunek 33.



Rysunek 33. Przetwornik tłokowy z nagrzewaniem indukcyjnym pośrednim [45], 1 – termopara, 2 – kompozyt silikon-etanol, 3 – wkręt łączący tłok z kompozytem, 4 – cewka indukcyjna, 5 – aluminiowa rurka, 6 – tłok.

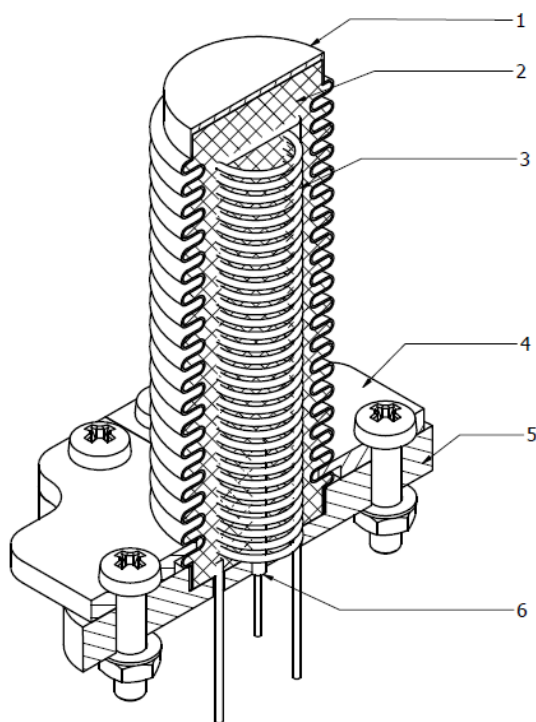
3.5. Badania przetwornika mieszkowego

W trakcie badań nad przetwornikami rurkowymi zaobserwowano kilka cech niepożądanych w ich działaniu. Jedną z nich był wpływ tarcia na zachowanie kompozytu. Tarcie o ściankę wewnątrz rurki zmniejszało prędkość i zakres ruchu kompozytu. Z tego powodu pojawiały się zatrzymania ruchu, dochodziło także do niepełnego powrotu kompozytu do pozycji startowej. Ponadto, w najlepszym przypadku w trakcie nagrzewania, środek czoła kompozytu wybrzuszał się wyraźnie w porównaniu do obszarów brzegowych, hamowanych przez tarcie o ściankę. Często zdarzało się, że powierzchnia „czoła” kompozytu poruszała się niesymetrycznie tj. ukośnie w stosunku do poziomemu. Ponadto ze względu na brak szczelnego

zamknięcia, duża powierzchnia czołowa umożliwiała dużą tzw. „ucieczkę” pary etanolu, co przekładało się na niską żywotność przetwornika.

Aby zminimalizować część z tych problemów, zaproponowano koncepcje przetwornika mieszkowego w oparciu o kompozyt silikon-etanol w wersji, jak przedstawiono to na rysunku 34.

Dzięki zastosowaniu metalowego mieszka, kompozyt jest lepiej odseparowany od środowiska zewnętrznego tzn. powietrza, co ogranicza „ucieczkę” etanolu. Ponadto mieszek odkształca się razem z kompozytem, przez co nie występuje problem tarcia o ściankę jak w przypadku tłokowego. Jednocześnie dzięki swojej sztywności jest w stanie ukierunkować odkształcenie. Z drugiej strony ze względu na swoją sprężystość generuje siłę przeciwdziałającą wydłużaniu się kompozytu.

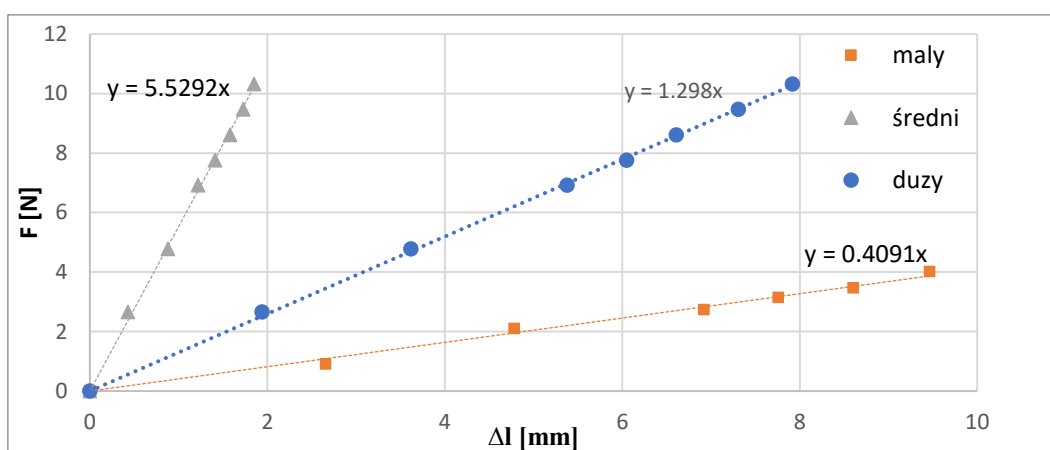


Rysunek 34. Rysunek 3D przetwornika mieszkowego: 1-metalowy mieszek, 2-kompozyt silikon-etanol, 3-spiralna grzałka, 4-płytkę przytrzymująca mieszek, 5-płyta z gniazdem mieszek, 6-termopara

W celu zbadania przetwornika mieszkowego, zaprojektowano i zbudowano trzy jego wersje prototypowe, w których zastosowano mieszki mosiężne różniące się wymiarami. W niniejszej pracy zostały one oznaczone jako: duży (B), średni (M) oraz mały (S). Ich

najważniejsze parametry takie jak: współczynnik sprężystości k , długość początkowa l_0 , oraz efektywne pole powierzchni przekroju, podano w tablicy 4. Charakterystyki, które posłużyły do wyznaczenia stałych sprężystości przedstawiono natomiast na rysunku 35. Wyznaczono je doświadczalnie, poprzez obciążanie mieszków za pomocą odważników, tak aby były rozciągane. Mierzono ich wydłużenia.

Jako materiał kompozytowy wypełniający mieszki zastosowano kompozyt taki sam jak zastosowany dla przetworników rurkowych (omówiony w rozdziale 3.1 Materiał kompozytowy silikon-etanol). Podobnie, grzałka umieszczona wewnątrz kompozytu miała postać podwójnej spirali i była wykonana z tego samego materiału, jak w przypadku przetworników tłokowych. Opór zastosowanych grzałek w przypadku wszystkich przetworników wynosił 11Ω .

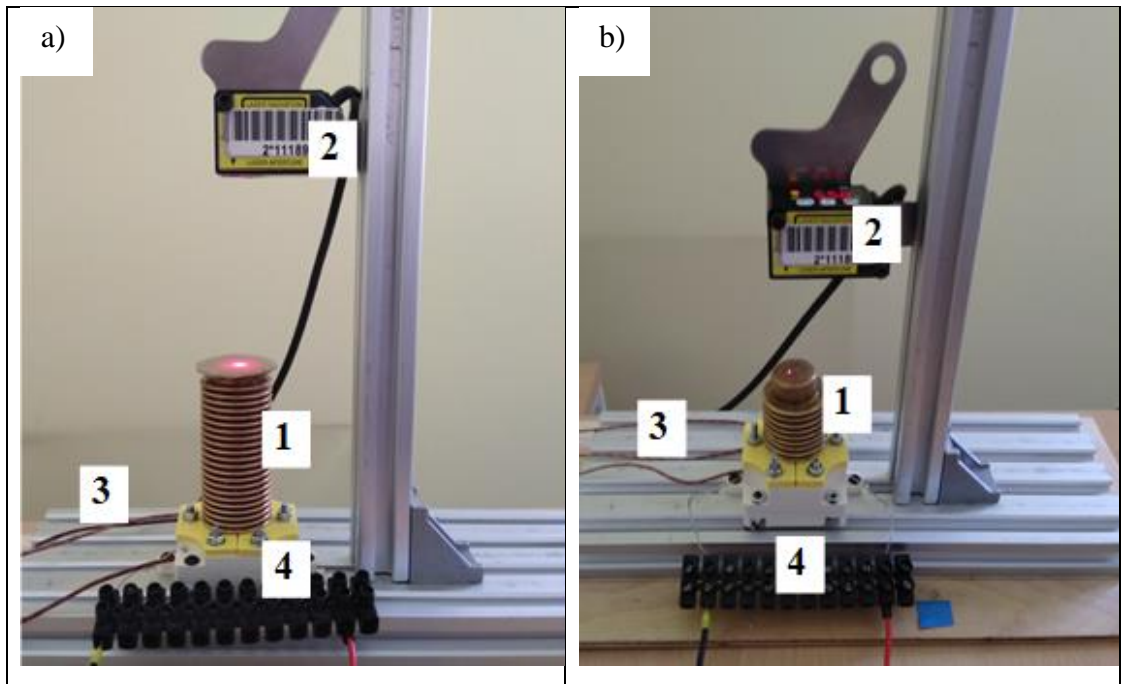


Rysunek 35. Wyznaczenie stałych sprężystości mieszków

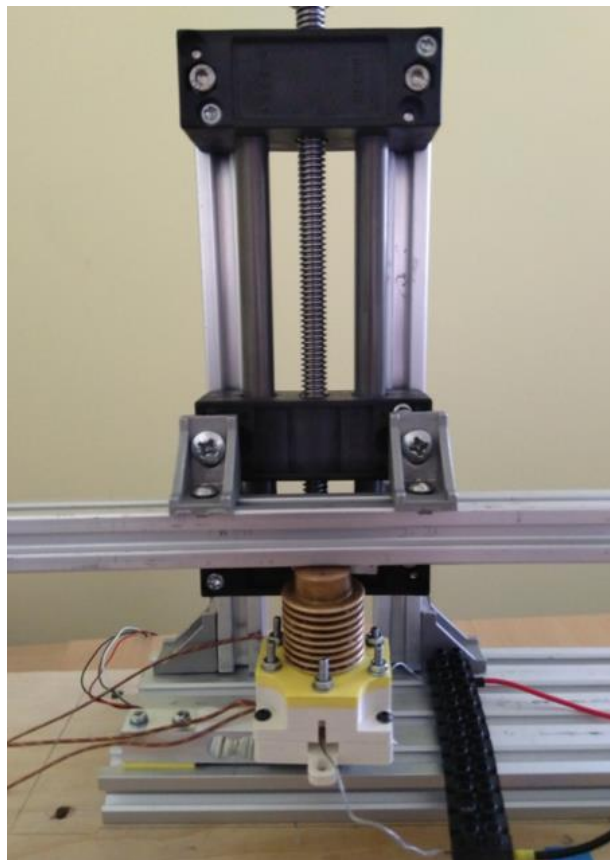
Tablica 4. Dane mieszków

Mieszek	V	k	l_0	A
	cm^3	N/mm	mm	mm^2
B - duży	16.95	1,30	57.6	227
M - średni	13.54	5,53	31.6	290
S - mały	4.15	0.41	19.4	125

Stanowiska do bada przetworników mieszkowych były takie same jak te zastosowanych w badaniach przetworników tłokowych. Ponownie badano przemieszczenia oraz siły blokujące przemieszczenia przetworników. Rysunki 36 i 37 przedstawiają przetworniki zamontowane na stanowiskach badawczych.

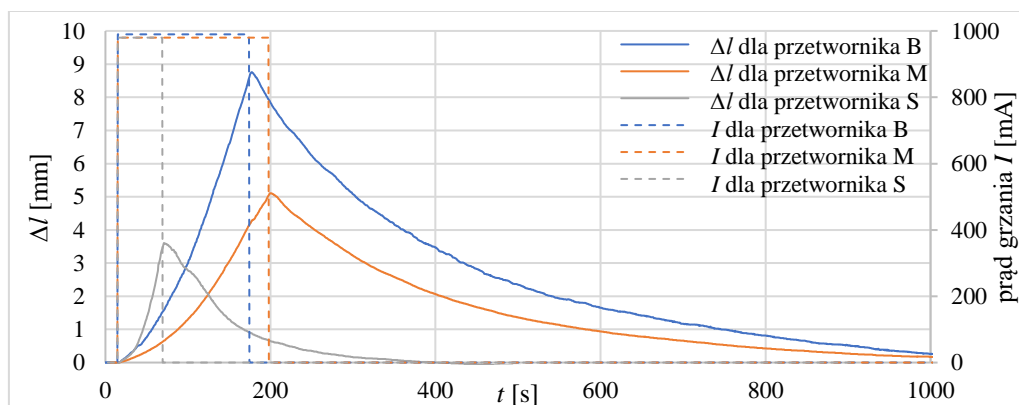


Rysunek 36. Przetworniki mieszkowe zamontowane na stanowisku do badania wydłużenia: a) przetwornik z mieszkem B, b) przetwornik z mieszkem M 1-przetwornik, 2-czujnik laserowy położenia, 3-przewody termopar, 4 -podłączenie przewodów grzałki do zasilania

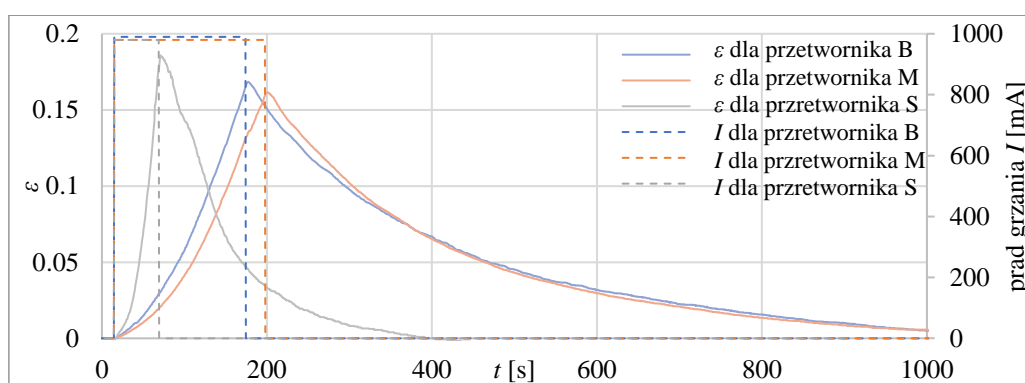


Rysunek 37. Przetwornik mieszkowy z mieszkem M na stanowisku do badania siły blokującej

Wyniki badania wydłużenia przetworników mieszkowych pokazano na rysunkach 38 i 39. Przedstawiają one odkształcenie mieszków odpowiednio bezwzględne i względne podczas nagrzewania do 75°C i chłodzenia do temperatury pokojowej. Wyniki uzyskanych odkształceń maksymalnych zebrano także w Tabelicy 5.



Rysunek 38. Odkształcenie bezwzględne przetworników mieszkowych



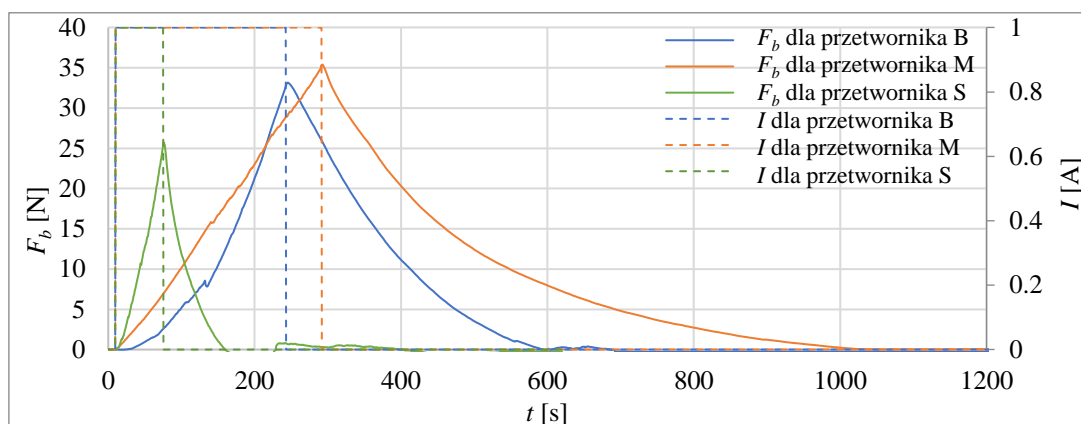
Rysunek 39. Odkształcenie względne mieszków

Tabelica 5. Uzyskane wydłużenia dla różnych mieszków

I	Oznaczenie przetwornika mieszkowego	Δl [mm]	ϵ	V [cm ³]	l_0 [mm]
1A	B	8,76	0,17	16,95	52
	M	5,11	0,16	13,54	31,6
	S	3,61	0,19	4,15	19,4

Badane przetworniki poddano także badaniu na generowaną siłę blokującą w trakcie nagrzewania do 75°C, tzn. że zasilanie elektryczne grzałki było wyłączane w momencie uzyskania w miejscu złącza termopary tej właśnie temperatury. Rysunek 40 przedstawia zmiany siły blokującej w trakcie nagrzewania i chłodzenia bez

wspomagania do uzyskania temperatury pokojowej. W Tabelicy 6 zebrano wartości uzyskanych maksymalnych sił dla poszczególnych przetworników przy zablokowanym przemieszczeniu.



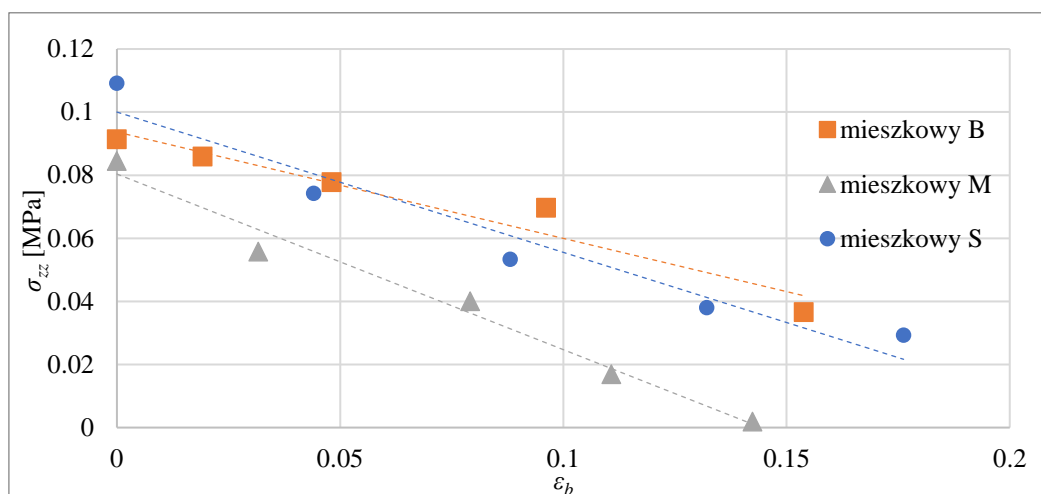
Rysunek 40. Zmiany siły blokującej tj. odpowiedzi impulsowe przetworników mieszkowych

W przypadku przetworników mieszkowych uzyskiwane wartości wydłużeń względnych są niższe, niż w przypadku przetworników rurkowych, co wynika z faktu że w przypadku przetworników mieszkowych wydłużanie się kompozytu natrafia na opór w postaci siły sprężystości generowanej przez mieszek. W przypadku badanych mieszków, przy nagraniu do 75°C, uzyskano dla nich wydłużenia względne mieszczące się w przedziale 0,15÷0,20. Oznaczało to, że spośród badanych przetworników mieszkowych tylko ten o największej długości początkowej osiągnął wydłużenie względne większe od wartości określonej w tezie, czyli 6 mm. Wartości sił wygenerowanych przez badane przetworniki mieszkowe, przy zablokowanym ich przemieszczeniu w pozycji początkowej, były w przypadku wszystkich badanych prototypów większe niż 16 N. Większe wartości siły blokującej przemieszczenie uzyskano dla przetworników o większej średniej średnicy- D_{sr} , a więc także o większej wartości efektywnego pola przekroju

Tablica 6. Wartości maksymalne siły blokującej dla przetworników mieszkowych

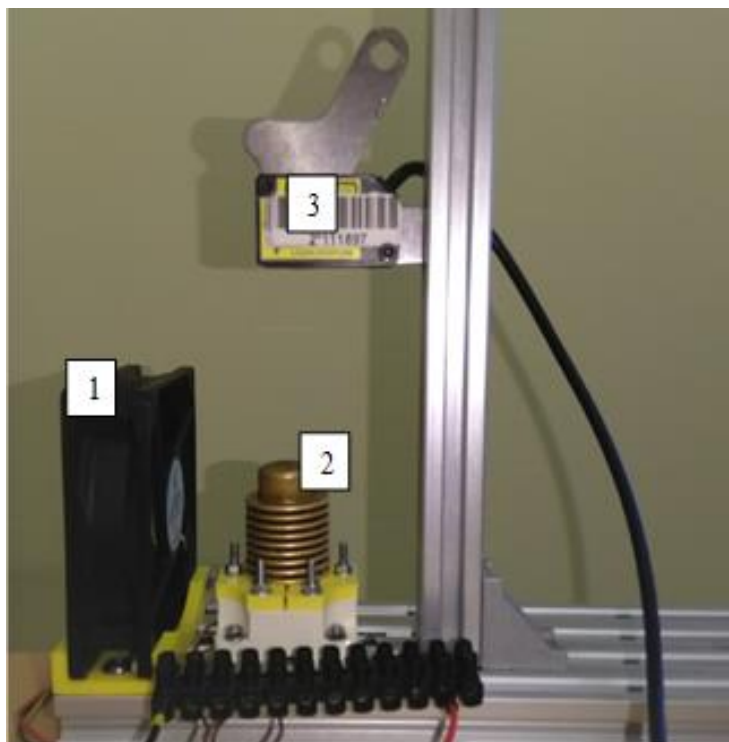
Przetwornik	F max [N]	K N/mm	V [cm ³]	l ₀ [mm]	D _{sr} [mm]	R [Ohm]	P [W]	E [J]
S	25,8	0,41	4,15	19,4	17,35	11,35	11,35	736,615
M	35,4	5,53	13,54	31,6	23,1	11,09	11,09	3119,617
B	33,2	1,30	16,95	52	21,5	11,49	11,49	2671,08

Na rysunku 41 przedstawiono wyniki badań naprężenia blokującego przy temperaturze 75° obliczone poprzez podzielenie siły blokującej przez pole powierzchni efektywnej przekroju tzn.: pole powierzchni koła o średnicy równej D_{sr} .



Rysunek 41. Naprężenie blokujące dla przetworników mieszkowych

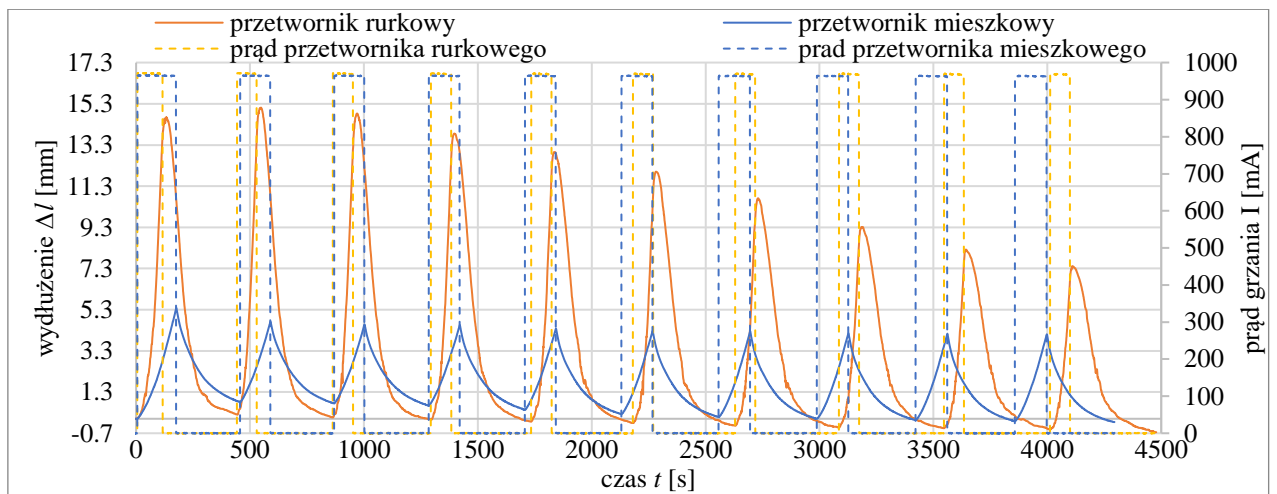
W celu zbadania żywotności osiągów przetworników mieszkowych w porównaniu do rurkowych postanowiono poddać je badaniom cyklicznym. W powtarzających się 10. Cyklach, przetwornik był nagrzewany do wybranej temperatury a następnie schładzany do 50°C. Dolna temperatura równa 50°C została wybrana po to aby skrócić czas badań. Taka temperatura została wybrana także dlatego, wcześniejsze badania pokazały, że przy chłodzeniu od temperatury 50°C do temperatury otoczenia tj. 20°C, nie zmiany wydłużeń były bardzo małe. Ponadto, stanowisko zostało wyposażone w wentylator, aby poprzez wymuszony przepływ powietrza przyspieszyć chłodzenie. Stanowisko pomiarowe zostało przedstawione na rysunku 42. Badaniom poddano średni przetwornik mieszkowy oraz przetwornik tłokowy o średnicy wewnętrznej równej 20,5 mm i długości początkowej 40 mm. Takie właśnie przetworniki wybrano ze względu na zbliżoną objętość kompozytu, jaki w nich zastosowanego, wynosząca odpowiednio 13,54 cm³ i 13,20 cm³.



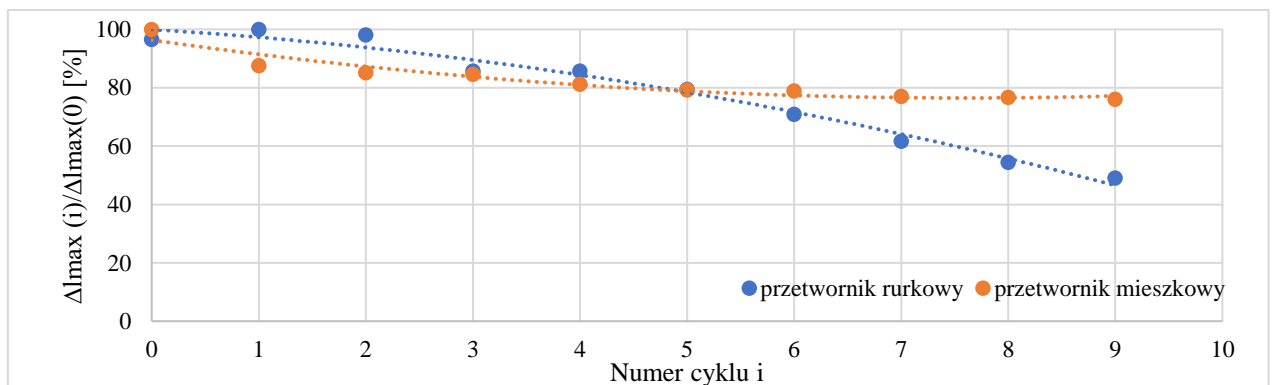
Rysunek 42. Stanowisko do pomiaru wydłużenia zmodyfikowane o wentylator. 1- wentylator, 2- przetwornik, 3- laserowy czujnik przemieszczenia

W pierwszej serii 10. cykli nagrzewano przetworniki do 75°C . Zarejestrowane przebiegi zmian wydłużenia w czasie przedstawiono na rysunku 43. Zmiany osiąganego maksymalnego wydłużenia w kolejnych cyklach grzanie-chłodzenie przestawiono na rysunku 44. W kolejnym badaniu tych samych przetworników w 10. kolejnych cyklach nagrzewano przetworniki do momentu osiągnięcia temperatury 85°C . Przebiegi tych cykli oraz zmiany maksymalnego wydłużenia przedstawiają rysunki 45 i 46. Na rysunkach 44 i 46 można zaobserwować, że w przypadku przetworników rurkowych uzyskiwane przemieszczenie z każdym kolejnym cyklem ulega wyraźnemu zmniejszeniu. W przypadku przetworników mieszkowych, parametr ten zmniejsza się ze 100% do 80%, a następnie po kilku pierwszych cyklach, stabilizuje się na tym samym poziomie. Zdaniem autora, takie zachowanie przetwornika świadczy to o tym, że w przetwornikach tłokowych występuje ucieczka etanolu do atmosfery. W przypadku zastosowania mieszków, kontakt kompozytu z otaczającą go atmosferą jest skutecznie ograniczony, dzięki czemu ograniczona zostaje ucieczka par etanolu. Przetwornik rurkowy, który wykonał 10 cykli nagrzewania do 75°C i chłodzenia do 50°C , przy podgrzaniu ponownym do 85°C osiągnął jedynie w pierwszym cyklu wartość wydłużenia zbliżoną do tej, osiągniętej za pierwszym razem przy podgrzaniu do 75°C . Przetwornik mieszkowy pomimo wykonania wcześniejszych cykli nagrzewania do 75°C , przy podgrzewaniu do 85°C w każdym następnym cyklu uzyskał wydłużenie większe niż przy podgrzewaniu do 75°C . Na przebiegach pokazanych na rysunkach 43 i 45 można

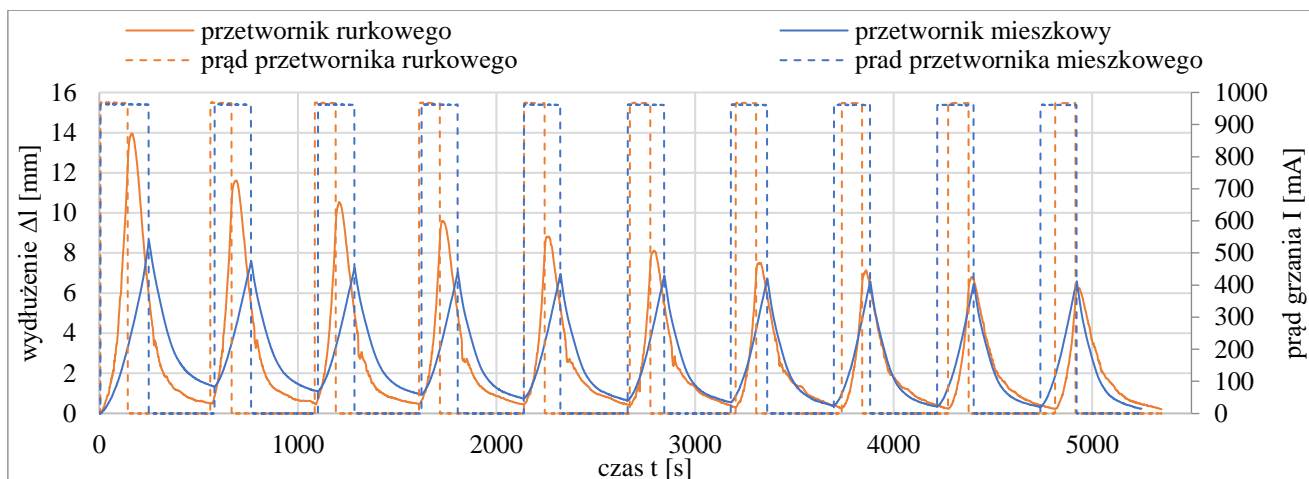
zaobserwować także, że pomimo większej objętości kompozytu użytego w przetworniku mieszkowym, wykonywał on zadane 10 cykli szybciej niż przetwornik tłokowy. Było to mimo tego, że czas nagrzewania przetwornika mieszkowego był dłuższy. Najprawdopodobniej wynikało to stąd, że większa powierzchnia mieszka ułatwiała odbieranie ciepła z kompozytu przez otoczenie, co z jednej strony przyspieszyło chłodzenie, ale z drugiej strony wydłużyło czas nagrzewania. Przy nagrzewania do 75°C wystąpiła większa różnica czasu między przetwornikiem mieszkowym a tłokowym po wykonaniu 10-ciu cykli, niż było to przy nagrzewaniu do 85°C.



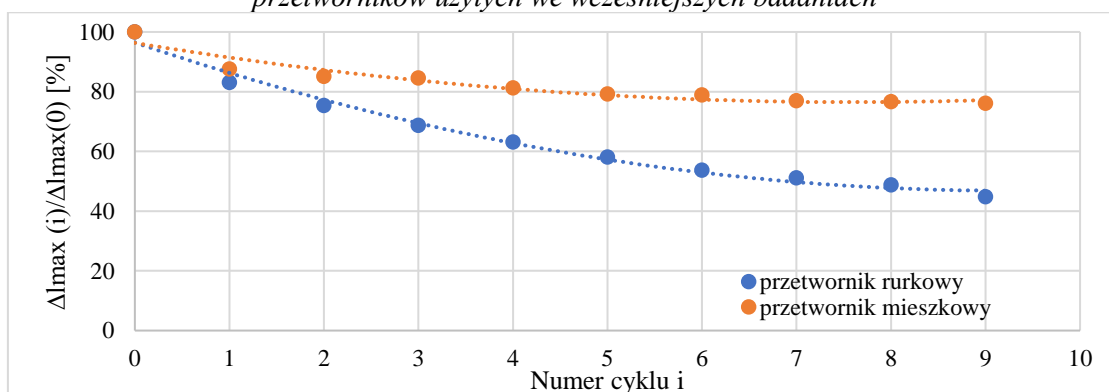
Rysunek 43. Zestawienie powtarzanych cykli nagrzewania do 75°C i chłodzenia do 50°C przetworników tłokowego ($D=20,5$ mm $l_0=40$ mm) i mieszkowego średniego



Rysunek 44. Spadek maksymalnego wydłużenia podczas cyklicznej pracy (nagrzewanie do 75°C i chłodzenie do 50°C) przetwornika mieszkowego średniego i tłokowego ($D=20,5$ mm $l_0=40$ mm). Cykl pierwszy otrzymał numer 0 ponieważ rozpoczął się od temperatury otoczenia.

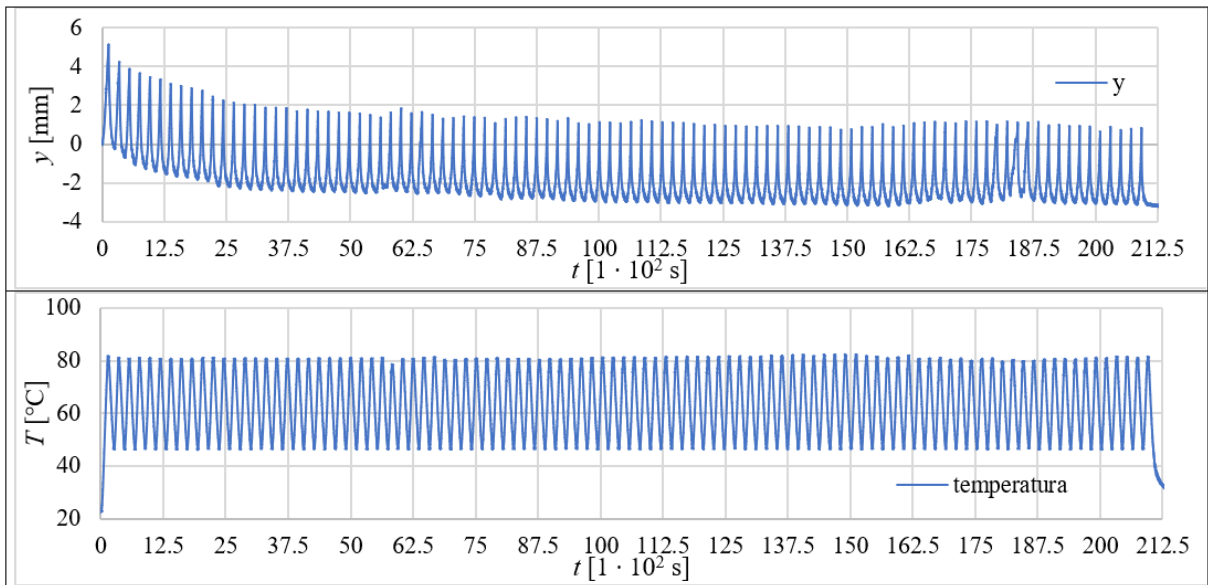


Rysunek 45. Zestawienie powtarzanych cykli nagrzewania do 85°C i chłodzenia do 50°C przetworników tłokowego ($D=20,5$ mm $l_0=40$ mm) i mieszkowego średniego. Użyto przetworników użytych we wcześniejszych badaniach

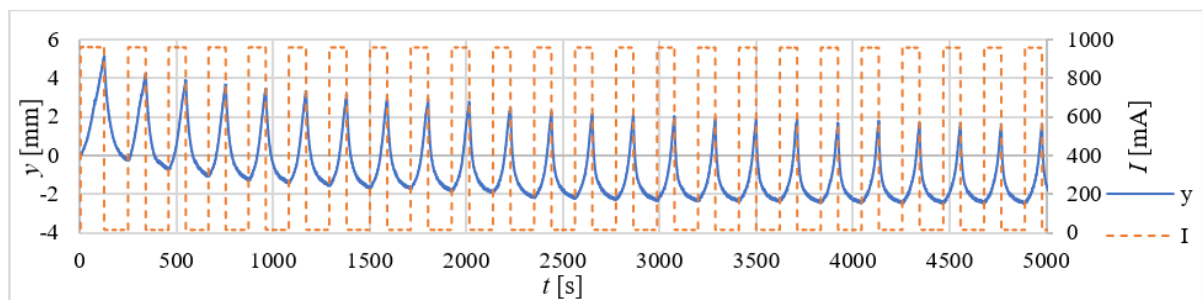


Rysunek 46. Spadek maksymalnego wydłużenia podczas cyklicznej pracy (nagrzewanie do 85°C i chłodzenie do 50°C) przetwornika mieszkowego średniego i tłokowego ($D=20,5$ mm $l_0=40$ mm). Cykl pierwszy otrzymał numer 0 ponieważ rozpoczął się od temperatury otoczenia.

Powyżej opisane próby były prowadzone dla małej liczby cykli. Aby lepiej ocenić działanie przetwornika, przeprowadzono badania dla pracy cyklicznej obejmującej 100 cykli nagrzewania do 75°C i chłodzenia do 50°C. Badania te przeprowadzono dla przetwornika mieszkowego małego (S). Wybrano go dlatego, że jego objętość była mniejsza, przez co pojedynczy cykl mógł trwać krócej niż w przypadku pozostałych, większych prototypów przetworników mieszkowych. Zarejestrowane wartości położenia czoła przetwornika oraz temperatury w jego wnętrzu w funkcji czasu, przedstawiono na rysunku 47. Powiększony fragment tych przebiegów, przedstawiający pierwsze 24 cykle wraz z zaznaczonym prądem nagrzewania przedstawiono na rysunku 48.



Rysunek 47. Zmiany pozycji czoła przetwornika mieszkowego małego oraz zmiany temperatury w jego wnętrzu podczas wykonywania cyklicznej pracy (nagrzewanie do osiągnięcia 75°C i chłodzenie do 50°C).

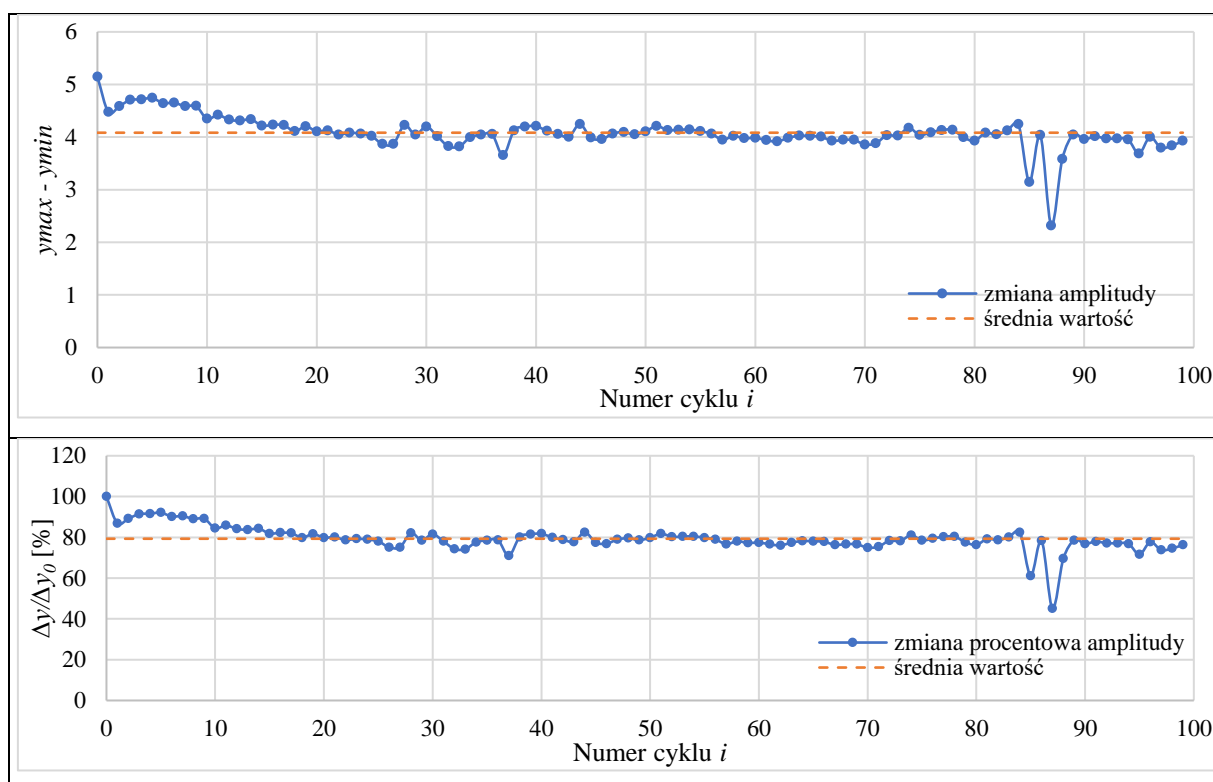


Rysunek 48. Krzywa zmian wydłużenia pierwszych 24 cykli przetwornika oraz przebieg zmian natężenia prądu grzania

Na rysunku 48 można zaobserwować, że podczas pierwszych cykli następowało obniżenie wartości wysunięcia i cofania się położenia czoła przetwornika, jednakże różnica między nimi utrzymywała się na zbliżonym poziomie. Podczas pierwszych cykli przemieszczenia przetwornika ze świeżo odlanym kompozytem, może dochodzić do ucieczki z niego etanolu, który nie został wystarczająco dobrze związany wewnątrz pęcherzyków, a pozostał jedynie na powierzchni kompozytu.

Na rysunku 49 można zaobserwować, że różnica między położeniem maksymalnym i minimalnym ustabilizowała się na poziomie 4 mm. W stosunku do inicjującego cyklu oznacza to spadek wydłużenia o około 20%, przy czym dokonał się on w trakcie pierwszych 16 cykli. Przez pozostałe cykle różnica między „górnym” i „dolnym” położeniem oscylowała w okolicach 4 mm za wyjątkiem zaburzonego odcinka pomiędzy 85 i 90 cyklem. Podsumowując można stwierdzić, że w przypadku przetworników rurkowych wraz z kolejnymi cyklami pracy następuje szybkie pogorszenie ich osiągnięć. Z tego powodu nie nadają się do zastosowań, w

których musiałyby wielokrotnie w powtarzalny sposób wykonywać podobne działanie. Można jedynie rozpatrywać ich zastosowanie w aplikacjach jednokrotnego działania. Z tego powodu nie zdecydowano się w dalszej pracy na zbudowanie napędu pozycjonującego na ich bazie. Natomiast w przypadku przetworników mieszkowych także występuje pogorszenie osiągow, w kolejnych cyklach w stosunku do pierwszego, jednakże jest ono dużo mniejsze niż w przypadku rurkowych, oraz jak wynika z rysunku 49. Po pewnej ilości cykli następuje stabilizacja osiągow. Z tego powodu w dalszej części pracy zdecydowano się skupić na przetwornikach mieszkowych.



Rysunek 49. Różnica między górnym i dolnym położeniem czola przetwornika oraz procentowa zmiana wydłużenia w stosunku do cyklu inicjującego.

3.6. Podstawy projektowania przetworników mieszkowych

Projektowanie przetwornika mieszkowego może być wykonane w oparciu o równania (1) ÷ (11), przedstawione w rozdziale 1.6. Szczególnie ważne są równania (9) ÷ (11). Opisują one podstawy teoretyczne działania kompozytu silikon-etanol. W celu zaprojektowania przetwornika mieszkowego należy uwzględnić w nich parametry mieszka, takie jak: współczynnik sprężystości k , długość początkową l_0 oraz pole powierzchni efektywnego przekroju mieszka A .

Założono, że w procesie projektowania znane są parametry wyjściowe, czyli przede wszystkim wymagana siła i przemieszczenie, jakie ma uzyskać napęd. W związku z tym

konieczne jest zaadaptowanie wyżej wymienionych równań do zaprojektowania przetwornika, tzn. wyznaczenie jego wymiarów itp. Do tego celu można zastosować równanie (11), opisujące naprężenie blokujące dla jednoosiowego wydłużenia kompozytu, w którym wydłużenie względne, dla którego przemieszczenie jest zablokowane, tzn. jest stałe ε_b .

W projektowanym przetworniku wydłużenie przy którym ruch zostaje zatrzymany przez siłę obciążającą może się zmieniać w czasie. Dla ułatwienia projektowania, we wzorze (11), ε_b zastąpiono przez $\Delta l(t)/l_0$, gdzie $\Delta l(t)$ to wydłużenie w danej chwili [mm], a l_0 to długość początkowa mieszka [mm]. Także σ_{zz} [MPa] może zostać zapisane jako $\frac{F_b(t)}{A}$, gdzie $F_b(t)$ jest siłą blokującą [N], a A jest powierzchnią efektywną przekroju mieszka [mm²]. Po przekształceniu otrzymano zależność na zmiany siły generowanej przez przetwornik $F_{wy}(t)$ w czasie, zależne od temperatury i wydłużenia kompozytu. Wartość tej siły jest równa tzw. sile blokującej, której przyłożenie spowoduje zatrzymanie ruchu przetwornika:

$$F_{wy}(t) = F_b(t) = [-3\kappa_e\alpha_e(t)\Delta T(t) + \left(\kappa_e + \frac{4}{3}\mu_e\right)\frac{\Delta l(t)}{l_0}] \cdot A \quad (12)$$

W przypadku przetworników mieszkowych, w tym wzorze należy jeszcze uwzględnić występowanie siły sprężystości mieszka $F_s(t)$ [N], która przeciwdziała jego rozszerzaniu się tj. wydłużaniu kompozytu i tym samym zmniejsza wartość siły blokującej F_b [N] niezbędnej aby zatrzymać wydłużanie się kompozytu. Wzór na siłę wyjściową i jednocześnie blokującą może być zapisany następująco:

$$F_{wy}(t) = F_b(t) = \left[-3\kappa_e\alpha_e(t)\Delta T(t) + \left(\kappa_e + \frac{4}{3}\mu_e\right)\frac{\Delta l(t)}{l_0}\right] \cdot A + F_s(t) \quad (13)$$

gdzie:

$F_s(t)$ – siła sprężystości mieszka, stawiająca opór przy wydłużaniu się kompozytu [N], A – efektywne pole powierzchni przekroju przetwornika [mm²], κ_e – efektywny moduł ściśliwości kompozytu [MPa], μ_e – efektywny moduł ścinania kompozytu [MPa], $\Delta T(t)$ – przyrost temperatury [°C], $\alpha_e(t)$ – efektywny współczynnik rozszerzalności termicznej [°C⁻¹]

Siła sprężystości potrzebna do rozciągnięcia mieszka $F_s(t)$ [N], może zostać wyrażona równaniem:

$$F_s(t) = k\Delta l(t) \quad (14)$$

gdzie:

k – współczynnik sprężystości mieszka przetwornika [$\frac{\text{N}}{\text{mm}}$], $\Delta l(t)$ – przyrost długości [mm]

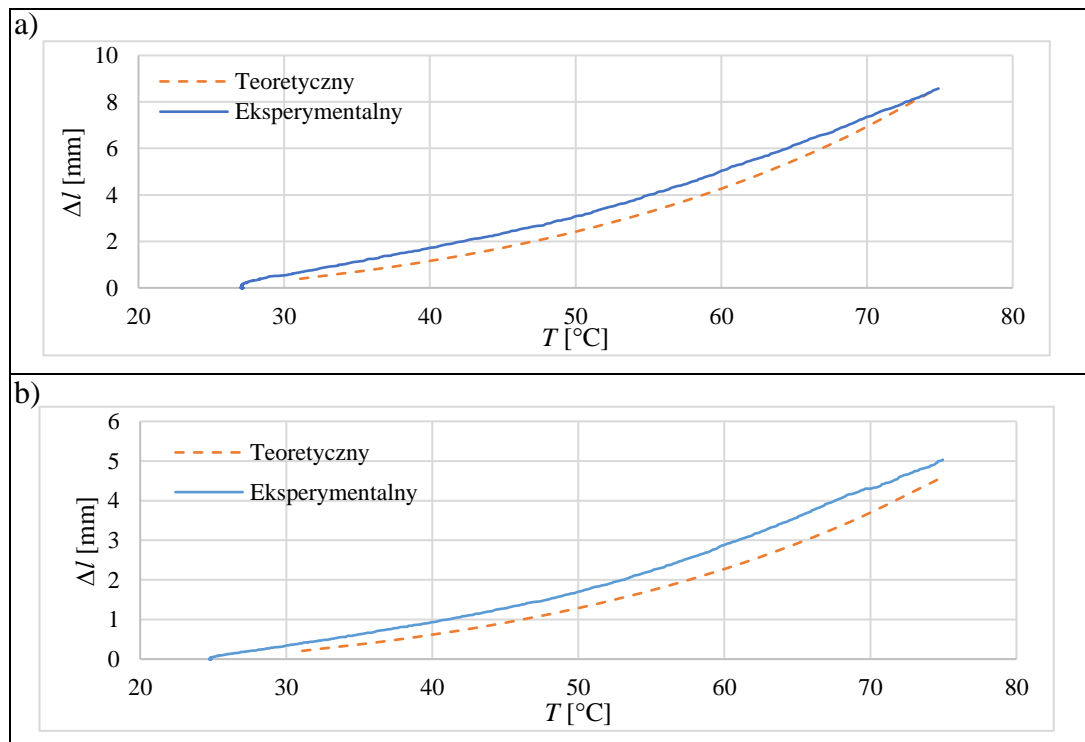
W przypadku przetwornika mieszkowego bez dodatkowego obciążenia, zewnętrznego tzn. przy $F_b = 0$ N, równowaga sił może zostać zapisana w sposób poniższy:

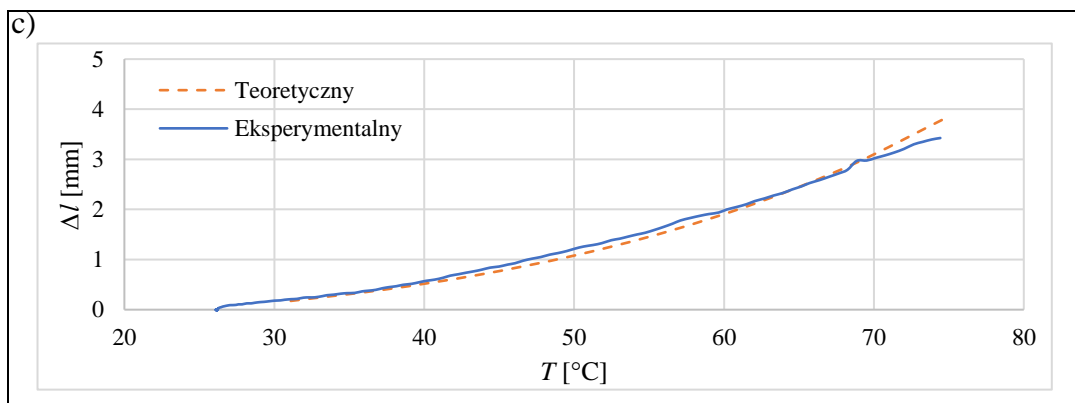
$$3\kappa_e\alpha_e(t)A\Delta T(t) = \left[\left(\kappa_e + \frac{4}{3}\mu_e \right) \frac{\Delta l(t)}{l_0} \right] \cdot A + k\Delta l(t) \quad (15)$$

Równanie (18) może zostać przekształcone do postaci opisującej wydłużenie przetwornika jako funkcję przyrostu temperatury $\Delta T(t)$:

$$\Delta l(t) = \frac{3\kappa_e\alpha_e(t)\Delta T(t)}{\left(\kappa_e + \frac{4}{3}\mu_e \right) \frac{1}{l_0} + \frac{k}{A}} \quad (16)$$

Zmierzone w trakcie badań doświadczalnych oraz obliczone za pomocą równania (16), wydłużenia przetworników mieszkowych dużego (B), średniego (M) i małego (S) w funkcji temperatury kompozytu pokazano na rysunku 50. Krzywe uzyskane w trakcie testów laboratoryjnych były zarejestrowane w trakcie nagrzewania przetwornika prądem o natężeniu 1 A do momentu uzyskania temperatury 75°C.





Rysunek 50. Wydłużenie przetworników mieszkowych teoretyczne i eksperymentalne jako funkcja temperatury w trakcie nagrzewania prądem o natężeniu 1 A: a) przebieg uzyskany dla przetwornik B, b) przebieg uzyskany dla przetwornika M, c) przebieg uzyskany dla przetwornika S

Teoretyczna wartość siły blokującej może zostać obliczona na podstawie równania (11). W tym przypadku wydłużenie względne ε_b jest stałe i równe $\Delta l_b/l_0$ gdzie Δl_b jest wydłużeniem przy którym przemieszczenie zostało zablokowane [mm]. Naprężenie blokujące może zostać zapisane jako siła blokująca $F_b(t)$ [N] podzielona przez efektywne pole powierzchni przekroju A [mm²]. Ponadto w pierwotnym równaniu (11) należy uwzględnić wpływ siły sprężystości potrzebnej do rozciągnięcia mieszka, równej $k\Delta l$, która przeciwdziała wydłużeniu mieszka. Biorąc pod uwagę powyższe, nowe równanie może zostać zapisane następująco:

$$F_b(t) = \left[-3\kappa_e \alpha_e(t) \Delta T(t) + \left(\kappa_e + \frac{4}{3} \mu_e \right) \frac{\Delta l_b}{l_0} \right] \cdot A + k \Delta l_b \quad (17)$$

gdzie:

$F_b(t)$ — siła blokująca [N], A — efektywne pole powierzchni przekroju przetwornika [mm²]

Po dokonaniu kilku prostych podstawień i przekształceń zaprezentowanych w równaniach (18) i (19) ostateczna forma jest przedstawiona w równaniu (20):

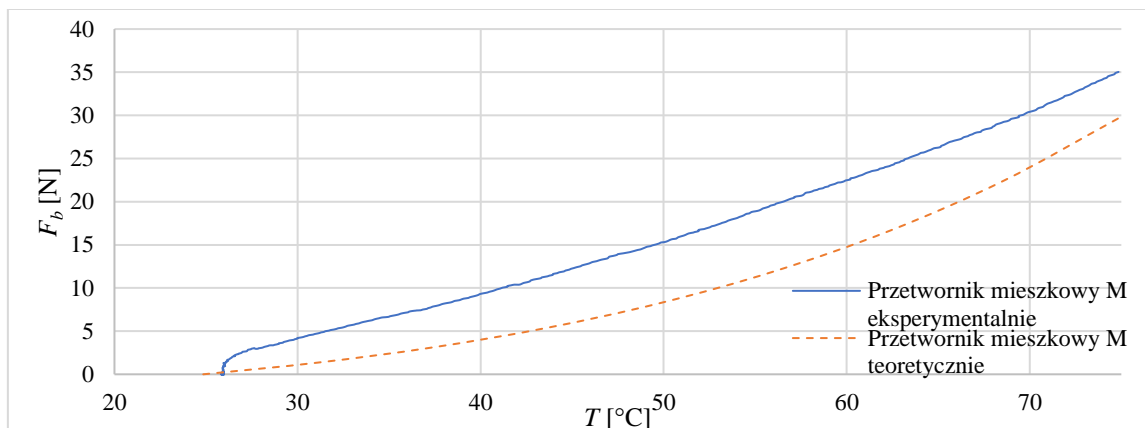
$$F_b(t) = \left[-3\kappa_e \alpha_e(t) \Delta T(t) + \left(\kappa_e + \frac{4}{3} \mu_e \right) \varepsilon_b + \frac{k}{A} \frac{l_0}{\Delta l_b} \frac{\Delta l_b}{l_0} \Delta l_b \right] \cdot A \quad (18)$$

$$F_b(t) = \left[-3\kappa_e \alpha_e(t) \Delta T(t) + \left(\kappa_e + \frac{4}{3} \mu_e \right) \varepsilon_b + \frac{k}{A} \frac{l_0}{\Delta l_b} \varepsilon_b \Delta l_b \right] \cdot A \quad (19)$$

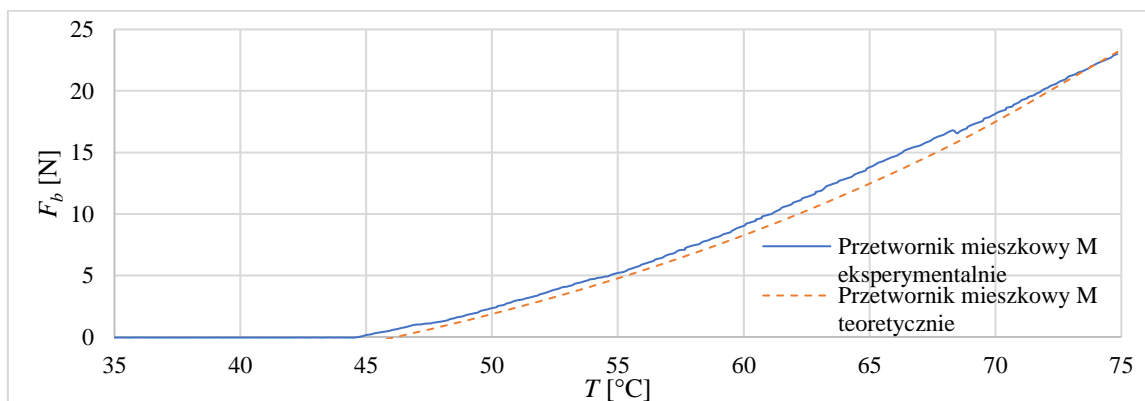
$$F_b(t) = \left[\left(\kappa_e + \frac{4}{3} \mu_e + \frac{k}{A} \frac{l_0}{\Delta l_b} \right) \varepsilon_b - 3\kappa_e \alpha_e(t) \Delta T(t) \right] \cdot A \quad (20)$$

Zmierzone oraz obliczone teoretycznie, przy użyciu równania (20), zmiany siły blokującej w funkcji temperatury dla przetwornika mieszkowego M przy wydłużeniu 0 mm, 1 mm i 3,5 mm są zaprezentowane na rysunkach 51÷53. Wartości użytych do obliczeń parametrów są następujące: $k = 5530 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$, $l_0 = 48,5$ mm, $A = 437,4$ mm², efektywny moduł ściskania obliczony

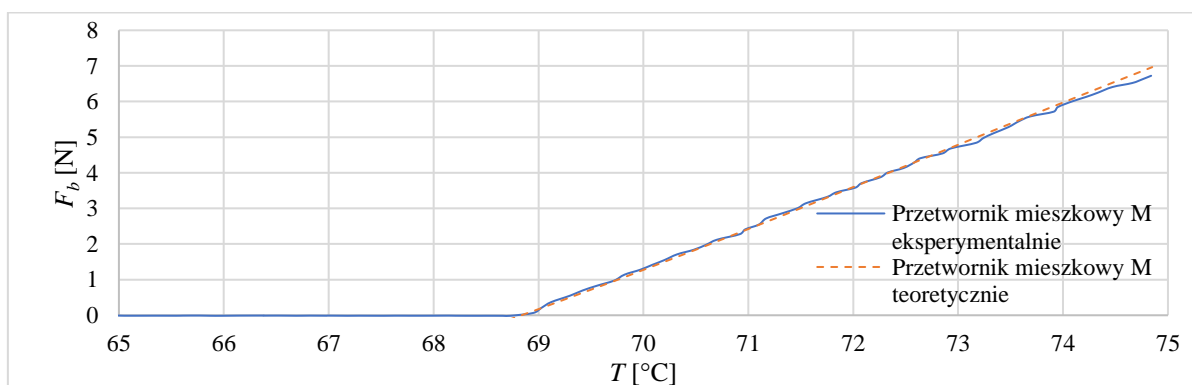
zgodnie z równaniem (6) wynosił $\kappa_e = 85,94$ kPa a efektywny moduł ścinania wynosił $\mu_e = 15,15$ kPa.



Rysunek 51. Siła blokująca dla wydłużenia 0 mm jako funkcja temperatury mierzonej wewnątrz przetwornika mieszkowego M



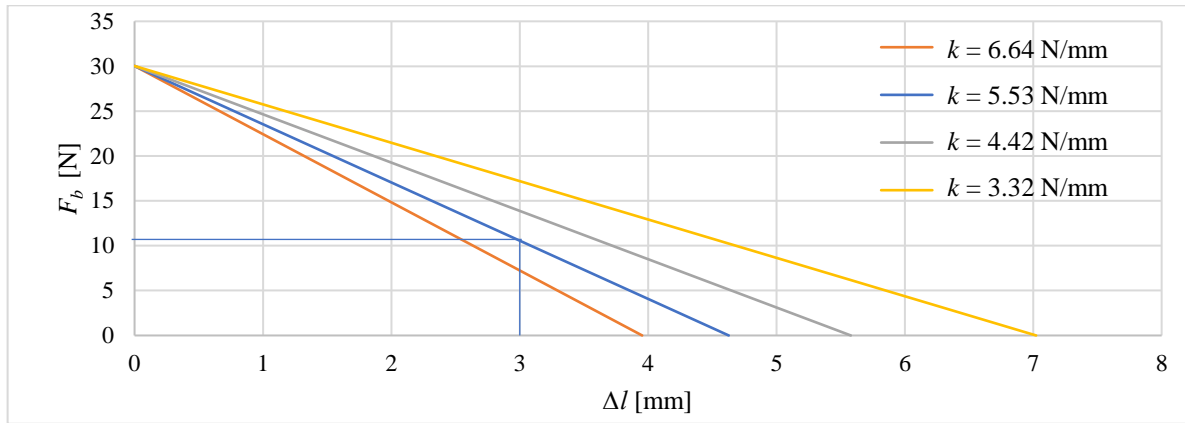
Rysunek 52. Siła blokująca dla wydłużenia 1 mm jako funkcja temperatury mierzonej wewnątrz przetwornika mieszkowego M



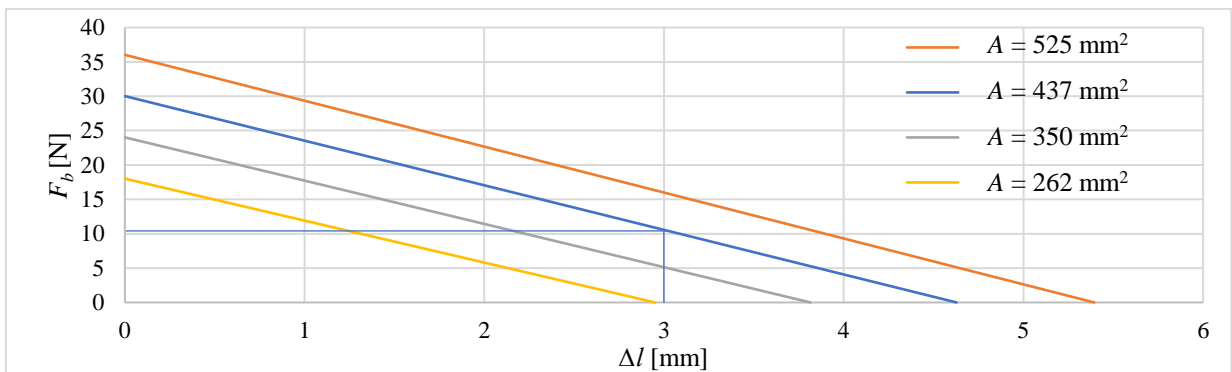
Rysunek 53. Siła blokująca dla wydłużenia 3,5 mm jako funkcja temperatury mierzonej wewnątrz przetwornika mieszkowego M

Na podstawie równań (16) i (20) można dla przetwornika mieszkowego wyznaczyć charakterystykę $F_b = f(\Delta l)$ przy danej temperaturze. Na podstawie tych równań na rysunku 54

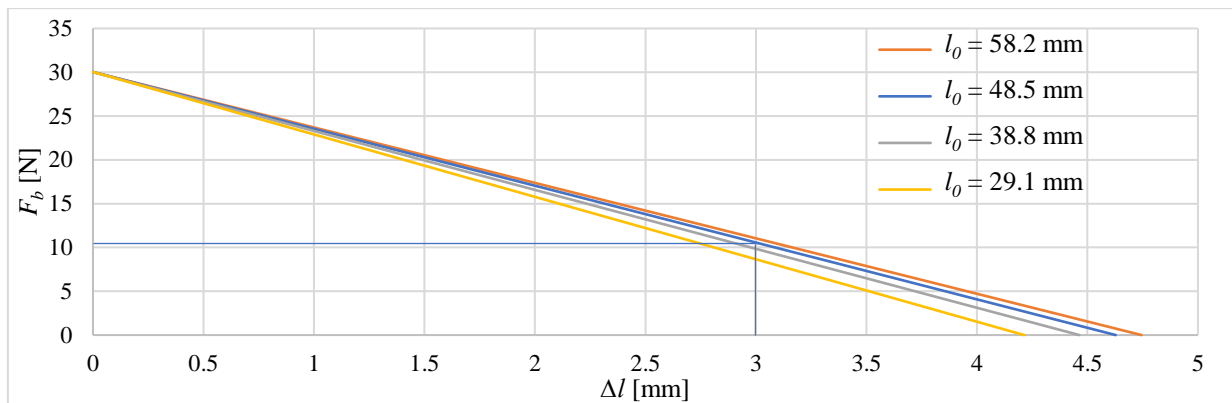
przedstawiono charakterystyki takich przetworników o tej samej długości początkowej l_0 i tej samej wartości efektywnego pola przekroju A , ale różniące się stałą sprężystości mieszka k . Podobnie na rysunku 55 przedstawiono charakterystyki przetworników różniących się parametrem A , natomiast na rysunku 56, różniące się tylko parametrem l_0 .



Rysunek 54. Charakterystyki $F_b = f(\Delta l)$ przetworników mieszkowych nagrzanych do temperatury 75°C różniących się stałą sprężystości k mieszka, pozostałe parametry $l_0 = 48.5$ mm, $A = 437$ mm².



Rysunek 55. Charakterystyki $F_b = f(\Delta l)$ przetworników mieszkowych nagrzanych do 75°C różniących się wartością pola efektywnego przekroju, pozostałe parametry $l_0 = 48.5$ mm, $k = 5.53$ N/mm.



Rysunek 56. Charakterystyki $F_b = f(\Delta l)$ przetworników mieszkowych nagranych do 75°C różniących się wartością długości początkowej l_0 , pozostałe parametry $A = 347 \text{ mm}^2$, $k = 5.53 \text{ N/mm}$.

W celu zaprojektowania przetwornika mieszkowego niezbędna jest znajomość jego stałej sprężystości k [$\frac{\text{N}}{\text{mm}}$]. Jej wartość wynika z geometrii mieszka oraz właściwości materiału z którego jest wykonany. Następujące równania (21-23) pozwalają obliczyć oczekiwaną wartość stałej sprężystości k metalowego mieszka [11].

$$k = \frac{2\pi k_{mP}^2 E g^3}{3n(k_{mP}^2 - 1)b^2} \left[c^2 - 1 - \frac{4c^2}{c^2 - 1} (\log c)^2 \right] \quad (21)$$

$$k_{mP} = \frac{1}{\nu} \quad (22)$$

$$c = \frac{r_m}{b} \text{ [mm/mm]} \quad (23)$$

W tych równaniach k_{mP} jest współczynnikiem równym odwrotności współczynnika Poissona, E jest modułem Younga materiału z którego wykonany jest mieszek [MPa], n jest liczbą segmentów, g jest grubością ścianki mieszka [mm], ν jest współczynnikiem Poissona materiału z którego wykonany jest mieszek, r_m jest promieniem zewnętrznej średnicy [mm], c jest współczynnikiem będącym stosunkiem promienia zewnętrznej średnicy do promienia średnicy wewnętrznej, b jest promieniem średnicy wewnętrznej [mm]. Równania te mogą być zastosowane w trakcie projektowania nowego przetwornika mieszkowego, do wyznaczenia parametrów mieszka.

W celu zaprojektowania przetwornika mogącego osiągnąć wydłużenie Δl_{max} oraz siłę F_b dla przemieszczenia o odległość Δl_b , zaproponowano następujący algorytm projektowania :

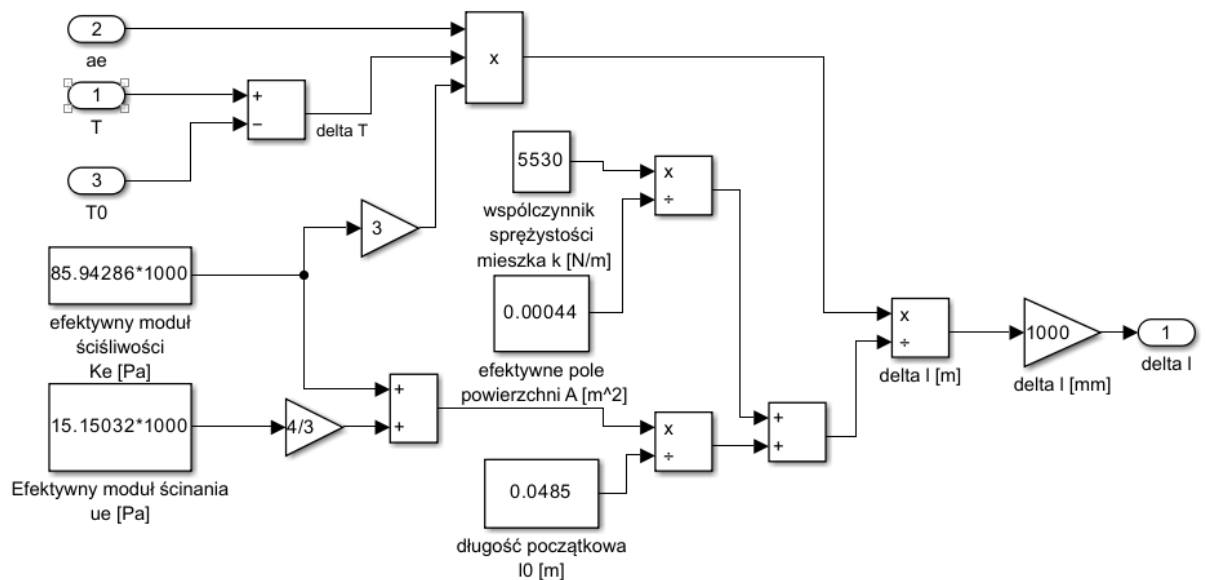
- 1) Określić wymagany punkt pracy tzn.: dla siły F_b i przesunięcia Δl_b oraz dla maksymalnego wydłużenia Δl_{max} , określić wymaganą wartość przyrostu temperatury ΔT
- 2) Założyć wstępnie wartość stałej sprężystości mieszka k

- 3) Dla $(\Delta l_{max}, \Delta T_1)$, $(F_b, \varepsilon_b, \Delta T_2)$ i wybranej wartości k rozwiązać układ równań (16) i (20), co pozwoli wyznaczyć wartości: długości początkowej l_0 i efektywnego pola powierzchni przekroju A .
- 4) Wybrać materiał, z którego ma być wykonany mieszek. Określa on wartości współczynnika Poissona ν oraz modułu Younga E , które będą traktowane jako stałe w następnym kroku.
- 5) Dla: l_0 , A , ν , E i k należy znaleźć parametry mieszka zgodne z równaniami (21)-(23). Wyznaczyć wartości zewnętrznego i wewnętrznego promienia mieszka a i b oraz grubość ścianki g , liczbę segmentów n . Wartość A ogranicza zakres możliwych wartości a i b , natomiast l_0 ogranicza liczbę segmentów, które mogą występować w mieszk.
- 6) W razie braku rozwiązania w kroku 4, sprawdzić możliwość użycia innego materiału.
- 7) W przypadku dalszego braku rozwiązania należy zmienić wartość k i powrócić ponownie do punktu numer 3.

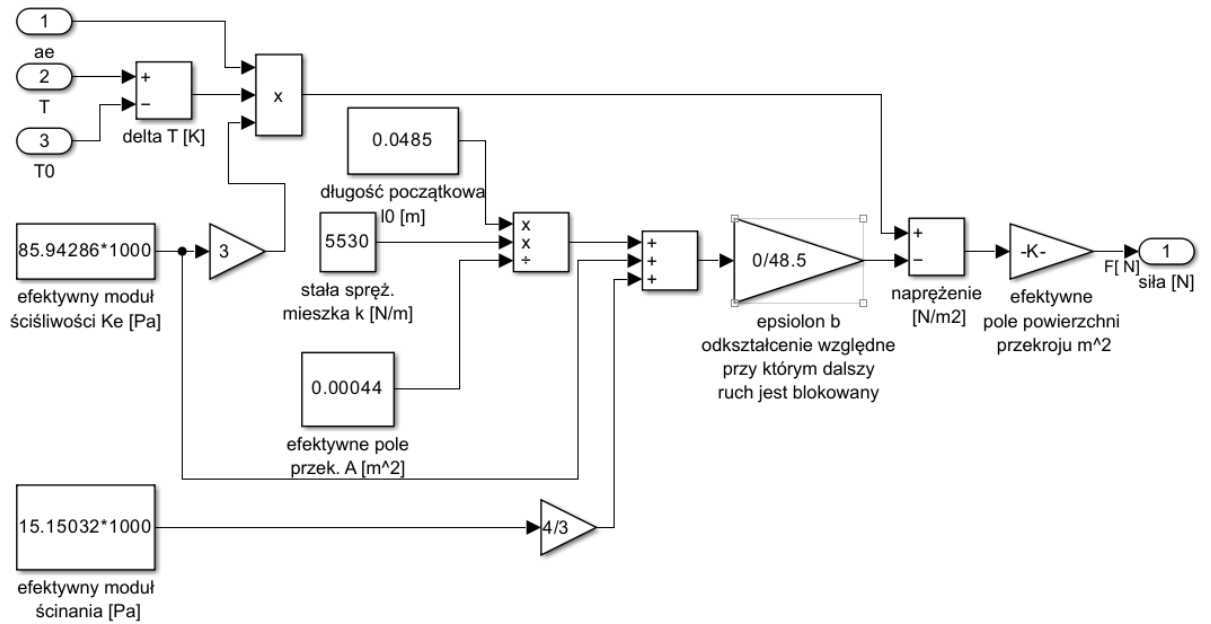
4. Badanie symulacyjne przetwornika

4.1. Model przetwornika mieszkowego

Zależności opisujące swobodne wydłużenie przetwornika mieszkowego pod wpływem temperatury, oraz wartość siły generowanej przez przetwornik przy zablokowanym przemieszczeniu opisują odpowiednio równania (16) i (20) przedstawione w rozdziale 3.6. poświęconemu podstawom projektowania przetworników mieszkowych. Zgodnie z tymi równaniami czynnikiem wywołującym generowanie wydłużenia albo siły jest wzrost temperatury kompozytu ΔT . Ponadto na wartość generowanego wydłużenia, albo siły mają wpływ także parametry zastosowanego mieszka oraz parametry materiału kompozytowego. Spośród parametrów mieszka są to jego długość początkowa l_0 , efektywne pole przekroju A , obliczane jako pole koła o średniej średnicy, liczonej jako średnia minimalnej i maksymalnej średnicy wewnętrznej mieszka, oraz stała sprężystości mieszka k . Parametrami materiału kompozytowego uwzględnionymi w powyższych równaniach są jego efektywny moduł ścisłości κ_e , efektywny moduł ścinania μ_e oraz efektywny współczynnik wydłużenia termicznego α_e . Równanie (16) zamodelowane w programie Matlab-Simulink przedstawiono na rysunku 57, natomiast równanie (20) na rysunku 58.

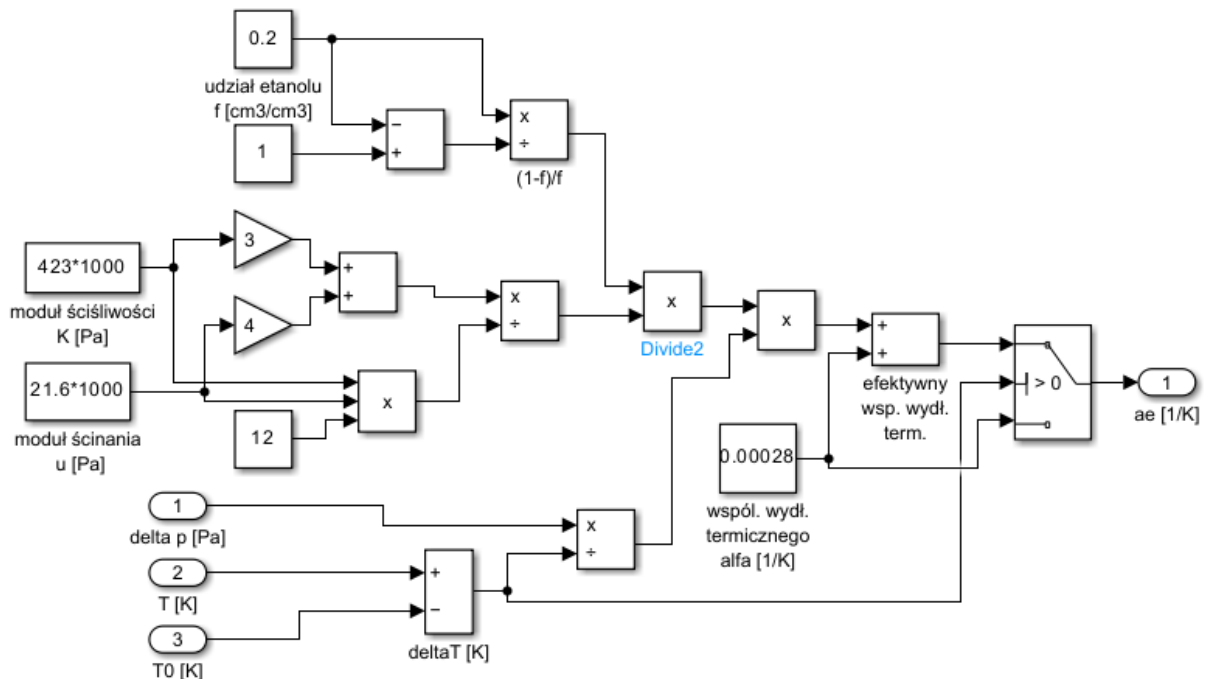


Rysunek 57. Zależność na wydłużenie przetwornika mieszkowego zamodelowana w programie Matlab-Simulink

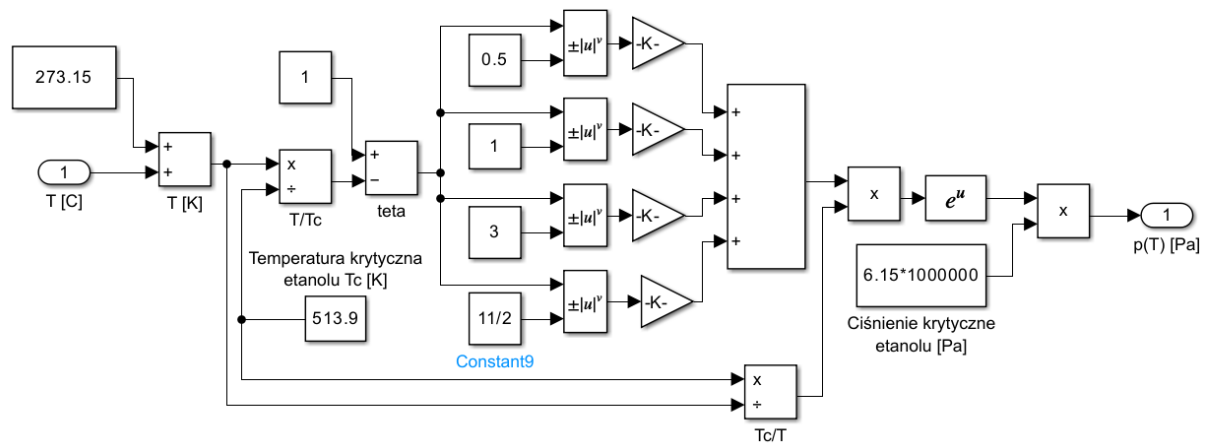


Rysunek 58. Zależność na generowana siłę zamodelowana w programie Matlab-Simulink

Spośród powyższych parametrów α_e zależy od zmiany temperatury, oraz od zmiany ciśnienia pary etanolu, która także zależy od przyrostu temperatury. Zależność na α_e opisaną równaniem (5) zamodelowaną przedstawia rysunek 59. Zależność natomiast na prężność pary etanolu w funkcji temperatury opisaną zależnościami (1) i (2) przedstawia rysunek 60.



Rysunek 59. Zależność na generowana efektywny współczynnik wydłużenia termicznego α_e zamodelowana w programie Matlab-Simulink



Rysunek 60. Zależność na prężność pary etanolu zamodelowana w programie Matlab-Simulink

Wzrost temperatury wewnątrz przetwornika spowodowany ogrzewaniem przez prąd płynący przez grzałkę może być zamodelowany przez obiekt inercyjny drugiego rzędu z opóźnieniem. Transmitancje takiego obiektu opisuje transmitancja opisana równaniem:

$$G(s) = \frac{T(s)}{I(s)} = \frac{k}{(sT_1+1)(sT_2+1)} e^{-sT_0} \quad (24)$$

gdzie:

k – wzmacnienie

T_1 – stała czasowa nagrzewania grzałki w izolacji teflonowej [s]

T_2 – stała czasowa nagrzewania kompozytu [s]

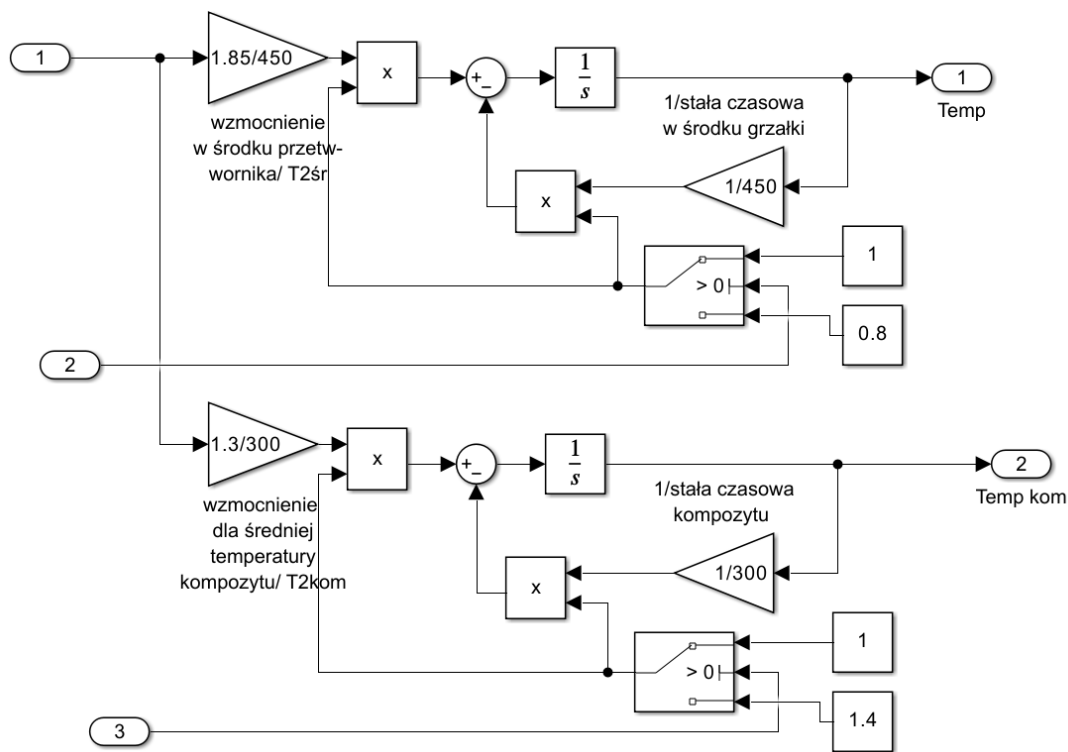
T_0 – opóźnienie nagrzewania układu [s]

s – zmienna zespolona

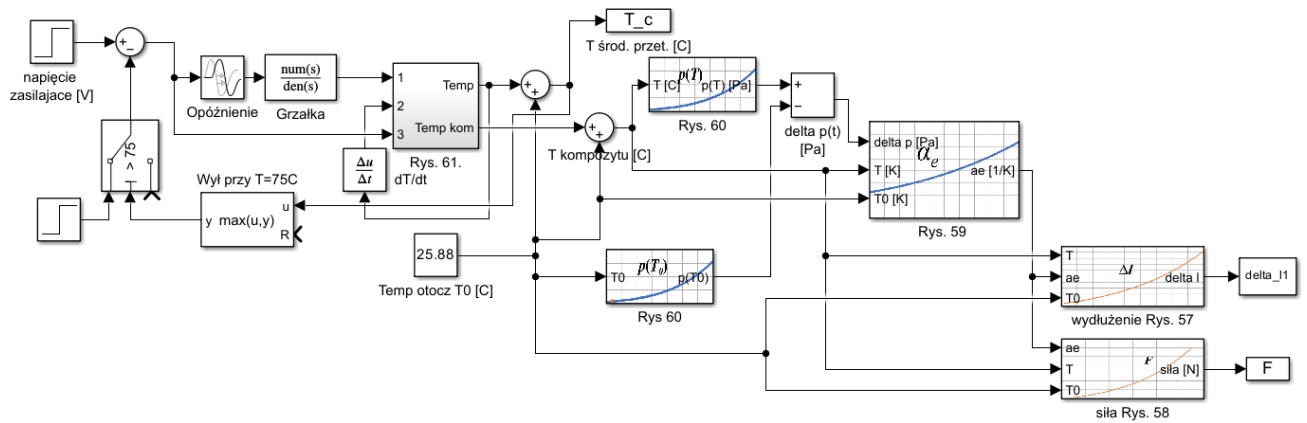
Jednakże temperatura wewnątrz przetwornika nie jest jednorodna. Przybliżenie wydłużenia na podstawie temperatury mierzonej w centralnym punkcie przekroju może dać dobre rezultaty w trakcie nagrzewania jednakże po wyłączeniu zasilania grzałki korelacja jest tracona. Jest to wynikiem inercji w przepływie ciepła. Po wyłączeniu nagrzewania temperatura w środku przetwornika wciąż rośnie, podczas gdy w rejonach położonych blisko ścianki zewnętrznej niemal natychmiast zaczyna spadać. Określenie rozkładu temperatury wewnątrz przetwornika jest złożonym zagadnieniem tak samo jak wzajemne oddziaływanie na siebie obszarów kompozytu o różnej temperaturze. Zagadnienie to jest dodatkowo komplikowane przez fakt że nagrzewający materiał składa się z trzech faz – silikonu w stanie stałym, etanolu w stanie gazowym, oraz części etanolu, która nie uległa przemianie fazowej w stanie ciekłym.

Zostało założone że ten sam efekt jak dla złożonego rozkładu temperatury może zostać uzyskany dla jednej określonej temperatury, która byłaby uśrednioną temperaturą materiału kompozytowego w całej swojej objętości. W stworzonym modelu moment zmiany włączania i wyłączenia grzania jest symulowany przez modelowaną zmian temperatury w centralnym punkcie przetwornika. Kiedy ta temperatura przekracza 75°C grzanie jest wyłączane. Z tego powodu zdecydowano się zamodelować dwie temperatury – temperaturę w środku przetwornika i temperaturę średnią kompozytu. Przy czym modelujące je obiekty dwuinercyjne mają taką samą stałą czasową T_1 – nagrzewania grzałki, ale różną stałą czasową nagrzewania kompozytu – T_2 . Obiekty te zostały dodatkowo tak zmodyfikowane aby wartości ich stałych czasowych T_2 zmieniały się zależnie czy obiekt jest w trakcie grzania, czy chłodzenia. Przy czym dla obiektu modelującego temperaturę w środku przetwornika zmiana ta następuje po zakończeniu narastania temperatury, natomiast dla obiektu symulującego uśrednioną temperaturę kompozytu zmiana ta następuje w momencie wyłączenia zasilania grzałki.

Ogólny model przetwornika jest przedstawiony na rysunku 62. Natomiast model symulujący część obiektu dwuinercyjnego o zmiennej stałej czasowej T_2 , przedstawiono na rysunku 61.

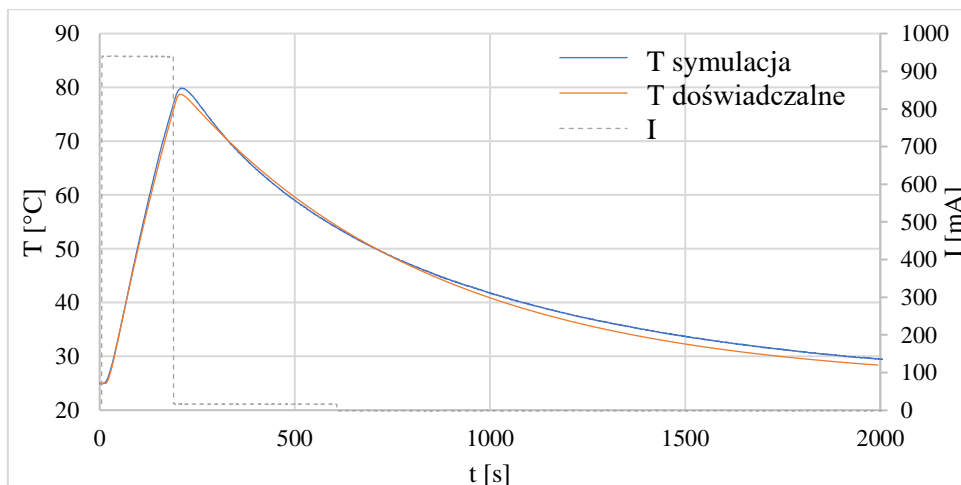


Rysunek 61. Fragment członu dwuinercyjnego o zmiennej stałej czasowej T_2

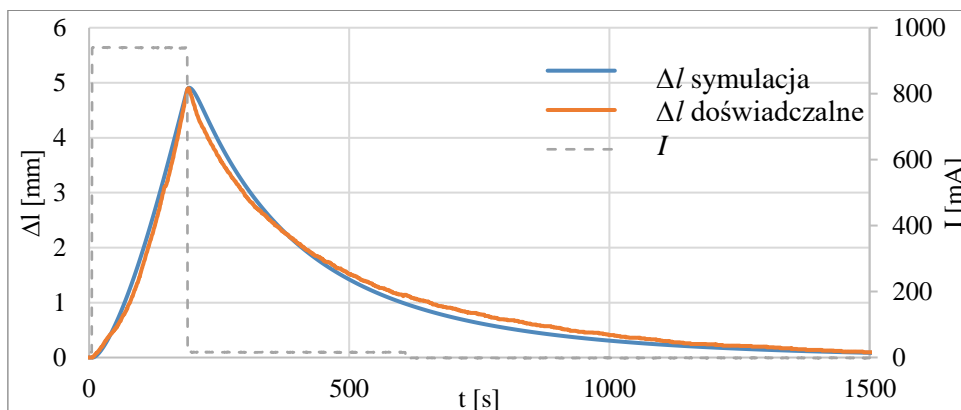


Rysunek 62. Model przetwornika

Rysunek 63 przedstawia zmiany temperatury wewnątrz mieszka s zasymulowane oraz zmierzone. Rysunek 64 przedstawia natomiast zmierzone oraz zasymulowane zmiany wydłużenia



Rysunek 63. Temperatura w środku aktuatora zmierzona eksperymentalnie i modelowana

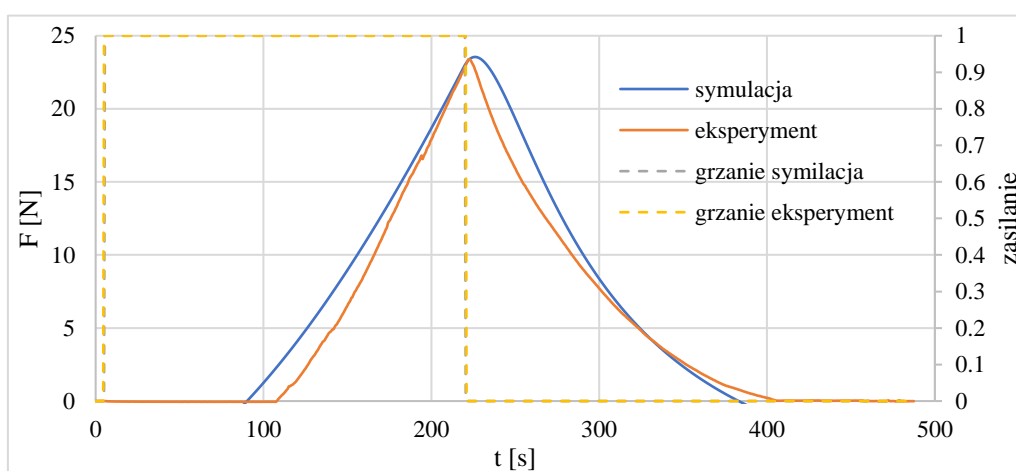


Rysunek 64. Wydłużenie przetwornika w czasie jako odpowiedź na prąd nagrzewania zmierzone eksperymentalnie i modelowane

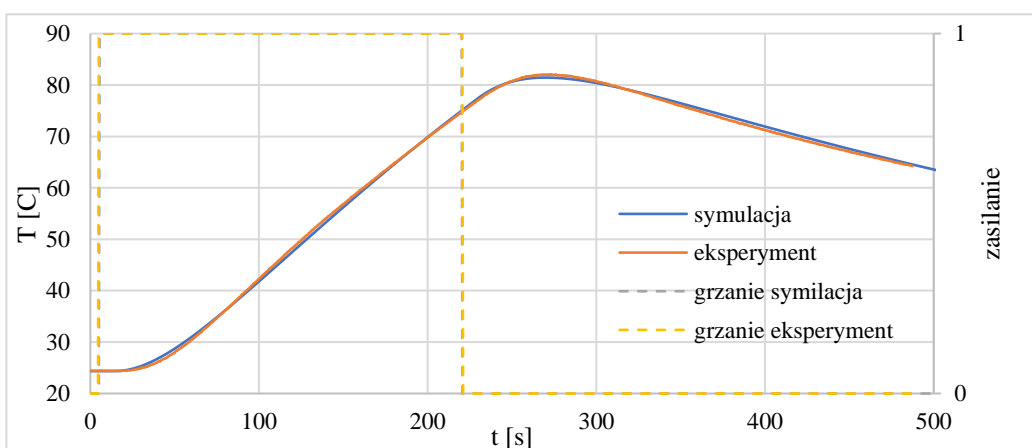
Siła blokująca przemieszczenie przetwornika mieszkowego może zostać obliczona po modyfikacji równania 21 po uwzględnieniu siły sprężystości generowanej przez odkształcający się mieszek. Przekształcona zależność jest przedstawiona przez równanie 14.

$$F = [3\kappa_e \alpha_e \Delta T - (\kappa_e + \frac{4}{3}\mu_e + \frac{\kappa l_0}{A}) \varepsilon] \cdot A \quad (14)$$

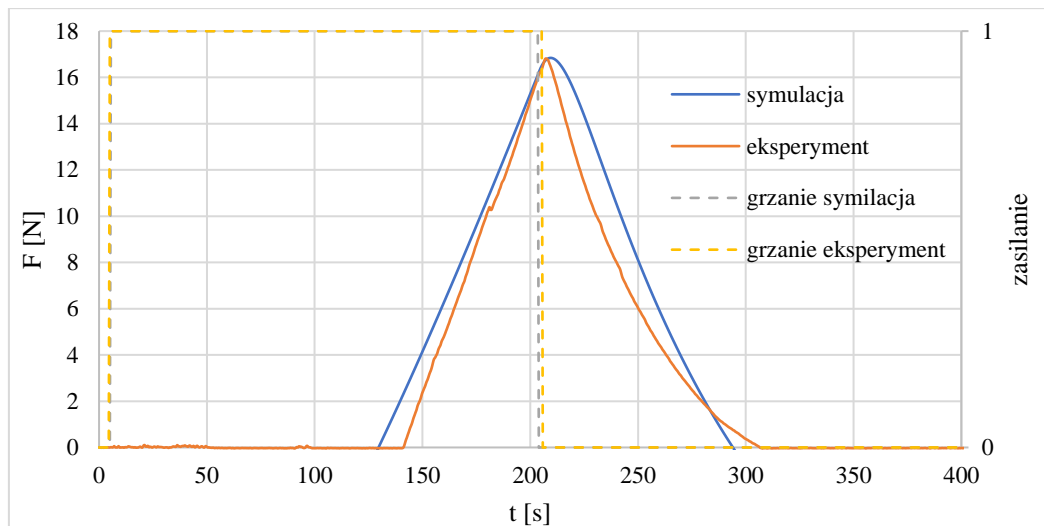
Po zaimplementowaniu powyższego równania do symulacji można przewidzieć siłę blokującą. Zmierzone wartości siły blokującej dla różnych przemieszczeń oraz temperaturę wewnątrz przetwornika mieszkowego s oraz wartości symulowane przedstawiają rysunki 65-68.



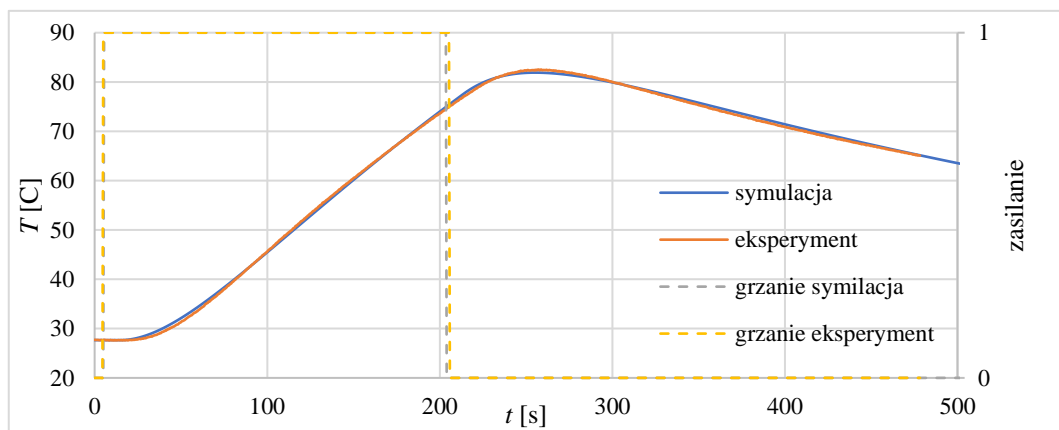
Rysunek 65. Siła blokująca dla przemieszczenia 1 mm zmierzona i symulowana dla przetwornika mieszkowego s



Rysunek 66. Temperatura wewnątrz przetwornika mieszkowego s przy zablokowaniu ruchu dla przemieszczenia 1 mm.



Rysunek 67. Siła blokująca dla przemieszczenia 2,5 mm zmierzona i symulowana dla przetwornika mieszkowego s



Rysunek 68. Temperatura wewnątrz przetwornika mieszkowego s przy zablokowaniu ruchu dla przemieszczenia 2,5 mm.

Zbudowany model dobrze odwzorowuje temperaturę wewnątrz przetwornika w symulowanych warunkach. W przypadku symulowanych sił uzyskane wartości maksymalne są zbliżone do tych zmierzonych eksperymentalnie, jednakże istnieją różnice między przebiegami symulowanymi i zmierzonymi doświadczalnie szczególnie w okolicach wyłączenia zasilania. Wynika to najprawdopodobniej z skomplikowanego w tych momentach rozkładu temperatury wewnątrz przetwornika, czego nie uwzględniła zbudowany model. Niemniej zaproponowany model pozwala w przybliżeniu symulować pracę przetwornika.

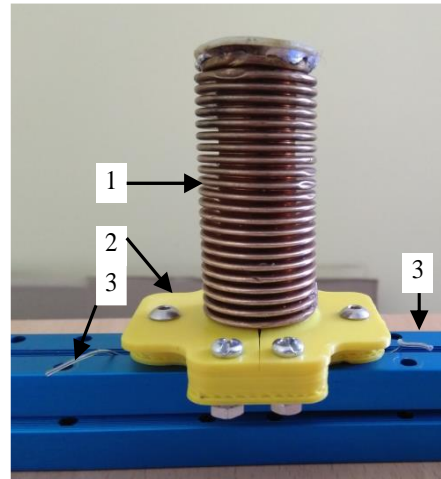
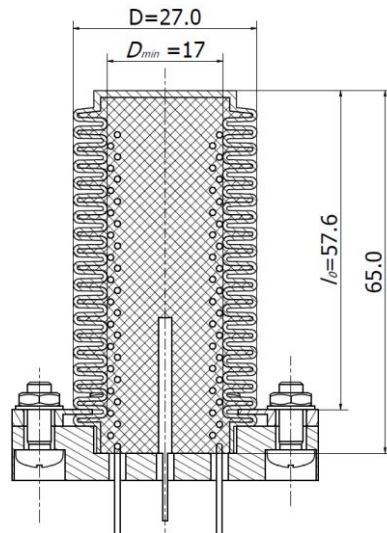
5. Badania sterowania w układzie zamkniętym

Działanie kompozytu silikon-etanol wykorzystuje zjawisko przemiany fazowej etanolu ciec-z-gaz, na skutek której z ciekłych kropeł etanolu zamkniętych w pęcherzykach rozproszonych w całej przestrzeni materiału, powstają pary etanolu. W skutku tego następuje wzrost ciśnienia wewnątrz pęcherzyków, które powoduje wzrost sił nacisku i wzrost naprężenia wewnętrznego podatnej osnowy kompozytu tj. silikonu. W rezultacie czego, kompozyt zwiększa siłę działającą na jego otoczenie. Jest to czynnikiem powodującym zmianę objętości kompozytu. Proces ten zależy od zmiany temperatury, ta natomiast zależy od ilości ciepła dostarczanego podczas grzania, ale także od ilości ciepła oddawanego do otoczenia, a więc od zmiennych warunków zewnętrznych. Sama temperatura początkowa kompozytu wpływa też na działanie przetwornika, głównie na zakres zadziałania, czyli na generowaną siłę i wykonywane przesunięcie. W przypadku niższych temperatur, tzn. poniżej 20°C, materiał musi się najpierw nagrzać, by zaszła przemiana ciec-z-gaz. Ponadto, sam rozkład temperatury w kompozycie nie jest równomierny, na skutek tego, że w jego środkowej części znajduje się gorąca grzałka, a jego zewnętrzna część styka się z obudową i tym samym z otoczeniem, które odbiera ciepło, prowadząc do spadku temperatury kompozytu. Z tych powodów, sterowanie napędem na bazie kompozytu silikon-etanol, w pętli otwartej byłoby silnie podatne na zakłócenia związane ze zmiennymi warunkami otoczenia. Dlatego też zdecydowano się opracować napęd pracujący ze sprzężeniem zwrotnym.

5.1. Badanie pozycjonowania liniowego napędu na bazie kompozytu silikon-etanol

Jednym z celów niniejszej pracy jest sprawdzenie dokładności pozycjonowania napędu zbudowanego na bazie kompozytu silikon-etanol. W związku z tym zbudowano napęd działający w pętli zamkniętej. Ze względu na większą trwałość przetwornika mieszkowego w porównaniu do tłokowego, zdecydowano się na wykorzystanie tego pierwszego w opracowanym serwonapędzie. Dodatkową zaletą takiego przetwornika jest brak tarcia kompozytu o ścianki tulei, będącej obudową zewnętrzną.

Rysunek z wymiarami zbudowanego zastosowanego przetwornika mieszkowego, przedstawiono na rysunku 69.

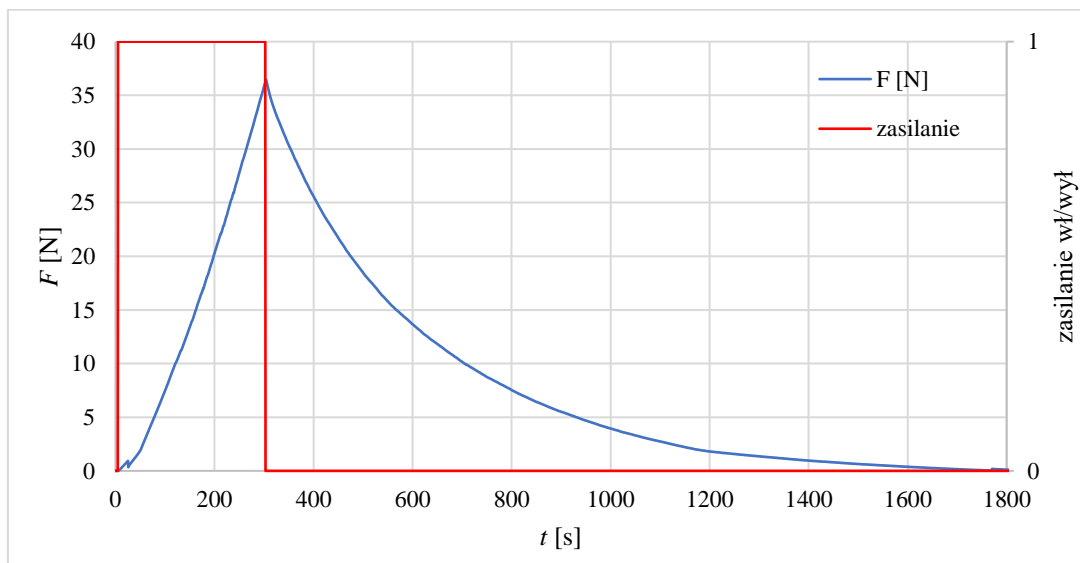


(a)

(b)

Rysunek 69. Zastosowany przetwornik mieszkowy w napędzie: a) rysunek CAD z wymiarami, b) zdjęcie (1 – mieszek, 2 – mocowanie mieszka, 3 – wyjście grzałki.)

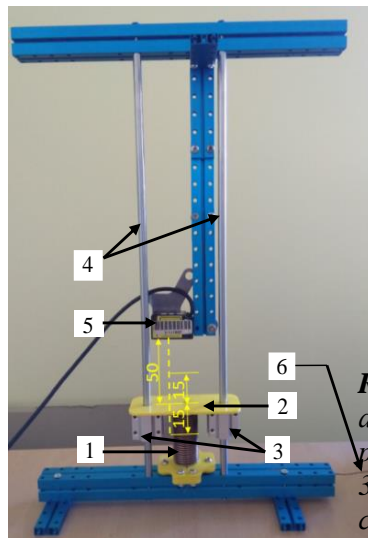
Zbudowany przetwornik został poddany badaniu generowanej siły podczas nagrzewania do 75°C, a następnie swobodnego chłodzenia. Otrzymany przebieg przedstawia rysunek 70. Badanie to potwierdziło, że zbudowany napęd będzie w stanie wygenerować siłę 75 N.



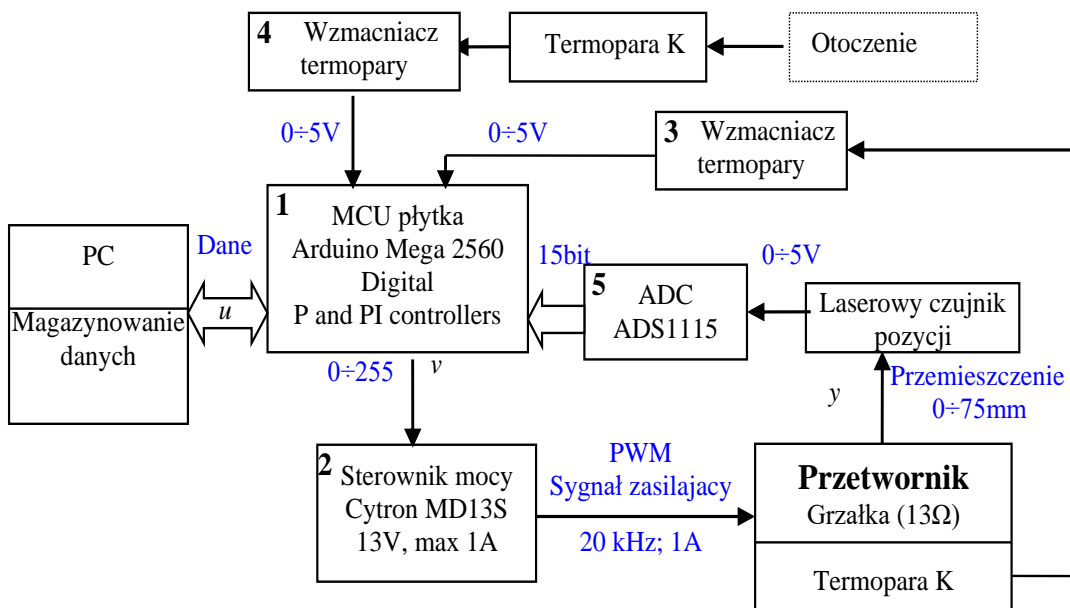
Rysunek 70. Wartość generowanej siły przez zastosowany przetwornik mieszkowy podczas nagrzewania do 75°C i chłodzenia.

Zbudowano napęd liniowy przedstawiony na rysunku 71, w którym przetwornik mieszkowy oparty na kompozycie silikon-etanol poruszał platformą zamontowaną na dwóch pionowych prowadnicach. Jako źródło sygnału sprzężenia zwrotnego położenia, posłużył laserowy czujnik odległości. W trakcie badań zastosowano dwa typy czujnika laserowego Panasonic HG-C1200 oraz Panasonic HG-C1050. Pierwszy z nich posiadał

zakres pomiarowy ± 80 mm, dokładność 0,2mm i zasięg równy 200 mm. Drugi czujnik charakteryzował się zakresem pomiarowym ± 50 mm, zasięgiem równym 50mm oraz dokładnością 0,03 mm. Do pomiaru temperatur: wewnątrz kompozytu oraz otoczenia zastosowano dwie termopary. Do sterowania mocą, tj. natężeniem prądu podawanego do grzałki zastosowano sterownik mocy PWM, a do sterowania całością napędu zastosowano płytke z mikrokontrolerem Arduino Mega 2560, która przesyłała także dane pomiarowe do komputera. Schemat blokowy układu kontrolno-pomiarowego przedstawiono na rysunku 72.

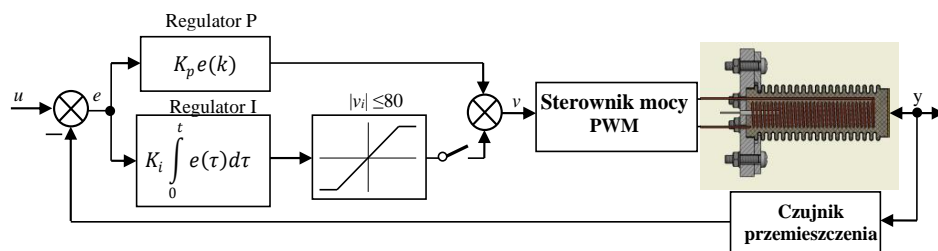


Rysunek 71. Zbudowane stanowisko badawcze: a) Stanowisko badawcze z napędem liniowym 1- przetwornik mieszkowy, 2-przesuwana platforma, 3-łożyska liniowe, 4-prowadnice liniowe, 5- czujnik odległości, 6-przewód termopary,



Rysunek 72. Schemat blokowy systemu pomiarowo-kontrolnego

Jako regulator położenia stosowano regulator typu P oraz PI, z wyłączalnym członem całkującym. Wyłączanie tego członu następowało w przypadku zbliżenia się elementu ruchomego napędu do wartości uchybu mniejszej niż 25 μm . W początkowych badaniach, regulacji podlegało tylko nagrzewanie kompozytu natomiast proces chłodzenia opierał się na transporcie ciepła z kompozytu do otoczenia. Schemat napędu z regulatorem PI przedstawiono na rysunku 73. W układzie regulacji zastosowano również ograniczenie sygnału wychodzącego z członu I. Jego zastosowanie było konieczne ze względu na występowania zjawiska tzw. „wind-up” regulatora I, które jest powodowane dużymi stałymi czasowymi obiektu sterowania, czyli przetwornika silikon-etanol.

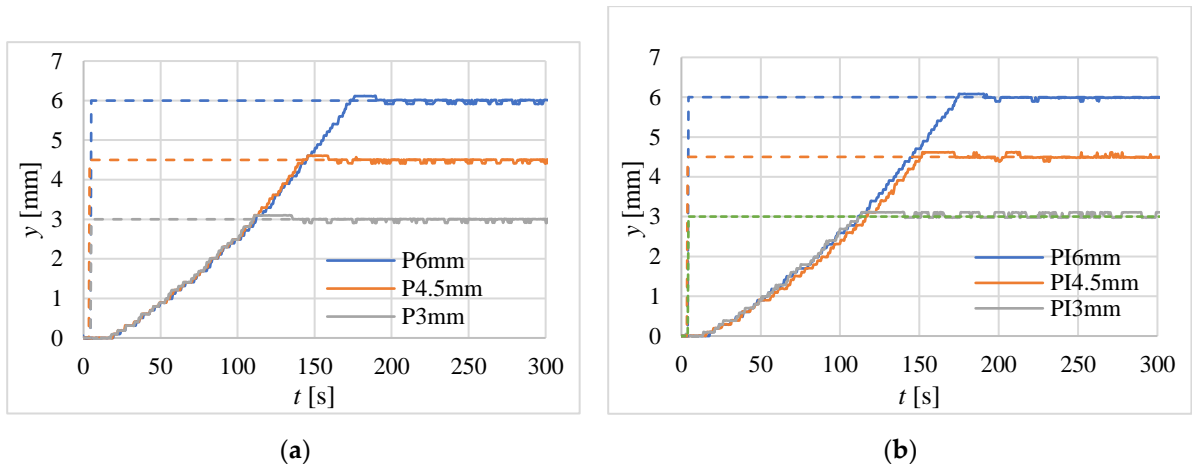


Rysunek 73. Schemat napędu z kompozytem silikon-etanol pracującego w pętli zamkniętej z regulatorem PI

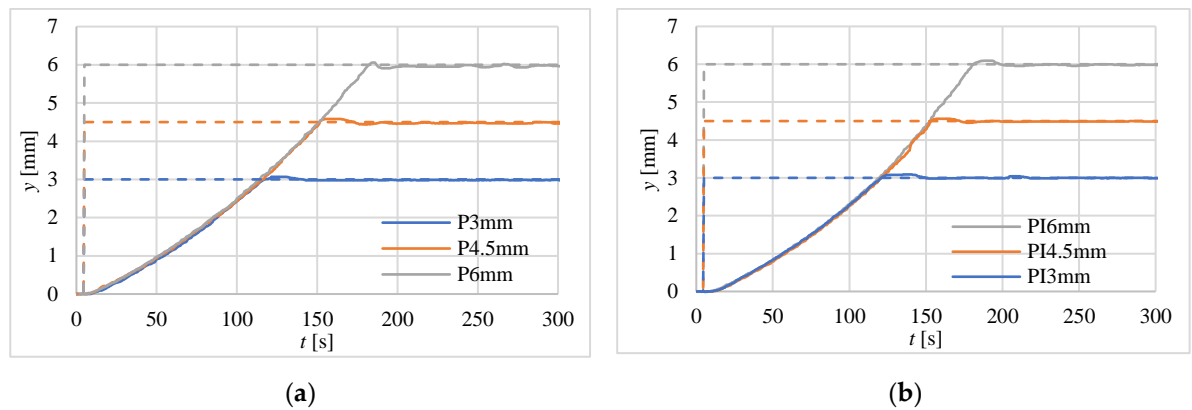
W pierwszych badaniach zbadano odpowiedź napędu na skokowo zadane przemieszczenie. Zbadano działanie przy zastosowaniu regulatorów P oraz PI oraz z zastosowaniem dwóch różnych czujników położenia o różnej dokładności. Zastosowane parametry regulatorów zaprezentowano w tabeli 7 natomiast krzywe odpowiedzi skokowych napędu przedstawiono na rysunkach 74 oraz 75. Wartości błędu ustalonego położenia po czasie 225 sekund od wystawiania sygnału zadanego, dla dwóch zastosowanych czujników położenia i dwóch regulatorów zebrano w tabeli 8. Najlepszą dokładność pozycjonowania uzyskano przy zastosowaniu regulatora PI oraz czujnika HG-1050. Dla odległości 6 mm wynosiła ona 45 μm . Dokładność pozycjonowania przy zastosowaniu czujnika HG-1200 i regulatora PI dla odległości 6 mm wynosiła 114 μm .

Tablica 7. Parametry regulatora P i PI, dobrane dla odpowiedzi na sygnał 10 V, jak dla obiektu astatycznego

Regulator	Parametr	wartość
P	K_p	2.32
	K_i	0.009
PI	K_p	2.09
	K_i	0.009

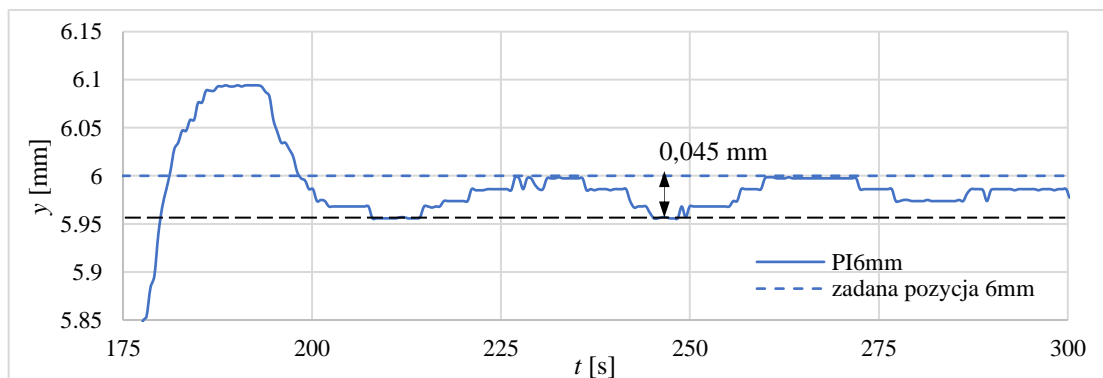


Rysunek 74. Odpowiedzi skokowe napędu, ustawionego dla pozycji pionowej z czujnikiem położenia HG-C1200 (oznaczenie: P3mm – odpowiedź na sygnał wymuszenia 3 mm, zastosowany regulator typu P).



Rysunek 75. Odpowiedzi skokowe w pozycji pionowej napędu z czujnikiem HG-C1050

Rysunek 76 przedstawia powiększony fragment pozycjonowania przy zadanej odległości 6 mm

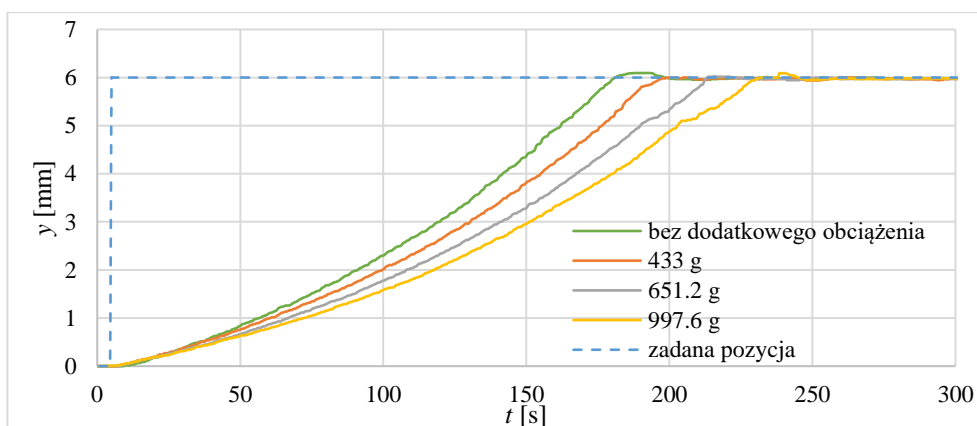


Rysunek 76. Powiększony fragment pozycjonowania na zadanej odległości 6mm dla regulatora PI

Tablica 8. Maksymalne błędy pozycji po 225 sek.

Czujnik	Skok [mm]	Regulator	błąd [μm]
HG-C1200	3	P	96
		PI	108
	4,5	P	90
		PI	120
	6	P	90
		PI	114
HG-1050	3	P	25
		PI	42
	4,5	P	38
		PI	18
	6	P	68
		PI	45

Dodatkowo poddano badaniu napęd badaniu, w którym wykonywał pozycjonowanie z obciążeniem. W tym celu na platformie umieszczano dodatkowe ciężarki, a następnie zadawano skokowo przemieszczenie o 6 mm. Wyniki tych badań przedstawiono na rysunku 77 oraz zebrano w tablicy 9. W przypadku badanych obciążeń dokładność pozycjonowania była porównywalna, wydłużał się tylko czas dojścia do zadanej pozycji.

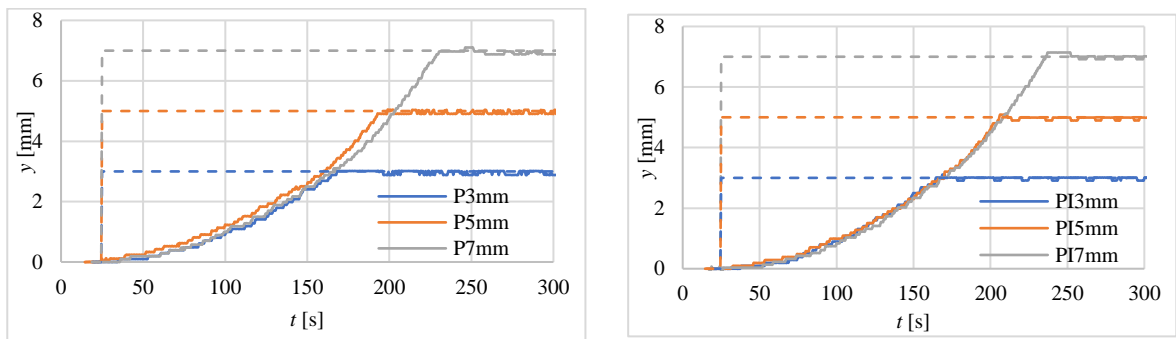


Rysunek 77. Odpowiedzi skokowe w pozycji pionowej napędu z czujnikiem HG-C1050 z dodatkową masą jako obciążeniem

Tablica 9. Błędy pozycji napędu z regulatorem PI przy zadanej pozycji 6 mm z dodatkową masą

Dodatkowa masa	błąd [μm]
Bez dodatkowej masy	44
433 g	60
651,2 g	45
997,6 g	44

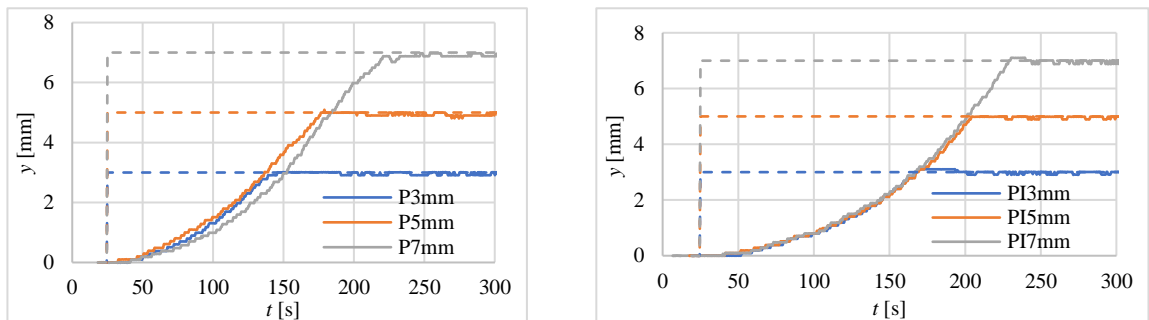
W dalszej części, aby sprawdzić czy wpływ grawitacji będzie istotny dla dokładności pozycjonowania napędu postanowiono zbadać odpowiedź napędu w przypadku ustawienia go w poziomie. Krzywe odpowiedzi skokowych dla wariantów z regulatorem P i PI pokazano na rysunkach 78 i 79. W tabeli 9 zebrano wartości błędu dla czasu powyżej 250 sekund od podania sygnału na wejściu serwonapędu. Wartości te są zbliżone do tych uzyskanych dla napędu pracującego w pozycji pionowej z takim samym czujnikiem odległości. Ponadto na rysunku 80 przedstawiono przebieg odpowiedzi skokowej dla napędu z regulatorem PI w pozycji pionowej i poziomej oraz zmiany temperatury rejestrowane wewnątrz przetwornika. W 650 sekundzie od zadania pozycji zasilanie grzałki było wyłączane, oraz włączany był wentylator o prędkości obrotowej 2015 obr/min. Wentylator został zastosowany aby skrócić czas chłodzenia.



(a)

(b)

Rysunek 77. Odpowiedź skokowa napędu z czujnikiem HG-C1200 w pozycji poziomej: a) dla regulatora P, b) dla regulatorów PI



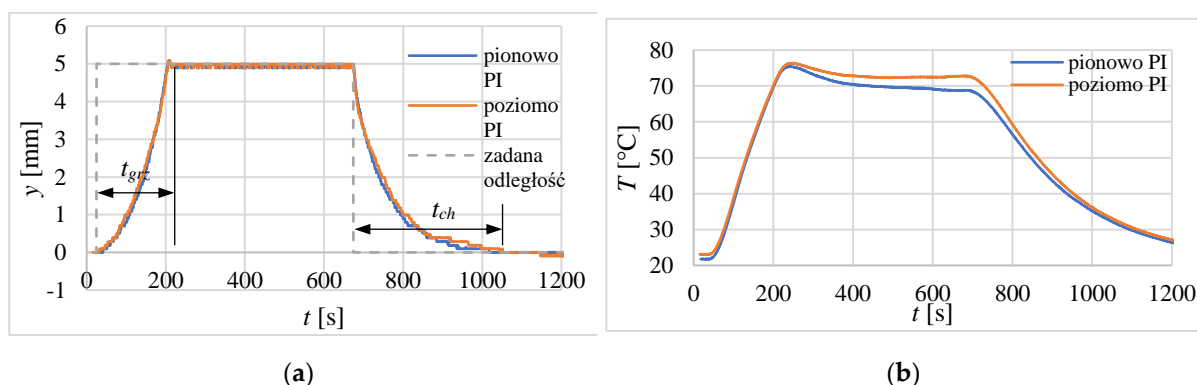
(a)

(b)

Rysunek 79. Odpowiedź skokowa dla pozycji pionowej z czujnikiem HG-C1200

Tablica 9. Dokładność w pozycji poziomej i pionowej

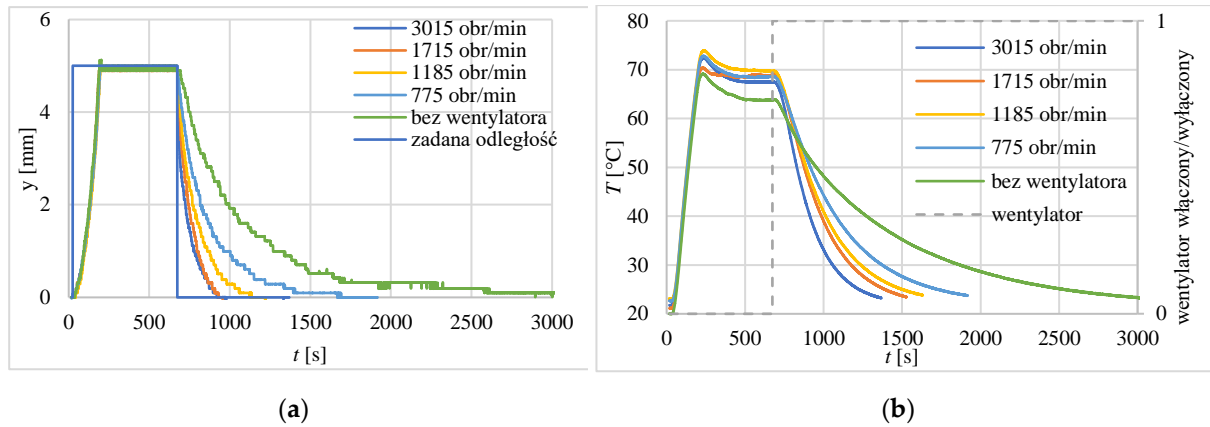
Regulator	Skok [mm]	Maksymalny błąd [μm] w pozycji poziomej	Maksymalny błąd [μm] w pozycji pionowej
P	3	120	96
PI	3	108	96
P	5	98	200
PI	5	110	110
P	7	220	124
PI	7	140	124



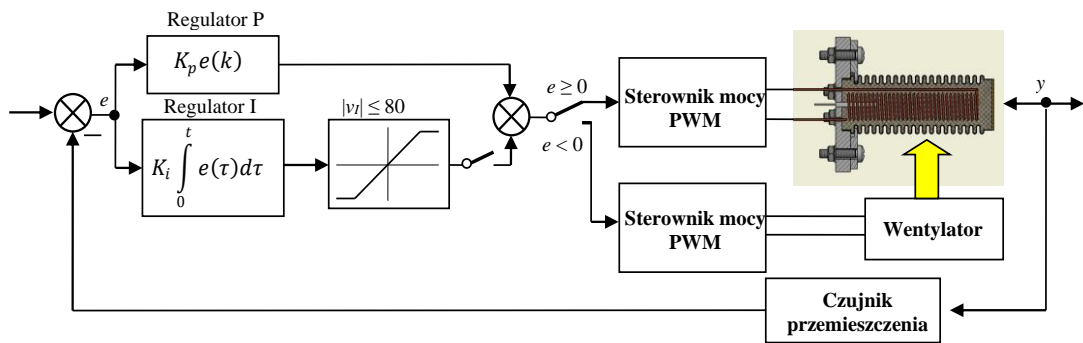
Rysunek 80. Zestawienie przykładowej odpowiedzi dla skokowo zadanej odległości 5 mm dla napędu z regulatorem PI ustawionego w orientacji pionowej i poziomej a) zarejestrowane zmiany odległości b) zarejestrowana temperatura wewnątrz przetwornika

Jak widać na rysunku 80, czas nagrzewania (t_{grz}) wynosił ok. 220 sek. a czas chłodzenia (t_{ch}) wynosił ok. 350 sek. W związku z tym, w dalszej części badań postanowiono zbadać możliwość przyspieszenia pracy napędu poprzez przyspieszenie transportu ciepła w trakcie chłodzenia przez wymuszony wentylatorem przepływ powietrza. Napędowi zadawana była do osiągnięcia odległość 5 mm a następnie po ustabilizowaniu się na tej pozycji wyłączane było nagrzewanie a włączany był wentylator, obracający się ze zmienianą prędkością. Na rysunku 81 zaprezentowano przebiegi zmian położenia i temperatury w czasie bez i z zastosowaniem wentylatora chłodzącego. Przepływ powietrza wymuszony pracą wentylatora, skutkowało szybszym powrotem elementu wykonawczego napędu do położenia początkowego. Na rysunku 73b widać także że wynikało to z szybszego chłodzenia kompozytu, będącego wynikiem lepszego odbierania ciepła przez powietrze będące w ruchu. Ponieważ zastosowanie wentylatora umożliwiało bardziej dynamiczny ruch napędu w trakcie chłodzenia, to w następnym kroku dodano do układu sterowania napędem także możliwość sterowania intensywnością chłodzenia wentylatora, poprzez zmiany prędkości obrotowe wentylatora. Schemat blokowy układu sterującego pokazano na rysunku 82. W układzie zastosowano

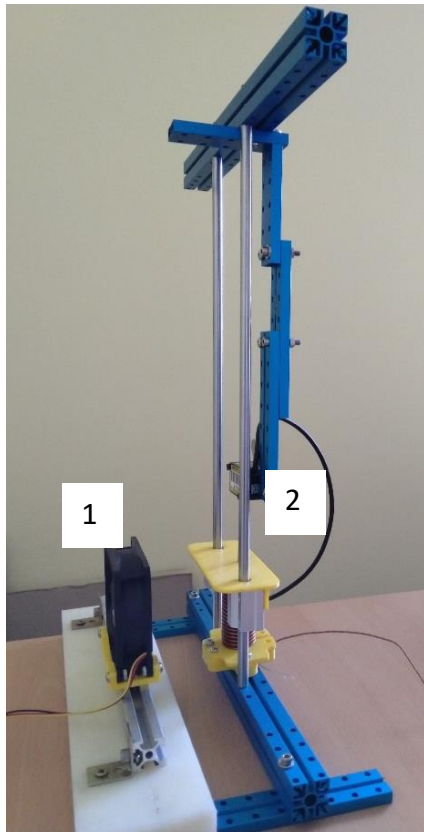
przełącznik, który zmieniał obiekt sterowania na grzałkę albo wentylator. Na rysunku 83 przedstawiono zdjęcie zmodyfikowanego stanowiska do badań.



Rysunek 81. Wpływ zastosowania wentylatora na zachowanie napędu podczas chłodzenia: a) wpływ na szybkość powrotu z zadanej odległości 5 mm, b) wpływ na szybkość spadku temperatury wewnątrz przetwornika



Rysunek 82. Schemat układu z wspomaganie chłodzenia w postaci wentylatora z regulatorem PI



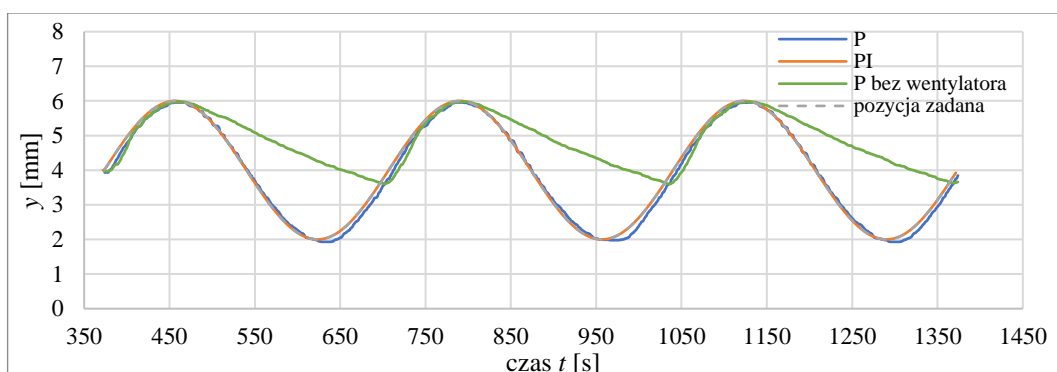
Rysunek 83. Stanowisko zmodyfikowane o dodanie wentylatora 1- wentylator, 2- stanowisko z przetwornikiem

Zmodyfikowany, czyli chłodzony napęd poddano badaniom dotyczącym możliwości jego nadążania za sygnałem sinusoidalnie zmiennym. Zbadano napęd zarówno z kontrolerem P jak i PI. Badania te wykazały, że dla małych częstotliwości tzn. 0,03 Hz napęd z układem chłodzenia w postaci wentylatora był w stanie podążać za sinusoidalnym sygnałem zadanym, natomiast bez tego wspomaganie, przemieszczenie napędu w trakcie chłodzenia znacznie odbiegało od sygnału zadanego. Występujący w tym cyklu pracy, duży błąd regulacji oznacza, że praktyczne zastosowanie takiego układu nie jest możliwe. Można to zaobserwować na rysunku 84. Zwiększanie częstotliwości do 0,01 Hz powodowało, że następowało znaczne zmniejszenie amplitudy i deformacja kształtu sinusoidy, co można zaobserwować na rysunkach 84-86. W celu porównania otrzymanych rezultatów (przebiegów) zastosowano dwa wskaźniki. Różniczkę błędu bezwzględnego (ang. root mean square error - RMSE) obliczono zgodnie ze wzorem:

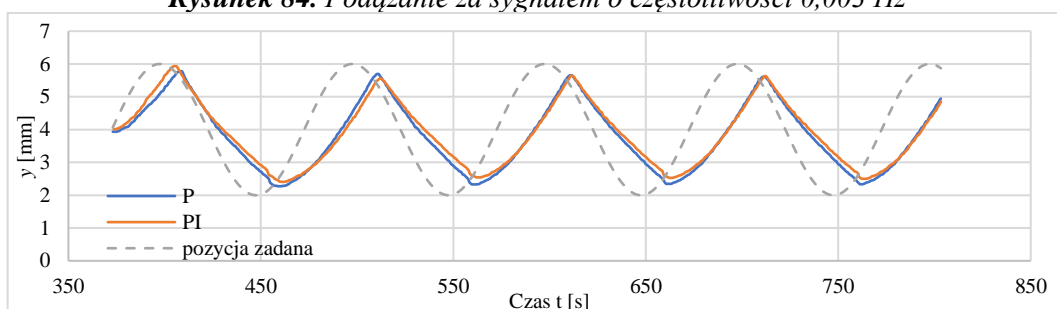
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_{ref}(i) - y(i)|^2} \quad (15)$$

Całkę z modułu uchybu regulacji (integrated absolute value of error - IAE) wyznaczono stosując wzór:

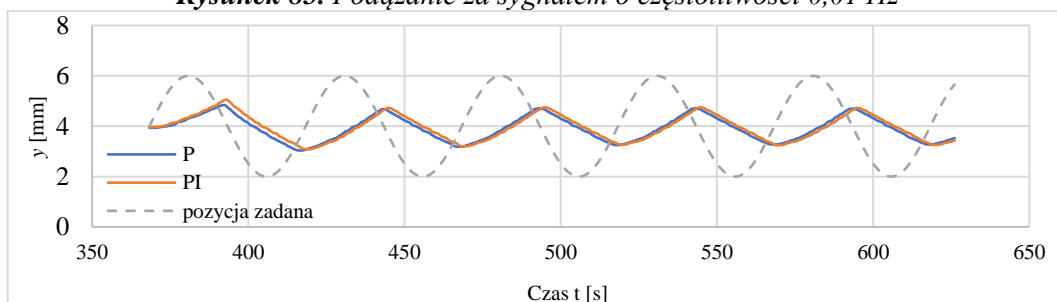
$$IAE = \int_{t=0}^{t=T} |y_{ref}(i) - y(i)| dt \quad (16)$$



Rysunek 84. Podążanie za sygnałem o częstotliwości 0,003 Hz



Rysunek 85. Podążanie za sygnałem o częstotliwości 0,01 Hz



Rysunek 86. Podążanie za sygnałem o częstotliwości 0,02 Hz

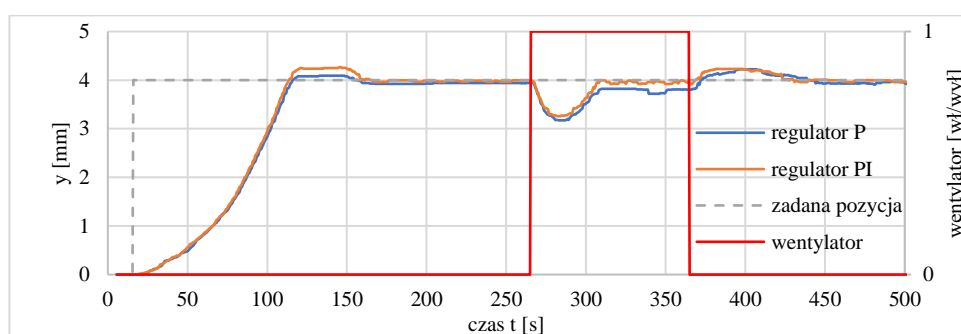
W tabeli 10 pokazano wskaźniki regulacji dla trzech częstotliwości, przy zastosowaniu regulatorów P oraz PI. W obszarze częstotliwości, dla których napęd mógł podążać za sygnałem zadaniem lepsze wyniki osiągał regulator PI.

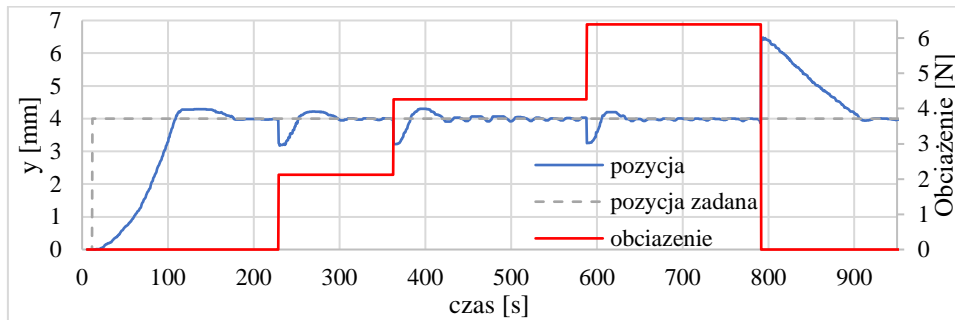
Tablica 10. Ocena jakości kontroli regulacji.

Częstotliwość [Hz]	Regulator	Maksymalny Uchyb Absolutny [mm]	Całka z modułu uchybu [mm]	Średni Błąd Kwadratowy [mm]
0.002	P	0.26	112.74	0.10
	PI	0.31	54.92	0.05
0.003	P	0.29	100.88	0.13
	PI	0.23	55.52	0.07
0.004	P	0.85	201.76	0.36
	PI	0.90	84.57	0.17

Dodatkowo postanowiono zbadać reakcję napędu na gwałtowną zmianę warunków zewnętrznych, w których pracuje napęd. Badano reakcję na zmianę czynników wpływających na proces odbierania ciepła, oraz na skokową zmianę obciążenia. W pierwszym przypadku zadawano napędowi osiągnięcie pozycji 4 mm, a po jego ustabilizowaniu się na tej pozycji, włączano wentylator a następnie po 100 sekundach wyłączano go. Na rysunku 87 pokazano, że po zmianie warunków odbioru ciepła polegającej na włączeniu wentylatora chłodzącego, przetwornik zastosowany w serwonapędzie z regulatorem P i PI, powracał do zadanej pozycji z błędem ok. $0,1 \div 0,2$ mm po ok. 80 sek., przy czym mniejszy uchyb występował dla regulatora PI. Po wyłączenia wentylatora można zaobserwować niewielkie przeregulowanie ($0,2 \div 0,3$ mm), po którym przetwornik powracał do pozycji zadanej po ok. 80 sek.

Badanie wpływu zmiany obciążenia polegało na zadaniu napędowi położenia równego 4 mm a następnie po ustabilizowaniu się jego pozycji, na dokładaniu kolejno na ruchomej platformie napędu, do trzech ciężarków o znanej masie. Po dołożeniu ostatniego ciężarka i ustabilizowaniu się pozycji, wszystkie ciężarki były zdejmowane. Na rysunku 88 przedstawiono zmiany położenia przetwornika zastosowanego w serwonapędzie w trakcie utrzymywania zadanej pozycji. W układzie zastosowano regulator typu PI. W badanym zakresie obciążeń dochodzących do 6,5 N po początkowych przeregulowaniach trwających ok. 80 sek, przetwornik serwonapędu powracał do pozycji zadanej.

**Rysunek 87.** Wpływ zakłóceń w postaci zmiany warunków odprowadzania ciepła

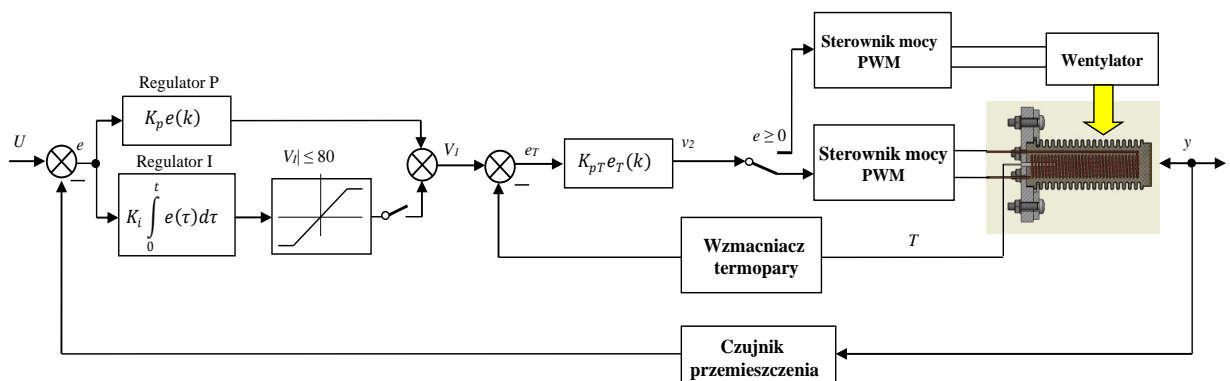


Rysunek 88. Zmiana obciążenia napędu z przetwornikiem mieszkowym utrzymującego zadaną pozycję

W celu dalszej poprawy działania napędu, zmodyfikowano układ regulacji dodając wewnętrzną pętlę sprzężenia zwrotnego. W której zastosowano regulację temperatury kompozytu. Do jej pomiaru wykorzystano sygnał z termopary, przetworzonego przez wzmacniacz. W ten sposób utworzono regulator kaskadowy. Jego parametry przedstawiono w tabelicy 11, a schemat ze zmodyfikowanym regulatorem, pokazano na rysunku 89. W badanym napędzie zastosowano przetwornik mieszkowy o wymiarach takich samych jak wcześniejszy z grzałką o rezystancji 9Ω .

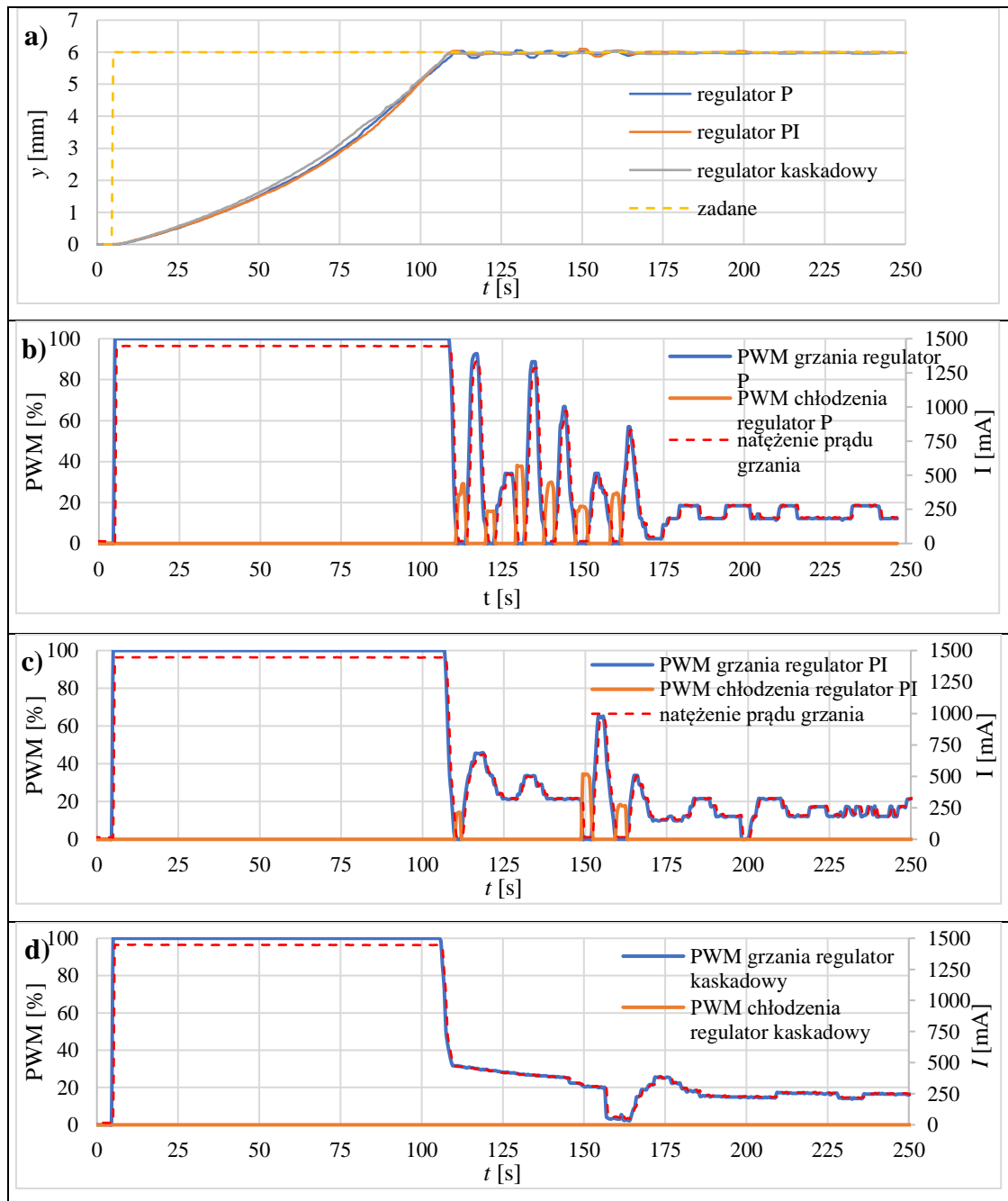
Tablica 11. Parametry regulatora kaskadowego

Parametr regulatora	wartość
K_p	0,282
K_i	0,004
K_{pT}	2,06

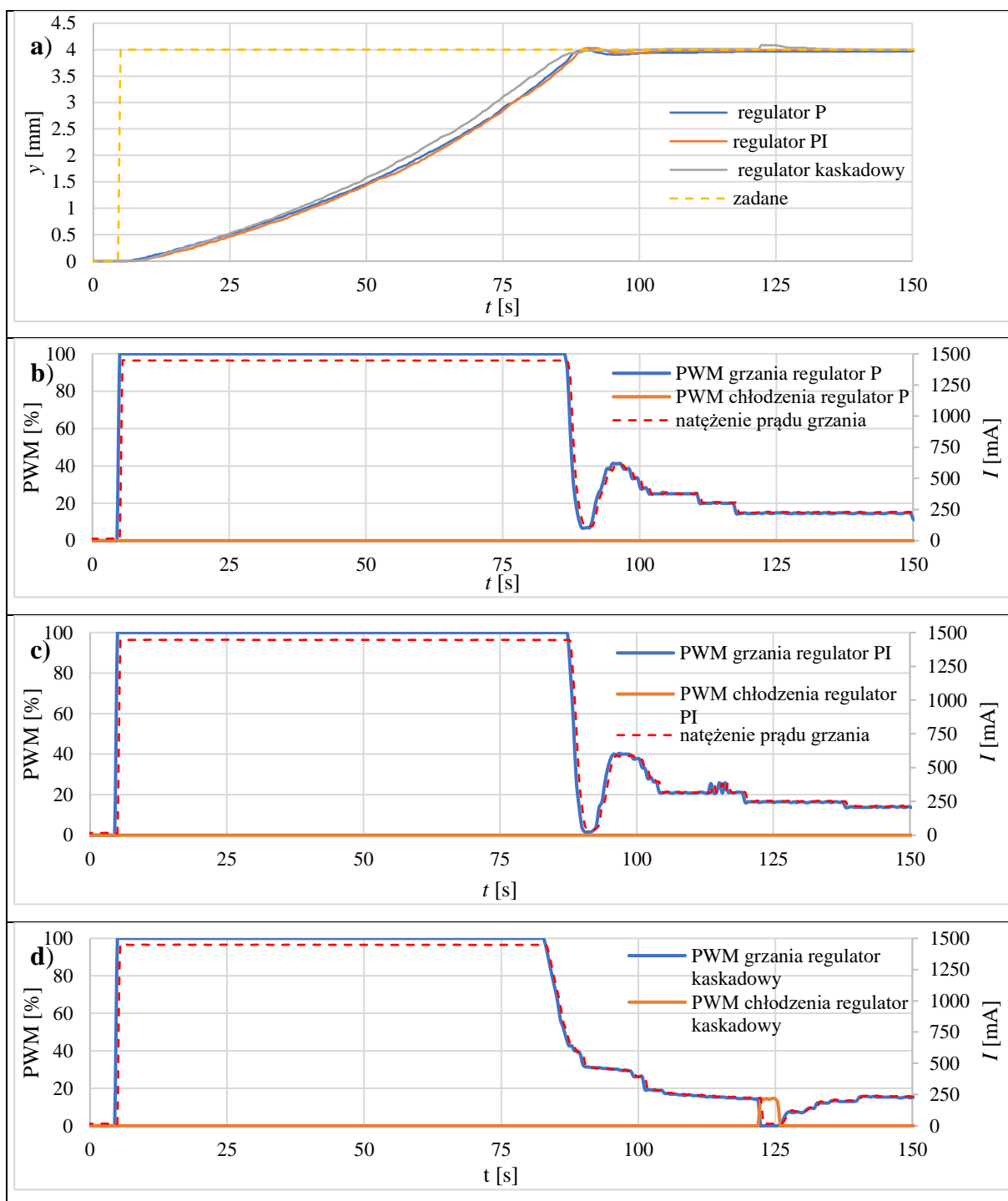


Rysunek 89. Schemat napędu z regulatorem z wewnętrzną pętlą regulacji temperatury

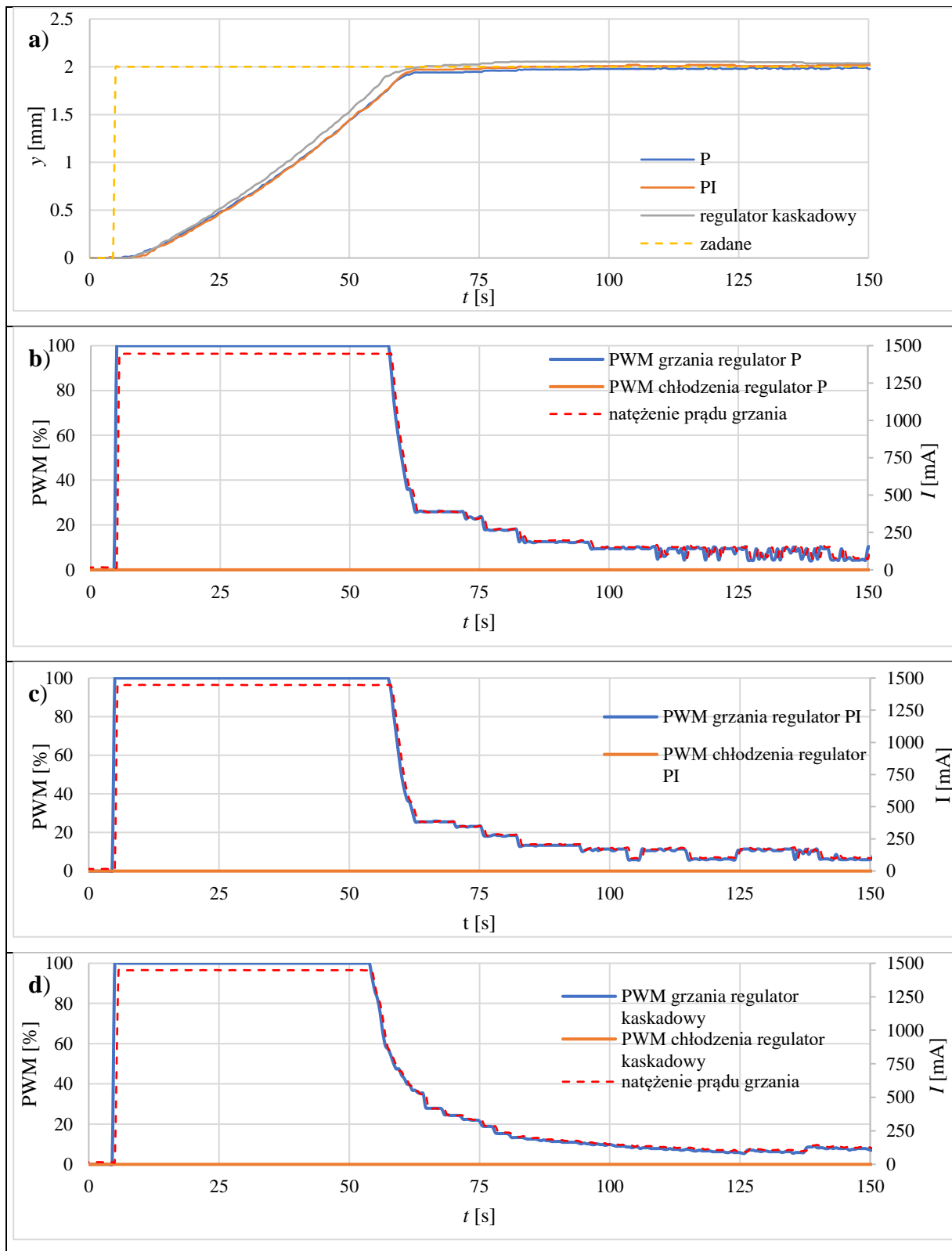
W tablicy 12 przedstawiono parametry porównujące parametry serwonapędu, uzyskane przy zastosowaniu poszczególnych regulatorów. Na rysunkach 90, 91 i 92 przedstawiono odpowiedzi napędu z różnymi regulatorami na zadane skokowo przemieszczenie równe 6 mm oraz zarejestrowane przebiegi sygnałów PWM sterujących mocą grzałki i prędkością obrotów wentylatora oraz przebiegi zmian natężenia prądu grzania. We wszystkich przypadkach zastosowano źródło zasilania o napięciu 13,5 V.



Rysunek 90. Odpowiedzi dla różnych regulatorów na zadane skokowo przemieszczenie o wartości 6 mm, a – pozycjonowanie przez poszczególne regulatory, wartości sygnałów PWM i prądu grzania dla regulatorów b - regulatora PI, c - regulatora P, d – regulatora kaskadowego



Rysunek 91. Odpowiedzi dla różnych regulatorów na zadane skokowo przemieszczenie o wartości 4 mm, a – pozycjonowanie przez poszczególne regulatory, wartości sygnałów PWM i prądu grzania dla regulatorów b - regulatora PI, c - regulatora P, d – regulatora kaskadowego



Rysunek 92. Odpowiedzi dla różnych regulatorów na zadane skokowo przemieszczenie o wartości 2 mm, a – pozycjonowanie przez poszczególne regulatory, wartości sygnałów PWM i prądu grzania dla regulatorów b - regulatora PI, c - regulatora P, d – regulatora kaskadowego

Tablica 12. Porównanie czasów osiągnięcia zadanej odległości poszczególnych regulatorów

regulator	Zadana odległość [mm]	Czas osiągnięcia 95% zadanej odległości [s]	Uchyb ustalony [μm]
P	2	60,5	24
	4	86,9	35
	6	107,4	36
PI	2	59,8	20
	4	87,5	13
	6	106,3	35
kaskadowy	2	57,5	55
	4	84,8	66
	6	106,1	55

W tablicy 12 zestawiono wyniki badania pozycjonowania napędu z skokowo zadany przemieszczeniem z zastosowaniem regulatorów P, PI oraz kaskadowego. Najniższe wartości ustalonego uchybu osiągnięto dla regulatora PI, ale były one dość zbliżone do osiągniętych przez regulator P. W przypadku regulatora kaskadowego osiągnięto nieco gorsze wartości.

Przy zdanych przemieszczeniach w przypadku regulatorów P i PI można zaobserwować bardziej skokowe zmniejszanie wartości sygnału PWM w pobliżu docelowego przemieszczenia, natomiast w przypadku regulatora kaskadowego zmniejszanie wartości sygnału PWM ma charakter bardziej płynny. Czasy dojścia do zadanej pozycji dla wszystkich regulatorów były na tyle zbliżone, że można uznać, że różnice były bardziej spowodowane zmianami w warunkach otoczenia mających wpływ na odbieranie ciepła, oraz różnicami w początkowym stanie przetwornika głównie jego temperaturą początkową niż wpływem regulatora.

5.2. Badanie napędu z forsowaniem napięcia

Jedną z największych, stwierdzonych w toku badań, wad napędu zbudowanego na bazie kompozytu silikon-etanol jest jego szybkość działania a dokładniej czasy uzyskania i ustalenia. Długie czasy reakcji wynikają stąd, że przetworniki aktywowane są za pomocą ciepła, a procesy cieplne charakteryzują się stosunkowo długimi czasami reakcji. Niska przewodność cieplna

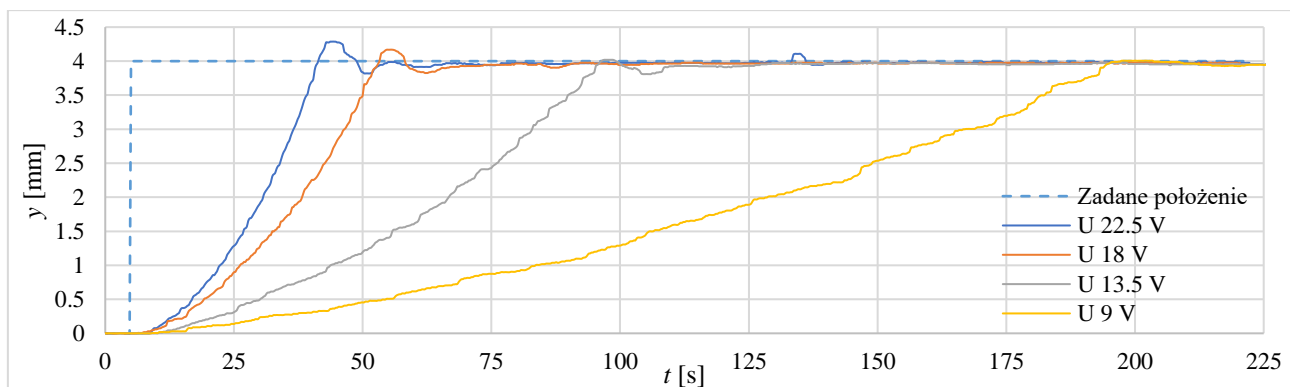
silikonu, ogranicza szybkość jego nagrzewania i chłodzenia, a w konsekwencji proces przemiany ciecż-gaz etanolu w całości materiału trwa wiele sekund.

Szybkość z chłodzenia może być poprawiona poprzez polepszenie warunków odbierania ciepła, na przykład poprzez dodanie do napędu dodatkowych wentylatorów, tak jak zostało to zrobione w opisanych wyżej badaniach. Dalsze zwiększenie szybkości chłodzenia wymagałoby zmian konstrukcji przetwornika poprzez dodanie dodatkowych radiatorów. Możliwe jest też zastosowanie ogniw Peltiera do szybkiego chłodzenia i równocześnie do odzysku ciepła, jednak to rozwiązanie komplikuje samą konstrukcję, zwiększa koszt i komplikację. Prostota konstrukcji zaproponowanego przetwornika jest jedną z jego zalet.

W przypadku szybkości przemieszczania podczas nagrzewania, można ją zwiększyć stosunkowo prosto poprzez zastosowanie większej mocy grzania, a tym samym dostarczeniu większej ilości ciepła niezbędnego do zajścia przemian fazowych będących siłą napędową przemieszczenia generowanego przez przetwornik. Aby zwiększyć szybkość nagrzewania można zwiększyć moc grzałki albo zwiększyć liczbę zastosowanych grzałek. Może to jednak doprowadzić go zbyt dużego nagrzania kompozytu i wzrostu temperatury do ponad 200°C, szczególnie w miejscach zamontowania grzałek, w których może dojść do uszkodzenia, tj. stopienia silikonu. Zmniejszenie czasu nagrzewania silikonu a tym samym czasu wydłużania przetwornika możliwe jest przez zastosowanie grzania indukcyjnego (wiroprądowego), co opisano w pracy [45]. Na rysunku 93 przedstawiono wykres odpowiedź napędu z regulatorem kaskadowym, zasilanego z różnymi napięciami na zadane skokowo przemieszczenie. W tabelicy 13. Zebrano czasy uzyskania (t_r ang. rise time) od sygnału początkowego do 100% zadanej odległości.

Tablica 13. Czasy uzyskania napędów z regulatorem kaskadowym z przetwornikiem o rezystancji grzałki równej 9 Ω , przy różnych napięciach zasilana

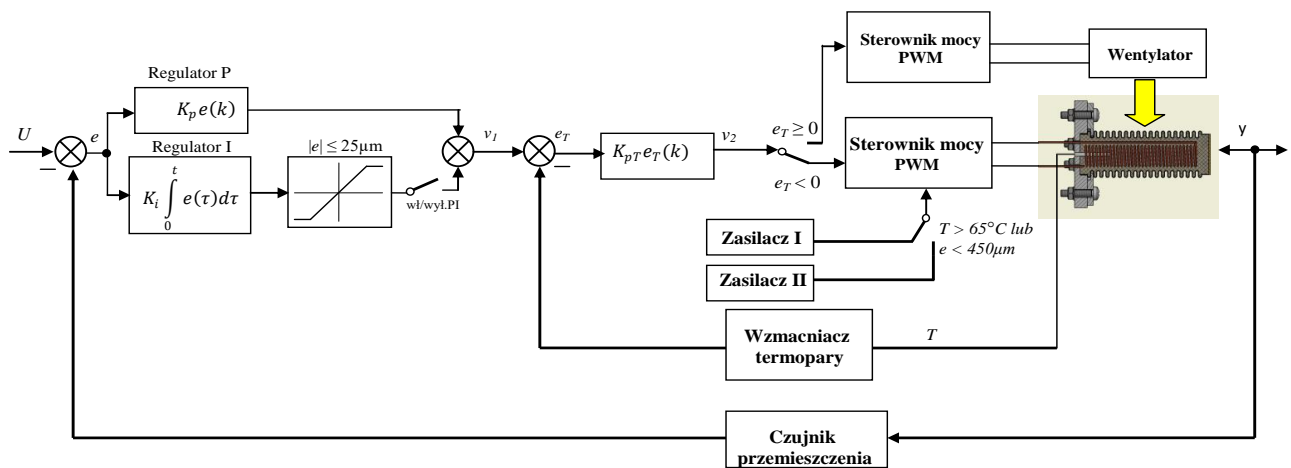
Napięcie zasilania [V]	Czas osiągnięcia zadanej odległości [s]
9	192,7
13,5	91,4
18	48,3
22,5	36,5



Rysunek 93. Wpływ napięcia zasilającego na szybkość napędu z regulatorem kaskadowym zbudowanego na przetworniku o rezystancji grzałki 9Ω .

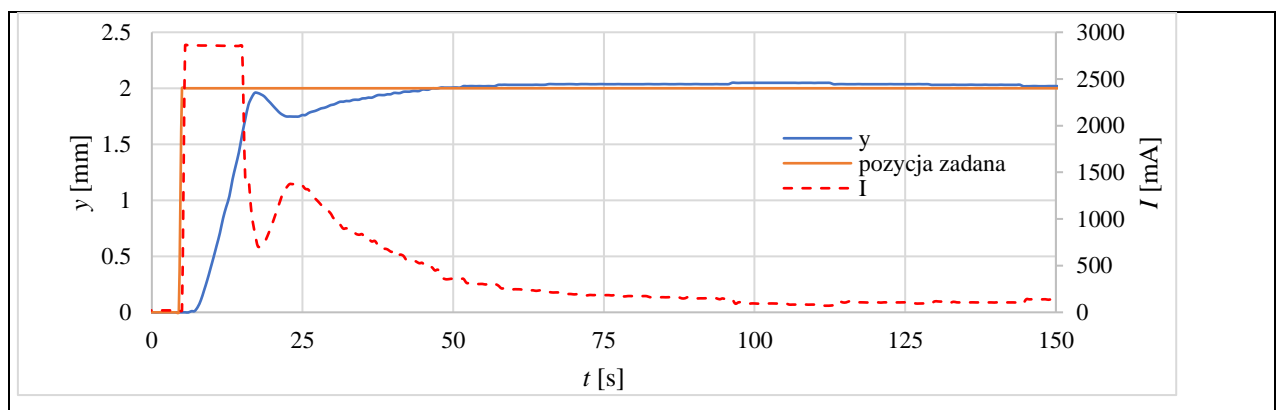
Zgodnie z oczekiwaniami zwiększenie wartości napięcia zasilania, a tym samym mocy grzania skróciło czas uzyskania zadanej pozycji. Zwiększenie napięcia zasilania 2,5-krotnie tzn. z 9 V do 22,5 V, skróciło czas pierwszego osiągnięcia zadanej pozycji ponad 5-krotnie. Można zauważyć, że jednakże przy zastosowaniu wyższych wartości napięć zasilających, w odpowiedzi skokowej pojawiły się przeregulowania. Zastosowanie podwyższonej mocy grzania może mieć także negatywne oddziaływanie na elementy przetwornika. W trakcie prób zastosowanie zasilania o napięciu 31,5 V doprowadziło do uszkodzenia teflonowej izolacji drutu grzałki, a tym samym do uszkodzenia przetwornika. Ponadto, większa moc nagrzewania wiąże się z ryzykiem przyspieszenia degradacji materiału. Z tych powodów postanowiono zastosować nagrzewanie, w którym tylko przez początkowy, stosunkowo krótki czas, grzałka pracowała z podwyższoną mocą. Po jego upływie układ sterowania zmniejszał napięcie i układ powracał do pracy z nominalną mocą roboczą. Dzięki temu ograniczone zostało niebezpieczeństwo narażenia materiału kompozytu na oddziaływanie wysokiej temperatury grzałki oraz zmniejszyło się ryzyko jej uszkodzenia. W oparciu o tą koncepcję zmodyfikowano układ regulacji, tak by mógł realizować tzw. początkowe forsowanie napięciowe.

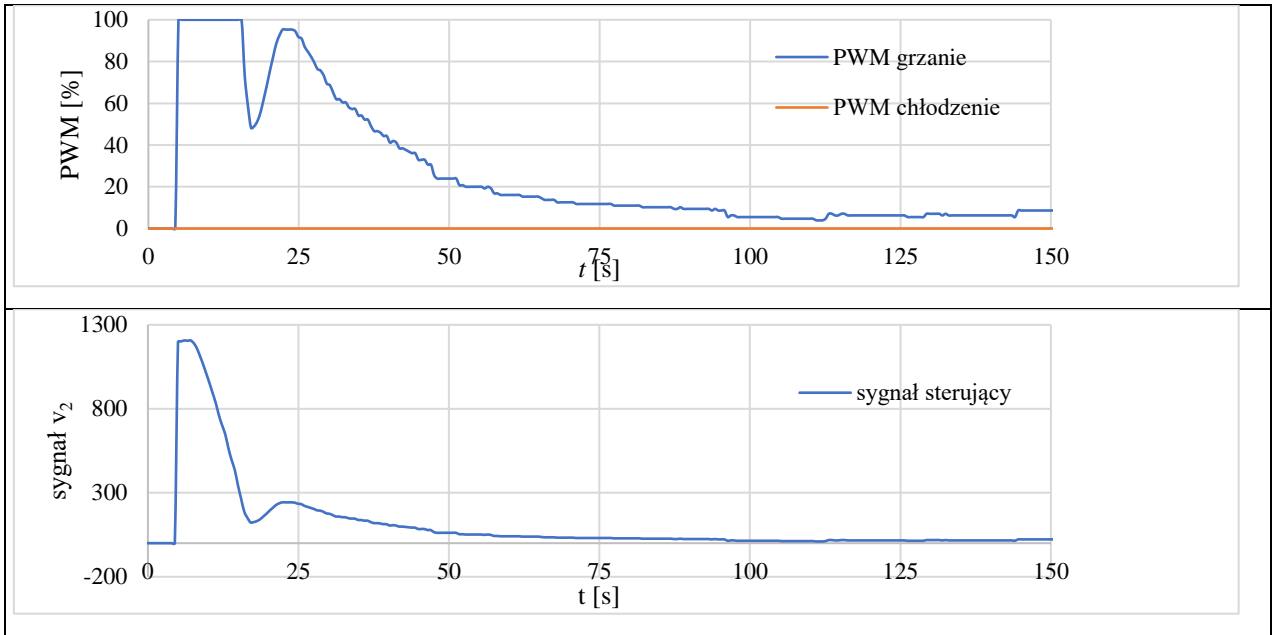
Zbudowano układ, w którym zastosowano początkowe zwiększenie mocy zasilania, które uzyskano przez forsowanie napięcia. W układzie tym początkowo przetwornik zasilany był z zasilacza o większym napięciu. Po uzyskaniu temperatury 65°C w środku przetwornika lub po uzyskaniu tzn. zbliżeniu się przez napęd na odległość $450 \mu\text{m}$ od pozycji zadanej, układ sterowania przełączał zasilanie na zasilacz o niższym napięciu. Schemat napędu z takim zmodyfikowanym regulatorem przedstawiono na rysunku 94.



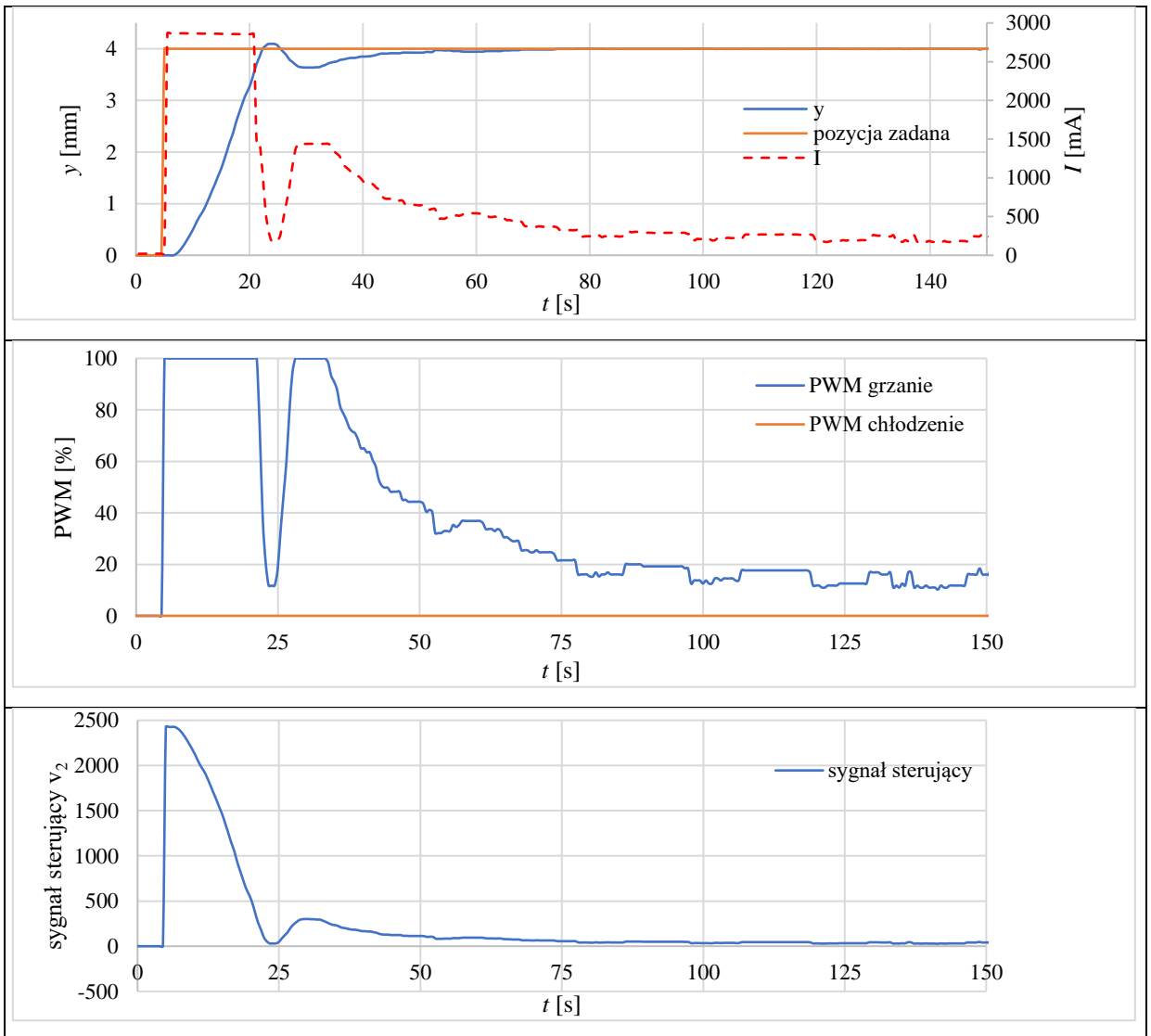
Rysunek 94. Schemat napędu z regulatorem z możliwością forsowania napięciem

Zbudowany serwonapęd z regulatorem umożliwiającym forsowanie podwyższonym napięciem poddano badaniom, w których zadawano skokowo przemieszczenie na odległość 2 mm, 4 mm i 6 mm. Uzyskane przebiegi z tych badań przedstawiono na rysunkach 95-97. W przypadku wszystkich przebiegów, można zaobserwować, że na etapie dochodzenia w okolice zadanej pozycji pobierany jest prąd o zwiększonej wartości, co oczywiście wynika z podania podwyższonego napięcia zasilania. Na etapie ustalania pozycji zadanej, układ pracuje już z mniejszym napięciem. Można też zaobserwować, że skokowa zmiana napięcia zasilania negatywnie wpływa na proces pozycjonowania zaburzając go, tzn. powodując oscylacje.

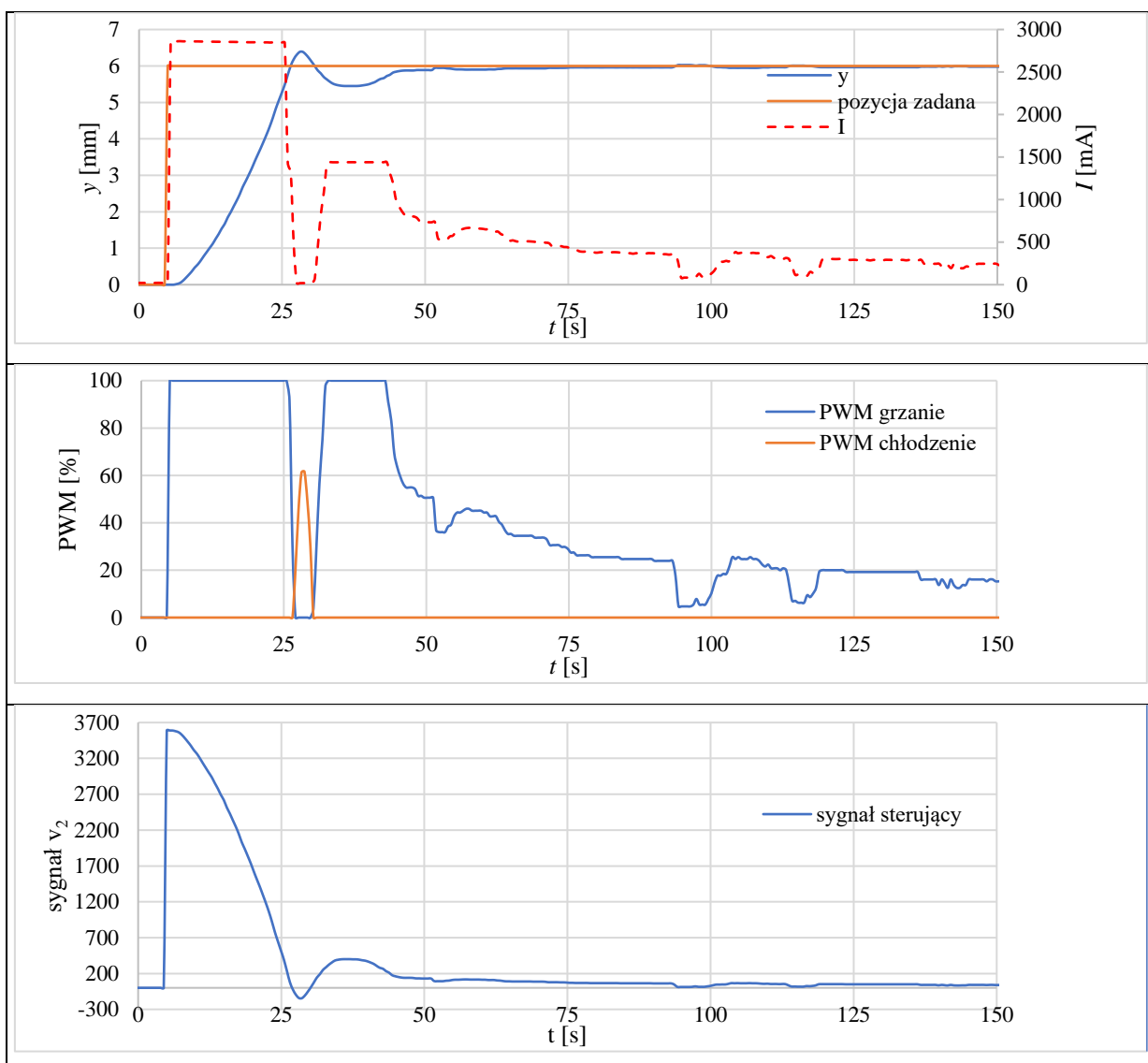




Rysunek 95. Pozycjonowanie do 2 mm z zastosowaniem forsowania napięciem



Rysunek 96. Pozycjonowanie do 4 mm z zastosowaniem forsowania napięciem



Rysunek 97. Pozycjonowanie do 6 mm z zastosowaniem forsowania napięciem

W tabelicy 14 zestawiono wartości czasów ustalenia, tj. potrzebnych do osiągnięcia 95% ($t_{0,95}$) odległości zadanej oraz wartości uchybu ustalonego. Ponieważ przy zmianie napięcia zasilającego następował spadek osiągniętego wydłużenia to, dla odległości zadanych w tabeli podano wartość $t_{0,95}$ przed zmianą napięcia zasilającego i po tej zmianie. W wynikach zwraca uwagę to, że czas $t_{0,95}$ był krótszy dla większych odległości. Jest to rezultat przyjętego sposobu pracy regulatora i właściwości kompozytu. Ponieważ jednym z kryteriów wyłączenia wyższego napięcia był spadek uchybu poniżej $450 \mu\text{m}$, to w przypadku zadania wydłużenia 2 mm, regulator przełączył się na niższe napięcie przy stosunkowo niskiej temperaturze kompozytu, a więc jeszcze w zakresie gdzie przyrost temperatury powodował mały przyrost

ciśnienia. Dlatego forsowanie napięcia nie przyniosło tak znaczącego skrócenia czasu ustalenia jak w przypadku odległości zadanych 4 mm i 6 mm.

Przy zadanej odległości równej 6 mm przetwornik był zasilany podwyższonym napięciem przez znacznie dłuższy czas (patrz rysunek 97). Dzięki temu temperatura kompozytu była wysoka, tzn. w zakresie temperatur gdzie przyrost ciśnienia następuje stosunkowo szybko. Zgodnie z literaturą [48] najlepszy zakres temperatury pracy kompozytu występuje od 55°C do 85°C. Dlatego jako granicę przełączenia napięcia zasilania przyjęto na temperaturę 65°C.

Tablica 14. Czas dojścia do 95% odległości zadanej oraz uchyb ustalony

Zadana odległość [mm]	Czas dojścia do 0,95 odległości zadanej $t_{0,95}$ [s]	Uchyb ustalony [μm]
2	16,3 i 34,7	50
4	21,5 i 37,0	16
6	26,0 i 43,3	53

6. Podsumowanie i wnioski

6.1. Podsumowanie badań

W pracy przedstawiono badania nad przetwornikami na bazie kompozytu silikon-etanol, który jest nowym materiałem kompozytowym zaliczanym do grupy materiałów zmiennofazowych (PCM). Jego zdolność do dużych odkształceń wyróżnia go spośród dotychczasowych materiałów z pamięcią kształtu.

Pierwsze rozdziały poświęcono przeglądowi dotychczasowych badań nad kompozytowymi materiałami zmiennofazowymi, szczególnie nad kompozytem silikon-etanol oraz ich zastosowaniu w przetwornikach. Wynikało z nich, że do tej pory nie podejmowano badań nad sterowaniem napędami z zastosowaniem przetworników na bazie kompozytu silikon-etanol.

W kolejnych rozdziałach przedstawiono opracowane dwie koncepcje przetworników elektromechanicznych na bazie kompozytu silikon-etanol oraz badania przeprowadzone na zbudowanych prototypach. Przedstawiono także teoretyczne podstawy ich działania. Porównano także wyniki otrzymane eksperymentalnie dla zbudowanych prototypów z przewidywaniami teoretycznymi. Pierwszą przedstawioną koncepcją był przetwornik rurkowy, drugim natomiast był przetwornik mieszkowy. Koncepcja druga eliminowała, część wad pierwszej koncepcji konstrukcji. Dzięki zamknięciu kompozytu wewnątrz metalowego mieszka uzyskano lepsze odizolowanie kompozytu od środowiska zewnętrznego co przełożyło się na jego większą żywotność. Ponadto ponieważ kompozyt był połączony kształtowo z mieszkiem wyeliminowano zaburzenia od tarcia występujące w pierwszej koncepcji.

W następnych rozdziałach przedstawiono prace w ramach których w oparciu o koncepcje drugiego przetwornika zbudowano napęd pracujący w układzie zamkniętym. Badania wykazały że do jego sterowania można zastosować regulator PI. Pracując ze sprzężeniem zwrotnym możliwe jest uzyskanie przez taki napęd pozycjonowania z dokładnością 0,1 mm.

Ponieważ jedną z głównych wad napędu była jego mała szybkość, w dalszej części pracy zbadano możliwości poprawy jego szybkości przez dodanie do napędu zewnętrznego chłodzenia, oraz przez dodanie możliwości forsowania napięciem podczas nagrzewania. W przypadku napędu z dodatkowym chłodzeniem w postaci wymuszonego wentylatorem przepływu powietrza był w stanie podążać za zmiennym sygnałem sinusoidalnym, pod warunkiem niezbyt szybkiej jego zmienności. Natomiast zastosowanie forsowania napięciem przyspieszyło osiągnięcie pozycji zadanej.

W trakcie prowadzonych prac, jedną z największych trudności, szczególnie w początkowym etapie badań, związana była z ulatnianiem się etanolu z kompozytu. Powodowało to bowiem zmianę właściwości wytworzonych przetworników. Zastosowanie metalowych mieszkań w dalszych etapach badań znacząco zredukowało ten problem. Ponadto pewnym źródłem problemów była mała

przewodność cieplna kompozytu silikon-etanol, przez co był on wrażliwy na lokalne przegrzania przy zastosowaniu zbyt dużego natężenia prądu grzania.

Na podstawie przeprowadzonych prac konstrukcyjnych oraz badań doświadczalnych sformułowano następujące wnioski:

- 1) zrealizowano wszystkie postawione cele rozprawy,
- 2) skonstruowano przetworniki elektromechaniczny na bazie kompozytu silikon-etanol, które uzyskiwały odkształcenie względne około 30-35% w przypadku rurowych przy nagraniu do 75°C. W przetwornikach mieszkowych wpływ na uzyskiwane odkształcenia wpływ miały parametry zastosowanych mieszków. Wartości uzyskiwanych wydłużeń bezwzględnych silnie zależały od zastosowanej geometrii przetworników i użytej objętości kompozytu. W przypadku badanych prototypów wynosiły one od kilku do kilkunastu milimetrów. Były one także w stanie wygenerować siłę rzędu kilkudziesięciu newtonów – **wyniki te potwierdziły główną tezę rozprawy,**
- 3) opracowano algorytm projektowania przetwornika mieszkowego na bazie kompozytu silikon-etanol – **zrealizowano w ten sposób cel opracowania algorytmu projektowania przetworników na bazie kompozytu silikon-etanol,**
- 4) dokonano modyfikacji wzorów opisujących działanie kompozytu silikon-etanol uwzględniających wpływ mieszka w przetworniku mieszkowym i na ich podstawie opracowano model komputerowy tego przetwornika – **stanowiło to realizację celu opracowania modelu komputerowego przetwornika na bazie kompozytu silikon-etanol,**
- 5) zbudowano napęd na bazie przetwornika mieszkowego na bazie kompozytu silikon-etanol, pracujący w układzie zamkniętym który mógł wygenerować siłę 35 N, osiągnąć przemieszczenie 6 mm, oraz uzyskać dokładność pozycjonowania $\pm 0,1$ mm – **jest to potwierdzenie tezy szczegółowej rozprawy,**
- 6) zaproponowano kilka regulatorów dla zbudowanego napędu działających w układzie pętli zamkniętej i przebadano ich działanie podczas badań pozycjonowani.

Perspektywy dalszych badań

Dalsze badania powinny być poświęcone zarówno ulepszeniu samego materiału kompozytowego, zbadaniu innych sposobów grzania, oraz ulepszeniu modelu przetwornika.

Badania w obszarze modyfikacji kompozytu powinny być nakierowane na minimalizację jego głównych wad jakimi są trwałość eksploatacyjna oraz szybkość działania. Droga do osiągnięcia tych celów może być wprowadzenie dodatków zwiększających

przewodność cieplną kompozytu, przez co skróceniu uległby czas potrzebny na jego równomierne nagrzanie a także schłodzenie. Zwiększona przewodność cieplna kompozytu silikon-etanol wpłynęłaby także, na zmniejszanie ryzyka lokalnego przegrzania. Istotnymi problemami w tym zakresie może być poprawne zmieszanie z dodatkami, oraz znalezienie takich dodatków, których koszt nie zwiększyłby znacząco kosztu kompozytu.

Obecnie nadal najczęściej stosowanym w badaniach sposobem nagrzewania kompozytu jest grzanie oporowe za pomocą spiralnej grzałki zatopionej w kompozycie. Należałoby rozważyć inne sposoby nagrzewania. Ponadto sama metoda nagrzewania za pomocą spiralnej grzałki wymaga badań nad jej optymalizacją, odnośnie wymiarów grzałki jej kształtu i sposobu zasilania.

W celu doskonalenia modelu należy przebadać rozchodzenie się ciepła w materiale kompozytu podczas nagrzewania i chłodzenia. Temperatura w całej objętości nie jest bowiem jednorodna, a wpływ na to ma metoda nagrzewania, oraz kształt przetwornika. Badania takie pozwoliłyby także lepiej zastosować do sterowania sygnał pochodzący z czujnika temperatury z wnętrza przetwornika.

Literatura

- [1] A. Dobrzański Leszek, „Metaloznawstwo z podstawami nauki o materiałach”, Warszawa, WNT, 1998.
- [2] P. A. Parrish, C. J. Coe, i N. M. Wereley, „Smart materials/structures technical analysis”, BDM FEDERAL INC ARLINGTON VA, 1993.
- [3] P. Ghosh, A. Rao, i A. R. Srinivasa, „Design of multi-state and smart-bias components using Shape Memory Alloy and Shape Memory Polymer composites”, *Materials & Design*, t. 44, s. 164–171, luty 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.05.063.
- [4] M. Kutz, *Materials and Mechanical Design*. John Wiley & Sons, 2006.
- [5] A. Miriyev, K. Stack, i H. Lipson, „Soft material for soft actuators”, *Nat Commun*, t. 8, nr 1, Art. nr 1, wrz. 2017, doi: 10.1038/s41467-017-00685-3.
- [6] P. Papon, J. Leblond, i P. H. E. Meijer, *The Physics of Phase Transitions*. w *Advanced Texts in Physics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002. doi: 10.1007/978-3-662-04989-1.
- [7] E. Wilhelm, C. Richter, i B. E. Rapp, „Phase change materials in microactuators: Basics, applications and perspectives”, *Sensors and Actuators A: Physical*, t. 271, s. 303–347, mar. 2018, doi: 10.1016/j.sna.2018.01.043.
- [8] J. Strittmatter, P. Gumpel, i V. Gheorghita, „Shape memory actuators-potentials and specifics of their technical use and electrical activation”, *Elastic*, t. 18, s. 16–3, 2012.
- [9] C. J. Ho, W. J. Wang, i C.-M. Lai, „Dynamic response of a thermally activated paraffin actuator”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, t. 103, s. 894–899, grudz. 2016, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.104.
- [10] K. Suzumori, H. Matsuoka, i S. Wakimoto, „Novel actuator driven with phase transition of working fluid for uses in wide temperature range”, w *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, paź. 2012, s. 616–621. doi: 10.1109/IROS.2012.6385761.
- [11] H. Matsuoka, K. Suzumori, i T. Kanda, „Development of a gas/liquid phase change actuator for high temperatures”, *ROBOMECH Journal*, t. 3, nr 1, s. 1, sty. 2016, doi: 10.1186/s40648-016-0041-7.
- [12] H. Matsuoka i K. Suzumori, „Gas/Liquid Phase Change Actuator for Use in Extreme Temperature Environments”, *International Journal of Automation Technology*, t. 8, nr 2, s. 140–146, 2014, doi: 10.20965/ijat.2014.p0140.
- [13] M. M. Farid, A. M. Khudhair, S. A. K. Razack, i S. Al-Hallaj, „A review on phase change energy storage: materials and applications”, *Energy Conversion and Management*, t. 45, nr 9, s. 1597–1615, cze. 2004, doi: 10.1016/j.enconman.2003.09.015.

- [14] S. Mondal, „Phase change materials for smart textiles – An overview”, *Applied Thermal Engineering*, t. 28, nr 11, s. 1536–1550, sie. 2008, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2007.08.009.
- [15] M. Wuttig i N. Yamada, „Phase-change materials for rewriteable data storage”, *Nature Materials*, t. 6, nr 11, s. 824–832, lis. 2007, doi: 10.1038/nmat2009.
- [16] Z. Ma i D. Sameoto, „A Review of Electrically Driven Soft Actuators for Soft Robotics”, *Micromachines*, t. 13, nr 11, Art. nr 11, lis. 2022, doi: 10.3390/mi13111881.
- [17] R. W. Style, R. Tutika, J. Y. Kim, i M. D. Bartlett, „Solid–Liquid Composites for Soft Multifunctional Materials”, *Advanced Functional Materials*, t. 31, nr 1, s. 2005804, 2021, doi: 10.1002/adfm.202005804.
- [18] R. Chellattoan, A. Yudhanto, i G. Lubineau, „Low-Voltage-Driven Large-Amplitude Soft Actuators Based on Phase Transition”, *Soft Robotics*, t. 7, nr 6, s. 688–699, grudz. 2020, doi: 10.1089/soro.2019.0150.
- [19] „Caltherm Corporation”. <http://caltherm.herodev.com/thermostatic-solutions/> (dostęp 12 maj 2023).
- [20] N. J. Nielsen, „HISTORY OF THINKJET PRINTHEAD DEVELOPMENT.”, *Hewlett-Packard Journal*, t. 36, nr 5, s. 4–10, 1985.
- [21] P. Calvert, „Inkjet printing for materials and devices”, *Chemistry of Materials*, t. 13, nr 10, s. 3299–3305, 2001, doi: 10.1021/cm0101632.
- [22] H. P. Le, „Progress and Trends in Ink-jet Printing Technology”, s. 14, 1999.
- [23] W. Y. Sim, H. J. Yoon, O. C. Jeong, i S. S. Yang, „A phase-change type micropump with aluminum flap valves”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, t. 13, nr 2, s. 286–294, 2003, doi: 10.1088/0960-1317/13/2/317.
- [24] P. Griss, H. Andersson, i G. Stemme, „Expandable microspheres for the handling of liquids”, *Lab on a Chip*, t. 2, nr 2, s. 117–120, 2002, doi: 10.1039/B111040N.
- [25] P. Selvaganapathy, E. T. Carlen, i C. H. Mastrangelo, „Electrothermally actuated inline microfluidic valve”, *Sensors and Actuators A: Physical*, t. 104, nr 3, s. 275–282, maj 2003, doi: 10.1016/S0924-4247(03)00030-X.
- [26] E. J. Tremblay, D. Loterie, i C. Moser, „Thermal phase change actuator for self-tracking solar concentration”, *Opt. Express, OE*, t. 20, nr 106, s. A964–A976, lis. 2012, doi: 10.1364/OE.20.00A964.
- [27] V. Zagolla, D. Dominé, E. Tremblay, i C. Moser, „Self-tracking solar concentrator with an acceptance angle of 32°”, *Opt. Express, OE*, t. 22, nr 107, s. A1880–A1894, grudz. 2014, doi: 10.1364/OE.22.0A1880.
- [28] J. Han *i in.*, „Untethered Soft Actuators by Liquid–Vapor Phase Transition: Remote and Programmable Actuation”, *Advanced Intelligent Systems*, t. 1, nr 8, s. 1900109, 2019, doi: 10.1002/aisy.201900109.
- [29] Y. Nishikawa i M. Matsumoto, „A design of fully soft robot actuated by gas–liquid phase change”, *Advanced Robotics*, t. 33, nr 12, s. 567–575, cze. 2019, doi: 10.1080/01691864.2019.1626281.
- [30] J. Li, M. Sun, i Z. Wu, „Design and Fabrication of a Low-Cost Silicone and Water-Based Soft Actuator with a High Load-to-Weight Ratio”, *Soft Robotics*, t. 8, nr 4, s. 448–461, sie. 2021, doi: 10.1089/soro.2019.0186.
- [31] H. Matsuoka *i in.*, „Development of a Rubber Soft Actuator Driven with Gas/Liquid Phase Change”, *Int. J. Automation Technol.*, t. 10, nr 4, s. 517–524, lip. 2016, doi: 10.20965/ijat.2016.p0517.
- [32] M. Boyvat, D. M. Vogt, i R. J. Wood, „Ultrastrong and High-Stroke Wireless Soft Actuators through Liquid–Gas Phase Change”, *Advanced Materials Technologies*, t. 4, nr 2, s. 1800381, 2019, doi: 10.1002/admt.201800381.

- [33] K. Narumi *i in.*, „Liquid Pouch Motors: Printable Planar Actuators Driven by Liquid-to-Gas Phase Change for Shape-Changing Interfaces”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, t. 5, nr 3, s. 3915–3922, lip. 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.2983681.
- [34] S. Ueno i Y. Monnai, „Wireless Soft Actuator Based on Liquid-Gas Phase Transition Controlled by Millimeter-Wave Irradiation”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, t. 5, nr 4, s. 6483–6488, paź. 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.3013847.
- [35] K. W. Oh, K. Namkoong, i C. Park, „A PHASE CHANGE MICROVALVE USING A MELTABLE MAGNETIC MATERIAL: FERRO-WAX”, s. 4, 2005.
- [36] H. J. Sant, T. Ho, i B. K. Gale, „An *in situ* heater for a phase-change-material-based actuation system”, *J. Micromech. Microeng.*, t. 20, nr 8, s. 085039, sie. 2010, doi: 10.1088/0960-1317/20/8/085039.
- [37] F. Goldschmidtboing, P. Katus, A. Geipel, i P. Woias, „A novel self-heating paraffin membrane micro-actuator”, w *2008 IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, sty. 2008, s. 531–534. doi: 10.1109/MEMSYS.2008.4443710.
- [38] J.-M. Park, Y.-K. Cho, B.-S. Lee, J.-G. Lee, i C. Ko, „Multifunctional microvalves control by optical illumination on nanoheaters and its application in centrifugal microfluidic devices”, *Lab on a Chip*, t. 7, nr 5, s. 557–564, 2007, doi: 10.1039/B616112J.
- [39] J. I. Lipton, S. Angle, R. E. Banai, E. Peretz, i H. Lipson, „Electrically Actuated Hydraulic Solids”, *Advanced Engineering Materials*, t. 18, nr 10, s. 1710–1715, 2016, doi: 10.1002/adem.201600271.
- [40] M. D. Bartlett i R. W. Style, „Introduction to liquid composites”, *Soft Matter*, t. 16, nr 25, s. 5799–5800, 2020, doi: 10.1039/D0SM90113J.
- [41] T. Noguchi i F. Tsumori, „Soft Actuator with Large Volumetric Change using Vapor-liquid Phase Transition”, s. 20.
- [42] G. Decroly *i in.*, „Optimization of Phase-Change Material–Elastomer Composite and Integration in Kirigami-Inspired Voxel-Based Actuators”, *Frontiers in Robotics and AI*, t. 8, 2021, Dostęp: 27 lipiec 2022. [Online]. Dostępne na: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frobt.2021.672934>
- [43] H. Wang *i in.*, „Large-Magnitude Transformable Liquid-Metal Composites”, *ACS Omega*, t. 4, nr 1, s. 2311–2319, sty. 2019, doi: 10.1021/acsomega.8b03466.
- [44] D. Jin Kang, S. An, A. L. Yarin, i S. Anand, „Programmable soft robotics based on nano-textured thermo-responsive actuators”, *Nanoscale*, t. 11, nr 4, s. 2065–2070, 2019, doi: 10.1039/C8NR08215D.
- [45] T. Kapłon, T. Lindner, i D. Wyrwał, „Induction heating for a silicone / ethanol composite actuator”, w *2020 International Conference Mechatronic Systems and Materials (MSM)*, lip. 2020, s. 1–4. doi: 10.1109/MSM49833.2020.9202227.
- [46] T. Kapłon i A. Milecki, „Linear Drive Based on Silicon/Ethanol Composite”, *Polymers*, t. 13, nr 16, Art. nr 16, sty. 2021, doi: 10.3390/polym13162668.
- [47] A. Miriyev, B. Xia, J. C. Joseph, i H. Lipson, „Additive Manufacturing of Silicone Composites for Soft Actuation”, *3D Printing and Additive Manufacturing*, t. 6, nr 6, s. 309–318, grudz. 2019, doi: 10.1089/3dp.2019.0116.
- [48] A. Miriyev, G. Caires, i H. Lipson, „Functional properties of silicone/ethanol soft-actuator composites”, *Materials & Design*, t. 145, s. 232–242, maj 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2018.02.057.
- [49] X. Li, H. Duan, P. Lv, i X. Yi, „Soft Actuators Based on Liquid–Vapor Phase Change Composites”, *Soft Robotics*, t. 8, nr 3, s. 251–261, cze. 2021, doi: 10.1089/soro.2020.0018.
- [50] J. E. Huber, N. A. Fleck, i M. F. Ashby, „The selection of mechanical actuators based on performance indices”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A:*

- Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, t. 453, nr 1965, s. 2185–2205, paź. 1997, doi: 10.1098/rspa.1997.0117.
- [51] T. Mirfakhrai, J. D. W. Madden, i R. H. Baughman, „Polymer artificial muscles”, *Materials Today*, t. 10, nr 4, s. 30–38, kwi. 2007, doi: 10.1016/S1369-7021(07)70048-2.
- [52] Z. Liu, B. Sun, J. Hu, Y. Zhang, Z. Lin, i Y. Liang, „Ethanol Phase Change Actuator Based on Thermally Conductive Material for Fast Cycle Actuation”, *Polymers*, t. 13, nr 23, Art. nr 23, sty. 2021, doi: 10.3390/polym13234095.
- [53] B. Xia *i in.*, „Improving the Actuation Speed and Multi-Cyclic Actuation Characteristics of Silicone/Ethanol Soft Actuators”, *Actuators*, t. 9, nr 3, Art. nr 3, wrz. 2020, doi: 10.3390/act9030062.
- [54] A. Miriyev, C. Trujillo, G. Caires, i H. Lipson, „Rejuvenation of soft material–actuator”, *MRS Communications*, t. 8, nr 2, s. 556–561, cze. 2018, doi: 10.1557/mrc.2018.30.
- [55] H. E. Dillon i S. G. Penoncello, „A Fundamental Equation for Calculation of the Thermodynamic Properties of Ethanol”, *International Journal of Thermophysics*, t. 25, nr 2, s. 321–335, mar. 2004, doi: 10.1023/B:IJOT.0000028470.49774.14.
- [56] „Ethanol (data page)”.
[https://ipfs.io/ipfs/QmXoypizjW3WknFiJnKLwHCnL72vedxjQkDDP1mXWo6uco/wiki/Ethanol_\(data_page\).html](https://ipfs.io/ipfs/QmXoypizjW3WknFiJnKLwHCnL72vedxjQkDDP1mXWo6uco/wiki/Ethanol_(data_page).html) (dostęp 5 sierpień 2022).
- [57] R. A. Bilodeau, A. Miriyev, H. Lipson, i R. Kramer-Bottiglio, „All-soft material system for strong soft actuators”, w *2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, kwi. 2018, s. 288–294. doi: 10.1109/ROBOSOFT.2018.8404934.
- [58] M. Cartolano, B. Xia, A. Miriyev, i H. Lipson, „Conductive Fabric Heaters for Heat-Activated Soft Actuators”, *Actuators*, t. 8, nr 1, Art. nr 1, mar. 2019, doi: 10.3390/act8010009.
- [59] H. Ma, X. Xiao, X. Zhang, i K. Liu, „Recent advances for phase-transition materials for actuators”, *Journal of Applied Physics*, t. 128, nr 10, s. 101101, wrz. 2020, doi: 10.1063/5.0020596.
- [60] S. Ogden, L. Klintberg, G. Thornell, K. Hjort, i R. Bodén, „Review on miniaturized paraffin phase change actuators, valves, and pumps”, *Microfluid Nanofluid*, t. 17, nr 1, s. 53–71, lip. 2014, doi: 10.1007/s10404-013-1289-3.
- [61] „Ecoflex™ 00-30 Product Information | Smooth-On, Inc.” <https://www.smooth-on.com/products/ecoflex-00-30/> (dostęp 27 lipiec 2022).
- [62] J.-J. Cabibihan, D. Joshi, Y. M. Srinivasa, M. A. Chan, i A. Muruganatham, „Illusory Sense of Human Touch From a Warm and Soft Artificial Hand”, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, t. 23, nr 3, s. 517–527, maj 2015, doi: 10.1109/TNSRE.2014.2360533.
- [63] T. Kapłon i A. Milecki, „Research on the Use of Silicon-Ethanol Composite in Actuators”, *Materials*, t. 15, nr 23, Art. nr 23, sty. 2022, doi: 10.3390/ma15238570.

Construction and control of a transducer built on the basis of a silicone-ethanol composite

ABSTRACT

This thesis presents the results of research on transducers built on the basis of a new material, which is a silicone-ethanol composite. The principle of operation of this material is based on a change in the physical state of the active material and because of that composite silicon-ethanol can be included in the group of PCM materials. The silicone-ethanol composite consists of bubbles filled with liquid ethanol dispersed in a silicone rubber matrix. During heating, the ethanol undergoes a liquid-gas transition, which increases the pressure in the bubbles, causing the entire material to expand. During cooling, the ethanol returns to the liquid state, and the material returns to its original dimensions due to the elastic forces of the matrix. A feature of the silicone-ethanol composite that makes it attractive is the ability to generate large deformations, reaching 100%. During investigations, two types of transducers were constructed. The built prototypes were subjected to a series of tests in which the generated forces and elongations were measured. These transducers were named as tubular transducer and bellow transducer. The first transducer were used in preliminary investigations, the second were used also in constructed drive. Based on them, an algorithm for designing a bellows transducer was developed. Based on the data from the literature review, a computer model of the transducer was also developed. On the basis of the bellows transducer, a closed-loop drive was built that could generate a force of 35 N, and achieve an elongation of 6 mm with an accuracy of ± 0.1 mm.

