

# DOŚWIADCZALNE WYZNACZANIE EFEKTYWNOŚCI REGENERATORA O NIERUCHOMYM WYPEŁNIENIU NA PODSTAWIE PARAMETRÓW EKSPLOATACYJNYCH REGENERATORÓW PIECA SZKLARSKIEGO

**Grzegorz WOŁKOWYCKI\***

\*Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Zakład Techniki Ciepłej i Chłodnictwa,  
ul. Wiejska 45 C, 15-351 Białystok

[g.wolkowycki@interia.pl](mailto:g.wolkowycki@interia.pl)

**Streszczenie:** W pracy opisano regeneratory, w które wyposażony jest piec szklarski znajdujący się w Hucie Szkła BIAGLASS w Białymstoku. Przedstawiono szczegółowo konstrukcję regeneratorów, własności termofizyczne wypełnienia oraz pomiarowe oprzyrządowanie eksploatacyjne. Pokazano jak wyznaczyć dysponując wynikami pomiarów eksploatacyjnych efektywność regeneratora. Zamieszczono, również wyniki symulacji wpływu błędów pomiaru temperatur spalin i powietrza na wielkość błędu tak wyznaczanej efektywności.

## 1. WSTĘP

Rozwój technologii topienia wsadu w wannie szklarskiej wiąże się z opracowaniem coraz to nowszych ich rozwiązań konstrukcyjnych pieców do topienia szkła, oraz właściwym doбором parametrów ściśle związanych z ich założonymi wymaganiami technologicznymi tak, aby uzyskać wymaganą jakość produktów finalnych.

Aby spełniać te wymagania to nowoczesny proces topienia wsadu w wannie szklarskiej powinien charakteryzować się:

- dużą stabilnością utrzymania temperatury i ciśnienia w części topliwej (gdzie układ jest utrzymywany w fazie ciekłej) i części wyrobowej pieca (skąd pobierane jest szkło do produkcji wyrobów),
- najmniejszym zużyciem paliwa (gazu ziemnego) poprzez uzyskanie możliwie wysokiej sprawności energetycznej procesu poprawie odzysku ciepła odpadowego. Konieczność taka jest rezultatem wysokiej temperatury spalin wylotowych z części topliwej wanny wynoszącej około 1400°C. W takich warunkach temperaturowych odzysk ciepła odpadowego z odprowadzonych spalin możliwy jest tylko poprzez zastosowanie regeneratorów o ceramicznej nieruchomej masie akumulacyjnej, prostych w budowie i niezawodnych w działaniu. Dla zapewnienia ciągłości procesu instalowane są minimum dwa regeneratory pracujące w naprzemiennych cyklach, współpracujące z jedną wanną.

Nowoczesne układy regeneratorów pieców szklarskich pozwalają na:

- zapewnienie wysokiej sprawności energetycznej pieca, a przez to uzyskanie oszczędności energii cieplnej i poprawę sprawności akumulacyjnej pieca, co osiąga się przez optymalne ukształtowanie wypełnień regeneratorów i dobór odpowiednich materiałów na te wypełnienia
- utrzymanie wysokiego poziomu sprawności eksploatacyjnej pieca przez cały okres kampanii, dzięki ograniczeniu procesu starzenia się wypełnień regeneratorów wskutek korozji i tworzenia się osadów ze składników wsadu unoszących ze spalinami zmniejszających prze-

kroje dla przepływu spalin i powietrza (Wrona i Witek, 1994)

- unikanie nieoczekiwanych przestojów, które przeważnie wiążą się z uszkodzeniem wypełnień (korozja, pełzanie itp.) oraz nieodwracalnego zatykania się części kanałów spalinowych koncentrującymi się osadami (Wrona i Witek, 1994).

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie jak wyznaczyć efektywność regeneratora o nieruchomym wypełnieniu na podstawie pomiarów parametrów eksploatacyjnych wraz z oceną błędu pomiarowego. Całość rozważań odnosi się do regeneratorów pracujących w Hucie Szkła Biaglass w Białymstoku. Zakres pracy obejmuje opis pieca, opis układu pomiarowego temperatur i przepływów gazu, spalin i powietrza w obrębie pieca i regeneratorów, metodologię doświadczalnego wyznaczania efektywności regeneratorów oraz symulację wyznaczania błędu określenia tej efektywności.

## 2. KONSTRUKCJA PIECA SZKLARSKIEGO I KOMÓR REGENERACYJNYCH W HUCIE SZKŁA BIAGLASS

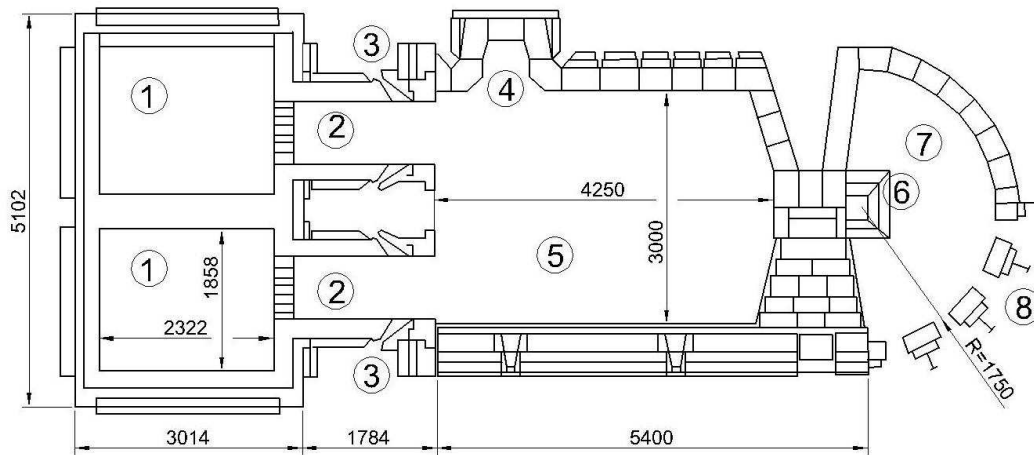
### 2.1. Piec szklarski

Huta Szkła Biaglass w Białymstoku istnieje od roku 1929 i zajmuje się głównie wyrobem szkła oświetleniowego. Obecnie w hucie szkła Biaglass Białystok pracuje piec szklarski zmianowy z przepływem głębinowym o pojemności 40 ton masy szklanej. Piec ma zdolność wytopową 7 ton masy szklanej na dobę i składa się z dwóch części: topliwej i wyrobowej połączonych przepustem na dnie wanny szklarskiej. Objętość części topliwej tego pieca wynosi 15 m<sup>3</sup>, natomiast części wyrobowej wynosi 4 m<sup>3</sup> (Wołkowycki, 2008).

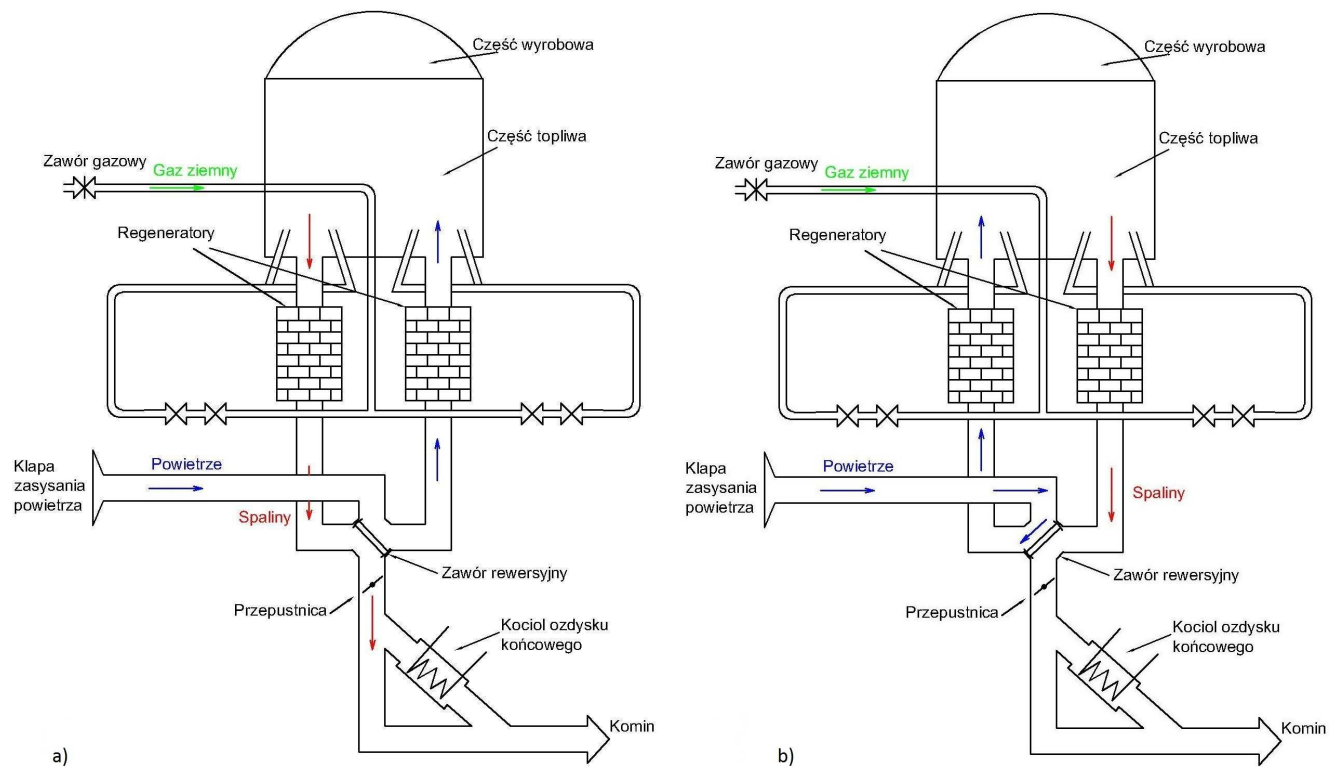
Na Rys. 1. pokazano przekrój poziomy całości pieca szklarskiego z komorami regeneratorów, kanałami przepływowymi do powietrza i spalin, wanną szklarską, która składa się z dwóch części – topliwej i wyrobowej. W części

topliwej szkło jest utrzymywane w fazie ciekłej, a w części wyrobowej pobierana jest masa szklana do produkcji.

Układ przepływu gazu, powietrza i spalin omawianego pieca szklarskiego jest pokazany na Rys. 2.



**Rys. 1.** Przekrój poziomy pieca szklarskiego pracującego w Hucie Szkła Biaglass; 1 – komory regeneratorów, 2 – kanał przepływu gazów spalinowych i powietrza do części wyrobowej pieca, 3 – palniki gazowe, 4 – zasyp mieszanki do wyrobu szkła, 5 – część topliwa, 6 – kanał przepływowy między częścią topliwą, a wyrobową, 7 – część wyrobowa, 8 – okna do poboru masy szklanej



**Rys. 2.** Schemat układu przepływowego pieca szklarskiego w Hucie Szkła Biaglass

a) prawy regenerator chłodzony, lewy ogrzewany, b) lewy regenerator chłodzony, prawy ogrzewany

Ciągłość działania pieca szklarskiego wymaga zawsze wyposażenia go w dwa regeneratory. Regeneratory działają, więc w sposób okresowy, tzn. gdy jeden nagrzewa się czyli akumuluje energię (wewnętrzna) odprowadzaną od spalin, drugi jest studzony oddając zakumulowaną energię do powietrza doprowadzonego do spalania. Po odpowiednim nagrzaniu regeneratora, nazywany okresem grza-

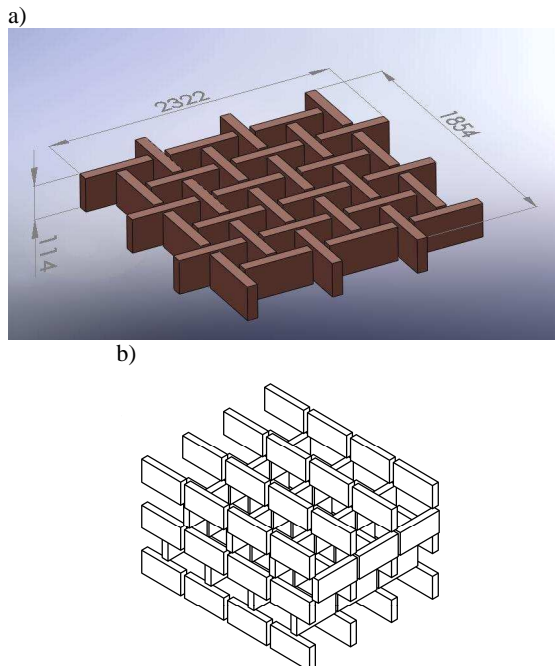
nia, przez który przepływają spaliny, co trwa pewien czas, zmienia się układ przepływu gazów, co nazywa się rewersją. Zatem regenerator nagrzany uprzednio spalinami jest przełączany na przepływ powietrza zimnego i doprowadzenie następnie oddaje ciepło przepływającemu powietrzu do palników. Długość okresów przepływu gazów reguluje odpowiednio do czasu nagrzewania się wypełnienia,

co określa się według zmieniającej się jego temperatury. Czas nagrzewania się kratownicy w hucie szkła Biaglass do odpowiedniej temperatury, czyli ok. 1320°C wynosi 30 minut, a więc w tych odstępach czasu następuje zmiana kierunku przepływu gazów. Ten okresowy sposób działania regeneratora powoduje, również wahania temperatury nagrzewanego powietrza, co odzwierciedla się na temperaturach panujących w piecu. Podczas jednego cyklu wypełnienie regeneratora maksymalnie schładza się do temperatury ok. 330°C. W celu zmniejszenia strat ciepła przez przewodzenie przez ściany komór na zewnątrz stosuje się izolację cieplną, komór regeneracyjnych.

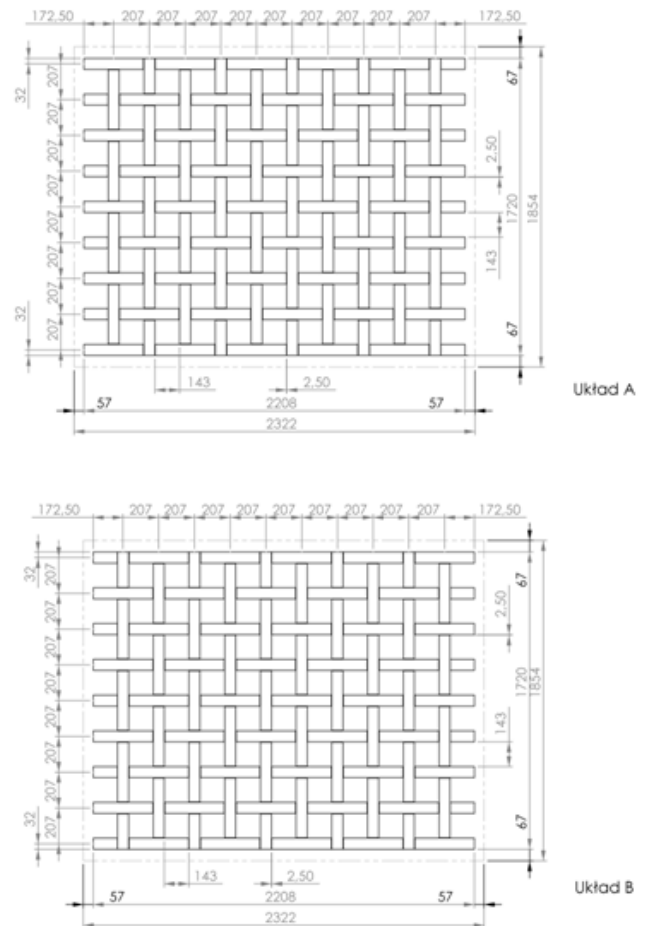
Jako paliwo do nagrzania oraz wytopienia wsadu używa się gazu ziemnego wysoko metanowego Gz 50, który jest gazem zawierającym w swoim składzie około 98 % metanu. Zużycie gazu wynosi 200 m<sup>3</sup> w ciągu godziny, czyli ponad 4000 m<sup>3</sup> na dobę. 75% ilości zużywanego gazu jest wykorzystywane na podtrzymanie „życia” wanny szklarskiej (utrzymanie masy szklarskiej w fazie ciekłej), natomiast reszta 25%, jest wykorzystywana do wytopienia nowo zasypanej mieszanki uzupełniającej ubytku wykorzystanej do produkcji wyrobów (Wołkowycki, 2008).

## 2.2. Konstrukcja regeneratorów zainstalowanych w Hucie Szkła w Białymstoku

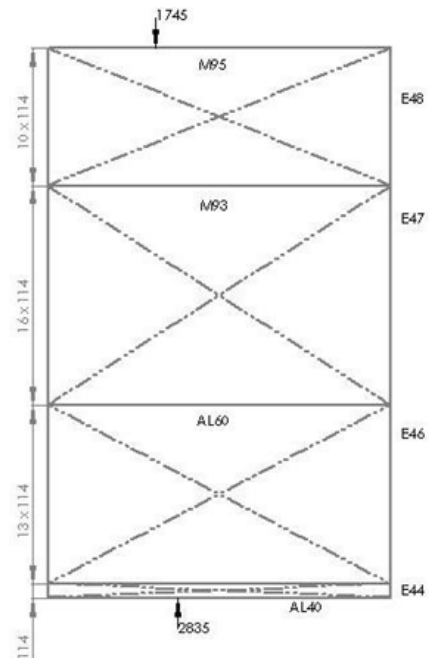
Masą akumulacyjną regeneratorów stanowi ceramiczny materiał ogniotrwały w formie prostek (cegieł) tworzących kratownicę, a to w celu umożliwienia przepływu spalin oraz powietrza. Jedna warstwa kratownicy w Białymstoku posiada wysokość 64 mm, zaś dwa pozostałe wymiary wynoszą 2322 mm x 1720 mm. Natomiast łączna wysokość wszystkich warstw wynosi 4560 mm. Kratowice regeneratora pokazano na Rys. 3 i Rys. 4.



Rys. 3. Widok kratownicy regeneratora zastosowanej w piecu w Hucie Szkła w Białymstoku; a) pojedyncza warstwa, b) ułożenie warstw



Rys. 4. Naprzemienne układy cegieł kratownicy regeneratora



Rys. 5. Przekrój poprzeczny kratownicy z uwzględnieniem kolejnych warstw wykonanych z różnych materiałów

Jedna warstwa kratownicy składa się w sumie z 99 prostek o trzech różnych wymiarach. Najwięcej prostek jest o wymiarach 345 x 114 x 64 i jest ich 80 szt. w jednej warstwie. Do dopasowania i zakończenia jednej warstwy

tak, aby pasowały do ściany komory służą cegły o wymiarach 205 x 114 x 64 (10 sztuk) i 140 x 144 x 64 (9 sztuk). Na Rys.4. pokazano układy cegieł kratownicy regeneratora pracującego w Hucie Szkła w Białymstoku. Cegły są ułożone w naprzemiennym układzie A i B Rys.4 tak, aby proste jednej konfiguracji opierały się na drugiej.

Porowatość  $\varepsilon$  układu cegieł definiuje się wzoru (1):

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_t} \quad (1)$$

gdzie:  $V_p$  – objętość pustek w jednej warstwie,  $V_t$  – objętość łączna pustek i (prostok) wypełnień w jednej warstwie.

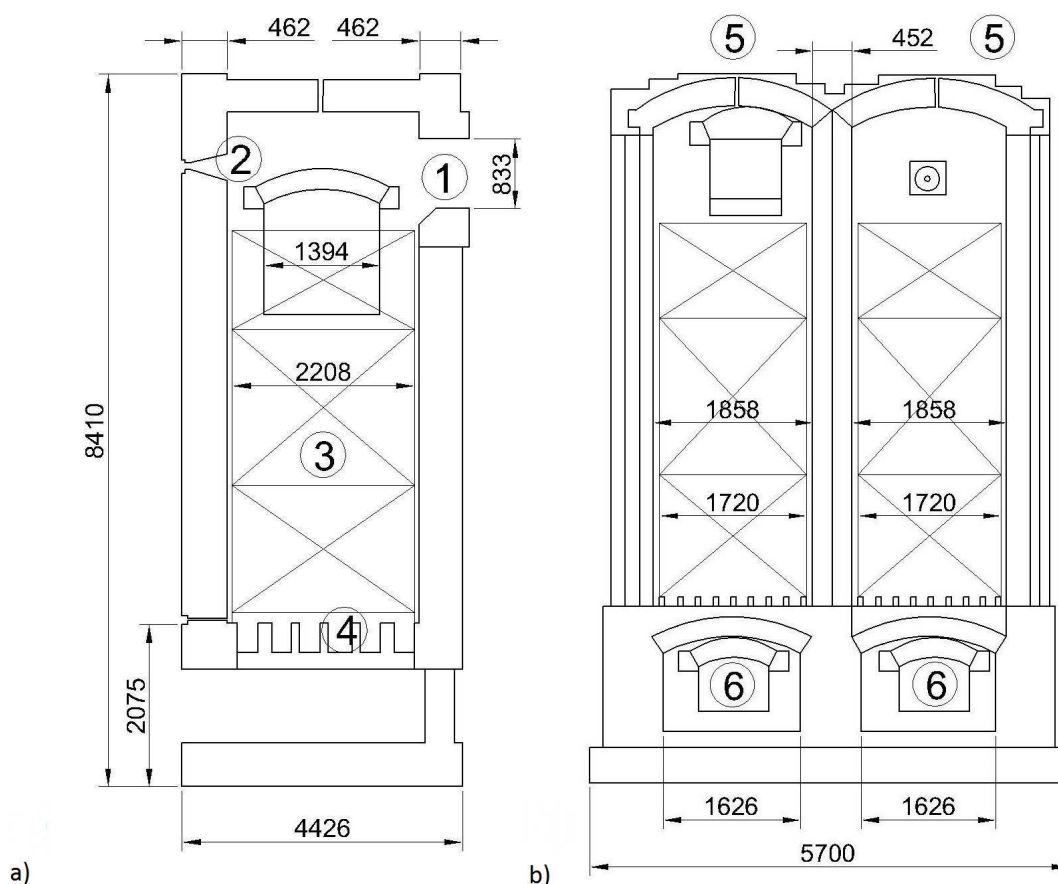
Podstawiając do wzoru:  $V_p = 207425280 \text{ mm}^3$  oraz  $V_t = 432944640 \text{ mm}^3$  otrzymuje się wartość porowatości równą 0,479.

Natomiast  $Y$  jest powierzchnią wymiany ciepła w jednostce objętości, którą wyznacza się dzieląc powierzchnie kontaktu cegieł ze spalinami/powietrzem wszystkich cegieł w warstwie przez objętość zajętej warstwy.

Zatem:

$$Y = \frac{A}{V} = \frac{44,5 \text{ m}^2}{0,43 \text{ m}^3} = 103,5 \frac{1}{\text{m}}, \quad (2)$$

Regenerator jest zbudowany z 4 warstw różnych materiałów ogniotrwałych Rys.5, które są różne pod względem składu chemicznego, od którego zależy odporność na oddziaływanie wysokiej temperatury gazów przepływających przez regenerator.



**Rys. 6.** Komory regeneracyjne pracujące w Hucie Szkła Biaglas – przekroje pionowe; 1 – kanał łączący regenerator z częścią topliwą pieca, 2 – wziernik do podglądu, 3 – kratownica regeneratora, 4 – ruszt podkomorowy, 5 – górne czujniki temperatury spalin i powietrza komór regeneracyjnych, 6 – przepływ gazów spalinowych oraz powietrza do komina oraz do komory

Najniżej, a więc w strefie najmniejszych temperatur usytuowane są cegły glinowo - krzemianowe AL44, których jest jedna warstwa, a jej skład chemiczny zawiera  $\text{SiO}_2$  – 50%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 46%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 1,8%,  $\text{TiO}_2$  – 0,9%.

Dalej w górę w kierunku większych temperatur, ułożonych jest kolejnych 13 warstw prostek wykonanych z materiału, również glonowo - krzemianowego AL60. W składzie chemicznym zawiera głównie  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 60% oraz  $\text{SiO}_2$  – 37,5%. Następnie umieszczonych jest 16 warstw cegieł

z materiału M93, którego głównym składnikiem jest magnez 92,4%. Ostatnia warstwa najbardziej odporna na działanie wysokich temperatur składa się z prostek z materiału M95, których jest 10 warstw, w skład chemiczny, których wchodzi w 96,2%  $\text{MgO}$ . Kratownice regeneratora konstruuje się z różnych warstw ze względów czysto ekonomicznych, gdyż cegły usytuowane w strefie niższych temperatur są tańsze, bo różnią się składem chemicznym od prostek znajdujących się wyżej. Niżej w Tab. 1 przedstawiono

wartości ciepła właściwego, przewodności cieplnej oraz porowatości otwartej (stosunek objętości otwartych porów materiału do całkowitej jej objętości, łącznie materiałów porami) dla materiałów użytych w każdej warstwie.

**Tab.1.** Właściwości materiałów kratownicy regeneratora

Materiał ogniowaty	Wartość ciepła właściwego [kJ/kg* K]	Przewodność cieplna w temp. 700°C [W/mK]	Przewodność cieplna w temp. 1000°C [W/mK]	Przewodność cieplna w temp. 1200°C [W/mK]	Porowatość otwarta [%]
<b>AL44</b>	1,05	1,40	1,50	-	17
<b>AL60</b>	1,0	1,60	1,70	-	16
<b>M93</b>	1,20	3,7	3,1	2,4	19
<b>M95</b>	1,16	4,2	3,7	3,0	18

Masa akumulacyjna regeneratora w formie kratownicy ułożona jest na ruszcie pod komorowym, złożonym z szamotowych kształtek tworzących sklepienie. W komorach znajdujących się w hucie szkła w Białymstoku jest ich sześć. Są one ułożone na spodzie komory tak, aby między nimi pozostawały dość szerokie szczeliny, którymi przepływają gazy. Pod rusztem komorowym znajduje się kanał pod komorowy, połączony z kanałami urządzenia rewersyjnego tj. zaworu służącego do przełączania przepływu gazu podczas cyklicznej pracy regeneratorów. Nad kratownicą pod sklepieniem komory znajduje się kanał dla przepływu gazów przez kratownicę, który łączy się z kanałem gdzie umieszczone są palniki.

### 3. OPRZYRZĄDOWANIE POMIAROWE PIECA SZKLARSKIEGO I KOMÓR REGENERACYJNYCH

#### 3.1. Schemat rozmieszczenia czujników pomiarowych układu

Głównym elementem sterowania wanny szklarskiej jest sterownik Siemens S7-300. Do sterownika są podłączone przewodami czujniki pomiarowe i elementy wykonawcze. Układ sterowania wyposażony jest w zasilacz bezprzewodowy pozwalający na pracę stacji operatorskiej, sterownika oraz ważniejszych wskaźników przy braku napięcia w sieci. Niżej na Rys. 7. przedstawiono schemat rozmieszczenia czujników pomiarowych i nastawników.

Do pomiaru temperatury w komór regeneracyjnych w Hucie Szkła Biaglass w Białymstoku zastosowano dwa różne termoelementy. W górnej części regeneratora znajduje się termoelement platyna – 10% rod/platyna oznaczonego symbolem S lub Pt Rh 10 – Pt, maksymalna temperatura stosowania wynosi 1540°C, zaś jego błąd pomiarowy wynosi  $\pm 0.0025|t|$ . W dolnej części komory znajduje się termoelement nikiel-chrom/nikiel-aluminium oznaczonego symbolem K lub NiCr-NiAl, którego maksymalna temperatura stosowania wynosi 1200°C, w którym błąd pomiarowy wynosi  $\pm 0.0075|t|$ .

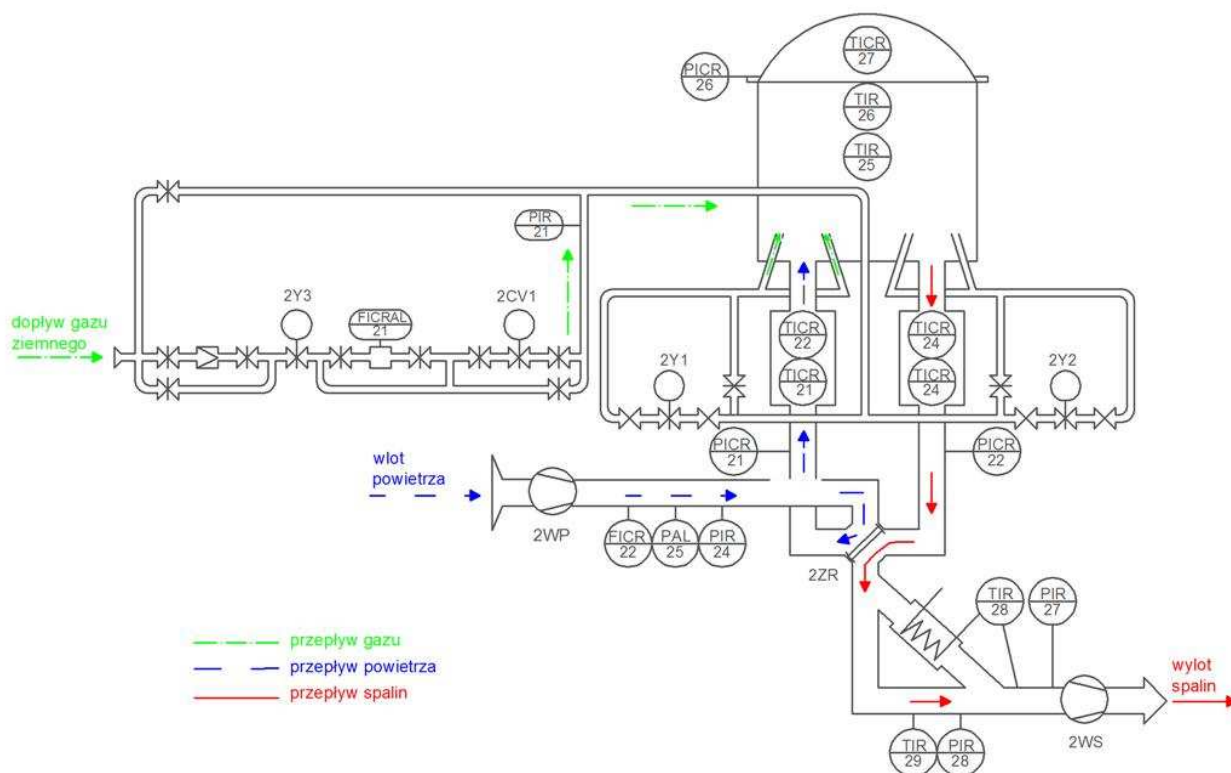
W Tab. 2 przedstawiono zestawienie czujników pomiarowych zastosowanych w piecu szklarskim.

**Tab. 2.** Czujniki pomiarowe pieca szklarskiego pracującego w Hucie Szkła Biaglass

Lp	Symbol	Producent/model	Przeznaczenie	Dokładność (błąd pomiarowy)
1.	TICR 27	PtRh10-Pt	Pomiar temperatury spalin w części wyrobowej	$\pm 0.0025 t $
2.	TIR 26	PtRh10-Pt	Pomiar temperatury w części wyrobowej	$\pm 0.0025 t $
3.	PICR 26	AKAPIS typ PRC-1	Pomiar ciśnienia spalin w części wyrobowej wanny	(-30...+30)Pa - błąd 0,3%
4.	TIR 25	PtRh10-Pt	Pomiar temperatury w części topliwej	$\pm 0.0025 t $
5.	TICR 22	PtRh10-Pt	Pomiar temperatury spalin w komorze strona L – góra	$\pm 0.0025 t $
6.	TICR 24	PtRh10-Pt	Pomiar temperatury spalin w komorze strona P – góra	$\pm 0.0025 t $
7.	TICR 23	NiCr-NiAl	Pomiar temperatury spalin w komorze strona L – dół	$\pm 0.0075 t $
8.	TICR 21	NiCr-NiAl	Pomiar temperatury spalin w komorze strona P – dół	$\pm 0.0075 t $
9.	PICR 21	APLISENS typ PC50	Pomiar ciśnienia spalin komora lewa	PC-50/-0,5÷+0,5kPa - błąd 0,3%
10.	PICR 22	APLISENS typ PC50	Pomiar ciśnienia spalin komora prawa dół	PC-50/-0,5÷+0,5kPa - błąd 0,3%
11.	PIR 27	LABOR typ UDL-7K	Pomiar ciśnienia spalin – czopach	(0 ... 600)°C-KW-L)
12.	PIR 28	LABOR typ UDL-7K	Pomiar ciśnienia spalin – kanał spalin	(0 ... 600)°C-KW-L)
13.	PIR 23	APLISENS typ PC-28/EEx	Ciśnienie gazu	PC-28/EEx/0÷10 kPa/PD/M - błąd 0,4%
14.	FICRA L 01	YOKO-GAWA typ DY050	Ilość gazu do wanny	$\pm 1\%$
15.	PIR 24	APLISENS typ PC-28	Ciśnienie powietrza	0÷2kPa/PD/M - błąd 0,4%
16.	FICR 02	FUJI typ FKK	Ilość powietrza do wanny	(0 ... 1,49)kPa
17.		BN-76/5531-09	Pomiar temperatury powietrza wlotowego do komór regeneratora	$\pm 0.02 t $

Przeznaczenie zastosowanych czujników uwidocznionych na schemacie Rys. 7.

- TICR 27 pomiar temperatury w części wyrobowej wanny szklarskiej – góra;
- TIR 26 pomiar temperatury w części wyrobowej – masa szklana;
- PICR 26 pomiar ciśnienia w części wyrobowej wanny szklarskiej;
- TIR 25 pomiar temperatury w części topliwej wanny szklarskiej;
- TICR 22 pomiar temperatury powietrza i spalin w komorze lewej górna część;
- TICR 24 pomiar temperatury powietrza i spalin w komorze prawej górna część;
- TICR 23 pomiar temperatury powietrza i spalin w komorze prawej dolna część;
- TICR 21 pomiar temperatury powietrza i spalin w komorze lewa dolna część;
- PICR 21 pomiar ciśnienia spalin komora lewa;
- PICR 22 pomiar ciśnienia spalin komora prawa;
- PIR 27 pomiar ciśnienia spalin – czopach – na wylocie do komina za kotłem wymiennikowym;
- PIR 28 pomiar ciśnienia spalin – kanał spalin – na wylocie do komina;
- TIR 28 pomiar temperatury spalin – czopach – na wylocie do komina za kotłem wymiennikowym;
- TIR 29 pomiar temperatury spalin – kanał spalin – na wylocie do komina;
- PIR 21 ciśnienie gazu dostarczonego do wanny szklarskiej;
- FICRAL 01 ilość gazu do wanny – znajduje się w rozdzielni gazu;
- PIR 24 ciśnienie powietrza na wlocie przed zaworem rewersyjnym;
- FICR 02 ilość powietrza do wanny na wlocie przed zaworem rewersyjnym;
- 2CV1 zawór dławiący gazowy z siłownikiem elektrycznym;
- 2Y1 zawór gazowy odcinający gaz na czas rewersji strona prawa;
- 2Y2 zawór gazowy odcinający gaz na czas rewersji strona prawa;
- 2Y3 zawór gazowy odcinający węzeł główny;
- 2WS wentylator spalin na wlocie do komina;
- 2WP wentylator powietrza za czerpnięą powietrza;
- 2ZR zawór rewersyjny do przełączania kierunku przepływu powietrza oraz spalin.



Rys. 7. Schemat układu przepływowego pieca szklarskiego i rozmieszczenie oprzyrządowania pomiarowego (Karolczak, 2004)

### 3.2. Charakterystyki poszczególnych układów pomiarowych

TICR 27 Pomiar temperatury spalin w części wyrobowej – góra:

Obwód pomiarowy wykorzystuje termooigniwo typu S zabudowane w wanny oraz kabel przewodów kompensacyjnych, które wprowadzono na dwuprzewodowy przetwornik U/I (produkcji CIBA typ T1249 ustawiony na (800...1600)°C) zasilany z miernika cyfrowego (produk-



cji LUMEL typ N15) oraz na kartę AI sterownika (S7-300 SIEMENS).

TIR 26 Pomiar temperatury w części wyrobowej :

Obwód pomiarowy wykorzystuje termooogniwo typu S zabudowane w wannie oraz kabel przewodów kompensacyjnych, które wprowadzono na dwuprzewodowy przetwornik U/I (produkcji CIBA typ T1249 ustawiony na (800...1600)°C) zasilany z miernika cyfrowego oraz na kartę AI sterownika.

PICR 26 Pomiar ciśnienia spalin w części wyrobowej wanny:

Obwód pomiarowy wykonano zabudowując dwuprzewodowy przetwornik różnicy ciśnienia (produkcji AKAPIS typ PRC-1 o zakresie pomiarowym:(-30...+30)Pa) na uśredniającej trasie impulsowej (łączy lewą i prawą stronę komory wyrobowej). Sygnał z przetwornika wprowadzono na kartę AI sterownika.

TIR 25 Pomiar temperatury w części topliwej:

Obwód pomiarowy wykorzystuje termooogniwo typu S zabudowane w wannie oraz kabel przewodów kompensacyjnych, które wprowadzono na dwuprzewodowy przetwornik U/I (produkcji CIBA typ T1249 ustawiony na (800...1600)°C) zasilany z miernika cyfrowego oraz na kartę AI sterownika.

TICR 24 Pomiar temperatury spalin w komorze strona P – góra:

Obwód pomiarowy wykorzystuje termooogniwo typu S zabudowane w wannie oraz kabel przewodów kompensacyjnych, które wprowadzono na dwuprzewodowy przetwornik U/I (produkcji CIBA typ T1249 ustawiony na (0...1400)°C) zasilany z miernika cyfrowego oraz na kartę AI sterownika.

TICR 22 Pomiar temperatury spalin w komorze strona L – góra:

Obwód pomiarowy wykorzystuje termooogniwo typu S zabudowane w wannie oraz kabel przewodów kompensacyjnych, które wprowadzono na dwuprzewodowy przetwornik U/I (produkcji CIBA typ T1249 ustawiony na (0...1400)°C) zasilany z miernika cyfrowego oraz na kartę AI sterownika.

TICR 22 Pomiar temperatury spalin w komorze strona P – dół:

Obwód pomiarowy wykorzystuje termooogniwo typu K zabudowane w wannie oraz kabel przewodów kompensacyjnych, które wprowadzono na dwuprzewodowy przetwornik U/I (produkcji LABOR typ UDL-9K-(0...1000)°C-KW-L) zasilany z miernika cyfrowego oraz na kartę AI sterownika.

TICR 21 Pomiar temperatury spalin w komorze strona L – dół:

Obwód pomiarowy wykorzystuje termooogniwo typu K zabudowane w wannie oraz kabel przewodów kompensacyjnych, które wprowadzono na dwuprzewodowy przetwornik U/I (produkcji LABOR typ UDL-9K-(0...1000)°C-KW-L) zasilany z miernika cyfrowego oraz na kartę AI sterownika.

PICR 21 Pomiar ciśnienia spalin komora lewa:

Obwód pomiarowy wykonano zabudowując dwuprzewodowy przetwornik ciśnienia (produkcji APLISENS typ PC-50/-0,5÷+0,5kPa/4÷20mA/M), którego sygnał wprowadzono na kartę AI sterownika.

PICR 22 Pomiar ciśnienia spalin komora prawa dół:

Obwód pomiarowy wykonano zabudowując dwuprzewodowy przetwornik ciśnienia (produkcji APLISENS typ PC-50/-0,5÷+0,5kPa/4÷20mA/M), którego sygnał wprowadzono na kartę AI sterownika.

PIR 27 Pomiar ciśnienia spalin – czopach:

Obwód pomiarowy wykonano zabudowując dwuprzewodowy przetwornik ciśnienia (produkcji APLISENS typ PC-50/-0,5÷+0,5kPa/4÷20mA/M), którego sygnał wprowadzono na kartę AI sterownika.

PIR 28 Pomiar ciśnienia spalin – kand spalin:

Obwód pomiarowy wykonano zabudowując dwuprzewodowy przetwornik ciśnienia (produkcji APLISENS typ PC-50/-0,5÷+0,5kPa/4÷20mA/M), którego sygnał wprowadzono na kartę AI sterownika.

PIR 27 Pomiar temperatury spalin – czopach:

Obwód pomiarowy wykorzystuje termooogniwo typu K zabudowane w czopuchu oraz kabel przewodów kompensacyjnych, które wprowadzono na dwuprzewodowy przetwornik U/I (produkcji LABOR typ UDL-7K-(0...600)°C-KW-L), z którego sygnał prądowy wprowadzono na kartę AI sterownika.

PIR 28 Pomiar temperatury spalin – kanał:

Obwód pomiarowy wykorzystuje termooogniwo typu K zabudowane w kanale spalin oraz kabel przewodów kompensacyjnych, które wprowadzono na dwuprzewodowy przetwornik U/I (produkcji LABOR typ UDL-7K-(0...600)°C-KW-L), z którego sygnał prądowy wprowadzono na kartę AI sterownika.

PIR 23 Ciśnienie gazu:

Obwód pomiarowy wykonano z dwuprzewodowego przetwornika ciśnienia w wersji iskrobezpiecznej (produkcji APLISENS typ PC-28/EEEx/0÷10kPa/PD/M) zamontowany na zaworze odcinającym wstawianym w gazociąg (węzeł gazowy wanny). Sygnał z przetwornika wprowadzono na kartę AI EEx sterownika.

FICRAL 01 Ilość gazu do wanny:

Obwód pomiarowy wykonano dwuprzewodowego przetwornika szybkości przepływu (produkcji YOKOGAWA typ DY050 ECL AD4-4AD EX zakres pomiarowy: (0...250)Nm<sup>3</sup> gazu/h) wstawiony bezpośrednio w gazociąg (węzeł gazowy wanny). Sygnał z przetwornika wprowadzono na kartę AI EEx sterownika.

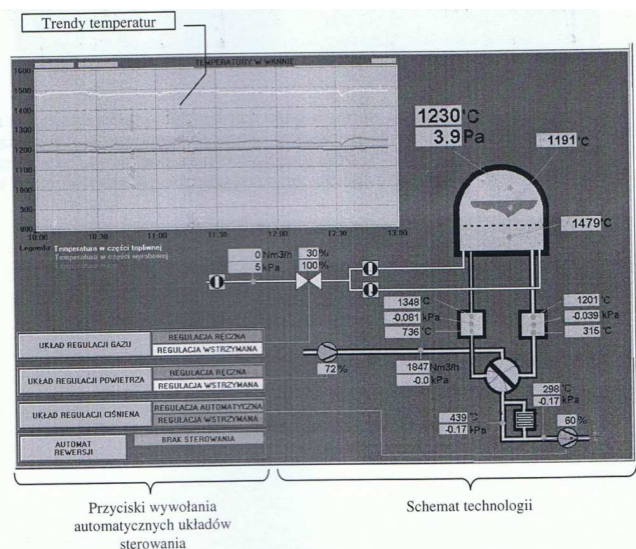
PIR 24 Ciśnienie powietrza:

Obwód pomiarowy wykonano dwuprzewodowego przetwornika ciśnienia (produkcji APLISENS typ PC-28/0÷2kPa/PD/M) zamontowany na króćcu kanału powietrza do wanny. Sygnał z przetwornika wprowadzono na kartę AI sterownika.

FICR 02 Ilość powietrza do wanny:

Obwód pomiarowy wykonano z przetwornika różnicy ciśnienia (produkcji FUJI typ FKK o ustawionym zakresie (0...1,49)kPa, który odpowiada przepływowi (0...2000) Nm<sup>3</sup> powietrza/h) zabudowany na zaworze blokowym pięciodrogowym zabudowanym bezpośrednio przy kryzie pomiarowej, wstawionej bezpośrednio w kanał powietrza do wanny. Sygnał z przetwornika wprowadzono na kartę AI sterownika (Karczlak, 2004).

Na Rys. 8. pokazano schemat wizualizacyjny układu przepływowego gazu, powietrza i spalin w obrębie wanny szklarskiej (Bobowski, 2004).

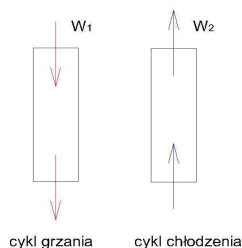


Rys. 8. Wizualizacja systemów pomiarowych i wykonawczych wanny szklarskiej Huty Szkła Biaglass w Białymstoku

## 4. DOŚWIADCZALNE WYZNACZANIE EFEKTYWNOŚCI REGENERATORA

### 4.1. Podstawy teoretyczne

Całkowanie równań bilansowych regeneratora dostarcza rozwiązań w postaci pól temperatury gazów i wypełnień. Jednak ze względów aplikacyjnych istotna jest wielkość wymienianego strumienia ciepła. Metodologia obliczeń takiego strumienia regeneratorów opiera się na pojęciu efektywności wymiany ciepłej wymiennika, nazywanej w rozważanym przypadku efektywnością regeneratora (Skiepko i Shah, 2005). Efektywność ta definiowana jest jako stosunek, obliczanego na podstawie wyznaczonych temperatur gazów, ilości ciepła  $Q$  wymienianego w regeneratorsie podczas cyklu do ilości ciepła  $Q_{\max}$ , którą byłaby wymieniana przy tych samych wlotowych właściwościach czynników wymieniających ciepło w rekuperatorze przeciwprądowym z wbudowaną nieskończenie wielką powierzchnią wymiany ciepła.



Rys. 9. Kierunek przepływu strumienia pojemności cieplnej w cyklu grzania oraz chłodzenia

Ilość ciepła wymienionego w okresie grzania w przedziale czasu  $\tau_1$  dla regularnie periodycznego stanu pracy jest zbilansowana równoważną ilością ciepła przeniesionego w okresie chłodzenia regeneratora w przedziale czasu  $\tau_2$ , stąd

$$Q = (\dot{W}_1 \tau_1) (\bar{t}_1^- - \bar{t}_1^+) = (\dot{W}_2 \tau_2) (\bar{t}_2^+ - \bar{t}_2^-), \quad (3)$$

Zatem, efektywność regeneratora wyznacza się na podstawie następującej zależności (Skiepko, 1998):

$$\varepsilon = \frac{(\dot{W}_1 \cdot \tau_1) (\bar{t}_1^- - \bar{t}_1^+)}{(\dot{W} \cdot \tau)_{\min} (\bar{t}_1^- - \bar{t}_2^-)} = \frac{(\dot{W}_2 \cdot \tau_2) (\bar{t}_2^+ - \bar{t}_2^-)}{(\dot{W} \cdot \tau)_{\min} (\bar{t}_1^- - \bar{t}_2^-)}, \quad (4)$$

Zazwyczaj występuje następująca zależność (Skiepko, 1998):

$$W_1 \cdot \tau_1 > W_2 \cdot \tau_2, \quad (5)$$

W rezultacie bazując na cyklu grzania do wyznaczenia efektywności regeneratora stosuje się wzór:

$$\varepsilon = \frac{(\dot{W}_1 \cdot \tau_1) (\bar{t}_1^- - \bar{t}_1^+)}{(\dot{W} \cdot \tau)_{\min} (\bar{t}_1^- - \bar{t}_2^-)} = \frac{\dot{W}_1 \cdot \tau_1 (\bar{t}_1^- - \bar{t}_2^-)}{\dot{W}_2 \cdot \tau_2 (\bar{t}_1^- - \bar{t}_2^-)}, \quad (6)$$

Przy zastosowaniu formuły (4) z uwzględnieniem (5) wyznaczenie efektywności regeneratora na podstawie cyklu chłodzenia, dla którego  $W_2 \tau_2 = (W\tau)_{\min}$  prowadzi do wzoru

$$\varepsilon = \frac{\bar{t}_2^+ - \bar{t}_2^-}{\bar{t}_1^- - \bar{t}_2^-}, \quad (7)$$

### 4.2. Analiza błęd pomiarowego efektywności

#### Błędy pomiarowe wielkości mierzonych bezpośrednio

Pomiar bezpośredni polega na zmierzeniu wielkości fizycznej przez odczyt wskazań jej wartości wprost z zastosowanego narzędzia pomiarowego. Wartości te mogą być odczytane również z systemu rejestracji i zbierania danych pomiarowych sprzężonego z zastosowanym narzędziem. Wielkość błędu bezwzględnego bezpośrednio zależy od przypadkowych, a więc nieprzewidywalnych, co do wielkości i kierunku, zmian wielkości mierzonej, które ujawniają się podczas kolejnych powtórzeń pomiarów, przy czym wartość średnia wielkości mierzonej jest zazwyczaj celem pomiarów, które wyznacza się ze wzoru (Moffat, 1988):

$$y_{sr} = \frac{\sum_{j=1}^J y_j}{J}, \quad (8)$$

Wkład tego rodzaju zmian do błędu bezwzględnego określa się jako błąd przypadkowy  $\Delta_{y,p}$  wielkości mierzonej, który w odniesieniu do wartości średniej  $y_{sr}$  określony jest wzorem:

$$\Delta_{y_{sr,p}} = \sqrt{\frac{1}{J \cdot (J-1)} \cdot \sum_{j=1}^J (y_j - y_{sr})^2}, \quad (9)$$

Na dokładność pozyskiwanych wyników pomiarów wpływa nie tylko wielkość błędu przypadkowego, ale i błędy systematyczne. Jeśli dla kolejnych powtórzeń pomiarów dokonywanych w tych samych warunkach błąd bezwzględny wielkości mierzonej jest znany i pozostaje stały to określa się go jako systematyczny. Zazwyczaj błąd systematyczny jest skutkiem znanego błędu narzędzia pomiarowego, znanych błędów odnoszącego się do wybranej metodologii pomiaru, błędów wprowadzanych przez sys-



tem zbierania danych pomiarowych. Wszystkie tego rodzaju błędy systematycznie można sklasyfikować do czterech podstawowych kategorii, a mianowicie:

- Błąd systematyczny wielkości  $y$  spowodowany niedokładnością kalibracji narzędzia pomiarowego,  $\delta_{y,kal}$ ;
- Błąd systematyczny wielkości  $y$  spowodowany niedokładnością systemu zbierania danych pomiarowych,  $\delta_{y,zb,dan}$ ;
- Błąd systematyczny wielkości  $y$  spowodowany zmiennością przestrzenną lub niedokładnością oszacowania zmienności przestrzennej wielkości  $y$ ,  $\delta_{y,zm,przest}$ ;
- Błąd systematyczny wielkości  $y$  spowodowany niedokładnością zainstalowania narzędzia pomiarowego,  $\delta_{y,inst}$ ;

Jeśli więc wielkość  $y_{sr}$  jest mierzona bezpośrednio to wynikowy jej błąd pomiaru uwzględniający wkład błędów przypadkowego / systematycznych wyznacza się ze wzoru:

$$\delta_{y_{sr}} = \sqrt{\delta_{y,inst}^2 + \delta_{y,kal}^2 + \delta_{y,zm,przest}^2 + \delta_{y,zb,dan}^2 + (2 \cdot \Delta_{y_{sr},p})^2}, \quad (10)$$

W rezultacie pomiaru wartości rzeczywiste wielkości  $y$  mogą być zapisane w jako znajdujące się w przedziale (Moffat, 1988):

$$y = y_{sr} \pm \delta_{y_{sr}} \quad (11)$$

### Błędy pomiarowe wielkości mierzonych pośrednio

W pomiarze pośrednim mierzona wielkość wyznacza się ze wzoru (lub kilku sprzężonych zależności), który uzależnia wielkość mierzona pośrednio od jednej lub kilku wielkości mierzonych bezpośrednio. Niech wielkość  $z$  jest mierzona pośrednio, co oznacza, że jest ona wyznaczana z formuły obliczeniowej oparciu o pewną liczbę wielkości pomierzonych bezpośrednio, gdzie każda z wielkości mierzonych bezpośrednio zostaje wyznaczona z błędem  $\delta_y$ . Wówczas błąd wyznaczenia wielkości mierzonej pośrednio wynosi

$$\delta_z = \sqrt{\sum_{k=1}^K \left( \frac{\partial z}{\partial y_k} \cdot \delta_{y_k} \right)^2} \quad (12)$$

W rezultacie pomiaru wartości rzeczywiste wielkości  $z$  mogą być zapisane w jako znajdujące się w przedziale

$$z = z_{sr} \pm \delta_z \quad (13)$$

Tak określona metodologia wyznaczania błędów pomiaru wielkości mierzonych bezpośrednio i pośrednio została zastosowana w niniejszej publikacji.

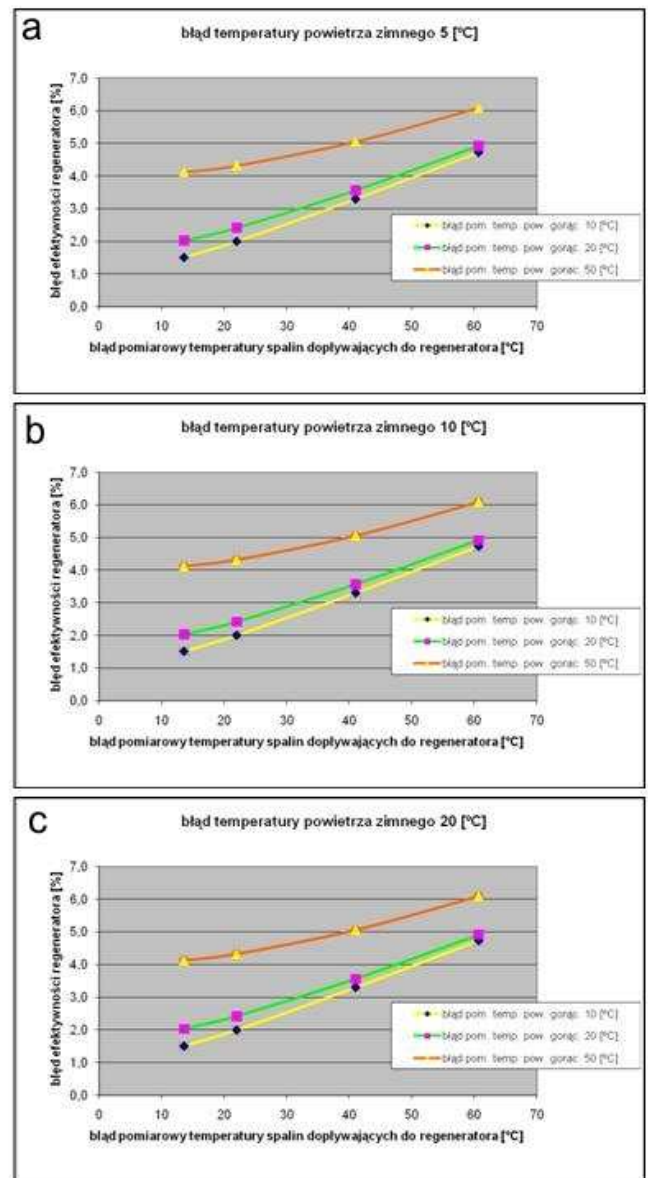
Zależność (7) jest zastosowana do wyznaczania efektywności regeneratora. Zatem wyznacza się ją doświadczalnie metodą pośrednią. W rezultacie zastosowanie wzoru (12) błąd pomiarowy efektywności jest określony następującą formułą

$$\Delta \varepsilon = \sqrt{\left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial t_2} \cdot \Delta t_2 \right)^2 + \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial t_2} \cdot \Delta t_2 \right)^2 + \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial t_1} \cdot \Delta t_1 \right)^2}, \quad (14)$$

Po wyznaczeniu wyników pochodnych cząstkowych otrzymujemy następującą zależność końcową:

$$\Delta \varepsilon = \sqrt{\left( \frac{1}{\bar{t}_1 - \bar{t}_2} \cdot \Delta \bar{t}_2 \right)^2 + \left( \frac{\bar{t}_2 - \bar{t}_1}{(\bar{t}_1 - \bar{t}_2)^2} \cdot \Delta \bar{t}_2 \right)^2 + \left( -\frac{\bar{t}_2 - \bar{t}_1}{(\bar{t}_1 - \bar{t}_2)^2} \cdot \Delta \bar{t}_1 \right)^2}, \quad (15)$$

## 5. WYNIKI SYMULACJI BŁĘDU WYZNACZANIA EFEKTYWNOŚCI



Rys. 9. Błędy wyznaczania efektywności regeneratora w funkcji błędów pomiarowych temperatury powietrza gorącego na wylocie z regeneratora oraz temperatury spalin na wlocie do regeneratora: a) dla błędu pomiarowego temperatury powietrza zimnego 5°C, b) dla błędu pomiarowego temperatury powietrza zimnego 10°C, c) dla błędu pomiarowego temperatury powietrza zimnego 20°C

Po założeniu szacunkowych wartości liczbowych średnich temperatur dla komory regeneratora lewego wynoszących odpowiednio:

$\bar{t}_1 = 1343^\circ\text{C}$  – temperatura spalin na dopływie do komory regeneratora,

$\bar{t}_2 = 1301^\circ\text{C}$  – temperatura powietrza za regeneratorem (średnia),

$\bar{t}_2 = 22^\circ\text{C}$  – temperatura powietrza, dopływającego do regeneratora, (na dolocie zimne powietrze).

Na wykresach Rys. 9. przedstawiono wyniki dokonanej symulacji błędu pomiarowego  $\Delta\varepsilon$  efektywności regeneratora określonej na podstawie cyklu chłodzenia. Wykresy pokazują jak zmienia się błąd pomiarowy efektywności w zależności od wartości wynikowej błędu pomiarowego temperatury powietrza gorącego na wyjściu z regeneratora. Przyjęto wartość błędu temperatury powietrza gorącego z regeneratora  $\Delta\bar{t}_2$  wynoszący  $10^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$  oraz założono błąd pomiaru temperatury spalin z pieca szklarskiego do regeneratora  $\Delta\bar{t}_1$ , odpowiednio  $10^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$ ,  $60^\circ\text{C}$ .

Po dokonaniu symulacji stwierdzono, iż wartość błędu pomiarowego efektywności podlega bardzo małym wahaniom zmieniając wartość zmiennej przestrzennej temperatury powietrza zimnego dopływającego do regeneratora. Wartość tą w pierwszym wykresie założono na  $5^\circ\text{C}$  drugim  $10^\circ\text{C}$  natomiast trzecim  $20^\circ\text{C}$ , pokazało to, że błąd zmienia się o wartość liczbowa dopiero czwartego miejsca po przecinku.

## 6. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono budowę, zasadę działania oraz oprzyrządowanie pomiarowe regeneratorów ciepłych zainstalowanych w Hucie Szkła Biaglass w Białymstoku. Pokazano jak wyznaczyć efektywność regeneratora na podstawie cyklu chłodzenia. Wyniki wykonanej symulacji dowodzą, że przy wykorzystaniu eksploatacyjnego oprzyrządowania pomiarowego można dokonać wyznaczenia efektywności regeneratorów o nieruchomym wypełnieniu. Analiza wyznaczonych pomiarowych pracy błędów pomiarowych wykazała, że pozyskane tą drogą rezultaty doświadczalne określające efektywność są dostatecznie dokładne dla celów analiz cieplno – przepływowych.

**Oznaczenia:**  $\dot{W}_1$  – strumień masy spalin [kg/s],  $\dot{W}_2$  – strumień masy powietrza [kg/s],  $\tau_1$  – czas trwania okresu grzania [s],  $\tau_2$  – czas trwania okresu chłodzenia [s],  $\bar{t}_1$  – średnia temperatura spalin na dopływie do komory regeneratora [ $^\circ\text{C}$ ],  $\bar{t}_2$  – średnia temperatura spalin za regeneratorem [ $^\circ\text{C}$ ],  $\bar{t}_2$  – średnia temperatura powietrza zimnego, dopływającego do regeneratora [ $^\circ\text{C}$ ],

## LITERATURA

1. **Bobowski J.** (2004), *Instrukcja obsługi komputerowego systemu sterowania wanny gazową nr 2 w Hucie Szkła „Biaglass” w Białymstoku.*
2. **Karolczak M.** (2004), *System automatyki wanny gazowej W2 w Biaglass Huta Szkła Białystok.*
3. **Moffat R.J.** (1988), Describing the Uncertainties In Experimental Results, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1, pp.3-17.
4. **Skiepmo T.** (1998), *Teoria wymienników z wypełnieniem, dodatek F, w Madejski J.: Teoria wymiany ciepła*, Politechnika Szczecińska, Szczecin, wydanie II poprawione i uzupełnione.
5. **Skiepmo T., Shah R.K.** (2005), Modeling and effect of leakages on heat transfer performance of fixed matrix regenerators, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48, 1608-1632.
6. **Wołkowycki G.** (2008), *Układ sterowania procesem topienia wsadu w wannie szklarskiej*, Praca magisterska Politechnika Białostocka.
7. **Wrona J., Witek E.** (1994), Regenerator – jego znaczenie dla dobrej pracy pieca szklarskiego i problemy eksploatacyjne. „*Gospodarka Paliwami i Energią*”, nr 12/1994

### EXPERIMENTAL DETERMINATION OF FIXED MATRIX REGENERATOR EFFECTIVENESS BASED ON OPERATION PARAMETERS OF REGENERATORS WORKING AT A GLASS MECTING FURNACE

**Abstract:** This paper describes the regenerators, in which it is fitted with glass oven located in the Glassworks Huta BIAGLASS in Białystok. Presents in detail the design of regenerators, thermo-physical properties of filling and measuring equipment performance. Having shown how to determine the operational effectiveness of the test results regenerator. Posted on, the results of simulation the impact of measurement errors and the temperature of exhaust air volume so as to be fixed efficiency bug.