

doi:10.15199/48.2015.09.66

Modelowanie fizykochemicznych procesów przemysłowych na przykładzie saturatora piekarniczego

Streszczenie. Poniższy artykuł prezentuje próbę opracowania modeli matematycznych procesów fizykochemicznych występujących w saturatorze piekarniczym. Założeniem było opracowanie urządzenia służącego do dozowania wody nasyconej dwutlenkiem węgla w temperaturze nieprzekraczającej 40 °C. Opracowano model opisujący zależność przepływu masowego mieszaniny cieczy i gazu w funkcji ciśnienia roboczego oraz algorytm dozowania wody gorącej do otrzymanej mieszaniny w celu uzyskania zadanej temperatury. Zaproponowane modele zostały pozytywnie zweryfikowane przy pomocy powstałego w wyniku prac mobilnego urządzenia do saturacji i dozowania wody w procesie przemysłowym.

Abstract. The paper deals with an attempt to develop mathematical models of physicochemical processes, which are occurring in a bakery aerator. The assumption is to design an equipment for dosing water saturated with carbon dioxide at a temperature not exceeding 40 °C. The model is developed to describe the relationship between the mass flow of a mixture of liquid and gas as a function of the mixture pressure. Additionally, hot water dispensing algorithm is developed, so the output mixture preset temperature is obtained. The proposed models have been positively verified using a real mobile equipment for saturation and dispensing water in the industrial process. **Mathematical models of physicochemical processes, which are occurring in a bakery aerator**

Słowa kluczowe: proces fizykochemiczny, nasywanie wody dwutlenkiem węgla, model przepływu, algorytm dozowania.

Keywords: physicochemical process, saturating water with carbon dioxide, flow model, dosing algorithm.

Wstęp

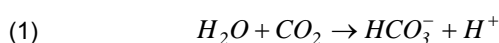
Procesy fizykochemiczne możemy rozpatrywać w dwóch grupach: zachodzące w roztworze i przebiegające ze zmianą stanu skupienia lub pomiędzy fazami. Większość tych zjawisk daje się opisać z wykorzystaniem praw fizyki, chemii oraz termodynamiki [2, 4]. Bez względu na sposób opisu mechanizmu omawianych zjawisk, musimy mieć świadomość, że zjawiska te, a dokładniej ich obserwowane wyniki, są najczęściej sumą kilku procesów zachodzących jednocześnie w obserwowanym układzie. Dokładny opis matematyczny procesów może być bardzo skomplikowany [7], a jego implementacja do rzeczywistego systemu może stać się bardzo trudna lub wręcz niemożliwa ze względu na zasoby systemu nadzorującego przebieg procesu [5].

Obecnie nad procesami fizykochemicznymi czuwają coraz to bardziej skomplikowane systemy włączając w to komputery przemysłowe lub dedykowane sterowniki [8]. Daje to duże możliwości w sensie stopnia zaawansowania reaktora chemicznego. Nie zmienia to faktu, iż w praktyce inżynierskiej dąży się zazwyczaj do uzyskania zadowalającego rezultatu za pomocą nieskomplikowanych matematycznie oraz numerycznie metod [7]. Takie podejście nie zwalnia jednak z obowiązku poznania istoty zjawiska i podjęcia próby opracowania modelu procesu.

Sformułowanie problemów

Pierwszy problem związany z modelowaniem procesu fizykochemicznego pojawił się podczas opracowywania założeń oraz rozwiązania konstrukcyjnego saturatora przemysłowego do wytwarzania wody pitnej nasyconej dwutlenkiem węgla. Zadaniem urządzenia jest dozowanie określonej masy wody gazowanej w zadanej temperaturze. Z uwagi na potrzebę jednorazowego wydozowania mieszaniny o wadze rzędu 50 kg należy opracować urządzenie, które będzie nasycało wodę pitną przepływowo.

Nasywanie wody dwutlenkiem węgla odbywa się według zależności [2]:



Rozpuszczalność dwutlenku węgla w wodzie, a co za tym idzie stopień jego dysocjacji zależy silnie od dwóch czynników: ciśnienia roboczego oraz temperatury wody [1], [4]. Aby wyznaczyć optymalną temperaturę nasywania oraz ciśnienie należy bliżej poznać te zależności.

Drugim napotkanym problemem jest proces dozowania mieszaniny. Pomiar wydozowanej objętości nasyconej dwutlenkiem węgla wody za pomocą czujnika przepływu może okazać się bardzo trudny i nieprecyzyjny z uwagi na możliwość występowania pęcherzyków nierozpuszczonego gazu w strudze. Należy zatem znaleźć zależność pomiędzy ciśnieniem roboczym komory saturacyjnej, a prędkością przepływu mieszaniny podczas dozowania.

Ostatnim zagadnieniem jest opracowanie sposobu doprowadzenia mieszaniny nasyconej dwutlenkiem węgla do zadanej temperatury przy minimalnej utracie zawartości zdysocjowanego gazu w roztworze. Rozwiązanie tego problemu zostanie przedstawione w dalszej części artykułu.

Analiza procesu nasywania wody pitnej dwutlenkiem węgla

Proces nasywania wody dwutlenkiem węgla (1) został opisany przez William'a Henry'ego. Prawo Henry'ego [1] brzmi następująco: w stałej temperaturze, ilość danego rozpuszczonego gazu w danej objętości cieczy jest wprost proporcjonalna do ciśnienia parcjalego gazu będącego w równowadze z tą cieczą. Innymi słowy, rozpuszczalność określonego gazu w danej cieczy jest wprost proporcjonalna do ciśnienia parcjalego tego gazu powyżej powierzchni cieczy. W formie matematycznej prawo Henry'ego może zostać zapisane jako:

$$(2) \quad p = k_H \cdot c$$

gdzie: p – ciśnienie parcjale gazu, k_H – stała Henry'ego, c – stężenie substancji rozpuszczonej.

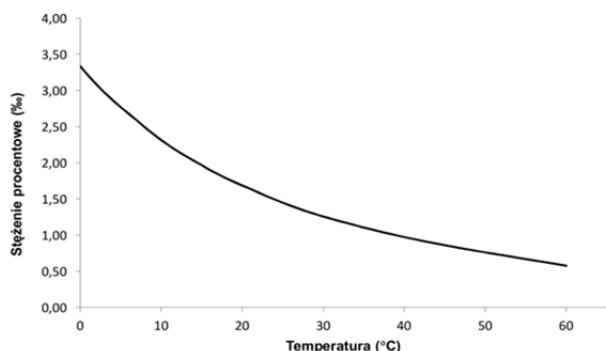
W przypadku mieszaniny wody i dwutlenku węgla stała Henry'ego w temperaturze standardowej T_0 wynoszącej 298,15 K wynosi 29,41 bar/(mol/l) [1]. W praktyce oznacza to, iż aby rozpuścić 1 mol dwutlenku węgla w roztworze wodnym należy dostarczyć ciśnienie rzędu 3 MPa.

Drugim czynnikiem mającym wpływ na rozpuszczalność jest temperatura roztworu. Zgodnie z literaturą [3] zależność pomiędzy temperaturą, a stałą Henry'ego jest następująca:

$$(3) \quad k_H(T) = k_H(T_0) e^{-C \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

gdzie: T_0 – temperatura standardowa, $C = 2400$ K.

Równanie (3) powinno być traktowane jako przybliżenie [3], jednakże oddaje ono ideę zależności rozpuszczalności od temperatury. Graficzna reprezentacja zależności stężenia dwutlenku węgla od temperatury [1] została przedstawiona na rysunku 1.



Rys.1. Zależność stężenia procentowego dwutlenku węgla od temperatury roztworu.

Analizując równanie (2) oraz rysunek 1 należy stwierdzić, iż w celu uzyskania największego stężenia dwutlenku węgla w roztworze wodnym należy zapewnić pracę reaktora w warunkach jak najniższej temperatury oraz najwyższego ciśnienia. Z uwagi na warunki panujące w przemyśle piekarniczym polegające na dużym jednorazowym zapotrzebowaniu na wodę nasyconą dwutlenkiem węgla oraz znaczną częstotliwość dozowań (rzędu dwóch na godzinę) nie jest możliwe zastosowanie układu chłodzenia reaktora (saturatora) z uwagi na duże zapotrzebowanie na energię. Dodatkowo dozowana woda winna posiadać temperaturę nie mniejszą niż 25 °C, a co za tym idzie chłodzenie reaktora jest czynnością zbędną lub wręcz niepożądaną. Schłodzenie mieszaniny o kilka °C w punkcie pracy rzędu 20 °C nie spowoduje znaczącego zysku stopnia rozpuszczalności (rys. 1), jakby to miało miejsce w okolicach wartości temperatury rzędu 5 °C, która z uwagi na rodzaj urządzenia jest technicznie i ekonomicznie nieosiągalna. Zdecydowano się na nasywanie wody o temperaturze panującej w sieci wodociągowej, tj. ok. 16-18 °C.

Pozostaje jeszcze kwestia doboru ciśnienia roboczego reaktora. Na tym etapie prac zdecydowano się zastosowanie w układzie standardowego regulatora ciśnienia dedykowanego do pracy z gazami technicznymi. Ciśnienie jakie udało się uzyskać wniósło 0,65 MPa (6,5 bara). Ciśnienie robocze ma też znaczący wpływ na uzyskiwany strumień wylotowy. Z uwagi na fakt, iż przy przyjętym powyżej ciśnieniu wylot gazowanej wody był gwałtowny i powodował ulotnienie się dwutlenku węgla zdecydowano się na zastosowanie specjalistycznego reduktora przepływu firmy Booth Dispensers Ltd. Reduktor ten jest dedykowanym rozwiązaniem do dozowania wody nasyconej dwutlenkiem węgla. Jego działanie nie ogranicza się jedynie do redukcji ciśnienia wyjściowego, ale również formowania strumienia w sposób zapewniający jak najbardziej równomierny przepływ pozbawiony turbulencji.

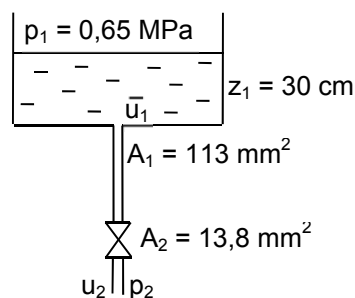
Model przepływu cieczy nasyconej dwutlenkiem węgla

W przypadku cieczy idealnych ich przepływy zostały ściśle opisane za pomocą równania Bernoulli'ego [6]:

$$(4) \quad \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + z_2$$

gdzie: p_1, p_2 – ciśnienia cieczy w punktach wlotowym i wylotowym; u_1, u_2 – prędkości przepływu cieczy w punktach wlotowym i wylotowym; z_1, z_2 – wysokości słupa cieczy w punktach wlotowym i wylotowym, ρ – masa właściwa cieczy; g – przyspieszenie ziemskie.

Aby przystąpić do modyfikacji równania Bernoulli'ego (4) należy dokonać pewnych założeń i uproszczeń. Uproszczony schemat układu dozowania wody nasyconej dwutlenkiem węgla przedstawiono na rysunku 2.

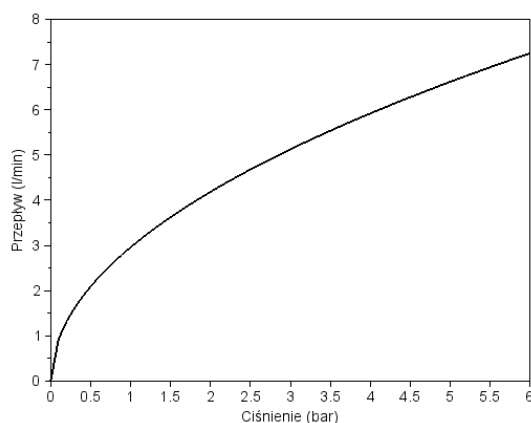


Rys.2. Schemat przedstawiający wypływ cieczy ze zbiornika.

W opisywanym przypadku operowanie wielkościami typu prędkość przepływu cieczy jest, z punktu widzenia celu rozważań, niewygodne i niedające interesującego nas rezultatu. Dlatego zdecydowano się zamiast prędkości przepływu zastosować parametr przepływu objętościowego. Wiadomym jest, że:

$$(5) \quad q = u_1 \cdot A_1 = u_2 \cdot A_2$$

gdzie: q – przepływ objętościowy, u_i – liniowa prędkość przepływu, A_i – pole powierzchni przekroju zwężki lub przewodu.



Rys.3. Zależność przepływu objętościowego cieczy od ciśnienia roboczego w zbiorniku.

Należy również zauważyć, że ciśnienia hydrostatyczne wywierane przez słup cieczy (z_i) są pomijalnie małe w porównaniu z ciśnieniem roboczym komory saturacyjnej, zatem można przyjąć, iż $z_1 = 0$. Ze względu na położenie dyszy wylotowej w urządzeniu można przyjąć, iż również $z_2 = 0$. Biorąc pod uwagę te założenia oraz podstawiając (5) do (4) otrzymujemy:

$$(6) \quad \frac{p_1}{\rho g} + \frac{q^2}{2A_1^2 g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{q^2}{2A_2^2 g}$$

Ciśnienie cieczy na końcu wylotu jest równe ciśnieniu atmosferycznemu, zatem $p_2 = 0$. Równanie (6) przyjmuje zatem postać:

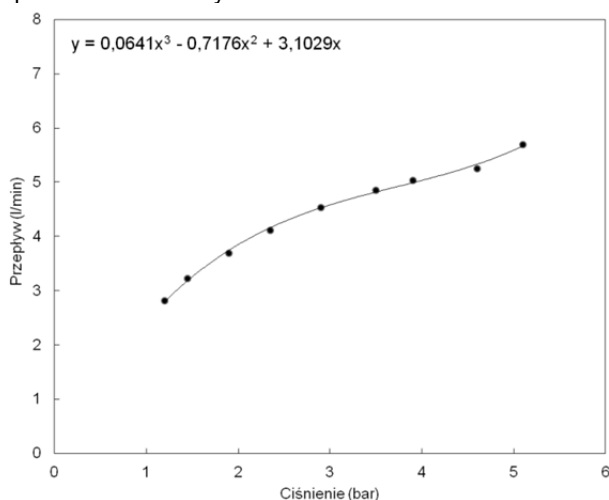
$$(7) \quad q = \sqrt{\frac{2A_1^2 A_2^2 p_1}{(A_1^2 - A_2^2)\rho}}$$

W przypadku, gdy opisywana ciecz jest idealna (nieściśliwa) równanie (7) w sposób precyzyjny wiąże ze sobą przepływ objętościowy na wylocie z ciśnieniem panującym w zbiorniku.

Niestety w opisywanym przypadku mamy do czynienia z mieszaniem cieczy i gazu, przez co równanie (7) powinno być uogólnione do postaci:

$$(8) \quad q(p_1) = \sqrt{\frac{2A_1^2 A_2^2 p_1}{(A_1^2 - A_2^2) \rho(p_1)}}$$

W związku z tym, że matematyczny opis zależności $\rho(p)$ wymaga zaawansowanej wiedzy z zakresu mechaniki płynów [6] oraz fizykochemii postanowiono opracować model uproszczony na podstawie badań empirycznych przepływów mieszanki w funkcji ciśnienia roboczego komory saturacyjnej. W tym celu przeprowadzono serię dozowań trwających po 45 s i metodą wagową określono masę wydozowanej mieszanki. Wyniki badań poddano aproksymacji funkcją wielomianową trzeciego stopnia z założeniem zerowej stałej. Model matematyczny zaprezentowano na rysunku 4.



Rys.4. Zależność przepływu objętościowego mieszanki wody i dwutlenku węgla od ciśnienia roboczego.

Podczas badań nie udało się uzyskać ciśnień poniżej 1 bara oraz powyżej 5,5 bara z uwagi na ograniczenia w funkcjonowaniu regulatora ciśnienia gazu. Porównując rysunek 3 oraz 4 można zauważyć pewną zbieżność modeli. Największe różnice występują przy ciśnieniach powyżej 3 barów i mogą one wynikać zarówno ze zjawisk związanych ze ściśliwością mieszanki, jak i stratami w rzeczywistym układzie hydraulicznym (np. przepływy turbulenty) [6]. W efekcie końcowym do dalszych rozważań zdecydowano się na użycie modelu uzyskanego empirycznie. Na podstawie analizy porównawczej z modelem Bernoulli'ego można stwierdzić, iż został on opracowany poprawnie.

Równanie bilansu cieplnego

Ostatnim elementem niezbędnym do wykonania urządzenia jest opracowanie algorytmu dozowania wody gorącej poprzez dotrysk do przepływającej mieszanki. Aby uniknąć podgrzewania wody nasyconej dwutlenkiem węgla i efekcie rozkładu jonów HCO_3^- , zdecydowano się na podgrzewanie mieszanki poprzez wydozowanie określonej ilości wody gorącej w dyszy wylotowej. Sposób ten zdaje się być na tym etapie badań bardziej optymalny niż nasywanie podgrzanej wcześniej wody (rysunek 1) z uwagi na znaczny spadek rozpuszczalności dwutlenku węgla wskutek wzrostu temperatury mieszanki. Równanie bilansu energetycznego może zostać zapisane jako (9).

$$(9) \quad Q_z + Q_c = Q_w$$

gdzie: Q_z – energia (ciepło) wydozowanej wody nasyconej dwutlenkiem węgla; Q_c – energia (ciepło) dodanej do mieszanki wody gorącej; Q_w – energia (ciepło) mieszanki końcowej

Wykorzystując definicję termodynamiczną ciepła [6] oraz biorąc pod uwagę, że ciepło właściwe wszystkich składników ze wzoru (9) jest jednakowe, można zapisać, że:

$$(10) \quad m_z T_z + m_c T_c = m_w T_w$$

gdzie: m_z – masa wydozowanej wody nasyconej dwutlenkiem węgla; T_z – temperatura wydozowanej wody nasyconej dwutlenkiem węgla; m_c – masa dodanej do mieszanki wody gorącej; T_c – temperatura dodanej do mieszanki wody gorącej; m_w – masa mieszanki końcowej; T_w – temperatura mieszanki końcowej.

Dozowanie wody gorącej będzie się odbywało poprzez cykliczne otwieranie i zamykanie zaworu wody gorącej z okresem równym $T_\alpha = 2$ s oraz wypełnieniem wynoszącym α . Masa wydozowanej wody może zostać określona zależnością:

$$(11) \quad m = \int_0^{t_z} q(t) dt$$

gdzie: t_z – okres dozowania mieszanki wody i dwutlenku węgla.

Przy stałym ciśnieniu pracy komory saturacyjnej, a zatem przy stałej wartości przepływu mieszanki oraz przy założeniu cyklicznej pracy zaworu wody gorącej ze współczynnikiem wypełnienia równym α można równanie (11) uprościć do:

$$(12) \quad m_z = q_z \cdot t_z$$

$$(13) \quad m_c = q_c \cdot \alpha \cdot t_z$$

gdzie: q – przepływ objętościowy odpowiednio mieszanki i wody gorącej.

Z założenia działania urządzenia wynika, iż całkowity czas dozowania jest równy czasowi dozowania wody nasyconej dwutlenkiem węgla, zatem:

$$(14) \quad m_w = t_z (\alpha \cdot q_c + q_z)$$

Podstawiając (11), (12) i (13) do (10) otrzymujemy:

$$(15) \quad q_z t_z T_z + \alpha q_c t_z T_c = t_z T_w (\alpha q_c + q_z)$$

Wyznaczając α z zależności (15) otrzymujemy:

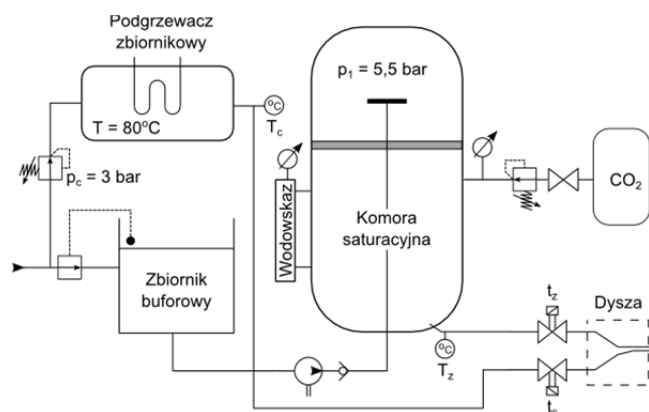
$$(16) \quad \alpha = \frac{q_z (T_w - T_z)}{q_c (T_c - T_w)}$$

Równanie przedstawione na rysunku 4 oraz zależność (16) pozwalają na implementację modelu do rzeczywistego urządzenia. Zanim jednak to nastąpi należy jeszcze zająć się sprawą przepływu objętościowego wody gorącej. Aby zapewnić jego wartość na stałym poziomie zastosowano dodatkowy regulator ciśnienia oraz zbiornik przeponowy w obwodzie zasilania ogrzewacza zbiornikowego o pojemności znamionowej wynoszącej 10 l. Jako ciśnienie robocze układu gorącej wody przyjęto $p_c = 0,3$ MPa, a jej przepływ objętościowy wyniósł $q_c = 1,88$ l/min.

Implementacja opracowanych modeli do urządzenia saturacyjnego i ich weryfikacja

Po wykonaniu wstępnych prób oraz opracowaniu modeli matematycznych wykonano model saturatora

piekarniczego, którego zadaniem było wytwarzanie wody nasyconej dwutlenkiem węgla. Jego blokowy schemat hydrauliczno-pneumatyczny przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5. Schemat hydrauliczno-pneumatyczny saturatora piekarniczego.

Woda, która ma zostać poddana procesowi gazowania jest dostarczana poprzez wlot urządzenia do zbiornika buforowego o pojemności 10 l oraz poprzez regulator ciśnienia (p_c) do podgrzewacza zbiornikowego wyposażonego dodatkowo w zbiornik przeponowy oraz zawór nadmiarowy. Temperatura robocza zbiornika została ustawiona na maksymalną zalecaną przez producenta wynoszącą 80 °C. Króciec wyjściowy podgrzewacza został wyposażony w czujnik temperatury oparty o przetwornik Pt100. Gorąca woda jest następnie doprowadzana do elektrozaworu znajdującego się w głowicy dozującej, a następnie bezpośrednio do dyszy. Zastosowanie zbiornika buforowego wody zimnej jest niezbędne z uwagi na chwilowe znaczne zapotrzebowanie pompy wirowej. Wyjście pompy jest doprowadzone wlotu wody w komorze saturacyjnej, gdzie ciecz jest rozpryskiwana, a następnie przechodzi przez przegrodę saturacyjną. Ciśnienie robocze zbiornika jest mierzone poprzez elektroniczny manometr pracujący w standardzie 4/20 mA o zakresie 1 MPa. Na jego podstawie za pomocą równania (rysunek 4) jest szacowany przepływ wody nasyconej dwutlenkiem węgla. Poziom cieczy w zbiorniku jest monitorowany za pomocą wodowskazu konduktometrycznego (rys. 4). Układy kondycjonerów odpowiedzialne za pomiar temperatur oraz poziomów wody zostały wykonane we własnym zakresie zgodnie ze standardami wejściowymi podanymi przez producenta sterownika [8]. Wyjście zbiornika saturacyjnego jest doprowadzone poprzez układ pomiaru temperatury wody do elektrozaworu znajdującego się w głowicy dozującej. Czasy otwarcia zaworów są szacowane na podstawie równań (12), (13) i (16).

Z uwagi na konieczność dokonywania obliczeń w czasie rzeczywistym z użyciem arytmetyki zmiennoprzecinkowej zastosowano do sterowania całym układem sterownik PLC firmy Horner APG model HEXE220C012 [8]. Implementacji całej logiki układu oraz opracowanych modeli i algorytmów dokonano w języku drabinkowym [5] wzbogaconym o zaawansowane matematyczne bloki funkcjonalne.

W celu weryfikacji poprawności zaproponowanych modeli przeprowadzono badania powtarzalności wydostawianej masy oraz temperatury wody nasyconej dwutlenkiem węgla. Z uwagi na techniczne warunki badań (zakres pomiarowy wagi analitycznej) jako masę przyjęto $m_w = 4,0$ kg i temperaturę $T_w = 25$ °C. Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 1. Jako wskaźnik powtarzalności przyjęto współczynnik zmienności (cv) rozumiany jako

stosunek odchylenia standardowego próby do jej wartości średniej (17).

$$(17) \quad cv = \frac{sd}{m} \cdot 100\%$$

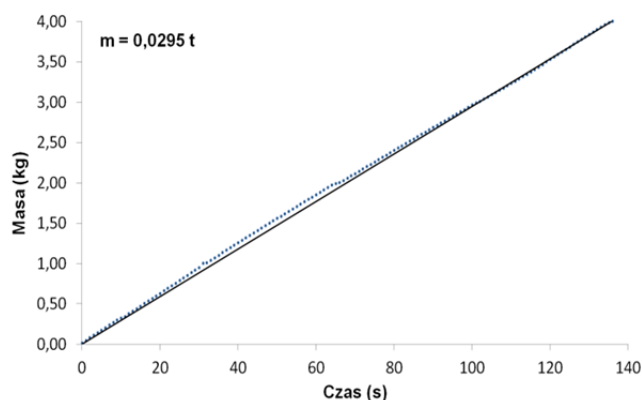
gdzie: sd – odchylenie standardowe, m – wartość średnia

Korzystanie ze współczynnika zmienności jako wskaźnika jest bardziej korzystne zarówno w przypadku urządzeń pomiarowych, jak i kontrolnych. Część producentów urządzeń do dnia dzisiejszego oprócz zamieszczenia informacji o niepewności dodaje również informację o współczynniku zmienności. Prezentowane w niniejszym artykule wyniki mają charakter czysto eksperymentalny, zatem analityczne szacowanie niepewności pomiaru zdaje się być nieuzasadnione.

Tabela 1. Wyniki badań powtarzalności dozowania wody nasyconej dwutlenkiem węgla

Mierzona wielkość	Wartość średnia serii	Współczynnik zmienności (cv)
Masa (m_w)	4,01 kg	1,5%
Temperatura (T_w)	24,4 °C	2,1%

Wyznaczone współczynniki zmienności (cv) w przypadku dozowanej masy, jak i zmierzonej temperatury są mniejsze od 3%, zatem zaproponowany model jest w dostateczny sposób zbieżny z rzeczywistym obiektem. Na korzyść zaproponowanego modelu przepływu cieczy nasyconej dwutlenkiem węgla przemawia dodatkowo fakt, iż podczas cyklu dozowania zauważono znaczne (rzędu 10%) wahania ciśnienia roboczego wewnątrz komory saturacyjnej. Miały one miejsce głównie w chwilach załączania pompy wirowej. Aby zobrazować zakłócenia w przepływie przeprowadzono rejestrację procesu dozowania wody gazowanej do naczynia pomiarowego. W tym celu odczytywano co 1 s masę wskazywaną przez wagę, korzystając z interfejsu pomiarowego wagi.



Rys.6. Przebieg czasowy procesu dozowania wody gazowanej do naczynia pomiarowego.

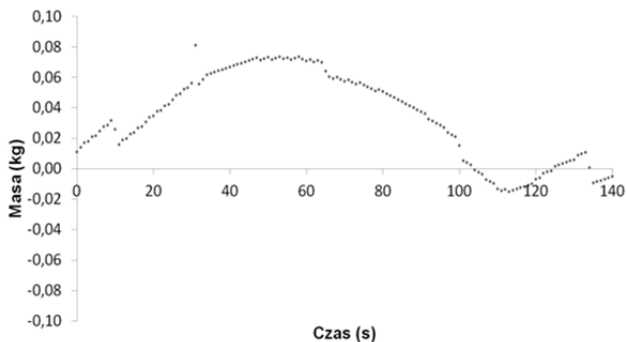
Z uwagi na problem w interpretacji przebiegu wyznaczono wartości resztowe procesu zgodnie z zależnością:

$$(18) \quad m_r(t) = q_{reg} \cdot t - m_e(t)$$

gdzie: $m_r(t)$ – masa resztowa, q_{reg} – wartość przepływu masowego wyznaczona na podstawie prostej regresji (rysunek 6), $m_e(t)$ – masa odczytana z wagi w chwili czasu t .

Analizując wykres na rysunku 7 można zauważyć, iż błędy powstałe w trakcie dozowania mają charakter zarówno stochastyczny, jak i systematyczny. Źródło błędów systematycznych leży najpewniej w nieliniowej charakterystyce

wagi, jednak jest on znikomy. Zmiany wartości resztowych dozowanej masy w funkcji czasu na rysunku 7 są spowodowane najpewniej poprzez wahania ciśnienia roboczego w zbiorniku saturacyjnym w trakcie dozowania.



Rys.7. Przebieg czasowy wartości resztowych dozowanej wody gazowanej do naczynia pomiarowego.

Odchylenie standardowe obliczonej próby reszt wyniosło zaledwie 36 g, co w odniesieniu do masy całej próby (4 kg) stanowi błąd na poziomie 0.9 %. Otrzymany w ten sposób błąd jest mniejszy niż współczynnika zmienności próby dozowań (tabela 1), co potwierdza przypuszczenia o źródle błędów leżących głównie w zjawisku wahań ciśnienia w zbiorniku roboczym i niedokładności modelu wiążącego przepływ.

Wnioski

Celem niniejszego artykułu była próba opracowania modeli procesów fizykochemicznych występujących w saturatorze piekarniczym. Z uwagi na postawione założenia konstrukcyjne prace składają się z trzech etapów. W pierwszym dobrano ciśnienie pracy urządzenia oraz opracowano model matematyczny wiążący przepływ masowy dozowanej mieszaniny z tymże ciśnieniem. Drugi etap polegał na opracowaniu algorytmu dozowania gorącej wody do mieszaniny w celu uzyskania zadanej przez operatora temperatury. Trzecim etapem było skonstruowanie i wykonanie urządzenia oraz poddanie zaproponowanych modeli weryfikacji praktycznej. W wyniku badań stwierdzono, iż modele matematyczne opisywanych procesów fizykochemicznych są poprawne, a popełnione w wyniku modelowania błędy są na zadowalającym poziomie.

W wyniku prowadzonych prac powstało w pełni funkcjonalne, mobilne urządzenie do dozowania wody nasyconej dwutlenkiem węgla, które zostanie przekazane

do testów w warunkach przemysłowych. Niestety z uwagi na nowatorski charakter urządzenia (wersja dla piekarnictwa) nie istnieje możliwość porównania jego parametrów z innymi urządzeniami tej klasy. Systemy saturacji typu *postmix* wykonują zazwyczaj dozowanie przez określony przez użytkownika czas, a powtarzalność dozowanej masy nie jest parametrem krytycznym.

Dalszy rozwój tematyki powinien być prowadzony w kierunku opracowania dyszy dozującej wraz z reduktorem ciśnienia. Jest to podyktowane pewnymi obserwacjami, dokonanymi podczas badań, związanymi z gwałtownym i turbulentnym wypływem cieczy z dozownika. Należy również zastanowić się nad możliwością zastosowania przepływomierza objętościowego oraz opracować model mający na celu korektę jego wskazań związaną z pomiarem objętości mieszaniny cieczy i gazu.

Należy również wziąć pod uwagę możliwość zasilania saturatora z dwóch źródeł wody pitnej: wody wodociągowej o temperaturze kilkunastu stopni oraz tzw. wody lodowatej o temperaturze nieprzekraczającej 5 °C. Powyższy pomysł pojawił się w trakcie testów urządzenia w piekarni, gdzie w zależności od pory roku i temperatury przechowywania składników zakres temperatur zadanych dozowanej wody waha się od kilku nawet do kilkudziesięciu stopni Celsjusza.

Artykuł powstał w ramach realizacji pracy statutowej nr S/WE/1/10.

LITERATURA

- [1] Dean J. A., *Lange's Handbook Of Chemistry*, McGraw-Hill, 1999.
- [2] Myers R., *The Basics of Chemistry*, Greenwood Press, 2003.
- [3] Smith F. L., Harvey A. H., *Avoid Common Pitfalls When Using Henry's Law*, CEP Magazine No. 126, September 2007.
- [4] *Poradnik fizykochemiczny*, WNT, Warszawa, 1974.
- [5] Kwaśniewski J., *Sterowniki PLC w praktyce inżynierskiej*, BTC Korporacja, 2008.
- [6] Chadwick A., Morfett J., Borthwick M., *Hydraulics in civil and environmental engineering*, CRC Press, 2013.
- [7] Jańczak D., *Interferences suppression in data fusion systems*, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 88, nr 10b (2012), s. 313-316.
- [8] Nota katalogowa sterownika HEXE220C012.

Autorzy: dr inż. Andrzej Holiczer, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, e-mail: a.holiczer@pb.edu.pl; Grzegorz Malinowski, GM TECHNOLOGIE, ul. Pochyła 15, 15-790 Białystok, e-mail: biuro@gmtechnologie.pl