

# ZAGADNIENIE OPTYMALNEGO SKŁADU MIESZANIN Z PARAMETRAMI ROZMYTYMI JAKO MODEL OPTYMALIZACJI WSADU DLA PIECÓW EAF

**Bolesław MACHULEC, Andrzej KUŹNIK**

**Streszczenie:** Przedstawiono wyniki badań odnoszące się do zastosowań systemów rozmytych do rozwiązywania zagadnień decyzyjnych optymalnego namiarowania wsadu w procesie elektrostalowniczym. Jako model do opisu nie do końca sprecyzowanych i posiadających niejednoznaczny charakter właściwości złomu stalowego zastosowano liczby rozmyte z trapezoidalną funkcją przynależności. Stosując zasady arytmetyki na liczbach rozmytych sformułowano model optymalizacji namiaru wsadu dla pieców EAF, który jest rozszerzeniem klasycznego modelu optymalizacji składu mieszanin. Przedstawiono przykład praktycznego zastosowania modelu optymalizacji wsadu z parametrami rozmytymi do optymalizacji wsadu dla wytopu stali S355J2G3 (18G2A) w piecach EAF.

**Słowa kluczowe:** proces EAF, model, optymalizacja wsadu, liczby rozmyte, namiar wsadu

## 1. Wstęp

W klasycznych modelach i podejściu do obliczeń w technice wymagane są dokładne i z góry określone wartości liczbowe parametrów. Jednak w praktyce spotykamy się z parametrami nie do końca sprecyzowanymi, ponieważ informacja o danym procesie technologicznym nie jest wystarczająca. Określając właściwości określonej partii złomu stalowego (np. skład chemiczny), nie jesteśmy w stanie dokładnie (punktowo) określić tych wartości. Wynika to z niejednorodności i specyfiki tego surowca, co związane jest z jego pochodzeniem i sposobem pozyskiwania. To sprawia, że jego podstawowe właściwości takie jak ciężar nasypowy i skład chemiczny są niejednoznaczne i posiadają "rozmyte" i przypadkowy charakter. Dotyczy to również parametrów procesu technologicznego wytopu stali w piecach EAF (Electric Arc Furnaces) takich jak uzyski masy i uzyski pierwiastków w trakcie roztopiania wsadu. To ogranicza przydatność klasycznych modeli optymalizacji wsadu dla pieców EAF w których wymagane są dokładne i z góry określone wartości liczbowe parametrów. Najprostszą postać takiego modelu można przedstawić w sposób następujący [1]:

$$\left. \begin{array}{l} 0.001 \mathbf{f}^T \mathbf{x} \rightarrow \min \\ \text{z warunkami} \\ \underline{\mathbf{b}} \cdot m \leq \mathbf{Ax} \leq \bar{\mathbf{b}} \cdot m \\ \underline{\mathbf{u}}_m^T \mathbf{x} = m \\ \underline{\mathbf{x}} \leq \mathbf{x} \leq \bar{\mathbf{x}} \end{array} \right\} \quad (1)$$

gdzie:  $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_N]^T$  - wektor zmiennych,  
 $x_j$  - masa składnika wsadu  $j$  w namiarze,  $kg$ ,  
 $\underline{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{x}}$  - wektory  $N \times 1$ , odpowiednio dolne i górne ograniczenia dot. struktury  
zużycia poszczególnych składników wsadu,  $kg$ ,  
 $\mathbf{f}$  - wektor  $N \times 1$ , ceny jednostkowe poszczególnych składników wsadu,  $zł/t$ ,  
 $m$  - masa kąpeli metalowej po roztopieniu,  $kg$ ,  
 $\mathbf{u}_m$  - wektor  $N \times 1$ , uzyski masy dla poszczególnych składników wsadu,  
 $\underline{\mathbf{b}}, \bar{\mathbf{b}}$  - wektory  $M \times 1$ , odpowiednio dolne i górne zaw. pierwiastków  
w składzie chemicznym metalu po roztopieniu, %,  
 $\mathbf{A} = [a_{ij}]$  - macierz  $M \times N$ ,  $a_{ij}$  - zaw.  $i$ -tego pierwiastka w  $j$ -tym składniku  
wsadu po uwzględnieniu uzysku  $u_{ij}$  w trakcie roztopiania, %,

Elementy macierzy  $\mathbf{A}$  określone są następująco:

$$a_{ij} = a'_{ij} \cdot u_{ij} \quad (2)$$

gdzie:  $a'_{ij}$  - zawartość  $i$ -tego pierwiastka w  $j$ -tym składniku wsadu w %  
 $u_{ij}$  - uzysk pierwiastka  $i$  pochodzącego ze składnika wsadu  $j$

Celem niniejszej pracy jest rozszerzenie modelu optymalizacji (1) na przypadek bardziej realistyczny z punktu widzenia procesu technologicznego wytopu stali, aby było możliwe uwzględnienie parametrów wsadu określonych w sposób przybliżony z mniejszą lub większą dokładnością. Zakłada się, że jedyną dostępną informacją są przedziały wartości w jakich powinny mieścić się z 100% pewnością każdy z parametrów procesu technologicznego, np. skład chemiczny surowców (złom stalowy), uzyski masy i uzyski pierwiastków, których nie można określić w sposób jednoznaczny (punktowo). W zależności od posiadanych informacji przedziały te mogą być większy lub mniejsze. Oprócz przedziałów wartości w których poszczególne parametry powinny oscylować, można również określić przedziały w których wartości te są najbardziej prawdopodobne. Ze względu na nieokreśloność, wykonywanie klasycznych działań arytmetycznych na przedziałach i wielkościach niejednoznacznych nie jest możliwe, dlatego do opisu tego typu obiektów wykorzystano liczby i przedziały rozmyte [2-4].

## 2. Liczby rozmyte, jako model do opisu właściwości parametrów procesu technologicznego wytopu stali

Teoria zbiorów rozmytych oraz liczby i przedziały rozmyte sformułowane zostały przez L. A. Zadeha (1965r) [2]. Zbiorem rozmytym  $A$  w pewnej (niepustej) przestrzeni  $X$ , tzn.  $A \subseteq X$ , nazywamy zbiór par:

$$A = \{(x, \mu_A(x)); x \in X\} \quad (3)$$

Występująca w (3) funkcja :

$$\mu_A : X \rightarrow [0,1] \quad (4)$$

jest funkcją przynależności zbioru rozmytego  $A$  [2,3], która każdemu elementowi  $x \in X$  przypisuje jego stopień przynależności do zbioru rozmytego  $A$ . Można wyróżnić 3 przypadki:

1.  $\mu_A(x) = 1$  oznacza pełną przynależność elementu  $x$  do zbioru  $A$ , tzn.  $x \in A$ ,
2.  $\mu_A(x) = 0$  oznacza brak przynależności elementu  $x$  do zbioru  $A$ , tzn.  $x \notin A$ ,
3.  $0 < \mu_A(x) < 1$  oznacza częściową przynależność elementu  $x$  do zbioru  $A$ .

Liczbą rozmytą  $M$ , jest szczególny rodzaj zbioru rozmytego, gdy zbiór  $X$ , obszar rozważań zbioru rozmytego jest zbiorem liczb rzeczywistych, ( $X = \mathcal{R}$ ), a funkcja przynależności (4) spełnia pewne dodatkowe warunki [3]. W ogólnym przypadku funkcje przynależności (4) mogą przyjmować różne postacie, a działania arytmetyczne na liczbach rozmytych są obliczeniowo dość skomplikowane [3]. Dlatego jako model do opisu parametrów złomu stalowego, oraz niektórych wielkości charakteryzujących proces wytopu stali w piecach EAF, których nie można określić w sposób jednoznaczny przyjęto formę trapezoidalną liczb i przedziałów rozmytych, dla których funkcja przynależności przyjmuje postać [4] (rys.1):

$$\mu_M(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{\underline{m}-l}, & \text{jeżeli } l \leq x \leq \underline{m} \\ 1, & \text{jeżeli } \underline{m} \leq x \leq \bar{m} \\ \frac{x-u}{\bar{m}-u}, & \text{jeżeli } \bar{m} \leq x \leq u \\ 0, & \text{jeżeli } x \notin (l, u) \end{cases} \quad (5)$$

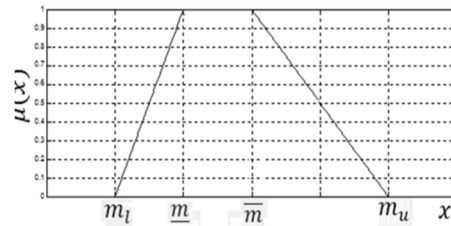
Zgodnie z notacją [3,4] trapezoidalnego przedziału rozmytego każdą wielkość  $m$  zapisuje się za pomocą 4 parametrów (rys. 1):

$$m = (m_l, \underline{m}, \bar{m}, m_u) \quad (6)$$

gdzie:  $\underline{m}, \bar{m}$  - dolna i górna wartość modalna formy trapezoidalnej  $m$ ,

$m_l, m_u$  - dolna (low) i górna (up)

wartość przedziału rozmytego.



Rys.1 Trapezoidalna postać przedziału rozmytego  $m = (m_l, \underline{m}, \bar{m}, m_u)$

Należy zwrócić uwagę, że dla szczególnych przypadków postać liczby trapezoidalnej obejmuje również liczby rzeczywiste i liczby rozmyte o prostokątnych i trójkątnych funkcjach przynależności:

- liczba rzeczywista  $m$ , jeśli  $m = (m, m, m, m)$ ,
- przedział liczbowy  $[\underline{m}, \bar{m}]$ , jeśli  $m = (\underline{m}, \underline{m}, \bar{m}, \bar{m})$ ,
- liczba rozmyta o trójkątnej funkcja przynależności:  $m = (m_l, m, m, m_u)$ .

Operacje arytmetyczne na przedziałach rozmytych postaci (5), (6) sprowadzają się do działań na ich końcach [4]. Jeśli  $a = (a_l, \underline{a}, \bar{a}, a_u)$ ,  $b = (b_l, \underline{b}, \bar{b}, b_u)$ , to formuły dla dodawania i mnożenia, oraz nierówności  $a \geq 0$  określa się następująco [4]:

$$\left. \begin{aligned} (a_l, \underline{a}, \bar{a}, a_u) \oplus (b_l, \underline{b}, \bar{b}, b_u) &= (a_l + b_l, \underline{a} + \underline{b}, \bar{a} + \bar{b}, a_u + b_u) \\ (a_l, \underline{a}, \bar{a}, a_u) \otimes (b_l, \underline{b}, \bar{b}, b_u) &\approx (a_l \cdot b_l, \underline{a} \cdot \underline{b}, \bar{a} \cdot \bar{b}, a_u \cdot b_u) \\ a \geq 0 &\leftrightarrow a_l \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Wyodręźeniem liczby rozmytej  $m$  (ang. defuzzification) jest zastępienie zbioru rozmytego o funkcji przynależności  $\mu_m(x)$  liczbą  $\hat{m} \in \mathcal{R}$  aproksymującą jej wartość [3,4]. Spośród wielu algorytmów wyodręźania liczb rozmytych [4], na uwagę zasługuje metoda bisekcji (BOA - bisector of area), w której liczba  $\hat{m}$  przyjmuje taką wartość, że dzieli powierzchnię pod krzywą  $\mu_m(x)$  na dwie równe połowy. Dla trapezoidalnych liczb rozmytych algorytm wyodręźania BOA posiada prostą interpretację i sprowadza się do następującej zależności [4]:

$$\hat{m} = \frac{1}{4}(m_l + \underline{m} + \overline{m} + m_u) \quad (8)$$

Poniżej zostanie sformułowany model optymalizacji składu mieszanin z parametrami rozmytymi o trapezoidalnych funkcjach przynależności, oraz zostanie przedstawiony przykład jego praktycznego zastosowania dla optymalizacji namiaru wsadu dla pieców EAF.

### 3. Model optymalizacji wsadu dla pieców EAF z parametrami rozmytymi

Zgodnie z notacją (6), do zapisu liczb trapezoidalnych potrzebne są 4 parametry. Stosując zapis symboliczny, oraz oznaczenia stosowane w modelu (1), skład chemiczny poszczególnych gatunków złomu, można przedstawić za pomocą trapezoidalnych liczb rozmytych (6) w postaci układu macierzy:

$$\mathbf{A}' = [\mathbf{A}'_l, \underline{\mathbf{A}'}, \overline{\mathbf{A}'}, \mathbf{A}'_u] \quad (9)$$

gdzie:  $\mathbf{A}'_l, \mathbf{A}'_u$  – macierze  $M \times N$ , których elementy określają odpowiednio końce dolnych i górnych wartości przedziałów rozmytych dla % zaw. pierwiastków w poszczególnych gatunkach złomu, %

$\underline{\mathbf{A}'}, \overline{\mathbf{A}'}$  – macierze  $M \times N$ , których elementy określają odpowiednio dolne i górne wartości modalne form trapezoidalnych dla % zaw. pierwiastków w poszczególnych gatunkach złomu, %

Analogicznie w postaci układu macierzy  $M \times N$  przedstawiamy uzyski w trakcie roztapiania poszczególnych gatunków złomu  $\mathbf{U}$

$$\mathbf{U} = [\mathbf{U}_l, \underline{\mathbf{U}}, \overline{\mathbf{U}}, \mathbf{U}_u] \quad (10)$$

Za pomocą macierzy  $\mathbf{A}'$  i  $\mathbf{U}$  możemy zdefiniować macierz  $\mathbf{A}$  określającą w postaci liczb rozmytych składy chemiczne poszczególnych gatunków złomu z uwzględnieniem zgaru pierwiastków w trakcie roztapiania. Stosując algorytm (7) mnożenia liczb trapezoidalnych, macierz  $\mathbf{A}$  jest układem czterech podmacierzy:

$$\mathbf{A} = [\mathbf{A}_l, \underline{\mathbf{A}}, \overline{\mathbf{A}}, \mathbf{A}_u] = [\mathbf{A}'_l \cdot \mathbf{U}_l, \underline{\mathbf{A}'} \cdot \underline{\mathbf{U}}, \overline{\mathbf{A}'} \cdot \overline{\mathbf{U}}, \mathbf{A}'_u \cdot \mathbf{U}_u] \quad (11)$$

Występujące w (11) działania macierzowe zdefiniowane zostały w (2) i polegają na mnożeniu odpowiadających sobie elementów obydwu macierzy np.:

$$\mathbf{A}_l = [a_{ij_l}] = [a'_{ij_l} \cdot u_{ij_l}] \quad , \text{ dla } i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

W identyczny sposób określamy elementy macierzy  $\underline{\mathbf{A}}, \bar{\mathbf{A}}, \mathbf{A}_u$  występujących w (11). W podobny sposób za pomocą liczb trapezoidalnych przedstawiamy wektory gęstości masy nasypowej  $\underline{\mathbf{d}}$  oraz wektory uzysków masy  $\underline{\mathbf{u}}$  jako układy czterech wektorów  $N \times 1$ :

$$\underline{\mathbf{d}} = [\underline{d}_l, \underline{d}_u, \bar{d}, d_u] \quad (13)$$

$$\underline{\mathbf{u}} = [\underline{u}_l, \underline{u}_u, \bar{u}, u_u] \quad (14)$$

Dla tak określonych parametrów modelu, stosując zasady arytmetyki dla trapezoidalnych liczb rozmytych (7), oraz zakładając, że obliczenia prowadzone są dla masy  $m = 1000$  kg ciekłego metalu, można rozszerzyć klasyczny model (1) optymalizacji wsadu dla pieców EAF w sposób następujący:

$$0.001 \mathbf{f}^T \mathbf{x} \rightarrow \min, \text{ zł} \quad (15)$$

z warunkami:

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{A}_l \mathbf{x} \geq \underline{\mathbf{b}} \cdot m_u \\ \mathbf{A}_u \mathbf{x} \leq \bar{\mathbf{b}} \cdot m_l \end{array} \right\} \quad (16)$$

$$\left. \begin{array}{l} m_l = \mathbf{u}_l^T \mathbf{x} \geq 0.975m \\ m_u = \mathbf{u}_u^T \mathbf{x} \leq 1.025m \\ \hat{m} = m \end{array} \right\} \quad (17)$$

$$\left. \begin{array}{l} 0.01 \underline{g}_1 \mathbf{1}^T \mathbf{x} \leq \sum_{i \in \text{wióry}} x_i \leq 0.01 \bar{g}_1 \mathbf{1}^T \mathbf{x} \\ 0.01 \underline{g}_2 \mathbf{1}^T \mathbf{x} \leq \sum_{i \in \text{lekki}} x_i \leq 0.01 \bar{g}_2 \mathbf{1}^T \mathbf{x} \\ 0.01 \underline{g}_3 \mathbf{1}^T \mathbf{x} \leq \sum_{i \in \text{średni}} x_i \leq 0.01 \bar{g}_3 \mathbf{1}^T \mathbf{x} \\ 0.01 \underline{g}_4 \mathbf{1}^T \mathbf{x} \leq \sum_{i \in \text{ciężki}} x_i \leq 0.01 \bar{g}_4 \mathbf{1}^T \mathbf{x} \end{array} \right\} \quad (18)$$

$$\left. \begin{array}{l} \bar{\mathbf{v}} \cdot \mathbf{1}^T \mathbf{x} \leq \mathbf{v}_l^T \mathbf{x} \\ \underline{\mathbf{v}} \cdot \mathbf{1}^T \mathbf{x} \geq \mathbf{v}_u^T \mathbf{x} \end{array} \right\} \quad (19)$$

$$\underline{\mathbf{x}} \leq \mathbf{x} \leq \bar{\mathbf{x}} \quad (20)$$

$$\mathbf{x} \geq \mathbf{0} \quad (21)$$

gdzie:

$$\mathbf{v}_l^T = \left[ \frac{1}{d_{1u}} \quad \frac{1}{d_{2u}} \quad \dots \quad \frac{1}{d_{Nu}} \right] \quad , m^3/Mg$$

$$\mathbf{v}_u^T = \left[ \frac{1}{d_{1l}} \quad \frac{1}{d_{2l}} \quad \dots \quad \frac{1}{d_{Nl}} \right] \quad , m^3/Mg$$

$$\underline{\mathbf{v}} = \frac{1}{\underline{d}} \quad , \quad \bar{\mathbf{v}} = \frac{1}{\bar{d}} \quad , \quad m^3/Mg$$

$\underline{d}, \bar{d}$  - ograniczenia dolne i górne dot. średniej gęstości nasypowej wsadu,  $Mg/m^3$

$\underline{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{x}}$  - wektory  $N \times 1$  dolnych i górnych ograniczeń zmiennych,  $kg$

$$\left. \begin{aligned} \underline{x} &= 0.01 \cdot \mathbf{1}^T \underline{x} \underline{c} \\ \bar{x} &= 0.01 \cdot \mathbf{1}^T \underline{x} \bar{c} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

$\underline{c}, \bar{c}$  - wektory  $N \times 1$  dolnych i górnych udziałów procentowych złomu we wsadzie, %

$(m_l, \underline{m}, \bar{m}, m_u)$  - "rozmyta" masa metalu po roztopieniu,  $kg$

$$(m_l, \underline{m}, \bar{m}, m_u) = (\mathbf{u}_l^T \underline{x}, \underline{\mathbf{u}}^T \underline{x}, \bar{\mathbf{u}}^T \underline{x}, \mathbf{u}_u^T \underline{x}) \quad (23)$$

$\hat{m}$  - wyostrzona wartość liczby rozmytej (23) reprezentującej masę metalu

$$\hat{m} = \frac{1}{4} \cdot (m_l + \underline{m} + \bar{m} + m_u)$$

Oprócz warunków dotyczących składu chemicznego metalu po roztopieniu (16), oraz warunków dot. struktury zużycia surowców (18), (22), uwzględnia się ograniczenia dotyczące średniej gęstości nasypowej wsadu (19), oraz tolerancję masy metalu po roztopieniu (17):

$$m = 1000 \text{ kg} \pm 2.5\%,$$

Dodatkowo wartość  $\hat{m}$  reprezentująca masę kąpieli metalowej spełnia warunek:  $\hat{m} = m$ .

Można zauważyć, że struktura modelu z parametrami rozmytymi (15) ÷ (21) nie uległa zmianie i jest zbliżona do klasycznego modelu optymalizacji wsadu (1). W warunkach ograniczających (16)÷(22) uwzględnia się skrajne wartości liczb trapezoidalnych (6) reprezentujących poszczególne parametry procesu technologicznego o charakterze niejednoznacznym dotyczące składu chemicznego i gęstości nasypowej wsadu, współczynników uzysku masy i pierwiastków w trakcie roztopiania, oraz masy i składu chemicznego metalu po roztopieniu. To sprawia, że jeśli układ warunków (16)-(21) nie jest sprzeczny, oraz odpowiednie przedziały reprezentujące "rozmyte" parametry procesu technologicznego będą wystarczająco duże, to można mieć pewność, że uzyskane za pomocą modelu rozwiązanie optymalne spełni w warunkach rzeczywistych założone wymagania.

#### 4. Przykład optymalizacji wsadu dla procesu wytopu stali S355J2G3 w piecach EAF za pomocą modelu z parametrami rozmytymi

W obliczeniach symulacyjnych wykorzystano dane liczbowe parametrów technologicznych wytopu stali S355J2G3 pochodzące z prac badawczych i wdrożeniowych realizowanych w Stalowni ISD Huta Częstochowa Sp. z o.o. przez zespół IMŻ [5] ÷ [8] uwagi na to, że oryginalne dane nie spełniały wymagań modelu (15) ÷ (21), właściwości surowców do produkcji stali S355J2G3, a także parametry technologicznego procesu wytopu stali w piecu EAF (uzyski masy, uzyski pierwiastków) poddano odpowiedniej modyfikacji numerycznej polegającej na "sztucznym" procesie ich rozmywania. Przyjęto założenie, że granice przedziałów trapezoidalnych (6) dla poszczególnych parametrów są proporcjonalne do ich wartości średnich. Surowcami do produkcji stali S355J2G3 o składzie chemicznym przedstawionym w tabelicy 1 są różne gat. złomu, których podstawowe właściwości przedstawiono w tabelicy 2. Z uwagi na ograniczoną ilość miejsca i trudności edycyjne w tabelicy 2 zamieszczono jedynie najbardziej niezbędne do

sformułowania modelu (15)÷(21) dane, tj. dolne i górne wartości przedziałów trapezoidalnych (6).

Tab. 1. Skład chemiczny stali S355J2G3 i skład chemiczny metalu w pierwszej próbie po roztopieniu

Ogr.	Skład chemiczny, % mas.									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn
$\underline{a}^T, \%$	max	1.00	0.20	max	max	max	max	max	max	max
$\overline{a}^T, \%$	0.20	1.50	0.55	0.035	0.035	0.30	0.30	0.08	0.30	0.030

Ogr.	Skład chemiczny kąpieli metalowej w 1-szej próbie po roztopieniu, % mas.									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn
$\underline{b}^T, \%$	0.10	0.00	0.00	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
$\overline{b}^T, \%$	0.20	1.50	0.55	0.030	0.030	0.30	0.30	0.08	0.30	0.020

Tab. 2. Dolne (A.) i górne (B.) właściwości przedziałów (9) dla składu chemicznego, ( $A_l^T, A_u^T$ ), gęstości nasypowych (13) ( $d_l, d_u$ ), oraz ceny jednostkowe surowców do produkcji stali S355J2G3

A.

Lp.	Gat. złomu	Rodzaj złomu	Gęstość $d$ t/m <sup>3</sup>	Skład chemiczny złomu, $A_l^T$ % mas.									
				C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn
1	HCZ1	lekki	0.410	0.18	0.36	0.23	0.009	0.015	0.07	0.09	0.08	0.21	0.018
2	HCZ2	lekki	0.510	0.18	0.36	0.23	0.013	0.032	0.11	0.09	0.11	0.22	0.035
3	HCZ3	lekki	0.510	0.18	0.32	0.23	0.023	0.032	0.13	0.12	0.13	0.33	0.928
4	HCZ3Z	lekki	0.610	0.19	0.39	0.24	0.026	0.034	0.13	0.13	0.13	0.29	0.026
5	HCZ3S	lekki	0.610	0.49	0.49	0.24	0.019	0.024	0.08	0.08	0.08	0.19	0.015
6	HCZ4	lekki	0.710	0.18	0.27	0.18	0.021	0.046	0.13	0.09	0.13	0.38	0.039
7	HCZ5	wióry	0.410	0.18	0.23	0.18	0.006	0.039	0.18	0.27	0.19	0.23	0.022
8	HCZ5K	średni	0.910	0.19	0.24	0.19	0.007	0.036	0.19	0.28	0.19	0.28	0.021
9	HCZ6	średni	0.910	0.46	0.32	0.09	0.013	0.028	0.11	0.09	0.11	0.19	0.015
10	HCZ7	ciężki	1.710	0.18	0.27	0.18	0.028	0.036	0.13	0.06	0.13	0.21	0.018
11	HCZ8	lekki	0.710	0.23	0.36	0.18	0.023	0.023	0.14	0.07	0.14	0.32	0.023
12	HCZ9	ciężki	1.410	3.37	0.91	0.73	0.038	0.023	0.02	0.02	0.02	0.02	0.007
13	WBG	średni	0.970	0.19	3.76	0.24	0.009	0.094	0.01	0.01	0.01	0.22	0.007
14	HBI	ciężki	1.970	1.46	0.07	0.00	0.010	0.010	0.01	0.01	0.01	0.01	0.005
15	Synticom	ciężki	1.970	1.65	0.10	0.00	0.010	0.010	0.01	0.01	0.01	0.01	0.005
16	Surówka	ciężki	1.970	3.98	0.49	0.58	0.039	0.019	0.01	0.01	0.01	0.01	0.007

**B.**

Lp.	Gat. złomu	Rodzaj złomu	Gęst. $d_0$ t/m <sup>3</sup>	Skład chemiczny złomu, $A_u^T$ % mas.										Cena $f$ , zł/t
				C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn	
1	HCZ1	lekki	0.590	0.22	0.44	0.27	0.011	0.019	0.09	0.11	0.04	0.25	0.022	460
2	HCZ2	lekki	0.690	0.22	0.44	0.27	0.015	0.038	0.13	0.11	0.02	0.26	0.041	460
3	HCZ3	lekki	0.690	0.22	0.38	0.27	0.027	0.038	0.15	0.14	0.04	0.39	1.112	540
4	HCZ3Z	lekki	0.790	0.21	0.41	0.26	0.028	0.036	0.13	0.13	0.04	0.35	0.028	560
5	HCZ3S	lekki	0.790	0.52	0.52	0.26	0.021	0.026	0.08	0.08	0.06	0.21	0.015	660
6	HCZ4	lekki	0.890	0.22	0.33	0.22	0.025	0.055	0.15	0.11	0.02	0.46	0.047	670
7	HCZ5	wióry	0.590	0.22	0.27	0.22	0.008	0.047	0.22	0.33	0.14	0.35	0.024	450
8	HCZ5H	średni	1.090	0.21	0.27	0.21	0.007	0.040	0.21	0.32	0.13	0.32	0.023	450
9	HCZ6	średni	1.090	0.55	0.38	0.11	0.015	0.034	0.13	0.11	0.02	0.23	0.017	700
10	HCZ7	ciężki	1.890	0.22	0.33	0.22	0.034	0.044	0.15	0.08	0.02	0.25	0.022	300
11	HCZ8	lekki	0.890	0.27	0.44	0.22	0.027	0.027	0.16	0.09	0.02	0.38	0.027	420
12	HCZ9	ciężki	1.590	4.03	1.09	0.87	0.046	0.027	0.02	0.02	0.01	0.02	0.009	680
13	WBG	średni	1.030	0.21	4.24	0.27	0.011	0.106	0.01	0.01	0.01	0.24	0.007	690
14	HBI	ciężki	2.030	1.55	0.07	0.00	0.010	0.010	0.01	0.01	0.01	0.01	0.005	2200
15	Syntyc	ciężki	2.030	1.75	0.10	0.00	0.010	0.010	0.01	0.01	0.01	0.01	0.005	1350
16	Surów	ciężki	2.030	4.22	0.52	0.62	0.041	0.021	0.01	0.01	0.01	0.01	0.007	1350

W analogiczny sposób określono parametry rozmytości współczynników uwzględniających ubytki ogólnej masy, oraz masy poszczególnych pierwiastków w procesie roztapiania wsadu (uzyski masy, uzyski pierwiastków) (tablica 3). Warunki dot. struktury zużycia poszczególnych składników wsadu, oraz udziału wiór, złomu lekkiego, złomu średniego i złomu ciężkiego w namiarze zamieszczono odpowiednio w tablicy 4 i tablicy 5. Uwzględniając skład chemiczny kąpeli metalowej w 1-szej próbie po roztopieniu (tab. 1), w tablicy 6 zamieszczono rozwiązanie zagadnienia optymalizacji liniowej (15)-(21) uzyskane za pomocą algorytmu Simpleks wchodzącego w skład modułu Solver Excel 2010. Zamieszczone w tablicy 6 dane wskazują, że rozwiązanie spełnia warunki ograniczające (20), (22). Spełnione są również pozostałe warunki ograniczające występujące w modelu (15)-(21). Zgodnie z oczekiwaniami, przeprowadzone za pomocą modelu (15)-(21) obliczenia symulacyjne pokazały [9], że większa niepewność dotycząca parametrów wsadu, oraz parametrów procesu technologicznego, a także większe wymagania polegające na zawężeniu zakresu niepewności dotyczącej masy metalu, oraz składu chemicznego kąpeli metalowej po roztopieniu wpływają na wyższy koszt wsadu



Tab. 3. Dolne (A.) i górne (B.) wartości przedziałów (14), (10) dla uzysków masy ( $u_l, u_u$ ) i pierwiastków ( $U_l, U_u$ ) dla różnych surowców do produkcji stali S355J2G3

**A.**

Lp.	Gat. złomu	Rodzaj złomu	U.masy $u$	Uzysk pierwiastków, $U_l^T$									
				C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn
1	HCZ1	lekki	0.810	0.085	0.385	0.000	0.285	0.935	0.785	0.885	0.885	0.935	0.885
2	HCZ2	lekki	0.800	0.085	0.235	0.000	0.315	0.935	0.785	0.885	0.885	0.935	0.885
3	HCZ3	lekki	0.850	0.085	0.235	0.000	0.315	0.885	0.785	0.885	0.885	0.935	0.885
4	HCZ3Z	lekki	0.930	0.085	0.235	0.000	0.315	0.885	0.835	0.935	0.835	0.935	0.885
5	HCZ3S	lekki	0.950	0.097	0.197	0.000	0.327	0.947	0.797	0.947	0.847	0.947	0.897
6	HCZ4	lekki	0.930	0.085	0.235	0.000	0.285	0.885	0.835	0.935	0.835	0.935	0.885
7	HCZ5	wióry	0.700	0.085	0.235	0.000	0.285	0.885	0.785	0.935	0.785	0.935	0.885
8	HCZ5K	średni	0.700	0.085	0.235	0.000	0.285	0.935	0.835	0.935	0.785	0.935	0.885
9	HCZ6	średni	0.850	0.085	0.235	0.000	0.285	0.935	0.835	0.935	0.785	0.935	0.885
10	HCZ7	ciężki	0.700	0.085	0.235	0.000	0.285	0.935	0.835	0.935	0.835	0.885	0.885
11	HCZ8	lekki	0.700	0.085	0.235	0.000	0.285	0.935	0.835	0.935	0.835	0.885	0.885
12	HCZ9	ciężki	0.850	0.085	0.235	0.000	0.285	0.935	0.835	0.935	0.835	0.935	0.885
13	WBG	średni	0.950	0.094	0.244	0.000	0.294	0.944	0.844	0.944	0.844	0.944	0.894
14	HBI	ciężki	0.930	0.097	0.397	0.000	0.327	0.947	0.847	0.947	0.847	0.947	0.897
15	Synticom	ciężki	0.890	0.097	0.347	0.000	0.327	0.947	0.847	0.947	0.847	0.947	0.897
16	Surówka	ciężki	0.930	0.097	0.297	0.000	0.327	0.947	0.847	0.947	0.847	0.947	0.897

**B.**

Lp.	Gat. złomu	Rodzaj złomu	U.masy $u_u$	Uzysk pierwiastków, $U_u^T$									
				C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn
1	HCZ1	lekki	0.863	0.12	0.42	0.000	0.315	0.965	0.82	0.92	0.92	0.97	0.915
2	HCZ2	lekki	0.858	0.12	0.27	0.000	0.345	0.965	0.82	0.92	0.92	0.97	0.915
3	HCZ3	lekki	0.879	0.12	0.27	0.000	0.345	0.915	0.82	0.92	0.92	0.97	0.915
4	HCZ3Z	lekki	0.898	0.12	0.27	0.000	0.345	0.915	0.87	0.97	0.87	0.97	0.915
5	HCZ3S	lekki	0.845	0.10	0.20	0.000	0.333	0.953	0.80	0.95	0.85	0.95	0.903
6	HCZ4	lekki	0.913	0.12	0.27	0.000	0.315	0.915	0.87	0.97	0.87	0.97	0.915
7	HCZ5	wióry	0.842	0.12	0.27	0.000	0.315	0.915	0.82	0.97	0.82	0.97	0.915
8	HCZ5K	średni	0.845	0.12	0.27	0.000	0.315	0.965	0.87	0.97	0.82	0.97	0.915
9	HCZ6	średni	0.866	0.12	0.27	0.000	0.315	0.965	0.87	0.97	0.82	0.97	0.915
10	HCZ7	ciężki	0.813	0.12	0.27	0.000	0.315	0.965	0.87	0.97	0.87	0.92	0.915
11	HCZ8	lekki	0.908	0.12	0.27	0.000	0.315	0.965	0.87	0.97	0.87	0.92	0.915
12	HCZ9	ciężki	0.934	0.12	0.27	0.000	0.315	0.965	0.87	0.97	0.87	0.97	0.915
13	WBG	średni	0.934	0.11	0.26	0.000	0.306	0.956	0.86	0.96	0.86	0.96	0.906
14	HBI	ciężki	0.954	0.10	0.40	0.000	0.333	0.953	0.85	0.95	0.85	0.95	0.903
15	Synticom	ciężki	0.934	0.10	0.35	0.000	0.333	0.953	0.85	0.95	0.85	0.95	0.903
16	Surów	ciężki	0.877	0.10	0.30	0.000	0.333	0.953	0.85	0.95	0.85	0.95	0.903

Tab. 4. Dolne i górne granice dotyczące struktury zużycia surowców we wsadzie do produkcji stali S355J2G3

Lp.	Gat. złomu	Rodzaj złomu	$\underline{c}$	$\bar{c}$
			%	%
1	HCZ1	lekki	0.0	50.0
2	HCZ2	lekki	0.0	50.0
3	HCZ3	lekki	0.0	30.0
4	HCZ3Z	lekki	0.0	40.0
5	HCZ3S	lekki	0.0	15.0
6	HCZ4	lekki	0.0	15.0
7	HCZ5	wióry	5.0	11.0
8	HCZ5K	średni	0.0	10.0
9	HCZ6	średni	0.0	20.0
10	HCZ7	ciężki	0.0	5.0
11	HCZ8	lekki	0.0	15.0
12	HCZ9	ciężki	0.0	4.0
13	WBG	średni	0.0	20.0
14	HBI	ciężki	0.0	3.0
15	Synticom	ciężki	0.0	3.0
16	Surówka	ciężki	0.0	20.0

Tab. 5. Dolne i górne granice udziału wiór, złomu lekkiego, złomu średniego i złomu ciężkiego w namiarze wsadowym, oraz średniej gęstości nasypowej wsadu do produkcji stali S355J2G3

Ozn.	Udział złomu				Gęstość nasypowa	
	Złom wióry	Złom lekki	Złom średni	Złom ciężki	Ozn.	Mg/m <sup>3</sup>
$\underline{g}^T, \%$	5.0	0.0	10.0	5.0	$\underline{d}$	0.70
$\bar{g}^T, \%$	10.0	60.0	60.0	60.0	$\bar{d}$	0.85

Tab. 6. Rozwiązanie zagadnienia optymalizacji namiarowania wsadu dla modelu z parametrami rozmytymi (15)-(21) za pomocą algorytmu Simplex modułu Solver Excel 2010

Lp.	Złom	$\underline{c}$	$\bar{c}$	$\underline{x}$	$\bar{x}$	$x$	
	gat.	%	%	kg	kg	%	kg
1	HCZ1	0.0	50.0	0.0	598.5	23.0	275.9
2	HCZ2	0.0	50.0	0.0	598.5	0.0	0.0
3	HCZ3	0.0	30.0	0.0	359.1	0.0	0.0
4	HCZ3Z	0.0	40.0	0.0	478.8	0.3	3.5
5	HCZ3S	0.0	15.0	0.0	179.5	15.0	179.5
6	HCZ4	0.0	15.0	0.0	179.5	0.0	0.0
7	HCZ5	5.0	11.0	59.8	131.7	5.0	59.8
8	HCZ5K	0.0	10.0	0.0	119.7	0.0	0.0
9	HCZ6	0.0	20.0	0.0	239.4	10.0	119.7
10	HCZ7	0.0	5.0	0.0	59.8	5.0	59.8
11	HCZ8	0.0	15.0	0.0	179.5	15.0	179.5
12	HCZ9	0.0	4.0	0.0	47.9	4.0	47.9
13	WBG	0.0	20.0	0.0	239.4	0.0	0.0
14	HBI	0.0	3.0	0.0	35.9	0.0	0.0
15	Synticom	0.0	3.0	0.0	35.9	3.0	35.9
16	Surówka	0.0	20.0	0.0	239.4	19.7	235.3
$f_{min} =$					850.2		$1^T x$
<b>Suma</b>						100.0	1197.0

#### 4. Podsumowanie

Jako model do opisu wielkości o charakterze niejednoznaczny wykorzystano liczby rozmyte o trapezoidalnych funkcjach przynależności. Zaletą zastosowania liczb trapezoidalnych do opisu rozmytości parametrów wsadu, oraz parametrów procesu technologicznego wytopu stali, których określenie w sposób jednoznaczny (punktowy) nie jest możliwe, jest prosty algorytm działań arytmetycznych, oraz łatwa i intuicyjna interpretacja. Sformułowany na zasadach arytmetyki liczb i przedziałów rozmytych model optymalizacji wsadu pozwala na zapewnienie z góry określonych przez elektrostalownię parametrów jakościowych mieszanki wsadowej dla pieców EAF. Pozwala to na uzyskanie założonej masy i składu chemicznego kąpieli metalowej w 1-sze próbie po roztopieniu, pomimo, że parametry jakościowe złomu stalowego, głównego surowca do pieców EAF, a także niektóre parametry procesu technologicznego wytopu stali są określone w sposób niejednoznaczny. Wynika to z przyjętych w modelu warunków ograniczających z uwzględnieniem skrajnych wartości trapezoidalnych przedziałów rozmytych (6) reprezentujących niejednoznaczne parametry procesu, a także, właściwości

matematycznych rozwiązania zagadnienia optymalizacji liniowej. Oprócz niesprzeczności układu warunków ograniczających w zagadnieniu optymalizacji (15)-(21), podstawową uzyskania w warunkach rzeczywistych poprawnych rozwiązań jest spełnienie założeń polegających na przyjęciu wystarczająco dużych wartości skrajnych dla przedziałów trapezoidalnych (6) reprezentujących parametry procesu technologicznego o charakterze niejednoznacznym. W przedziałach tych ze 100% pewnością powinny być zawarte "rozmyte" parametry procesu takie jak: gęstość nasypowa i skład chemiczny złomu, współczynniki uzysku masy i uzysku pierwiastków w trakcie roztopienia.

## Literatura

1. Ziółkowski E.: Modelowanie namiarowania wsadu dla pieców odlewniczych z uwzględnieniem materiałów wsadowych o rozmytych parametrach. Wydawnictwo AGH, Rozprawy i Monografie 169, Kraków 2007.
2. Zadeh L.A.: Fuzzy sets. *Information and Control*, 8 (1965) 338–353.
3. Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L.: Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte. PWN, Warszawa-Łódź 1997.
4. Banerjee S.: Kumar T.R.: Arithmetic Operations on Generalized Trapezoidal Fuzzy Number and its Applications. *Turkish Journal of Fuzzy Systems*, Vol.3, No.1, 2012, s.16-44.
5. Kuźnik T., Suchecka W., Kuźnik A.: Testowanie i weryfikacja systemu doboru wsadu do pieca KONEL. Spr. IMŻ Nr PC/IMŻ/PC00099, Gliwice 2005.
6. Kuźnik T., Bulkowski L., Suchecka W., Kuźnik A.: Wdrożenie Komputerowego Systemu Doboru wsadu dla pieca Konel. Spr. IMŻ Nr PC/IMŻ/PC00090, Gliwice 2005.
7. Kuźnik T., Galisz U., Bulkowski L., Zdonek B., Kuźnik A., Suchecka W., Bernat L., Czarny M., Gawor R., Orman L., Szota L., Walczyński M., Zamorski J.: Wdrożenie komputerowego systemu doboru wsadu dla pieca Konel w Hucie Częstochowa sp. z o.o. Spr. IMŻ Nr WO-1304, Gliwice 2005.
8. Kuźnik T., Suchecka W., Kuźnik A.: Opracowanie systemu doboru wsadu do pieca KONEL, uwzględniającego bilans cieplny procesu i ekonomikę produkcji. Spr. IMŻ Nr - PC-0090/9, Gliwice 2005.
9. Kuźnik A.: Modelowanie namiarowania wsadu dla celów optymalizacji procesu wytopu stali w piecach elektrycznych. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Katowice 2013.

Dr hab. inż. Bolesław MACHULEC  
Katedra Inżynierii Produkcji  
Politechnika Śląska  
40-019 Katowice, ul. Krasińskiego 8  
tel./fax: +48 (32) 603 4307/ +48 (32) 603 4212  
e-mail: boleslaw.machulec@polsl.pl

Mgr inż. Andrzej KUŹNIK  
Instytut Metalurgii Żelaza,  
44-100 Gliwice, ul. Karola Miarki 12-14,  
tel./fax: +48 (32) 2345205/ +48 (32) 2345300  
e-mail: imz@imz.pl