

AUTOREFERAT

Modelowanie geotermalnych wymienników ciepła typu Fielda – pozyskiwanie ciepła geotermalnego

dr inż. TOMASZ KUJAWA

Katedra Techniki Ciepłej
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Al. Piastów 17, 70-310 Szczecin

1. Imię i nazwisko: **Tomasz Kujawa**

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

2003 stopień naukowy **doktora nauk technicznych** uzyskany na Wydziale Budownictwa i Architektury Politechniki Szczecińskiej; dziedzina i specjalność: budownictwo; tytuł rozprawy „**Wykorzystanie gruntu jako źródła ciepła dla budynków mieszkalnych za pomocą pionowych gruntowych wymienników ciepła**”, promotor: prof. dr hab. inż. Władysław Szaflik,

1993 tytuł **magistra inżyniera** uzyskany na Wydziale Mechanicznym Politechniki Szczecińskiej na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn, specjalność: systemy i urządzenia energetyczne; temat pracy: „**Analiza profilu prędkości i kąta wypływu powietrza z ostatniego otworu uzbrojonego, umieszczonego na bocznej ścianie kanału wentylacyjnego**”, promotor: dr inż. Mieczysław Kabat.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych.

30.11.2018 – nadal:	Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Katedra Techniki Ciepłej, Al. Piastów 19, 70-310 Szczecin, mianowanie, starszy wykładowca,
01.02.2004 - 29.11.2018	Politechnika Szczecińska/Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Mechaniczny, Katedra Techniki Ciepłej, Al. Piastów 19, 70-310 Szczecin, mianowanie, adiunkt
01.10.1994 - 31.01.2004	Politechnika Szczecińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Techniki Ciepłej, Al. Piastów 19, 70-310 Szczecin, mianowanie, asystent
01.01.1994 - 30.09.1994	Politechnika Szczecińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Techniki Ciepłej, Al. Piastów 19, 70-310 Szczecin, umowa o pracę, samodzielny mechanik
01.03.1993 - 31.12.1994	Politechnika Szczecińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Techniki Ciepłej, Al. Piastów 19, 70-310 Szczecin, umowa o pracę, starszy referent techniczny

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789):

a) tytuł osiągnięcia naukowego (monografia),

Modelowanie geotermalnych wymienników ciepła typu Fielda – pozyskiwanie ciepła geotermalnego

b) (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy),

Autor: **Tomasz Kujawa**

Tytuł: **Modelowanie geotermalnych wymienników ciepła typu Fielda – pozyskiwanie ciepła geotermalnego**

Rok wydania: **2019**

Miejsce wydania: **Szczecin**

Nr ISBN: **978-83-7663-289-6**

Wydawnictwo: **Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, al. Piastów 48, 70-311 Szczecin, tel. 91 449 47 60,**

Recenzenci wydawniczy: **prof. dr hab. inż. Tadeusz Bohdal**
prof. dr hab. inż. Mieczysław E. Poniewski

c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Monografia jest podsumowaniem moich wieloletnich prac w zakresie modelowania i praktycznego zastosowania geotermalnych wymienników ciepła typu Fielda, przydatnych do energetycznego wykorzystania nieeksploatowanych otworów wiertniczych poszukiwawczych, jako potencjalnych geotermalnych źródeł ciepła. Jednocześnie stanowi podsumowanie obszernej literatury światowej i zawiera krytyczną analizę stanu wiedzy w zakresie modelowania geotermalnych wymienników typu Fielda.

Monografię podzielono na dwie zasadnicze części. Część pierwsza jest poświęcona prezentacji i omówieniu analitycznego modelowania wymienników ciepła typu Fielda, dotyczącego czterech wyróżnionych i zarazem typowych przypadków, znajdujących swoje odniesienie w zastosowaniach praktycznych. W części drugiej proponowane modelowanie analityczne zastosowano do opracowania koncepcji wykorzystania pozyskanej tym sposobem energii geotermalnej do zasilenia projektowanego kompleksu obiektów balneologiczno – rekreacyjnych w Suchej Beskidzkiej, bazujących na zagospodarowaniu istniejącego pojedynczego otworu wiertniczego Jachówka K-2.

W części pierwszej podjąłem się zadania wykazania, że zaproponowane modele analityczne geotermalnych wymienników ciepła typu Fielda opisują cztery wyróżnione przypadki transportu ciepła ze złoża geotermalnego do nośnika ciepła z należytą dla celów inżynierskich (projektowych) dokładnością, porównywalną z dokładnością obliczeń numerycznych.

W monografii zaproponowano analityczne modele obliczeniowe dla następujących przypadków / wariantów stosowania geotermalnych wymienników ciepła typu Fielda:

- temperatura zatłaczanego nośnika ciepła (wody) jest niższa od temperatury złoża na powierzchni ziemi. Przypadek taki ma miejsce w sytuacji gdy nośnik ciepła został intensywnie schłodzony w odbiornikach ciepła lub może dotyczyć sytuacji, gdy przez wymiennik przepływa nośnik ciepła w obiegu otwartym (na przykład ciepła woda użytkowa) lub gdy wykorzystujemy czynnik niskowrzący;
- temperatura zatłaczanego nośnika ciepła (wody) jest wyższa od temperatury złoża na powierzchni ziemi. Jest to przypadek typowy, najczęściej spotykany w pracy instalacji geotermalnych, i wynika z faktu, że po schłodzeniu wody u odbiorców jej temperatura jest wyższa od temperatury przypowierzchniowych warstw gruntu.
- temperatura zatłaczanego nośnika ciepła (wody) jest wyższa od temperatury złoża na powierzchni ziemi, a ponadto górotwór składa się z dwóch różnych warstw, warstwy skalnej i złoża geotermalnego wodonośnego. Przypadek taki może mieć miejsce gdy wykorzystujemy otwór wiertniczy poprzez który była wydobywana woda geotermalna, a z pewnych względów eksploatacyjnych (na przykład zarastanie otworów w wyniku wysokiej mineralizacji wody) zaniechamy dalszej eksploatacji złoża;
- temperatura zatłaczanego nośnika ciepła (wody) wyższa od temperatury złoża na powierzchni ziemi, a wymiennik ciepła charakteryzuje się dwoma zróżnicowanymi powierzchniami wewnętrznymi dla izolowanego i nieizolowanego kanału wewnętrznego. Taki przypadek może

mieć miejsce z pewnych względów konstrukcyjnych związanych z adaptacją otworu wiertniczego.

Dla każdego ze wskazanych czterech przypadków zbudowano / opracowano właściwy dla niego model transportu ciepła ze złoża geotermalnego do nośnika ciepła, uzyskując rozwiązanie analityczne, zgodnie z przyjętym celem. Właściwości otrzymanych rozwiązań analitycznych zilustrowano na licznych wykresach, które są jednocześnie nomogramami, umożliwiającymi ocenę przydatności rozważanego otworu wiertniczego do wykorzystania jako potencjalne, geotermalne źródło ciepła. Analizę każdego z wyżej wymienionych przypadków zrealizowano zarówno w sensie jakościowym, jak i ilościowym, wykorzystując dostępne dane źródłowe. W nomogramach ułatwiających ocenę przydatności potencjalnego źródła ciepła uwzględniono wszystkie dane niezbędne do zdefiniowania przyszłej instalacji geotermalnej, a więc planowaną geometrię wymiennika, przewodności cieplne materiału konstrukcyjnego i izolacji, oraz charakterystykę termiczną złoża.

Za ważne należy uznać wnioski wynikające z analizy zamieszczonych nomogramów umożliwiające ocenę wpływu poszczególnych parametrów, takich jak wymiary geometryczne (długość, przekroje rur) i własności cieplne wymiennika ciepła typu Fielda (przewodność cieplna materiału, adiatermiczność rury wewnętrznej), natężenie przepływu i własności cieplne nośnika ciepła oraz charakterystyki gruntu (profil temperaturowy, własności cieplne).

Wykazano, że uzyskiwany z geotermalnego źródła strumień ciepła silnie zależy od własności złoża. Dla złoża jednorodnego rośnie wraz ze wzrostem temperatury nośnika na wylocie / dopływie do wymiennika, gdy rosną; pojemność cieplna nośnika, współczynnik przenikania ciepła po stronie zewnętrznej wymiennika i długość wymiennika, a maleje temperatura nośnika zatłaczanego. Dla złoża niejednorodnego, składającego się z warstwy skalnej i geotermalnej, wzrost strumienia pozyskiwanego ciepła zależy ponadto od grubości warstwy geotermalnej i współczynnika przenikania ciepła w obszarze tej warstwy. W obu przypadkach jest on funkcją profilu temperaturowego gruntu.

Szczególnie korzystnymi przypadkami do wykorzystania jako geotermalne źródła ciepła są nieczynne otwory wiertnicze i do tych zastosowań odnoszą się zawarte w monografii rozważania ilościowe. Z tego powodu poświęcam wiele uwagi dokładnej analizie wpływu własności różnych warstw gruntu, w których działa geotermalny wymiennik ciepła typu Fielda.

W części drugiej monografii odnoszę wcześniejsze rozwiązania analityczne do szczegółowej analizy wymiany ciepła pomiędzy rzeczywistym złożem, o znanym profilu temperaturowym, a wymiennikiem ciepła bazującym na istniejącym orurowaniu otworu wiertniczego Jachówka-2K. W prezentowanej w monografii analizie wykorzystania energii geotermalnej z otworu wiertniczego rozważono dwa warianty konstrukcji wymiennika ciepła Fielda. Pierwszy dotyczył wymiennika o długości całkowitej 2870 m, drugi o długości 3950 m. W obu przypadkach przewidziano zastosowanie izolacji cieplnej zmniejszającej wymianę ciepła pomiędzy strumieniami nośnika płynącego w przeciwnych kierunkach w kanałach wewnętrznym i zewnętrznym. W obu wariantach geometrii wymiennika ciepła Fielda rozważono trzy różne sposoby wykonania izolacji rury wewnętrznej, zależne od konstrukcji analizowanego wymiennika. Obliczenia porównawcze zrealizowano dla wybranych strumieni objętościowych wody przepływającej przez wymiennik.

Analiza warunków działania wymienników Fielda, według rozpatrywanych modeli analitycznych i dla wybranych parametrów złoża (Jachówka-K2) wykazała, że maksymalna ilość pozyskiwanego ciepła zależy od doboru właściwego (optymalnego) strumienia objętościowego zatłaczanej wody. W tych przypadkach uzyskuje się również wysokie wartości temperatury nośnika ciepła na wypływie z wymiennika. Zwiększanie strumienia objętościowego zatłaczanej wody skutkuje wzrostem ilości pozyskiwanego ciepła, ale jednocześnie powoduje wyraźne obniżenie temperatury nośnika na wypływie.

Zauważa się, że właściwe wykorzystanie możliwości geotermalnego źródła ciepła dla istniejącej konstrukcji wymiennika wymaga zastosowania odpowiedniej regulacji zasilanej sieci cieplnej.

Ważnym elementem oceny jakości obliczeń na podstawie modeli analitycznych było korzystne porównanie wyników z obliczeniami numerycznymi, które są dostępne w literaturze. Oznacza to osiągnięcie jednego z ważnych celów pracy, jaką był plan zbudowania nieskomplikowanego a jednocześnie dokładnego narzędzia do projektowania instalacji geotermalnych stosujących wymienniki ciepła typu Fielda do zagospodarowania otworów wiertniczych.

Należy zaznaczyć, że brak jest w polskim piśmiennictwie naukowym monografii, omawiającej w sposób całościowy tematykę analitycznego modelowania geotermalnych wymienników ciepła typu Fielda, ze wskazaniem na praktyczne możliwości ich zastosowania w otworach wiertniczych, jako geotermalnych źródeł ciepła.

Należy wyraźnie podkreślić, że tematyka monografii stanowi jedną z ważniejszych w obszarze geoenergetyki, a w szczególności w zakresie obliczeń i doboru gruntowych wymienników ciepła stosowanych na potrzeby pozyskiwania energii geotermalnej. Liczba publikacji książkowych w tym zakresie jest bardzo mała, ograniczona i niewystarczająca. Pomimo coraz większej liczby publikacji, w postaci artykułów i referatów, które ujmują problem częściowo, brak jest opracowań zwartych szeroko ujmujących i porządkujących te zagadnienia. Dotyczy to w szczególności literatury w języku polskim. Prezentowana monografia w założeniu stanowi kompendium wiedzy w obszarze geotermalnych źródeł energii. Celem Autora było zebranie wcześniej uzyskanych wyników obliczeń analitycznych i przedstawienie ich na tle wyników badań innych autorów. Nie było to zadanie łatwe, z tego względu, że w literaturze tematu brakuje istotnych danych, które pozwoliłyby na bezpośrednie ich porównanie.

Tym samym uważam, że monografia wypełnia istotną lukę w tym zakresie koncentrując się na niżej wymienionych obszarach, zaliczanych przeze mnie do najważniejszych moich osiągnięć:

- i) Opracowanie czterech modeli obliczeniowych geotermalnych wymienników ciepła (z temperaturą wyższą od temperatury złoża na wejściu do wymiennika ciepła oraz z temperaturą niższą od temperatury złoża na wejściu do wymiennika) osadzonych w jednej warstwie jednorodnej złoża oraz w dwóch istotnie różniących się warstwach np. warstwie skalnej lub warstwie geotermalnej.
- ii) Przedstawienie rozwiązań tych modeli dla szczególnego przypadku, jakim jest adiatermiczność rury wewnętrznej wymiennika ciepła typu Fielda.
- iii) Opracowanie nomogramów umożliwiających wstępną ocenę przydatności danej lokalizacji pod kątem instalacji danego typu geotermalnego wymiennika ciepła (geometria wymiennika, współczynnik przewodzenia ciepła, zastosowana izolacja itp.), przy znajomości wielkości, które są do tego potrzebne (charakterystyka złoża - parametry termiczne).
- iv) Przeprowadzenie analizy wyników obliczeń w wersji uogólnionej oraz dla rzeczywistych, projektowych wielkości, związanych z charakterystyką warstwy skalnej (gruntu) oraz geometrii wymiennika.
- v) Dokonanie analizy ilościowej i jakościowej własnych obliczeń numerycznych z dostępnymi danymi źródłowymi, które stosowane były w obliczeniach wykonanych przez innych autorów. Uzyskane wyniki korelują między sobą, potwierdzając celowość i zalety opracowania analitycznego.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych (artystycznych).

Prowadzone przez mnie prace dotyczyły zagadnień wpływu powietrza z otworów kanałów wentylacyjnych uzbrojonych blachą perforowaną [zał.4 pkt. II: E-1, L-1, L-3]. Były to prace badawcze, pomiarowe. Analizowane były prędkości i kąt wpływu strumienia powietrza dla różnych konfiguracji zbrojenia otworu.

Do oceny nierównomierności profilu prędkości powietrza wypływającego z otworu nawiewnego wprowadzono trzy wskaźniki: nierównomierności rozkładu ciśnienia statycznego wzdłuż otworu wypływowego, nierównomierności prędkości nawiewu powietrza oraz wskaźnik zmienności kąta wpływu strumienia powietrza.

Ważnym z punktu widzenia prac projektowych jest ustalenie zależności pomiędzy geometrią elementów nawiewnych i wartością strat ciśnienia. W tym celu poddano analizie wpływ badanych parametrów na wartość współczynnika oporu miejscowego i współczynnika wypływu.

Przeprowadzone badania pokazały wpływ pomijanych dotychczas w praktyce projektowej, parametrów geometrycznych otworu zbrojonego blachą perforowaną na wartość prędkości wypływu powietrza, zmienność kątów strug wypływających z otworów perforowanych i innych parametrów. Dokonano uogólnienia wyników badań i zaproponowano zależności matematyczne określające wartości średniego kąta wypływu powietrza z otworu oraz wartości oporu miejscowego. Zależności te stanowią cenny i uściślający materiał dla projektanta.

Kolejna tematyka moich prac dotyczyła zagadnień wnikania ciepła w zakresie wymuszonego ruchu przejściowego w kanale kołowym oraz profilu prędkości strug powietrza wypływających z kanału pierścieniowego [zał.4 pkt. II: L-2, L-3, L-4, L-6].

Biorąc pod uwagę fakt nieustabilizowanego ruchu cząstek płynu w obszarze ruchu przejściowego, który stwarza trudności w uzyskiwaniu pełnej powtarzalności wyników przy określaniu ilości przekazywanego ciepła, przyjęto hipotezę o możliwości opisanie zależności uogólnionej na liczbę Nusselta z wykorzystaniem parametru zależnego od funkcji stosunku prędkości średniej do maksymalnej względem liczby Reynoldsa. Opracowano uogólnione równanie, które zostało zweryfikowane badaniami [zał.4 pkt. II: L-2, L-4, L-6].

Kanały o przekroju pierścieniowym są często stosowane w technice. Wymienniki ciepła, zaopatrzone w tego typu kanały, ze względu na ich wysoką efektywność energetyczną, należą do grupy najczęściej używanych rekuperatorów. Z powodu ich powszechności w tej dziedzinie techniki, kanały pierścieniowe były przedmiotem wielu prac badawczych. Zajmowano się jednak przede wszystkim zjawiskami wymiany ciepła (ze względu na zastosowanie w energetyce), na drugi plan odstawiając zjawiska hydrodynamiczne. Brak danych (w dostępnej literaturze) na temat stosunku prędkości średniej do prędkości maksymalnej dla różnych liczb Reynoldsa w kanale pierścieniowym, spowodował, że podjąłem się próby opisanie tego zjawiska. Badania przeprowadzono w zakresie ruchu przejściowego oraz burzliwego, opracowano uogólnione zależności dla różnych przedziałów liczb Reynoldsa. Najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych prac są takie, że profil prędkości w kanale pierścieniowym jest bardzo zbliżony do profilu prędkości w kanale kołowym, różni się jedynie miejscem występowania prędkości maksymalnej. Wartości stosunku prędkości średniej do prędkości maksymalnej dla danych liczb Reynoldsa w ruchu przejściowym i burzliwym w kanale pierścieniowym różnią się od wartości tego stosunku dla tych samych liczb Re w kanale kołowym.

Kolejnym obszarem mojej pracy były pionowe wymienniki gruntowe sprzężone z pompami ciepła [zał.4 pkt. II: E-2, E-5, L-7, L-12÷L-15, L-20, L-22]. Opracowałem modele matematyczne dla różnych rodzajów wymiennika ciepła: typu U-rura, rura w rurze, wymienniki przeciwbieżne. W każdym z modeli uwzględniono stałą temperaturę gruntu z głębokością. Zasadnicze poczynione założenie to quasi-stacjonarność przekazywania ciepła pomiędzy gruntem a czynnikiem, co znacznie uprościło obliczenia pól temperatury, jak i strumieni przekazywanego ciepła. Wyjściowe równania opisujące przekazywanie energii we wszystkich analizowanych przypadkach oparto na wykorzystaniu klasycznej teorii rekuperatorów. Niezbędne do przeprowadzenia obliczeń współczynniki przejmowania ciepła po stronie nośnika ciepła wyznaczono korzystając z dostępnych w literaturze równań korelacyjnych. W obliczeniach uwzględniono opór przejmowania ciepła pomiędzy gruntem a czynnikiem płynącym w wymienniku. Kolejny z istotnych problemów obliczeniowych w postaci oporu przenikania ciepła pomiędzy czynnikiem płynącym w obu rurach tworzących wymiennik ciepła typu U, rozwiązano stosując metodę źródeł i upustów. Wyniki obliczeń przedstawiono

w postaci nomogramów pozwalających określić strumień ciepła przejmowanego od gruntu w funkcji stosunku różnic temperatury czynnika na wlocie i wylocie, strumienia jego pojemności cieplnej, a także stosunku oporów przenikania ciepła.

Wykazano, iż przyjęcie warunku stałej temperatury gruntu nie ma praktycznie żadnego wpływu na strumień ciepła przejmowany od gruntu w przypadku obu rozpatrywanych konstrukcji wymiennika ciepła.

Rezultaty obliczeń wykonane według zależności wyprowadzonych z modeli analitycznych porównano z wynikami obliczeń jedną z metod opisanych w literaturze (umownie zwaną metodą SeCeSPol). Porównanie bezwzględnych strumieni ciepła oszacowanych za pomocą obu metod w przypadku wymiennika typu U-rura wykazało, iż wszystkie metody dają zbliżone wyniki dla krótkich wymienników (do ok. 50 m) i to niezależnie od właściwości termo fizycznych gruntu, w tym oczywiście szczególnie współczynnika przewodzenia ciepła czy średnicy rury. Różnice w wynikach obliczeń rosną wraz ze wzrostem długości rury i ze zwiększeniem wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu.

Na podstawie wyników badań eksperymentalnych pionowych, gruntowych wymienników ciepła przeprowadzonych w ośrodku szczecińskim, oszacowano opory przenikania ciepła w gruncie. Otrzymane w ten sposób wyniki porównano z wartościami wynikającymi ze wzorów cytowanych w literaturze. Wyniki uzyskiwane z zastosowanych wzorów są znacznie wyższe od eksperymentalnych. Wynika to z faktu, że formuły teoretyczne odnoszą się do ciągłej pracy wymiennika ciepła podczas gdy w warunkach eksperymentu praca badanych wymienników ciepła była przerywana.

Podjęte prace w obszarze tzw. płytkiego wykorzystania energii gruntu pozwoliły na wejście w obszar głębokich wymienników geotermalnych [zał.4 pkt. II: A-1, A-2, A-3, E-3, E-4, E-6÷E-17, E-19÷E-25, E-31]. Opracowano modele matematyczne różnych wariantów głębokich wymienników geotermalnych w różnych podwariantach pod względem temperatury na zatłaczaniu (mniejsza lub większa od temperatury na powierzchni ziemi), czy też zakończenia wymiennika (głowica śrubowa), jak również wymienników krzyżowo-prądowych [zał.4 pkt. II: L-18, L-26]. W modelach tych przyjęto, że temperatura gruntu wraz z głębokością zmienia się liniowo. Zajmowałem się również modelowaniem otworów wydobywczych wody geotermalnej, analizując wpływ istotnych parametrów na osiąganą moc i temperaturę czynnika. Wyniki podjętych prac były prezentowane na szeregu konferencjach krajowych i międzynarodowych [zał.4 pkt. II: L-5, L-7÷L-11, L-16÷L-38, L-42÷L-47].

Kolejna tematyka przez mnie podjęta w pracy naukowej to zajęcie się rozwiązaniami elektrowni organicznej, w której zastosowano podkrytyczną jednoobiegową siłownię z zastosowaniem suchego lub mokrego czynnika roboczego [zał.4 pkt. II: E-26, E-27, E-29, E-30, L-48, L-50]. Siłownia ta zasilana jest wodą geotermalną. Powyższa siłownia może być stosowana nie tylko w elektrowni, ale także w elektrociepłowni. Aby ustalić zasadność jej stosowania w jednym z dwóch wymienionych przypadkach wprowadzono współczynnik ϕ , który zdefiniowano jako stosunek strumienia masowego wody przepływającego przez przeciwprądowy wymiennik ciepła, w którym podgrzewana jest ciecz czynnika roboczego w granicach temperatur skraplania i parowania, do strumienia masowego wody \dot{m}_s opuszczającego parowacz zgodnie z zależnością $\phi = \dot{m}_{s1}/\dot{m}_s$. Przyjęto, że znany jest strumień masowy wody \dot{m}_s o znanej temperaturze T_{s1} , który podgrzewany jest w wymienniku ciepła, stanowiącym górne źródło ciepła. Wykonano obliczenia siłowni z zastosowaniem różnych czynników roboczych (m. in. R227ea, RC318, R1234yf, R1234ze) dla różnych temperatur parowania z uwzględnieniem temperatur bliskopodkrytycznych dla wybranych temperatur

wody zasilającej. Opracowano odpowiednie wykresy ilustrujące zakresy zastosowań jednoobiegowej siłowni w elektrowni lub elektrociepłowni. Prace w tej tematyce będą rozwijane w dalszej mojej pracy naukowej.

A handwritten signature in blue ink, reading "Tomasz Kujawa". The signature is written in a cursive style with a long, sweeping tail.