



**POLITECHNIKA POZNAŃSKA**

Wydział Inżynierii Mechanicznej

Instytut Technologii Mechanicznej



## **PRACA DOKTORSKA**

# **Układ chłodzenia form wtryskowych stosowany w warunkach dynamicznych zmian temperatury (RHCM)**

mgr inż. Paweł MUSZYŃSKI

Promotor:  
Prof. dr hab. inż. Roman STANIEK

Promotor pomocniczy:  
dr inż. Krzysztof MROZEK

Poznań, 2021



## Spis treści

<b>STRESZCZENIE .....</b>	<b>5</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>6</b>
<b>WYKAZ OZNACZEŃ.....</b>	<b>7</b>
<b>1. WPROWADZENIE .....</b>	<b>11</b>
<b>2. PRZEGLĄD STANU WIEDZY.....</b>	<b>13</b>
2.1. <b>PODSTAWY TEORETYCZNE PROCESU WTRYSKIWANIA TWORZYW TERMOPLASTYCZNYCH.....</b>	<b>13</b>
2.1.1. <i>Proces wtryskiwania ze stałą temperaturą formy (CIM – Conventional Injection Moulding) .</i>	<i>17</i>
2.1.2. <i>Proces wtryskiwania w technologii dynamicznych zmian temperatury (RHCM – Rapid Heat Cycle Moulding) .....</i>	<i>18</i>
2.1.3. <i>Kategoryzacja wad wyprasek wtryskowych powstających w wyniku nieprawidłowego chłodzenia.....</i>	<i>20</i>
2.2. <b>PODSTAWY TEORETYCZNE PROCESU WYMIANY CIEPŁA W FORMACH WTRYSKOWYCH .....</b>	<b>24</b>
2.3. <b>MECHANIZMY INTENSYFIKOWANIA WYMIANY CIEPŁA .....</b>	<b>29</b>
2.4. <b>METODY CHŁODZENIA FORM WTRYSKOWYCH STOSOWANE W PRZEMYSŁE .....</b>	<b>38</b>
2.4.1. <i>Konwencjonalne układy chłodzenia.....</i>	<i>40</i>
2.4.2. <i>Innowacyjne metody chłodzenia form wtryskowych.....</i>	<i>42</i>
<b>3. CEL, SPOSÓB ROZWIĄZANIA PROBLEMU I ZAKRES PRACY .....</b>	<b>48</b>
<b>4. ANALIZA WPŁYWU SZYBKIEGO CHŁODZENIA FORMY NA STRUKTURĘ WYPRASEK.....</b>	<b>50</b>
4.1. <b>METODYKA BADAŃ .....</b>	<b>52</b>
4.2. <b>ANALIZA WYNIKÓW.....</b>	<b>53</b>
<b>5. OPRACOWANIE ZAŁOŻEŃ KONSTRUKCYJNYCH UKŁADU CHŁODZENIA I ANALIZA ORAZ BADANIA SYMULACYJNE .....</b>	<b>58</b>
5.1. <b>OPRACOWANIE ZAŁOŻEŃ KONSTRUKCYJNYCH .....</b>	<b>58</b>
5.1.1. <i>Dobór materiału na wkładki badawcze .....</i>	<i>58</i>
5.1.2. <i>Wybór kształtu kanałów oraz analiza ich technologiczności i kosztów wykonania.....</i>	<i>67</i>
5.2. <b>ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI I DOBÓR CIECZY CHŁODZĄCEJ.....</b>	<b>72</b>
5.3. <b>BADANIA SYMULACYJNE PROCESU CHŁODZENIA FORM WTRYSKOWYCH .....</b>	<b>80</b>
5.3.1. <i>Opracowanie modelu badawczego .....</i>	<i>80</i>
5.3.2. <i>Wpływ materiału wkładów chłodzących na efektywność chłodzenia .....</i>	<i>85</i>
5.3.3. <i>Wpływ kształtu kanału na efektywność chłodzenia .....</i>	<i>88</i>
<b>6. BUDOWA PROTOTYPÓW WYBRANYCH ELEMENTÓW UKŁADU CHŁODZENIA .....</b>	<b>93</b>
<b>7. BADANIA DOŚWIADCZALNE PROTOTYPOWEGO UKŁADU CHŁODZENIA .....</b>	<b>97</b>
7.1. <b>STANOWISKO BADAWCZE .....</b>	<b>97</b>
7.2. <b>OPRACOWANIE METODYKI I PROGRAMU BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH .....</b>	<b>103</b>
7.3. <b>BADANIA I ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW .....</b>	<b>104</b>
7.4. <b>ANALIZA PORÓWNAWCZA ORAZ OPTIMALIZACJA PROCESU CHŁODZENIA .....</b>	<b>115</b>
<b>8. PODSUMOWANIE, WNIOSKI ORAZ KIERUNKI PRZYSZYŁYCH BADAŃ .....</b>	<b>122</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>126</b>
<b>ZAŁĄCZNIK 1. STUDIUM PRZYPADKU – ANALIZA OPŁACALNOŚCI STOSOWANIA NOWEGO UKŁADU CHŁODZENIA.....</b>	<b>135</b>



## Streszczenie

Praca dotyczy zagadnień związanych z badaniami układów chłodzenia form wtryskowych oraz ich konstrukcją. W rozprawie przedstawiono podstawy teoretyczne procesu wtryskiwania tworzyw sztucznych. Zaprezentowano przegląd metod produkcji opartych na wtryskiwaniu ze stałą temperaturą pracy formy wtryskowej CIM (Conventional Injection Molding) i z zastosowaniem technologii RHCM (Rapid Heat Cycle Molding). Kategoryzacji poddano wady wyprasek powstające w wyniku prowadzenia procesu chłodzenia w sposób niewłaściwy oraz przeanalizowano genzę ich powstawania. Następnie omówiono podstawy teoretyczne procesu wymiany ciepła w formach wtryskowych oraz mechanizmy jego intensyfikacji. Ponadto, dokonano podziału metod chłodzenia form wtryskowych na konwencjonalne oraz innowacyjne. W celu wskazania ważności podjętych badań przeprowadzono analizę wpływu szybkiego chłodzenia formy na strukturę wyprasek oraz zaprezentowano sposób doboru cieczy chłodzącej. Na podstawie przeprowadzonych analiz opracowano założenia konstrukcyjne, w których skupiono się na selekcji materiału na prototypowe wkładki chłodzące oraz wyborze kształtu kanałów chłodzących o zwiększonej czynnej powierzchni wymiany ciepła. Dla opracowanych geometrii kanałów chłodzących przeprowadzono badania symulacyjne procesu chłodzenia. Na bazie badań numerycznych zaprojektowano i wykonano prototypowe wkłady badawcze oraz wszystkie niezbędne elementy układu chłodzenia formy wtryskowej potrzebne do przeprowadzenia weryfikacji eksperymentalnej. Dodatkowo, zaprojektowano oraz zbudowano stanowisko badawcze, pracujące w trybie pół – automatycznym. Na podstawie otrzymanych wyników dokonano analizy porównawczej oraz przeprowadzono optymalizację procesu chłodzenia dla zaproponowanego układu. Ostatnią część dysertacji stanowią wnioski końcowe oraz studium przypadku, w którym przedstawiono analizę opłacalności stosowania nowego systemu chłodzenia.

## Summary

The present study concerns issues related to the research of a cooling systems and a design of injections moulds. The dissertation presents the theoretical basis of the plastics injection moulding process. Selected methods of injection molding production have been presented – Injection molding with constant operating temperature of the mould, which is called CIM (Conventional Injection Molding) and RHCM (Rapid Heat Cycle Molding) technology. Next, the common defects of moldings resulting of the improper cooling process have been categorized and the genesis of their development has been analyzed. Then, theoretical foundations of the heat transfer process in injection moulds and the mechanisms of its intensification have been discussed. Moreover, the injection moulds cooling methods have been divided into conventional and innovative. In order to indicate the validity of the undertaken research, the analysis of the influence of rapid cooling of the mould on the structure of plastics products has been carried out. At this point the method of selecting cooling liquid has been also presented. On the basis of the conducted analysis the design assumptions has been developed. During these activities, the focus was primarily on the selection of materials for the prototype cooling inserts and the selection of the shape of cooling channels with an increased active heat exchange surface. The simulation studies of the cooling process have been executed for the devised geometries of the cooling channels. The prototype inserts have been designed and manufactured on the grounds of the simulation studies. In addition, all necessary elements of the injection mold cooling system, which were needed for experimental verification, have been designed and produced. After that, the test stand has been designed and built (operating in a semi – automatic mode). Based on the obtained results, the comparative analysis and the optimization of the cooling process for the proposed system has been performed. The final part of dissertation consists of conclusions and a case study in which an analysis of profitability of using the new cooling system has been presented.

## Wykaz oznaczeń

### Litery greckie

$\alpha$	[W/m <sup>2</sup> K]	– współczynnik przenikania ciepła
$\alpha_T$	[m <sup>2</sup> /s]	– dyfuzyjność termiczna
$\beta$	[°]	– kąt pochylenia ścianki żebra
$\beta_w$	[W/m <sup>2</sup> K]	– współczynnik przenikania ciepła do stołów wtryskarki
$\beta_{isol}$	[W/m <sup>2</sup> K]	– współczynnik przenikania ciepła w przypadku dla płyt izolacyjnych
$\varepsilon$	[-]	– współczynnik emisyjności
$\lambda$	[W/mK]	– współczynnik przewodzenia ciepła
$\lambda_w$	[W/mK]	– współczynnik przewodzenia ciepła materiału płyt mocujących formy
$\lambda_{isol}$	[W/mK]	– współczynnik przewodzenia ciepła materiału płyt izolacyjnych
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	– gęstość substancji
$\eta$	[Pas]	– współczynnik lepkości dynamicznej
$\tau$	[N/m <sup>2</sup> ]	– naprężenia ścinające
$\bar{\tau}_{eff}$	[-]	– tensor naprężeń

### Litery łacińskie

$A_A$	[m <sup>2</sup> ]	– suma powierzchni mocowania form (stołów wtryskarki)
$A_k$	[m <sup>2</sup> ]	– pole powierzchni przepływu
$A_S$	[m <sup>2</sup> ]	– powierzchnia zewnętrzna formy wtryskowej
$A_{TR}$	[-]	– płaszczyzna podziału formy
$c$	[J/kgK]	– ciepło właściwe (tworzywa)
$c_{1-3}$	[-]	– stałe materiałowe
$c_T$	[J/kg]	– ciepło topnienia (tworzywa)
$C_p$	[J/kgK]	– ciepło właściwe cieczy chłodzącej
$C_S$	[-]	– współczynnik emisyjności dla ciała doskonale czarnego
$d, D$	[m]	– średnica kanału chłodzącego
$D_S$	[m]	– średnica ślimaka wylączarki
$E$	[J]	– energia
$E_{fs_{ch}}$	[%]	– współczynnik odbioru ciepła (symulacja)
$E_{fs_{ch-śr}}$	[%]	– średni współczynnik odbioru ciepła (symulacja)
$E_{fd_{ch}}$	[%]	– współczynnik odbioru ciepła (doświadczenie)

$Efd_{ch-sr}$	[%]	– średni współczynnik odbioru ciepła (doświadczenie)
$f_D$	[-]	– współczynnik oporu Darcy'ego
$f_p$	[s]	– częstość próbkowania
$\vec{F}$	[-]	– wektor sił masowych działających na ciecz
$g$	[m]	– grubość ścianki wypraski
$h$	[J]	– entalpia
$H$	[-]	– współczynnik wysokości żebra
$H_m$	[m]	– wysokość formy
$L, L_k$	[m]	– długość kanału chłodzącego
$L_S$	[m]	– długość ślimaka wytłaczarki
$m$	[kg]	– masa
$M$	[-]	– liczba żeber
$Nu$	[-]	– liczba Nusselta
$p$	[Pa]	– ciśnienie
$P_{do}$	[Pa]	– ciśnienie na wlocie do układu badawczego
$P_{wy}$	[Pa]	– ciśnienie na wyjściu z układu badawczego
$Pr$	[-]	– liczba Prandtla
$q_{PR}$	[W/m <sup>2</sup> ]	– gęstość przepływu ciepła
$Q$	[l/min]	– objętościowe natężenie przepływu
$\dot{Q}_{CH}$	[W]	– strumień ciepła odprowadzany przez układ chłodzący [W]
$\dot{Q}_{DM}$	[W]	– strumień ciepła dostarczony przez dodatkowe medium [W]
$\dot{Q}_{GK}$	[W]	– strumień ciepła dostarczony przez system gorąco – kanałowy [W]
$\dot{Q}_{KT}$	[W]	– strumień ciepła związany ze zjawiskiem konwekcji termicznej [W]
$\dot{Q}_M$	[W]	– strumień ciepła odprowadzany do elementów wtryskarki [W]
$\dot{Q}_O$	[W]	– strumień ciepła przekazywany do otoczenia [W]
$\dot{Q}_{PR}$	[W]	– strumień ciepła związany ze zjawiskiem promieniowania [W]
$\dot{Q}_T$	[W]	– strumień ciepła doprowadzany do formy wtryskowej [W]
$\dot{Q}_W$	[W]	– ciepło akumulowane w wyprasce [W]
$r_{1-4}$	[m]	– promień kanałów uźebrowanych
$R_e$	[MPa]	– granica plastyczności
$R_m$	[MPa]	– wytrzymałość na rozciąganie
$Re$	[-]	– liczba Reynoldsa
$S_{isol}$	[m]	– grubość płyty termoizolacyjnej
$t$	[s]	– czas



$t_c$	[s]	– czas cyklu
$t_{ch}$	[s]	– czas chłodzenia
$t_{cp}$	[s]	– czas cyklu pomiarowego podczas badań doświadczalnych
$t_n$	[s]	– czas nagrzewania
$t_{off}$	[s]	– czas otwarcia formy
$t_{zest}$	[s]	– czas zestalenia polimeru w formie
$T$	[°C]	– temperatura
$T_{uw}, T_1$	[°C]	– temperatura uwolnienia wypraski z gniazda formującego
$T_f$	[°C]	– temperatura formy
$T_i$	[°C]	– temperatura początkowa wkładki
$T_{in}$	[°C]	– temperatura cieczy chłodzącej na wlocie
$T_{kr}$	[°C]	– temperatura krystalizacji tworzywa sztucznego
$T_o$	[°C]	– temperatura otoczenia
$T_{pf}$	[°C]	– temperatura powierzchni formującej
$T_{top}$	[°C]	– temperatura topnienia tworzywa sztucznego
$T_{tw}$	[°C]	– temperatura tworzywa sztucznego
$T_w, T_2$	[°C]	– temperatura wtrysku
$u$	[m/s]	– prędkość przepływu cieczy
$u_m$	[kg/s]	– masowa prędkość przepływu
$U_{in}$	[m/s]	– prędkość cieczy na wlocie
$V_{ch}$	[s]	– szybkość chłodzenia (pomiar DSC)
$V_g$	[s]	– szybkość grzania (pomiar DSC)
$W_{1-6}$	[s]	– pomiar czasu dla zadanej temperatury
$x$	[m]	– odległość pomiędzy sąsiadującymi kanałami
$X_{kr}$	[%]	– stopień krystaliczności



## 1. Wprowadzenie

Już od wielu lat technologia wtryskiwania tworzyw sztucznych jest jedną z najintensywniej rozwijających się metod formowania wyrobów z tworzyw sztucznych. Znajduje zastosowanie niemalże we wszystkich gałęziach przemysłu począwszy od produkcji zabawek, RTV/AGD, sprzętu elektronicznego, sprzętu medycznego, a skończywszy na przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym i chemicznym. Coraz częściej zdarza się jednak, że oczekiwania klientów w stosunku do estetyki, jakości, właściwości mechanicznych oraz użytkowych wobec wyprasek stają się niemożliwe do spełnienia w przypadku zastosowania konwencjonalnego wtryskiwania. Z tego powodu aktualnym trendem w dziedzinie formowania wtryskowego jest wykorzystywanie form pracujących w cyklu dynamicznych zmian temperatury.

Zastosowanie technologii szybkiej kontroli temperatury formy doprowadziło do podziału procesu wtrysku na dwa główne cykle – cykl grzania i cykl chłodzenia, ściśle zsynchronizowane z pracą wtryskarki i założonym przez technologa profilem procesu. W momencie wtrysku formę podgrzewa się do temperatury bliskiej temperaturze uplastycznionego tworzywa w celu poprawy jego płynięcia i lepszego odwzorowania kształtów formujących. Następnie, po całkowitym wypełnieniu wnęki formy, rozpoczyna się faza jej chłodzenia w celu jak najszybszego uwolnienia (wypchnięcia) gotowej wypraski. Kluczowym aspektem w trakcie przebiegu procesu formowania wtryskowego jest czas trwania fazy chłodzenia. Stanowi ona zazwyczaj 50 – 80% czasu całego cyklu i jest jednym z najważniejszych etapów. W przypadku pracy form w technologii dynamicznych zmian temperatury dodatkowym problemem staje się wysoka temperatura wcześniej nagranych powierzchni formujących. Stąd konieczne staje się poszukiwanie układów chłodzenia o wyższej wydajności i szybkości odbioru ciepła. Ponadto odprowadzanie ciepła od wypraski i płyt (wkładów) formujących musi przebiegać w sposób równomierny, aby uniknąć powstawania nadmiernych naprężeń własnych mogących powodować deformacje wypraski. Ściślej ujmując, dynamika chłodzenia musi być odpowiednio dopasowana do rodzaju przetwarzanego tworzywa, ponieważ zbyt wolne obniżanie temperatury wypraski powoduje spadek jej naprężeń własnych i powstawanie dużego skurczu. Z kolei zbyt szybkie chłodzenie (tzw. zamrażanie wyprasek) może powodować duże naprężenia i brak skurczu pierwotnego, z równoczesnym powstawaniem skurczu wtórnego. Skutkami skurczu wtórnego są, między innymi wypaczenia, pękanie wyprasek oraz pojawianie się linii naprężeniowych po pewnym czasie od wyjęcia części z formy wtryskowej.

Wymagania stawiane wyrobom z tworzyw sztucznych są coraz wyższe, dlatego koniecznością staje się ciągłe udoskonalanie technologii ich wytwarzania, w tym wtryskiwania. Nowoczesne tendencje rozwojowe wynikają z dążenia do poprawy jakości produkowanych wyrobów przy równoczesnym ograniczeniu kosztów i czasu produkcji. Dlatego tak ważnymi aspektami stają się odpowiedni wybór metody chłodzenia oraz zaprojektowanie układu regulacji temperatury, które zapewnią skuteczną wymianę ciepła w formie wtryskowej. Autor proponuje zastosowanie kanałów chłodzących o zwiększonej aktywnej powierzchni wymiany ciepła, jako metodę pozwalającą na dynamiczny odbiór ciepła od wypraski i powierzchni formujących, z jednoczesnym zredukowaniem czasu fazy chłodzenia.

W pracy przedstawiono obecnie stosowane metody produkcji wyprasek wtryskowych oparte na konwencjonalnym procesie wtryskiwania (stała temperatura pracy formy), jak i z wykorzystaniem technologii RHCM (Rapid Heat Cycle Molding). Zaprezentowano znane metody chłodzenia form wtryskowych, zarówno konwencjonalne jak i stosowane w technologii dynamicznych zmian temperatury. Dokonano podziału powszechnie występujących wad wyprasek, wynikających z nieprawidłowego prowadzenia procesu chłodzenia lub z błędnie dobranej metody chłodzenia. Na podstawie kompleksowego przeglądu literatury oraz doświadczenia autora opracowano kanały chłodzące o zmiennej geometrii przekroju poprzecznego, które poddano badaniom symulacyjnym. Analiza numeryczna pozwoliła na wytypowanie, spośród zaproponowanych geometrii, kanałów chłodzących charakteryzujących się największą efektywnością odbioru ciepła. Bazując na otrzymanych rezultatach, zaprojektowano oraz zbadano doświadczalnie prototypowy układ chłodzenia. Na podstawie otrzymanych wyników wybrano kanał chłodzący, który zapewnił najskuteczniejsze i najbardziej równomierne odprowadzenie ciepła od badanej wkładki oraz określono najkorzystniejsze parametry procesu chłodzenia.

Niniejsza praca ma charakter badawczo – rozwojowy i była realizowana w ramach projektu badawczego LIDER/006/143/L-5/13/NCBR/2014 współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

## 2. Przegląd stanu wiedzy

Przemysł przetwórstwa tworzyw sztucznych warunkuje rozwój wielu sektorów gospodarki, począwszy od artykułów gospodarstwa domowego, medycyny, przemysłu opakowań, budownictwa, motoryzacji, wyrobów przemysłowych, aż do lotnictwa i technik kosmicznych [106]. Zakres stosowania tworzyw jest w ciągłej fazie wzrostu, ponieważ pozwala na obniżenie nie tylko kosztów wyrobów końcowych, w których je zastosowano (np. samochodów, samolotów), ale dodatkowo obniża koszty ich użytkowania. Najnowsze dane rynkowe dotyczące przemysłu tworzyw sztucznych wskazują na dynamiczny rozwój – produkcję tworzyw w roku 2019 na świecie szacuje się na około 359 mln ton (wzrost o około 4% w stosunku do roku poprzedniego), przy czym największym producentem są Chiny (30% światowej produkcji). W Europie w roku 2019 wyprodukowano ponad 61,8 mln ton tworzyw sztucznych [134].

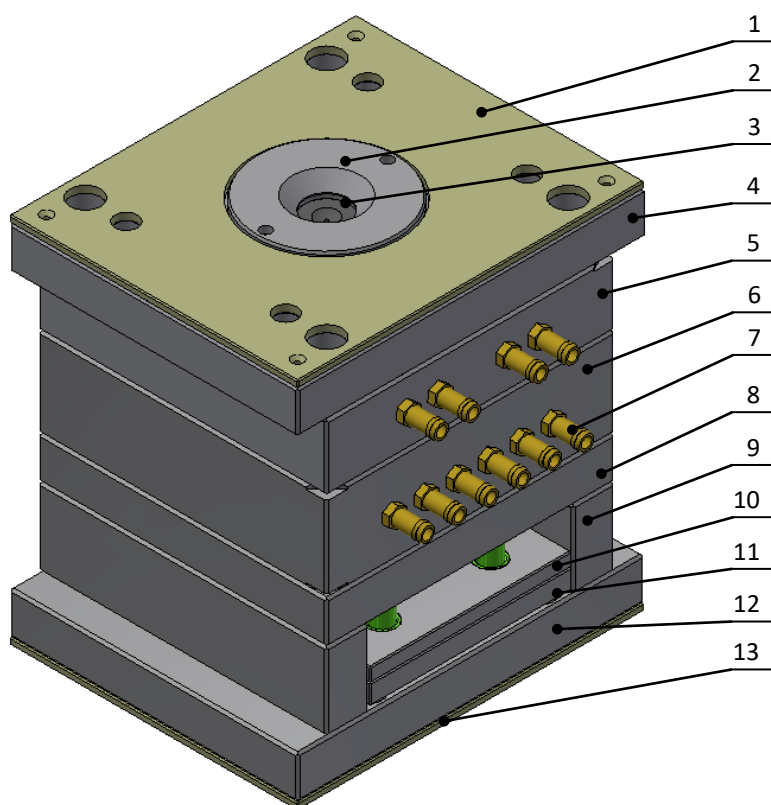
Powyższe dane doskonale obrazują konieczność równoczesnego rozwoju technologii przetwórstwa tworzyw. Ciągły rozwój technologiczny, zakładający minimalizację kosztów wytwarzania przy równoczesnej poprawie jakości produktu finalnego oraz ciągłego skracania czasu produkcyjnego, wymusza konieczności implementacji najnowszych rozwiązań technologicznych i efektów innowacyjnych badań. Aktualnie największy nacisk na badania i doskonalenie wywiera się na technologię wtryskiwania, która pozwala na wytwarzanie elementów o najbardziej zróżnicowanym stopniu skomplikowania, przy zachowaniu wysokiego progu precyzji kształtów, tolerancji wymiarowej, powtarzalności oraz efektywności.

### 2.1. Podstawy teoretyczne procesu wtryskiwania tworzyw termoplastycznych

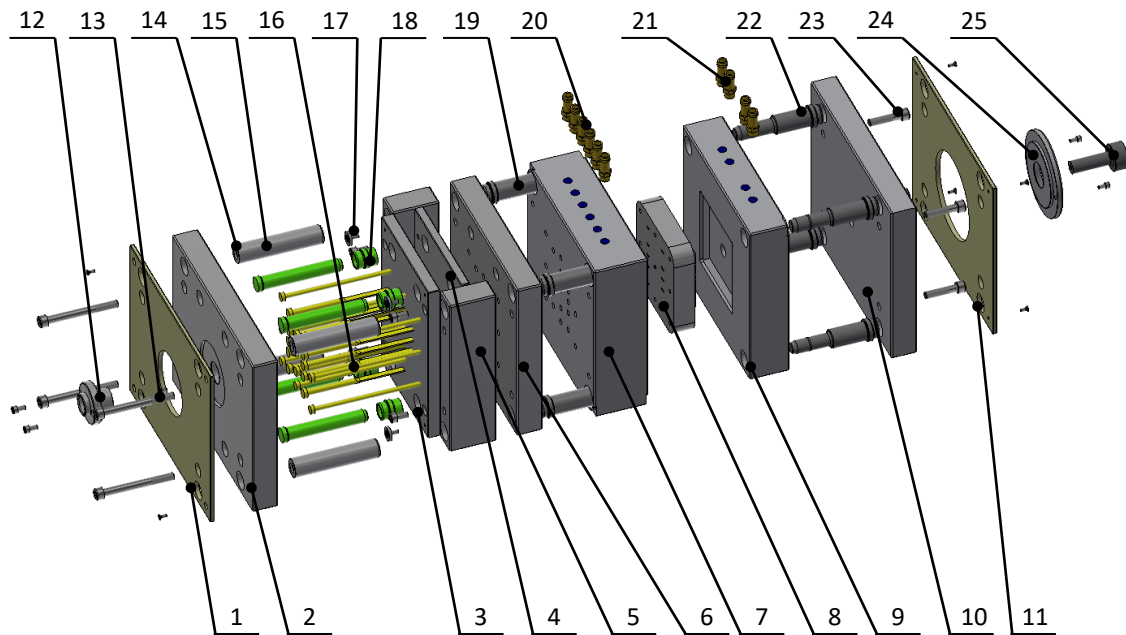
Formowanie wtryskowe jest procesem pozwalającym na ekonomiczne wytwarzanie elementów z tworzyw sztucznych o zróżnicowanych, nierzadko bardzo skomplikowanych, kształtach, z zachowaniem wąskiego (jak na tworzywa) pola tolerancji wymiarowej [30, 41, 42]. Przed uformowaniem jednak jakiegokolwiek części należy zaprojektować, wyprodukować oraz uruchomić formę wtryskową, która sama w sobie jest bardzo skomplikowanym narzędziem, złożonym z wielu elementów poddawanych setkom tysięcy, a nawet milionom cykli zmiany temperatury i obciążeń. Podstawową funkcją formy jest umożliwienie wypełnienia uplastycznionym tworzywem gniazda (lub gniazd) formującego i uformowanie wyrobu, który odwzorowuje jego ściśle określony kształt. Drugą podstawową funkcją formy

wtryskowej jest efektywne i równomierne odprowadzenie ciepła od gorącego tworzywa, natomiast trzecią umożliwienie usuwania wyprasek w szybki i powtarzalny sposób [141].

Twierdzi się, że to właśnie forma wtryskowa stanowi najważniejszy element składowy całego cyklu wtryskiwania, ponieważ bezpośrednio wpływa na właściwości mechaniczne, użytkowe, estetykę oraz jakość wyprodukowanych wyrobów. Zależności pomiędzy konstrukcją formy wtryskowej, użytymi komponentami oraz technikami wytwórczymi w stosunku do procesu produkcyjnego i otrzymywanych właściwości wyprasek, zostały przeanalizowane między innymi w pracach [16, 18, 44, 50, 98]. Na rysunkach 2.1 oraz 2.2 zaprezentowano budowę przykładowej formy wtryskowej.



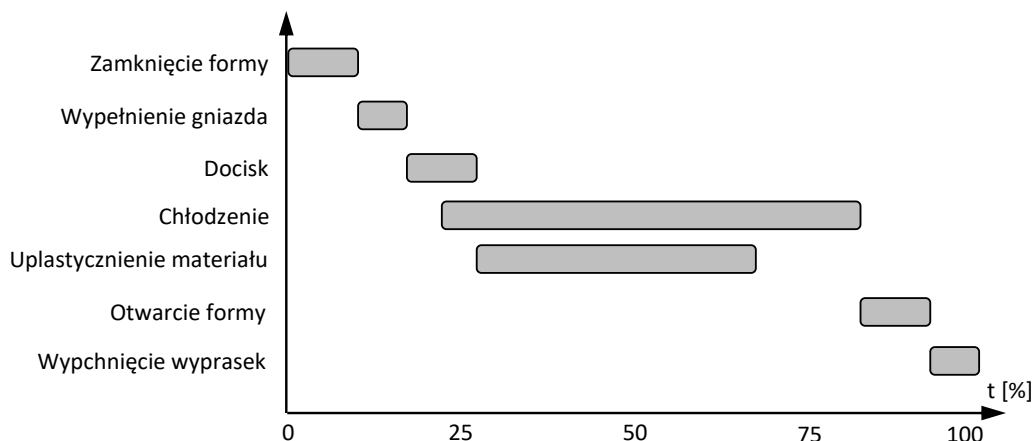
Rys. 2.1. Budowa formy wtryskowej, widok izometryczny: 1 – płyta termoizolacyjna matrycy, 2 – pierścień centrujący, 3 – tulejka wtryskowa, 4 – płyta mocująca matrycy, 5 – płyta formująca matrycowa, 6 – płyta formująca stemplowa, 7 – króciec wody, 8 – płyta podporowa stempla, 9 – listwa dystansowa, 10 – płyta wypychaczy, 11 – płyta oporowa wypychaczy, 12 – płyta mocująca stempla, 13 – płyta termoizolacyjna stempla



Rys. 2.2. Budowa formy wtryskowej, widok rozbity: 1 – płyta termoizolacyjna stempla, 2 – płyta mocująca stempla, 3 – płyta oporowa wypychaczy, 4 – płyta wypychaczy, 5 – listwa dystansowa, 6 – płyta podporowa stempla, 7 – płyta formująca stemplowa, 8 – wkład stemplowy, 9 – płyta matrycowa, 10 – płyta mocująca matrycy, 11 – płyta termoizolacyjna matrycy, 12 – pierścień centrujący stempla, 13 – śruba łącząca elementy stempla, 14 – tuleja ustalająca, 15 – słup prowadzący zestaw wypychaczy, 16 – wypychacze, 17 – podkładka dystansowa, 18 – tuleja prowadząca, 19 – tuleja ustalająca, 20, 21 – króciec wody, 22 – słup prowadzący, 23 – śruba łącząca elementy stempla, 24 – pierścień centrujący, 25 – tulejka wtryskowa

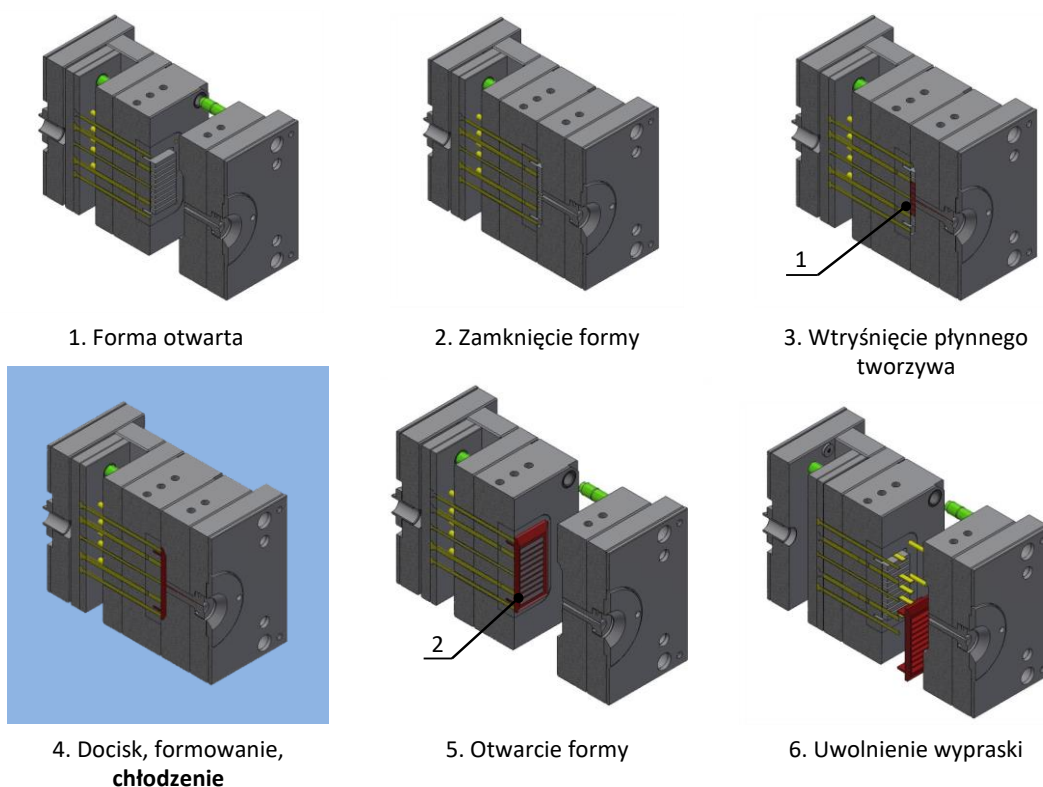
Cechą charakterystyczną procesu wtryskiwania jest to, że jest to proces cykliczny i można go podzielić na następujące fazy [105]:

- zamknięcie połówki formy,
- dosunięcie zespołu wtryskowego wtryskarki,
- wtrysnięcie uplastycznionego tworzywa do gniazda formującego,
- przełączenie ciśnienia wtrysku na ciśnienie docisku (tzw. faza docisku); **start procesu chłodzenia**,
- plastyfikacja tworzywa w postaci granulatu (przesunięcie ślimaka wtryskarki w położenie nastawne pod wpływem uplastycznionego tworzywa gromadzącego się przed jego czołem),
- odsunięcie zespołu wtryskowego wtryskarki; **zakończenie procesu chłodzenia**,
- otwarcie formy.



Rys. 2.3. Przykładowy czas procesu wtryskiwania dla wyrobu o maksymalnej grubości ścianki 2 mm [42]

Na rysunku 2.3 przedstawiono przybliżony czas trwania procesu wtryskiwania dla przykładowej części o maksymalnej grubości ścianki 2 mm, natomiast rysunek 2.4 ilustruje etapy cyklu. Czas wypełniania gniazda formującego uplastycznionym tworzywem (wtrysk) oraz czas fazy docisku stanowią nieznaczną część długości całego cyklu i zazwyczaj podlegają optymalizacji i minimalizacji. Dominującym etapem jest proces chłodzenia wypraski i formy, co jest spowodowane przede wszystkim ograniczoną szybkością przepływu ciepła ze stopu polimeru do stalowych elementów formy i następnie układu kanałów chłodzących, ze względu na niską dyfuzję termiczną tworzywa sztucznego.



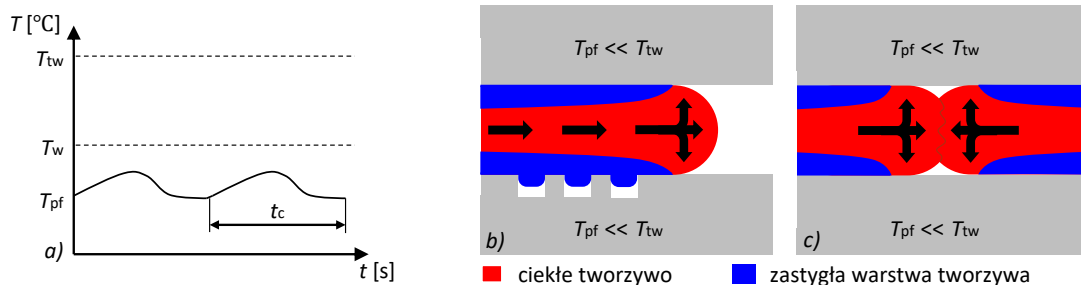
Rys. 2.4. Przebieg cyklu wtryskiwania: 1 – płynne tworzywo sztuczne, 2 – wypraska



Efekt finalny procesu formowania wtryskowego zależy w głównej mierze od: parametrów wypraski (kształt, materiał, technologiczność), konstrukcji formy wtryskowej oraz parametrów wtryskiwania (czas poszczególnych etapów, temperatura uplastycznionego tworzywa, ciśnienie, temperatura powierzchni formujących i całej formy) [7, 45, 86, 98, 108].

### 2.1.1. Proces wtryskiwania ze stałą temperaturą formy (CIM – Conventional Injection Moulding)

Proces wtryskiwania ze stałą temperaturą formy, nazywany często izotermicznym, polega na utrzymaniu stałej temperatury formy wtryskowej, dostosowanej do rodzaju przetwarzanego materiału. Przed uruchomieniem produkcji formę nagrzewa się do temperatury niższej niż temperatura wtrysku (w przypadku tworzyw termoplastycznych) lub do temperatury umożliwiającej proces sieciowania (w przypadku tworzyw termoutwardzalnych). Upłastycznione tworzywo jest wtryskiwane do gniazda formującego pod wysokim ciśnieniem, przechodząc kolejno przez dyszę, kanał główny oraz kanały doprowadzające [109]. W konsekwencji temperatura formy wtryskowej będzie utrzymywać się na stałym poziomie podczas całego cyklu wtryskiwania [93].



Rys. 2.5. Przykładowy rozkład temperatury w przypadku izotermicznego kierowania procesem wtrysku (proces konwencjonalny): a) przebieg wartości temperatury na powierzchniach formujących, b) odwzorowanie gniazda, c) łączenie płynących strug tworzywa [109]

Rysunek 2.5 ilustruje schematyczne zestawienie wartości temperatur poszczególnych elementów: wtryskiwanego materiału, powierzchni formującej oraz wypraski. Temperatura uplastycznionego tworzywa jest dużo wyższa niż temperatura powierzchni gniazda formującego, co skutkuje tym, że w momencie wtrysku tworzywo o wysokiej temperaturze styka się z relatywnie zimną ścianą układu wlewowego oraz gniazda. Powoduje to wychładzanie się stopu wraz z przebytą przez nie drogą w kanałach doprowadzających, a zarazem wzrost jego lepkości [2, 109]. W ten sposób powstają przymarznięte warstwy na powierzchni strugi (rys. 2.5b), które utrudniają wypełnienie najdalej położonych od punktu wtrysku obszarów

formujących. To niekorzystne zjawisko powoduje spadek płynności tworzywa, co wpływa również na problemy odwzorowania mikrostruktur gniazda formującego (rys. 2.5b) oraz powstawania widocznych linii łączenia płynących strug (rys. 2.5c) [28, 44, 45].

W przypadku procesu formowania wtryskowego ze stałą temperaturą formy, faza chłodzenia rozpoczyna się już w trakcie momentu wtrysku [109]. Zastosowanie stosunkowo niskiej temperatury powierzchni formujących ma wpływ na szybki odbiór ciepła od płyt (wkładów) formujących i wypraski, co pozwala na znaczne zredukowanie czasu trwania całego cyklu. Z drugiej jednak strony, krótki czas cyklu wynikający z zastosowania zbyt niskiej temperatury formy nie zrekompensuje produkcji wyprasek z wadami, która tym samym będzie nieekonomiczna.

### **2.1.2. Proces wtryskiwania w technologii dynamicznych zmian temperatury (RHCM – Rapid Heat Cycle Moulding)**

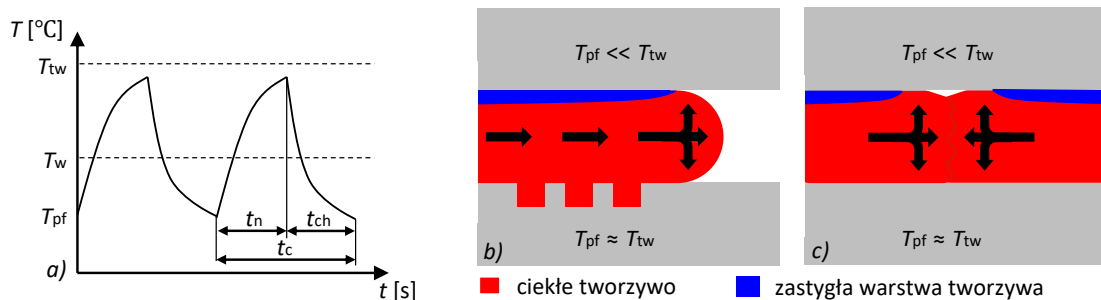
Alternatywą dla konwencjonalnego prowadzenia procesu wtrysku są technologie dynamicznych zmian temperatury formy [11-13, 19, 49, 77], które polegają na celowej kontroli temperatury ścianek formujących (rys. 2.6a). Powierzchnie formujące odpowiedzialne za kształtowanie wyprasek, nagrzewa się do temperatury bliskiej roztopionego w cylindrze wtryskarki tworzywa sztucznego, co pozwala na lepsze odwzorowanie geometrii gniazda formującego i jego kompletne wypełnienie (rys. 2.6b), oraz wpływa na jakość i właściwości użytkowe produkowanych wyprasek [8]. Ponadto uzyskane w ten sposób wyroby cechują się większą estetyką wykonania, brakiem deformacji i widocznych linii łączenia (rys. 2.6c) [102]. Po etapie wtrysku następuje proces wzmożonego chłodzenia formy oraz wypraski (rys. 2.6a), w celu bezpiecznego jej usunięcia z gniazda formującego. Zagadnienia dynamicznego sterowania temperaturą powierzchni formujących zostały szeroko opisane przez Giovanniego Luchettę i innych [20, 52] oraz Dimla [22].

Dodatkowa operacja nagrzewania wpływa na czas cyklu, a tym samym zmniejsza produktywność całego procesu. Dlatego tak ważnym aspektem, w kontekście wtryskiwania w technologii RHCM, staje się chłodzenie, które musi zapewnić dynamiczny i równomierny odbiór ciepła, przy jednoczesnej redukcji czasu gwarantującej zachowanie ekonomiki procesu. Obecnie znanych jest kilka metod dynamicznego nagrzewania form wtryskowych:

- parą wodną [14, 15, 39],
- cieczą (np. DMTC – Dynamic Mold Temperature Control, Variotherm) [130],

- grzałkami elektrycznymi, metody oporowe (np. RHC – Rapid Heating Ceramics) [91, 94, 95, 101],
- promieniowaniem podczerwonym (np. Variomelt IR) [9],
- indukcyjnie (np. InduMold, Cage System, 3iTech) [11-13, 56, 136].

Jednakże, od strony technologicznej, głównym problemem występującym w trakcie procesu wtrysku jest zapewnienie możliwie najefektywniejszego i równomiernego odprowadzenia ciepła od ochładzanego tworzywa tak, aby uniknąć powstania nadmiernych naprężeń własnych powodujących deformacje wypraski [78, 124, 132].



Rys. 2.6. Przykładowy rozkład temperatury w przypadku stosowania dynamicznych zmian temperatury formy (RHCM): a) przebieg wartości temperatury na powierzchniach formujących, b) odwzorowanie gniazda formującego, c) łączenie się strug tworzywa [109]

Technologie wtryskiwania wykorzystujące dynamiczne zmiany temperatury (RHCM) umożliwiają świadome kontrolowanie przebiegu i rozkładu temperatury w gnieździe formującym. Przynosi to wiele korzyści jakościowych i ekonomicznych, między innymi:

- znaczną poprawę właściwości mechanicznych i wizualnych wyprasek,
- eliminację linii płynięcia i linii łączenia się płynących strug tworzywa,
- stosowanie dłuższych dróg płynięcia, co pozwala na ograniczenie liczby punktów wtrysku,
- możliwość pracy przy obniżonym ciśnieniu dzięki eliminacji efektu przymarzania strugi,
- możliwość produkcji wyrobów o znacznie cieńszych ściankach w stosunku do konwencjonalnej metody wtrysku,
- znaczne obniżenie naprężeń własnych oraz zmniejszenie skurczu wypraski,
- ograniczenie występowania zapadnięć, jam i wciągnięć,
- eliminację wad w postaci przypaleń, smug, srebrzenia, zróżnicowania połysku powierzchni wypraski,

- możliwość produkcji wyprasek wykorzystywanych w przemyśle optycznym,
- możliwość precyzyjniejszego sterowania stopniem krystaliczności tworzywa.

### **2.1.3. Kategoryzacja wad wyprasek wtryskowych powstających w wyniku nieprawidłowego chłodzenia**

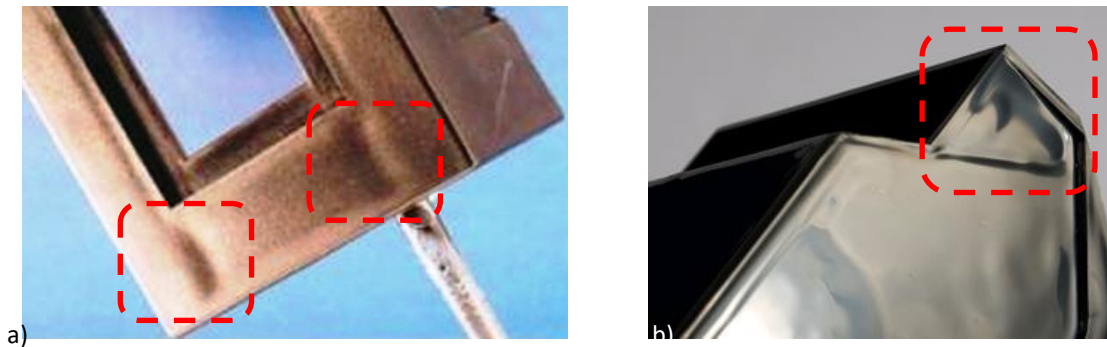
Jakość wyprasek oraz koszt ich produkcji są ściśle powiązane z właściwym funkcjonowaniem układu chłodzenia formy [105]. Nieprawidłowa kontrola temperatury formy jest główną przyczyną powstawania wielu wad w wypraskach. Do najważniejszych zaliczyć można:

- wciągi, zapadnięcia i jamy skurczowe,
- widoczne linie łączenia strumieni tworzywa,
- deformacje (wypaczenia),
- widoczne ślady wypychaczy,
- widoczne różnice w połysku powierzchni wyprasek.

Ponadto stwierdzono, że dynamika chłodzenia musi być odpowiednio dopasowana do rodzaju przetwarzanego tworzywa sztucznego, ponieważ zbyt wolne obniżanie temperatury wypraski powoduje spadek jej naprężeń własnych i powstawanie dużego skurczu. Z kolei zbyt szybkie chłodzenie (tzw. zamrażanie wyprasek) może prowadzić do powstawania dużych naprężeń i braku skurczu pierwotnego, z równoczesnym powstawaniem skurczu wtórnego [30]. Skutkami skurczu wtórnego są, między innymi wypaczenia, pękanie wyprasek oraz pojawianie się linii naprężeniowych po pewnym czasie od wyjęcia wyprodukowanej części z formy wtryskowej [65].

#### **Wciągi i zapadnięcia**

Wciągi i zapadnięcia to wady powstające w szczególności w obszarach występowania węzłów cieplnych stygnącej wypraski w wyniku zjawiska pierwotnego skurczu przetwórczego. Pod pojęciem skurczu przetwórczego rozumie się zmniejszenie objętości wyrobu względem wartości nominalnej (objętości gniazda formującego) podczas jego stygnięcia w formie oraz w krótkim okresie czasu po jej opuszczeniu [48, 117].

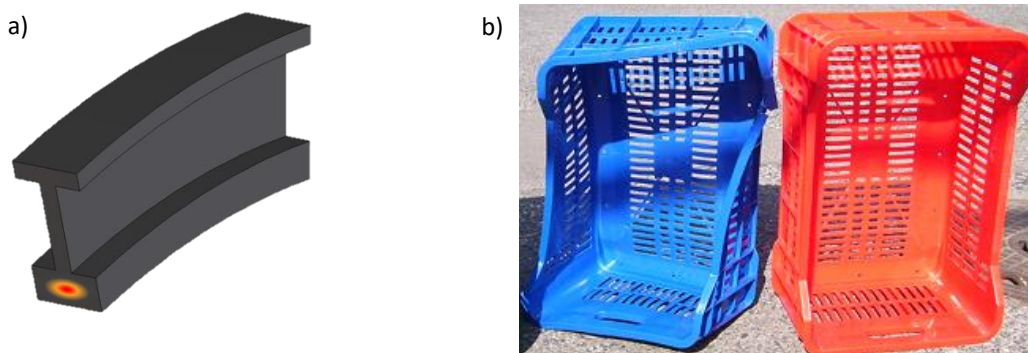


Rys. 2.7. Zapadnięcia wyprasek wywołane skurczem pierwotnym tworzywa: a) wcięcia powstałe w okolicach zgrubień, b) wcięcia w okolicach żeber wzmacniających; czerwonymi ramkami oznaczono omawiane wady [109, 142]

W praktyce wcięcia pojawiają się najczęściej w miejscach zgrubień (rys. 2.7a), łączenia żeber wzmacniających (rys. 2.7b), występowania kołków montażowych oraz obszarów, z których trudno jest odebrać ciepło. Ponadto występuje tendencja, że wraz ze zwiększaniem czasu chłodzenia wady te pogłębiają się. Podobne zjawiska fizykochemiczne zachodzą podczas występowania wad deformacji, często nazywanych wypaczeniem.

### Deformacje (wypaczenia)

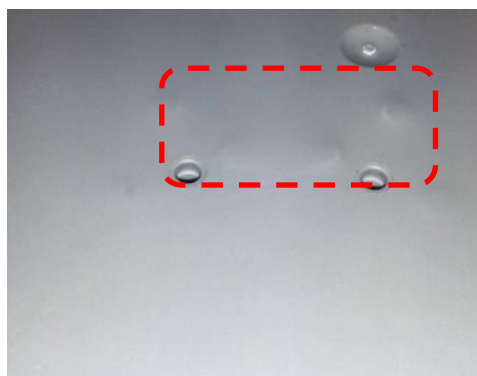
Wypaczenia to odstępstwa kształtu wypraski od kształtu nominalnego. W trakcie stygnięcia tworzywa w formie oraz chwilę po jej opuszczeniu dochodzi do zjawiska zmiany objętości, co związane jest z przybliżaniem się łańcuchów molekularnych [66, 117]. Wraz ze wzrostem czasu chłodzenia wzrasta stopień upakowania, a więc wypraska bardziej się kurczy. Kierunek skurczu bezpośrednio uwarunkowany jest kształtem i grubością ścianek w poszczególnych obszarach wypraski (rys. 2.8a, 2.8b). Konstruktor formy musi przewidzieć miejsca występowania węzłów cieplnych tak, aby zapewnić maksymalną równomierność chłodzenia wyrobu. W celu uniknięcia nadmiernego skurczu konieczne jest zapewnienie odpowiedniej dynamiki działania układu chłodzenia.



Rys. 2.8. Deformacja wypraski: a) wypaczenie wynikające z różnicy grubości ścianki, b) odkształcenie wynikające ze zbyt długiego czasu chłodzenia (po lewej skrzynka zdeformowana, po prawej prawidłowa) [126]

### Widoczne ślady wypychaczy

Nieodłącznym elementem prawidłowego funkcjonowania układu wypychania formy wtryskowej są wypychacze, które odpowiadają za bezpieczne usunięcie wypraski z gniazda formującego bez narażania jej na uszkodzenia. Funkcją dodatkową wypychaczy jest również odpowietrzenie gniazda formującego. Ich liczba i kształt zdeterminowane są parametrami geometrycznymi produkowanego wyrobu i typowane przez konstruktora w trakcie projektowania formy. Pole powierzchni spychania (suma powierzchni czołowych wszystkich zastosowanych wypychaczy w konstrukcji formy) powinna zostać dobrana w taki sposób, aby zapewnić równomierne uwolnienie wypraski. W przypadku nadmiernego skurczu pierwotnego artykułu (zbyt długiego czasu chłodzenia) dochodzi do obciśnięcia (obkurczenia) się go na stemplu, a siły skurczowe powodują powstanie nadmiernych naprężeń na powierzchniach przylegania wypychaczy, co w efekcie uwidacznia się na gotowych wyrobach (rys 2.9).

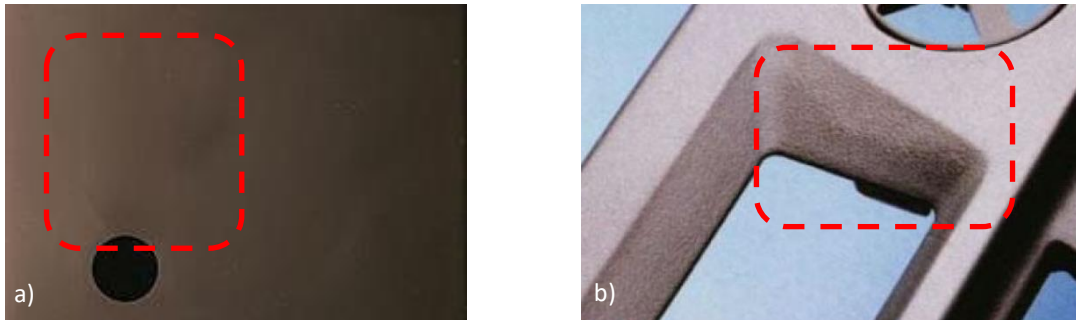


Rys. 2.9. Widoczne ślady wypychaczy na wyprasce

### Widoczne różnice połysku powierzchni wyprasek

Większość aktualnie projektowanych i następnie produkowanych wyprasek (w szczególności wyroby typu osłona, obudowa, zaślepka, pokrywa) konstruowana jest w postaci ściany z licznymi uźebrowaniami, o określonych walorach estetycznych. W zależności od przeznaczenia, widoczne ścianki przyjmują jedną z trzech struktur: połysk, mat (rys. 2.10a) lub fakturę (2.10b) [21]. Na spodniej części umieszczone są elementy wzmacniające (żebra), kołki montażowe, zaczepy, zgrubienia pod wypychacze i inne. Wprowadza to zróżnicowanie grubości ścianek, co w efekcie powoduje powstawanie lokalnych węzłów cieplnych. W obszarach, w których tworzywo zastyga w ostatniej fazie, dochodzi do skurczu, co jest powodem rozciągania schłodzonych już miejsc materiału. Powstanie przypowierzchniowych naprężeń rozciągających (odkształceń) przekłada się na zróżnicowanie połysku. Elementy produkowa-

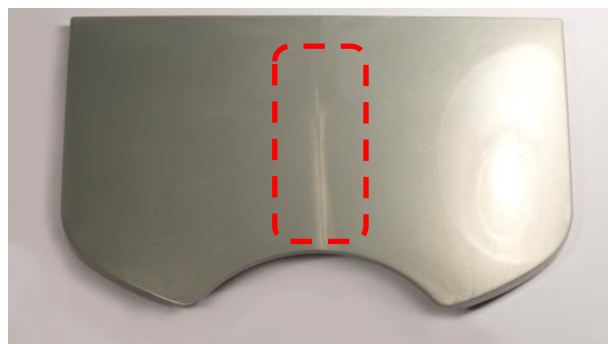
ne na potrzeby przemysłu RTV/AGD lub motoryzacyjnego są szczegółowo i rygorystycznie kontrolowane przyrządami pomiarowymi pod kątem zapewnienia założonego koloru i połysku. Dlatego układ chłodzenia form wtryskowych w tym przypadku stanowi jedno z ważniejszych zagadnień konstrukcyjnych i technologicznych.



Rys. 2.10. Różnice połysku na powierzchni wypraski: a) wypraska z powierzchnią matową, b) wypraska z powierzchnią fakturowaną [109].

### Widoczne linie łączenia strumieni tworzywa

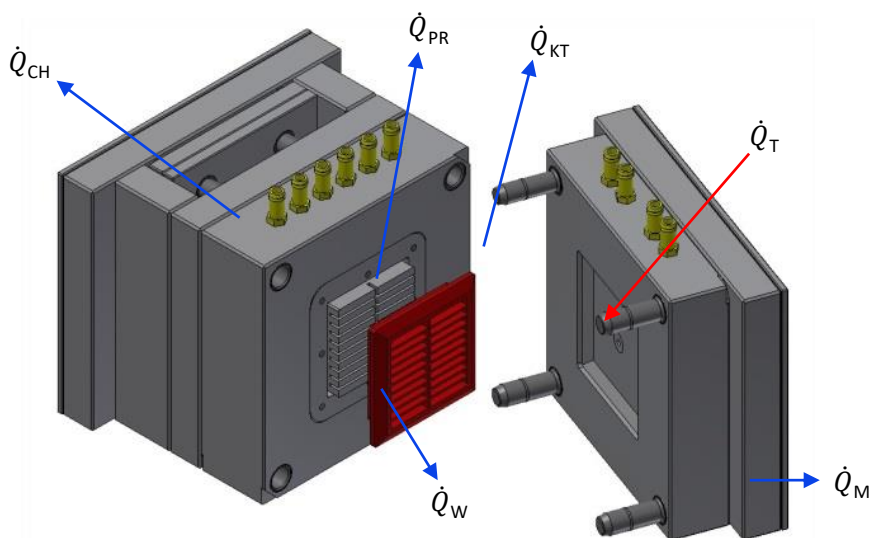
W większości przypadków proces wypełniania wnęki formy wtryskowej nie odbywa się poprzez płynięcie jednej strugi tworzywa. Najczęściej, nawet gdy zastosowany jest jeden punkt wtrysku, dochodzi do rozdzielnia płynącego materiału na dwie lub więcej strug, które w końcowym etapie formowania wyrobu „spotykają się”, tworząc linie łączenia (rys. 2.11) [9, 44, 45]. W obszarach wypraski, gdzie kształt formy sprzyja łączeniu się strumieni stopu, który nie jest dostatecznie uplastyczniony, mogą pojawić się widoczne ślady przypominające wyglądem rysy, przebarwienia wzdłużne lub pęknięcia. Bardzo często, oprócz negatywnego wpływu na estetykę i jakość wyrobu, linie łączenia mogą stanowić karby obniżające wytrzymałość mechaniczną wtryskiwanej wypraski, co często eliminuje jej wartość użytkową.



Rys. 2.11. Widoczne linie łączenia strug [142]

## 2.2. Podstawy teoretyczne procesu wymiany ciepła w formach wtryskowych

Proces wymiany ciepła w formach podczas wtryskiwania tworzyw sztucznych jest zjawiskiem złożonym, zależnym od wielu czynników [40, 68, 81]. Nierównomierny rozkład temperatury oraz wysokie jej gradienty pomiędzy poszczególnymi elementami konstrukcyjnymi formy wtryskowej powodują zróżnicowany skurcz i wypaczenia wyprasek. Błędy popełnione już podczas projektowania układu chłodzenia prowadzą do braku pełnej kontroli jego funkcjonowania, co determinuje ponoszeniem nadmiernych kosztów całego procesu. Aby skutecznie przeciwdziałać powyższym negatywnym zagadnieniom, należy zrozumieć zjawiska cieplne zachodzące podczas pracy formy wtryskowej i uzmysłowić sobie istotność prawidłowego doboru (projektu) systemu chłodzenia.



Rys. 2.12. Bilans cieplny formy wtryskowej [65, 81]

Bilans cieplny tradycyjnej formy wtryskowej przedstawiono na rys. 2.12. Strumień ciepła  $\dot{Q}_T$  doprowadzany jest do formy wraz z wtrysniętym, gorącym tworzywem sztucznym. Odprowadzanie ciepła z układu odbywa się na drodze promieniowania termicznego  $\dot{Q}_{PR}$ , konwekcji  $\dot{Q}_{KT}$  oraz przewodzenia  $\dot{Q}_M$  do sąsiednich ośrodków o niższej wartości temperatury, m.in. do medium chłodzącego (najczęściej woda) znajdującego się w zamkniętym układzie chłodzenia, stołu wtryskarki oraz otoczenia. Opcjonalnie forma może zostać wyposażona w system gorąco – kanałowy ( $\dot{Q}_{GK}$ ), który ma za zadanie utrzymywać wysoką temperaturę uplastycznionego tworzywa między następującymi po sobie cyklami wtrysku. Innym rozwiązaniem technologicznym jest celowe wprowadzenie dodatkowego medium grzejjego ( $\dot{Q}_{DM}$ ), które wykorzystywane jest we wcześniej opisanej w pracy metodzie RHCM. Równanie (2.1) przedstawia zapis matematyczny bilansu cieplnego formy [81]:



$$\dot{Q}_T + (\dot{Q}_{GK} + \dot{Q}_{DM}) = \dot{Q}_{KT} + \dot{Q}_{PR} + \dot{Q}_{CH} + \dot{Q}_W + \dot{Q}_M, \quad (2.1)$$

gdzie suma poniższych składników stanowi wymianę ciepła z otoczeniem:

$$\dot{Q}_{KT} + \dot{Q}_{PR} + \dot{Q}_W + \dot{Q}_M = \dot{Q}_O. \quad (2.2)$$

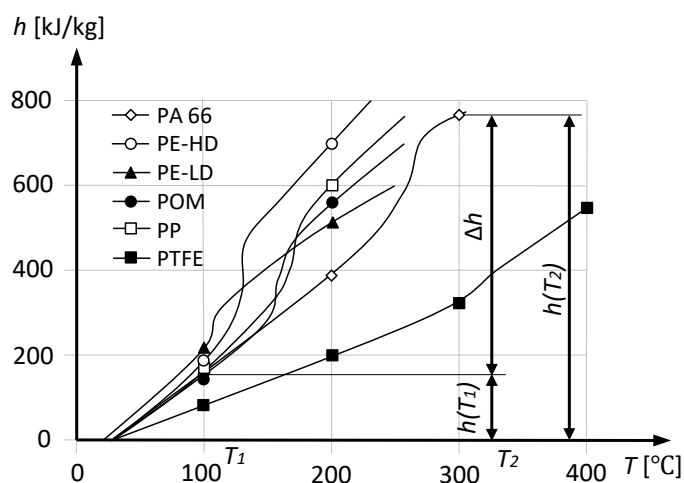
Stąd wyznaczyć można ilość ciepła odprowadzaną od układu poprzez system kanałów chłodzących (w przypadku grzania – ciepło doprowadzane):

$$\dot{Q}_{CH} = \dot{Q}_T + (\dot{Q}_{GK} + \dot{Q}_{DM}) - (\dot{Q}_{KT} + \dot{Q}_{PR} + \dot{Q}_W + \dot{Q}_M). \quad (2.3)$$

W celu określenia ilości ciepła, które należy odprowadzić z gniazda formującego, należy przeprowadzić analizę różnicy entalpii pomiędzy temperaturą wtryskiwanego stopu  $T_2$ , a temperaturą uwalnianej z gniazda formującego wypraski  $T_1$  [68]:

$$\dot{Q}_T = \frac{m \cdot \Delta h}{t}, \quad (2.4)$$

$$\Delta h = c(T_2 - T_1) + c_T. \quad (2.5)$$

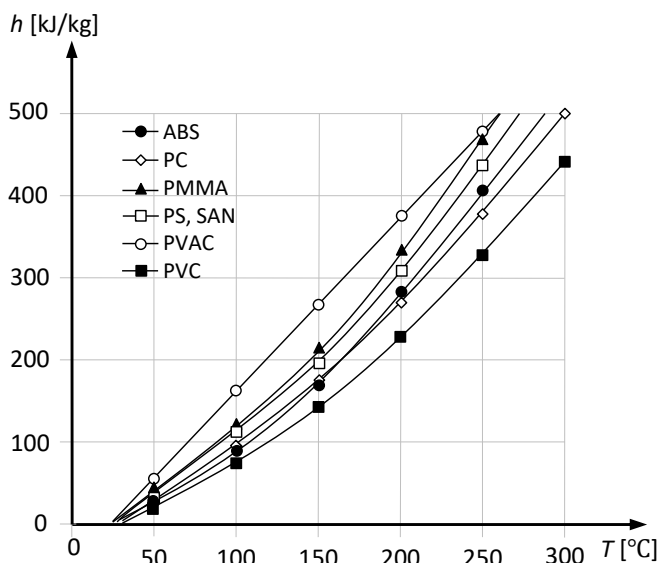


Rys. 2.13. Wykres entalpii wybranych tworzyw krystalicznych [68]

Analiza wykresów na rysunkach 2.13 i 2.14, z uwzględnieniem wzoru (2.4), pozwala na oszacowanie strumienia ciepła  $\dot{Q}_T$ , które należy odprowadzić z gniazda formującego (z podziałem na tworzywa krystaliczne i amorficzne).

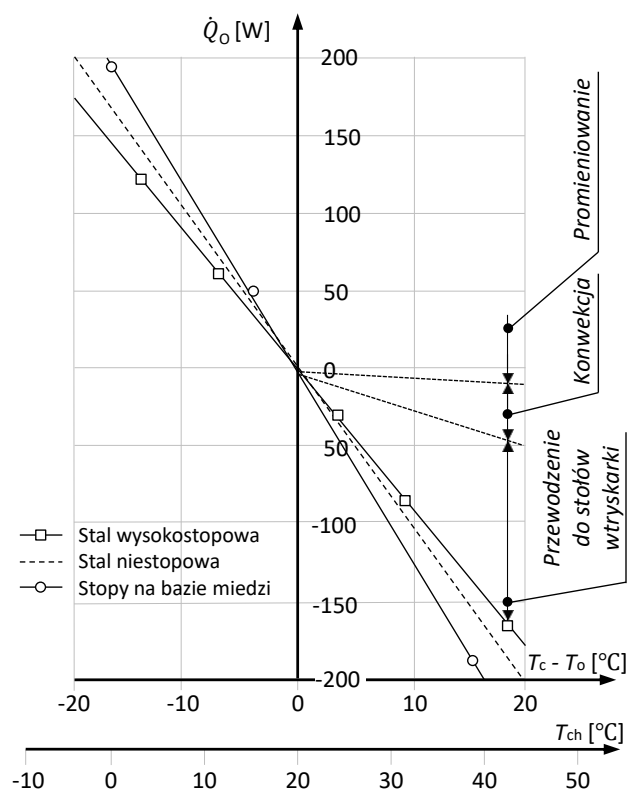
Powyższa analiza pozwala na określenie koniecznej wydajności układu chłodzenia w celu bezpiecznego usunięcia wypraski z gniazda formującego. Problemem staje się natomiast określenie wymiany ciepła z otoczeniem  $\dot{Q}_O$  ( $\dot{Q}_{KT} + \dot{Q}_{PR} + \dot{Q}_W + \dot{Q}_M$ ), która zgodnie z rys. 2.12, stanowi ważny czynnik podczas procesu wtryskiwania. Ponieważ wyznaczenie

i kontrolowanie wymiany ciepła z otoczeniem jest problematyczne ze względu na wysoką dynamikę procesu, należy ograniczyć je do minimum [105].



Rys. 2.14. Wykres entalpii wybranych tworzyw amorficznych [68]

Bardzo często w literaturze zjawiska cieplne występujące podczas pracy formy wtryskowej określane są stratami cieplnymi, czyli niepożądanym przeniesieniem ciepła do stołów wtryskarki (oraz innych jej elementów) oraz wskutek promieniowania i konwekcji do atmosfery (rys. 2.15 – przykładowy wykres bilansu strat cieplnych formy) [68].



Rys. 2.15. Bilans strat cieplnych formy wtryskowej (przykładowy) [68]

### 2.2.1. Konwekcja $\dot{Q}_{KT}$

Straty ciepłe w wyniku konwekcji opisuje się przy wykorzystaniu prawa Newtona w postaci [68]:

$$\dot{Q}_{KT} = A_S \cdot \alpha \cdot (T_f - T_o). \quad (2.6)$$

W praktyce przemysłowej zewnętrzna temperatura formy najczęściej jest nieznaną – kontroli temperatury zazwyczaj podlega obszar gniazda formującego, dlatego też do jej przybliżonego określenia opracowuje się wykresy korelacji pomiędzy różnicą temperatur formy i otoczenia, a temperaturą czynnika chłodzącego (grzewczego), w zależności od stosowanego materiału [68].

Równanie (2.6) opisujące konwekcję w procesie wtryskiwania odnosi się do przypadku, gdy forma wtryskowa jest zamknięta. Aby uszczegółwić zachodzącą wymianę ciepła pomiędzy formą a otoczeniem, należy rozpatrzyć sytuację, gdy forma zostaje otwarta w celu uwolnienia wypraski. Równanie (2.6) powinno zostać uzupełnione o następujący czynnik [68]:

$$A_{TR} \cdot \alpha \cdot (T_f - T_o) \cdot \frac{t_{off}}{t_c}. \quad (2.7)$$

W konsekwencji wzór (2.6) przyjmuje postać [68]:

$$\dot{Q}_{KT} = \alpha \cdot (T_f - T_o) \cdot \left( A_S + \frac{A_{TR} \cdot t_{off}}{t_c} \right). \quad (2.8)$$

### 2.2.2. Promieniowanie (radiacja) $\dot{Q}_{PR}$

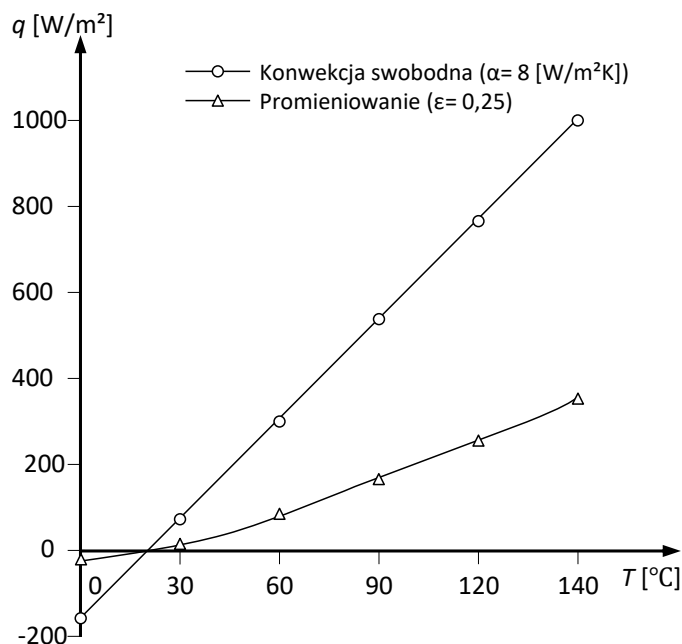
Straty ciepłe w wyniku promieniowania cieplnego definiowane są na podstawie prawa Stefana – Boltzmana [68]:

$$\dot{Q}_{PR} = A_S \cdot \varepsilon \cdot C_S \cdot \left[ \left( \frac{T_f}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_o}{100} \right)^4 \right], \quad (2.9)$$

$$q_{PR} = \varepsilon \cdot C_S \cdot \left[ \left( \frac{T_f}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_o}{100} \right)^4 \right]. \quad (2.10)$$

Składnik  $\varepsilon$  definiowany jest jako współczynnik emisyjności informujący o zdolności danego ciała do emisji promieniowania cieplnego. W zależności od zastosowanego materiału przyjmuje wartości z zakresu 0 – 1 (ciało doskonale czarne – 1, ciało doskonale białe – 0).

Wartość współczynnika emisyjności jest istotna w kontekście charakteru prowadzonych badań pomiaru temperatury, co zostanie bliżej przedstawione w kolejnych rozdziałach.



Rys. 2.16. Transfer ciepła w wyniku konwekcji oraz promieniowania (temperatura zewnętrzna  $T_o = 20^\circ\text{C}$ ) [68]

Porównując straty ciepła w wyniku promieniowania oraz konwekcji termicznej, przyjmuje się, że przy temperaturach powierzchni zewnętrznych formy dochodzących do  $90^\circ\text{C}$  straty ciepłone w wyniku promieniowania stanowią około 25% strat będących skutkiem zjawiska konwekcji [105]. Na rysunku (2.16) przedstawiono graficzną interpretację porównania tych dwóch składników transferu ciepła z formy.

### 2.2.3. Przewodzenie $\dot{Q}_M$

Straty ciepłone poprzez przewodzenie, przede wszystkim do stołów wtryskarki i innych jej elementów, stanowią największy udział ze wszystkich do tej pory analizowanych. Wyraża się je następującą zależnością [68]:

$$\dot{Q}_M = A_A \cdot \beta_w \cdot (T_f - T_o). \quad (2.11)$$

Straty ciepłone w wyniku zjawiska kondukcji są na tyle wysokie, że zaleca się stosowanie materiału termoizolacyjnego pomiędzy stołami wtryskarki, a płytami formy. W tym celu stosuje się specjalne płyty, które są odporne na działanie wysokiej temperatury, dochodzącej do  $300^\circ\text{C}$ , odporne na działanie środków chłodzących oraz przenoszą naciski rzędu 600 MPa. Współczynnik wymiany ciepła  $\lambda$  materiału termoizolacyjnego wynosi  $0,13 \text{ W/mK}$  [135],

natomiast jego skład jest tajemnicą handlową firm trudniących się sprzedażą normalistów do budowy form wtryskowych. W przypadku stosowania izolacji współczynnik przekazywania ciepła do stołów wtryskarki  $\beta_w$  przyjmuje następującą postać  $\beta_{isol}$  [68]:

$$\beta_{isol} = \frac{\beta_w}{1 + \frac{s_{isol} \cdot \lambda_w}{H_m \cdot \lambda_{isol}}} \quad (2.12)$$

### 2.3. Mechanizmy intensyfikowania wymiany ciepła

Obecnie wielu inżynierów zajmujących się techniką cieplną poszukuje nowych metod wymiany ciepła pomiędzy nagrzewanymi powierzchniami a otaczającymi je cieczami chłodzącymi. Szczególnie intensywne badania prowadzone są w zakresie intensyfikacji procesu chłodzenia form wtryskowych pracujących w cyklu dynamicznych zmian temperatury (RHCM). Wynika to z faktu, że aspekt chłodzenia wyprasek w cyklu formowania wtryskowego ma ogromny wpływ na ich właściwości, jakość, estetykę, kształt oraz wartości użytkowe [4]. Do głównych problemów występujących podczas chłodzenia form należy zapewnienie szybkiego, wydajnego, a zarazem równomiernego odbioru ciepła od ochładzanego materiału, co pozwala na bezpieczne uwolnienie wypraski z formy z jednoczesną redukcją powstawania nadmiernych naprężeń i niekontrolowanego skurczu formowanego wyrobu [48].

W dalszej części rozprawy autor skupił się na analizie istniejących mechanizmów intensyfikowania wymiany ciepła w zastosowaniach ogólnych, jak również pod kątem produktów uzyskiwanych na drodze przetwórstwa tworzyw sztucznych.

#### 2.3.1. Zagadnienia ogólne

Klasyfikacja mechanizmów i technik poprawy wymiany ciepła została przedstawiona m. in. w dwóch pozycjach literaturowych – Principles of Enhanced Heat Transfer autorstwa R. L. Webb i N. H. Kim [99] oraz Handbook of Heat Transfer autorstwa E. Bergles [5]. Przedstawiono w nich zagadnienia teoretyczne procesu wymiany ciepła oraz metody, poparte badaniami, intensyfikacji procesu chłodzenia (grzania). Przedstawiony został podział na metody aktywne oraz pasywne [5]. Mechanizmy zwiększania transferu ciepła, które wymagają zewnętrznego źródła energii nazywane są aktywnymi. Zaliczyć można do nich m. in. stosowanie zewnętrznych mieszalników lub zastosowanie wibracji powierzchniowych, co zostało opisane również w pracy [67].

Analiza metod aktywnych była przedmiotem badań pracy [36], w której autorzy przedstawili wyniki eksperymentów polegających na zwiększeniu przenoszenia ciepła poprzez zjawisko konwekcji. W tym celu opracowali mechanizm rozbijający warstwę graniczną, co doprowadziło do ponad 10 – krotnego wzrostu konwekcyjnego współczynnika przenoszenia ciepła w niektórych przypadkach.

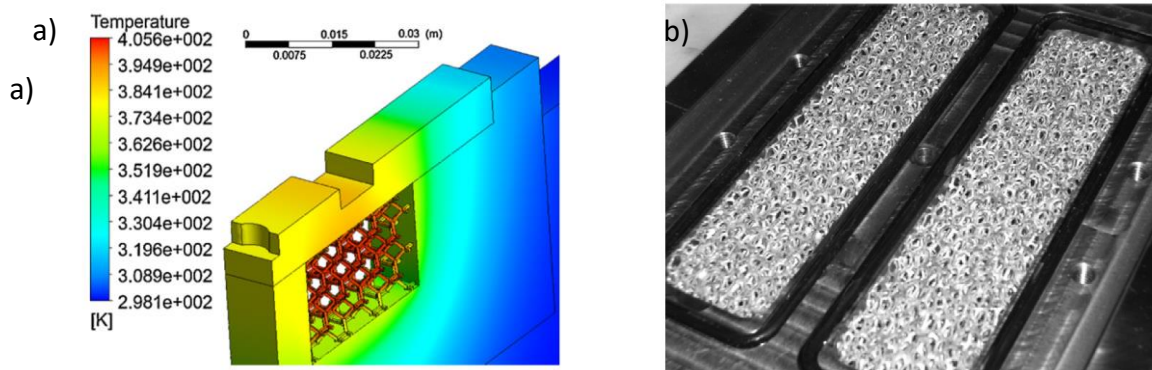
Metodami pasywnymi określa się z kolei wszystkie te, gdzie do poprawy procesu nie jest wymagane dostarczenie zewnętrznego źródła zasilania. Metody tego typu polegają przede wszystkim na: kontroli stanu powierzchni mającej kontakt z medium chłodzącym (chropowatość, rodzaj zastosowanej obróbki, kształt) [31, 32], stosowaniu generatorów zawirowań rozbijających laminarną warstwę przyścienną [10], stosowaniu uzwojonych wymienników ciepła z materiałów o wysokim współczynniku przenikania ciepła, wykorzystaniu struktur porowatych zwiększających aktywną powierzchnię wymiany ciepła [3, 19], czy poprzez użycie dodatków do chłodziw [5, 6, 99].

Współczesne badania w zakresie poprawy efektywności wymiany ciepła pomiędzy ośrodkami stałymi a cieciami skupiają się przede wszystkim na analizie wykorzystania uźebrowanych (żebra o zmiennych kształtach, mikro – żebra, powierzchnie kanałów uźebrowane wewnątrz/zewnątrz) kanałów chłodzących [1], materiałów o strukturze porowatej, generatorów wirów, nanociecz [88, 89, 104] oraz materiałów kompozytowych o wysokim współczynniku przewodności cieplnej. Kompleksowy raport najnowszych postępów w tym zakresie został zaprezentowany w pozycji [82]. Autorzy skupili się na przedstawieniu najefektywniejszych obecnie metod w zakresie transferu ciepła i dokonali ich porównania. W konkluzji swojej pracy zaprezentowali teoretyczne współczynniki wymiany ciepła w korelacji porównywanych metod.

### **2.3.2. Przetwórstwo tworzyw sztucznych – formy wtryskowe**

Wraz z rozwojem technologii RHCM trwają poszukiwania kluczowych jej aspektów, czyli szybkiego grzania i chłodzenia form wtryskowych. Pomimo szerokiego już w tej chwili stosowania wyżej wspomnianej techniki w przemyśle przetwórstwa tworzyw sztucznych, nadal trwają liczne badania w tej materii. O ile obszar eksploracji metod nagrzewania powierzchni formujących jest obszernie poznany, o tyle w kwestii szybkiego chłodzenia naukowcy i inżynierowie na całym świecie poszukują efektywniejszych rozwiązań.

Współautorem wielu prac skupiających się na tematyce chłodzenia form wtryskowych w technologii RHCM jest Giovanni Lucchetta. W pracach [19, 52] autorzy przedstawili innowacyjną technologię szybkiego nagrzewania i chłodzenia form poprzez zastosowanie wkładu wypełnionego aluminiową strukturą porowatą (rys. 2.17b). W pierwszym etapie autorzy wykonali badania symulacyjne procesu nagrzewania oraz chłodzenia w oprogramowaniu ANSYS Workbench dla wkładki o wymiarach 33×22×10 mm, która została przedstawiona na rysunku 2.17a (rozmiar wkładki determinowany był ograniczonymi zasobami obliczeniowymi). Następnie przeprowadzone zostały badania doświadczalne i seria próbna produkcji wyprasek z nowym systemem chłodzenia. Otrzymane wyniki wykazały wyraźną poprawę replikacji mikrostruktury powierzchni wypraski oraz braku występowania linii łączenia strug tworzywa.



Rys. 2.17. Badania procesu nagrzewania i chłodzenia z wykorzystaniem struktury porowatej:  
a) badania symulacyjne, b) wkład formujący wypełniony strukturą porowatą [52]

Analogiczne badania zespół G. Lucchett'y zaprezentował w pracach [20, 53]. W pierwszej z nich w procesie chłodzenia porównano wykorzystanie dwóch różnych struktur porowatych oraz wkładu kulkowego (znana technologia BFMOLD koncernu Witmann Group). W tym przypadku przeprowadzono wyłącznie badania eksperymentalne oraz produkcję serii wyprasek. Autorzy wysnuli tezę, że zastosowane metody pozwoliły na skrócenie cyklu wtryskiwania o około 16 sekund. Ponadto, nagrzewanie formy w połączeniu z szybkim chłodzeniem przyczyniło się do wyeliminowania widocznych linii łączenia oraz pozwoliło na produkcję wyprasek, których powierzchnie zewnętrzne cechują się wysokim połyskiem.

W drugiej wspomnianej pracy [20] autorzy skupili się na analizie wpływu szybkiego grzania/chłodzenia podczas produkcji wyprasek wzmocnionych włóknem szklanym. Ponownie w celu dynamicznego chłodzenia wykorzystano wkład z pianą metalową, wykonano badania symulacyjne i eksperymentalne. Dodatkowo przeprowadzono próby rozciągania próbek, a także zbadano ich mikrostrukturę (rozkład długości i orientację włókien oraz porowatość

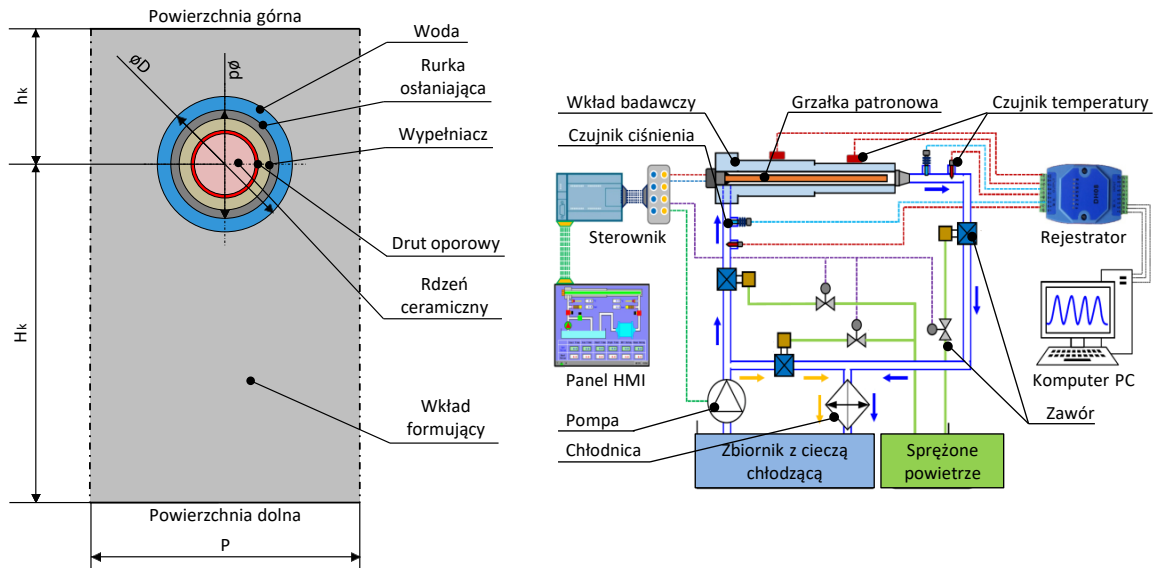
wewnętrzną za pomocą mikroskopu rentgenowskiego i pomiarów optycznych). W konkluzji autorzy przedstawili tezę, że zachodzi znacząca interakcja pomiędzy parametrami prędkości wtrysku, a temperaturą początkową i szybkością ochładzania formy wtryskowej.

Zdaniem autora niniejszej pracy struktury porowate umieszczone w pobliżu powierzchni formujących mogą negatywnie wpływać na sztywność formy oraz sposób jej eksploatacji. Rozwiązanie jest również ograniczeniem przy projektowaniu form dla wyprasek uźbrowanych, ponieważ uniemożliwia zastosowanie dużej liczby wypychaczy.

W opracowaniach [91, 95] Wang i inni zaproponowali nową metodę szybkiego ogrzewania i chłodzenia formy poprzez nagrzewanie elektryczne i chłodzenie pierścieniowe. Na rysunku 2.18a zaprezentowano omawiane rozwiązanie, które polega na umieszczeniu grzałki w otworze wykonanym w płycie matrycowej/stemplowej formy. Średnica otworu jest większa od średnicy grzałki, a przestrzeń pomiędzy nimi spełnia rolę kanału chłodzącego.

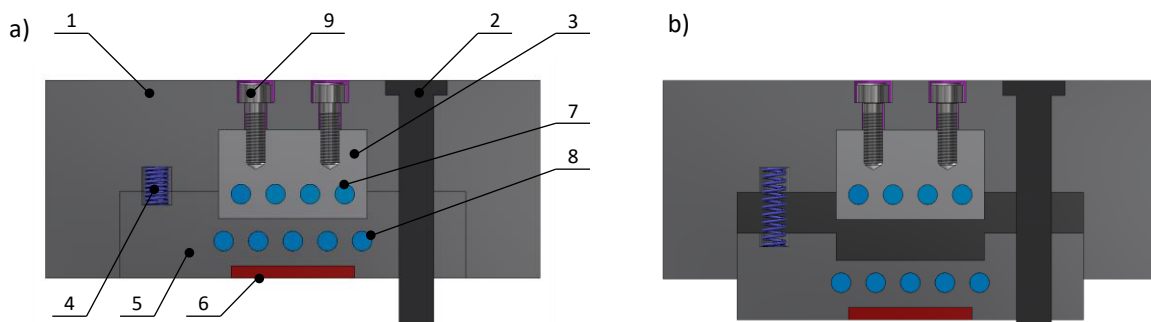
W ramach prac autorzy wykonali badania symulacyjne, w których rozważali zmienne parametry takie jak: wydatek objętościowy oraz ciśnienie medium chłodzącego, moc grzałek elektrycznych, szczelinę pomiędzy grzałkami a ścianką kanału chłodzącego. Następnie przeprowadzili badania doświadczalne procesów nagrzewania i chłodzenia (stanowisko doświadczalne – rys. 2.18b). Ponadto, podczas analizy procesu chłodzenia wyznaczyli konwekcyjny współczynnik przenikania ciepła pomiędzy cieczą chłodzącą a powierzchnią formującą oraz liczby podobieństwa Nussleta ( $Nu$ ) i Reynolds'a ( $Re$ ). Wyszuli wniosek, że w zakresie badanych prędkości przepływu cieczy przez układ efektywność chłodzenia wzrastała wraz ze wzrostem prędkości przepływu i następnie osiągała stan równowagi, podczas gdy wartość ciśnienia wzrastała liniowo w całym badanym zakresie. Stwierdzili, że najefektywniejsze chłodzenie (największa wartość współczynnika przenikania ciepła) odnotowano przy wydatku przepływu wynoszącym 6 l/min, dla którego liczba Reynolds'a wynosiła 6700. Pomimo wielu pozytywnych aspektów wynikających z prezentowanej metody, tj. uzyskanie powierzchni wyprasek o wysokim połysku oraz brak linii łączenia, autorzy nie wykonali analizy porównawczej z konwencjonalnymi metodami w odniesieniu do czasu chłodzenia i opłacalności produkcji. Dlatego też trudno stwierdzić, czy powyższa metoda pozwala na zredukowanie czasu cyklu wtryskiwania tworzyw sztucznych przy jednoczesnym zachowaniu ekonomiki procesu.





Rys.2.18. Metoda chłodzenia zaproponowana przez Wanga: a) istota układu chłodzenia, b) schemat stanowiska badawczego [91]

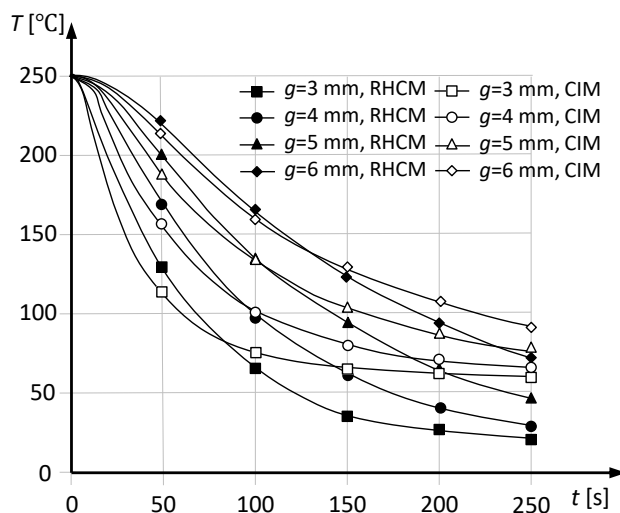
W kolejnej pracy [93] autorzy opracowali nowatorską konstrukcję formy wtryskowej – w płytach matrycowej i stemplowej osadzili ruchome wkłady formujące oraz odseparowane płyty chłodzące (z j. ang.: floating cavity). Omawiane rozwiązanie jest widoczne na rysunku 2.19. W fazie nagrzewania wkładka zostaje przemieszczona poza obrys płyty stemplowej/matrycowej (rys. 2.19b), co zapobiega przenikaniu ciepła do płyty chłodzącej. Na etapie chłodzenia medium chłodzące przepływa zarówno przez kanały znajdujące się w płycie chłodzącej jak i ruchomym wkładzie formującym (rys. 2.19a). Powyższe rozwiązanie konstrukcyjne pozwoliło autorom pracy na zmniejszenie objętości nagrzewanego/chłodzonego materiału, co z kolei umożliwiło zredukowanie czasu całego cyklu.



Rys. 2.19. Konstrukcja formy wtryskowej z ruchomym wkładem formującym (j. ang.: floating cavity): a) faza chłodzenia, b) faza nagrzewania, 1 – płyta główna, 2 – słup prowadzący, 3 – wkładka chłodząca, 4 – sprężyna naciskowa, 5 – wkładka formująca, 6 – wypraska, 7 – kanały chłodzące, 8 – kanały grzewcze/chłodzące, 9 – śruba mocująca wkładkę chłodzącą [93]

W celu porównania proponowanego rozwiązania z konwencjonalnym układem formującym (CIM) autorzy przeprowadzili badania dla trzech wkładek, wykonanych z różnych mate-

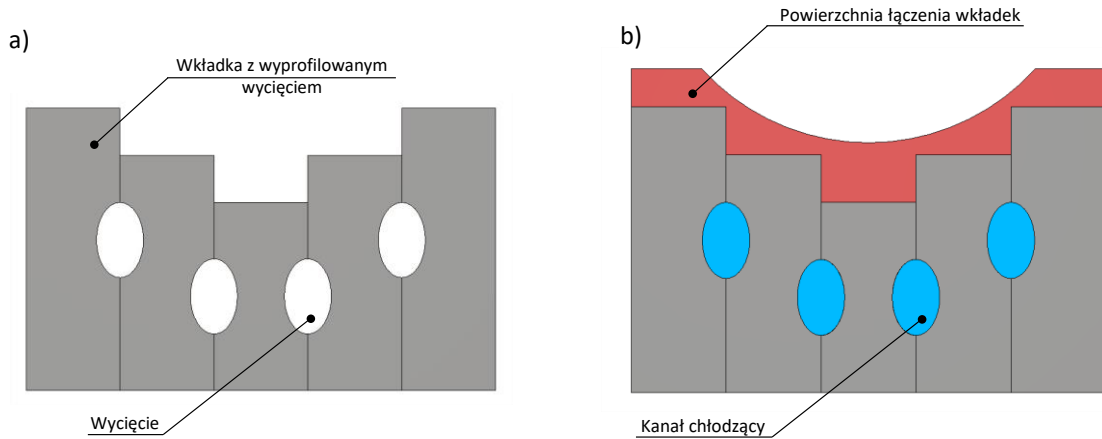
riałów – stal narzędziowa, stop aluminium oraz miedź (w pracy nie podano szczegółowych informacji na temat zastosowanych materiałów). Jako medium do nagrzewania/chłodzenia w obu rozważanych przypadkach wykorzystano wodę, olej oraz parę wodną (parę wodną wykorzystano tylko podczas procesu grzania).



Rys. 2.20. Rezultaty procesu chłodzenia dla porównywanych technologii – RHCM i CIM [94]

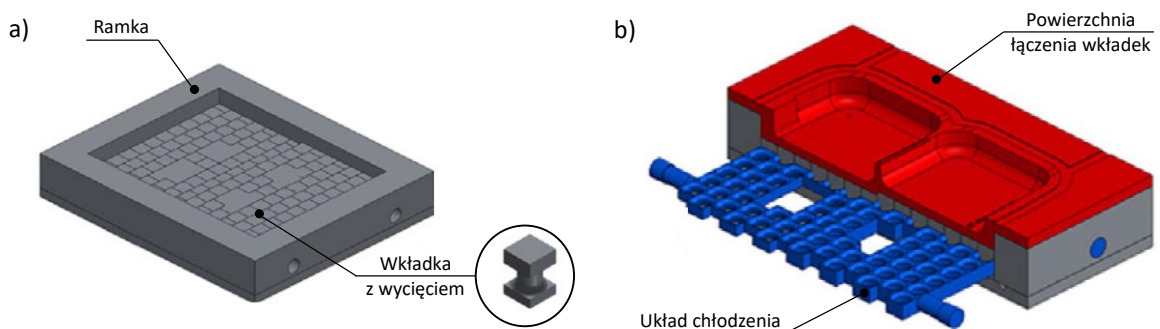
Analogiczne badania zespół Wanga przedstawił w pracy [94], z dodatkowym zastosowaniem grzania elektrycznego. Na podstawie obserwacji poczynionych podczas badań autorzy stwierdzili, że proponowane rozwiązanie pozwala na skrócenie czasu chłodzenia o 15% w stosunku do konwencjonalnego procesu (obliczenia zostały wykonane dla przykładowej wypraski, o grubości ścianki równej 6 mm). Na wykresie (rys. 2.20) przedstawiono zestawienie wyników uzyskanych dla technologii RHCM i CIM, dla różnych grubości ścianki wypraski ( $g$ ). Ponadto autorzy zaryzykowali stwierdzenie, że układ z ruchomym wkładem formującym ma szansę konkurować z chłodzeniem konformalnym.

Innym rozwiązaniem mającym na celu zintensyfikowanie chłodzenia form wtryskowych jest koncepcja zaproponowana w pracy [84] przez zespół pod kierownictwem Soshi'ego. Na rysunkach 2.21 i 2.22 przedstawiono ideę, nazwaną przez autorów „grid molding”, która zakłada, że płyta formująca budowana jest z pewnej liczby wkładek. Każda wkładka posiada wyprofilowane wycięcie, które po zestawieniu bloków w zespół tworzą układ kanałów chłodzących. Przygotowany w ten sposób blok formujący został napawany laserowo, w celu połączenia wszystkich elementów, i obrobiony wykańczająco na maszynie CNC. Cały proces został przeprowadzony w jednym zamocowaniu dzięki zastosowaniu hybrydowej obrabiarki DMG Mori LASERTEC 65, która została wyposażona w 5 osi sterowanych numerycznie oraz głowicę laserową do obróbki przyrostowej (Additive manufacturing).



Rys. 2.21. Idea koncepcji Grid molding: a) przygotowanie wkładek z wycięciami, b) połączenie wkładek w jedną płytę [84]

W swojej pracy autorzy skoncentrowali się przede wszystkim na studium możliwości technologicznych wykonania formy z wykorzystaniem techniki grid molding, niemniej zrealizowano również badania symulacyjne oraz eksperymentalne cyklu wtrysku, z głównym naciskiem na fazę chłodzenia. W tabeli 2.1 przedstawiono porównawcze rezultaty chłodzenia dla metody konwencjonalnej i proponowanej przez autorów. Wyniki wyraźnie wskazują, że rozważane rozwiązanie charakteryzuje się większą wydajnością procesu. Szczególną uwagę należy zwrócić na różnicę temperatury pomiędzy powierzchnią formującą a cieczą chłodzącą. Dla omawianych zagadnień w przypadku chłodzenia konwencjonalnego różnica ta wynosi 13,3 °C, natomiast w przypadku technologii grid molding 7,3 °C, co stanowi 45-cio procentową redukcję tego parametru. We wnioskach autorzy dowodzą, że zastosowanie ich myśli koncepcyjnej pozwoli na znaczną redukcję czasu cyklu przy jednoczesnej poprawie wydajności i równomierności chłodzenia. Inną korzyścią płynącą z proponowanej metody jest możliwość produkcji form bimetalowych, które obecnie stanowią ciekawe spektrum badawcze w branży konstrukcji narzędzi do przetwórstwa tworzyw sztucznych.

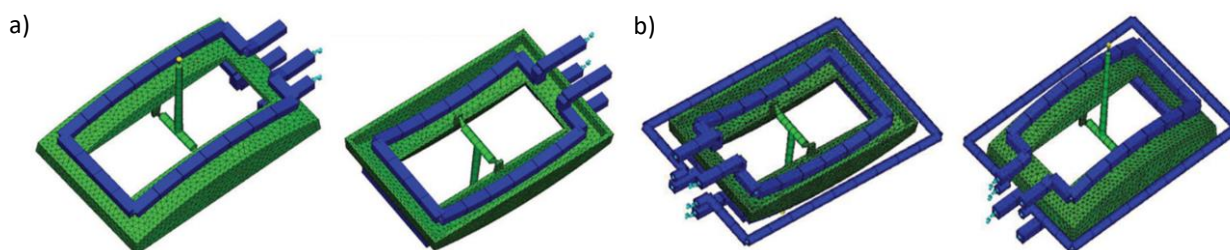


Rys. 2.22. Prototyp wkładki grid molding: a) złożenie wkładek w ramce, b) połączenie wkładek poprzez napawanie i obróbkę powierzchni [84]

Tabela 2.1. Wyniki porównawcze badań doświadczalnych dla metod konwencjonalnej i grid molding [84]

Temperatura	Metoda konwencjonalna	Grid molding
Max. temperatura na powierzchni [°C]	53,3	47,3
Min. temperatura na powierzchni [°C]	47,9	42,2
Max. różnica temperatury pomiędzy powierzchnią formującą a cieczą chłodzącą [°C]	13,3	7,3

Zagadnienie intensyfikacji chłodzenia form wtryskowych zostało również rozpatrzone przez Shayfull'a i innych [80]. Autorzy zaproponowali zastosowanie układu frezowanych kanałów chłodzących (MGSS – Milled Grooved Square Shape), których kształt i przebieg wzorowany jest na kanałach konformalnych. W artykule naukowcy zaprezentowali badania symulacyjne procesu chłodzenia przykładowego produktu o wymiarach 120×80×18,75 mm i grubości ścianki 2,5 mm, w oprogramowaniu Autodesk Moldflow Insight (AMI) 2012. Obliczenia numeryczne zrealizowano dla konwencjonalnych, wierconych kanałów chłodzących oraz dwóch autorskich koncepcji kanałów frezowanych (rys. 2.23). Różnica pomiędzy koncepcjami wynika z zastosowania dodatkowego kanału na obwodzie wyrobu w 2 rozwiązaniu.



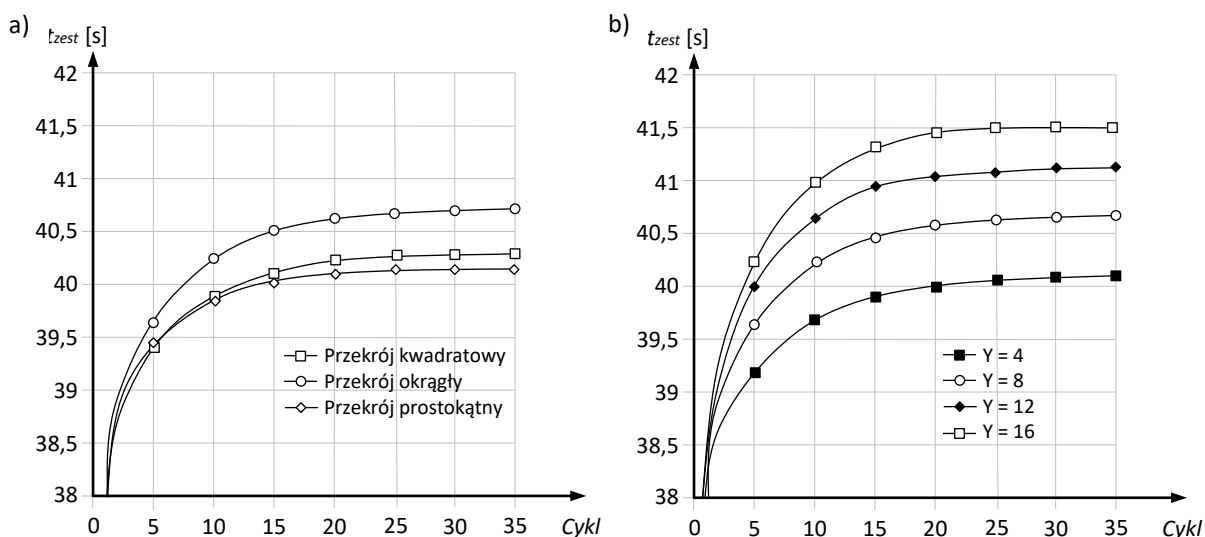
Rys. 2.23. Układ kanałów MGSS a) koncepcja 1, b) koncepcja 2 [80]

Jako główne kryteria do porównań przyjęto czas pozwalający na usunięcie wypraski z formy oraz różnicę temperatur na powierzchniach formujących (w celu określenia równomierności odbioru ciepła). Badania symulacyjne w oprogramowaniu AMI umożliwiły wyznaczenie przyjętych kryteriów (tabela 2.2). Przedstawione rezultaty wyraźnie podkreślają przewagę frezowanych kanałów nad konwencjonalnymi, jeżeli chodzi o czas i zbalansowanie chłodzenia. Zastosowanie tego typu kanałów może pozwolić na zredukowanie czasu cyklu i umożliwić równomierny odbiór ciepła od wypraski. Autorzy w swojej pracy nie podjęli się, niestety, porównania aspektów ekonomicznych, które w końcowym rozrachunku wyboru metody chłodzenia mogą być kwestią kluczową. Ponadto analizie poddany został jeden typ wyrobu, który ewidentnie konweniował z sugerowanym rozwiązaniem.

Tabela 2.2. Wyniki badań symulacyjnych zespołu Shayfull'a [80]

Konfiguracja kanałów chłodzących	Czas do uwolnienia wypraski, t [s]	Temp. na stronie matrycowej, $T_m$			Temp. na stronie stemplowej, $T_s$		
		Min.	Max.	$\Delta T$	Min.	Max.	$\Delta T$
Kanały wiercone	21,75	39,21	41,10	7,82	45,19	57,39	12,2
Kanały MGSS, Typ 1	20,32	37,32	44,20	6,88	38,84	45,67	6,83
Kanały MGSS, Typ 2	20,00	33,33	41,35	8,02	37,96	43,95	5,99

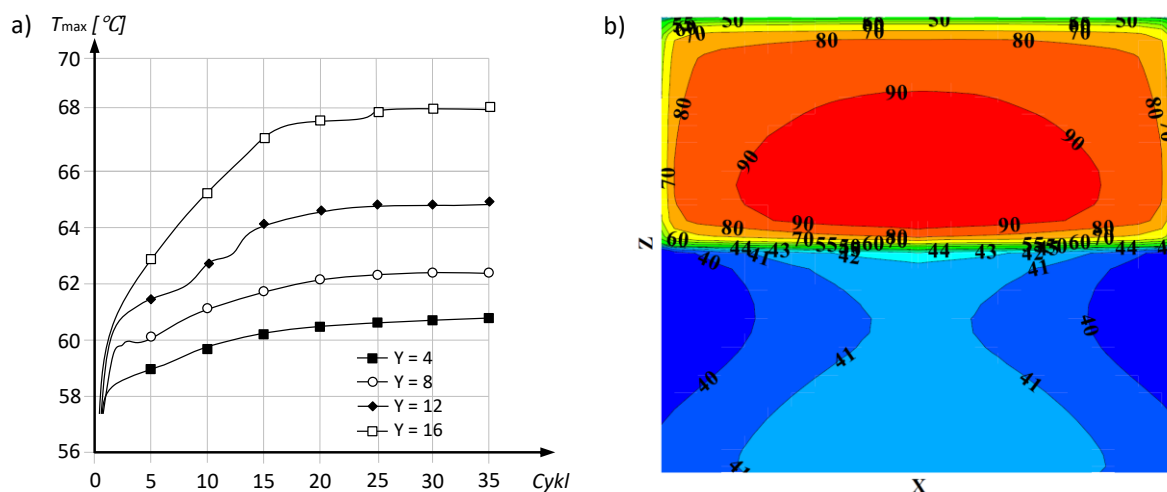
Obiektem badań Hassana i innych [37] była analiza kanałów chłodzących o fundamentalnych kształtach przekroju poprzecznego – kwadratowym, okrągłym oraz prostokątnym. Przeprowadzone badania numeryczne (metodą objętości skończonej) i doświadczalne potwierdziły, że istotny wpływ na wymianę ciepła w formie wtryskowej mają położenie kanałów chłodzących (rozstaw, odległość od powierzchni formującej) oraz ich kształt. Rezultaty uzyskane przez zespół badawczy sygnalizują, że proces chłodzenia został usprawniony w przypadku zastosowania kanałów o przekroju prostokątnym. Na rysunku 2.24 przedstawiono wykres obrazujący omawiane rezultaty – w przypadku kanałów o przekroju prostokątnym czas wymagany do zestalenia się tworzywa w gnieździe formującym osiągnął wartość najniższą, co świadczy o najintensywniejszym odbiorze ciepła. Analiza odległości kanałów od wypraski (od ścianki gniazda formującego, rys. 2.24b) wykazała, że przy minimalnej jej wartości, w rozpatrywanym przypadku równej 4 mm, czas wymagany do całkowitego zestalenia produktu zmniejszył się o 3% niż w przypadku stosowania odległości zalecanych (tab. 2.3).



Rys. 2.24. Rezultaty chłodzenia: a) dla kanałów o różnych przekrojach poprzecznych, b) dla zmiennych odległości pomiędzy kanałami chłodzącymi a powierzchnią formującą [37]

Innym istotnym parametrem rozważanym w omawianej dysertacji był rozkład temperatury na powierzchni ścianki formującej. Na rysunku 2.25 zaprezentowano wartości maksymalnych różnic temperatury na badanej powierzchni w zależności od jej odległości od kana-

łów oraz przykładowy rozkład temperatury. Najkorzystniejsze rezultaty otrzymano w przypadku umiejscowienia kanałów możliwie jak najbliżej formowanego wyrobu.



Rys. 2.25. Rozkład temperatury na powierzchni formującej: a) maksymalne różnice temperatury, b) przykładowy rozkład temperatury na powierzchni formującej dla  $Y = 4$  mm [37]

## 2.4. Metody chłodzenia form wtryskowych stosowane w przemyśle

Celem układu regulacji temperatury formy wtryskowej jest zapewnienie odpowiedniej temperatury gniazd formujących – odprowadzanie ciepła oraz wytworzenie jak najbardziej równomiernego rozkładu temperatur [105]. Powinien on w sposób powtarzalny i z określoną dynamiką zapewniać kontrolę temperatury powierzchni formujących [105]. Proces termostatowania formy jest kompromisem pomiędzy jak najlepszym wypełnieniem gniazda formującego, co wymaga wysokiej temperatury jego powierzchni, a krótkim czasem cyklu, który ma ogromny wpływ na ekonomiczny przebieg produkcji masowej [58]. Odpowiednio zaprojektowany układ chłodzenia umożliwi skrócenie czasu cyklu wtrysku, a tym samym zmniejszenie kosztu produkcji [105]. Ponadto pozwala na uzyskanie żądanych właściwości wyprasek, tj. niskich naprężeń wewnętrznych, wysokiej wytrzymałości oraz estetyki, zachowanie stałej wartości skurczu, braku widoczności linii łączenia oraz smug.

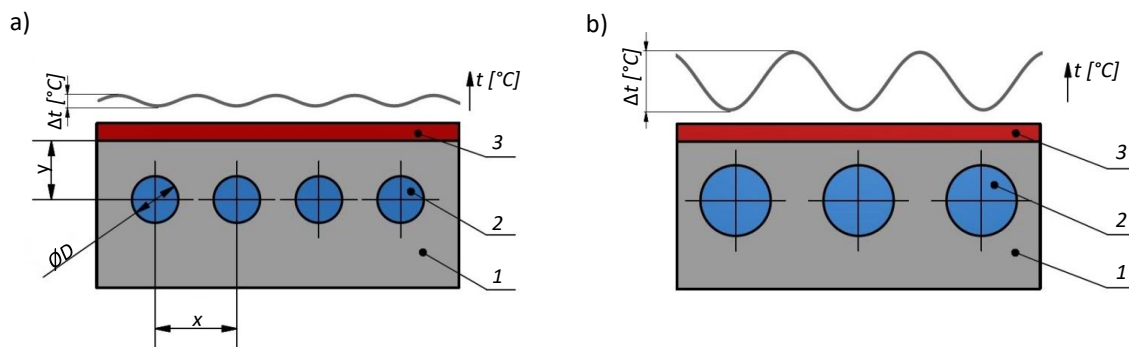
Konstrukcja układu chłodzenia zależy od szeregu czynników [69]:

- rodzaju przetwarzanego tworzywa (termoplastyczne, termoutwardzalne),
- struktury morfologicznej tworzywa (częściowo krystaliczne lub bezpostaciowe),
- wielkości formowanego detalu oraz liczby gniazd formy (jest to związane z wielkością narzędzia i systemem termostatowania),
- wymaganiami stawianymi gotowemu wyrobowi,

- budowy formy wtryskowej (stopnia skomplikowania układu uwalniania wypraski oraz układu wlewowego).

Kształt kanału chłodzącego oraz jego odległość od powierzchni gniazda formującego mają ogromny wpływ na skuteczność wyrównywania temperatury w formie. Średnica otworów chłodzących (przekrój poprzeczny kanałów) powinna być możliwie jak największe. Zaleca się, aby średnica kanałów nie były mniejsze niż 6 mm, ponieważ przy mniejszych wartościach następuje tłumienie przepływu medium chłodzącego, co w znacznym stopniu utrudnia regulację temperatury. Z kolei górna granica wynosi około 20 mm – zauważono, że powyżej tej wartości intensywność chłodzenia nie wzrasta, a zwiększa się tylko wydatek chłodziwa [105].

Na rysunku 2.26a przedstawiono zalecane rozmieszczenie kanałów chłodzących, które gwarantują największą skuteczność chłodzenia (tabela 2.3 prezentuje rekomendowane wartości liczbowe – pogrubioną czcionką zaznaczono wartości wybierane w pierwszej kolejności). Zaleca się, aby chłodzenie zmniejszało się w kierunku drogi płynięcia ciekłego tworzywa sztucznego [105]. Rozmieszczenie kanałów musi zapewniać równomierny rozkład temperatury na powierzchni gniazda formującego, natomiast nieprawidłowo zaprojektowany układ chłodzenia może powodować zbyt duży gradient temperatury na powierzchni chłodzonej. Na rysunku 2.26b zilustrowano nieodpowiednie ulokowanie kanałów chłodzących.



Rys. 2.26. Zasady rozmieszczania kanałów chłodzących oraz ich wpływ na rozkład temperatury: a) prawidłowe rozmieszczenie kanałów, b) nieprawidłowe rozmieszczenie kanałów, 1 – układ formujący, 2 – kanał chłodzący, 3 – wypraska [65, 105]

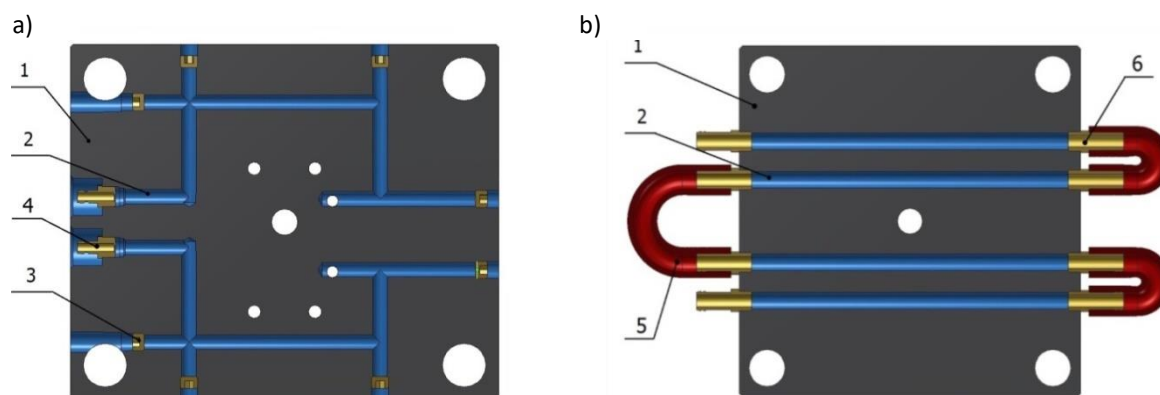
Tabela 2.3. Wymiary i rozstawienie kanałów chłodzących [105]

D [mm]	6	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>12</b>	<b>14</b>	<b>16</b>	18	20
y [mm]	7	<b>10</b>	<b>13</b>	<b>18</b>	<b>22</b>	<b>28</b>	34	40
$x \approx 1,7 D$ [mm]	10	<b>14</b>	<b>17</b>	<b>20</b>	<b>24</b>	<b>27</b>	30	34

Projektując układ chłodzenia należy mieć również na uwadze długość drogi przepływu medium chłodzącego przez formę wtryskową. Całkowita długość kanałów powinna być możliwie jak najkrótsza, aby zapewnić małą różnicę temperatur chłodziwa na wejściu i wyjściu. Mała różnica gwarantuje równomierne odbieranie ciepła od wypraski we wszystkich strefach gniazda formującego. Przyjmuje się, aby różnica temperatury chłodziwa na wlocie i wylocie nie przekraczała granicy 3 – 5 °C [105].

#### 2.4.1. Konwencjonalne układy chłodzenia

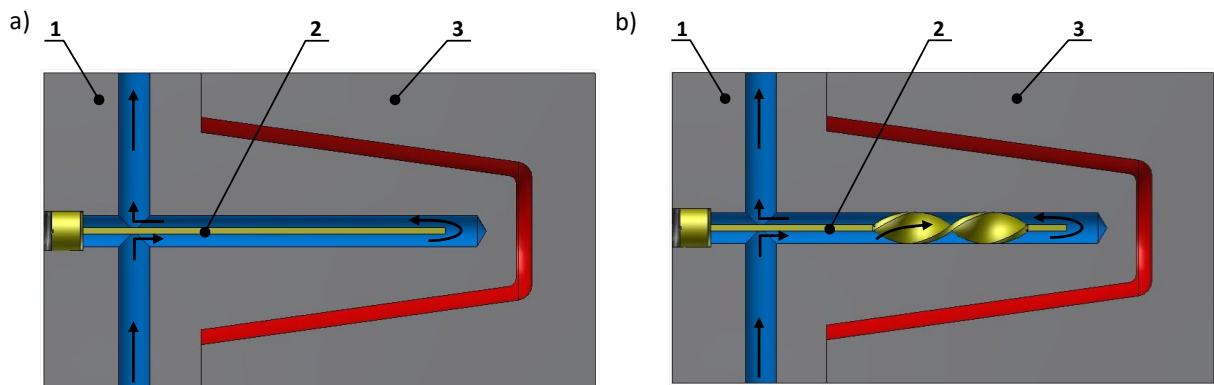
Konwencjonalne układy chłodzenia form wtryskowych opierają się na prostych, wierconych otworach w elementach formy (wkładach formujących, stemplach oraz płytach stemplowych i matrycowych). Są to najczęściej stosowane kanały ze względu na łatwość wykonania oraz stosunkowo niski koszt [105]. Na rysunku 2.27 przedstawiono typowe układy wykonane w płytach matrycowych. Łączenie otworów wywierconych w jednym kierunku odbywa się poprzez wykonanie otworów poprzecznych (rys. 2.27a) lub też przez zastosowanie elastycznych węży umieszczonych na zewnątrz formy (rys. 2.27b). Wykonanie wielu kanałów chłodzących niesie za sobą konieczność zaślepienia części z nich, ponieważ każdy układ chłodzący (każda strefa) ma zazwyczaj jedno wejście i jedno wyjście medium. W takich przypadkach stosuje się korki zamykające, wykonane najczęściej z miedzi oraz jej stopów. Wadą tego sposobu jest możliwość występowania przecieków, które mogą zakłócić prawidłowe funkcjonowanie systemu regulacji temperatury. Stosowanie takich rozwiązań powoduje szereg ograniczeń geometrycznych w kształcie i przebiegu kanałów chłodzących, a tym samym w przepływie medium i efektywności odbioru ciepła [69].



Rys. 2.27. Kanały chłodzące wykonane w płytach matrycowych: a) łączenie kanałów z użyciem korków zaślepiających, b) zastosowanie elastycznych przewodów, 1 – płyta matrycowa, 2 – kanał chłodzący, 3 – korek zaślepiający, 4 – końcówka z gniazdem zatrzasku, 5 – przewód elastyczny, 6 – końcówka do przewodu elastycznego [65, 105]

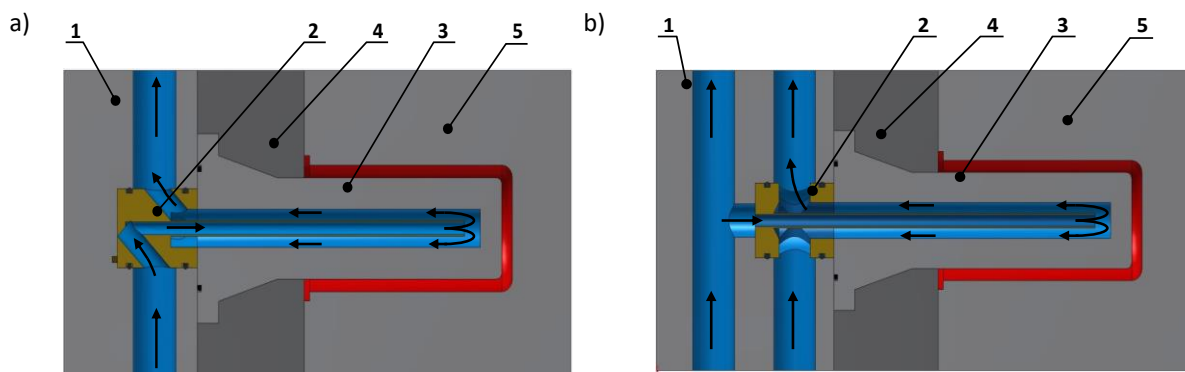


Największy problem związany z zapewnieniem odpowiedniej temperatury występuje w przypadku form z ruchomymi rdzeniami oraz długimi częściami stemplowymi. Problem wynika z faktu, że bardzo trudno zapewnić w tych elementach skuteczny przepływ medium chłodzącego, co w połączeniu z małą pojemnością cieplną powoduje bardzo szybkie nagrzewanie się powierzchni do temperatury uniemożliwiającej często poprawne uformowanie (i odformowanie) wyrobu [69]. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem w takich przypadkach jest doposażanie układu chłodzącego w dodatkowe elementy, takie jak różnego rodzaju przegrody i dysze chłodzące. Na rysunku 2.28 przedstawiono sposób chłodzenia stempla o dużej długości z wykorzystaniem przegród – prostej oraz spiralnej. Przegrody chłodzące, które wyznaczają kierunek przepływu chłodziwa, umieszczane są we wcześniej przygotowanych nieprzelotowych otworach (kierunek ruchu medium chłodzącego został oznaczony strzałkami). Do głównych wad układów z przegrodą prostą zaliczyć można występowanie gradientu temperatury po obu jej stronach – niższa po stronie wlotu, wyższa po stronie wylotu. W przypadku produkcji wyprasek cienkościennych, w których grubość ścianki nie przekracza 0,8 mm, zbyt duża różnica temperatur może powodować powstawanie niedolewów, a tym samym wadliwe wykonanie wyprasek [69].



Rys. 2.28. Chłodzenie stempli z wykorzystaniem przegród: a) przegroda prosta, b) przegroda spiralna, 1 – płyta stemplowa, 2 – przegroda, 3 – matryca [65]

Do chłodzenia długich stempli stosuje się również dysze chłodzące, które mogą występować w układzie szeregowym bądź równoległym (rys. 2.29).



Rys. 2.29. Chłodzenie stempli z wykorzystaniem dysz chłodzących: a) dysza szeregową, b) dysza równoległą, 1 – płyta stemplowa, 2 – dysza chłodząca, 3 – stempel, 4 – oprawa stempla, 5 – matryca [65]

Zastosowanie dysz w układach chłodzenia form niesie ze sobą szereg korzyści, do których zalicza się [65]:

- możliwość pracy dyszy w dowolnej orientacji,
- możliwość doboru długości dyszy w zależności od długości chłodzonego stempla,
- prosta instalacja i utrzymanie,
- niskie ciśnienie zwrotne układu.

Stosowanie dysz w układzie szeregowym determinuje wykonanie w płycie stemplowej otworu, którego oś jest prostopadła do osi dyszy. Z kolei wykorzystanie układu równoległego wiąże ze sobą konieczność wykonania dwóch równoległych otworów. Wadą chłodzenia szeregowego jest fakt, że medium chłodzące dostarczane jest tylko i wyłącznie jedną drogą doływu do kolejno umiejscowionych w płycie stempli. W ten sposób następuje wydłużenie drogi chłodzenia, co powoduje wzrost różnicy temperatury pomiędzy poszczególnymi stemplami formującymi. W przypadku stosowania dysz równoległych, jednakową temperaturę gniazd zapewnia jednoczesne doprowadzanie chłodziwa z jednego kanału zbiorczego do każdego ze stempli. Taki zabieg pozwala na uzyskanie równomiernej w każdym z nich. Wadą aplikacji chłodzenia w układzie równoległym jest znaczne zwiększenie stopnia skomplikowania konstrukcji formy wtryskowej oraz jej kosztu, ze względu na konieczność wykonania większej liczby kanałów doprowadzających.

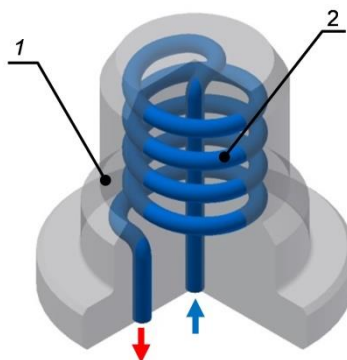
#### 2.4.2. Innowacyjne metody chłodzenia form wtryskowych

##### Chłodzenie konformalne

Jeszcze kilka lat temu druk 3D oraz techniki przyrostowe w wytwarzaniu (Additive manufacturing – AM) były nazywane nową generacją technologii i były znane jako metody szyb-

kiego prototypowania (Rapid Prototyping/Rapid Tooling) [35]. Obecnie metody przyrostowe są szeroko stosowane w seryjnej produkcji w wielu gałęziach przemysłu, począwszy od przemysłu lotniczego, medycznego, motoryzacyjnego, energetycznego, kończąc na wytwarzaniu specjalistycznych narzędzi, takich jak formy wtryskowe. Technologie szybkiego wytwarzania ułatwiły oraz przyspieszyły proces wprowadzania nowych produktów na rynek. Wykonywane elementy charakteryzują się wysoką dokładnością wymiarową, coraz mniejszą grubością warstw (w zależności od stosowanej metody) i dużą powtarzalnością. W technologiach przyrostowych wykorzystywanych do produkcji elementów form wtryskowych stosowany może być szeroki zakres materiałów, takich jak stale narzędziowe, stale nierdzewne czy też stopy aluminium [105].

Produkcja funkcjonalnych prototypów form wtryskowych wysokiej jakości oraz wkładów formujących ze skomplikowanymi układami chłodzenia, przy jednoczesnym zachowaniu efektywności, jest czasochłonna i często nieekonomiczna w przypadku stosowania konwencjonalnych metod wytwarzania obróbki skrawaniem oraz obróbki elektroerozyjnej. Wraz z rozwojem technik przyrostowych w produkcji narzędzi rozwijają się układy chłodzenia oparte na kanałach konformalnych, których istota działania została przedstawiona między innymi w pracach [22, 76, 103]. Chłodzenie konformalne pozwala na prowadzenie kanałów blisko powierzchni formujących, dostosowanych do kształtu formowanego wyrobu [69]. Przekrój poprzeczny kanałów przyjmuje różne, właściwie nieograniczone kształty, co pozwala na efektywniejszy odbiór ciepła od wypraski. Na rysunku 2.30 przedstawiono stempel z przykładowym konformalnym układem chłodzenia.



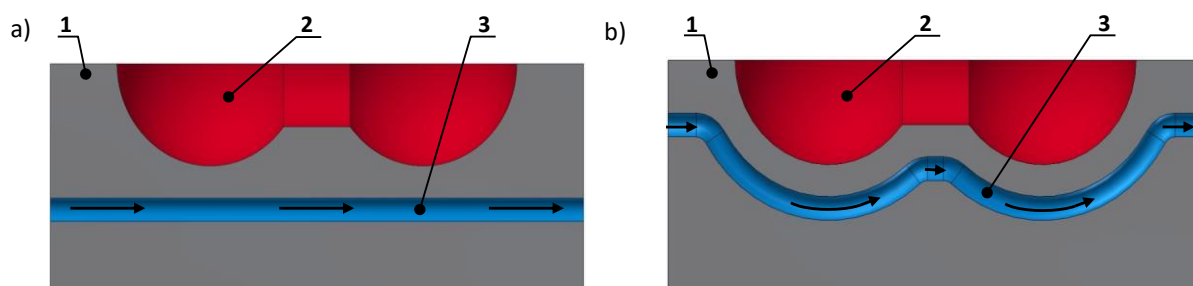
Rys. 2.30. Przykład stempla z kanałem konformalnym: 1 – stempel, 2 – kanał konformalny [65]

Dowolność geometrii układu chłodzenia jest możliwa do realizacji z wykorzystaniem metod przyrostowych, np. technologii DMLS (Direct Metal Laser Sintering), czyli technologii

laserowego przetapiania proszków metali. Dzięki tej metodzie możliwe jest wykonanie skomplikowanego układu chłodzenia i poprowadzenia kanałów chłodzących w trudno dostępnych miejscach, co w przypadku stosowania konwencjonalnych metod ubytkowych byłoby nieosiągalne. Ograniczeniem metody jest stosowanie jej dla wybranej grupy wyrobów – przeszkodą w chłodzeniu stempeli będzie konieczność aplikacji dużej liczby wypychaczy, co uniemożliwi dowolne poprowadzenie kanałów chłodzących.

W technologii DMLS wkładka formująca lub stempel budowane są warstwa po warstwie – promień lasera przetapia tylko te obszary, które mają zostać połączone z uprzednio nałożoną warstwą. Taki sposób prowadzenia procesu produkcji elementów form wtryskowych umożliwia dowolne prowadzenie kanałów chłodzących, które mogą przebiegać w stałej, założonej przez konstruktora, odległości od powierzchni formującej, co z kolei prowadzi do otrzymania równomiernego rozkładu temperatury na powierzchni gniazda formującego.

Rysunek 2.31a prezentuje przekrój poprzeczny wkładki formującej wyposażonej w tradycyjny kanał chłodzący w postaci prostego, wierconego otworu o danej średnicy. Cechą charakterystyczną konwencjonalnego układu chłodzenia jest to, że odległość ścianki kanału chłodzącego od powierzchni formującej zmienia się w każdym obszarze formy, dlatego wymiana ciepła w poszczególnych strefach gniazda staje się inna, co prowadzi do nierównomiernego odbioru ciepła i powstawania dużych gradientów temperatury na powierzchniach formujących.



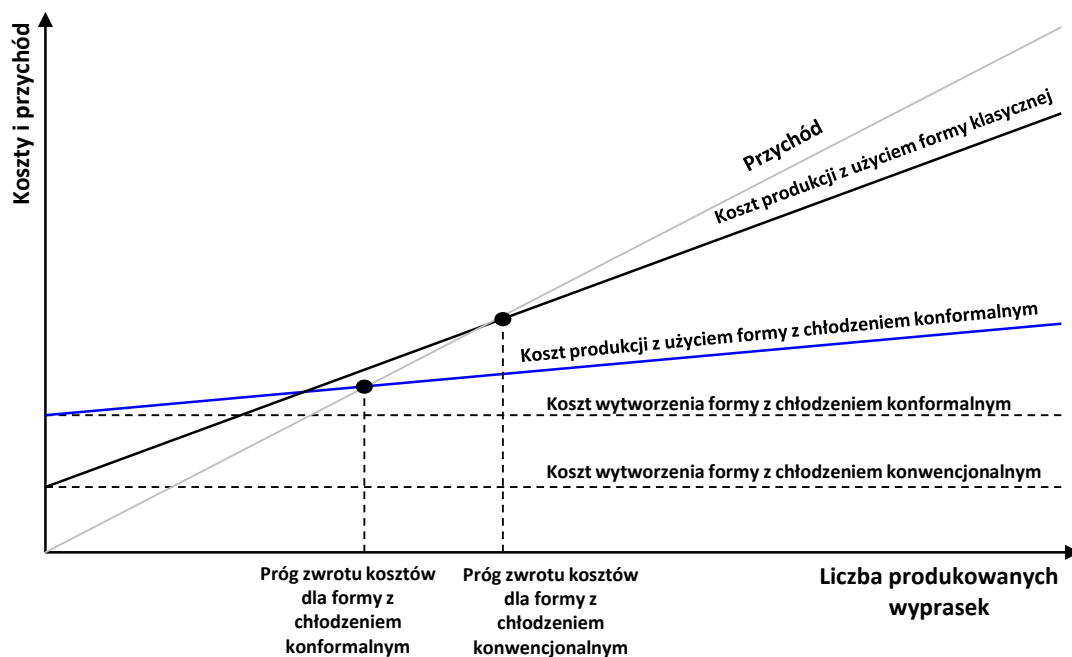
Rys. 2.31. Zestawienie układów chłodzenia: a) kanał konwencjonalny, b) kanał konformalny, 1- wkładka formująca, 2- gniazdo formujące, 3- kanał chłodzący [65]

Stosując układ chłodzenia z kanałami konformalnymi (rys. 2.31b), można ustrzec się powyższych wad. Co najistotniejsze, kształt kanału odzwierciedla kształt gniazda – gwarantuje to zachowanie stałej odległości pomiędzy kanałem, a powierzchnią formującą. Ponadto stosowanie tej technologii dostarcza szeregu innych korzyści [69]:

- możliwość intensywniejszego chłodzenia w stosunku do metod konwencjonalnych, co prowadzi do skrócenia czasu całego cyklu wtryskiwania,

- selektywny odbiór ciepła z poszczególnych obszarów wypraski – możliwość wytworzenia gradientu struktury lub zapewnienie porównywalnych temperatur dla wyprasek o zróżnicowanej grubości ścianki,
- chłodzenie stempli, rdzeni oraz trzpieni formujących z zastosowaniem jednego lub kilku kanałów (np. spiralnych),
- zredukowanie deformacji wyprasek na skutek dynamicznego i równomiernego odbioru ciepła,
- podniesienie precyzji kontroli temperatury formy wtryskowej w czasie trwania cyklu produkcyjnego.

Układy chłodzenia oparte na kanałach konformalnych pozwalają na maksymalizację efektów chłodzenia, co w znacznej mierze wpływa na redukcję czasu cyklu. Chłodzenie konformalne zapewnia stabilność oraz powtarzalność prowadzonego procesu formowania wtryskowego. Pomimo tak licznych zalet stosowania tej metody w konstrukcji form wtryskowych, analizie należy poddać aspekt ekonomiczny, z racji wysokich kosztów stosowania technik przyrostowych w produkcji wkładów formujących [18]. Na poniższym wykresie (rys. 2.32) zaprezentowano porównanie kosztów oraz przychodów produkcji wyprasek w przypadku stosowania formy klasycznej oraz formy z układem kanałów konformalnych [120]. Wraz ze wzrostem liczby produkowanych wyrobów (wyprasek) rośnie opłacalność stosowania nowoczesnych form wtryskowych.



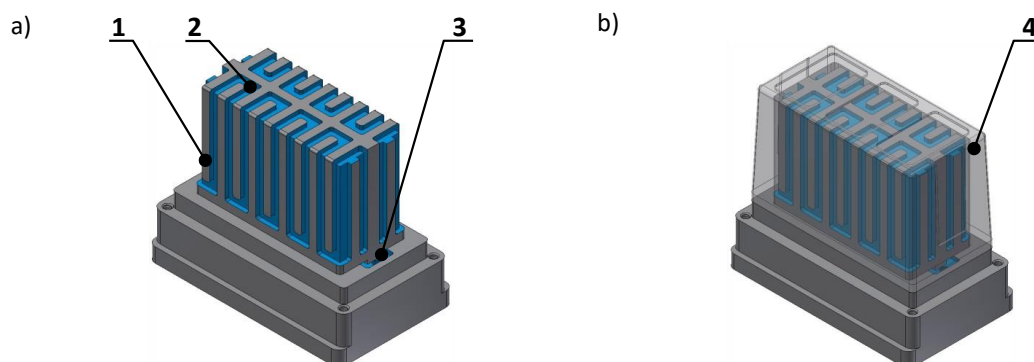
Rys. 2.32. Wykres tendencji wzrostu zysku przy zastąpieniu klasycznej formy przez formę z kanałami konformalnymi [120]

Należy jednak pamiętać, że do produkcji pewnej grupy wyrobów wystarczające będzie zastosowanie tradycyjnego układu chłodzenia, opartego na wierconych kanałach. W celu wdrożenia nowoczesnych układów regulacji temperatury formy wtryskowej konieczna jest analiza ekonomiczna opłacalności takiego zabiegu konstrukcyjnego.

### Chłodzenie konturowe (quasi – konformalne)

Technologia chłodzenia konturowego form wtryskowych polega na wykonaniu frezowanych kanałów chłodzących na rdzeniu stempla lub wkładki formującej i następnym umieszczeniu oprawki (rys. 2.33 – przykład chłodzenia konturowego). Wybór tej metody umożliwia, podobnie jak w przypadku chłodzenia konformalnego, poprowadzenie kanałów chłodzących odsuniętych o stałą odległość od powierzchni formujących, a zatem bardzo dobre odwzorowanie powierzchni kształtu wypraski. Powoduje to wzrost wydajności odbioru ciepła od formowanego wyrobu z tworzywa sztucznego.

Podobna metoda do chłodzenia konturowego jest również znana pod nazwą chłodzenia quasi – konformalnego, co zostało zaprezentowane w pracy [115].

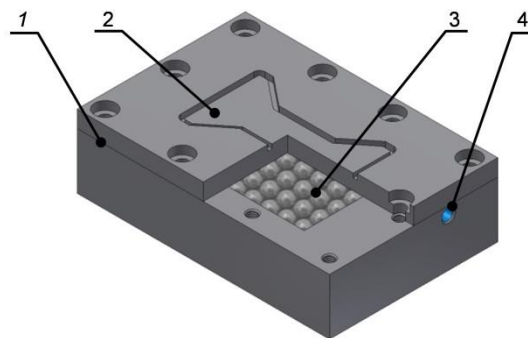


Rys. 2.33. Przykład stempla z układem chłodzenia konturowego: a) stempel, b) złożenie stempla z oprawką, 1- stempel, 2- frezowane kanały chłodzące, 3- kanał doprowadzający, 4- oprawka stempla [65]

W stosunku do konwencjonalnych metod chłodzenia, do zalet układu chłodzenia konturowego należy zintensyfikowany odbiór ciepła ze względu na dużą objętość przepływu cieczy chłodzącej oraz równomierny rozkład temperatury na powierzchni gniazda formującego. Biorąc pod uwagę problemy pojawiające się podczas stosowania omawianego układu, występuje konieczność zapewnienia szczelności połączenia rdzenia stempla/wkładki z oprawką. Kolejnym minusem są ograniczenia w przypadku chłodzenia płyt stemplo- wych/matrycowych o małej grubości, ponieważ ingerencja w ich konstrukcję w postaci frezowanych kanałów chłodzących znacznie obniża ich właściwości wytrzymałościowe.

## Chłodzenie w technologii BFMOLD

Technologia BFMOLD® jest opatentowaną przez brytyjski koncern Witmann Group metodą dynamicznej regulacji temperatury formy wtryskowej [143]. Istotą kontroli temperatury formy wtryskowej w tej technologii jest zastosowanie dwóch obiegów cieczy oraz wsadu kulkowego. Jeden obieg wykorzystywany jest jako podstawowy układ chłodzący formy, natomiast drugi, zlokalizowany w okolicach gniazda formującego, służy do precyzyjnej kontroli temperatury powierzchni formujących (grzania oraz chłodzenia). Innowacją metody jest wykonanie kieszeni w obszarze gniazda formującego, będącej częścią drugiego układu chłodzenia, i wypełnienie jej kulkami. Zastosowanie wsypu kulkowego pozwala na zwiększenie czynnej powierzchni wymiany ciepła, a tym samym zapewnienie intensywnego odbioru ciepła oraz równomiernego rozkładu temperatury na powierzchni formującej, przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniej sztywności (wedle autorów rozwiązania) wkładki formującej (rys. 2.34).



Rys. 2.34. Wkładka formująca BFMOLD®: 1 – dwuczęściowa wkładka formująca, 2 – gniazdo formujące, 3 – kieszeń z wypełnieniem kulkowym, 4 – wlot cieczy chłodzącej [65, 143]

Jako zalety tej metody wyróżnić można [143]:

- wzrost wydajności produkcji poprzez zredukowanie czasu cyklu wtrysku,
- zminimalizowanie zniekształceń i deformacji wyprasek oraz poprawę jakości ich powierzchni,
- dynamiczną regulację temperatury poprzez zwiększenie powierzchni czynnej wymiany cieplnej,
- ograniczenie powstawania wad wyprasek, takich jak: widoczne punkty wtrysku i widoczne linie łączenia.

### 3. Cel, sposób rozwiązania problemu i zakres pracy

Punktem wyjścia w podjęciu tematu pracy było doświadczenie autora zdobyte w projektach badawczych:

- INNOTECH-K2/IN2/60/183932/NCBR/13, Indukcyjne formy wtryskowe dla złączy elektrotechnicznych i elektronicznych (na studiach inżynierskich),
- LIDER 143/L-5/2013, Nowe systemy efektywnego chłodzenia form wtryskowych (na studiach magisterskich i doktoranckich),

oraz staż studencki i obecnie praca na stanowisku konstruktora form wtryskowych w zakładzie przemysłowym.

Aktualnie autor jest głównym wykonawcą zespołu badawczego projektu LIDER/13/0049/L-9/17/NCBR/2018, Hybrydowe formy wtryskowe nagrzewane indukcyjnie w sposób selektywny.

Celem pracy jest opracowanie oraz badania symulacyjne i doświadczalne nowego, efektywnego systemu chłodzenia form wtryskowych stosowanego w warunkach dynamicznych zmian temperatury (RHCM – Rapid Heat Cycle Molding), który zapewni szybkie i równomierne ich chłodzenie.

W ramach dysertacji opracowano sposób wyboru najkorzystniejszego kształtu przekroju poprzecznego kanału chłodzącego w układzie chłodzenia form wtryskowych pracujących w technologii dynamicznych zmian temperatury (RHCM), pod kątem szybkości i równomierności odbioru ciepła od nagrzewanych powierzchni oraz technologiczności i kosztów jego wykonania.

Praca swoim zakresem obejmuje:

- analizę istniejących metod chłodzenia form wtryskowych,
- analizę wpływu szybkości chłodzenia formy na strukturę wyprasek poprzez zastosowane metody skaningowej kalorymetrii różnicowej (Differential Scanning Calorimetry – DSC),
- dobór materiału na wkłady chłodzące oraz analizę właściwości i dobór cieczy chłodzącej,
- opracowanie modelu i przeprowadzenie badań symulacyjnych nowego układu chłodzenia form,



- opracowanie konstrukcji i budowę wybranych elementów formy z nowym układem chłodzenia,
- opracowanie konstrukcji i budowę stanowiska do badań eksperymentalnych,
- opracowanie metodyki i programu badań doświadczalnych,
- wykonanie badań doświadczalnych nowego układu chłodzenia pod kątem szybkości i równomierności działania,
- analizę wyników badań doświadczalnych i optymalizację parametrów procesu,
- studium przypadku opłacalności stosowania nowego układu chłodzenia.

#### 4. Analiza wpływu szybkiego chłodzenia formy na strukturę wyprasek

Na wstępie niniejszej rozprawy odnotowano, że jakość wyprasek i koszt ich produkcji są ściśle powiązane z prawidłowym działaniem układu chłodzenia formy wtryskowej. Przy kontroli temperatury formy spotykają się przeciwstawne wymagania, które należy rozwiązać w sposób kompromisowy, ponieważ [105]:

- ekonomiczne, krótkie czasy cyklu wtryskiwania (niski koszt produkcji i szybsza realizacja zamówień) osiąga się poprzez stosowanie niskiej temperatury formy,
- uzyskanie wyprasek wysokiej jakości, o pożądanych właściwościach mechanicznych i użytkowych, jest możliwe tylko przy wysokiej temperaturze powierzchni formujących (bliskiej uplastycznionemu wtryskiwanemu tworzywu) i równomiernym jej rozkładzie.

Biorąc pod uwagę powyższe, przyjęto się, że wzmożone chłodzenie stosuje się zazwyczaj przy produkcji artykułów powszechnego użytku, takich jak opakowania spożywcze i przemysłowe, różnego rodzaju pojemniki, zabawki oraz wszystkie te wyroby, od których konieczne jest odprowadzanie dużych ilości ciepła w krótkiej jednostce czasu. Wypraski tego typu zazwyczaj wykonywane są z termoplastów amorficznych, których skurcz i skurcz wtórny są stosunkowo małe – ok. 0,2 – 0,7% [105]. W tym przypadku mały odbiór ciepła od wyrobu i rozkład temperatury w formie w mniejszym stopniu wpływają na odchyłki kształtu i wymiarów niż w kwestii wyprasek technicznych z tworzyw krystalicznych i semi – krystalicznych, których wartości skurczu i skurczu wtórnego wahają się w granicach 0,8 – 4%.

Analizę wpływu szybkiego chłodzenia na strukturę wyprasek wykonano z zastosowaniem izotaktycznego polipropylenu (PP). Wybrano odmianę, która produkowana jest przez Lyondell Basell i dostępna pod nazwą Moplen HP500N. W tabeli 4.1 zaprezentowano najważniejsze właściwości tego tworzywa. Jako modyfikator zastosowano środek Millad NX8000 produkowany przez Milliken Chemical Company. Substancję tę, będącą pod względem chemicznym 1,2,3-tridesoksy-4,6:5,7-bis-O-[(4propylfenyl)metylen]nonitol sorbitolem, stosuje się w celu przyspieszenia krystalizacji polimeru termoplastycznego, rozdrobnienia krystalitów i zwiększenia stopnia jego krystaliczności oraz dodatkowo skrócenia czasu cyklu wtryskiwania [25]. Przy zastosowaniu w kompozycjach z polipropylem, środek ten działa jako nukleant fazy krystalicznej  $\alpha$  [33].

Tabela 4.1. Właściwości polipropylenu Moplen HP500N [125]

Właściwość	Jednostka	Wartość
Struktura chemiczna	-	Hopolimer
Współczynnik szybkości płynięcia MFI (230 °C, 16 kg)	[g/10 min]	12
Gęstość	[g/cm <sup>3</sup> ]	0,90
Moduł sprężystości wzdłużnej	[MPa]	1400
Granica plastyczności	[MPa]	35
Wydłużenie przy zerwaniu	[%]	>50
Udarność (met. Charpy'ego, z karbem)	[kJ/m <sup>2</sup> ]	4
Temperatura mięknięcia wg. Vicata (A/50N)	[°C]	153
Temperatura ugięcia pod obciążeniem HDT	[°C]	95

Należy nadmienić, że polipropylen jest tworzywem semikrystalicznym [38, 25, 33, 90] – podczas procesu chłodzenia jego makrocząsteczki tworzą uporządkowaną strukturę. Proces krystalizacji, a w szczególności temperatura krystalizacji  $T_{kr}$ , determinuje parametry przetwarzania tego materiału, co oznacza, że w przypadku technologii wtryskiwania wypraska musi zostać schłodzona poniżej  $T_{kr}$ . Podwyższenie temperatury krystalizacji umożliwia zastosowanie krótszego czasu chłodzenia, co bezpośrednio wpływa na skrócenie cyklu procesu wtryskiwania i w rezultacie przekłada się na zwiększenie wydajności produkcji [85].

Przebieg krystalizacji polimerów zależy od wielu czynników, dlatego też może być modyfikowany poprzez zastosowanie różnych metod [23], do których zalicza się stosowanie środków będących zarodkami krystalizacji (tzw. nukleanty) [33] oraz w kontrze stosowanie dużych wartości temperatury powierzchni formujących. Dodanie nukleantów do materiału polimerowego powoduje przyspieszenie procesu krystalizacji (w wyższych temperaturach) oraz rozdrobnienie krystalitów. Efektem takiego przebiegu procesu krystalizacji jest redukcja czasu chłodzenia, a także poprawa właściwości estetycznych i wizualnych wyrobu. Druga metoda sterowania procesem krystalizacji polimeru polega na zmianie warunków chłodzenia – w przypadku technologii wtryskiwania niska temperatura formy powoduje, że odbiór ciepła od stopionego polimeru następuje szybciej, co jednocześnie skraca czas cyklu. Taki zabieg może skutkować brakiem osiągnięcia przez wyrób wymaganego stopnia krystaliczności [97]. Z drugiej strony, zastosowanie wysokiej temperatury powierzchni formujących umożliwia uzyskanie dużej ilości fazy krystalicznej, przy koincydencyjnym wydłużeniu czasu chłodzenia wyrobu.

Tabela 4.2. Nazwy i skład przygotowanych próbek

Nazwa	Zawartość PP [% wag.]	Zawartość Millad NX8000 [% wag.]
PP	100	0
0,1% NX	99,9	0,1
0,25% NX	99,75	0,25
0,5% NX	99,5	0,5
1% NX	99	1

Aby zbadać wpływ temperatury formy wtryskowej (powierzchni formujących) na właściwości modyfikowanego polipropylenu wykonano próbki. Proces wtryskiwania zrealizowano z zastosowaniem wtryskarki Demag Ergotech Pro 250 - 80 o sile zamykania 250 kN. Temperatura wtryskiwania wynosiła 230°C, ciśnienie wtrysku – 60 MPa, a temperatura formy – 20, 40 i 60 °C.

#### 4.1. Metodyka badań

Proces krystalizacji polipropylenu z różną zawartością nukleanta wtryskiwanego przy zmiennych warunkach temperatury powierzchni formującej zbadano poprzez zastosowanie metody skaningowej kalorymetrii różnicowej (ang. Differential Scanning Calorimetry – DSC). Metoda ta opiera się na pomiarze ilości ciepła pobranego lub oddanego przez próbkę o znanej masie podczas podgrzewania lub chłodzenia ze znaną szybkością.

W celu przeprowadzenia pomiarów posłużono się aparatem Netzsch DSC 204F1 [131], który umożliwił wykonanie badań w atmosferze azotu. Próbki o masie  $5 \pm 0,2$  mg umieszczano w aluminiowych tyglach, które następnie lokowano w aparacie DSC.

Plan pomiarowy wyglądał w następujący sposób:

1. grzanie od 20°C do 250°C z szybkością 10 °C/min,
2. przetrzymanie próbki w temperaturze 250 °C przez 5 minut,
3. chłodzenie próbki do 20°C z szybkością 5, 10, 20 °C/min,
4. przetrzymanie próbki w temperaturze 20 °C przez 5 minut,
5. grzanie do 250°C z szybkością 5, 10, 20 °C/min.

Temperatury topnienia i krystalizacji  $T_{top}$  i  $T_{kr}$  badanego polimeru odczytano jako maksimum odpowiednich pików, natomiast stopień krystaliczności  $X_{kr}$  wyznaczono zgodnie z równaniem (4.1):

$$X_{kr} = \frac{\Delta H_m}{(1-\varphi) \cdot \Delta H_{100\%}} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

## 4.2. Analiza wyników

Na rysunku 4.1 przedstawiono termogramy DSC otrzymane podczas pierwszego grzania próbek wtryskiwanych przy różnej temperaturze formy. Pierwsze grzanie powoduje stopienie materiału, co prowadzi do „wymazania” jego historii termicznej (temperatura formy przestaje mieć wpływ na jego właściwości). W tabeli 4.3 przedstawiono rezultaty  $T_{top}$  i  $X_{kr}$ .

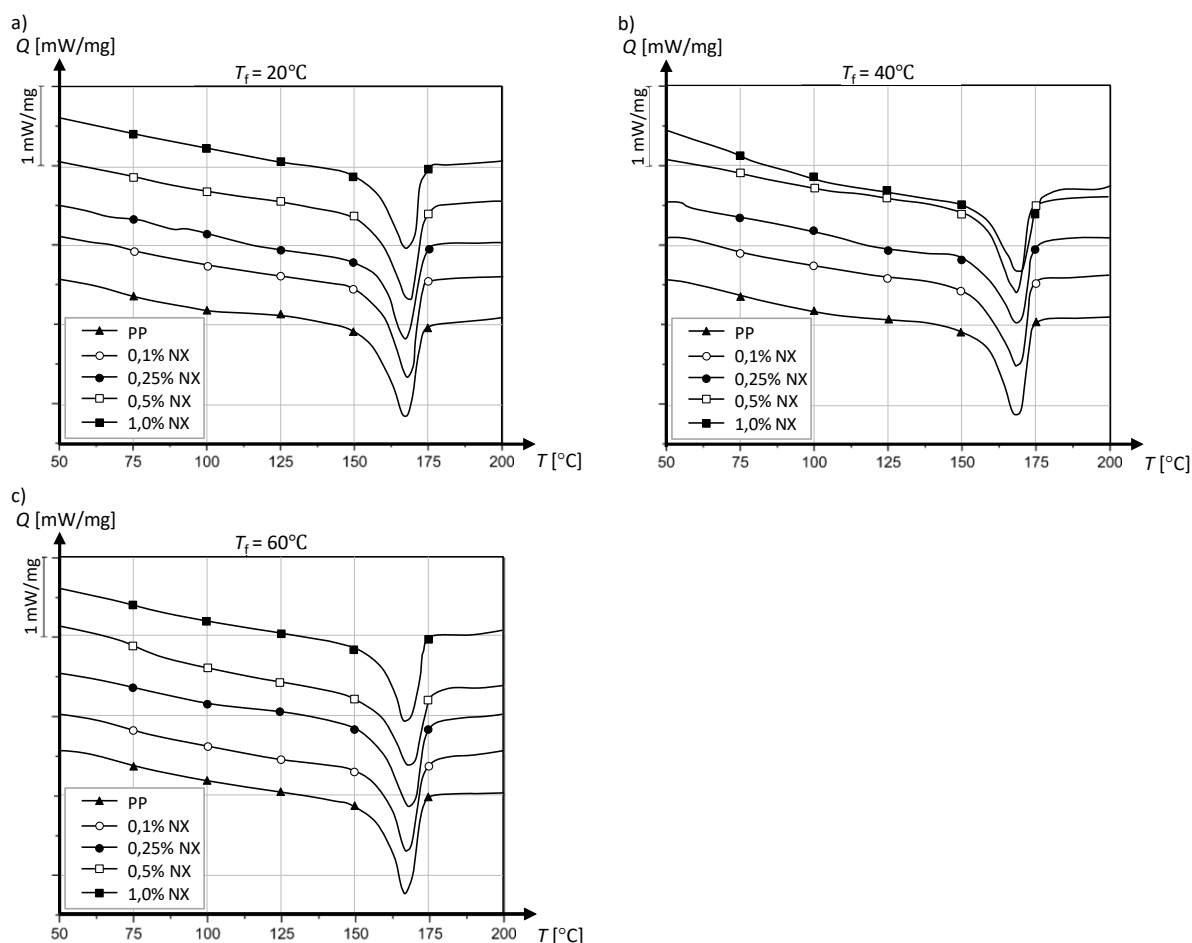
Analizując uzyskane termogramy (rys. 4.1) można zaobserwować pojedynczy pik endotermiczny, który świadczy o topnieniu polipropylenu. Temperatura topnienia czystego PP badana metodą DSC mieści się w zakresie 167,0-168,3 °C – są to wartości charakterystyczne dla izotaktycznego polipropylenu [38]. W tym przypadku nie zauważono prostej zależności między jej wartością a temperaturą formy wtryskowej. Ponadto, rozpatrując szerokość pików topnienia, gdzie różnice wynoszą 1-2 °C, można stwierdzić, że są pomijalnie małe i nie mają znaczenia z punktu widzenia planowania procesu technologicznego oraz właściwości użytkowych wyrobu. Próbkę badawczą z dodatkiem nukleanta cechują się nieznacznie wyższą temperaturą topnienia niż czysty polipropylen (najwyższa wartość wynosi 169,3 °C, uzyskana dla 1% NX wtryskiwanej przy  $T_f = 40$  °C). Zmiana  $T_{top}$  może świadczyć o modyfikacji struktury krystalicznej polimeru, jednak zważając, że jej wartość jest niewielka, może ona wynikać również z innych, przypadkowych czynników (np. kształt próbki, powierzchnia jej styku z tygłem) [23].

Tabela 4.3. Właściwości termiczne próbek wtryskiwanych przy różnej temperaturze formy

$T_f$ [°C]	PP		0,1% NX		0,25% NX		0,5% NX		1% NX	
	$T_{top}$ [°C]	$X_{kr}$ [%]	$T_{top}$ [°C]	$X_{kr}$ [%]	$T_{top}$ [°C]	$X_{kr}$ [%]	$T_{top}$ [°C]	$X_{kr}$ [%]	$T_{top}$ [°C]	$X_{kr}$ [%]
<b>20</b>	167,2	43,5	167,6	47,9	167,2	51,6	168,4	50,5	168,0	47,1
<b>40</b>	168,3	45,9	168,6	47,6	168,7	50,4	168,1	48,3	169,3	49,8
<b>60</b>	167,0	48,7	167,3	47,7	168,4	48,3	167,2	47,6	167,1	48,3

Drugim rozpatrywanym parametrem w kontekście zależności z temperaturą formy (powierzchni formującej) był stopień krystaliczności. W przypadku  $T_f = 20$  °C zawartość fazy krystalicznej wynosi 43,5% i zwiększa się do 48,7% dla temperatury formy wynoszącej 60 °C. Przy większej wartości  $T_f$  szybkość chłodzenia stopionego polimeru maleje, co powoduje, że jego makrocząsteczki tworzą strukturę uporządkowaną [97]. Na podstawie otrzymanych rezultatów można stwierdzić, że im większa wartość temperatury powierzchni formującej (szybszy odbiór ciepła od wypraski), tym większa ilość materiału zostaje „zamrożona” w fazie amorficznej. Niemniej jednak należy odnotować, że wzrost  $X_{kr}$  z 43,5% do 48,5% nie wpływa

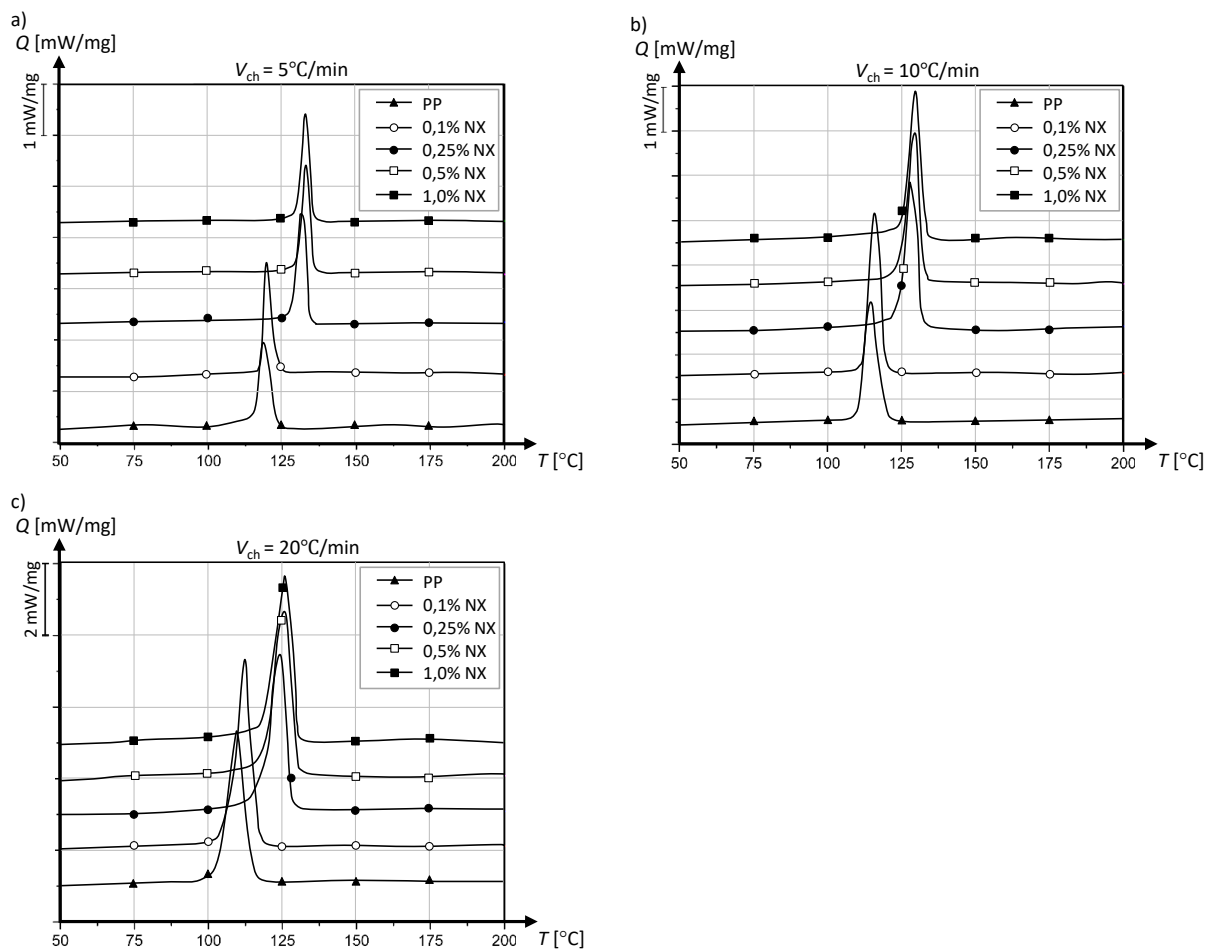
znacząco na właściwości polimeru, a pozwala w znaczny sposób skrócić czas cyklu wtryskiwania, co jest zjawiskiem pozytywnym w aspekcie ekonomiki produkcji.



Rys. 4.1. Termogramy DSC próbek wtryskiwanych przy różnej temperaturze formy: a)  $T_f = 20^\circ\text{C}$ , b)  $T_f = 40^\circ\text{C}$ , c)  $T_f = 60^\circ\text{C}$

Zgodnie z danymi przedstawionymi na termogramach DSC (rys. 4.2), które zostały uzyskane podczas chłodzenia próbek z różną szybkością, polipropylen krystalizuje w temperaturze ok.  $100\text{--}130^\circ\text{C}$  – świadczy o tym występowanie egzotermicznego piku w tym zakresie. Zmiana szybkości chłodzenia wpływa w znaczący sposób na wartość temperatury krystalizacji ( $T_{kr}$ ) – dla wszystkich próbek odnotowano obniżenie temperatury krystalizacji. Ma to związek z faktem, że zjawisko przemiany fazowej (jakim jest krystalizacja), zależy od zmiany warunków chłodzenia [23]. W przypadku polipropylenu bez dodatków zmiana szybkości chłodzenia z 5 do  $20^\circ\text{C}/\text{min}$  powoduje spadek temperatury krystalizacji  $T_{kr}$  o  $9,8^\circ\text{C}$ . Zbliżoną tendencję zarejestrowano dla próbek z dodatkiem nukleanta, z tym jednak rozgraniczeniem, że wartość różnicy temperatur jest wyższa i wynosi około  $7^\circ\text{C}$ . W kwestii próbek o różnej zawartości nukleanta można odnotować, że jego dodatek powoduje zwiększenie temperatury krystalizacji

zacji PP niezależnie od szybkości chłodzenia – dla prędkości chłodzenia 10 °C/min od około 115,0 °C aż do 130,0 °C. Analizując zależność pomiędzy ilością modyfikatora a wartością temperatury krystalizacji ( $T_{kr}$ ), stwierdzono, że nie jest liniowa – dodatek na poziomie 0,25% skutkuje wzrostem  $T_{kr}$  polipropylenu o 13,5 °C, natomiast dalsze zwiększanie jego ilości (do 1%) powoduje nieznaczną zmianę o 1,5 °C. Prowadzi to do wniosku, że zastosowanie 0,25% wag. modyfikatora korzystnie wpłynie na skrócenie czasu cyklu przetwarzania, natomiast zwiększanie jego ilości do 1% nie spowoduje dużych zmian. Taka zależność  $T_{kr}$  i ilości modyfikatora jest cechą charakterystyczną dla środków nukleujących opartych na sorbitolu [33].



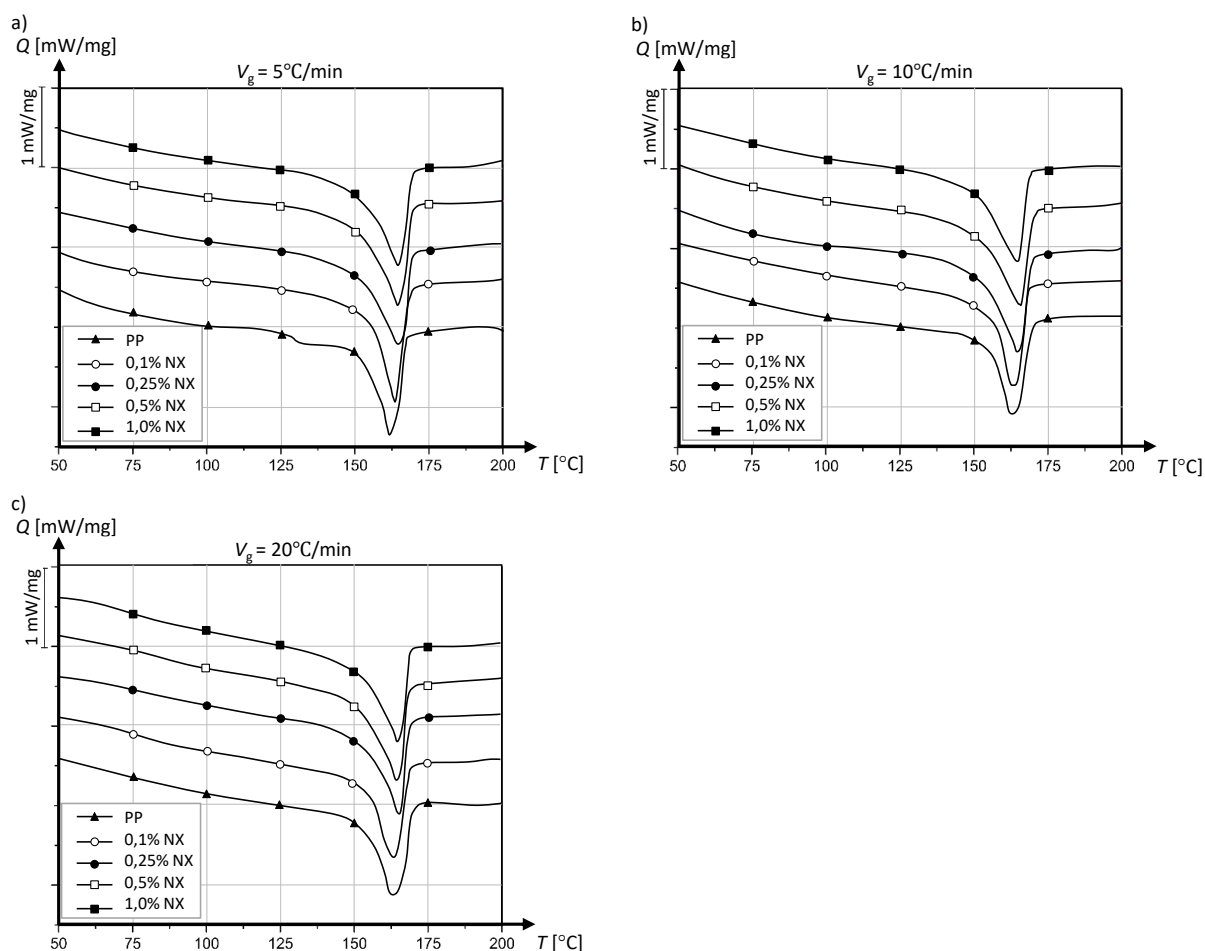
Rys. 4.2. Termogramy DSC otrzymane podczas chłodzenia z różną szybkością: a) 5 °C/min, b) 10 °C/min, c) 20 °C/min

Rysunek 4.3 ilustruje termogramy DSC grzania próbek wykryzalizowanych podczas wcześniejszego procesu chłodzenia z różną szybkością. Analizując otrzymane rezultaty można ocenić ilość fazy krystalicznej, która została wytworzona w tworzywie podczas wcześniej przeprowadzonego etapu badania. Szybkość chłodzenia, analogicznie jak w przypadku temperatury krystalizacji, znacząco wpływa na  $X_{kr}$  polipropylenu. Zwiększanie prędkości chłodzenia z 5 do 20 °C/min powoduje, że stopień krystaliczności obniża się z około 49,8% do 44,2%.

Porównując otrzymane wartości  $X_{kr}$  z wartościami uzyskanymi dla próbek wtryskiwanych do gniazd formujących o różnej temperaturze powierzchni, stwierdzono, że są one zbliżone. Biorąc pod uwagę ten fakt, można spodziewać się, że wartości (m. in.  $T_{kr}$ ) uzyskane podczas badania kalorymetrią różnicową rzetelnie odzwierciedlają rzeczywiste zjawiska zachodzące podczas procesu wtrysku.

Tabela 4.4. Właściwości termiczne próbek chłodzonych z różną szybkością.

Właściwość	Szybkość chłodzenia [°C/min]	PP	0,1% NX	0,25% NX	0,5% NX	1% NX
$T_{top}$ [°C]	5	162,1	163,4	165,2	164,9	164,6
	10	163,2	167,6	165,2	165,1	164,7
	20	162,9	163,2	165,1	164,7	164,9
$T_{kr}$ [°C]	5	119,0	119,8	131,7	132,4	133,2
	10	115,0	116,6	128,5	129,4	130,0
	20	109,8	112,9	124,3	125,7	126,2
$X_{kr}$ [%]	5	49,8	50,9	54,6	53,1	54,2
	10	44,9	49,1	50,3	54,0	52,0
	20	44,2	49,1	51,4	52,2	51,9



Rys. 4.3. Termogramy DSC otrzymane podczas następnego grzania próbek: a) 5 °C/min, b) 10 °C/min, c) 20 °C/min



Konkludując przeprowadzone badania eksperymentalne wpływu szybkości chłodzenia na strukturę wyprasek – przeanalizowano wpływ warunków chłodzenia (zmiennej szybkości chłodzenia) na proces krystalizacji polipropylenu. Badania przeprowadzono w formie wtryskowej o różnej temperaturze powierzchni formujących oraz metodą skaningowej kalorymetrii różnicowej. Na podstawie wykonanych prac badawczych stwierdzono, że zmiana temperatury formy (zmiana szybkości chłodzenia tworzywa) wpływa na osiągnięty stopień krystaliczności oraz temperaturę krystalizacji tworzywa. Dla czystego polipropylenu najkorzystniejsze wyniki (duże wartości  $X_{kr}$  i  $T_{kr}$ ) otrzymano przy najwyższej temperaturze formy i chłodzeniu z najmniejszą prędkością, niemniej zwiększanie prędkości chłodzenia nie wpływało w znaczny sposób na spadek stopnia krystaliczności badanych próbek. W przypadku próbek modyfikowanych nukleantem odnotowano wyraźny wzrost temperatury krystalizacji i ilości fazy krystalicznej w relacji do czystego polipropylenu. Na podstawie zrealizowanych badań można skonstatować, że proces krystalizacji polipropylenu może być kontrolowany poprzez stosowanie ściśle określonych warunków chłodzenia formy wtryskowej.

## **5. Opracowanie założeń konstrukcyjnych układu chłodzenia i analiza oraz badania symulacyjne**

Na podstawie zgromadzonych materiałów, licznych dyskusji w środowisku specjalistów zajmujących się konstrukcją form wtryskowych oraz wiedzy i doświadczenia autora sformułowano zagadnienia, którymi powinien cechować się nowy układ chłodzenia form wtryskowych. Jednym z głównych obszarów zastosowania technologii wtryskiwania w warunkach dynamicznych zmian temperatury (RHCM) jest produkcja wyrobów typu 3C (z j. ang. computer, communication and customer electronic / komputery, komunikacja i elektronika użytkowa). Jest to związane przede wszystkim z bardzo wysokimi wymaganiami jakościowymi stawianymi tego typu wyrobom.

Proponowane w niniejszej rozprawie rozwiązanie ma polegać na zwiększeniu powierzchni czynnej wymiany ciepłej pomiędzy wkładem formującym a medium chłodzącym, poprzez wykorzystanie odpowiednio ukształtowanych wkładów chłodzących (kanały o zmiennej geometrii przekroju poprzecznego).

### **5.1. Opracowanie założeń konstrukcyjnych**

#### **5.1.1. Dobór materiału na wkładki badawcze**

Na jakość i dokładność wymiarową produkowanych wyprasek decydujący wpływ mają: konstrukcja, materiał i jakość wykonania formy wtryskowej. Konstrukcja formy wpływa na przebieg procesów fizykochemicznych zachodzących wewnątrz gniazd formujących. W trakcie jej projektowania należy zwrócić szczególną uwagę na następujące układy: wlewowy, wypychania, chłodzenia oraz konstrukcję gniazda wraz z odpowiednim odpowietrzeniem. Czynniki wpływające na jakość wyprasek z punktu widzenia konstrukcji formy to: tolerancje wykonawcze, jakość powierzchni, rozmieszczenie kanałów chłodzących, sposób ustalenia stempla względem matrycy, sztywność konstrukcji oraz stopień zużycia formy. Wysoka jakość wykonania powierzchni roboczych formy pozwala uniknąć między innymi: powstawania błędów kształtu, nieprawidłowości usuwania wyrobu z formy, nieprzylegania powierzchni zamykających (powstawania wypłytki, gratów itp.) oraz występowania zbyt głębokich śladów po wypychaczach. Od strony eksploatacyjnej bardzo ważne jest zachowanie dużej żywotności poszczególnych części. Materiał z którego wykonuje się formę (wkładki

formujące) jest ważnym czynnikiem determinującym pożądany rozkład temperatury w formie i tym samym wpływa na:

- jakość powierzchni wypraski,
- powstawanie wypływek (wzajemne nieprzyleganie powierzchni zamykających),
- gęstość wypraski (stopień upakowania materiału),
- zdolność wypełnienia formy,
- właściwości eksploatacyjne wyrobu,
- powstawanie skurczu i naprężeń wewnętrznych w wyprasce,
- wydajność produkcji.

Z uwagi na istotny wpływ materiału i jakości wykonania formy na dokładność wymiarową, skurcz oraz jakość powierzchni wypraski, projektując formę szczególną uwagę należy poświęcić doborowi odpowiedniego materiału przeznaczonego na jej wykonanie. Stąd surowcom przeznaczonym na budowę gniazd formujących stawia się następujące wymagania:

- twardość w zakresie 50 – 60 HRC,
- duża odporność na zużycie ściernie – robocze powierzchnie formy długo zachowują żądaną jakość, gładkość oraz stabilność wymiarową im odporność jest większa; ponadto, odporność na zużycie ściernie ma szczególne znaczenie, gdy stosowane tworzywo jest wzmocnione włóknami,
- wysoka stabilność wymiarowa,
- duża przewodność cieplna, która wpływa na równomierne, szybkie nagrzewanie formy/ powierzchni formujących oraz odprowadzanie ciepła w trakcie procesu chłodzenia (ogranicza to do minimum odkształcenia wyprasek); zbyt mała przewodność cieplna może generować brak powtarzalności produkowanych wyrobów oraz spowodować wydłużenie czasu cyklu produkcyjnego,
- wysoka odporność na korozję – cecha ważna z punktu widzenia przechowywania i eksploatacji form wtryskowych w wilgotnym środowisku; kanały chłodzące wymagają czystej (pozbawionej rdzy i osadu z kamienia) powierzchni ścianek w celu zapewnienia stałego poziomu sprawności i wysokiej efektywności transferu ciepła od nagranych powierzchni,

- wytrzymałość na zmęczenie cieplne oraz odporność na działanie temperatury w zakresie 20 – 290 °C; ważnym parametrem jest również stabilność wymiarowa w zakresie temperatur okna przetwórczego tworzywa,
- dobra polerowalność,
- dobra obrabialność umożliwiająca zastosowanie dużych prędkości skrawania – daje to sposobność na skrócenie czasu obróbki oraz redukcję zużycia narzędzi skrawających,
- możliwość prowadzenia obróbki elektroerozyjnej,
- dobra spawalność – cecha ważna z punktu widzenia regeneracji elementów formy wtryskowej – powierzchnie formujące, krawędzie zamykające często są napawane i ponownie kształtowane,
- duża udarność oraz odporność na wgniecenia,
- podatność na obróbkę cieplno – chemiczną (hartowanie, utwardzanie powierzchniowe, azotowanie, nawęglanie).

Najpopularniejszymi materiałami stosowanymi w konstrukcji form wtryskowych są stale narzędziowe, oznaczone numerami (zgodnie z niemiecką normą DIN) 1.1730, 1.2312, 1.2343 oraz stal o nazwie handlowej TOOLOX 44.

Stal narzędziowa 1.1730, ze względu na dobry stosunek ceny do jakości, najczęściej wykorzystywana jest do konstrukcji korpusów form [123, 127, 135]. Dobra obrabialność oraz właściwości wytrzymałościowe sprawiają, że stosuje się ją na płyty gabarytowe i dystansowe oraz płyty wypychaczy. Z uwagi na zbyt niską twardość sporadycznie używa się jej na płyty formujące.

Materiałami dedykowanymi do budowy wkładów formujących są przede wszystkim stale 1.2343 oraz TOOLOX 44, które zostaną szczegółowo opisane w dalszej części pracy.

### **Stal 1.2343 (WCL wg. PN-86/H-85021)**

Stal 1.2343 to stal narzędziowa do pracy na gorąco przeznaczona na narzędzia pracujące w wysokiej temperaturze do 600 °C. Charakteryzuje się dużą ciągliwością i małą skłonnością do pęknięć hartowniczych. Ogromną zaletą jest dobra obrabialność, co ma znaczenie podczas frezowania głębokich kieszeni, wiercenia długich (głębokich) otworów kanałów chłodzących w płytach formujących. Stal charakteryzuje się dużą hartownością, odpornością

na odpuszczanie i wytrzymałością przy wysokich temperaturach. Wykazuje małą skłonność do powstawania powierzchniowej siatki pęknięć, jest niewrażliwa na gwałtowne zmiany temperatury, uderzenia i wstrząsy. Charakteryzuje się odpornością na tworzenie się pęknięć na granicach ziaren, co często staje się przyczyną ich wykruszania i tworzenia się koncentratów naprężeń, skutkujących w dalszym etapie eksploatacji powstawaniem siatki pęknięć powierzchniowych. Co więcej, dodatek chromu i krzemu zwiększa wytrzymałość zmęczeniową stali, odporność na utlenianie i wytrzymałość wysokotemperaturową. Dobre właściwości fizyczne i mechaniczne stal WCL uzyskuje również dzięki stosunkowo małej (jak na stale narzędziowe) zawartości węgla i dodatkom stopowym. Pozytywnie na strukturę stali wpływa: Cr, V, Mo i Si. W tabeli 5.1 przedstawiono kompletny skład chemiczny. Wanad i molibden są pierwiastkami, które po rozpuszczeniu podczas austenitowania powodują wydzielanie się węglików MC i M<sub>2</sub>C. Prowadzi to do zjawiska twardości wtórnej. Ma to znaczenie z uwagi na fakt, że stal ta podczas odpuszczania jest nagrzewana do temperatury o ok. 100 °C wyższej niż temperatura pracy. Obecność chromu powoduje zwiększenie hartowności oraz odporności na utlenianie. Krzem w ilości ok. 1% przyczynia się również do zwiększenia odporności na utlenianie w temperaturze nawet do 800 °C. Dodatek wanadu zwiększa z kolei odporność na zużycie erozyjne. Twardość stali WCL po zahartowaniu i odpuszczaniu mieści się w zakresie 53-58 HRC (w zależności od temperatury odpuszczania).

Stal WCL charakteryzuje się dobrą przewodnością cieplną (tzw. łatwością przewodzenia ciepła), zwiększającą się wraz ze wzrostem temperatury. Zapewnia to szybkie odbieranie i oddawanie ciepła, a co za tym idzie większą szybkość grzania i chłodzenia. Jest to szczególnie ważne w formach wtryskowych pracujących w cyklu RHCM. Oddziaływanie na właściwości eksploatacyjne materiału ma współczynnik rozszerzalności cieplnej, którego zmniejszenie obniża naprężenia cieplne. Niewielka wartość współczynnika rozszerzalności wpływa na większą stabilność wymiarową podczas pracy, zwłaszcza, że stal ta jest przeznaczona do pracy nawet w bardzo wysokich temperaturach (rzędu 600 °C), a formy wtryskowe nagrzewa się maksymalnie do 300 °C (poza szczególnymi przypadkami produkcji specjalnej). Na etapie konstrukcji i doboru materiału na wkłady formujące należy jednak wziąć pod uwagę współczynnik bezpieczeństwa uwzględniający ryzyko wystąpienia błędów procesu nagrzewania i przekroczenia dopuszczalnych wartości temperatury.

W tabelach 5.1 – 5.3 przedstawiono najważniejsze właściwości mechaniczne, fizyczne i cieplne oraz odporność stali na działanie czynników korozyjnych.

Tabela 5.1. Skład chemiczny stali 1.2343 [133]

Pierwiastek	Zawartość [%]
C	0,32-0,42
Mn	0,20-0,50
Si	0,80-1,20
Cr	4,50-5,50
Ni	≤0,35
Mo	1,20-1,50
V	0,30-0,50
W	≤0,30
Co	≤0,30
Cu	≤0,30
P	≤0,030
S	≤0,030

Tabela 5.2. Właściwości mechaniczne i fizyczne stali 1.2343 [133]

Właściwość	Jednostka	Wartość
Moduł Young'a	GPa	207-218
Moduł sprężystości poprzecznej	GPa	76-79,9
Współczynnik sprężystości objętościowej (moduł Helmholtza)	GPa	246-259
Współczynnik Poissona	-	0,36-0,375
Współczynnik kształtu	-	16
Granica plastyczności, Re	MPa	1380-1660
Wytrzymałość na rozciąganie, Rm	MPa	1660-1930
Wytrzymałość na ściskanie	MPa	1520-1790
Wytrzymałość na zginanie	MPa	1380-1660
Wydłużenie, A	%	5-9
Twardość	HV	207-690
Wytrzymałość zmęczeniowa 10 <sup>7</sup> cykli	MPa	662-869
Odporność na kruche pękanie	MPa·m <sup>1/2</sup>	104-136
Gęstość, ρ	g/cm <sup>3</sup>	7,8

Tabela 5.3. Właściwości cieplne stali 1.2343 [133]

Właściwość	Jednostka	Wartość
Maksymalna temperatura pracy	°C	482-538
Minimalna temperatura pracy	°C	-73÷(-53)
Przewodność cieplna	W/m·K	28,9-31,3
Pojemność cieplna	J/kg·K	461-480
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	K <sup>-1</sup> ·10 <sup>-6</sup>	11-11,5
Utajone ciepło topnienia	kJ/kg	386-437
Opór właściwy	μΩ·cm	25-56

## Stal TOOLOX 44

TOOLOX 44 to stal z gatunku stali narzędziowych, produkowana przez szwedzką hutę SSAB. Dostarczana jest w stanie ulepszonym cieplnie. Charakteryzuje się dużą udarnością oraz bardzo małymi naprężeniami własnymi, co zapewnia dużą stabilność wymiarową narzędzia podczas pracy. Twardość w stanie dostawy wynosi 45 HRC. Poprzez azotowanie

i wytwarzanie powłok metodami PVD można zwiększyć powierzchniowo jej wartość do 65 HRC [137]. Dodatkowo należy wspomnieć, że stal ta łatwo poddaje się obróbce mechanicznej, wykazuje wysoką polerowalność, nadaje się do spawania CE = 0,94, trawienia i obróbki elektroerozyjnej. Ma praktycznie wszystkie właściwości, które wymagane są od materiału stosowanego na wkłady formujące. Obecnie stanowi bardzo dużą konkurencję dla stali 1.2343, lecz jest rozwiązaniem mniej opłacalnym ekonomicznie. Dodatek chromu w tej stali powoduje zwiększenie hartowności oraz odporności na utlenianie. Krzem w ilości około 1 % również przyczynia się do zwiększenia odporności na utlenianie w temperaturze nawet do 800 °C. Obecność wanadu zwiększa odporność na zużycie erozyjne [137].

Stal Toolox 44 charakteryzuje się dużą jednorodnością, wytrzymałością (około 1300 MPa), sprężystością i wysoką udarnością. Do jej zalet zalicza się również wysoką stabilność wymiarową oraz dobre właściwości mechaniczne w wysokich temperaturach pracy (dochodzących do 600 °C).

Istotną kwestią podczas grzania i chłodzenia formy wtryskowej są pojawiające się naprężenia cieplne, powodujące zmęczenie cieplne. Rozkład temperatury w grzonym elemencie określa się za pomocą znajomości właściwości fizyko – chemicznych i cieplnych materiału. Najistotniejszym parametrem jest współczynnik rozszerzalności cieplnej, którego niska wartość wpływa na zmniejszenie naprężeń cieplnych, odkształceń podczas zmiany temperatury pracy oraz, co bardzo ważne, gwarantuje dużą stabilność wymiarową. Stal TOOLOX 44 cechuje się stosunkowo dobrą przewodnością cieplną, co gwarantuje odpowiednią szybkość nagrzewania i chłodzenia formy, a także pozwala zapobiec występowaniu dużego gradientu temperatury w obszarze gniazda formującego. Co więcej, wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej charakteryzuje się stałością w zakresie temperatury od 20 °C do 400 °C. Producent stali TOOLOX 44 zapewnia, że materiał zachowuje dużą wytrzymałość i udarność nawet do temperatury ok. 590 °C (w zależności od pozostałych warunków pracy i zastosowanej obróbki), co wpływa na większą żywotność formy podczas pracy w cyklu zmiennych warunków temperaturowych [137].

W tabelach 5.4 – 5.6 przedstawiono najważniejsze właściwości mechaniczne, fizyczne i cieplne oraz odporność stali na działanie czynników korozyjnych.

Tabela 5.4. Skład chemiczny stali TOOLOX 44 [137]

Pierwiastek	Zawartość [%]
C	0,32
Mn	0,8
Si	0,60 - 1,10
Cr	1,35
Ni	Max. 1
Mo	0,8
V	0,14
P	≤0,01
S	≤0,003

Tabela 5.5. Właściwości mechaniczne i fizyczne stali TOOLOX 44 [137]

Właściwość	Jednostka	Wartość
Granica plastyczności, Re	MPa	1300
Wytrzymałość na rozciąganie, Rm	MPa	1450
Wydłużenie, A	%	13
Twardość	HRC	45
Wytrzymałość na ściskanie,	MPa	1250
Udarność	J	30

Tabela 5.6. Właściwości cieplne stali TOOLOX 44 [137]

Właściwość	Jednostka	Wartość
Maksymalna temperatura pracy	°C	590
Przewodność cieplna	W/m·K	28
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	K <sup>-1</sup> ·10 <sup>-6</sup>	13,5

Opisane materiały są najczęściej stosowanymi, jeżeli chodzi o konstrukcję wkładów formujących. Innymi materiałami, które mogłyby spełnić stawiane wymagania są stopy na bazie aluminium lub miedzi. Stopy te cechują się dużo większą wartością współczynnika przewodności cieplnej niż prezentowane stale. Poniżej przedstawiono w sposób szczegółowy dwa stopy aluminium i miedzi, które mogą być brane pod uwagę podczas konstrukcji elementów form wtryskowych.

#### Stop aluminium EN AW 7075 (wg ISO 209-1:1989 AlZn5.5MGCu)

Stop aluminium EN AW 7075 (wg ISO 209-1:1989 AlZn5,5MGCu) cechuje się dużą wytrzymałością mechaniczną (porównywalną do stali konstrukcyjnych) oraz bardzo dużą wytrzymałością zmęczeniową. W przemyśle tworzyw sztucznych stop 7075 jest najczęściej stosowany na formy rozdmuchowe i formy do tworzyw piankowych. Ponadto, jego mała masa przy dobrych właściwościach mechanicznych powoduje, że jest on stosowany w przemyśle lotniczym, sportowym i na wybrane części maszyn. Materiał cechuje się dobrą obrabialnością oraz twardością. Bardzo dobrze nadaje się do polerowania i obróbki elektroerozyjnej oraz



można go spawać. Do głównych zalet stopu, w aspekcie prowadzonych badań, należą: doskonała przewodność cieplna, która jest 3-krotnie większa od stali, oraz jednorodna struktura wewnętrzna materiału, co sprawia, że nadaje się do obróbki głębokich wybrań. Jest to szczególnie istotne w przypadku wykonywania długich kanałów chłodzących. Homogeniczna struktura materiału zapewnia stabilność i równomierność nagrzewania oraz chłodzenia.

Wadą stosowania omawianego materiału na elementy form wtryskowych jest znaczny spadek wartości granicy plastyczności wraz ze wzrostem temperatury. Już przy temperaturze wynoszącej 100 °C następuje regres właściwości mechanicznych stopu EN AW 7075 [79].

Poniżej przedstawiono najważniejsze właściwości mechaniczne, fizyczne oraz cieplne omawianego materiału (5.7 – 5.9).

Tabela 5.7. Skład chemiczny stopu aluminium EN AW 7075 [122, 133]

Pierwiastek	Zawartość [%]
Mg	2,1 – 2,9
Mn	≤0,30
Fe	≤0,50
Si	≤0,40
Cu	1,2 – 2
Zn	5,1 – 6,1
Cr	0,18 – 0,28
Ti	≤0,20
Zr+Ti	≤0,25
Inne	≤0,15
Al	reszta

Tabela 5.8. Właściwości mechaniczne i fizyczne aluminium EN AW 7075 [122, 133]

Właściwość	Jednostka	Wartość
Granica plastyczności, Re	MPa	240 – 460
Wytrzymałość na rozciąganie, Rm	MPa	360 – 540
Wydłużenie, A	%	2 – 8
Twardość	HBW	104 – 160
Udarność	J/cm <sup>2</sup>	33,7

Tabela 5.9. Właściwości cieplne aluminium EN AW 7075 [122, 133]

Właściwość	Jednostka	Wartość
Maksymalna temperatura pracy	°C	100 – 150
Przewodność cieplna	W/m·K	130 – 160
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	K <sup>-1</sup> ·10 <sup>-6</sup>	23,4

## Stop AMPCOLOY 940

W przypadku stopów na bazie miedzi wyróżnić można dwie propozycje: AMPCOLOY 83 i AMPCOLOY 940/944. Stop AMPCOLOY 83 w przetwórstwie tworzyw sztucznych najczęściej wykorzystywany jest do budowy gniazd formujących. Stosuje się go do wytwarzania kokil,

wkładów i trzpieni chłodzących. Dodatek berylu o wartości 1,9 % pozwala uzyskać dobre właściwości mechaniczne przy zachowaniu wysokiej przewodności cieplnej i elektrycznej. Przewodność cieplna AMPCOLOY 83 przewyższa ponad 4 krotnie stal [116], dlatego jest tak szeroko stosowany na wkładki chłodzące do form wtryskowych. Zazwyczaj tego typu wkładki osadzone są głównie po stronie stemplowej formy, w miejscach gdzie utrudnione jest wychłodzenie wypraski (przeważnie są to miejsca, w których problem stanowi poprowadzenie długich kanałów chłodzących). Innym stopem miedzi szeroko stosowanym w konstrukcji form jest opatentowany stop AMPCOLOY 940/944. Podobnie jak inne stopy miedzi, w przetwórstwie tworzyw sztucznych najczęściej wykorzystuje się go do budowy gniazd formujących. Dodatek takich pierwiastków stopowych jak nikiel, krzem i chrom pozwala uzyskać dobre właściwości mechaniczne przy zachowaniu wysokiej przewodności cieplnej i elektrycznej. Przewodność cieplna AMPCOLOY 940/944 jest blisko 8-krotnie wyższa od stali (dzięki temu jest tak szeroko stosowany na wkładki chłodzące do form wtryskowych). Wyeliminowanie berylu ze składu chemicznego sprawiło, że jest to materiał ekologiczny, spełniający wymagania aktualnych norm stosowanych na całym świecie. Wpłynęło to jednak na zmianę charakterystyki wytrzymałościowej stopu. W porównaniu do innych stopów na bazie miedzi nastąpił spadek twardości, wartości granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie. W tabelach 5.10 – 5.12 zawarto najważniejsze właściwości mechaniczne, fizyczne oraz cieplne stopu AMPCOLOY 940 (materiał wyciskany).

Tabela 5.10. Skład chemiczny stopu AMPCOLOY 940 [116]

Pierwiastek	Zawartość [%]
Ni	2,5
Si	0,7
Cr	0,4
Cu	reszta

Tabela 5.11. Właściwości mechaniczne i fizyczne stopu AMPCOLOY 940 [116]

Właściwość	Jednostka	Wartość
Granica plastyczności, Re	MPa	510 – 517
Wytrzymałość na rozciąganie, Rm	MPa	662 – 689
Wydłużenie, A	%	13
Twardość	HRB	95
Wytrzymałość na ściskanie,	MPa	552

Tabela 5.12. Właściwości cieplne stopu AMPCOLOY 940 [116]

Właściwość	Jednostka	Wartość
Maksymalna temperatura pracy	°C	
Przewodność cieplna	W/m·K	208
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	K <sup>-1</sup> ·10 <sup>-6</sup>	17,5

Wymienione materiały należą do najczęściej stosowanych do budowy form wtryskowych. Ich dobór wynika bezpośrednio z charakterystyki procesu produkcji danej wypraski. W przypadku gdy prognozowana jest produkcja masowa, dąży się do minimalizacji kosztów eksploatacji formy poprzez zastosowanie materiałów o wysokiej wytrzymałości mechanicznej i przewodności cieplnej. Pozwala to zminimalizować koszty obsługi, regeneracji i napraw gniazd formujących. Dobre parametry cieplne przekładają się na redukcję zużycia energii podczas procesów nagrzewania i przede wszystkim chłodzenia formy.

### **5.1.2. Wybór kształtu kanałów oraz analiza ich technologiczności i kosztów wykonania**

W ramach pracy skupiono się na podniesieniu efektywności procesu chłodzenia, co ma umożliwić skrócenie czasu cyklu, przy jednoczesnym zachowaniu założeń konstrukcyjnych i technologicznych formowanego wyrobu. W rozdziale drugim przedstawiono obecnie stosowane na świecie mechanizmy intensyfikacji wymiany ciepła w dziedzinie inżynierii cieplnej. Proponowane rozwiązanie, możliwe do wdrożenia w konstrukcji form wtryskowych, ma polegać na zwiększeniu czynnej powierzchni wymiany cieplnej pomiędzy wkładem formującym a medium chłodzącym poprzez wykorzystanie odpowiednio ukształtowanych kanałów chłodzących.

#### **Kształt kanału**

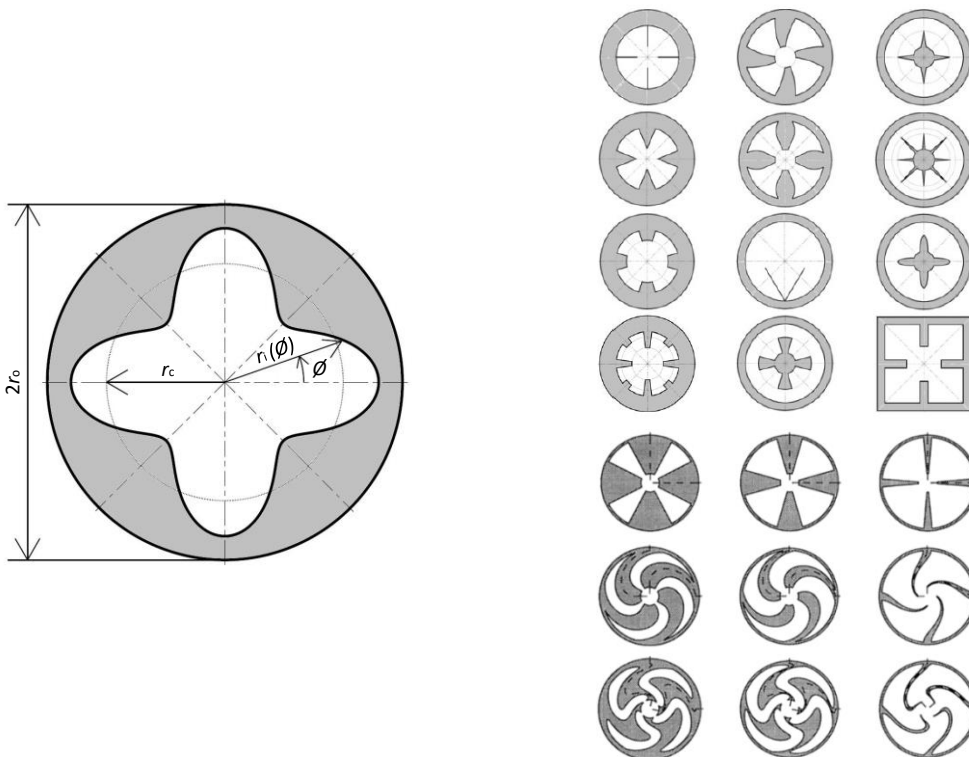
W celu wytypowania kształtu przekroju poprzecznego kanału chłodzącego w układzie chłodzenia form wtryskowych pracujących w technologii dynamicznych zmian temperatury (RHCM), najlepszym pod względem szybkości i równomierności odbioru ciepła od nagrzewanych powierzchni oraz kosztów i technologiczności wykonania, dokonano analizy literatury mieszczącej się w tym zakresie.

W rozdziale drugim zaznaczono, że konwencjonalne układy chłodzenia form opierają się na prostych, wierconych otworach w elementach formy (wkładach formujących, stemplach oraz płytach stemplowych i matrycowych). Stosowanie takich rozwiązań powoduje ograniczenia geometryczne w kształcie i przebiegu kanałów chłodzących, a tym samym w przepływie medium i odbiorze ciepła. Wiercone kanały są najczęściej stosowane ze względu na łatwość wykonania oraz stosunkowo niski koszt.

Chcąc zwiększyć czynną powierzchnię wymiany cieplnej należy rozpatrzyć kanały o zróżnicowanej geometrii przekroju poprzecznego. Tematem zależności pomiędzy kształtem kanału a efektywnością chłodzenia zajmuje się liczne grono mechaników teoretycznych,

którzy swoje badania opierają przede wszystkim na metodach obliczeniowych takich jak: metoda elementów skończonych (MES), metoda różnic skończonych (MRS) oraz metoda rozwiązań podstawowych (MRP).

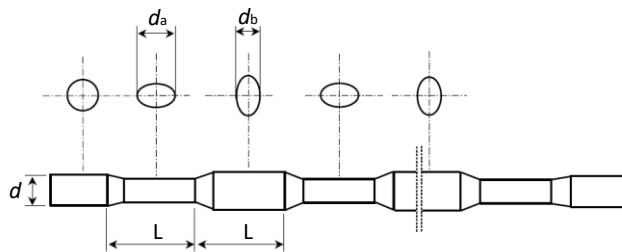
W pracach [34, 46] autorzy zaprezentowali najczęściej rozpatrywane w światowej literaturze przekroje poprzeczne kanałów (rys. 5.1), wykonali obliczenia z wykorzystaniem metody MRP dla propozycji swojego kształtu kanału, w którym zmiennym parametrem była wysokość i liczba korugacji (z j. ang corrugation – pofalowanie) oraz dokonali analizy rezultatów. Jako kryteria porównawcze przyjęto profil prędkości cieczy, rozkład temperatury, wartość współczynnika tarcia  $f$  (oporów przepływu), liczb podobieństwa Nusselta oraz Reynolds'a, a także błąd metody obliczeniowej. W podsumowaniu pracy autorzy przedstawili następujące wnioski: wartość parametru  $f$ -Re wzrasta wraz ze wzrostem bezwymiarowej wartości wysokości korugacji ścianki kanału, a obniża się wraz ze wzrostem liczby korugacji; wraz ze wzrostem bezwymiarowej wartości wysokości korugacji oraz ich liczby następuje zwielokrotnienie wartości liczby Nusselta, a tym samym intensyfikacji wymiany ciepła.



Rys. 5.1. Przekrój poprzeczny rozpatrywanego kanału (jeden z przypadków – 4 korugacje) [34, 46]

Chen i inni zaproponowali w swojej pracy [17], aby kształt przekroju kanału chłodzącego był zmienny wzdłuż jego osi. W tym celu opracowali model kanału chłodzącego, który nazwali kanałem „potrójnie owalnym” (rys. 5.2) – podążając wzdłuż osi kształt zmienia się trzykrot-

nie, przyjmując zarys elipsy (owalu). Zmienny profil ścianek kanału pełni w tym przypadku rolę generatora turbulencji, która jest zjawiskiem pożądanym, jeżeli chodzi o zintensyfikowanie transferu ciepła. Symulacje numeryczne dla badanego obiektu pozwoliły autorom na wyznaczenie liczb Reynoldsa i Nusselta oraz współczynnika tarcia, na podstawie których dokonali analizy przepływu cieczy z wymianą ciepła. W ramach wniosków stwierdzono, że największy wzrost lokalnego współczynnika przenikania ciepła (badanego wzdłuż osi) odnotowano w sekcji przejściowej elipsy poziomej w elipsę pionową. Ponadto, autorzy stwierdzili, że w momencie przejścia kanału o przekroju okrągłym w eliptyczny następuje zwielokrotnienie liczb Reynoldsa i Nusselta. W przypadku tej drugiej, skonstatowano wzrost od 40% do ponad 100% w zależności od prędkości przepływu. Negatywnym aspektem stosowania kanałów o profilu eliptycznym jest zwielokrotnienie oporów przepływu, co prowadzi do większych spadków ciśnienia aniżeli w przypadku stałego profilu konwencjonalnego (okrągłego).



Rys. 5.2. Kształt kanału rozważany przez Chena i innych [17]

Analizując źródła literaturowe z zakresu badań nad intensyfikacją wymiany ciepła, w których naukowcy poszukują kształtu kanału najefektywniejszego pod kątem odbioru ciepła od chłodzonego ciała, autor niniejszej dysertacji zauważył, że najczęściej rozważane są kanały uźbrowane. Taki typ kanałów chłodzących został przedstawiony między innymi w pracach [17, 27, 43, 55, 57, 83, 87, 96]. W rozprawach tych autorzy dokonują porównania efektywności wymiany ciepła w stosunku do kanałów konwencjonalnych, o gładkich ściankach, na podstawie wcześniej już przedstawionych kryteriów: wartości liczb Reynoldsa i Nusselta, wartości współczynnika tarcia, profili prędkości cieczy oraz pól rozkładu temperatury i strumienia cieplnego. Skupiają się przede wszystkim na zależnościach pomiędzy przyjętymi kryteriami, a liczbą żeber w kanale, ich wysokości oraz grubości ścianki. W każdym z przypadków, w którym zastosowano uźbrowanie ścianki, wartość liczby Nusselta osiągała większe wartości niż w przypadku kanału gładkiego, co świadczy o zwielokrotnieniu transportu ciepła na drodze zjawiska konwekcji. Zwiększeniu ulegała również wartość liczby Reynoldsa,

natomiast podobnie jak w przypadku kanałów o kształcie eliptycznym, następowało zwiększenie spadków ciśnienia na drodze przepływu.

Tematyka kanałów chłodzących o zmiennej geometrii przekroju poprzecznego nie jest obca autorowi niniejszej rozprawy, ponieważ w ramach prac [62 – 64] przedstawił prowadzone badania wstępne.

### **Analiza technologiczności i kosztów wykonania kanałów chłodzących**

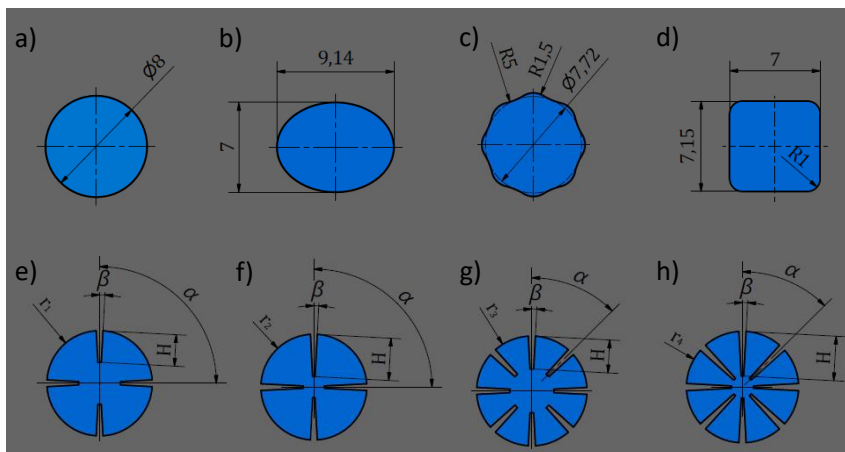
Technologiczność konstrukcji określana jest ogólnie jako stopień dostosowania konstrukcji do możliwości jej realizacji, w najkorzystniejszych warunkach, przy jednoczesnym spełnieniu kryteriów (najczęściej) niskich kosztów i czasu wykonania. W dobie nowoczesnego przemysłu, produkcji 4.0, wytworzenie wyrobu (części, urządzenia, maszyny itp.) podlega regułom ekonomicznym i ciągłej optymalizacji. Nieustannie dąży się do obniżania kosztów produkcji z jednoczesnym zachowaniem żądanych właściwości produktu, które paradoksalnie stają się coraz wyższe. Dlatego też, wysoce istotnym czynnikiem staje się uwzględnienie zalet i wad szeroko stosowanych technik wytwarzania i wybór tej najwłaściwszej oraz analiza właściwości stosowanych materiałów [129].

Na rysunku 5.1 przedstawiono najczęściej analizowane teoretycznie w literaturze światowej przekroje kanałów chłodzących. Zespół cech konstrukcyjnych zaprezentowanych kształtów kanałów stawia bardzo wysokie wymagania obecnej technologii, jeżeli chodzi o możliwość zastosowania ich w przypadku konstrukcji form wtryskowych. Zważywszy na zalecane przekroje kanałów chłodzących stosowanych w termostatach form (rozdział 2.4, tab. 2.3), wyzwaniem staje się opracowanie technologii do wytworzenia tego typu kanałów chłodzących, ze względu na ich małe rozmiary. Eliminacji podlega obróbka skrawaniem, ponieważ współcześnie technika nie dysponuje odpowiednimi narzędziami do przeprowadzenia tego typu operacji. Jedynym rodzajem obróbki ubytkowej, który mógłby znaleźć zastosowanie w rozpatrywanym przypadku jest obróbka elektroerozyjna, w szczególności cięcie elektroerozyjne WEDM (Wire Electrical Discharge Machining). W tego typu obróbce rolę elektrody roboczej pełni drut z mosiądzu, miedzi lub wolframu o średnicy z zakresu 0,02 – 0,5 mm [118]. Z zastosowaniem metody WEDM można wykonywać kształtowanie skomplikowanych zarysów charakteryzujących się niewielkimi wymiarami. Przeszkodą w stosowaniu tego rodzaju obróbki może być długość kanału, ponieważ grubość (wysokość cięcia) obrabianego materiału jest ograniczona możliwościami obrabiarki. Obecnie produk-

wane elektrodrążarki drutowe ofertują obróbkę części o maksymalnej wysokości dochodzącej do 850 mm [117].

Alternatywą może być silnie rozwijająca się technika druku 3D, która stosowana jest w przypadku produkcji wkładek z układem chłodzenia konformalnego, co również zostało wcześniej omówione. Aktualnie zastosowanie metod przyrostowych do produkcji analizowanych kanałów jest nieopłacalne.

Reasumując powyższe rozważania, można dojść do wniosku, że prezentowane kanały jawią się jako konstrukcje nietechnologiczne, bardzo trudne do zrealizowania. Jednak pozytywne wyniki wstępne stanowiły motywację dla autora do prowadzenia dalszych badań. W tym celu, na bazie doświadczenia, licznych konsultacji z promotorami oraz gronem specjalistów z zakresu mechaniki płynów oraz możliwości obecnej techniki, wybrano osiem kształtów kanałów chłodzących, które widnieją na rysunku poniżej. Otwór  $\varnothing 8$  to kanał bazowy (rys. 5.3a), który został wytypowany w celu porównania efektywności chłodzenia. Kolejne kształty (b-h) stanowią kanały o zwiększonej czynnej powierzchni wymiany ciepła przy zachowaniu stałego pola przepływu, co będzie kryterium porównawczym. Szczegółowe informacje dotyczące cech kanałów zostaną przedstawione w rozdziale 5.3.1. Opracowanie modelu badawczego.



Rys. 5.3. Kształty rozważanych kanałów chłodzących: a) okrągły (wiercony)  $\varnothing 8$ , b) krzywoliniowy, c) eliptyczny, d) kwadratowy, e) – h) uźebrowany o zmiennych parametrach

Do dalszych prac badawczych założono, że próbki z zaprezentowanymi kształtami kanałów chłodzących zostaną wykonane z zastosowaniem obróbki elektroerozyjnej WEDM (po uprzedniej analizie możliwości metody).

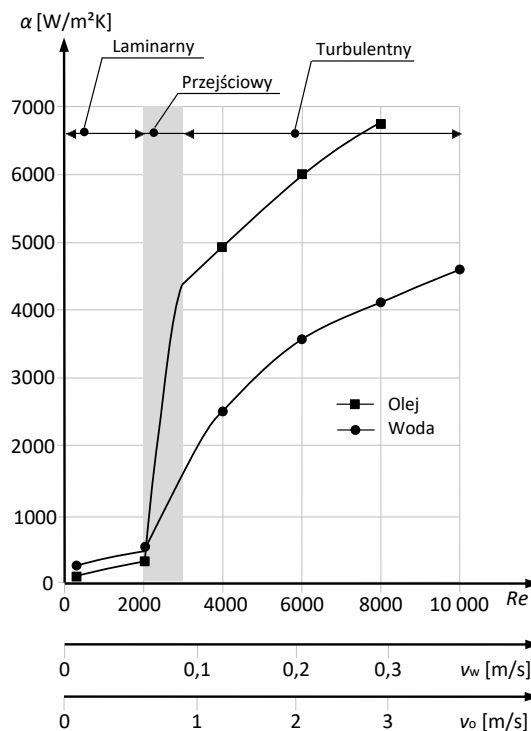
Oszacowanie kosztów produkcji proponowanych kanałów w procedurze przemysłowej jest bardzo trudne, ponieważ zależy od wielu czynników takich jak: zastosowana metoda

wytwarzania, materiał płyt/wkładek formujących, gabaryty kanałów (średnica oraz długość), stopień skomplikowania, wymagana jakość i chropowatość powierzchni).

## 5.2. Analiza właściwości i dobór cieczy chłodzącej

Jedną z kluczowych ról podczas odbioru ciepła od formowanej wypraski stanowi rodzaj zastosowanej cieczy chłodzącej [72]. Przyjmuje się, że na efektywność transportu ciepła przez ciecz chłodzącą największy wpływ mają następujące czynniki: różnica temperatur pomiędzy elementami formy a chłodziwem, powierzchnia kanałów chłodzących oraz wartość współczynnika przenikania ciepła  $\alpha$ . Współczynnik przenikania ciepła zależy przede wszystkim od wartości liczby Reynoldsa, która określa stosunek sił bezwładnościowych do sił lepkościowych. Wykorzystuje się ją do opisu charakteru przepływu cieczy, który może być laminarny ( $Re < 2000$ ), przejściowy ( $2000 < Re < 3000$ ) lub turbulentny ( $Re > 3000$ ) i wyraża się równaniem:

$$Re = \frac{\rho v L}{\eta} . \quad (5.1)$$



Rys. 5.4. Zależność wartości współczynnika przenikania ciepła od liczby Reynoldsa dla wody i oleju w temperaturze 80°C (średnica kanału  $d=10$  mm, długość  $L=1000$  mm) [105]

Na rysunku 5.4 przedstawiono wykres zależności współczynnika przenikania ciepła  $\alpha$  od liczby Reynoldsa. Zakłada się, że prędkość przepływu cieczy, przy której odbiór ciepła jest



najefektywniejszy, powinna przyjmować takie wartości, aby liczba Reynoldsa dla danego przepływu wynosiła około 10 000 [110]. Dalszy wzrost wartości prędkości przepływu cieczy chłodzącej powoduje znaczący wzrost spadków ciśnienia w kanałach chłodzących, niewspółmierny ze wzrostem skuteczności chłodzenia [110]. W źródłach literaturowych odnaleźć można, że jest to minimalna lub optymalna wartość liczby Re, lecz nie jest ona definiowana jako maksymalna, której nie należy przekraczać [70, 73, 81].

Charakter transportu ciepła w cieczy można zdefiniować za pomocą bezwymiarowych liczb kryterialnych, Prandtla (Pr) oraz Nusselta (Nu). Liczba Prandtla wyraża stosunek lepkości płynu do jego przewodnictwa ciepłego i definiuje ją równanie:

$$\text{Pr} = \frac{c_p \eta}{\lambda}. \quad (5.2)$$

W rozważanym przypadku lepkość dynamiczna  $\eta$  cieczy chłodzącej opisana jest równaniem [110]:

$$\eta = c_1 \exp\left(\frac{c_2}{c_3 + T}\right). \quad (5.3)$$

Liczba Nusselta, która określa wymianę ciepła pomiędzy cieczą a ciałem stałym w kierunku prostopadłym do powierzchni, jest stosunkiem wartości przenoszenia ciepła w wyniku konwekcji do wartości transportu ciepła w wyniku przewodzenia. Definiuje się ją następującym równaniem:

$$\text{Nu} = \frac{E_{\text{konwekcji}}}{E_{\text{przewodzenia}}} = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}. \quad (5.4)$$

W przypadku przepływu przez kanał zamknięty o przekroju kołowym wartość liczby Nusselta wyraża się następująco: dla przepływu laminarnego przy stałej temperaturze ścianki kanału (5.5) oraz dla przepływu turbulentnego (5.6) i (5.7):

$$\text{Nu} = 3,657, \quad (5.5)$$

$$\text{Nu} = 0,023 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^n, \quad (5.6)$$

$$\text{Nu} = \frac{\frac{f_D}{8}(Re-1000)Pr}{1+12,7\sqrt{\frac{f_D}{8}(Pr^{\frac{2}{3}}-1)}}. \quad (5.7)$$

Równanie (5.6) nazywane równaniem Dittusa – Boeltera obowiązuje dla wartości  $Re$  z zakresu  $Re \geq 10\,000$  oraz wartości liczby Prandtla  $0,6 \leq Pr \leq 160$ . Z kolei równanie (5.7), zwane równaniem Gnielińskiego, uwzględnia zakres przepływu przejściowego i stosowane jest w przypadku konieczności uzyskania większej dokładności rezultatów oraz przy następujących warunkach:  $0,5 \leq Pr \leq 2000$  oraz  $3000 \leq Re \leq 5 \cdot 10^6$ .

Do opisu oporów przepływu stosuje się równanie Darcy'ego – Weisbacha, które przyjmuje poniższą postać [75]:

$$\frac{\Delta p}{L_p} = f_D \frac{1}{2g} \frac{v^2}{D} \quad (5.8)$$

Współczynnik oporu dla przepływu turbulentnego w kanałach zamkniętych o przekroju okrągłym może być definiowany na podstawie równania Darcy'ego (5.9) lub Fanninga (5.10).

$$f_D = [0,79 \ln(Re - 1,64)]^{-2}, \quad (5.9)$$

$$f = \frac{2\tau_s}{\rho u_m^2}. \quad (5.10)$$

Z doświadczenia autora pracy wynika, że najczęściej stosowanym medium chłodzącym w procesie produkcji wyprasek wtryskowych jest woda. Niemniej, istnieją również inne chłodziwa, które są obecnie stosowane w przemyśle tworzyw sztucznych. W tabeli 5.13 przedstawiono wybrane (najpopularniejsze) ciecze chłodzące (dane na podstawie bazy programu Autodesk Moldflow [110]).

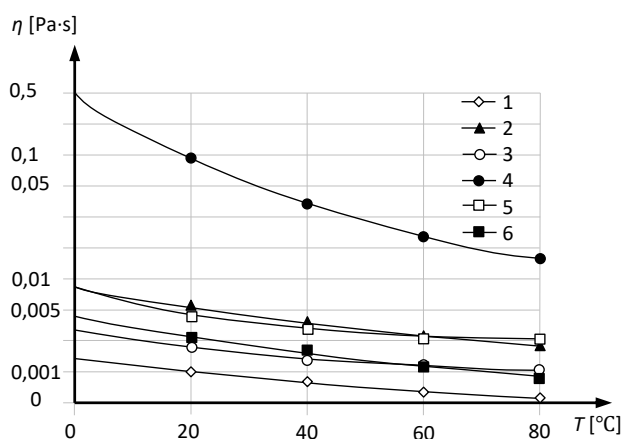
Tabela 5.13. Zestawienie wybranych cieczy chłodzących [110]

Numer próbki	Rodzaj cieczy chłodzącej	Maksymalny zakres temperatury [°C]	Gęstość $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Ciepło właściwe $C_p$ [J/kg°C]	Współczynnik przewodzenia ciepła $\lambda$ [W/m°C]	Parametry lepkościowe		
						$c_1$ [Pa·s]	$c_2$ [°C]	$c_3$ [°C]
1	Woda	10-95	0,988	4180	0,643	2,86E-05	510,7	123,7
2	60% Roztwór wodny glikolu etylowego	-40-150	1,076	3131	0,368	1,27 E-04	572,2	133,2
3	Fluorinert FC 75	-80-165	1,658	1110	0,06025	2,45 E-04	144,5	56,7
4	Mobiltherm 600	-15-180	0,886	2082	0,119	6,22 E-05	806,9	80,7
5	Coolanol 25	-101-288	0,875	2008	0,128	8,05 E-05	110,4	39,1
6	75% Dowfrost i 25% glikolu etylenowego	-45-160	1,010	3977	0,480	2,49 E-05	660,5	123,9

Dla cieczy chłodzących przedstawionych w tabeli 5.13 przeprowadzono analizy, które miały na celu określenie wpływu temperatury zastosowanego medium oraz prędkości prze-

pływu na efektywność chłodzenia. Ponadto wykonano obliczenia wyznaczające spadki ciśnienia. Do obliczeń przyjęto prędkość przepływu cieczy w kanale o średnicy  $D_k = 8$  mm.

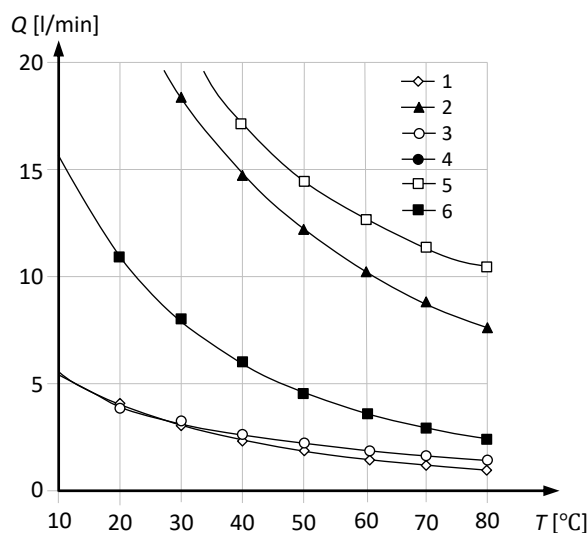
Na podstawie równań (5.1) – (5.7) wyznaczono zależności lepkości cieczy chłodzących od temperatury oraz zbadano relacje pomiędzy liczbą Reynoldsa i temperaturą cieczy oraz objętościowym natężeniem przepływu. Na rysunku 5.5 pokazano zmiany lepkości cieczy chłodzących w funkcji temperatury (skala na osi rzędnych została przedstawiona w sposób logarytmiczny ze względu na dużo większą wartość lepkości chłodziwa na bazie oleju mineralnego niż pozostałych). Analizując otrzymane rezultaty, stwierdzono że najmniejsze wartości lepkości dynamicznej uzyskano w przypadku wody. Lepkość pozostałych cieczy chłodzących oscylowała w granicach 0,001 – 0,01 Pa·s (za wyjątkiem chłodziwa na bazie oleju – Mobilthermu, którego lepkość w temperaturze 10 °C wynosi około 0,5 Pa·s). Dla każdego analizowanego przypadku wzrost temperatury powoduje spadek wartości lepkości.



Rys. 5.5. Zależność lepkości cieczy chłodzących od temperatury (numery próbek zgodnie z tabelą 5.13).

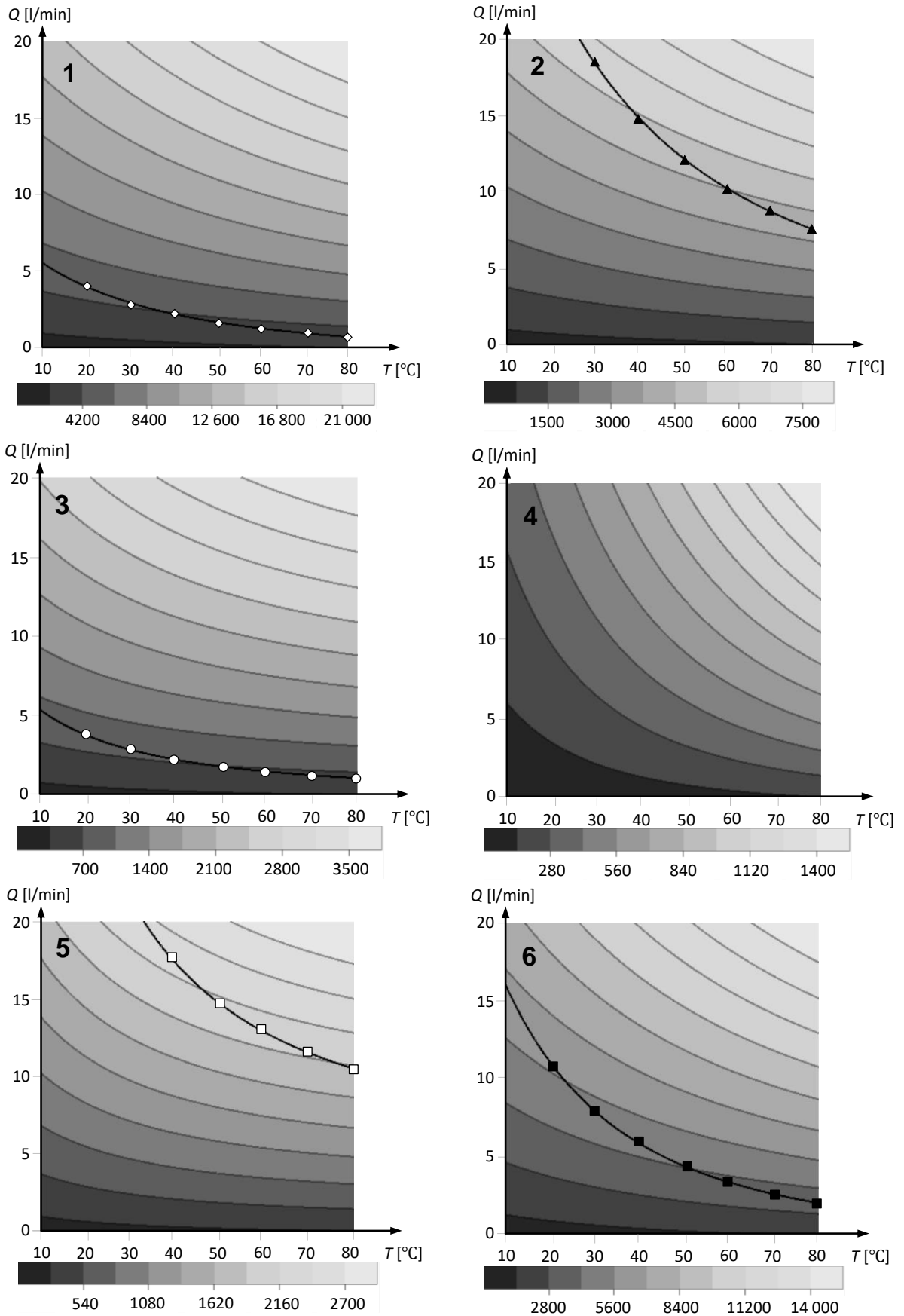
Kolejnym analizowanym parametrem była zdolność danej cieczy chłodzącej do uzyskania liczby Reynoldsa na poziomie 10 000 w zależności od wartości objętościowego natężenia przepływu i temperatury. Na rysunku 5.6 zaprezentowano krzywe wyznaczające ten parametr. Stwierdzono, że woda oraz chłodziwo o handlowej nazwie Fluorinert FC 75 uzyskały zakładaną wartość liczby Re w warunkach najniższych wartości natężenia przepływu przez układ chłodzący. Największa wartość przepływu objętościowego do uzyskania założonej liczby Reynoldsa występuje w przypadku 60% roztworu glikolu etylenowego w wodzie oraz chłodziwie Coolanol 25. Na wykresie nie uwzględniono chłodziwa Mobiltherm 600 (ciecz nr 4), ponieważ w badanym zakresie temperatury oraz natężenia przepływu nie uzyskano prędkości przepływu pozwalającej na osiągnięcie liczby Reynoldsa na poziomie 10 000.

W tym zagadnieniu, dopiero podniesienie temperatury cieczy do 120 °C, przy przepływie 20 l/min, pozwoliło na otrzymanie  $Re = 10\ 000$ .



Rys. 5.6. Wykres zależności temperatury ( $T$ ) i objętościowego natężenia przepływu ( $Q$ ) analizowanych cieczy chłodzących (dla liczby Reynoldsa  $Re = 10\ 000$ )

Jednym z najważniejszych czynników determinujących skuteczność wymiany ciepła między cieczą chłodzącą a ciałem stałym jest współczynnik przenikania ciepła  $\alpha$  [119]. Na rysunku 5.7 przedstawiono zależność tego współczynnika (wykres konturowy) od natężenia przepływu oraz temperatury medium chłodzącego. Na podstawie analizy uzyskanych rezultatów oraz wcześniejszych założeń ( $Re = 10\ 000$  jako wystarczająca wartość podczas chłodzenia) odnotowano, że najskuteczniejszymi chłodziwami będą woda oraz Fluorinert FC 75. W przypadku pozostałych wybranych cieczy, współczynnik przenikania ciepła dla  $Re = 10\ 000$  osiąga wyższe wartości niż w przypadku wody, ale wiąże się to z koniecznością generowania większego natężenia przepływu i stosowania wyższej temperatury chłodzenia. Efektywny odbiór ciepła nie zależy tylko od wartości współczynnika  $\alpha$ , ale w dużej mierze również od różnicy temperatur chłodziwa i chłodzonego ciała. Zastosowanie możliwie niskiej temperatury (zależnej od czynników takich jak: rodzaj tworzywa sztucznego, grubość ścianek oraz gabaryty wypraski, wymagana dokładność wyrobu itp.) medium chłodzącego będzie miało większe znaczenie na efektywność chłodzenia niż zwiększanie wartości współczynnika  $\alpha$  przy zachowaniu wyższej temperatury cieczy chłodzącej (przy stałej wartości liczby Reynoldsa).

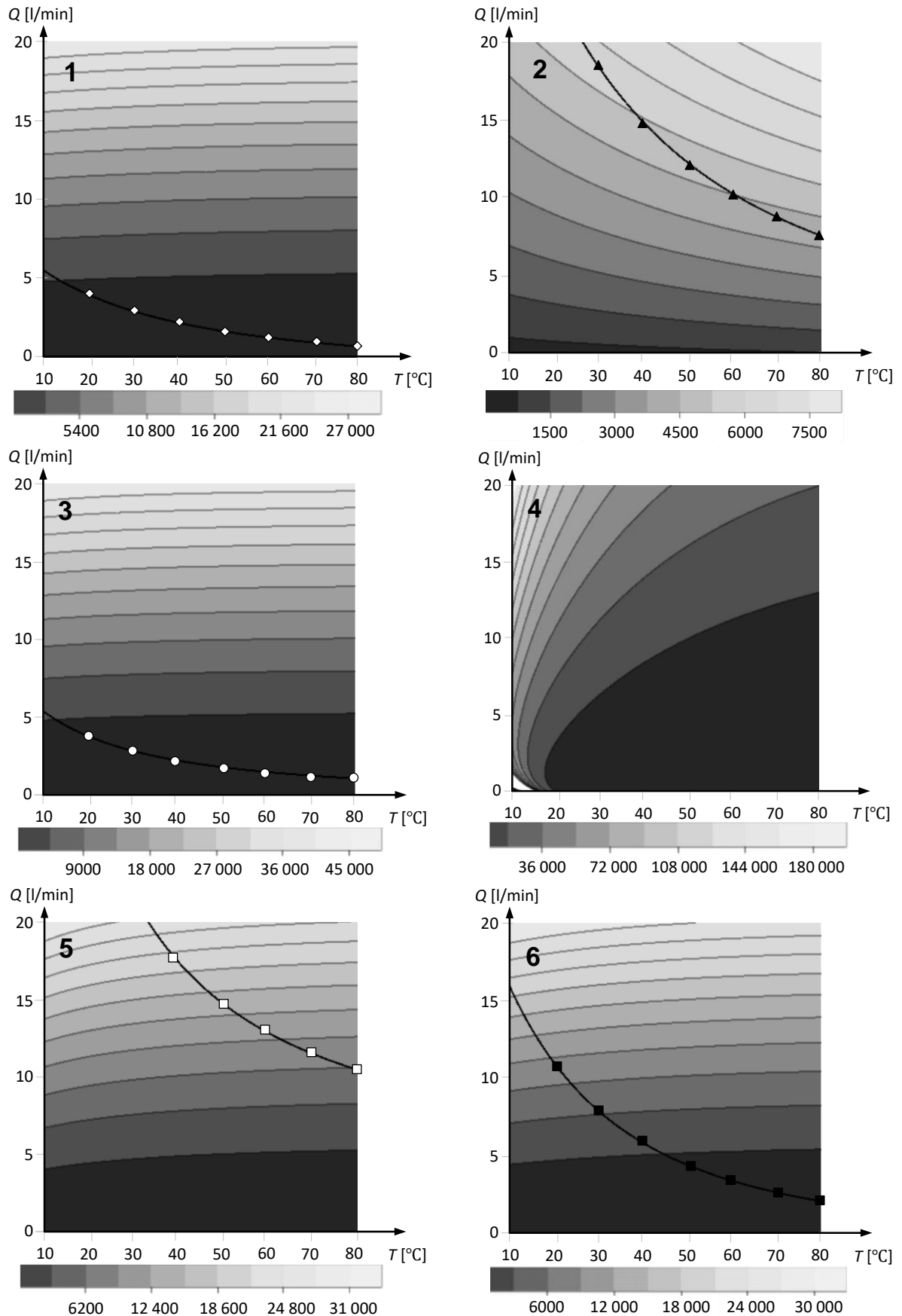


Rys. 5.7. Zależność współczynnika przenikania ciepła ( $\alpha$ ) od temperatury ( $T$ ) oraz natężenia przepływu ( $Q$ ) cieczy chłodzącej (w lewym górnym rogu podano numer cieczy chłodzącej zgodnie z tabelą 5.13, na wykresy nałożono krzywą wyznaczoną dla liczby Reynoldsa równej 10 000).

Na podstawie równań 5.8 – 5.10 określono wartość spadków ciśnienia na jednostkę długości  $\Delta p/L$  dla zmiennych wartości temperatury medium chłodzącego oraz jego natężenia przepływu. Do obliczeń przyjęto chropowatość ściany kanału chłodzącego  $\varepsilon_c = 0,05$  mm oraz średnicę kanału chłodzącego  $D = 8$  mm. Na rysunku 5.8 zilustrowano uzyskane rezultaty zależności spadku ciśnienia na jednostkę długości od natężenia przepływu i temperatury cieczy chłodzącej. Wysokie wartości natężenia przepływu cieczy w układzie chłodzącym powodują powstawanie dużych różnic ciśnienia na wejściu i wyjściu. Najmniejsze wartości spadku ciśnienia odnotowano w przypadku zastosowania wody, co skutkuje szybszym osiągnięciem zakładanej wartości liczby Reynoldsa ( $Re = 10\ 000$ ). Największe opory przepływu uzyskano w przypadku chłodziwa Mobiltherm 600, co związane jest z jego dużą wartością lepkości, znacznie większą od pozostałych rozważanych cieczy chłodzących. Zauważyć można, że dodatek glikolu do wody w nieznacznym stopniu zmniejsza wartość oporów przepływu, jednak nie powoduje to poprawy w skuteczności odbioru ciepła.

Powyższe rozważania miały na celu przeanalizowanie wpływu parametrów nastawnych (natężenie przepływu i temperatura chłodziwa) wybranych cieczy chłodzących na efektywność chłodzenia oraz spadki ciśnienia w układzie chłodzącym formy wtryskowej. Parametry te mają istotne znaczenie w kwestii odbioru ciepła z formy, natomiast w celu porównania skuteczności chłodzenia wybranych cieczy chłodzących skupiono się na współczynniku przenikania ciepła. Należy również pamiętać, że istotny wpływ na wydajność transportu ciepła pomiędzy cieczą chłodzącą a ciałem stałym, ma różnica temperatur pomiędzy nimi. Dlatego też, powinno stosować się możliwie niską temperaturę medium chłodzącego pozwalającą na produkowanie wyrobów o pożądanym właściwościach mechanicznych i estetycznych oraz zadawalającej jakości.

Na podstawie przedstawionej analizy do dalszych badań wybrano wodę, mimo iż przy porównywanych parametrach i założonej liczbie Reynoldsa większą skuteczność chłodzenia wykazywał wodny roztwór glikolu. Wybór wody wiązał się z zadawalającymi rezultatami, kwestiami ekonomicznymi, ogólną dostępnością oraz perspektywą budowy stanowiska badawczego do badań doświadczalnych.



Rys. 5.8. Zależność spadku ciśnienia na jednostkę długości ( $\Delta p/L$ ) od temperatury ( $T$ ) oraz natężenia przepływu ( $Q$ ) cieczy chłodzącej (w lewym górnym rogu podano numer cieczy chłodzącej, na wykresy nałożono krzywą wyznaczoną dla liczby Reynoldsa równej 10 000).

### 5.3. Badania symulacyjne procesu chłodzenia form wtryskowych

Analiza symulacyjna procesu chłodzenia została przeprowadzona z wykorzystaniem Metody elementów skończonych (MES), która wykorzystywana jest do rozwiązywania równań różniczkowych spotykanych w fizyce i technice [107]. Metoda MES opiera się na podziale dziedziny (dyskretyzacji) na skończone elementy, dla których rozwiązanie jest przybliżane przez konkretne funkcje, i przeprowadzaniu faktycznych obliczeń tylko dla węzłów tego podziału. Główna idea MES polega na tym, że każda dowolna ciągła wartość (np. temperatura) może zostać zamieniona na model dyskretny. Tak przygotowany model jest oparty na ograniczonej liczbie węzłów, które tworzą ograniczoną liczbę elementów skończonych [107].

W ramach niniejszej rozprawy naukowej podjęto się przeprowadzenia badań symulacyjnych procesu chłodzenia dla kanałów chłodzących o różnej geometrii, aby sprawdzić możliwości ich zastosowania w technologii RHCM. Celem analizy było przedstawienie procesu badawczego oraz uzyskanych rezultatów, które pozwoliły na porównanie efektywności chłodzenia z konwencjonalnymi, wierconymi kanałami chłodzącymi, powszechnie stosowanymi w przypadku chłodzenia form wtryskowych.

#### 5.3.1. Opracowanie modelu badawczego

Na potrzeby przeprowadzenia analizy symulacyjnej procesu chłodzenia, która pozwala z pewnym przybliżeniem wyznaczyć jego przebieg w zależności od zadanych parametrów wyjściowych oraz warunków brzegowych, opracowano model badawczy. Poniżej przedstawiono schemat postępowania podczas budowy modelu oraz przebieg badań symulacyjnych na przykładzie konwencjonalnego, wierconego kanału chłodzącego (rys. 5.3a, kanał o przekroju okrągłym).

Do opisu przepływu płynu z wymianą ciepła dla kanałów chłodzących przyjęto następujące założenia i uproszczenia:

- płyn jest newtonowski i nieściśliwy,
- właściwości termiczne płynu i materiału ścianki kanału są różne,
- przepływ jest turbulentny,
- symulacja przeprowadzana jest w stanie nieustalonym (z ang. unsteady – state).



Mając na uwadze powyższe, model badawczy oparto na następujących równaniach [111]:

**Równanie ciągłości:**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0. \quad (5.11)$$

**Równanie Naviera-Stokesa:**

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = -\nabla p + \eta \nabla^2 \bar{u} + \bar{F}. \quad (5.12)$$

**Równanie bilansu energii:**

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot [\bar{u}(\rho E + p)] = \nabla \cdot [k_{\text{eff}} \nabla T - h + (\bar{\tau}_{\text{eff}} \cdot \bar{u})]. \quad (5.13)$$

Całkowita energia zagadnienia opisywana jest jako:

$$E = C_p T + \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2}. \quad (5.14)$$

Natomiast tensor naprężeń  $\tau_{\text{eff}}$  definiuje się następująco:

$$\bar{\tau}_{\text{eff}} = \mu \cdot [(\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \bar{u} I]. \quad (5.15)$$

Na potrzeby analizy, porównania oraz oceny charakterystyki przepływu z wymianą ciepła dla wybranych kanałów chłodzących zastosowano liczby podobieństwa Reynoldsa i Nusselta oraz współczynnik oporu przepływu. Definicje powyższych czynników przedstawiono w rozdziale 5.2 (równania 5.1 – 5.10).

Badania symulacyjne zostały przeprowadzone w oprogramowaniu ANSYS Fluent 14.5. Analiza zakłada stan nieustalony (Transient/Unsteady State), natomiast przyjęte modele turbulencji to modele z grupy eddy viscosity turbulence models bazujące na równaniach k-epsilon, oparte na metodach RANS, czyli równaniach Reynoldsa (RANS – Reynolds Avaraged Navier Stokes Equations). Model turbulencji (k-ε) jest najczęściej stosowanym modelem w dziedzinie obliczeń numerycznych w obrębie mechaniki płynów do modelowania przepływów (Computational Fluid Dynamics – CFD) dla przepływu turbulentnego. Składa się z dwóch równań, gdzie pierwsza zmienna to energia kinetyczna turbulencji (k), a druga zmienna to szybkość rozpraszania energii turbulencji (ε) [111].

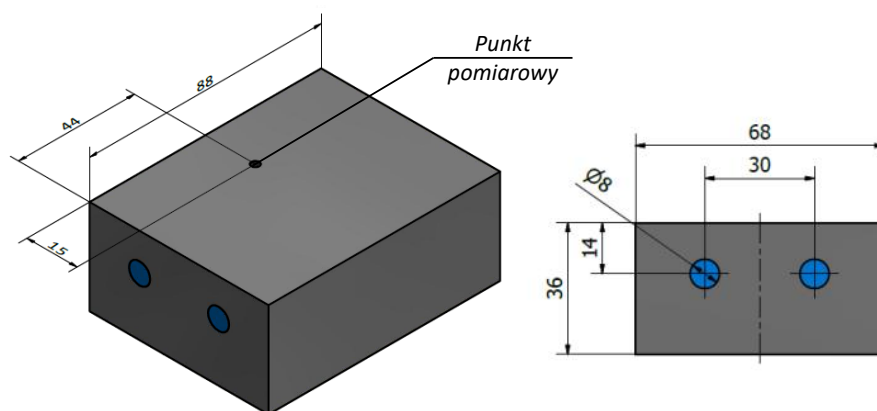
W pierwszym etapie wykonano model geometryczny wkładki z kanałami chłodzącymi w programie CAD, Inventor Professional 2017 (rys. 5.9 kanał gładki – pozostałe geometrie kanałów zostały zaprezentowane na rys. 5.3) oraz ustalono następujące założenia:

- długość kanału:  $L_k = 88$  mm,
- pole przepływu:  $A_k = 50,26$  mm<sup>2</sup>,
- materiał wkładki: tabela 5.15,
- medium chłodzące: woda.

Dla kanałów uźebrowanych (rys. 5.3 e-h) przyjęto następujące parametry:

- promień kanału:  $r_n \rightarrow$  zależny od  $A_k$ ,
- kąt pochylenia ścianki żebra  $\beta = 3^\circ$ ,
- wysokość żebra:  $H$ ,
- liczba żeber:  $M \rightarrow 4; 8$ .

Powyższe parametry kanałów uźebrowanych zostały przyjęte po wcześniej przeprowadzonej analizie literatury – rozdział 5.1.2.



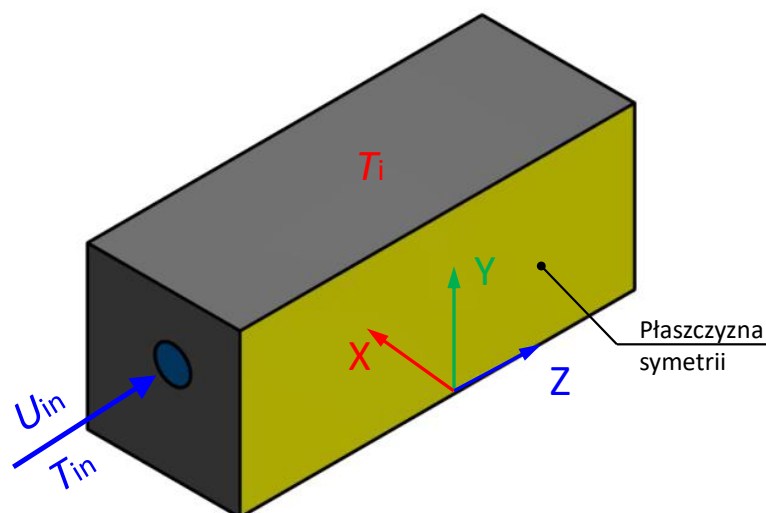
□ powietrze    ■ chłodziwo (woda)    ■ Grupa materiałów – tab. 5.15

Rys. 5.9. Model 3D wkładki badawczej wykonany w oprogramowaniu CAD Inventor Professional 2017

Dla danego zagadnienia podczas badań symulacyjnych wykorzystano połowę przedstawionej wkładki (rys. 5.10), ze względu na symetrię układu. Przygotowany w ten sposób model zaimportowano do środowiska ANSYS Fluent, przyjęto warunki brzegowe zawarte w tabeli 5.14 oraz nadano parametry materiałowe (tab. 5.15).

Tabela 5.14. Warunki brzegowe rozpatrywanego zagadnienia

Warunek brzegowy	Jednostka	Wartość
Intensywność turbulencji przepływu	%	4,6
Prędkość cieczy na wlocie $U_{in}$	m/s	2
Natężenie przepływu $Q$	l/min	6
Temperatura cieczy chłodzącej na wlocie $T_{in}$	°C	30
Temperatura początkowa wkładki $T_i$	°C	150
Czas chłodzenia $t_{ch}$	s	20

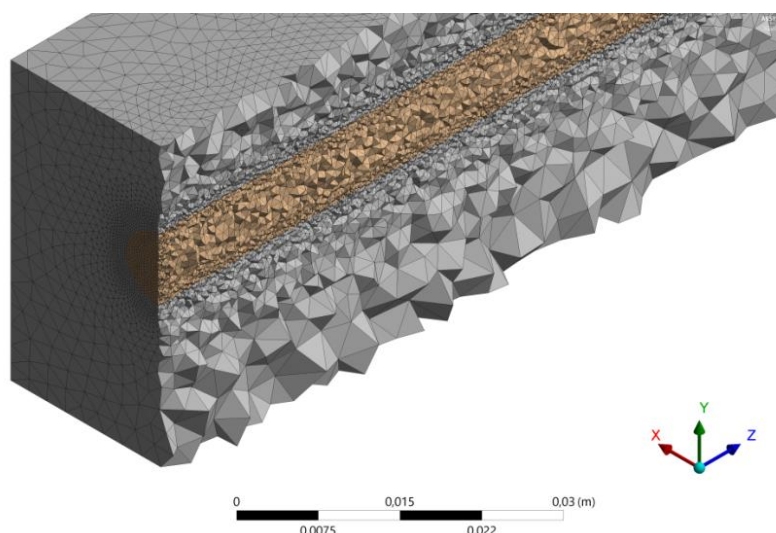


Rys. 5.10. Warunki brzegowe

Tabela 5.15. Dane materiałowe do obliczeń numerycznych [111, 133]

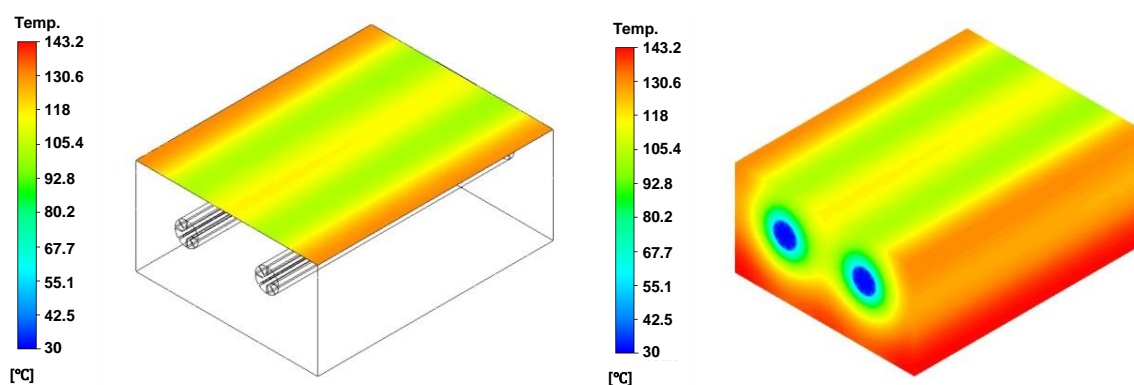
Właściwość	Jednostka	Woda (H <sub>2</sub> O)	Stal 1.2343	Stal 1.1730	Stal TOO-LOX 44	Stop EN AW 7075	Stop AMOCOLOY 940
Gęstość $\rho$	kg/m <sup>3</sup>	998,2	7860	7850	7855	2800	8710
Ciepło właściwe, $C_p$	J/kgK	4186	460	460	460	862	380
Przewodność cieplna, $\lambda$	W/mK	0,6	30	42	28	130-160	208
Lepkość dynamiczna, $\eta$	Pa·s	0,001	-	-	-	-	-

W kolejnym kroku wygenerowano siatkę elementów skończonych – osobno dla ciała stałego oraz cieczy. Z powodu rozpatrywania zagadnienia w przestrzeni 3D konieczne było wygenerowanie trójwymiarowej siatki, do budowy której wykorzystano czterościenne obszary elementarne (tetrahedron elements). Zdecydowano się na zmienną gęstość siatki – zagęszczeniu uległ obszar kontaktu ciała stałego z cieczą, ze względu na kluczowe procesy wymiany ciepła zachodzące w warstwie przyściennej (rys. 5.11).

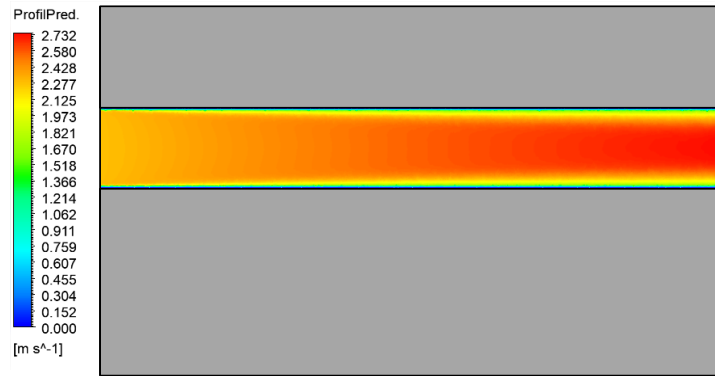


Rys. 5.11. Siatka elementów skończonych w programie ANSYS Fluent (przekrój wzdłuż osi kanału)

Po przygotowaniu siatki następowo wprowadzono parametry procesu w solverze Fluent, zgodnie z danymi przedstawionymi w tabeli 5.14: intensywność turbulencji (4,6% - obliczona na podstawie parametrów kanału oraz warunków brzegowych), prędkość cieczy na wlocie do kanału (2 m/s, co przy danym polu przepływu generuje natężenie przepływu 6 l/min), temperatura cieczy chłodzącej na wlocie (30°C), temperatura początkowa chłodzonej wkładki (150°C) oraz czas chłodzenia (20 s). Zaimplementowanie powyższych parametrów pozwoliło na przeprowadzenie symulacji procesu chłodzenia, co w efekcie przełożyło się na uzyskanie rozkładów temperatury na powierzchni wkładki oraz w całej jej objętości (rys. 5.12), profilu prędkości cieczy (rys. 5.13), rozkładu ciśnienia (rys. 5.14) oraz danych do wyznaczenia liczb Reynoldsa, Nusselta i oporów przepływu.

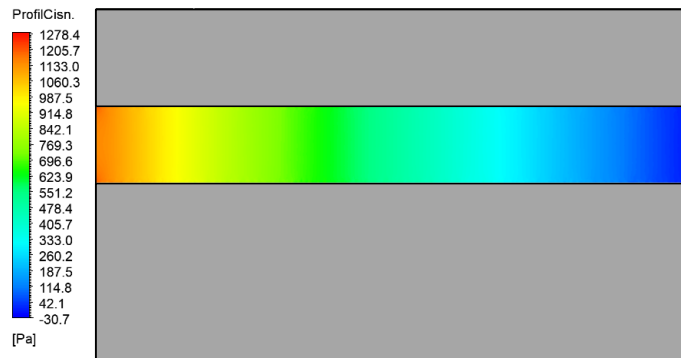


Rys. 5.12. Rozkłady temperatury na powierzchni wkładki oraz jej objętości



Rys. 5.13. Profil prędkości cieczy chłodzącej – przekrój poprzeczny przez kanał

Opracowany w ten sposób model badawczy zastosowano do obliczeń numerycznych wszystkich analizowanych materiałów oraz kształtów kanałów chłodzących.



Rys. 5.14. Profil spadku ciśnienia – przekrój poprzeczny przez kanał

### 5.3.2. Wpływ materiału wkładów chłodzących na efektywność chłodzenia

Celem przeprowadzonych badań symulacyjnych było porównanie efektywności procesu chłodzenia w zależności od zastosowanego materiału na wkładki chłodzące (tabela 5.15) oraz geometrii kanałów chłodzących. Jako kryterium porównawcze przyjęto rozkład temperatury na powierzchni wkładki (w punkcie pomiarowym wskazanym na rysunku 5.9) i rozkład temperatury w objętości całej wkładki. W tabeli 5.16 przedstawiono rezultaty uzyskane po 20 sekundach chłodzenia – wskazania temperatury w punkcie pomiarowym oraz średnią temperaturę objętości całej wkładki.

W pierwszej kolejności autor rozprawy podjął się zbadania wpływu materiału na szybkość chłodzenia. Materiały poddane badaniom zostały szczegółowo opisane w rozdziale 5 i są to: stale 1.2343, 1.1730, TOOLOX 44 oraz stopy EN AW 7075 (stop aluminium), AMPCOLOY 940 (stop miedzi).

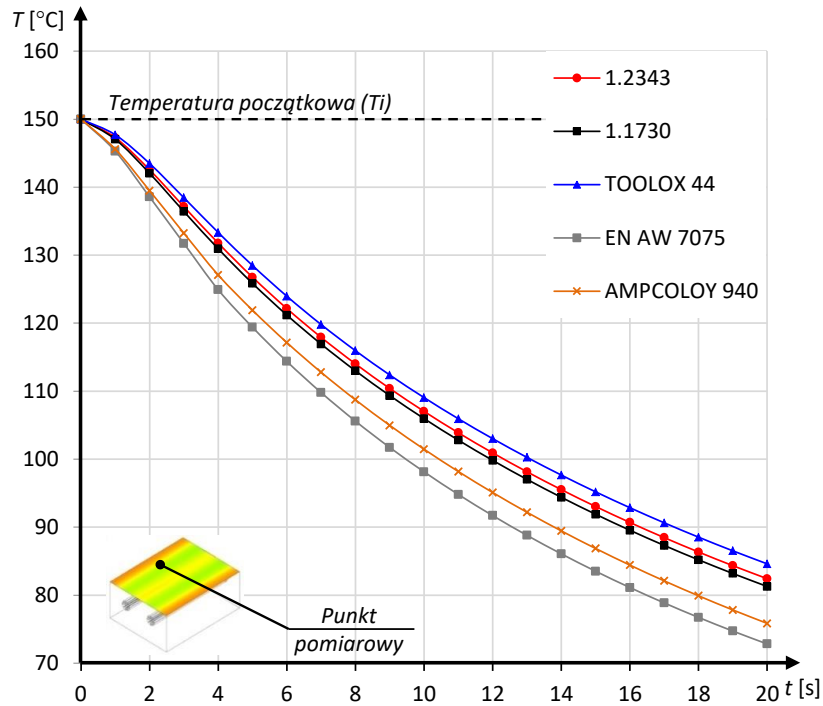
Zgodnie z oczekiwaniami, największa ilość ciepła została odebrana przez medium chłodzące w przypadku wkładek wykonanych ze stopów aluminium oraz miedzi – na powierzchni

wkładki odnotowano wartości temperatury 72,93 °C (EN AW 7075) oraz 75,86 °C (tab. 5.16). Dla porównania, dla badanych stali osiągnięto wartości temperatury w zakresie 81,3 – 84,6 °C po czasie 20 s chłodzenia. Wynika to z faktu, że omawiane stopy metali nieżelaznych cechują się większymi wartościami współczynnika przewodności cieplnej ( $\lambda$ , tabela 5.15), czyli zdolnością substancji do przewodzenia ciepła. Najniższą wartość temperatury, a co za tym idzie największą ilość ciepła odebraną przez medium chłodzące odnotowano w przypadku wkładki wykonanej ze stopu EN AW 7075. Pomimo że stop ten charakteryzuje się największą wartością ciepła właściwego, na powierzchni wkładki uzyskano najmniejszą wartość temperatury, wynoszącą 72,93°C. Zważył tutaj czynnik masy, ponieważ w badaniach symulacyjnych wymiary wkładki były identyczne dla wszystkich omawianych materiałów. Masa wkładki z aluminium jest ponad 3-krotnie mniejsza niż wkładki wykonanej ze stopu miedzi oraz około 2,5-krotnie mniejsza niż wkładek stalowych.

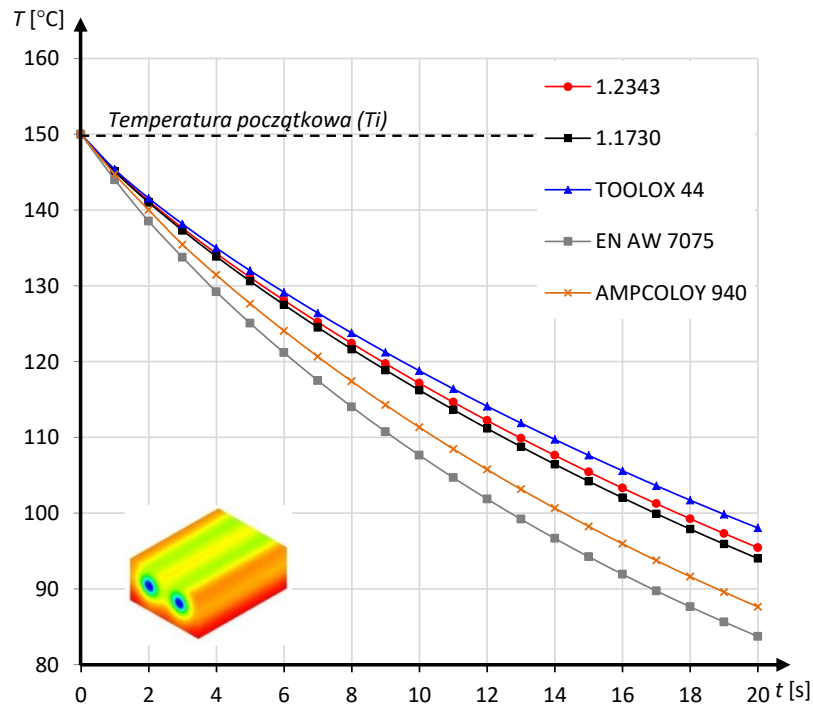
Tabela 5.16. Rezultaty po 20 s chłodzenia z natężeniem przepływu 6 l/min dla badanych materiałów

<b>Materiał</b>	<b>Temp. w punkcie pomiarowym [°C]</b>	<b>Średnia temp. całej wkładki [°C]</b>
Stal 1.2343	82,43	95,44
Stal 1.1730	81,29	94,00
Stal TOOLOX 44	84,61	98,03
Stop EN AW 7075	72,83	82,13
Stop AMPCOLOY 940	75,86	87,63

Porównując szybkość procesu chłodzenia dla rozważanych materiałów otrzymano następujące rezultaty (pomiar temperatury na powierzchni wkładki): dla stopów EN AW 7075 oraz AMPCOLOY940 odpowiednio 3,86 °C/s oraz 3,70 °C/s. Natomiast dla stali uzyskano wyniki w zakresie 3,27 – 3,43 °C/s (rys. 5.15 oraz 5.16). Jeżeli chodzi o materiały stalowe, najszybszy odbiór ciepła zaobserwowano w przypadku wkładki wykonanej ze stali 1.1730, która charakteryzuje się największym współczynnikiem przewodności cieplnej (tab. 5.15). Biorąc pod uwagę ten gatunek stali, jako materiał na budowę form wtryskowych, przytoczono wcześniej, że wykonuje się z niego przede wszystkim korpusy form, ze względu na niską twardość w stosunku do stali 1.2343 czy TOOLOX 44. W odniesieniu do wytrzymałości i parametrów konstrukcyjnych, dużo lepszym wyborem na wkładki doświadczalne będzie stal narzędziowa 1.2343, w przypadku której transfer ciepła jest intensywniejszy niż dla materiału TOOLOX 44.



Rys. 5.15. Rezultaty pomiaru temperatury na powierzchni wkładki (dla analizowanych materiałów)



Rys. 5.16. Rezultaty pomiaru średniej temperatury objętości wkładki (bryły) dla analizowanych materiałów

Biorąc pod uwagę powyższe oraz wdrożeniowy charakter badań i ograniczony budżet, do dalszych rozważań symulacyjnych i doświadczalnych na materiał wkładek badawczych wybrano stal 1.2343, która jest najczęściej wykorzystywanym surowcem na wkłady formujące – posiada pożądane właściwości oraz jest dostępna u większości dostawców normalistów do budowy form wtryskowych.

### 5.3.3. Wpływ kształtu kanału na efektywność chłodzenia

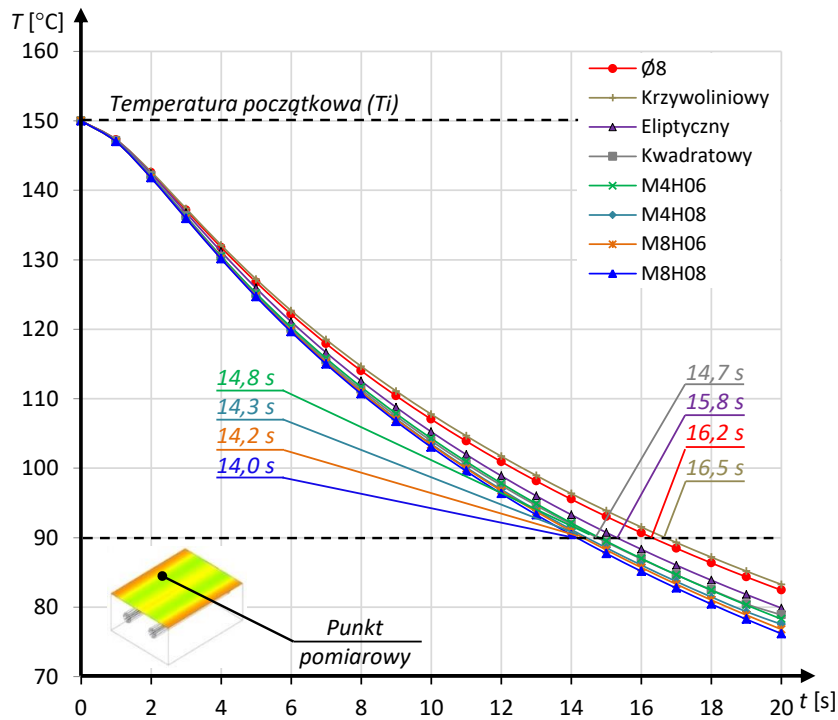
Po wykonaniu badań symulacyjnych dla różnych materiałów i wyborze jednego z nich do dalszych badań (stal 1.2343), przeprowadzono badania numeryczne w celu porównania efektywności procesu chłodzenia wkładek form wtryskowych w zależności od geometrii kanałów chłodzących. Jako kryterium porównawcze przyjęto rozkłady temperatury na powierzchni wkładek (w uprzednio wskazanym punkcie pomiarowym), rozkłady temperatury w objętości całej wkładki (bryły) oraz wyznaczono liczby podobieństwa Reynoldsa i Nusseta oraz opory przepływu. W tabeli 5.17 przedstawiono rezultaty uzyskane po 20 sekundach chłodzenia – wskazania temperatury w punkcie pomiarowym oraz temperaturę średnią objętości wkładki.

Tabela 5.17. Rezultaty po 20 s chłodzenia z zadaniem natężeniem przepływu 6 l/min.

Geometria kanału	Temp. w punkcie pomiarowym [°C]	Średnia temp. całej wkładki [°C]
Okrągły Ø8	82,43	95,44
Eliptyczny	79,86	95,32
Krzywoliniowy	83,26	95,29
Kwadratowy	78,88	94,69
Uzębrowany M4H06	78,28	93,52
Uzębrowany M4H08	77,52	93,13
Uzębrowany M8H06	76,80	91,42
Uzębrowany M8H08	76,17	90,6

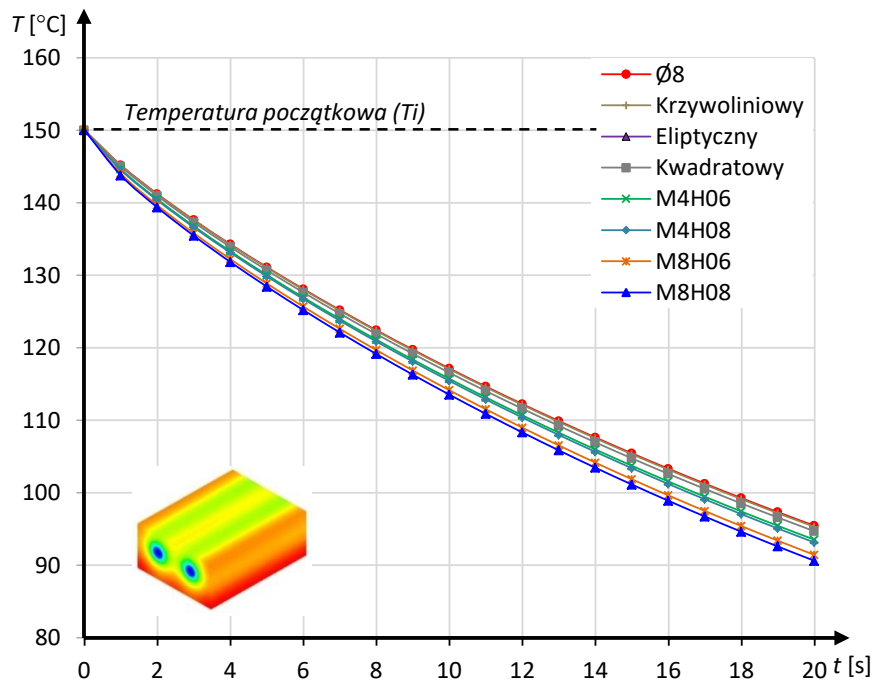
Zarówno w przypadku pomiaru temperatury w punkcie, jak objętości bryły, najniższe wartości temperatury uzyskano w przypadku kanału uzębrowanego z ośmioma żebrami (rys. 5.17 i 5.18). Porównując uzyskaną temperaturę powierzchni wkładki z kanałem M8H08 z wkładką z kanałem konwencjonalnym (wierconym) odnotowano różnicę około 6 °C/20s, co stanowi 9,2% poprawy efektywności chłodzenia (3,69 °C/s dla kanału uzębrowanego, 3,38 °C/s dla kanału wierconego). Podobny rezultat uzyskano w przypadku średniej temperatury całej objętości analizowanych wkładek. Nieznacznie większe wartości temperatury zauważono w przypadku kanału z czterema żebrami, co dowodzi, że konfiguracja 8 żeber zapewnia zwielokrotnienie efektywności odbioru ciepła. W celu zobrazowania zwiększenia skuteczności odbioru ciepła na wykresie (rys. 5.17) naniesiono wartość czasu, po którym temperatura na powierzchni wkładki osiąga 90 °C. Dla konwencjonalnego kanału uzyskano wartość 16.2 s, natomiast dla najskuteczniejszego, pod względem prędkości odbioru ciepła, kanału uzębrowanego – 14 s.





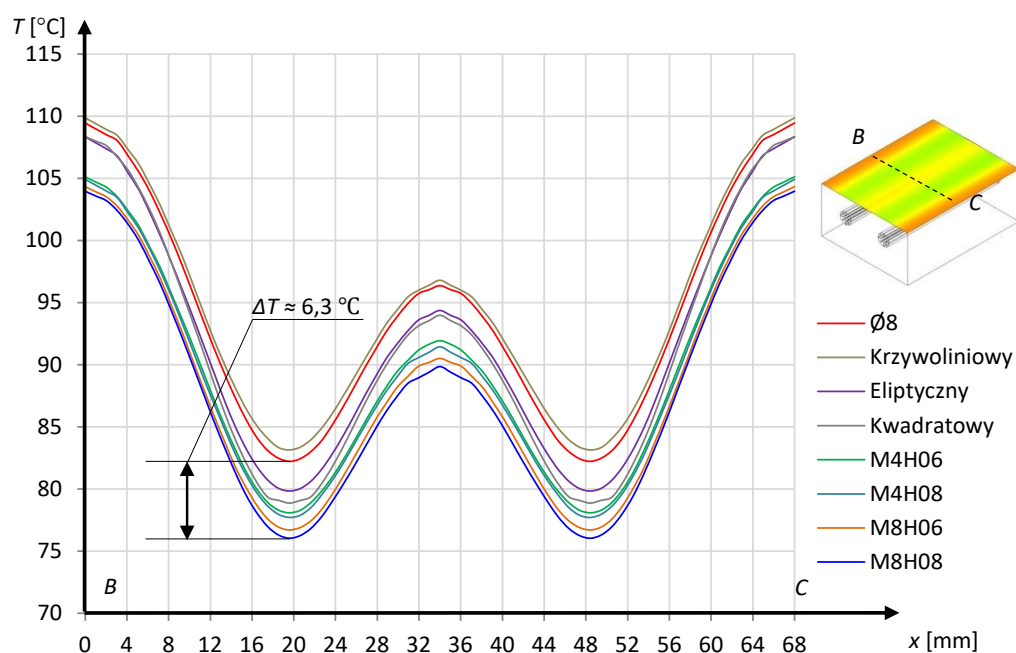
Rys. 5.17. Rezultaty pomiaru temperatury na powierzchni wkładki dla badanych geometrii kanałów

Ponadto zaobserwowano, że wraz z upływem czasu spada dynamika chłodzenia, a największe różnice w odczytach temperatury pojawiają się w początkowych sekundach procesu. Jest to zbieżne z analizą doboru cieczy chłodzącej, gdzie zauważono, że istotny wpływ na wydajność transportu ciepła pomiędzy medium chłodzącym w wkładką, posiada różnica wartości temperatury pomiędzy nimi.



Rys. 5.18. Rezultaty pomiaru średniej temperatury objętości wkładki dla badanych geometrii kanałów

Na rysunku 5.19 przedstawiono graficzne rozkłady temperatur na powierzchniach badanych wkładek w kierunku prostopadłym do osi kanałów chłodzących. Jak już wcześniej omówiono, w przypadku wkładki z kanałem konwencjonalnym minimalna temperatura wyniosła 82,43 °C, natomiast najniższa temperatura odnotowana w przypadku kanału M8H08 to 76,17 °C. Nierównomierny rozkład temperatury na powierzchni wkładek wynika z faktu zastosowania tylko 2 kanałów, co wiązało się z ograniczeniem mocy obliczeniowych podczas badań symulacyjnych. W przypadku chłodzenia form wtryskowych stosuje się wytyczne w sposobie rozmieszczania kanałów chłodzących, które zapewniają jak najbardziej równomierny odbiór ciepła od wypraski (rys. 2.26).

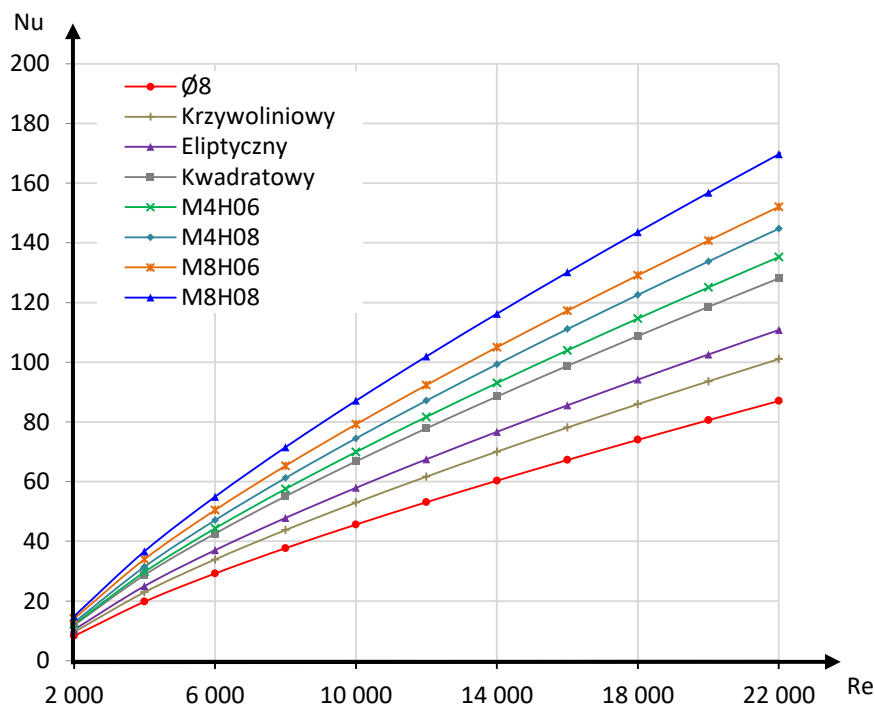


Rys. 5.19. Rozkład temperatury na powierzchni wkładek po 20 sekundach chłodzenia

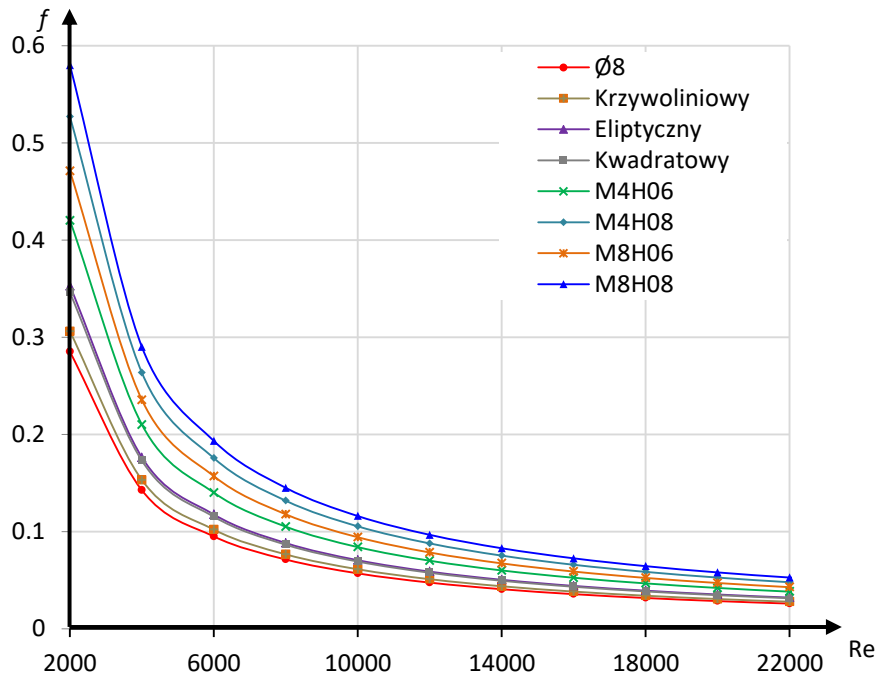
W celu wskazania wyraźnej korelacji pomiędzy geometrią rozpatrywanych kanałów chłodzących a intensywnością wymiany ciepła wyznaczono liczbę Nusselta i przedstawiono ją w zależności od liczby Reynoldsa (rys. 5.20). Wraz ze wzrostem wartości liczby  $Re$  następuje zwielenokrotnienie wartości liczby  $Nu$ . W przypadku kanału uźebrowanego o konfiguracji M8H08 wartość liczby Nusselta wynosi 87,1 (dla  $Re = 10\ 000$ ), co w zestawieniu z kanałem wierconym Ø8, dla którego  $Nu = 45,6$ , dowodzi zintensyfikowania odbioru ciepła poprzez zastosowanie wewnętrznego uźebrowania. Tym samym można dojść do wniosku, że uźebrowane kanały chłodzące mogą być trafnym rozwiązaniem poprawy procesu chłodzenia form wtryskowych pracujących w technologii RHCM.

Biorąc pod uwagę uzyskane wartości liczby Nusselta, które są wysokie w szczególności dla kanałów uźbrowanych, nadmienić należy, że podobne badania prowadzone były w pracach [24, 29]. Autorzy udowodnili możliwość uzyskania wysokiego poziomu intensywności przepływu ciepła na granicy ciecz – ciało stałe, zanim przepływ osiągnie w pełni rozwinięty stan (w zakresie krótkich przewodów).

Ostatnim analizowanym parametrem podczas badań symulacyjnych był opór przepływu zdefiniowany na podstawie wyznaczenia współczynnika tarcia ( $f$ ). Wykres na rysunku 5.21 ilustruje korelację tego parametru z liczbą Re. W każdym z rozpatrywanych przypadków wartość współczynnika  $f$  ulega obniżeniu wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa, co znajduje odzwierciedlenie w światowej literaturze [57, 83]. Uzyskane rezultaty znamienicie obrazują, że wraz ze wzrostem czynnej powierzchni kontaktu cieczy ze ścianką kanału chłodzącego (żebra) następuje wzrost oporów przepływu. Fakt ten z kolei wpływa niekorzystnie na powstawanie strat ciśnienia w całym układzie chłodzenia. Biorąc pod uwagę powyższe, w badaniach doświadczalnych należy przeanalizować rzeczywistą różnicę oporów przepływu pomiędzy kanałami konwencjonalnymi, a proponowanymi przez autora.



Rys. 5.20. Wykres zależności liczby Nusselta od liczby Reynoldsa dla rozpatrywanych kanałów chłodzących



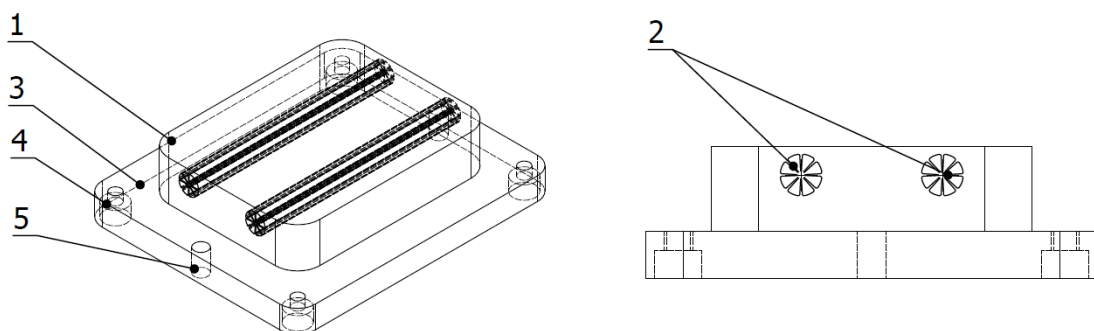
Rys. 5.21. Wykres zależności współczynnika tarcia Fanning'a od liczby Reynoldsa dla rozpatrywanych kanałów chłodzących

Reasumując, przeprowadzone badania symulacyjne dla wytypowanych kanałów chłodzących pozwoliły na określenie najkorzystniejszego kształtu przekroju poprzecznego, który zapewnia najszybszy oraz najbardziej równomierny proces odbioru ciepła od chłodzonej wkładki – kanał o symbolu M8H08. W celu weryfikacji wyników uzyskanych na podstawie obliczeń numerycznych, do dalszych badań doświadczalnych wybrano kanały z czterema i ośmioma żebrami o współczynnikach wysokości  $H=0,6$  i  $0,8$ . Dodatkowo, do celów porównawczych, wykonano wkładkę z kanałem gładkim (jako referencja).

## 6. Budowa prototypów wybranych elementów układu chłodzenia

Zważywszy na założenia początkowe projektu, analizę wyników uzyskanych podczas obliczeń numerycznych oraz wdrożeniowy charakter badań i ograniczony budżet, do dalszych rozważań doświadczalnych wybrano cztery kanały uźebrowane (dodatkowo kanał gładki – jako kanał referencyjny). W tym celu opracowano prototypowe wkładki wyposażone w omawiane kanały chłodzące oraz korpus zespołu badawczego umożliwiające zaimplementowanie owych wkładek do przeprowadzenia badań doświadczalnych. Modele 3D oraz dokumentacja techniczna opracowane zostały w programie CAD – Autodesk Inventor Professional 2017.

Na rysunku 6.1 zaprezentowano model wkładki (1) wyposażonej w dwa kanały chłodzące (2) – w tym przypadku jest to kanał z ośmioma żebrami o współczynniku wysokości żebra  $H=0,8$ . W celu osadzenia wkładek w korpusie zespołu badawczego wykonano kołnierz (3), na którym umieszczono otwory z pogłębieniem (4) pod śruby mocujące oraz otwory (5) pod kołki pozycjonujące. Ponadto w otworach (4) wykonane zostały gwinty pozwalające na prosty, poprzez wkręcenie śrub M5, demontaż wkładek z korpusu. Powtarzalność pozycjonowania wkładek badawczych podczas montażu/demontażu jest zapewniona poprzez zastosowanie kołków bazujących (5) wkładkę względem płyty podstawy. Pozostałe konfiguracje kanałów chłodzących zostały wykonane w identycznych wkładkach.



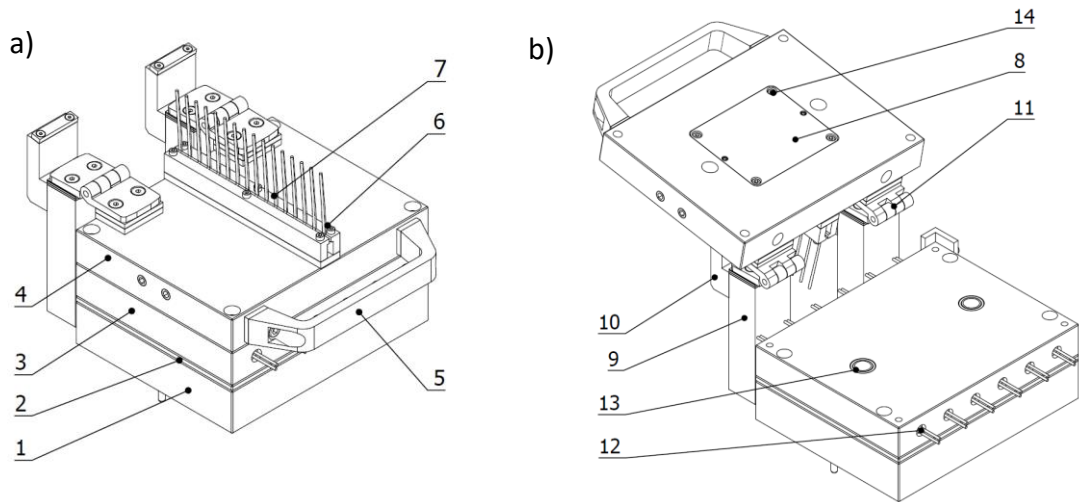
Rys. 6.1. Wkładka z kanałami chłodzącymi (przykład kanałów uźebrowanych, gdzie liczba żeber wynosi 8, a współczynnik ich wysokości 0,8)

Poniżej zaprezentowano fotografie wkładek z prototypowym układem chłodzenia. Wkładki wykonano z zastosowaniem technologii frezowania oraz szlifowania (wszystkie powierzchnie zamykające). Kanały chłodzące zostały wycięte na drążarce drutowej w technologii WEDM.

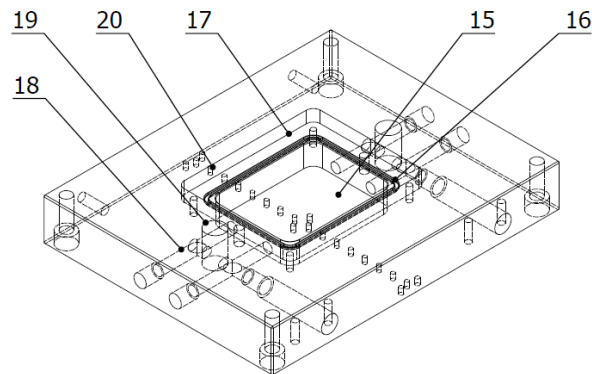


Rys. 6.2. Wkładki z prototypowym układem chłodzenia

W kolejnym kroku wykonano projekt konstrukcyjny korpusu zespołu badawczego (rys. 6.3). Głównym założeniem projektowym korpusu było zapewnienie modułowości konstrukcji. Taki zabieg pozwolił na szybką i łatwą przezbrajalność wkładek z badanymi kanałami chłodzącymi. Na rys. 6.3 przedstawiono korpus w pozycjach zamkniętej a) i otwartej b). Zespół wkładów zawiera: płytę podstawy (1), płytę termoizolacyjną (2), płytę grzewczą (3), płytę bazową (4), uchwyt (5), mocowanie czujników temperatury (6), czujniki temperatury (7), wkładkę badawczą (8), słupek (9), podporę z płytką termoizolacyjną (10), zawias (11), grzałki patronowe (12) oraz uszczelki (13). Płyty od (1) do (4) stanowią korpus dla wymiennych wkładek (rys. 6.1 przedstawia przykładową wkładkę badawczą (8) z badanym kanałem chłodzącym). Wymiana wkładki (8) następuje poprzez odkręcenie czterech śrub (14) i uniesienie płyty bazowej (4). Czynności te są możliwe do zrealizowania poprzez zastosowanie w konstrukcji zawiasów (11) oraz uchwytu (5). Następnie należy odkręcić cztery śruby (14) i „wybić” wkładkę (aby ułatwić demontaż w pogłębieniach walcowych wykonano gwinty). Na rys. 6.4 przedstawiono płytę bazową (4) w celu lepszego zobrazowania podanych czynności. Płyta termoizolacyjna (2) została zastosowana dla zapobiegnięcia przenikania ciepła od płyty grzewczej (3) do płyty podstawy (1). Ten sam zabieg został zastosowany przy połączeniu zawias (11) – słupek (9), zawias (11) – płyta bazowa (4) oraz uchwyt (5) – płyta bazowa (4).



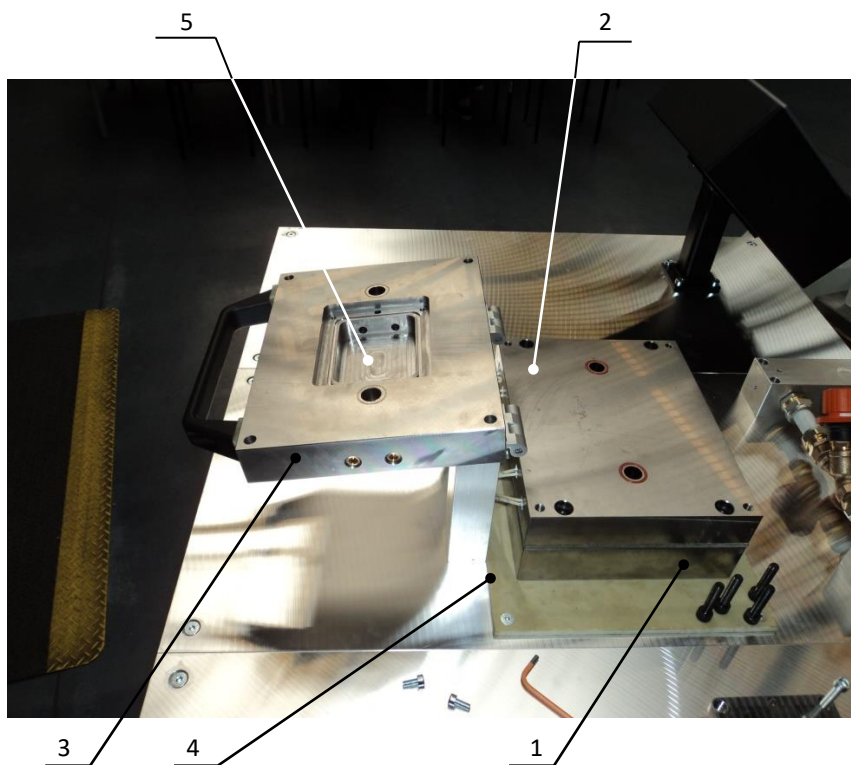
Rys. 6.3. Korpus zespołu badawczego: a) pozycja zamknięta, b) pozycja otwarta: 1 – płyta podstawy, 2 – płyta termoizolacyjna, 3 – płyta grzewcza, 4 – płyta bazowa, 5 – uchwyt, 6 – mocowanie czujników temperatury, 7 – czujnik temperatury, 8 – wkładka badawcza, 9 – słupek, 10 – podpora z płytką termoizolacyjną, 11 – zawias, 12 – grzałka patronowa, 13 – o-ring (uszczelnienie), 14 – śruba mocująca



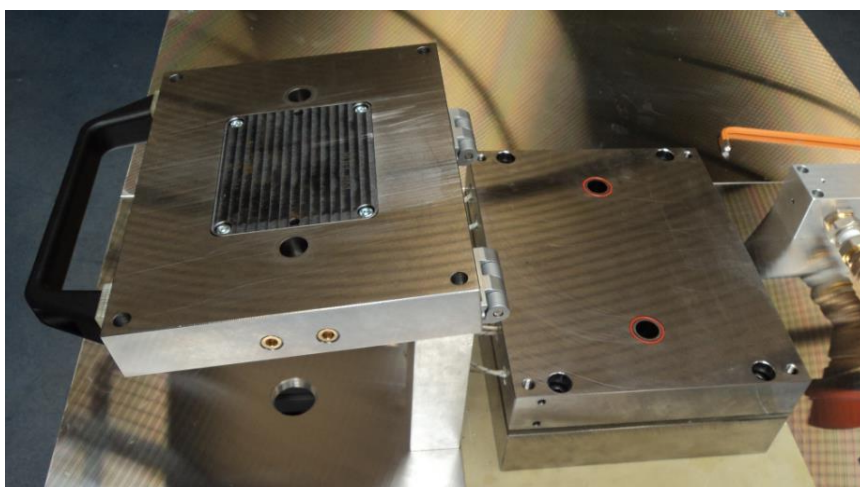
Rys. 6.4. Płyta bazowa: 15 – kieszeń pod wkładkę badawczą, 16 – rowek na uszczelkę, 17 – kieszeń pod kołnierz wkładki badawczej, 18 – kanał doprowadzający medium chłodzące do wkładki, 19 – kanał doprowadzający medium chłodzące do układu, 20 – otwór pod montaż czujnika temperatury Pt100

Pokazana na rys. 6.4 płyta bazowa (4) zawiera kieszeń pod badaną wkładkę badawczą (15), rowek na uszczelkę (16) oraz kieszeń pod kołnierz wkładki badawczej (17). Ponadto w płycie bazowej wykonane zostały kanały chłodzące (18) o średnicy 8 mm, które doprowadzają ciecz chłodzącą do badanych wkładek oraz pionowe kanały (19) o średnicy 16 mm umożliwiające doływ medium z zespołu chłodzenia. Na powierzchni płyty wykonano szesnastę otworów (20) o średnicy 3 mm, w których umieszczone zostały czujniki temperatury Pt100.





Rys. 6.5. Korpus zespołu badawczego w pozycji otwartej: 1 – płyta podstawy, 2 – płyta grzewcza z grzałkami patronowymi, 3 – płyta bazowa, 4 – płyta termoizolacyjna, 5 – kieszeń pod wkładkę badawczą



Rys. 6.6. Korpus zespołu badawczego w pozycji otwartej po montażu wkładki badawczej

Przygotowany w opisany sposób układ korpusu wraz z wymiennymi wkładkami, po uprzedniej kontroli jakości części, został zmontowany i zaimplementowany do stanowiska badawczego. Na rysunkach 6.5 i 6.6 przedstawiono poglądowe fotografie finalizacji procesu montażu. W kolejnej fazie prac przystąpiono do budowy kompletnego stanowiska badawczego.



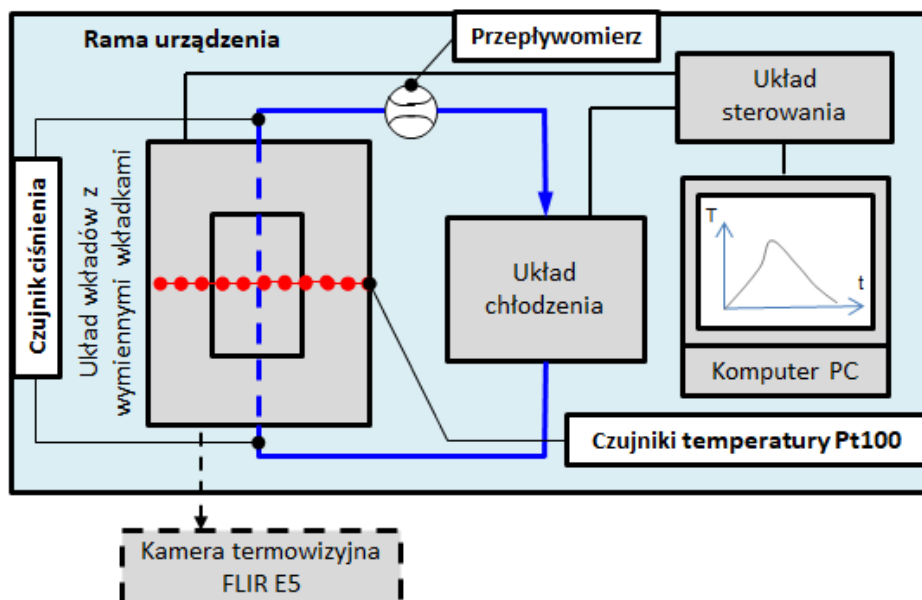
## 7. Badania doświadczalne prototypowego układu chłodzenia

### 7.1. Stanowisko badawcze

W konstrukcji stanowiska (urządzenia) do badań doświadczalnych układu chłodzenia form wtryskowych w technologii dynamicznych zmian temperatury (RHCM) w pierwszym etapie projektowania przyjęto, że stanowisko będzie składało się z następujących zespołów:

- układu wkładów z wymiennymi wkładkami badawczymi oraz grzałkami patronowymi (w celu podniesienia temperatury wkładek z badanymi kanałami chłodzącymi),
- układu chłodzenia stanowiska,
- układu sterowania (pomiaru, automatycznej kontroli temperatury, sterowania procesem),
- komputera z oprogramowaniem,
- ramy urządzenia.

Na rysunku 7.1 pokazano schemat blokowy urządzenia, w którym uwzględniono powyższe zespoły. W tabelach 7.1 i 7.2 przedstawiono podstawowe parametry zastosowanych urządzeń pomiarowych – czujników Pt100 oraz kamery termowizyjnej FLIR E5.



Rys. 7.1. Schemat blokowy stanowiska badawczego

Tab. 7.1. Podstawowe parametry czujnika Pt100 [139]

<b>Klasa</b>	A
<b>Zakres temperatur</b>	-100°C / +450°C
<b>Dokładność</b>	±0.15°C (dla 0°C)

Tab. 7.2. Podstawowe parametry kamery FLIR E5 [121]

<b>Rodzaj detektora</b>	mikrobolometryczny
<b>Rozdzielczość detektora</b>	120×90 ppi
<b>Czułość termiczna</b>	<0.15°C
<b>Kąt widzenia obiektywu</b>	45°×53°
<b>Częstotliwość próbkowania</b>	9 Hz
<b>Zakres pomiaru temperatury</b>	-20°C/+250°C
<b>Dokładność</b>	±2°C

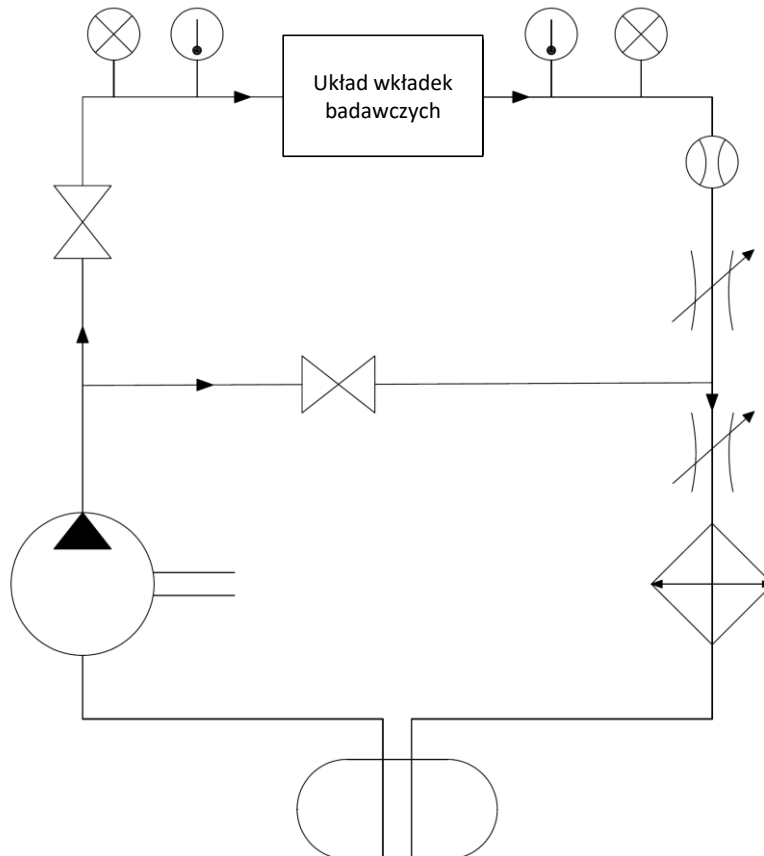
W kolejnym etapie przeanalizowano funkcjonalność poszczególnych zespołów oraz postawiono wymagania niezbędne do prawidłowego działania każdego z nich. Wykonanie tego typu analizy pozwoliło na przyjęcie następujących założeń konstrukcyjnych:

- modułowość – konstrukcja układu wkładów powinna zapewnić szybką i łatwą przezbieralność wkładek z badanymi kanałami chłodzącymi,
- powtarzalność – wymiana wkładek musi przebiegać w sposób powtarzalny oraz muszą być zapewnione identyczne warunki podczas każdego cyklu badawczego,
- bezpieczeństwo użytkownika – rama stanowiska badawczego wraz z osłonami zapewni wysoki standard bezpieczeństwa od zagrożeń, tj. poparzenia (gorące elementy układu chłodzenia), kontakt z elementami wirującymi (wentylatory chłodnicy), porażenia prądem,
- mobilność – konstrukcja ramy nośnej musi zapewnić możliwość przemieszczania całego stanowiska,
- kompaktowość – wynikająca z konieczności ruchu, urządzenie musi mieć budowę kompaktową,
- ergonomia stanowiska – badania będą wykonywane w pozycji stojącej.

Ponadto przyjęto następujące warunki pracy:

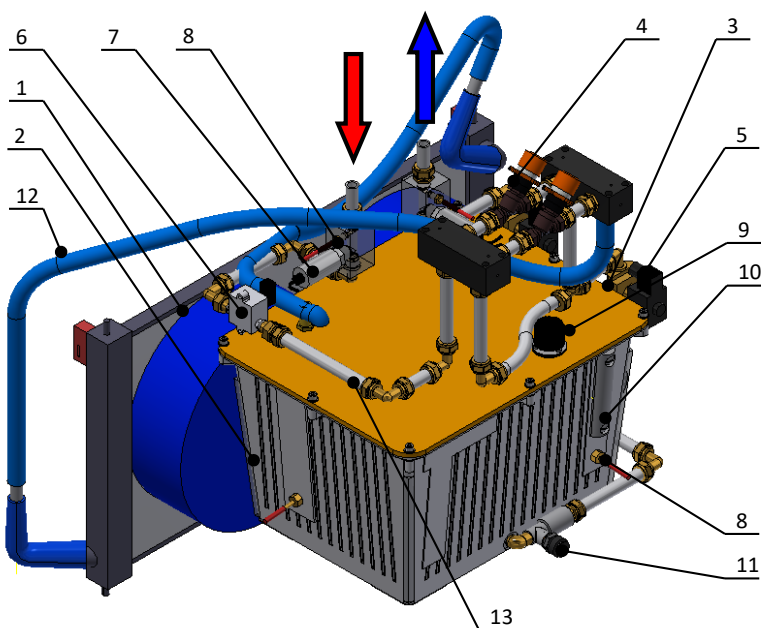
- medium chłodzące: woda destylowana,
- natężenie przepływu: 5 – 10 l/min,
- ciśnienie w układzie chłodzącym: max 6 bar,
- max. temperatura cieczy w układzie chłodzącym: 80 °C,
- min. temperatura cieczy w układzie chłodzącym: 20 °C,
- max. temperatura nagrzewanych wkładek: 200 °C,
- czas nagrzewania (1 cykl):  $\approx$  180 s,
- tryb przełączania grzanie/chłodzenie: pół-automatyczny.

„Sercem” stanowiska do badań eksperymentalnych jest system chłodzenia (regulacji temperatury), połączony z układem wkładek z wymiennymi wkładkami badawczymi. Głównymi elementami omawianego układu są: chłodnica cieczy, pompa cyrkulacyjna oraz zbiornik hydrauliczny, w tym przypadku o pojemności 40 l. Na potrzeby projektu opracowano schemat hydrauliczny, który został zaprezentowany na rysunku 7.2. Poza głównymi komponentami, które zostały już wcześniej wskazane, na schemacie naniesiono również: czujniki ciśnienia, czujniki temperatury, zawory dławiące oraz zawory zasurowe odcinające.



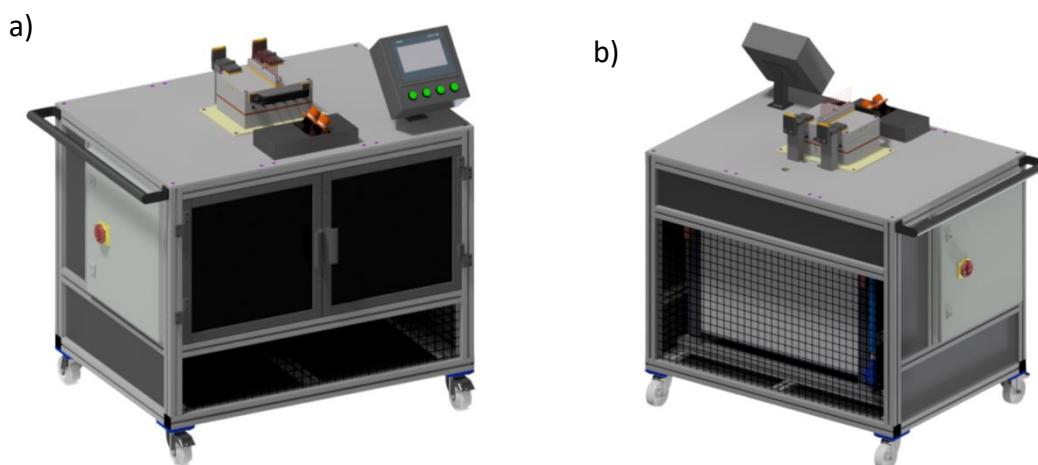
Rys. 7.2. Schemat hydrauliczny układu chłodzenia

Bazując na opracowanym schemacie hydraulicznym, wykonano uproszczony model 3D układu chłodzenia (rys. 7.3). Założono, że połączenia zostaną zrealizowane poprzez zastosowanie systemu instalacyjnego ALU-PEX, w skład którego wchodzi przewody wielowarstwowe, przystosowane do pracy w wysokich temperaturach medium i ciśnieniu wynoszącym max. 10 bar. W celu połączenia układu zgodnie z przedstawionym schematem (rys. 7.2) wykorzystano różnego typu łączniki proste, kolanka, trójniki itp. Wyjątek stanowi podłączenie chłodnicy do układu – zastosowano przewód elastyczny, dedykowany do systemów regulacji temperatury form wtryskowych.



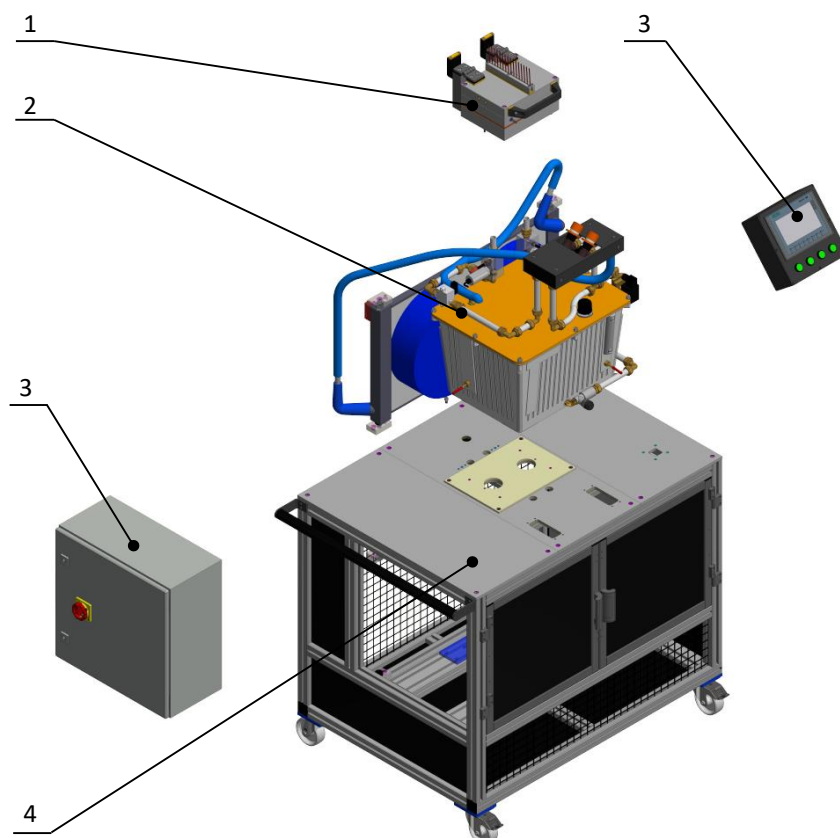
Rys. 7.3. Model systemu regulacji temperatury: 1 – chłodnica, 2 – zbiornik hydrauliczny, 3 – pompa cyrkulacyjna, 4 – zawór dławiący, 5 – elektrozawór, 6 – przepływomierz, 7 – czujnik ciśnienia, 8 – czujnik temperatury, 9 – korek z odpowietrzeniem, 10 – wskaźnik poziomu cieczy z termometrem, 11 – korek spustowy, 12- elastyczny przewód, 13 – system instalacyjny ALU-PEX

Projekt koncepcyjny stanowiska do badań doświadczalnych został wykonany, analogicznie jak prototyp układu chłodzenia, w programie CAD Autodesk Inventor Professional 2017. Po utworzeniu wszystkich niezbędnych modeli 3D pojedynczych części, złożów układów funkcjonalnych oraz kompletnego stanowiska opracowano dokumentację techniczną, która była niezbędna do wykonania wszystkich elementów wchodzących w skład projektu. Ponadto, opracowano rysunki złożeniowe oraz montażowe w celu zintegrowania zespołów w funkcjonalną całość – stanowisko do badań doświadczalnych układów chłodzenia form wtryskowych.



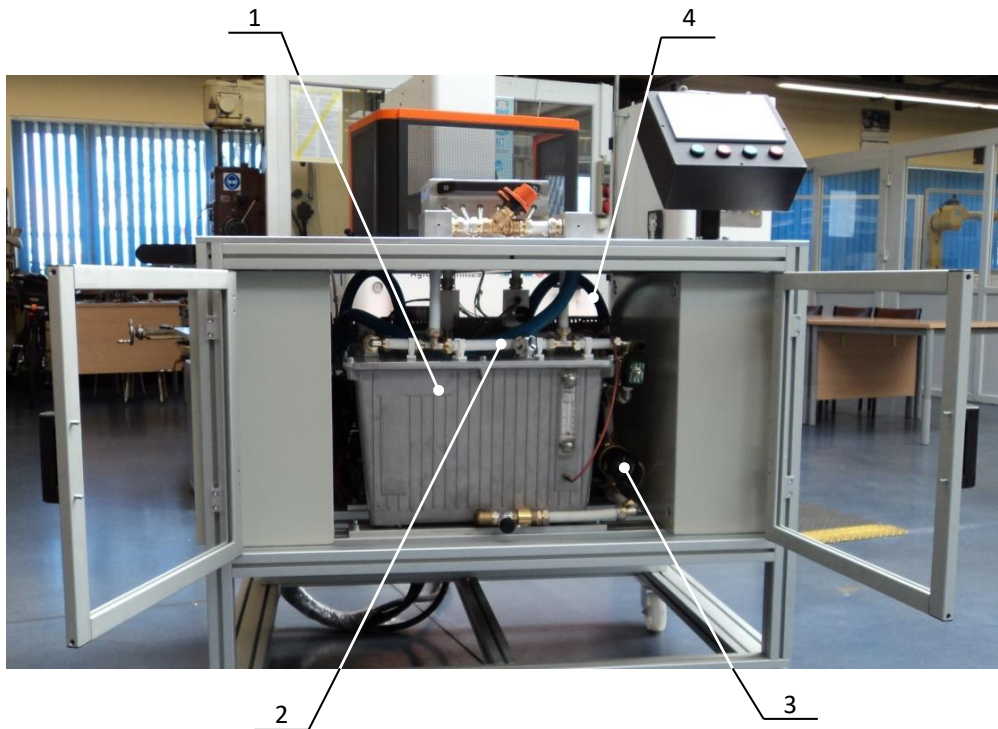
Rys. 7.4. Stanowisko badawcze: a) rzut izometryczny – front, b) rzut izometryczny - tył

Podczas projektowania stanowiska do badań wszystkie przedstawione wcześniej założenia zostały spełnione. Rysunek 7.4 ilustruje rzuty izometryczne koncepcji projektu, natomiast na rysunku 7.5 przedstawiono rozbicie z wyszczególnieniem głównych układów funkcjonalnych.

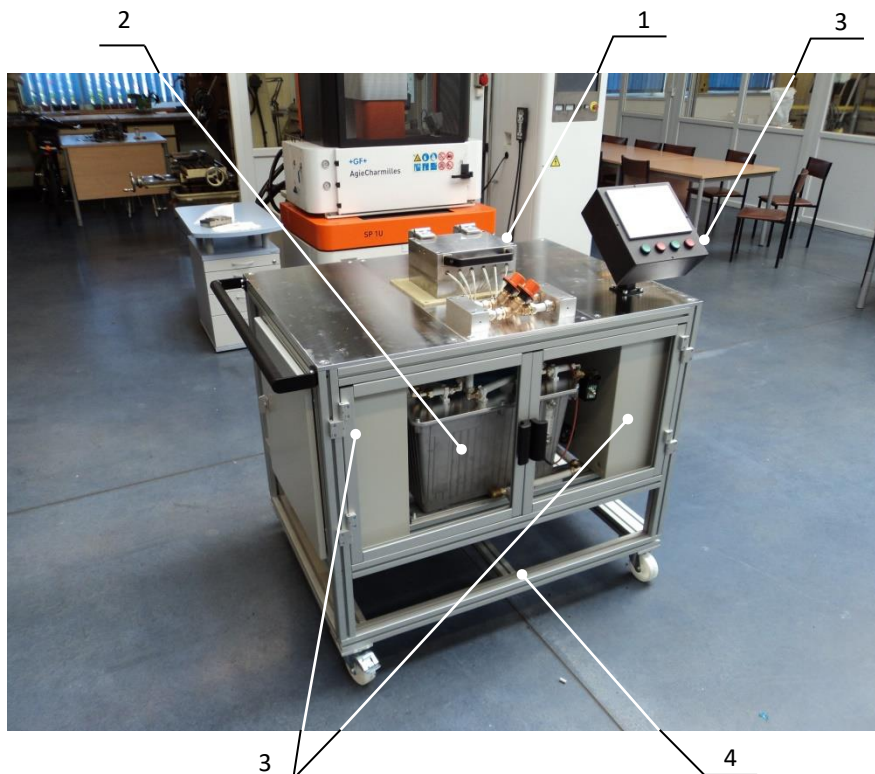


Rys. 7.5. Podział stanowiska badawczego na zespoły: 1 – układ wkładów z wymiennymi wkładkami badawczymi oraz grzałkami patronowymi, 2 – układ chłodzenia stanowiska, 3 – układ sterowania, 4 – rama urządzenia

Po zakończeniu budowy stanowiska i sprawdzeniu układów zasilania, sterowania, nagrzewania i chłodzenia nastąpiło próbne uruchomienia. Układ chłodzenia został uzupełniony 36 litrami wody demineralizowanej w celu ograniczenia zjawiska oddzielania się kamienia i osadzania na przewodach oraz wewnątrz badanych wkładek. Na rysunkach 7.6 i 7.7 pokazano odpowiednio widok układu chłodzenia oraz widok głównych zespołów w trakcie montażu urządzenia. Natomiast kolejna fotografia (rys. 7.8) ilustruje efekt finalny.



Rys. 7.6. Widok układu chłodzenia: 1 – zbiornik hydrauliczny, 2 – system przewodów ALU – PEX, 3 – pompa cyrkulacyjna, 4 – przewód elastyczny



Rys. 7.7. Widok głównych zespołów stanowiska podczas etapu montażu: 1 – układ wkładów z wymiennymi wkładkami badawczymi oraz grzałkami patronowymi, 2 – układ chłodzenia stanowiska, 3 – układ sterowania, 4 – rama urządzenia



Rys. 7.8. Stanowisko do badań doświadczalnych

Przedstawiona w niniejszym rozdziale konstrukcja stanowiska stanowi istotę patentu pt. „Stanowisko do badań układów chłodzenia form wtryskowych” [112], którego autor rozprawy jest współtwórcą (głównym autorem).

## 7.2. Opracowanie metodyki i programu badań doświadczalnych

W celu przeprowadzenia badań eksperymentalnych opracowano ich przebieg oraz określono wszystkie niezbędne parametry procesu (tabela 7.3). Wszystkie parametry pozostały stałe, poza natężeniem przepływu, którego wartości zmieniały się zgodnie z wartościami przedstawionymi w tabeli. Wielkość natężenia przepływu z zakresu od 5 do 10 l/min jest najczęściej stosowana w przemyśle przetwórstwa tworzyw sztucznych w przypadku technologii wtryskiwania. Zgodnie z danymi literaturowymi [105] przyjmuje się, że powyżej tych wartości efektywność procesu chłodzenia przestaje wzrastać, co ma związek z charakterem przepływu, dlatego też ograniczono badania eksperymentalne do tych wartości.

Tabela 7.3. Parametry procesu podczas badań doświadczalnych

Parametr	Jednostka	Wartość
Natężenie przepływu cieczy, $Q$	l/min	5, 6, 8, 10
Temperatura początkowa, $T_i$	°C	150
Temperatury cieczy w zbiorniku, $T_{in}$	°C	30
Temperatura otoczenia w lab., $T_o$	°C	22
Czas cyklu pomiarowego, $t_{cp}$	s	120
Częstość próbkowania, $f_p$	s	0,5



Dla zaprezentowanych parametrów przeprowadzono badania. Ich przebieg był następujący:

- ustabilizowanie temperatury wody w zbiorniku do wartości 30 °C,
- nagrzanie płyty bazowej do temperatury 150 °C (odczyt z czujnika T08, rys. 7.7) za pomocą grzałek patronowych umieszczonych w płycie grzewczej,
- włączenie obiegu chłodzenia wodą z jednoczesnym startem automatycznego pomiaru temperatury,
- pomiar intensywności chłodzenia w czasie 120 s. z wykorzystaniem szesnastu czujników rezystancyjnych Pt100 (oraz kamery termowizyjnej FLIR E5),
- przygotowanie układu do kolejnego cyklu badawczego.

Proces nagrzewania układu badawczego był możliwy dzięki zastosowaniu dwunastu grzałek patronowych HASCO Z110/12,5×80×800 o łącznej mocy 9,6 kW, które zostały zainstalowane w płycie grzewczej (rys. 6.3). Układ nagrzewano do momentu uzyskania temperatury o wartości 150 °C odczytanej z wskazania czujnika T08. Czujnik T08 wybrano jako priorytetowy ze względu na jego położenie bezpośrednio nad badanym kanałem chłodzącym, co odpowiadało pozycji punktu pomiarowego podczas badań symulacyjnych. Po wykonanych w ten sposób czynnościach następował cykl pomiarowy, który przeprowadzono w identycznych warunkach dla wszystkich badanych kanałów i zmiennych wartości natężenia przepływu.

Przeprowadzenie badań doświadczalnych miało na celu określenie najlepszego kanału chłodzącego pod kątem następujących kryteriów:

- szybkości chłodzenia,
- równomierności chłodzenia,
- spadków ciśnienia na drodze przepływu (oporów przepływu).

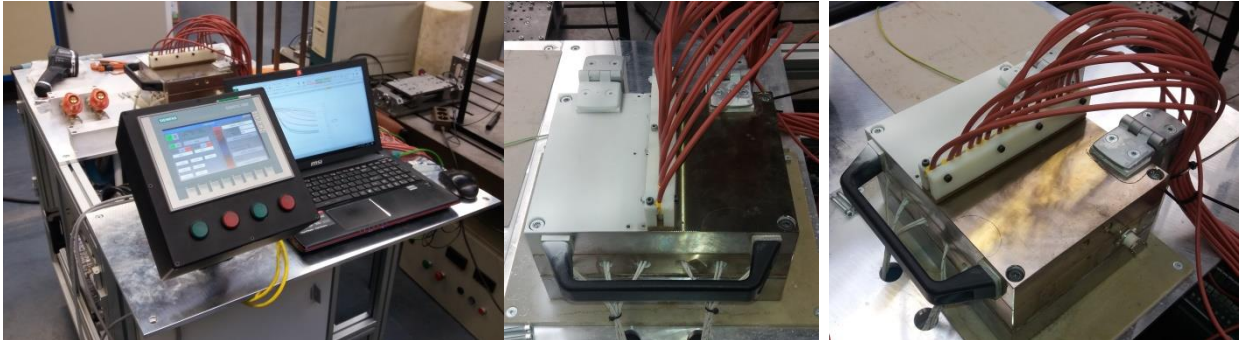
Ponadto, w dalszej części pracy, uzyskane rezultaty poddano analizie oraz porównano z wynikami badań symulacyjnych. Umożliwiło to optymalizację parametrów procesu chłodzenia oraz weryfikację technologiczności proponowanych rozwiązań w odniesieniu do standardowych, wierconych kanałów chłodzących.

### **7.3. Badania i analiza uzyskanych wyników**

Zgodnie z opracowaną metodyką i programem, badania przeprowadzono dla czterech konfiguracji kanałów uźebrowanych oraz kanału gładkiego o średnicy 8 mm. Wszystkie

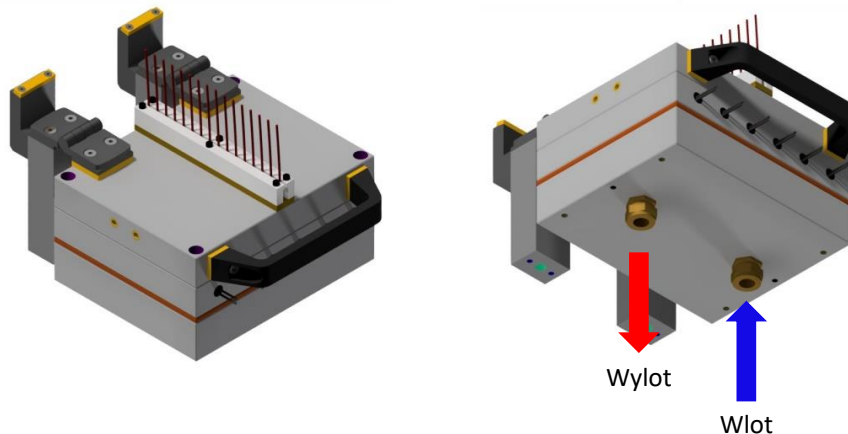


badania eksperymentalne wykonano na wcześniej zaprojektowanym oraz zmontowanym stanowisku badawczym (rys. 7.8). W tabeli 7.3 przedstawiono parametry procesu oraz warunki panujące w laboratorium.



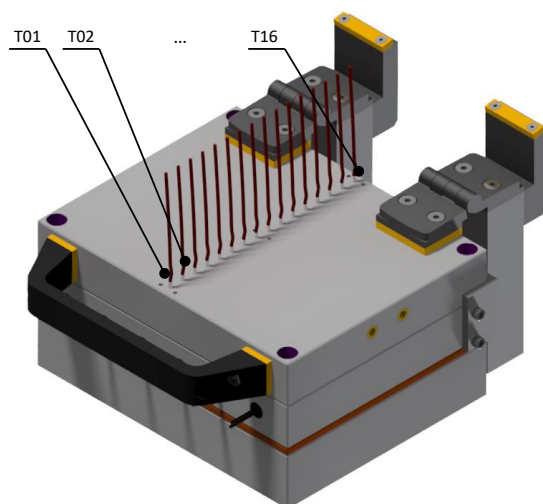
Rys. 7.8. Stanowisko badawcze podczas przeprowadzania badań doświadczalnych

Proces wstępnego nagrzewania układu badawczego (grzałki patronowe) oraz temperatura medium chłodzącego w zbiorniku kontrolowane były z pulpitu sterującego SIEMENS KTP700. Wartość natężenia przepływu cieczy chłodzącej regulowano dwoma zaworami dławiącymi, natomiast pomiar realizowany był za pomocą przepływomierza. Dodatkowo, monitorowano wartości temperatury i ciśnienia na wlocie oraz wylocie cieczy do/z układu badawczego (rys. 7.9). Rejestrację tych parametrów zrealizowano z zastosowaniem czujników temperatury Pt100 oraz czujników ciśnienia SIEMENS QBE2002-P20.



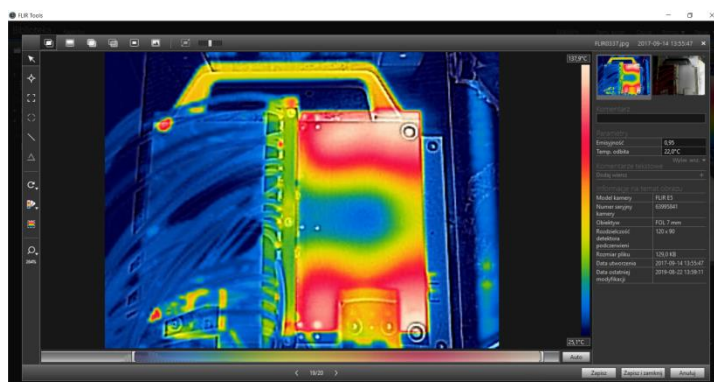
Rys. 7.9. Korpus układu badawczego ze wskazaniem punktów wlotu i wylotu cieczy chłodzącej

Proces nagrzewania oraz chłodzenia rejestrowany był poprzez zastosowanie czujników Pt100, co omówiono w punkcie dotyczącym budowy stanowiska. Dane temperaturowe zarejestrowane przez czujniki były przesyłane do sterownika PLC SIEMENS SIMATIC S7-1200, następnie wyświetlane na panelu dotykowym SIEMENS KTP700 i przesyłane do komputera PC. Na rysunku 7.10 przedstawiono numerację czujników rezystancyjnych Pt100.



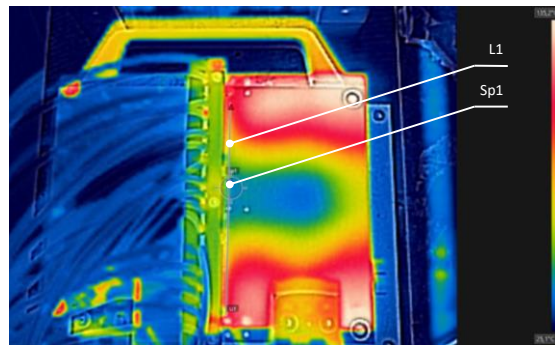
Rys. 7.10. Sposób numeracji czujników temperatury Pt100 – od T01 do T16

Dodatkowym elementem monitorującym zachodzące procesy była kamera termowizyjna FLIR E5. Kamerą monitorowano część korpusu po stronie wylotu cieczy z układu, co uwidoczniono na zaprezentowanym poniżej termogramie. Część płyty będąca przedmiotem analizy temperaturowej, została pokryta kredą w spray'u w celu uzyskania jednolitego współczynnika emisyjności na badanej powierzchni. Zarejestrowane przez kamerę termowizyjną obrazy (termogramy) przesyłano do komputera PC. Następnie, uzyskane w ten sposób dane poddano obróbce poprzez zastosowanie oprogramowania FLIR TOOLS (rys. 7.11).



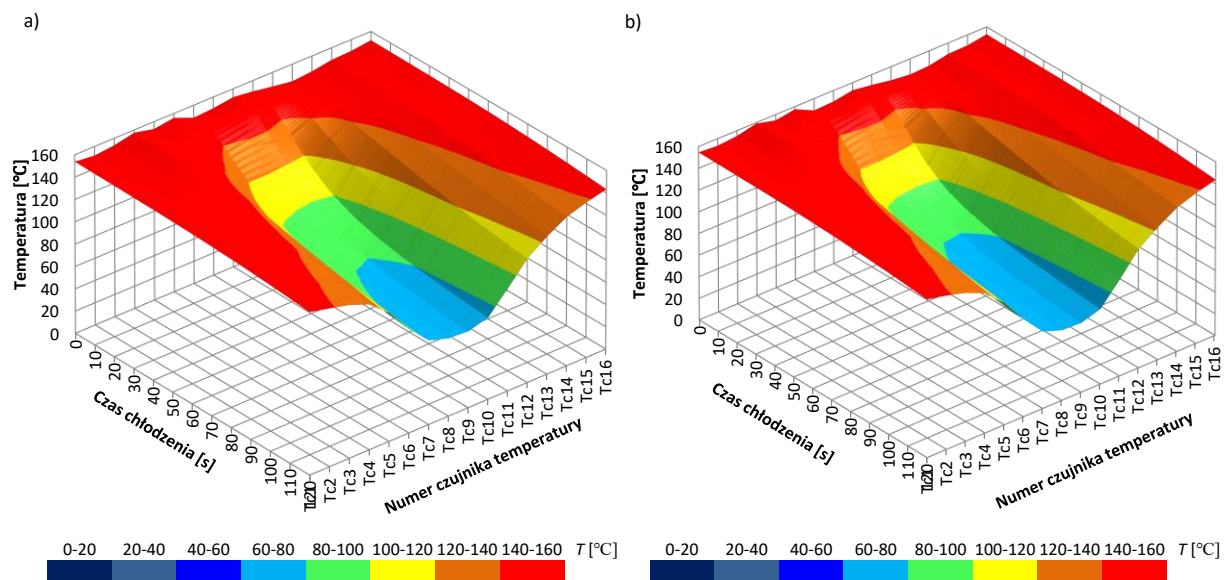
Rys. 7.11. Interface programu FLIR TOOLS

Program FLIR TOOLS pozwala na wyświetlanie i obróbkę wyników w postaci termogramów rozkładu temperatury na badanych powierzchniach. Narzędzia, które zostały wykorzystane podczas analizy wyników, to odczyt temperatury w zadanym punkcie Sp1 oraz odczyt temperatury średniej wzdłuż wyznaczonej linii L1 (rys. 7.12). Uzyskane w ten sposób wyniki pomiaru temperatury służyły jako poglądowe, natomiast dalszej analizie poddane zostały rezultaty odczytane z zastosowaniem umieszczonych na powierzchni płyty korpusu czujników Pt100.



Rys. 7.12. Przykład obróbki danych w programie FLIR TOOLS

Na poniższym rysunku (rys. 7.13) zobrazowano dane temperaturowe, odczytane ze wszystkich 16 czujników Pt100 podczas pomiaru temperatury z zastosowaniem wkładek z kanałami gładkim oraz uźebrowanym M8H08. Zgodnie z wcześniej przytoczonym założeniem, jako referencję wybrano czujnik T08, który znajdował się w osi badanego kanału chłodzącego. Temperatura początkowa o wartości 150 °C monitorowana była na omawianym detektorze. Biorąc pod uwagę pozostałe elementy Pt100, zauważyć można, że początkowe wartości temperatur nie są w pełni zbieżne. Wynikało to z faktu, iż nagrzanie płyty bazowej w całkowicie jednorodny sposób było nieosiągalne w przypadku zastosowanych rozwiązań. Dlatego też, dalszej analizie poddane zostały rezultaty zarejestrowane przez jeden czujnik temperatury, oznaczony symbolem T08.



Rys. 7.13. Wykres powierzchniowy ilustrujący rozkład temperatury na powierzchni płyty: a) wkładka z kanałem gładkim  $\varnothing 8$ , b) wkładka z kanałem uźebrowanym M8H08

W tabelach 7.4 – 7.7 zaprezentowano rezultaty uzyskane dla wszystkich konfiguracji kanałów i wartości natężenia przepływu dla czasu chłodzenia równego 120 sekund. W normalnych warunkach produkcyjnych długość cyklu chłodzenia podczas procesu wtryskiwania

trwa zazwyczaj od kilku do kilkudziesięciu sekund w zależności od rozmiarów, masy i gatunku tworzywa produkowanego artykułu. Podczas badań układ chłodzono przez 120 s, w celu uzyskania jak największej ilości danych do analizy. Ponadto, obserwowano zachowanie się układu w poszczególnych odcinkach czasowych, co było ważną informacją w aspekcie optymalizacji procesu i próby jego przygotowania do warunków produkcyjnych.

Tabela 7.4. Rezultaty procesu chłodzenia dla wkładek z badanymi kanałami [°C] ( $Q = 5$  l/min)

t [s]	Kanał $\varnothing 8$	M4H06	M4H08	M8H06	M8H08
0	150	150	150	150	150
30	117,3	118,6	116,5	115,7	110,8
60	89,8	90,1	88,5	88,1	84,6
120	73,4	73,4	72,4	70,7	69,6

Tabela 7.5. Rezultaty procesu chłodzenia dla wkładek z badanymi kanałami [°C] ( $Q = 6$  l/min)

t [s.]	Kanał $\varnothing 8$	M4H06	M4H08	M8H06	M8H08
0	150	150	150	150	150
30	114,6	115,6	112,5	114	109,7
60	87	87,7	86	85,2	82,3
120	71	71,5	70,5	68,4	67,4

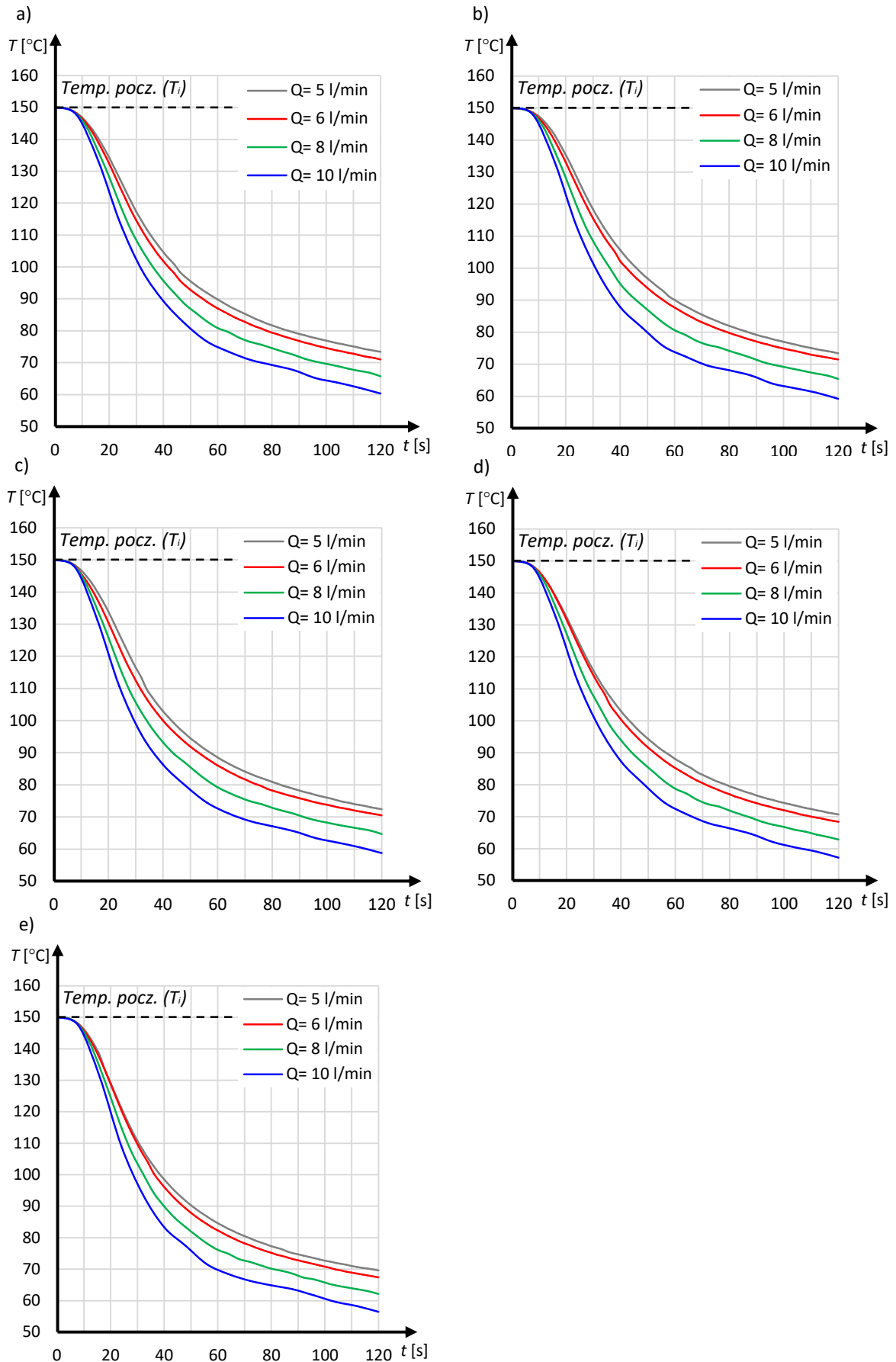
Tabela 7.6. Rezultaty procesu chłodzenia dla wkładek z badanymi kanałami [°C] ( $Q = 8$  l/min)

t [s]	Kanał $\varnothing 8$	M4H06	M4H08	M8H06	M8H08
0	150	150	150	150	150
30	108,8	108,8	106,0	107,9	103,8
60	80,8	80,6	79,1	78,7	76,2
120	65,7	65,3	64,7	62,9	62,1

Tabela 7.7. Rezultaty procesu chłodzenia dla wkładek z badanymi kanałami [°C] ( $Q = 10$  l/min)

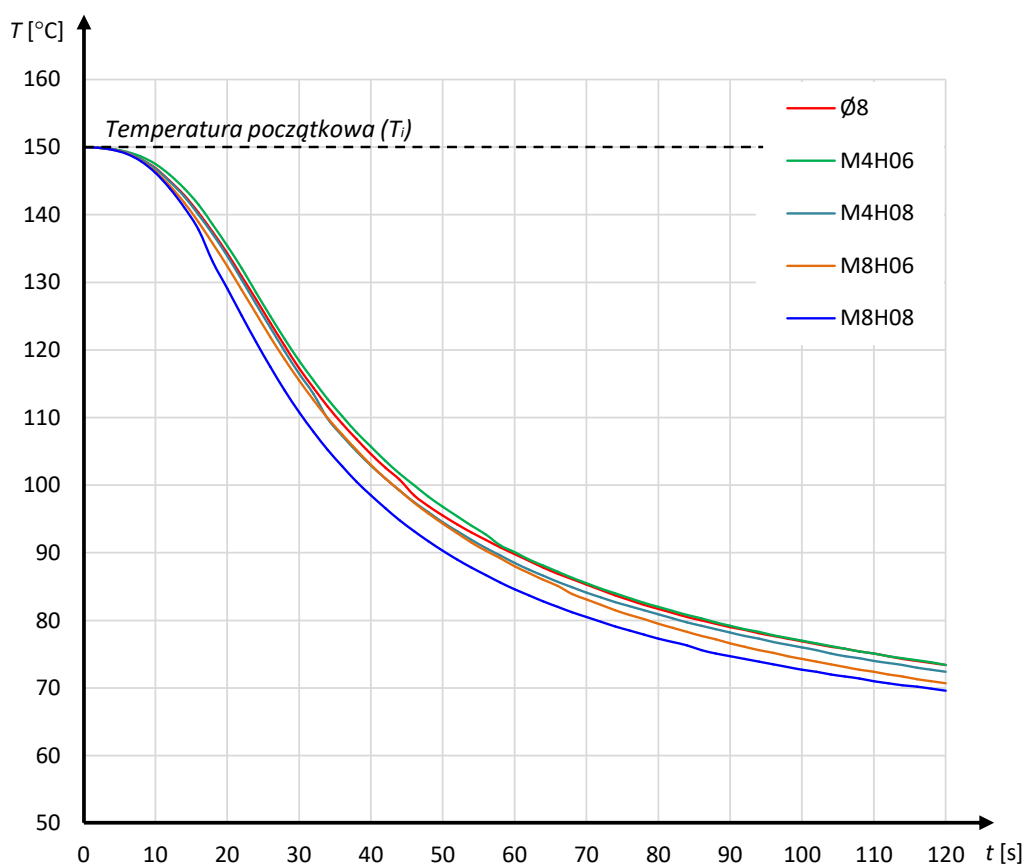
t [s]	Kanał $\varnothing 8$	M4H06	M4H08	M8H06	M8H08
0	150	150	150	150	150
30	102,6	101,7	99,1	101,3	96,7
60	74,5	73,4	72,3	72,2	68,2
120	60,3	59,3	58,8	57,2	55,0

Zgodnie z przyjętymi założeniami, próby chłodzenia wykonano dla 4 różnych wartości natężenia przepływu. Wartość tego parametru ma kluczowe znaczenie w przypadku chłodzenia wszelkich systemów wymagających kontroli temperatury i nie inaczej jest w przypadku form wtryskowych. Zwiększanie wartości natężenia przepływu powoduje wzrost intensywności odbioru ciepła od nagrzewanego układu. Na poniższych wykresach (rys. 7.14a-e) zaprezentowano porównanie rezultatów chłodzenia w zależności od kształtu kanału oraz wartości omawianego parametru. Stosownie do przypuszczeń, wraz ze zwiększaniem natężenia przepływu zwiększała się wymiana ciepła pomiędzy stalową wkładką a medium chłodzącym (wodą). Minimalne wartości temperatury osiągnięto w przypadku ustawienia wartości przepływu na poziomie 10 l/min i oscylowały one w granicach 60 °C po 120 sekundach chłodzenia.



Rys. 7.14. Rezultaty chłodzenia w zależności od kształtu kanału i wartości natężenia przepływu: a) kanał  $\varnothing 8$ , b) kanał M4H06, c) kanał M4H08, d) kanał M8H06, e) kanał M8H08

W celu określenia najlepszego rozwiązania dokonano zestawienia uzyskanych rezultatów w zależności od konfiguracji żeber. Na rysunkach 7.15 – 7.18 zaprezentowano graficzne przedstawienie uzyskanych wyników w zależności od kształtu kanału i natężenia przepływu. Największy odbiór ciepła, niezależnie od natężenia przepływu, odnotowano w przypadku kanałów z ośmioma żebrami o współczynniku wysokości  $H=0,8$ . W przypadku natężenia przepływu  $Q=5$  l/min minimalna wartość temperatury dla kanału M8H08 wyniosła  $69,6$  °C. Dla porównania, w przypadku kanału wierconego  $\varnothing 8$  uzyskano minimalną wartość temperatury na poziomie  $73,4$  °C, co daje różnicę  $3,8$  °C (po 120 sekundach chłodzenia). Co ciekawe, największą różnicę pomiędzy wskazanymi kanałami odnotowano w 28 sekundzie pomiaru i wyniosła ona  $6,6$  °C. W aspekcie chłodzenia form wtryskowych jest to zjawisko pożądane, ponieważ etap chłodzenia w procesie wtryskiwania trwa od kilku do kilkunastu, kilkudziesięciu sekund i wskazane jest, żeby układ chłodzący charakteryzował się największą dynamiką na jego początku.

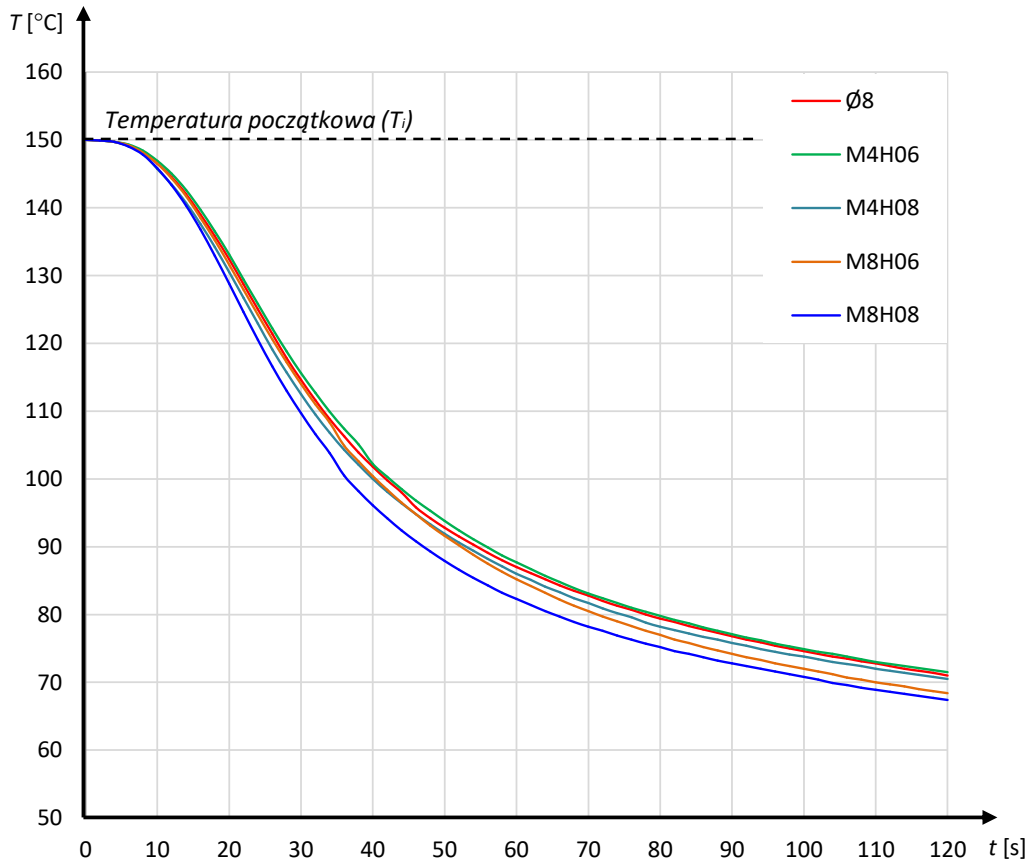


Rys. 7.15. Krzywe chłodzenia uzyskane w czasie 120 sekund ( $Q = 5$  l/min)

Dla przypadku chłodzenia z natężeniem przepływu wynoszącym  $6$  l/min dla kanału  $\varnothing 8$  (po 120 sekundach procesu) uzyskano wartość temperatury wynoszącą  $71$  °C, natomiast dla kanału M8H08  $67,4$  °C, co w konsekwencji daje różnicę wynoszącą  $3,6$  °C. Podobnie

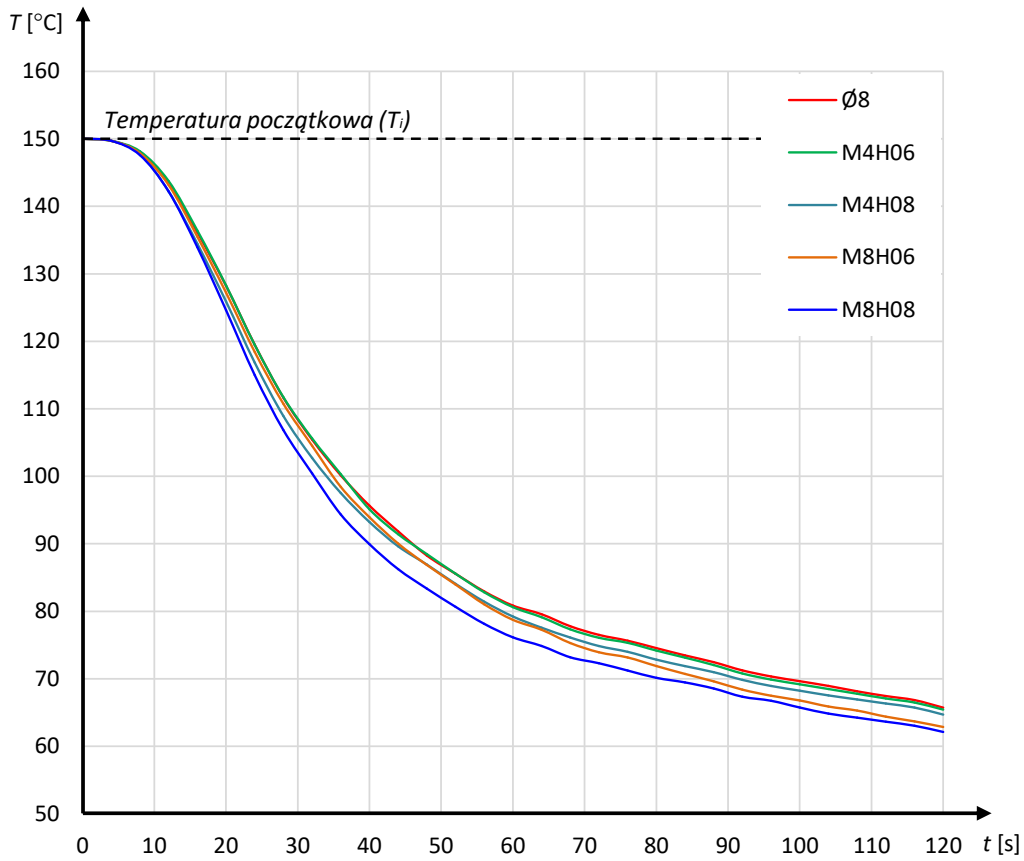


jak we wcześnie omawianej sytuacji, nie jest to maksymalna różnica pomiędzy odczytami temperatury – maksymalne odchylenie temperatury, na korzyść kanału uźebrowanego, uzyskano w 25 sekundzie pomiaru i wyniosło one 6 °C (dla  $\emptyset 8$  i dla M8H08).

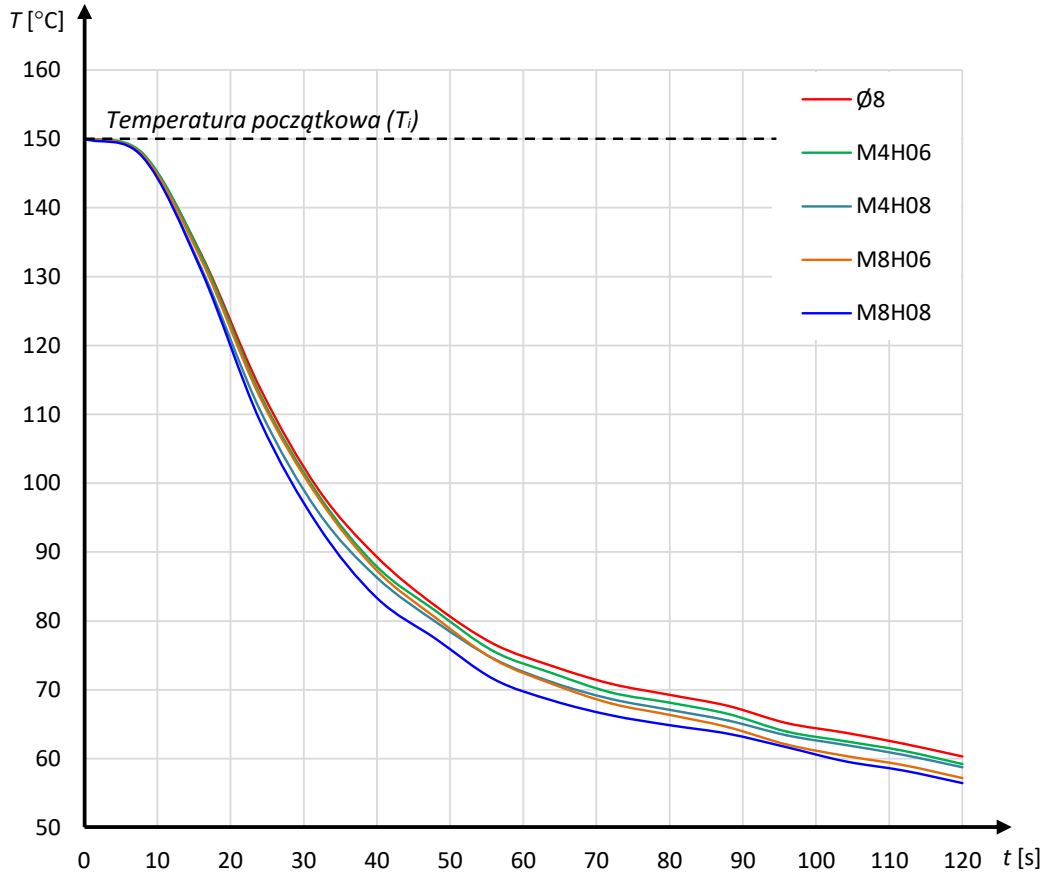


Rys. 7.16. Krzywe chłodzenia uzyskane w czasie 120 sekund ( $Q = 6$  l/min)

Krzywe uzyskane dla przepływów 8 i 10 l/min, mimo że różnią się uzyskanymi wartościami temperatury, cechują się zbieżnym charakterem. Odnotowano również, że w kwestii większych wartości przepływu, pomiar temperatury był mniej stabilny, co widoczne jest podczas przeprowadzania analizy uzyskanych krzywych (rys. 7.17 i 7.18). Jest to szczególnie wyraźne w przypadku pomiarów, w których natężenie przepływu wynosiło  $Q = 10$  l/min. Może się to wiązać ze zjawiskiem wzmożonej turbulencji przepływu, co powoduje utratę stabilności ruchu cieczy, która wpływa z kolei na odczyty wartości temperatury. Mimo to, uzyskiwane rezultaty dla takiego natężenie przepływu są najkorzystniejsze spośród badanych. Chcąc porównać otrzymane wyniki z poprzednimi, odnotowano następujące wartości: dla kanału  $\emptyset 8$  – 60,3 °C oraz 55 °C dla kanału M8H08, co w efekcie dało różnicę wynoszącą 5,3 °C.



Rys. 7.17. Krzywe chłodzenia uzyskane w czasie 120 sekund ( $Q = 8$  l/min)



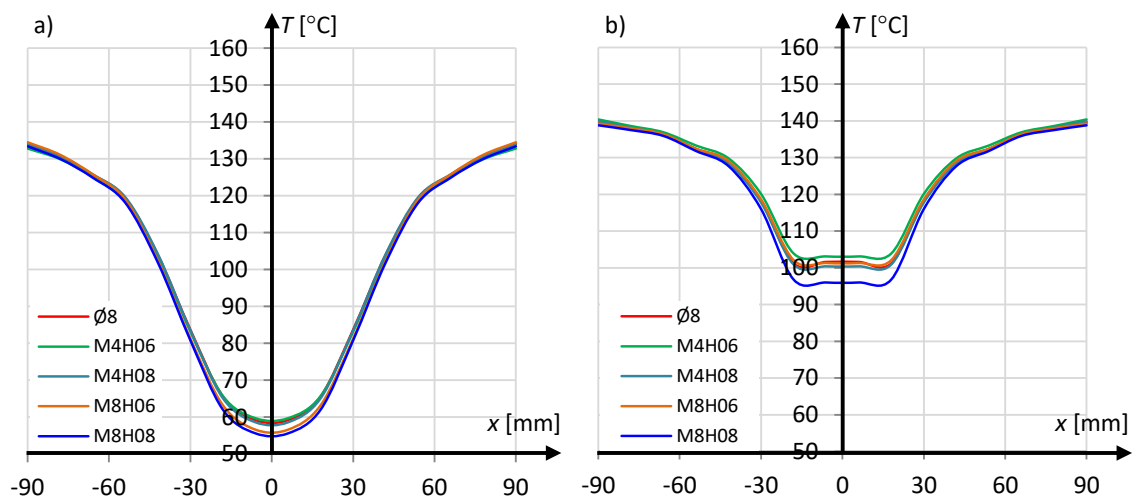
Rys. 7.18. Krzywe chłodzenia uzyskane w czasie 120 sekund ( $Q = 10$  l/min)



Dla kanałów uźebrowanych o współczynniku wysokości  $H=0,6$  szybkość chłodzenia była zbliżona do szybkości, którą odnotowano w przypadku zastosowania kanału konwencjonalnego. Jednoznacznie zobrazowało to, że należy skupić się na kanałach z najdłuższymi żebrami. W przypadku kanałów z czterema żebrami uzyskana efektywność chłodzenia jest niższa niż w przypadku ośmiu, ale w aspekcie ekonomicznym i technologiczności wykonania może być alternatywą dla ośmiu żeber.

Kolejnym z kryteriów podczas oceny efektywności chłodzenia dla badanych kanałów chłodzących było kryterium równomierności odbioru ciepła. Na poniższych wykresach zaprezentowano rozkład temperatury na powierzchni płyty bazowej po 120 s (rys. 7.19a) oraz 30 s (rys. 7.19b) przy natężeniu przepływu wynoszącym 10 l/min. Dla wszystkich przypadków uzyskano regularny rozkład temperatury w obszarze kanałów chłodzących. Na pozostałej części płyty utrzymywała się wysoka temperatura (powyżej 100 °C), ponieważ zastosowane zostały dwa kanały chłodzące, co zostało przedstawione w części poświęconej budowie prototypów i stanowiska badawczego. W praktyce przemysłowej należałoby chłodzić całą płytę poprzez zwiększenie liczby kanałów – zgodnie z zaleceniami przedstawionymi na rysunku 2.26 i w tabeli 2.3.

Przewagę w szybkości odbioru ciepła kanału M8H08 od pozostałych można dostrzec na podstawie analizy rysunku 7.19b – wartość temperatury jest mniejsza niż w pozostałych przypadkach, i co więcej, nie rzutuje to na spadek równomierności jej rozkładu. Widoczne natomiast jest samo rozmieszczenie kanałów chłodzących (widoczne ugięcie krzywej, 7.19b).

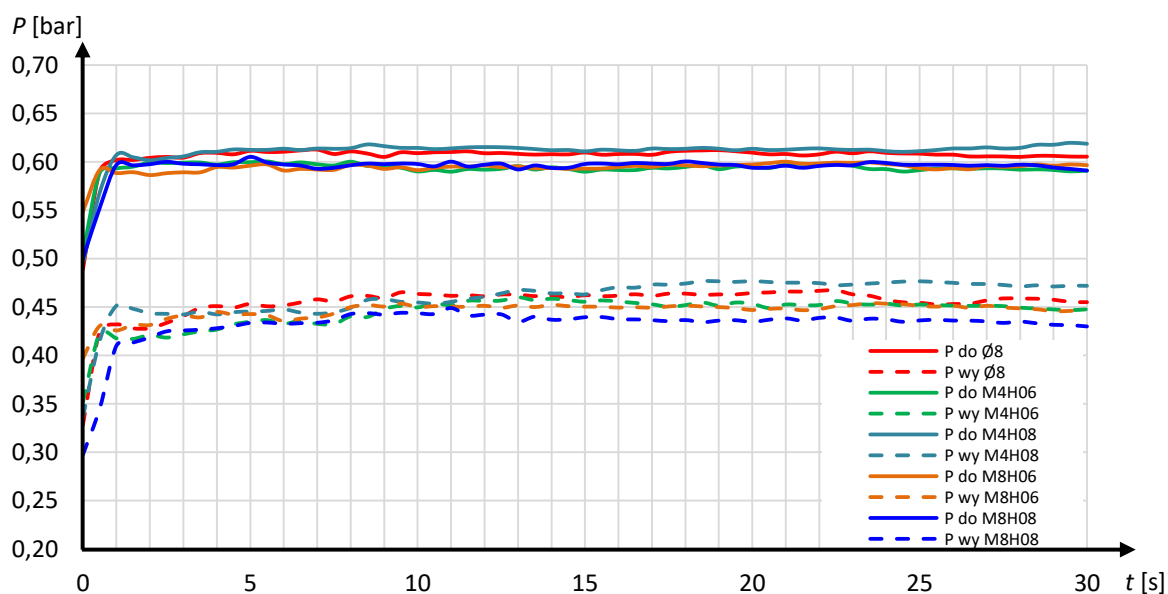


Rys. 7.19. Rozkład temperatury na powierzchni wkładki dla  $Q=10$  l/min: a) po 120 s chłodzenia, b) po 30 s chłodzenia

Ostatnim z kryteriów porównawczych są pojawiające się podczas przepływu cieczy przez układ straty ciśnienia. Wiedza na temat powstających spadków ciśnienia w układzie jest czynnikiem niezbędnym w doborze odpowiednich urządzeń zasilających oraz oceny ekonomiki procesu chłodzenia. Na rysunku 7.20 pokazano uzyskane rezultaty wartości ciśnienia na wlocie i wylocie cieczy chłodzącej. Uzyskane wyniki zostały przedstawione na odcinku pomiarowym o długości 30 sekund, ponieważ po przekroczeniu tego czasu, nie odnotowano znaczącej utraty stabilności przepływu medium chłodzącego.

Największe straty ciśnienia zarejestrowano w przypadku kanału M8H08 – ich maksymalna wartość wyniosła 0,156 bar ( $P_{do} = 0,605$  bar,  $P_{wy} = 0,449$  bar), co jest zbieżne z badaniami symulacyjnymi, gdzie wyznaczony został współczynnik oporu Fanninga (rys. 5.21) i największa uzyskana wartość dla omawianej konfiguracji kanału uźebrowanego. Dla porównania, w przypadku kanału gładkiego straty ciśnienia wyniosły 0,145 bar ( $P_{do} = 0,613$  bar,  $P_{wy} = 0,467$  bar). Mniejsze opory przepływu zaobserwowano w przypadku kanałów z krótszymi źebami, M4H06 – 0,140 oraz M8H06 – 0,143 bar. W ostatnim przypadku (M4H08) wartość spadku ciśnienia ukształtowała się na poziomie 0,149 bar.

Odnosząc się do poprzednich kryteriów, według których kanał M8H08 charakteryzował się najlepszymi rezultatami, w tym przypadku osiągnięto najmniej korzystny wynik. Prowadzi to do wniosku, że w przypadku stosowania tego typu systemu chłodzącego należy zastosować urządzenia zasilające o odpowiedniej wydajności, aby zapobiec powstawaniu zbyt dużych spadków ciśnienia na drodze przepływu.



Rys. 7.20. Pomiar ciśnienia na wejściu i wyjściu z układu badawczego

Analizując wyniki uzyskane podczas realizacji badań doświadczalnych, stwierdzono zbieżny charakter z otrzymanymi w symulacjach. W przypadku kryterium szybkości – najszybszy odbiór ciepła odnotowano dla kanału o ośmiu żebrach i współczynniku wysokości równym 0,8. Obrazuje to precyzyjnie wpływ rozmiaru czynnej powierzchni wymiany ciepła na efektywność chłodzenia. Z drugiej strony, zwiększanie tej powierzchni kanału prowadzi do zwiększenia wartości spadków ciśnienia na drodze przepływu medium chłodzącego. W przypadku badań numerycznych czynnik ten został przedstawiony na drodze wyznaczenia współczynnika tarcia  $f$ , natomiast podczas badań eksperymentalnych dokonano pomiaru ciśnienia na wejściu oraz wyjściu medium do i z analizowanego układu. W obu sytuacjach zwiększanie powierzchni kontaktu cieczy ze ścianką kanału miało negatywny wpływ na charakter przepływu (wzrost oporów).

#### 7.4. Analiza porównawcza oraz optymalizacja procesu chłodzenia

Celem optymalizacji procesu chłodzenia było określenie zależności pomiędzy wymaganym czasem odbioru ciepła od wypraski do jej bezpiecznego uwolnienia z gniazda formującego a grubością ścianki oraz porównanie tego zjawiska dla przypadków chłodzenia konwencjonalnego i nowego systemu. W załączniku 1 – studium przypadku dokonano analizy opłacalności stosowania nowego systemu chłodzącego w zależności od wyżej wspomnianych parametrów. Analizę ekonomiczną wykonano dla przykładowej wypraski z materiałów PA6 i PP, których właściwości przedstawiono w tabeli 7.8.

Wyznaczenie krzywych chłodzenia w zależności od grubości ścianki wypraski przeprowadzono zgodnie z zależnością (7.1) [42, 105]. Obliczeń dokonano dla wybranych tworzyw: PP, PA6 (tabela 7.8). W tym miejscu należy nadmienić, że zależność (7.1) pozwala na oszacowanie przybliżonej wartości czasu potrzebnego na chłodzenia wypraski i podczas kalkulacji konstruktor formy powinien wziąć pod uwagę przekrój ścianki o największej grubości, który prawdopodobnie będzie wymagał najdłuższego czasu na zestalenie. W celach porównawczych zastosowano również wzór (7.2), pozwalający na ogólne (zgrubne) oszacowanie czasu chłodzenia niezależnie od zastosowanego tworzywa:

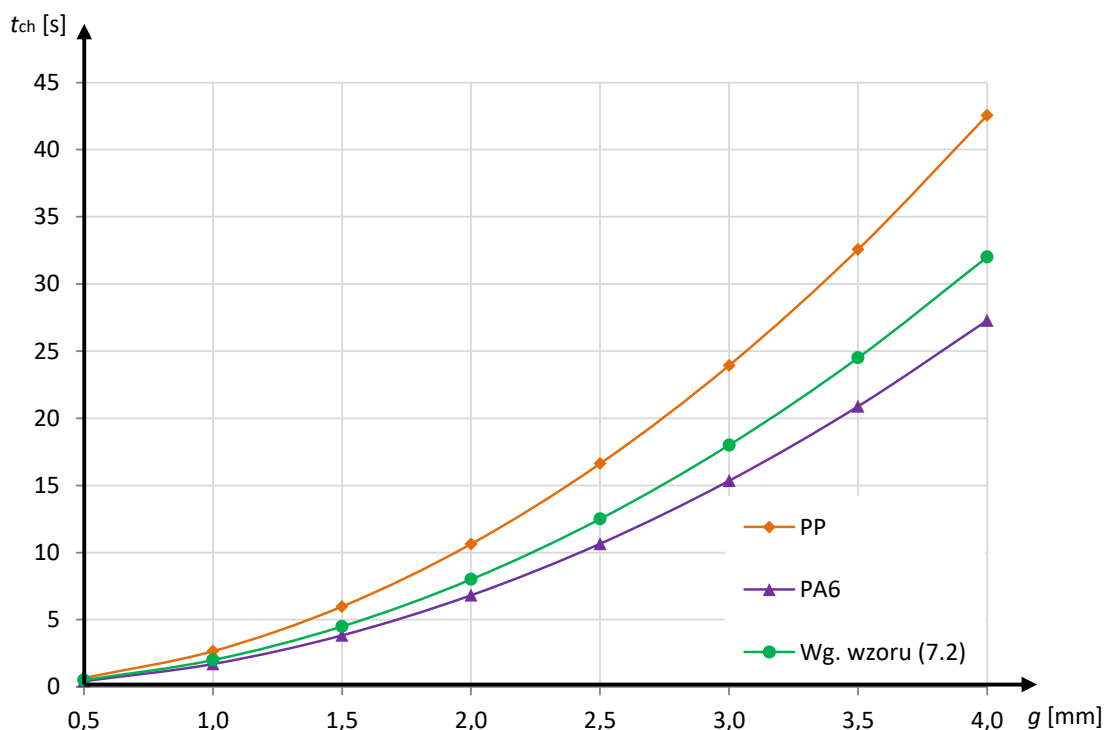
$$t_{\text{ch}} = \frac{g^2}{\pi^2 \cdot \alpha_T} \ln \left( \frac{4}{\pi} \frac{T_{\text{tw}} - T_{\text{ch}}}{T_{\text{uw}} - T_{\text{ch}}} \right), \quad (7.1)$$

$$\tilde{t}_{\text{ch}} = 2 \left[ \frac{\text{s}}{\text{mm}^2} \right] (g [\text{mm}])^2. \quad (7.2)$$

Tabela 7.8. Dane materiałowe wybranych tworzyw sztucznych [42, 110]

Tworzywo	PP	PA6
$T_{tw}$ [°C]	250	240
$T_{ch}$ [°C]	50	90
$T_{uw}$ [°C]	80	90-120
$\alpha_T$ [m <sup>2</sup> /s]	$8.15 \cdot 10^{-8}$	$1.10 \cdot 10^{-7}$

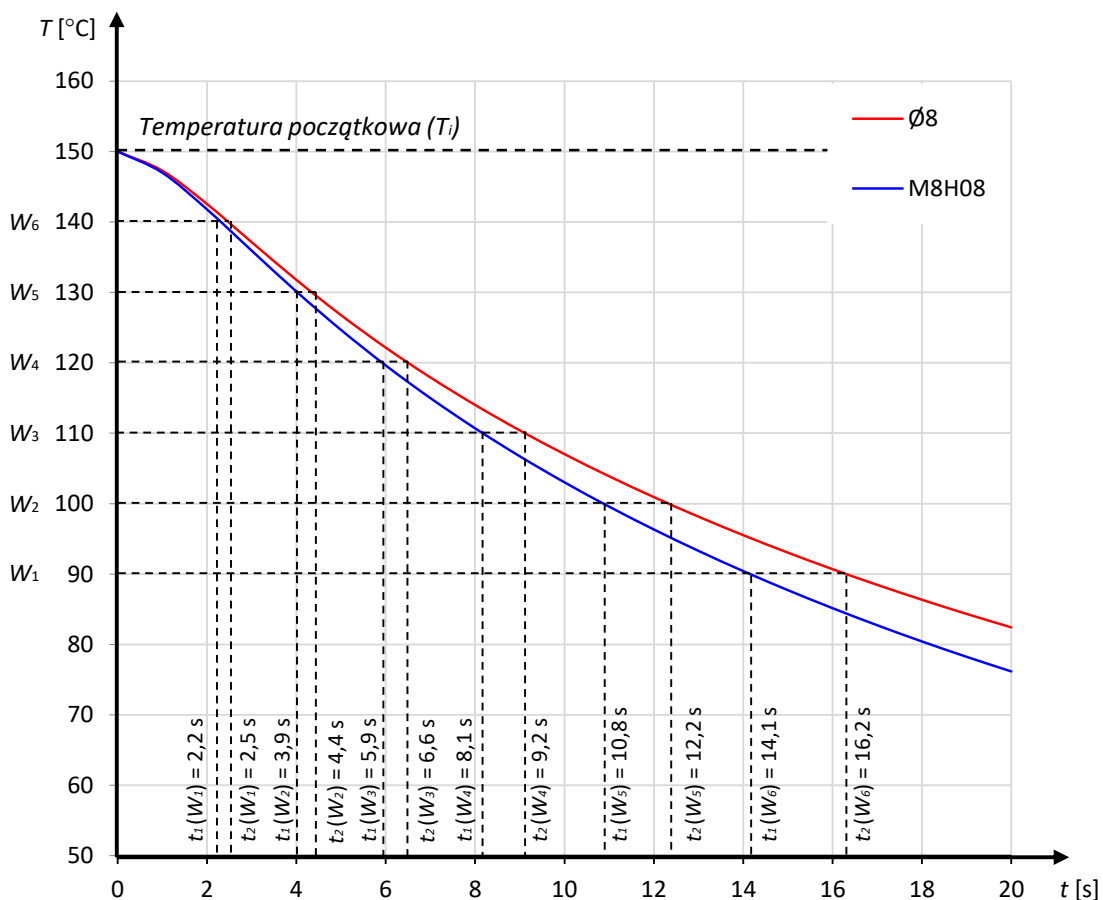
Na podstawie równania (7.1) wyznaczono krzywe chłodzenia dla wybranych tworzyw sztucznych i grubości ścianki wyrobu od 0,5 do 4 mm (rys. 7.21) – typowy zakres wartości dla wyprasek produkowanych w technologii RHCM, z zachowaniem zasad technologiczności produktu. Ponadto, dla porównania, wyznaczono krzywą chłodzenia wg. ogólnego wzoru (7.2), niezależnie od stosowanego tworzywa.



Rys. 7.21. Krzywe czasu chłodzenia dla PP i PA6 w zależności od grubości ścianki wyrobu

Aby porównać długość czasu chłodzenia w zależności od grubości ścianki dla konwencjonalnego układu chłodzenia i proponowanego systemu, przeprowadzono analizę uzyskanych wyników (symulacyjnych i eksperymentalnych). Porównanie zrealizowano dla układu z kanałem uźbrowanym M8H08, który charakteryzował się najkrótszym czasem chłodzenia. Poniższe obliczenia stanowią jedynie porównanie szybkości procesu chłodzenia na podstawie uzyskanych wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych pomiędzy układem konwencjonalnym a proponowanym systemem chłodzenia.

Kryterium porównawczym w tym przypadku był stosunek przyrostu szybkości chłodzenia pomiędzy kanałem konwencjonalnym ( $\emptyset 8$ ) a kanałem żebrowanym (M8H08). Zdefiniowano tego typu współczynnik ze względu na różnice w modelach dla badań symulacyjnych i eksperymentalnych. W rozdziale 5.3 zaznaczono, że badania symulacyjne zostały zrealizowane poprzez zastosowanie modelu wkładki – w celu wstępnego porównania efektywności procesu chłodzenia w zależności od rodzaju stosowanego materiału oraz geometrii kanałów chłodzących. Natomiast badania doświadczalne przeprowadzono dla wybranych geometrii kanałów, na potrzeby których wykonano wybrane elementy układu chłodzenia formy wtryskowej (rozdział 6). Założono, że stosunek przyrostu szybkości zostanie wyznaczony dla zakresu wartości temperatur od  $T_p = 150\text{ }^\circ\text{C}$  do  $T_k = 90\text{ }^\circ\text{C}$ , czyli zmiany temperatury  $\Delta T = 60\text{ }^\circ\text{C}$  (rys. 7.22 dla badań symulacyjnych) ze skokiem  $10\text{ }^\circ\text{C}$ . Zakres wartości temperatury został wybrany tylko do wyznaczenia współczynników umożliwiającą wykonanie analizy zbieżności badań symulacyjnych i eksperymentalnych oraz analizy ekonomicznej, przedstawionej w dalszych krokach.



Rys. 7.22. Czas potrzebny na odbiór ciepła i osiągnięcia temperatury  $90\text{ }^\circ\text{C}$  na powierzchni wkładki (badania symulacyjne)

W przypadku badań symulacyjnych dla kanału  $\varnothing 8$  wartość temperatury na powierzchni wkładki wyniosła  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  po czasie  $t_2 = 16,2\text{ s}$ , natomiast dla kanału uźebrowanego po czasie  $t_1 = 14\text{ s}$ . Pozostałe, pośrednie rezultaty przedstawiono w tabeli 7.9. Stosując zależność (7.3) wyznaczono współczynniki szybkości odbioru ciepła dla kanału M8H08 względem układu konwencjonalnego (dla poszczególnych wartości temperatury, tab. 7.9). Średni współczynnik szybkości odbioru ciepła wyniósł  $Efs_{ch-śr} = 11,73\%$ .

$$Efs_{ch} = \frac{t_2 - t_1}{t_2} \cdot 100\%. \quad (7.3)$$

Tabela 7.9. Rezultaty dla badań symulacyjnych

Kanał		M8H08	$\varnothing 8$	Współczynnik szybkości chłodzenia $Efs_{ch}$ [%]
Oznaczenie	Temp. [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$t_1$ [s]	$t_2$ [s]	
$W_1$	140	2,2	2,5	12,00%
$W_2$	130	3,9	4,4	11,36%
$W_3$	120	5,9	6,6	10,61%
$W_4$	110	8,1	9,2	11,96%
$W_5$	100	10,8	12,2	11,48%
$W_6$	90	14,1	16,2	12,96%
Śr. współczynnik szybkości chłodzenia $Efs_{ch-śr}$ [%]				11,73%

Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone z zastosowaniem zmiennych wartości natężenia przepływu medium chłodzącego przez układ badawczy. Z tego względu obliczenia zgodnie z zależnością (7.4) wykonano dla wszystkich wartości tego parametru – 5, 6, 8 oraz 10 l/min, a rezultaty zawarto w tabeli 7.10. Następnie wyznaczono średnią wartość współczynnika szybkości chłodzenia dla ww. parametrów, która ostatecznie wyniosła  $Efd_{ch-śr} = 13,45\%$ , co w zestawieniu z wynikiem otrzymanym na drodze symulacji komputerowych daje rezultat zbliżony ( $Efs_{ch-śr} = 11,73\%$ ).

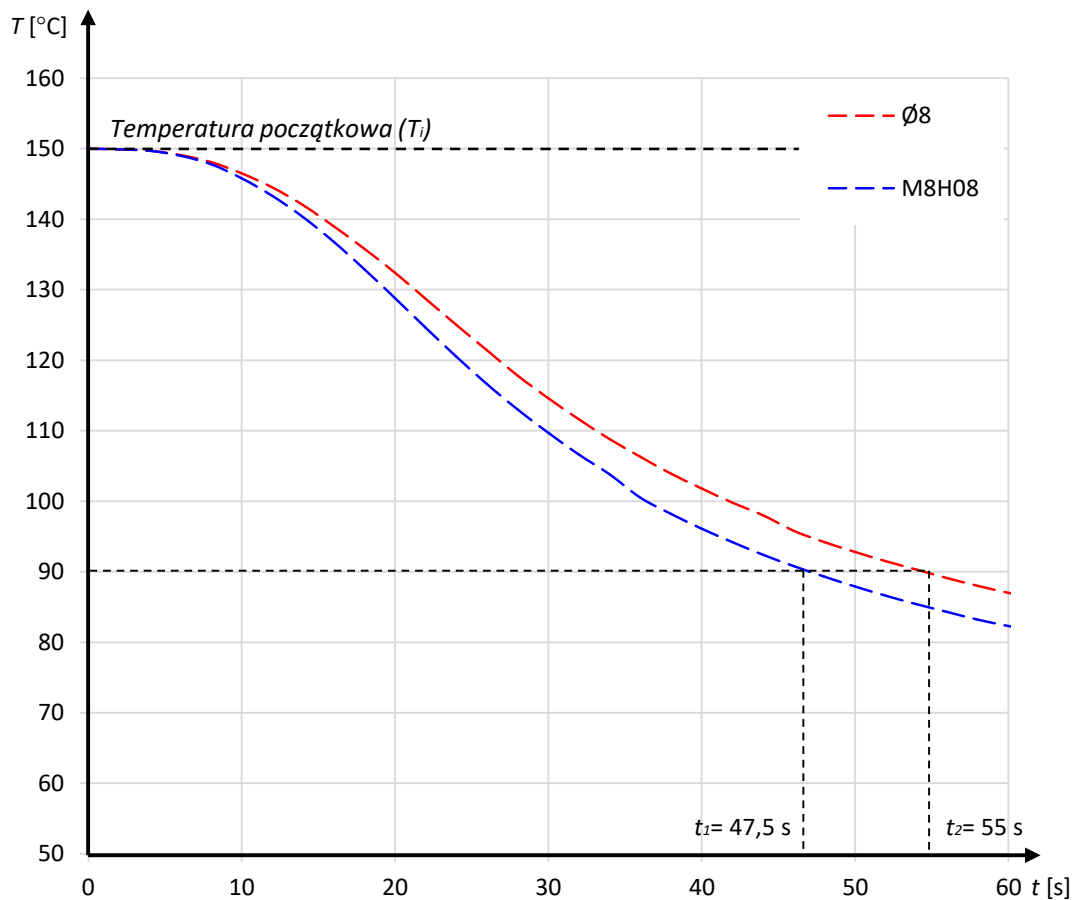
$$Efd_{ch} = \frac{t_2 - t_1}{t_2} \cdot 100\%. \quad (7.4)$$

Ponadto, na rysunku 7.23, jako przykład, przedstawiono krzywe chłodzenia uzyskane podczas badań doświadczalnych dla natężenia przepływu o wartości  $Q = 6\text{ l/min}$ . Można zauważyć, że pomimo różnicy w wartości odcinka czasowego, o czym wcześniej wspomniano, charakter krzywych chłodzenia uzyskanych podczas badań symulacyjnych (rys. 7.22) i eksperymentalnych jest zbliżony. Różnicę stanowią pierwsze sekundy pomiaru, ponieważ w przypadku badań doświadczalnych zaobserwować można zjawisko bezwładności układu wkładka – medium chłodzące – układ pomiarowy (czujniki rezystancyjne). Ciekawym zjawiskiem jest

zależność widoczna w tabeli 7.10 – wraz ze wzrostem wartości natężenia przepływu zmniejsza się procentowy wskaźnik szybkości chłodzenia pomiędzy rozważanymi układami. Prowadzi to do wniosku, że im większa wartość natężenia przepływu, tym mniej istotny staje się kształt kanału chłodzącego.

Tabela 7.10. Rezultaty dla badań doświadczalnych

Natężenie przepływu [l/min]	5	6	8	10
Kanał $\varnothing 8$	59,5	55,0	46,0	39,0
M8H08	51,0	47,5	40,0	34,0
Współczynnik szybkości chłodzenia $Efd_{ch}$ [%]	14,29	13,64	13,04	12,82
Śr. współczynnik szybkości chłodzenia $Efd_{ch-śr}$ [%]	13,45			



Rys. 7.23. Czas potrzebny do osiągnięcia temperatury 90°C na powierzchni układu (badania doświadczalne) dla  $Q=6$  l/min

Na potrzeby analizy ekonomicznej dla nowego systemu chłodzącego, dla wypraski z tworzyw PA6 i PP opracowano krzywą chłodzenia w zależności od grubości ścianki. Przyjęto, że dla chłodzenia konwencjonalnego ( $\varnothing 8$ ) czas potrzebny na odbiór ciepła od wypraski jest zgodny z teoretycznym, wyznaczonym z zależności (7.1). Dla systemu wyposażonego w kanały M8H08 będzie to czas obliczony zgodnie z następującym równaniem:

$$t_{ch-M8H08} = t_{ch-\emptyset 8} - (t_{ch-\emptyset 8} \cdot E f d_{ch-\acute{s}r}). \quad (7.5)$$

Tabele 7.11 oraz 7.12 przedstawiają wyznaczone wartości czasu chłodzenia dla PA6 i PP, w zależności od grubości ścianki, natomiast na rys. 7.24 zaprezentowano omawiane rezultaty graficznie. Wraz ze zwiększaniem grubości ścianki wzrasta różnica pomiędzy wymaganym czasem chłodzenia dla porównywanych układów. Dla wypraski z materiału PA6 o maksymalnej grubości ścianki wynoszącej 4 mm różnica ta wyniosła około 3,6 s natomiast dla wyrobu z PP 5,7 s. Wiąże się to bezpośrednio z zalecanymi wartościami temperatury odformowania wypraski oraz właściwościami rozważanych tworzyw sztucznych (tab. 7.8).

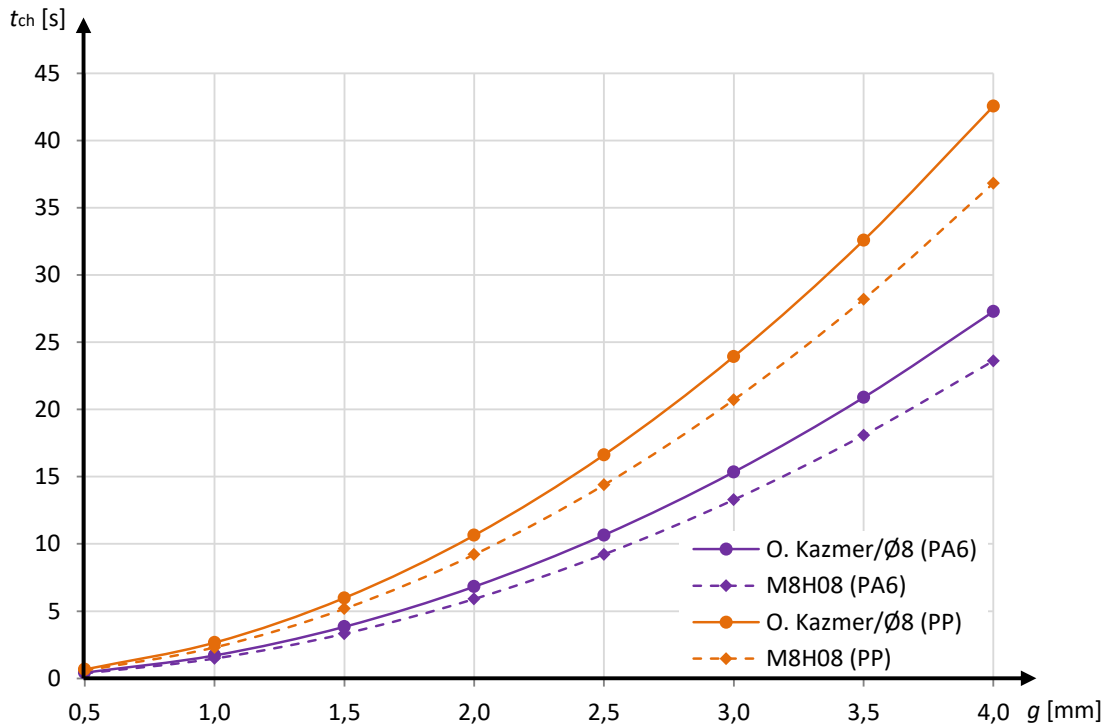
Tabela 7.11. Czas chłodzenia w zależności od maksymalnej grubości ścianki wypraski i systemu chłodzenia dla PA6

Grubość ścianki $g$ [mm]	$t_{ch-\emptyset 8}$ dla PA6 wg (7.1)/ $\emptyset 8$ [s]	$t_{ch-M8H08}$ dla PA6 wg M8H08 [s]
0,50	0,43	0,37
1,00	1,70	1,48
1,50	3,84	3,32
2,00	6,82	5,90
2,50	10,66	9,22
3,00	15,34	13,28
3,50	20,89	18,08
4,00	27,28	23,61

Tabela 7.12. Czas chłodzenia w zależności od maksymalnej grubości ścianki i systemu chłodzenia dla PP

Grubość ścianki $g$ [mm]	$t_{ch-\emptyset 8}$ dla PP wg (7.1)/ $\emptyset 8$ [s]	$t_{ch-M8H08}$ dla PP wg M8H08 [s]
0,50	0,66	0,58
1,00	2,66	2,30
1,50	5,98	5,18
2,00	10,64	9,21
2,50	16,62	14,38
3,00	23,93	20,71
3,50	32,57	28,19
4,00	42,54	36,82





Rys. 7.24. Krzywe czasu chłodzenia dla PA6 i PP w zależności od grubości ścianki wyrobu

Na podstawie otrzymanych rezultatów oraz ich analizy stwierdzono, że znaczący wzrost wydajności chłodzenia zaczyna się w przypadku wyprasek o maksymalnej wartości grubości ścianki 3 mm. W przypadku produktów z cieńszymi ściankami czas chłodzenia pomiędzy układem konwencjonalnym a proponowanym jest zbliżony. Ponadto, nowy układ chłodzenia może znaleźć zastosowanie w formach do produkcji wyrobów z tworzyw, których temperatura odformowania przyjmuje niskie wartości (np. prezentowany podczas rozważań polipropylen). W przypadku chłodzenia form RHCM dla artykułów cienkościennych należy nadal poszukiwać odpowiednich rozwiązań w zakresie ich termostatowania, aby ich funkcjonowanie było ekonomicznie uzasadnione.

W załączniku nr 1 autor niniejszej dysertacji przedstawił studium przypadku pt. „Analiza opłacalności stosowania nowego układu chłodzenia”, w którym przeanalizowano aspekt ekonomiczny produkcji wyprasek z wyżej wymienionych materiałów przy zastosowaniu rozważanych układów chłodzenia. Celem tego zabiegu jest potwierdzenie przedstawionych spostrzeżeń i wniosków.

## 8. Podsumowanie, wnioski oraz kierunki przyszłych badań

Jakość i estetyka wyprasek oraz koszt ich produkcji są ściśle powiązane z właściwym funkcjonowaniem układu chłodzenia formy wtryskowej. Nieprawidłowa kontrola temperatury formy jest główną przyczyną powstawania wielu wad w wypraskach. Właściwie dobrana metoda oraz wykonany projekt układu chłodzenia umożliwiają znaczne skrócenie czasu cyklu wtryskiwania, a tym samym zredukowanie kosztów produkcji. Prawidłowa realizacja wyżej wymienionych zagadnień umożliwia uzyskanie żądanych właściwości produkowanych wyrobów, do których zaliczyć można: małe naprężenia wewnętrzne, dużą wytrzymałość oraz estetykę i dobre własności użytkowe, zachowanie stałej wartości skurczu przetwórczego, a także brak widocznych linii łączenia strugi oraz smug. Proces chłodzenia form wtryskowych stanowi obecnie duże wyzwanie dla przemysłu przetwórstwa tworzyw sztucznych, ponieważ rosnące wymagania jakościowe, dążenie do redukcji czasu cyklu oraz kosztów produkcji powodują konieczność ciągłego rozwoju technologii wtryskiwania pod kątem zagadnień wymiany ciepła w formach wtryskowych.

W ramach dysertacji zaproponowano nowy system chłodzenia form wtryskowych bazujący na kanałach o zwiększonej czynnej powierzchni wymiany ciepła, który zapewni szybkie i równomierne chłodzenie form wtryskowych pracujących w technologii dynamicznych zmian temperatury (RHCM – Rapid Heat Cycle Molding). Skupiono się na opracowaniu sposobu rozwiązania wyboru najkorzystniejszego kształtu przekroju poprzecznego kanału pod kątem szybkości i równomierności odbioru ciepła od nagrzewanych powierzchni oraz kosztów i technologiczności wykonania. W celu rozwiązania przedstawionego problemu zrealizowano następujące zadania:

- przeprowadzono analizę istniejących metod chłodzenia form wtryskowych,
- wykonano analizę wpływu szybkości chłodzenia formy na strukturę wyprasek poprzez zastosowane metody skaningowej kalorymetrii różnicowej (Differential Scanning Calorimetry – DSC),
- dokonano doboru materiału na wkłady chłodzące oraz wykonano analizę właściwości i dobór cieczy chłodzącej,
- opracowano model i przeprowadzono badania symulacyjne nowego układu chłodzenia form,

- opracowano konstrukcję i zrealizowano budowę wybranych elementów formy z nowym układem chłodzenia,
- opracowano konstrukcję i zbudowano stanowisko do badań eksperymentalnych,
- opracowano metodykę i program badań doświadczalnych,
- wykonano badania doświadczalne nowego układu chłodzenia pod kątem szybkości i równomierności działania,
- przeprowadzono analizę wyników badań doświadczalnych i optymalizację parametrów procesu,
- przedyskutowano studium przypadku opłacalności stosowania nowego układu chłodzenia.

Wyniki przeprowadzonych analiz wpływu szybkości chłodzenia form wtryskowych na strukturę wyprasek, wykonanych badań symulacyjnych oraz doświadczalnych, pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- najlepsze pod względem szybkości i równomierności chłodzenia wyniki chłodzenia uzyskano w przypadku zastosowania kanałów z konfiguracją żeber o parametrach  $M=8$  i  $H=0,8$ ,
- najintensywniejsze chłodzenie w przypadku kanałów uźebrowanych występuje w przedziale czasowym od 20 s do 40 s – największą różnicę temperatury pomiędzy kanałem  $\varnothing 8$  a M8H08 odnotowano w 2 s procesu i wyniosła  $6,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,
- stwierdzono, że dla kanałów z 8 żebrami odnotowano skuteczniejszy odbiór ciepła niż dla kanałów z 4 żebrami, które mogą być jednak alternatywą ze względów technologicznych,
- wyznaczone średnie współczynniki szybkości odbioru ciepła dla kanału M8H08 względem układu konwencjonalnego, dla badań symulacyjnych ( $Efs_{\text{ch-sr}}=11,73\%$ ) oraz eksperymentalnych ( $Efd_{\text{ch-sr}}=13,45\%$ ) dowodzą zbieżności otrzymanych rezultatów,
- proponowana metoda znajduje zastosowanie przede wszystkim w formach do produkcji masowej (ponad 2 mln. produkowanych wyrobów; analiza w studium przypadku) oraz produkcji wyrobów o grubości powyżej 3 mm,
- zastosowanie żeber w kanałach wpływa na wzrost oporów przepływu, co skutkuje koniecznością zapewnienia urządzeń zasilających o odpowiedniej wydajności, w celu zapobiegnięcia powstawaniu zbyt dużych spadków ciśnienia na drodze przepływu podczas stosowania tego typu systemu chłodzącego,

- w celu zweryfikowania otrzymanych wyników badań należy zbudować formę wtryskową wyposażoną we wkłady formujące z uźebrowanymi kanałami chłodzącymi i wykonać serię procesu wtryskiwania,
- dalsze prace powinny być ukierunkowane na możliwość zastosowania nanocieczy (cieczy jonowych) w chłodzeniu form wtryskowych.

Proponowany system chłodzenia stanowi istotę zgłoszenia patentowego pt. „Forma wtryskowa zawierająca wkładki chłodzące o zwiększonej aktywnej powierzchni wymiany ciepła” [113], które podobnie jak niniejsza praca zrealizowane zostały w ramach projektu badawczego LIDER/006/143/L-5/13/NCBR/2014 współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. O dużym potencjale wdrożeniowym rozwiązania świadczą zapytania kierowane do Centrum Transferu Technologii Politechniki Poznańskiej przez przedsiębiorstwa przemysłowe specjalizujące się budową form wtryskowych oraz technologią wtryskiwania tworzyw sztucznych.

W pracy esencjonalnie omówiono również tematykę metod nagrzewania form wtryskowych w technologii RHCM, ponieważ istotą przeprowadzonych analiz był etap chłodzenia występujący podczas cyklu wtryskiwania. Porównania układów chłodzenia, konwencjonalnego oraz nowego systemu, dokonano dla przypadku formy pracującej w technologii RHCM, dlatego też czas nagrzewania (temperatura początkowa), a co za tym idzie czas cyklu (pominając etap chłodzenia) były identyczne. Wyżej przedstawione założenia nie oznaczają jednak, że metody nagrzewania form wtryskowych są autorowi nieznane. W ramach projektu LIDER/13/0049/L-9/17/NCBR/2018 pt. „Hybrydowe formy wtryskowe nagrzewane indukcyjnie w sposób selektywny” autor, jako główny wykonawca, realizuje obecnie prace badawcze związane z nagrzewaniem indukcyjnym form wtryskowych. Efektem tych działań są prace [59 – 61, 71], w których przedstawiono wstępne wyniki badań powiązane z tematyką grzania indukcyjnego. Ponadto, w dorobku autora znajdują się również udział w projekcie INNOTECH-K2/IN2/60/183932/NCBR/13 pt. „Indukcyjne formy wtryskowe dla złączy elektro-technicznych i elektronicznych” oraz patent [114], który stanowi forma wtryskowa wyposażona w układ selektywnego nagrzewania indukcyjnego.

Na podstawie rezultatów przedstawionych w studium przypadku, stwierdzono, że proponowany system chłodzenia może znaleźć zastosowanie przede wszystkim w formach przeznaczonych do produkcji wyprasek o grubościach ścianki powyżej 3 mm oraz w przypadku produkcji wyrobów z materiałów, dla których wymagana jest mała wartość temperatury ich

uwolnienia z formy wtryskowej. Dla wyrobów cienkościennych wpływ chłodzenia jest niewystarczający w stosunku do krótkiego czasu cyklu, co powoduje że różnice kosztów procesu w nieznaczny sposób niwelują zwiększone nakłady, konieczne do wyprodukowania narzędzia z nowym system chłodzenia. W przypadku regulacji temperatury form RHCM dla artykułów cienkościennych należy nadal poszukiwać odpowiednich rozwiązań w zakresie chłodzenia, aby ich funkcjonowanie było ekonomicznie uzasadnione.

Podsumowując, zastosowanie proponowanego przez autora systemu chłodzenia zawsze powinno zostać poprzedzone szczegółową analizą efektów jego wdrożenia nie tylko pod kątem czysto technicznych aspektów produkcji konkretnych wyrobów, zastosowanych materiałów (wypraski oraz formy wtryskowej), ale przede wszystkim zasadności jego stosowania ze względów ekonomicznych całego procesu produkcyjnego.

**LITERATURA**

- [1] Andreozzi A., Manca O., Nardini S., Ricci D., Forced convection enhancement in channels with traversal ribs and nanofluids, *Applied Thermal Engineering*, 2016, 98, pp. 1044 – 1053.
- [2] Asadizanjani N., Gao R. X., Fan Z. A., Kazmer D., Viscosity Measurement in Injection Molding Using a Multivariate Sensor, *Proceedings of the ASME/ISCIE 2012 International Symposium on Flexible Automation ISFA2012*, St. Louis, USA.
- [3] Au K. M., Yu K. M., Modeling of multi – connected porous passageway for mould cooling, *Computer-Aided Design*, 2011, 43, pp. 989 – 1000.
- [4] Benitez – Rangel J.P., Trejo – Hernandez M., Morales-Hernandez L.A., Dominguez – Gonzalez A., Improvement of the injection mold process by using vibration through a mold accessory, *Materials and Manufacturing Processes*, 2010, 25(7), pp. 577 – 580.
- [5] Bergles A. E., *Handbook of Heat Transfer*, 1998, McGraw-Hill, New York, USA, 3rd edition.
- [6] Bergles A. E., The implications and challenges of enhanced heat transfer for the chemical process industries, *Chemical Engineering Research and Design*, 2001, 79(4), pp. 437 – 444.
- [7] Białasz S., Klepka T., Simulation of the medical syringe injection moulding process, 2019, *MATEC Web Conferences*, 252, pp. 05016: 1 – 6.
- [8] Bociąga E., Wpływ temperatury formy wtryskowej i prędkości wtryskiwania na wybrane właściwości wyprasek polietylenowych, *Polimery*, 2000, 11 – 12(45), pp. 830 – 836.
- [9] Chang P. C., Sheng J. H., Simulation of infrared rapid surface heating for injection molding, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, 49, pp. 3846 – 3854.
- [10] Charun H., Efektywność intensyfikacji konwekcyjnej wymiany ciepła w kanałach rurowych z turbulizatorami, *COW 12*, 2005, pp. 14 – 20.
- [11] Chen S.C., Jong W. R., Chang J. A., Dynamic mold surface temperature control using induction heating and its effects on the surface appearance of weld line, *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, 101, pp. 1174 – 1180.
- [12] Chen S. C., Jong W. R., Chang Y. J., Chang J. A., Cin J. C., Rapid mold temperature variation for assisting the micro injection of high aspect ratio micro-feature parts using induction heating technology, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16(9), pp. 1783 – 1791.
- [13] Chen S. C., Minh P. S., Chang J. A., Huang S. W., Huang C. H., Mold temperature control using high-frequency proximity effect induced heating, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2011, 39(2), pp. 216 – 223.
- [14] Chen S. C., Pham S. M., Chang J. A., Gas-assisted mold temperature control for improving the quality of injection molded parts with fiber additives, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2011, 38, pp. 304 – 312.
- [15] Chen S. C., Chien R. D., Lin S. H., Lin M. C., Chang J. A., Feasibility evaluation of gas-assisted heating for mold surface temperature control during injection molding process, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2009, 36(8), pp. 806 – 812.
- [16] Chen W. C., Fu G. L., Tai P. H., Deng W. J., Proces parameter optimization for MIMO plastic injection molding via soft computing, *Expert Systems with Applications*, 2009, 36 (2), pp. 1114 – 1122.

- [17] Chen W. L., Guo Z., Chen C. K., A numerical study on the flow over a novel tube for heat-transfer enhancement with a linear Eddy-viscosity model, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 47, pp. 3431 – 3439.
- [18] Combrinck J., Van As B., Booysen G., De Beer D., Cost-effectiveness of Direct Metal Laser Sintered Maraging Steel Inserts for Plastic Injection Moulding Process, *South African Journal of Industrial Engineering*, 2019, 30(3) Special Edition, pp. 52 – 62.
- [19] Crema L., Sorgato M., Lucchetta G., Thermal optimization of deterministic porous mold inserts for rapid heat cycle molding, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 109, pp. 462 – 469.
- [20] Crema L., Sorgato M., Zanini F., Carmignato S., Lucchetta G., Experimental analysis of mechanical properties and microstructure of long glass fiber reinforced polypropylene processed by rapid heat cycle injection molding, *Composites Part A* 107, 2018, pp. 366-373.
- [21] Czyżewski P., Sykutera D., Bieliński M., Troszyński A., The impact of laser radiation on polypropylene molded pieces depending on their Surface conditions, *Polymers*, 2019, 11, pp. 1660: 1 – 16.
- [22] Dimla E., Miani F., Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools, *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 164 – 165, pp. 1294 – 1300.
- [23] Di Lorenzo, M.L.; Silvestre, C. Non – isothermal crystallization of polymers, *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 1999, 24, pp. 917–950.
- [24] Dirker J., Meyer J., Kohlmeyer B., Local heat transfer coefficients at the inlet of an annular flow passage, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 113, pp. 268 – 280.
- [25] Dobrzyńska – Mizera, M.; Dutkiewicz, M.; Sterzyński, T.; Di Lorenzo, M.L. Polypropylene-based composites containing sorbitol – based nucleating agent and siloxane-silsesquioxane resin, *Journal of Applied Polymer Science*, 2016, 133, pp. 43476.
- [26] Drobny J.G., *Handbook of Thermoplastic Elastomers*, 2014, Elsevier, USA.
- [27] Fabbri G., Optimum profiles for asymmetrical longitudinal fins in cylindrical ducts, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, 42, pp. 511 – 523.
- [28] Feng J., Yang W., Zhang R. Y., Wu J. J., Wang L., Zhang C. L., Yang M. B., effect of viscosity ratio on the crystalline morphologies and mechanical property of multi – melt multi – injection molded parts, *Polymer – Plastics Technology and Engineering*, 2014, 53, pp. 1272 – 1282.
- [29] Fenot M., Dorignac E., Giret A., Lalizel G., Convective heat transfer in the entry region of an annular channel with slotted rotating inner cylinder, *Applied Thermal Engineering*, 2013, 54, pp. 345 – 358.
- [30] Fisher J.M., *Handbook of molded part shrinkage and warpage*, Norwich, USA: Plastic Design Library, William Andrew Inc. 2003.
- [31] Furumoto T., Ueda T., Amino T., Hosokawa A., A study of internal face finishing of the cooling channel in injection mold with free abrasive grains, *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211, pp. 1742 – 1748.
- [32] Furumoto T., Ueda T., Amino T., Kusunoki D., Hosokawa A., Tanaka R., Finishing performance of cooling channel with face protuberance inside the molding die, *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212, pp. 2154 – 2160.
- [33] Gahleitner M., Grein C., Kheirandish S., Wolfschwenger J., Nucleation of polypropylene homo- and copolymers, *International Polymer Processing*, 2011, 26, pp. 2 – 20.

- [34] Grabski J.K., Kołodziej J.A., Application of the method of fundamental solutions and the radial basis functions for laminar flow and heat transfer in internally corrugated tubes, *Computers & Mathematics with Applications*, 2018, 75(4), pp. 1413 – 1433.
- [35] Grünberger T., Domröse R., Direct Metal Laser Sintering: Identification of process phenomena by optical in-process monitoring, *Laser Technik Journal*, 2015, 1, pp. 45 – 48.
- [36] Hagge J. K., Junkhan G. H., Experimental study of a method of mechanical augmentation of convective heat transfer in air, *Tech. Rep. HTL3, ISU – ERI – Ames – 74158*, 1975, Iowa State University, Amsterdam.
- [37] Hassan H., Regnier N., Le Bot C., Defaye G., 3D study of cooling system effect on the heat transfer during polymer injection molding, *International Journal of Thermal Sciences*, 2010, 49, pp. 161 – 169.
- [38] Hisham A. Maddah Polypropylene as a Promising Plastic: A Review. *American Journal of Polymer Science*, 2016, 6, pp. 1 – 11.
- [39] Hou J., Zhao G., Wang G., Dong G., Xu J., A novel gas-assisted microcellular injection molding method for preparing lightweight foams with superior surface appearance and enhanced mechanical performance, 2017, 127, pp. 115 – 125.
- [40] Jansen K. M. B., Heat transfer in injection moulding systems with insulation layers and heating elements, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1995, 38(2), pp. 309 – 316.
- [41] Johnston S., McCready C., Hazen D., VanDerwalker D., Kazmer D., On-line multivariate optimization of injection molding, *Polymer Engineering Science*, 2015, 55(12), pp. 2743 – 2750.
- [42] Kazmer D. O., *Injection Mold Design Engineering*, Monachium: Hanser, 2007.
- [43] Kim D. K., Thermal optimization of internally finned tube with variable fin thickness, *Applied Thermal Engineering*, 2016, 102, pp. 1250– 1261.
- [44] Kitayama S., Ishizuki R., Takano M., Optimization of mold temperature profile and process parameters for weld line reduction and short cycle time in rapid heat cycle molding, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 103, pp. 1735 – 1744.
- [45] Kitayama S., Tamada K., Takano M., Aiba S., Numerical and experimental investigation on process parameters optimization in plastic injection molding for weldlines reduction and clamping force minimization, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97, pp. 2087 – 2098.
- [46] Kołodziej J.A., Grabski J.K., Application of the method of fundamental solutions and the radial basis functions for viscous laminar flow in wavy channel, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2015, 57, pp. 58 – 65.
- [47] *Kunststoffe International*, Do Not Forget the Cooling – Measures for More Energy Efficiency in Thin-Wall Injection Molding, 2015, 6 – 7, pp. 43 – 46.
- [48] Kurt M., Kaynak Y., Kamber O. S., Influence of molding conditions on the shrinkage and roundness of injection molded parts, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 46, pp. 571 – 578.
- [49] Li J., Li T., Peng X., Liu F., Zhou H., Jiang S., Optimal design of heating system for electrical rapid heat cycle mold based on multi-objective optimization, multiple-attribute decision-making, and conformal design theory, *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(8), pp. 1-11.
- [50] Li X. P., Zhao G. Q., Guan Y. J., Ma M. X., Optimal design of heating channels for rapid heating cycle injection mold based on response Surface and genetic algorithm, *Materials and Design*, 2009, 30(10), pp. 4317 – 4323.



- [51] Lee N.C., Practical Guide to Blow Moulding, Rapra Technology Limited, 2006.
- [52] Lucchetta G., Fiorotto M., Bariani P. F., Influence of rapid mold temperature variation on surface topography replication and appearance of injection-molded parts, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2012, 61, pp. 539 – 542.
- [53] Lucchetta G., Fiorotto M., Influence of rapid mold temperature variation on the appearance of injection – molded parts, *Strojnicki Vestnik*, 2013, 59(11), pp. 683 – 688.
- [54] Lucchetta G., Influence of process parameters on the weld lines formation in rapid heat cycle molding, *AIP Conference Proceedings*, 2011, 1353, pp. 797 – 802.
- [55] Mahdi Q., Numerical investigation of forced convection of nano fluid flow in horizontal U-longitudinal finned tube heat exchanger, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, 95, pp. 1 – 7.
- [56] Mrozek K., Chen S. C., Selective induction heating to eliminate the fundamental defects of thin-walled moldings used in electrical industry, *Journal of Applied Polymer Science*, 2017, 134(26), pp. 44992: 1 – 17.
- [57] Mrozek K., Mierzwiczak M., Application of the method of fundamental solutions to analysis of the fully developed laminar flow and heat transfer. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 53(3), pp. 505 – 518.
- [58] Mrozek K., Staniek R., Szostak M., Research on injection mold cooling system efficiency and uniformity for electrical connector casing, *Machines Technologies Materials International Virtual Journal*, 2013, 12, pp. 53 – 56.
- [59] Mrozek K., Poszwa P., Muszyński P., Numerical study on the influence of Rapid Temperature Cycling (RTC) on polymer flow at maximum injection pressure, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2020, 77(9), pp. 821 – 839.
- [60] Mrozek K., Muszyński P., Poszwa P., Influence of induction heating of injection molds on reliability of electrical connectors, *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 2020, 22 (4), pp. 676 – 683.
- [61] Mrozek K., Muszyński P., Poszwa P., Application of Magnetic Concentrator for Improvement in Rapid Temperature Cycling Technology, *Polymers*, 2021, 13 (1), pp. 91: 1 – 17.
- [62] Muszyński P., Poszwa P., Brząk P., Numerical study of rapid cooling of injection molds, *International Conference Proceedings of International Conference on Manufacturing Engineering and Materials ICMEM 2018, LNME*, 2019, pp. 539 – 547.
- [63] Muszyński P., A Simulation Study on Finned Cooling Channels in Injection Mold, *Proceedings of ASME 2017 IMECE Vol. 8: Heat Transfer and Thermal Engineering: ASME*, 2017, Tampa, Florida, USA – s. 71312-1-71312-7.
- [64] Muszyński P., Mrozek K., Mierzwiczak M., Simulation research on a new effective cooling system of injection mold, *Proceedings of SEMC 2016: The Sixth International Conference on Structural Engineering, Mechanics and computation*, 2016, Kapsztad, pp. 1816 – 1822.
- [65] Muszyński P., Mrozek K., Poszwa P., Wybrane metody chłodzenia form wtryskowych, *Mechanik nr 8-9*, 2016, pp. 996 – 1000.
- [66] Nian S. C., Wu C. Y., Huang M. S., Warpage control of thin-walled injection molding using local mold temperatures, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2015, 61, pp. 10 – 110.
- [67] Nesis E. I., Shatalov A. F., Karmatskii N. P., Dependence of the heat transfer coefficient on the vibration amplitude and frequency of a vertical thin heater, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1994, 67, 1/2, pp. 696 – 698.

- [68] COV00073619 Optimized Mold Temperature Control, materiały firmy Covestro Deutschland AG, Edition 2016 – 03.
- [69] Postawa P., Chłodzenie konformalne form wtryskowych, *Teka Kom. Bud. Ekspł. Masz. Elektrotech. Bud. T. II*, 2008, pp. 129 – 132.
- [70] Postawa P., Stachowiak T., Grzesiczak D., On – line temperature recording in a multi cooling channel injection molding tool, *Polimery*, 2015, 60(5), pp. 351 – 355.
- [71] Poszwa P., Muszyński P., Mrozek K., Numerical study on the influence of RHCM on the basic parameters of filling the cavity, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2020, 30, pp. 94 – 104.
- [72] Poszwa P., Muszyński P., Mrozek K., Szostak M., Wpływ rodzaju cieczy chłodzącej oraz parametrów przepływu na skuteczność chłodzenia form wtryskowych, *Polimery*, 63(3), pp. 224 – 233.
- [73] Pepliński K., Bieliński M., Prototype modular inserts to boost the cooling of mold cavities in polymer processing, *Polimery*, 2015, 60, pp. 747 – 750.
- [74] Perez C. J., Alvarez V. A., Overall Crystallization Behavior of Polypropylene – Clay Nanocomposites; Effect of Clay Content and Polymer/Clay Compatibility on the Bulk Crystallization and Spherulitic Growth, *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, 114, pp. 3248 – 3260.
- [75] Rosato D.V., Rosato M.G., *Injection Molding Handbook*, Springer Science+Business Media, Nowy Jork 2000.
- [76] Sachs E., Wylonis E., Allen S., Cima M., Guo H., Production of injection molding tooling with conformal cooling channels using the three dimensional printing process, *Polymer Engineering and Science*, 2000, 40(5), pp. 1232 – 1247
- [77] Sanchez R., Martinez A., Mercado D., Carbonel A., Aisa J., Rapid heating injection moulding: An experimental surface temperature study, *Polymer Testing*, 2020, 93, pp. 106298: 1 – 7.
- [78] Santhanam N., Chiang H. H., Himasekhar K., Tuschak P., Wang K. K., Postmolding and load-induced deformation analysis of plastic parts in the injection molding process, *Advances in Polymer Technology*, 1991, 11(2), pp. 77 – 89.
- [79] Senkova S., Senkov O., Miracle D., Cryogenic and elevated temperature strengths of an Al – Zn – Mg – Cu alloy modified with Sc and Zr, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2006, 37(12), pp. 3569 – 3575.
- [80] Shayfull Z., Safian S., Azlan M. Z., Rozaimi M. S., Ahmad F. M., Milled Groove Square Shape Conformal Cooling Channels in Injection Molding Process, *Materials and Manufacturing Processes*, 2013, 28(8), pp. 884 – 891.
- [81] Sikora R., *Przetwórstwo tworzyw wielocząsteczkowych*, 1993, Warszawa: Wydawnictwo Edukacyjne Zofii Dobkowskiej.
- [82] Siddique M., Khaled A.-R.A., Abdulhafiz N.I., Boukhary A.Y., Recent advances in heat transfer enhancements: a review report, *International Journal of Chemical Engineering*, 2010, vol. 2010, pp. 106461: p. 1 – 28.
- [83] Soliman H. M., Chau T. S., Trupp A. C., Analysis of laminar heat transfer in internally finned tubes with uniform outside wall temperature, *Journal of Heat Transfer*, 1980, 102, pp. 598 – 604.
- [84] Sterzyński T., Processing and property improvement in isotactic polypropylene by heterogeneous nucleation, *Polimery*, 2000, 45(11 – 12), pp. 786 – 791.
- [85] Soshi M., Ring J., Young C., Oda Y., Mori M., Innovative grid molding and cooling using an additive and subtractive hybrid CNC machine tool, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2017, 66, pp. 401 – 404.

- [86] Sykutera D., Czyżewski P., Kościuszko A., Szewczykowski, P. Wajer Ł., Bieliński M., Monitoring of the injection and holding phases by using a modular injection mold, *Journal of Polymer Engineering*, 2018, 38, pp. 63 – 71.
- [87] Tien W. K., Yeh R.-H., Hsiao J. C., Numerical analysis of laminar flow and heat transfer in internally finned tubes, *Heat Transfer Engineering*, 2012, 33(11), pp. 957 – 971.
- [88] Vanaki Sh. M., Ganesan P., Mohammed H. A., Numerical study of convective heat transfer of nanofluids: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 54, pp. 1212 – 1239.
- [89] Vanaki Sh. M., Mohammed H. A., Numerical study of nanofluid forced convection flow in channels using different shaped transverse ribs, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2015, 67, pp. 176 – 188.
- [90] Varga J.,  $\beta$ -modification of isotactic polypropylene: Preparation, structure, processing, properties, and application, *Journal of Macromolecular Science – Part B: Physics*, 2002, 41(4 – 6), pp. 1121 – 1171.
- [91] Wang G., Hui Y., Zhang L., Zhao G., Research on temperature and pressure responses in the rapid mold heating and cooling method based on annular cooling channels and electric heating, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 116, pp. 1192 – 1203.
- [92] Wang G., Zhao G., Wang X., Development and evaluation of a new rapid mold heating and cooling method for rapid heat cycle molding, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 78, pp. 99 – 111.
- [93] Wang W., Zhao G., Li H., Guan Y., Analysis of thermal cycling efficiency and optimal design of heating/cooling systems for rapid heat cycle injection molding process, *Materials and Design*, 2010, 31, pp. 3426 – 3441.
- [94] Wang G., Zhao G., Li H., Guan Y., Research of thermal response simulation and mold structure optimization for rapid heat cycle molding processes, respectively, with steam heating and electric heating, *Materials and Design*, 2010, 31, pp. 382 – 395.
- [95] Wang G., Zhao G., Guan Y., Development and experimental study of a new electric-heating rapid thermal response mold for RHCM process, *Advanced Science Letters*, 2011, 4(6-7), pp. 2082-2086.
- [96] Wang Q. W., Lin M., Zeng M., Effect of lateral fin profiles on turbulent flow and heat transfer performance of internally finned tubes, *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29, pp. 3006 – 3013.
- [97] Wang W., Zhao G., Guan Y., Wu X., Hui Y., Effect of rapid heating cycle injection mold temperature on crystal structures, morphology of polypropylene and surface quality of plastic parts, *Journal of Polymer Research*, 2015, 22(84), pp. 1 – 11.
- [98] Wang X., Li Z., Gu J., Ruan S., Shen C., Wang X., Reducing service stress of the injection-molded polycarbonate window by optimizing mold construction and product structure, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86, pp. 1691 – 1704.
- [99] Webb R. L., Kim N. H., 2005, *Principles of Enhanced Heat Transfer*, Taylor and Francis, New York, USA, 2nd edition.
- [100] Weigand B., *Analytical Methods for Heat Transfer and Fluid Flow Problems*, Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2015, Berlin.
- [101] Xiao C. L., Huang H. X., Development of a rapid thermal cycling molding with electric heating and water impingement cooling for injection molding applications, *Applied Thermal Engineering*, 2014, 73(1), pp. 712 – 722.

- [102] Xie L., Ziegmann G., Influence of processing parameters on micro injection molded weld line mechanical properties of PP (Polypropylene), *Microsystem Technology*, 2009, 15, pp. 1427 – 1435.
- [103] Xu X., Sachs E., Allen S., Production of injection molding tooling with conformal cooling channels using the three dimensional printing process, *Polymer Engineering and Science*, 2001, 41(7), pp. 1265 – 1279.
- [104] Yang C., Li W., Nakayama A., Convective heat transfer of nanofluids in a concentric annulus, *International Journal of Thermal Sciences*, 2013, 71, pp. 249 – 257.
- [105] Zawistowski H., Frenkler D., *Konstrukcja form wtryskowych do tworzyw termoplastycznych*, 1984, Warszawa: WNT.
- [106] Zawistowski H., *Założenia projektowe dokumentacji technicznej wyprasek z tworzyw sztucznych*, *Mechanik*, 2010, 84(4), pp. 250 – 255.
- [107] Zienkiewicz O. C., Taylor R.L., *The Finite Element Method*, 5-ed, 2000, Oxford, Butterworth-Heinemann.
- [108] Zhang J., Wang J., Lin J., Guo Q., Chen K., Ma L., Multiobjective optimization of injection molding process parameters based on Opt LHD, EBFNN, and MOPSO, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 85, pp. 2857 – 2872.
- [109] Zimmermann T., *Auslegung und Konstruktion von Spritzgusswerkzeugen mit induktiver Temperierung*, Bericht Nr. 35, 2011, IKFF, Stuttgart.
- [110] Dokumentacja programu Autodesk Moldflow®.
- [111] Dokumentacja programu ANSYS Fluent 14.5.

### Patenty

- [112] Muszyński P., Mierzwiczak M., Stanowisko do badań układów chłodzenia form wtryskowych, nr 234993 z dnia 12.12.2019
- [113] Muszyński P., Mierzwiczak M., Mrozek K., Poszwa P., Forma wtryskowa zawierająca wkładki chłodzące o zwiększonej aktywnej powierzchni wymiany ciepła, zgłoszenie patentowe nr 424235
- [114] Mrozek K., Muszyński P., Forma wtryskowa, nr 228607 z dnia 30.06.2015
- [115] Mrozek K., Szostak M., Wkładka chłodząca element formujący wypraskę w formie wtryskowej, nr 219177 z dnia 05.08.2014

### Źródła internetowe

- [116] [www.ampcometal.com](http://www.ampcometal.com) (dostęp: 02.02.2020)
- [117] [www.dc.engr.scu.edu](http://www.dc.engr.scu.edu) (dostęp: 15.05.2020)
- [118] [www.ebmia.pl](http://www.ebmia.pl) (dostęp: 20.06.2019)
- [119] [www.engineeringtoolbox.com](http://www.engineeringtoolbox.com) (18.06.2019)
- [120] [www.fado.info](http://www.fado.info) (dostęp: 01.02.2020)
- [121] [www.flir.com](http://www.flir.com) (dostęp: 06.06.2019)
- [122] [www.gleich.de](http://www.gleich.de) (dostęp: 02.02.2020)
- [123] [www.hasco.com](http://www.hasco.com) (dostęp: 02.02.2020)
- [124] [www.injectionmoldingplastic.com](http://www.injectionmoldingplastic.com) (dostęp: 02.02.2020)
- [125] [www.lyondellbasell.com](http://www.lyondellbasell.com) (dostęp: 15.05.2020)
- [126] [www.macplas.it](http://www.macplas.it) (dostęp: 15.05.2020)
- [127] [www.meusburger.com](http://www.meusburger.com) (dostęp: 02.02.2020)
- [128] [www.moldex3D.com](http://www.moldex3D.com) (dostęp: 15.05.2020)
- [129] [www.morektech.com.pl](http://www.morektech.com.pl) (dostęp: 05.06.2020)

- [130] [www.mouldingtoolequipment.com](http://www.mouldingtoolequipment.com) (dostęp 15.05.2020)
- [131] [www.netzsch-thermal-analysis.com](http://www.netzsch-thermal-analysis.com) (dostęp: 14.04.2020)
- [132] [www.nexpcb.com](http://www.nexpcb.com) (dostęp: 02.02.2020)
- [133] [www.oberon.pl](http://www.oberon.pl) (dostęp: 20.06.2019)
- [134] [www.plasticseurope.com](http://www.plasticseurope.com) (dostęp: 25.05.2019)
- [135] [www.proplastica.pl](http://www.proplastica.pl) (dostęp: 01.02.2020)
- [136] [www.rooctool.com](http://www.rooctool.com) (dostęp: 15.11.2018)
- [137] [www.ssab.com](http://www.ssab.com) (dostęp: 20.06.2019)
- [138] [www.sodick.pl](http://www.sodick.pl) (dostęp: 20.06.2019)
- [139] [www.termoaparatura.com.pl](http://www.termoaparatura.com.pl) (dostęp: 25.05.2018)
- [140] [www.totalmateria.com](http://www.totalmateria.com) (dostęp: 05.03.2020)
- [141] [www.tworzywa.pwr.wroc.pl](http://www.tworzywa.pwr.wroc.pl) (dostęp: 20.05.2019)
- [142] [www.wadim.com.pl](http://www.wadim.com.pl) (dostęp: 20.06.2019)
- [143] [www.wittmann-group.com](http://www.wittmann-group.com) (dostęp: 05.05.2019)



## Załącznik 1. Studium przypadku – Analiza opłacalności stosowania nowego układu chłodzenia

### Wykaz oznaczeń

$K_w$  – jednostkowy koszt produkcji wypraski [€]

$K_{f/w}$  – zamortyzowany koszt formy i jej utrzymania na 1 sztukę wypraski [€]

$K_{m/w}$  – koszt materiału na 1 sztukę wypraski [€]

$K_{p/w}$  – koszt procesu na 1 sztukę wypraski [€]

$f_w$  – procent produkcji wyprasek dopuszczonych przez kontrolę jakości [€]

$K_f$  – koszt wyprodukowania formy wtryskowej [€]

$f_u$  – współczynnik konserwacji i utrzymania formy wtryskowej

$n_w$  – zakładana wielkość produkcji [szt.]

$V_w$  – objętość wtrysku [ $\text{cm}^3$ ]

$\rho_m$  – gęstość tworzywa sztucznego [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

$\kappa_m$  – koszt tworzywa sztucznego [€/kg]

$f_s$  – współczynnik strat tworzywa sztucznego

$t_c$  – czas cyklu wtryskiwania [s]

$R_w$  – stawka roboczogodziny wtryskarki (z uwzględnieniem czasu osobowego) [€]

$n_g$  – liczba gniazd formujących

$f_{ce}$  – współczynnik efektywności cyklu (zależny od rodzaju produkcji)

$F_z$  – siła zwarcia wtryskarki [ton]

$f_m$  – współczynnik możliwości technicznych wtryskarki

$L_w$  – wymiar podłużny wypraski [m]

$S_w$  – wymiar poprzeczny wypraski [m]

$L_w \times S_w$  – powierzchni rzutu wypraski na płaszczyznę stołu [ $\text{m}^2$ ]

Na podstawie wyznaczonych danych autor niniejszej dysertacji podjął się zadania oszacowania kosztów produkcji wybranego wyrobu w zależności od jego maksymalnej grubości ścianki i zastosowanego systemu chłodzenia – konwencjonalnego oraz proponowanego, na bazie kanału uźebrowanego M8H08. W tym celu konieczne było wyznaczenie kosztów jednostkowych wypraski  $K_w$ , zgodnie z równaniem (9.1), na który składają się: zamortyzowany koszt formy i jej utrzymania w przeliczeniu na 1 sztukę ( $K_{f/w}$ ), koszt materiału na 1 sztukę ( $K_{m/w}$ ), koszt procesu na 1 sztukę ( $K_{p/w}$ ). Suma powyższych elementów podzielona przez współczynnik produktów dopuszczonych do sprzedaży przez kontrolę jakości ( $f_w$ ) stanowi koszt jednostkowy wypraski. W rozważanym przypadku, ponieważ autor posiada doświadczenie w obszarze konstrukcji form wtryskowych do produkcji wyprasek technicznych wykorzystywanych w przemyśle elektronicznym i elektrotechnicznym, założono wysokie wymagania jakościowe. Dobrany współczynnik  $f_w$  wyniósł 0,98 (dla liczby cykli 1 000 000).

Tabela 9.1. Współczynnik artykułów dopuszczonych do sprzedaży przez kontrolę jakości ( $f_w$ ) [42]

Liczba cykli	Niskie wymagania jakościowe	Wysokie wymagania jakościowe
10 000	0,95	0,9
100 000	0,98	0,95
1 000 000	0,99	<b>0,98</b>

$$K_w = \frac{K_{f/w} + K_{m/w} + K_{p/w}}{f_w}. \quad (9.1)$$

Zamortyzowany koszt formy i jej utrzymania w skali roku został wyznaczony z zależności (9.2). Koszt produkcji form z chłodzeniem konwencjonalnym oraz nowym systemem chłodzenia oszacowano na podstawie doświadczenia oraz wiedzy praktycznej autora, zdobytych w zakładach przemysłowych zajmujących się ich wytwarzaniem. Podczas kalkulacji przyjęto następujące koszty: projektu, technologii, materiałów, roboczogodzin obrabiarek oraz operatorów, roboczogodzin ślusarzy, normalistów, dostaw oraz koszty prób (na wtryskarkach) formy przed dopuszczeniem jej do produkcji. Dla przeprowadzonej analizy założono, że wielkość produkcji wynosi 0,5 mln sztuk, forma wtryskowa jest dwugniazdowa, układ wlewowy zimno – kanałowy, wszystkie elementy formujące zostały wykonane ze stali narzędziowej 1.2343 (WCL), natomiast korpus ze stali 1.1730 (C45U). Wcześniej odnotowano, że materiałami poddanymi analizie są poliamid (PA6) oraz polipropylen (PP). Z tego względu współczynnik eksploatacji form  $f_u$  wyniósł 2 (tab. 9.3). Na potrzeby wykonania kalkulacji założono, że kanały uźebrowane umieszczono w newralgicznych miejscach formy (w okolicach gniazd formują-



ych) i stanowią one 30% całkowitej długości wszystkich kanałów chłodzących (konwencjonalnych kanałów wierconych).

Dla powyższych założeń koszt formy z chłodzeniem konwencjonalnym zawarł się w kwocie 25 000 € natomiast z proponowanym układem chłodzenia 28 800 €. Do oszacowania kosztów ww. form przyjęto następujące stawki:

- koszty opracowania konstrukcji i technologii – 3000 €
- koszty materiału – circa 3000 €,
- koszty obróbki na obrabiarkach konwencjonalnych – 25 €/h,
- koszty obróbki na obrabiarkach CNC – 40 €/h,
- koszty obróbki na maszynach EDM/WEDM – 40 €/h,
- koszty prac ślusarskich i montażu formy – 45 €/h,
- koszty prób na wtryskarkach – 40 €/h.

W koszt wykonania formy wliczono również potrójną pętlę optymalizacji narzędzia, ponieważ proces montażu zalicza się do precyzyjnych prac ślusarskich, które nierzadko muszą być powtarzane kilkakrotnie podczas uruchamiania formy (spasowanie elementów, kontrola wszystkich powierzchni zamykających itp.).

$$K_{f/w} = \frac{K_f}{n_w} \cdot f_u \quad (9.2)$$

Tabela 9.2. Współczynnik eksploatacji formy wtryskowej,  $f_u$  [42]

Materiały	Tworzywa o małej lepkości, bez wypełniaczy	Tworzywa o dużej lepkości lub z wypełniaczami	Tworzywa o dużej lepkości z wypełniaczami w postaci włókien
Materiały miękkie (aluminium, stal miękka)	3	10	20
Standardowe stale na formy (np. 1.2311)	2	5	10
Stale narzędziowe i utwardzane (np. 1.2343)	2	2	3

W kolejnym kroku z równania (9.3) wyznaczono koszt materiału na jedną sztukę wypraski ( $K_{m/w}$ ). Dane potrzebne do oszacowania tej składowej przedstawiono w tabeli 9.3 (właściwości tworzywa, parametry procesu). Współczynnik strat materiału  $f_s$  został dobrany z tabeli 9.4, dla układu wlewowego zimno – kanałowego z wlewką przeznaczonym na przemięt do ponownego wykorzystania podczas procesu wtrysku.

$$K_{m/w} = V_w \cdot \rho_m \cdot \kappa_m \cdot f_s \quad (9.3)$$

Tabela 9.3. Dane materiałowe wybranych tworzyw sztucznych,  $f_u$  [42]

Parametr	Jednostka	PA6	PP
Objętość wtrysku, $V_m$	[m <sup>3</sup> ]	$5,25 \cdot 10^{-6}$	$5,25 \cdot 10^{-6}$
Gęstość tworzywa sztucznego, $\rho_m$	[kg/m <sup>3</sup> ]	1153	939
Koszt tworzywa sztucznego, $\kappa_m$	[€/kg]	4,02	1,43

Tabela 9.4. Współczynnik strat tworzywa sztucznego,  $f_s$  [42]

Typ konstrukcji układu doprowadzającego	Współczynnik strat układu doprowadzającego, $f_s$
Układ zimno-kanałowy	1,25
Układ zimno-kanałowy z wlewką przeznaczonym na przemiał	1,08
Układ gorąco-kanałowy z krótkimi kanałami doprowadzającymi	1,05
Układ gorąco-kanałowy z długimi kanałami doprowadzającymi	1,02

Ostatnim elementem składowym niezbędnym do kalkulacji kosztu jednostkowego produktu jest koszt procesu ( $K_{p/w}$ ), który definiuje się zgodnie z równaniem (9.4). W celu oszacowania kosztu jednostkowego w konstrukcji formy wtryskowej założono dwa gniazda formujące ( $n_g$ ).

$$K_{p/w} = \frac{t_c}{n_g} \cdot \frac{R_w}{3600 \text{ s/h}}. \quad (9.4)$$

Zapis (9.5) umożliwia obliczenie czasu cyklu wtryskiwania w sposób zgrubny, bazując przede wszystkim na maksymalnej grubości ścianki wytwarzanego produktu. Wychodząc z założenia, że wcześniej precyzyjniej oszacowano wymagany czas chłodzenia z zależności (7.1) oraz (7.2), które można zestawić w sposób przedstawiony równaniem (9.6), zdefiniowano wzór pozwalający na obliczenie czasu cyklu dla układu konwencjonalnego (9.7) oraz nowego systemu chłodzenia (9.8), uwzględniający przytoczone wytyczne:

$$t_c = 4 \left[ \frac{\text{s}}{\text{mm}^2} \right] \cdot (g[\text{mm}])^2 \cdot f_{ce}, \quad (9.5)$$

$$t_{ch} \cong \tilde{t}_{ch}, \quad (9.6)$$

$$t_{\text{ctot-}\emptyset 8} = 2 \cdot g^2 \cdot (2 \cdot f_{ce} - 1) + \frac{g^2}{\pi^2 \cdot a} \ln \left( \frac{4 T_{tw} - T_{ch}}{\pi T_{uw} - T_{ch}} \right), \quad (9.7)$$

$$t_{\text{ctot-M8H08}} = 2 \cdot g^2 \cdot (2 \cdot f_{ce} - 1) + \frac{g^2}{\pi^2 \cdot a} \ln \left( \frac{4 T_{tw} - T_{ch}}{\pi T_{uw} - T_{ch}} \right) \cdot (1 - E_{\text{ch-sr}}). \quad (9.8)$$

Z tabeli 9.5 dobrano współczynnik efektywności cyklu produkcyjnego ( $f_{ce}$ ) dla układu zimno – kanałowego w cyklu w automatycznym.

Tabela 9.5. Współczynnik efektywności cyklu produkcyjnego,  $f_{ce}$  [42]

Typ konstrukcji układu doprowadzającego oraz operacje dodatkowe	Układ zimno-kanalowy	Układ gorąco-kanalowy
Cykl półautomatyczny, z operatorem	2,5	3,0
Cykl półautomatyczny, grawitacyjne uwalnianie wyprasek/ robot pobierający wypraski	1,5	2,0
Cykl w pełni automatyczny	1,0	1,5

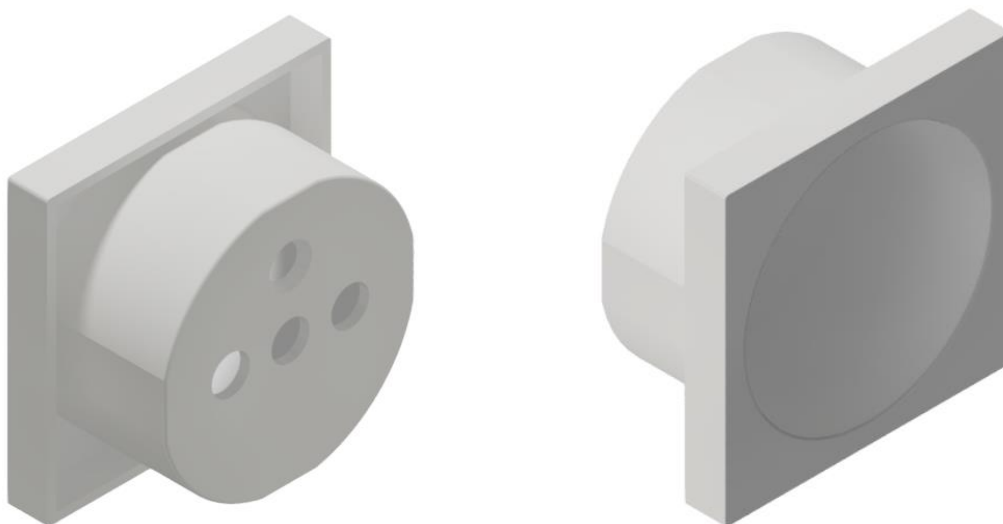
W celu wyznaczenia stawki roboczogodziny wtryskarki,  $R_w$  (z uwzględnieniem czasu osobowego operatora/technologa wtrysku) zastosowano równanie:

$$R_w = [47,0 + 0,073 \cdot F_z - 4,7 \ln(F_z)] \cdot f_m \quad (9.9)$$

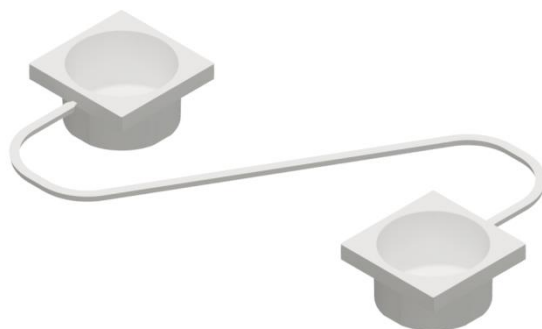
Wymaganą siłę zwarcia formy ( $F_z$ ) wyznaczono z zależności (9.10):

$$F_z = 75 \cdot 10^6 [\text{Pa}] \cdot (n_g \cdot L_w \cdot S_w [\text{m}^2]) \cdot \frac{[\text{mTon}]}{9800 [\text{N}]} \quad (9.10)$$

gdzie należało uwzględnić powierzchnię rzutu wypraski i wlewka na płaszczyznę stołu -  $L_w \times S_w$ . Wypraska poddana rozważaniom została przedstawiona na rysunku 9.1, natomiast rysunek 9.2 ilustruje rzut wypraski (2 gniazda) wraz z wlewkiem. Współczynnik możliwości technicznych wtryskarki obliczono zgodnie z danymi zawartymi w tabeli 9.6, dla wtryskarki z napędem elektrycznym, wyposażonej w ramię robota pobierającego wypraski ( $f_m = 1,15$ ).



Rys. 9.1. Analizowana wypraska – obudowa gniazda elektrycznego (bez ramki)



Rys. 9.2. Układ wlewowy analizowanego przypadku

Tabela 9.6. Współczynnik możliwości technicznych wtryskarki,  $f_m$  [42]

Typ wtryskarki oraz wymagania pracy	Współczynnik $f_m$
Wtryskarki z napędem hydraulicznym starego typu (produkowane przed 1985 rokiem)	0,8
Wtryskarki z napędem hydraulicznym lub elektrycznym starszego typu (produkowane przed 1998)	1,0
Współczesne wtryskarki z napędem elektrycznym	1,1
Ramię pobierające wyroby/ transporter	+ 0,05
Kontrola temperatury wtrysku (wtrysk gorąco-kanalowy)	+ 0,05
Wtrysk wspomagany gazem	+ 0,1
Kontrola kompresji wtrysku	+ 0,1
Wtrysk dwu-komponentowy	+ 1,0
Wtrysk trzy-komponentowy	+ 1,4

Na podstawie przedstawionych powyżej zależności oraz przyjętych założeń wyznaczono koszt jednostkowy wypraski w zależności od grubości ścianki (tabela 9.7 – wypraski z PA6 oraz tabela 9.8 – wypraski z PP). Największy wpływ na wartość tego czynnika mają koszty produkcji formy wtryskowej oraz procesu. Dokonując porównania tych dwóch elementów, koszt produkcji formy z układem konwencjonalnym będzie mniejszy niż formy wyposażonej w nowy układ chłodzenia (wartości wymienione wcześniej) natomiast w przypadku kosztów procesu, z uwagi na skrócenie czasu chłodzenia, wystąpi sytuacja odwrotna.

Tabela 9.7. Koszt jednostkowy wypraski  $K_w$  (€)

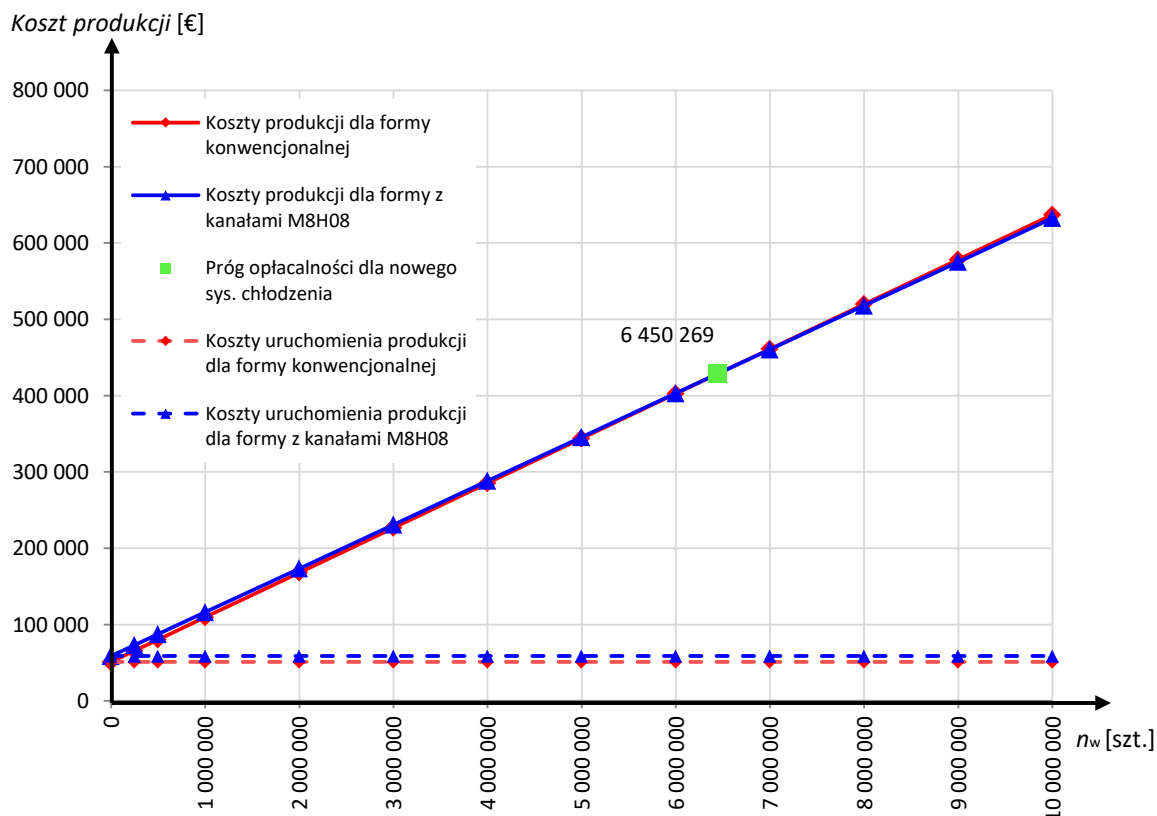
Koszt jednostkowy wypraski $K_w$ (€) z tworzywa sztucznego PA6		
Max. grubość ścianki, $g$ [mm]	Chłodzenie konwencjonalne	Nowy system chłodzenia
1	0,1606	0,1749
2	0,2058	0,2165
3	0,3030	0,3077
4	0,4390	0,4352

Tabela 9.8. Koszt jednostkowy wypraski  $K_w$  (€)

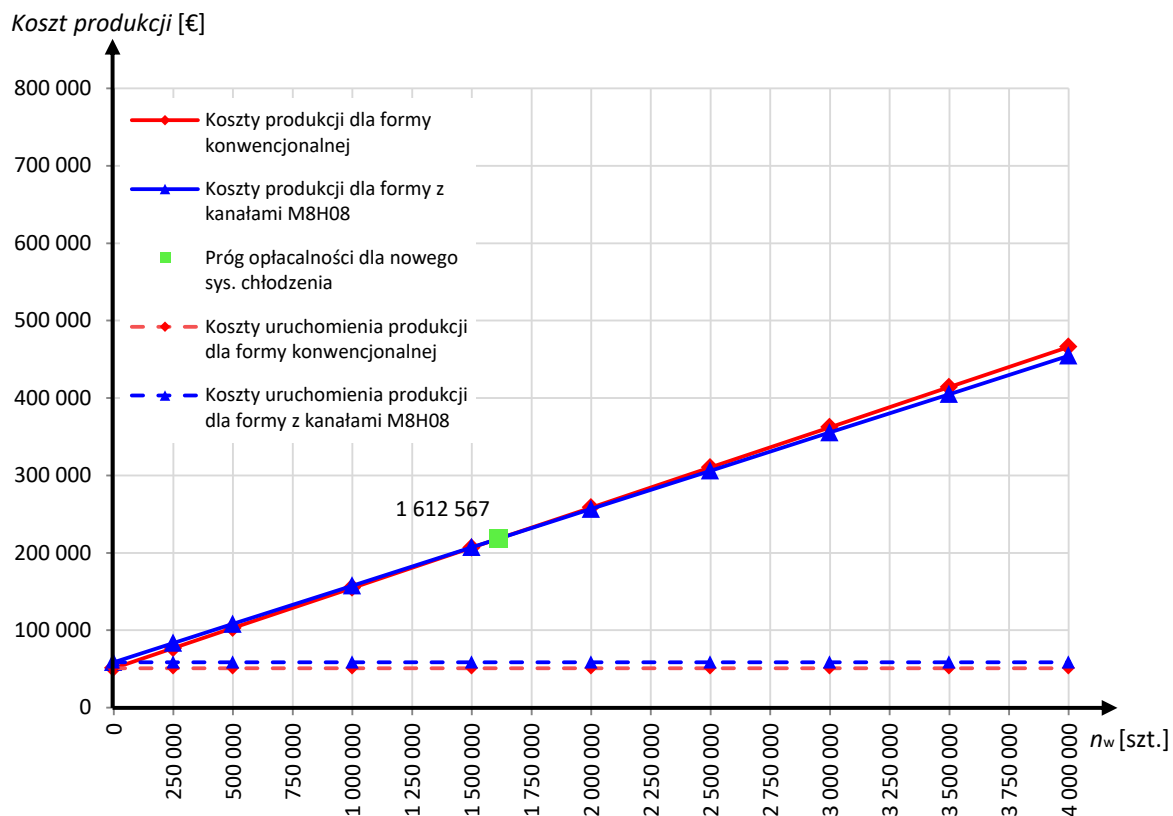
Koszt jednostkowy wypraski $K_w$ (€) z tworzywa sztucznego PP		
Max. grubość ścianki, $g$ [mm]	Chłodzenie konwencjonalne	Nowy system chłodzenia
1	0,1471	0,1608
2	0,2073	0,2153
3	0,3295	0,3281
4	0,5005	0,4860

Na rysunkach 9.3 – 9.10 zaprezentowano wykresy kosztów produkcji wyprasek w zależności od maksymalnej grubości ścianki, zastosowanego systemu chłodzenia, materiału oraz liczby produkowanych wyrobów. Na wykresach umieszczono punkt przełamania krzywych kosztów dla chłodzenia konwencjonalnego i nowego systemu chłodzenia, który określa próg opłacalności stosowania proponowanego przez autora rozwiązania.

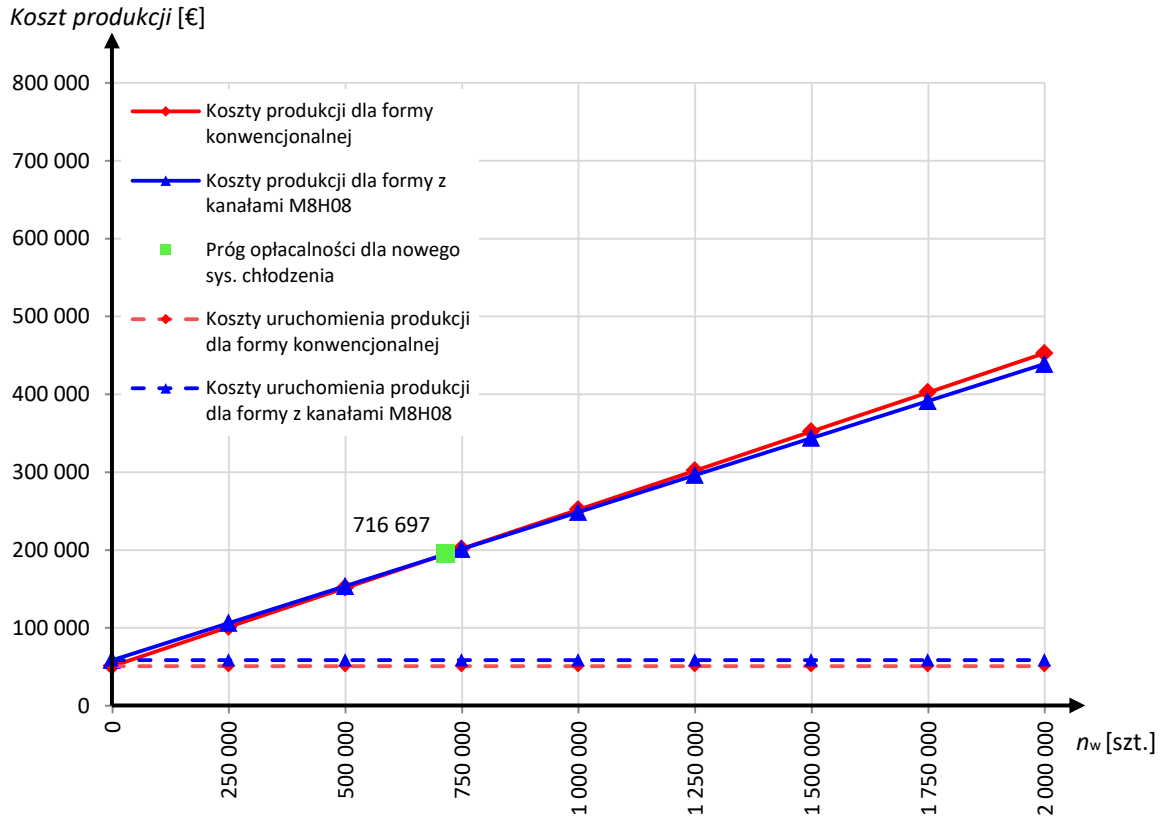
Dla wyrobu o maksymalnej grubości ścianki 1 mm punkt ten osiągnięto dopiero przy ponad 6,45 mln sztuk dla wyrobów z PA6 oraz ponad 4,13 mln dla artykułów produkowanych z polipropylenu. W kolejnych przypadkach było to odpowiednio 1 612 567 szt. (PA6) oraz 1 034 054 (PP) dla grubości ścianki 2 mm, 716 697 (PA6) oraz 459 579 dla grubości ścianki 3 mm. Najmniejszą wartość progu opłacalności stosowania nowego systemu chłodzącego, zarówno dla poliamidu jak i polipropylenu, uzyskano w przypadku kalkulacji dla wyrobów z maksymalną grubością ścianki wynoszącą 4 mm (odpowiednio 403 142 i 258 513 sztuk). Zestawienie uzyskanych rezultatów przedstawiono na wykresie słupkowym (rys. 9.11). Wartości te wynikają z faktu, że wraz ze zwiększaniem grubości ścianki wyrobów, zwiększa się wartość różnicy czasu chłodzenia pomiędzy porównywanymi układami (w funkcji kwadratowej), co ilustruje również rys. 7.24. Ma to znaczący wpływ na wartość kosztów procesu, które przy wydłużaniu czasu cyklu działają na korzyść nowego systemu chłodzenia – znaczna redukcja czasu cyklu powoduje „wypłaszczenie” kosztów produkcji i obniża próg opłacalności dla proponowanego układu. Stąd, najmniejszą różnicę kosztów jednostkowych wypraski odnotowano dla przypadku  $g = 4$  mm (tabele 9.7, 9.8). Ponadto, w przypadku tworzyw, dla których wartość temperatury uwolnienia wypraski z formy jest dużo mniejsza niż temperatura wtrysku (np. rozważany polipropylen), nowy system chłodzenia w znaczny sposób wpłynie na obniżenie kosztów procesu.



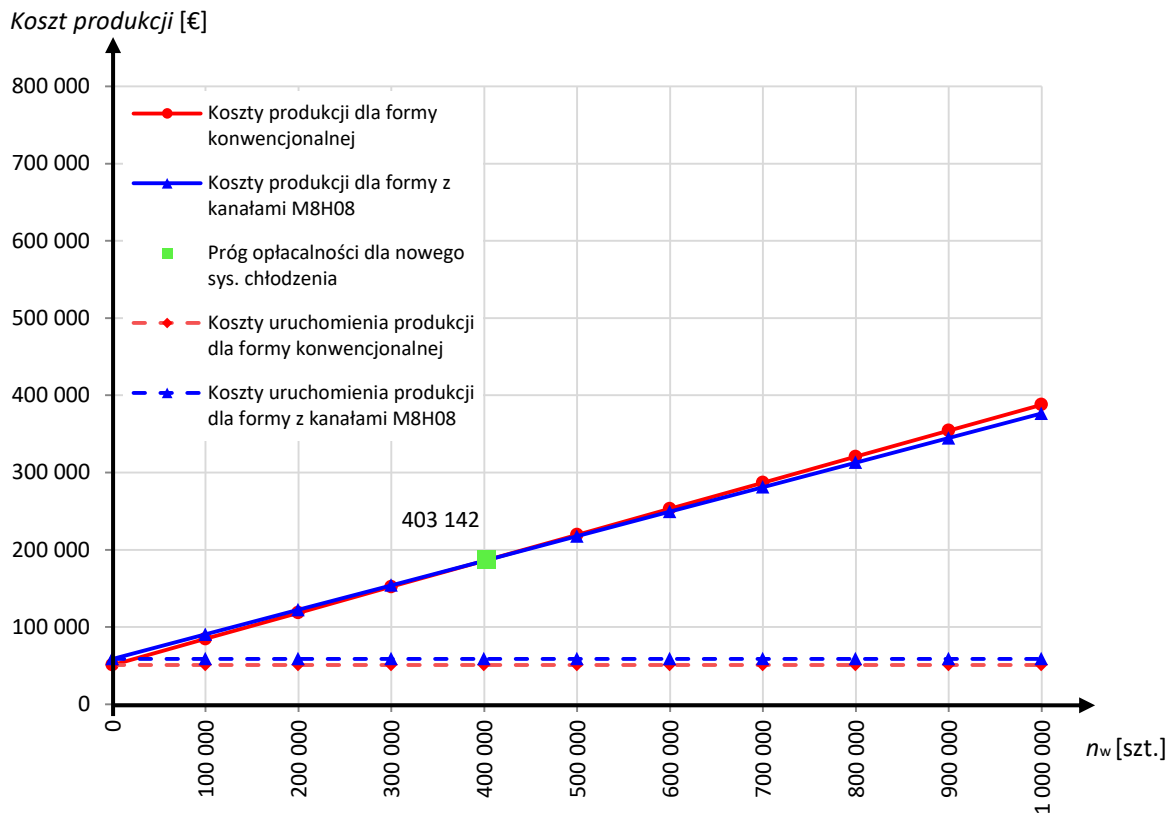
Rys. 9.3. Koszty produkcji wypraski z PA6 o maksymalnej grubości ścianki 1 mm w zależności od zastosowanego systemu chłodzenia



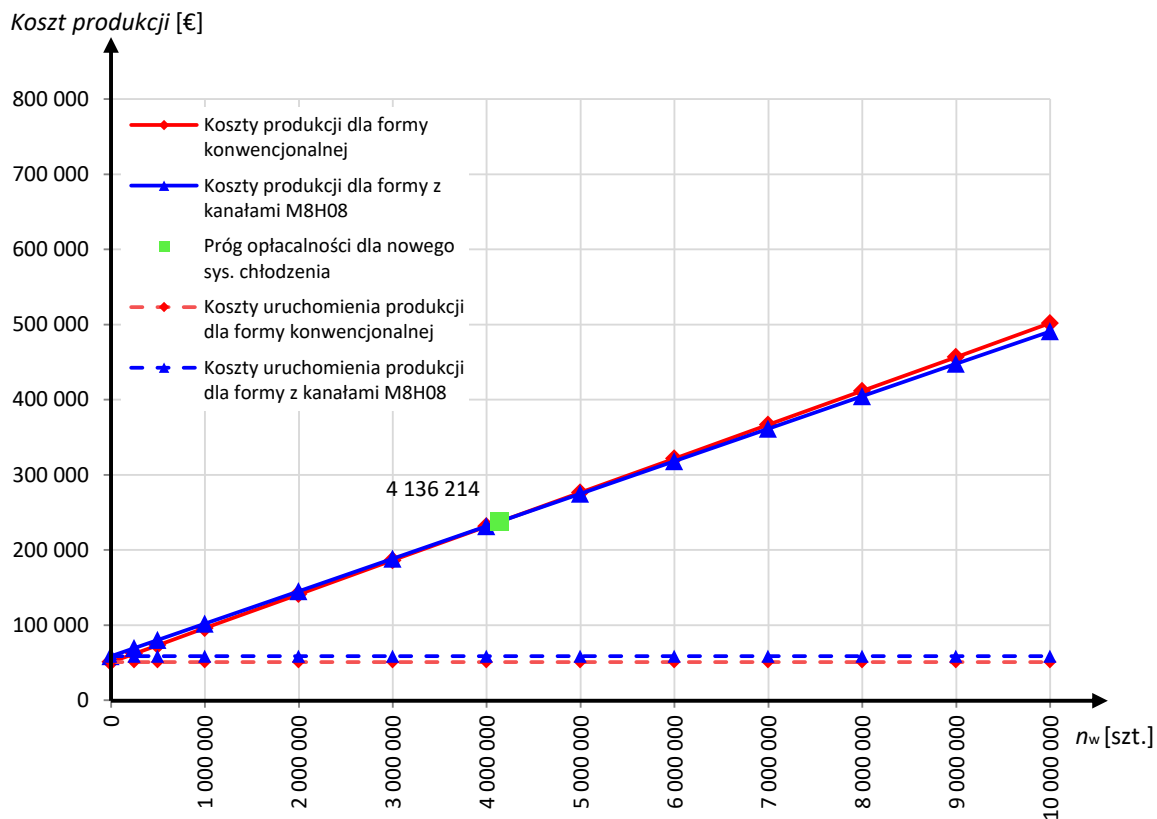
Rys. 9.4. Koszty produkcji wypraski z PA6 o maksymalnej grubości ścianki 2 mm w zależności od zastosowanego systemu chłodzenia



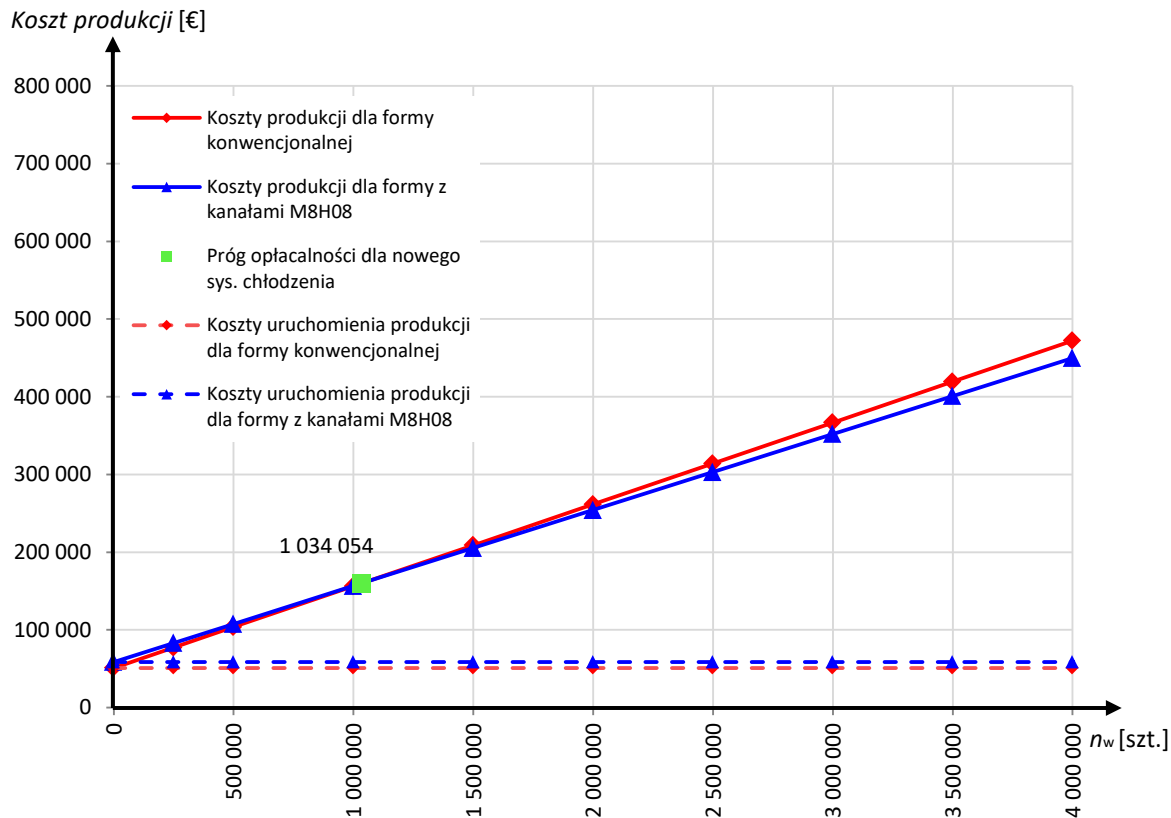
Rys. 9.5. Koszty produkcji wypraski z PA6 o maksymalnej grubości ścianki 3 mm w zależności od zastosowanego systemu chłodzenia



Rys. 9.6. Koszty produkcji wypraski z PA6 o maksymalnej grubości ścianki 4 mm w zależności od zastosowanego systemu chłodzenia

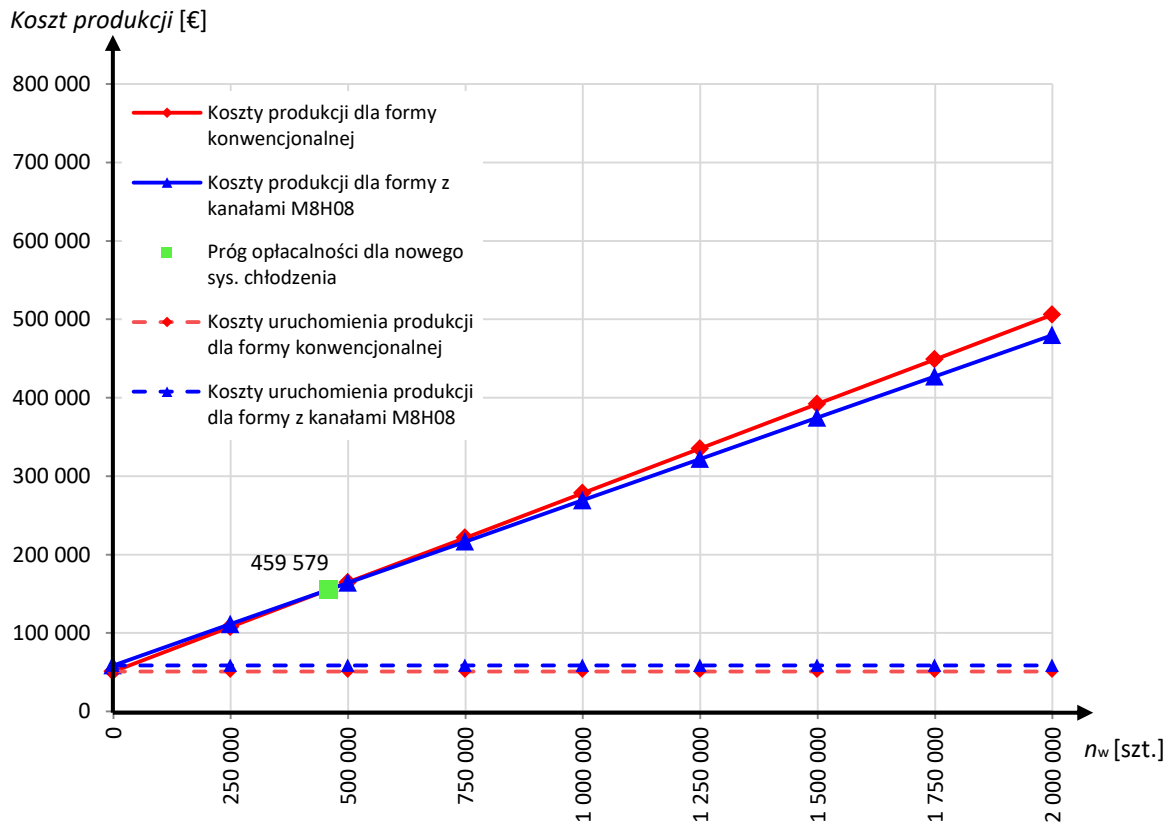


Rys. 9.7. Koszt produkcji wypraski z PP o maksymalnej grubości ścianki 1 mm w zależności od zastosowanego systemu chłodzenia

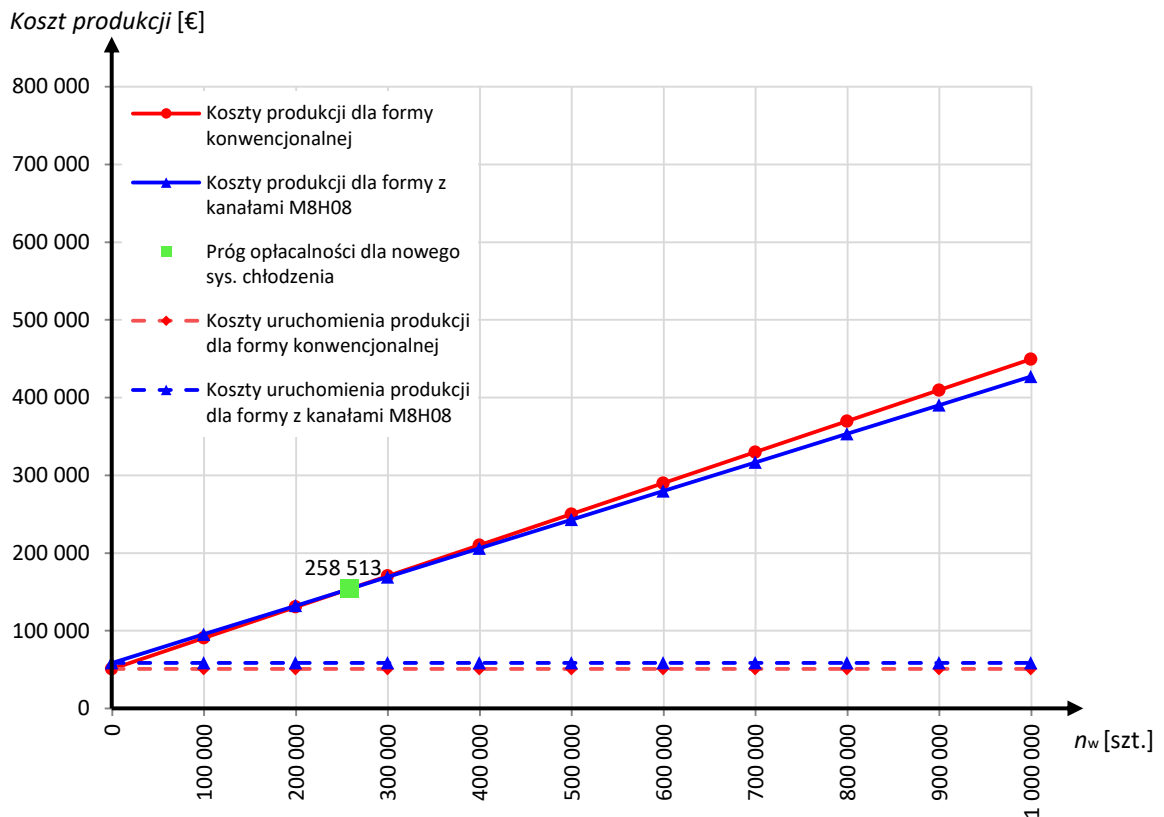


Rys. 9.8. Koszt produkcji wypraski z PP o maksymalnej grubości ścianki 2 mm w zależności od zastosowanego systemu chłodzenia

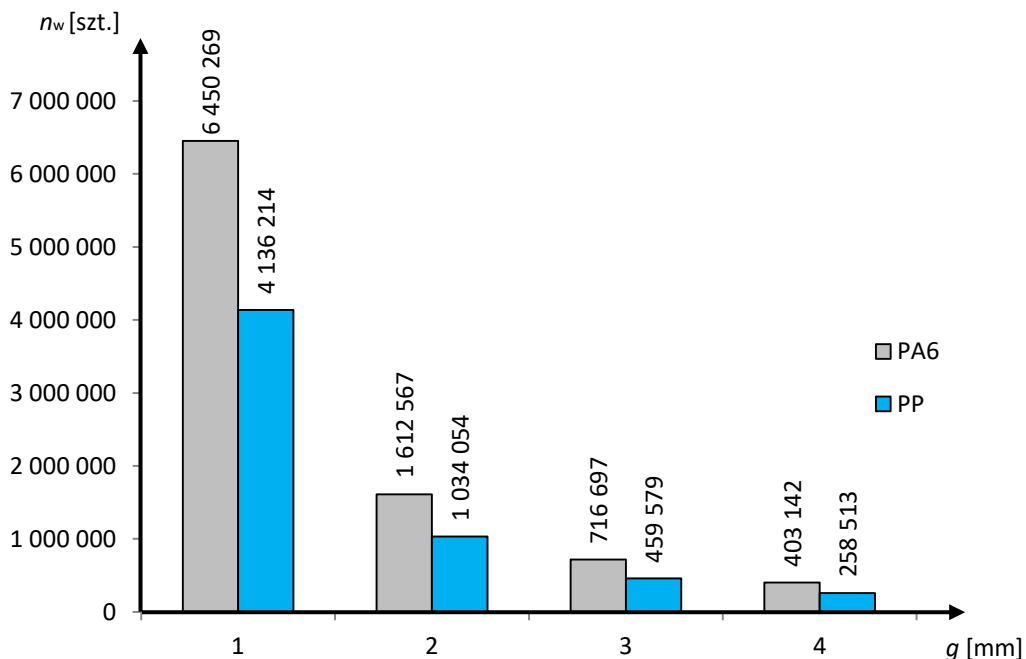




Rys. 9.9. Koszt produkcji wypraski z PP o maksymalnej grubości ścianki 3 mm w zależności od zastosowanego systemu chłodzenia



Rys. 9.10. Koszt produkcji wypraski z PP o maksymalnej grubości ścianki 4 mm w zależności od zastosowanego systemu chłodzenia



Rys. 9.11. Porównanie progu opłacalności stosowania nowego systemu chłodzenia dla produktów z wybranych tworzyw sztucznych (dla konkretnego przypadku)

Na podstawie przedstawionych rezultatów autor niniejszej dysertacji stwierdził, że proponowany system chłodzenia może znaleźć zastosowanie przede wszystkim w formach przeznaczonych do produkcji wyprasek o grubościach ścianki powyżej 3 mm oraz w przypadku produkcji wyrobów z materiałów, gdzie wymaga się niskiej wartości temperatury ich uwolnienia z formy wtryskowej. Dla wyrobów cienkościennych wpływ chłodzenia jest niewystarczający w stosunku do krótkiego czasu cyklu, co powoduje, że różnice kosztów procesu w nieznaczny sposób niwelują zwiększone nakłady konieczne do wyprodukowania narzędzia z nowym systemem chłodzenia. W przypadku regulacji temperatury form RHCM dla artykułów cienkościennych należy nadal poszukiwać odpowiednich rozwiązań w zakresie chłodzenia, aby ich funkcjonowanie było ekonomicznie uzasadnione.