

JERZY WAWRZEŃCZYK¹

WIOLETTA KOZAK²

ADAM KŁAK³

Kielce University of Technology

¹e-mail: zmsjw@tu.kielce.pl

²e-mail: wioletta88kozak@gmail.com

³e-mail: adamklak@gmail.com

Possibility of pore size distribution application to the description of air-entrained concrete porosity structure

Abstract

Air void size and number distribution constitutes a major characteristic, which substantially contributes to building up concrete resistance to cyclic freezing and thawing. The standard pore spacing factor L is based on the Powers model. Due to the assumptions made in the model, it may not be able to represent the real structure of air pores in the concrete. Consequently, it is necessary to look for other methods to describe this structure. The sought model needs to account for variability in sizes of pore chords and pore random spacing in the paste. The paper analyses the distribution type and compares porosity characteristics obtained with measurements, and on the basis of the distribution. The analysis aims to assess if it is possible to substitute chords in the 0 to 400 μm range with their distribution. Another purpose of the analysis is to compare air pore structure parameters obtained by computations on raw data with the results received on the basis of pore size distribution for a given concrete.

Keywords: air-entrained concrete, air pore size distribution, Log-normal distribution.

1. Introduction

Air-entrainment, a basic method that protects concrete against the adverse action of frost, water and de-icing salts has been known for over 70 years. Air-entrainment technology involves introducing a surfactant into the concrete mix. The air-entraining agent makes it possible to form and evenly disperse small air bubbles in the concrete. The system of tiny air voids protects concrete from damage caused by an increase in the volume of freezing water. Appropriate spacing of air voids in hardened cement paste significantly reduces the distance to be travelled by water that is not frozen yet, from a random point inside the hardened cement paste to the nearest air void [9]. To ensure concrete freeze-thaw resistance, it is essential to provide a time-stable system of small air bubbles, which are located close enough to one another, at the lowest possible total air content. In modern concrete technology, unlike in traditionally air-entrained concrete, cement, additives and admixtures are combined, which often causes problems related to obtaining the time-stable pore system. The effects of

air-entrainment may differ depending on the concrete mix consistency and temperature, mixing time, transport time, and also the manner in which the mix is placed and compacted [3]. Substantial air losses occur when the concrete mix is pumped (approx. 1–1.5%), and also vibrated [13]. Air-entrainment can also be dependent on the characteristics of the aggregate grains, especially of sand (roughness, number and shape of grains) [11], which are often unaccounted for. Taking into account a large number of factors that affect the quality of air-entrainment, it may happen that, in spite of using air-entraining agents, the required pore structure is not obtained. The systems of air pores may be not fine enough, or they may not be stable in time [10]. Consequently, the maximum distance, measured along the cement paste, the freezing water needs to travel from a random point in the cement paste to the nearest air void will grow. As a result, the pore spacing factor L is increased, yet the total air content A does not change [13]. Therefore, simple measurements of air content cannot provide the basis for assessing the

quality of air-entrained concrete porosity. Thus, it is necessary to establish air-entrainment quality control, which involves the microscopy assessment of air pore structure. The basic parameter that relates the quality of air-entrained concrete to its freeze-thaw resistance is spacing L . The standard [8] gives the method of determining pore structure parameters on the basis of the Powers model, which assumes that all pores have the same diameter and are distributed in cube corners (Fig. 1). Thus, spacing factor L corresponds to a half of the cube diagonal.

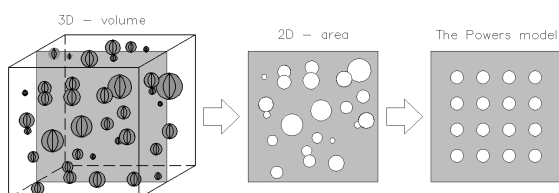


Fig. 1. Difference between the actual air pore distribution and that assumed in the Powers model [7]

Air pore structure is described by the following parameters: total air content A , specific surface of air pores α , spacing factor L and micropore content A_{300} and air pore size distribution [8]. The assumptions adopted in the Powers model may, in some cases, make the model incompatible with the real structure of pores in the concrete. Figure 2 presents exemplary photographs of air pores, which show that in modern concretes, pores often coalesce forming larger systems, or they can have bizarre shapes.

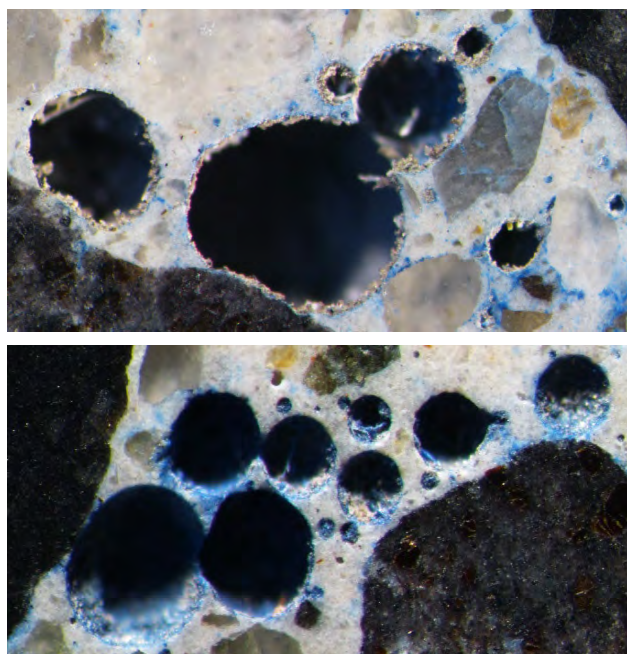


Fig. 2. View of complex pore arrangements in air-entrained concrete

Other ways of describing air pore structure are sought by researchers, including Philleo [6], Attiogbe [1], Jin et al. [4], and Elsen et al. [2]. Air pore structure is investigated by the chord counting method [8], on the basis of which air pore size distribution is determined, which is a transition from 1D to 3D modelling. The measurements lead to the determination of the total air content A , pore spacing factor L , specific surface of air pores α , and the micropore content A_{300} . Expected advancements in the image automatic analysis method will, in not-too-distant future, make it possible to take 2D measurements. Those will contribute to obtaining a more accurate representation of the real porosity structure in air-entrained concretes. Such approach was used by, among others, Yim et al. [14].

2. Air pore distribution in air-entrained concrete

The PN-EN 480-11 standard [8] defines the method of calculating the parameters of the air pore structure and also allows to make a transition from classes (1D) to pore size distribution (3D) in the concrete. Therefore, it is necessary to develop a model that would account for diversity in pore diameter sizes and pore random spacing in the paste. Such a model would be able to describe a real structure of air bubbles and, thus, to state more precisely the dependences holding between pore structure parameters and concrete freeze-thaw resistance [9]. Many researchers emphasise the necessity to employ distribution in the description of the parameters of concrete porosity structure [1, 2, 4, 6]. The paper presents the analysis of the type of distribution and also a comparison of porosity characteristics obtained through measurements and on the basis of distribution. Investigations into the pore structure in air-entrained concretes have been conducted for many years at the Optical Microscopy Laboratory of the Construction Technology and Organization Department at the Kielce University of Technology. The analysis of the determination of the parameters of chord distribution was performed using the Table Curve 2D software [12].

3. Investigations into the form of pore system distribution in air-entrained concrete

Air-entrained concretes having diversified parameters of porosity structure were investigated. In the first stage of investigations, different types of distribution that are available in the literature were analysed. Log-normal, Gamma and Weibull distributions are most frequently employed to describe

the distribution of pore sizes. The density functions that specify these distributions are presented in the form of equations 1–3:

– Log-normal distribution

$$y = a \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln \left(\frac{x}{b} \right)}{c} \right)^2 \right] \tag{1}$$

– Gamma distribution

$$y = a \exp \left(-\frac{x-b}{c} \right) \left(\frac{\frac{x-b}{c} + d-1}{d-1} \right)^{d-1} \tag{2}$$

– Weibull distribution

$$y = a \left(\frac{d-1}{d} \right)^{\frac{1-d}{d}} \left[\frac{x-b}{c} + \left(\frac{d-1}{d} \right)^{\frac{1}{d}} \right]^{d-1} \exp \left[-\left(\frac{x-b}{c} + \left(\frac{d-1}{d} \right)^{\frac{1}{d}} \right)^d + \frac{d-1}{d} \right] \tag{3}$$

An attempt was made, on the example of two selected concretes, to assess which distribution type best represents the system of pores having the diameters from 0 to 400 μm. Distributions for selected concretes are presented in Figures 3, 4. The results of analyses and comparisons are shown in Table 1.

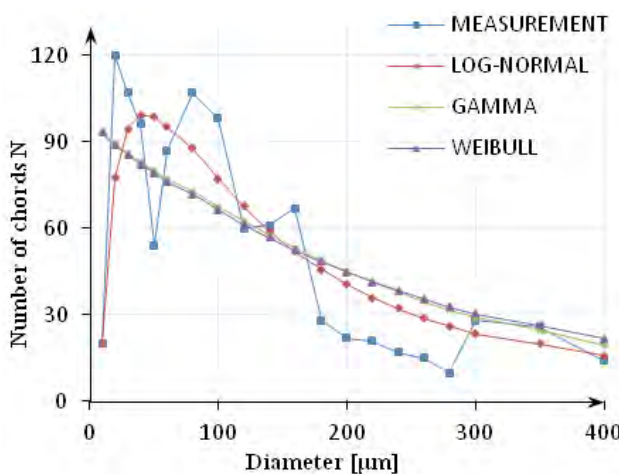


Fig. 3. Distributions of chord lengths in B1 concrete

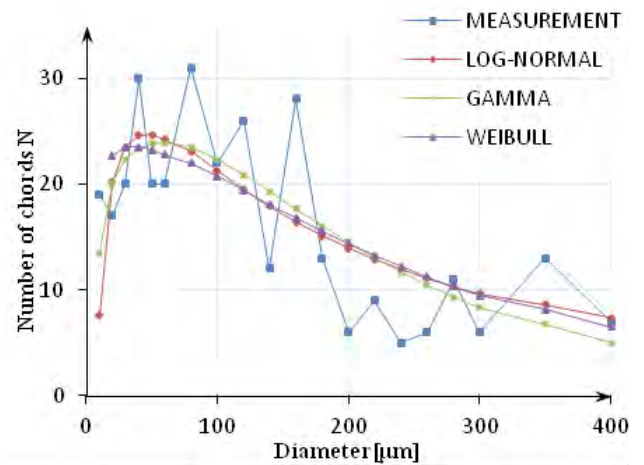


Fig. 4. Distributions of chord lengths in B2 concrete

Table 1. Comparison of the fit coefficient r^2 for two different concretes

DISTRIBUTION	CONCRETES	
	B1	B2
	r^2	r^2
LOG-NORMAL	0.57	0.71
GAMMA	0.55	0.70
WEIBULL	0.55	0.69

The assessment of how accurately a given distribution form fits the measurement results is made on the basis of the fit coefficient r^2 . The results presented in Table 1 indicate that the r^2 parameter takes on the most advantageous values for the Log-normal distribution. These conclusions are congruent with opinions expressed by other researchers [14].

4. Comparison of the pore system parameters obtained through measurements and Log-normal distribution

The analysis aims at assessing the possibility of substituting chords in the 0 to 400 μm range with their distribution. Another goal is to validate the parameters of air pore structure obtained by calculations made on raw data against the results received on the basis of the pore system distribution for a given concrete. In the second stage of investigations, the parameters of the density function of Log-normal distribution were determined for four selected concretes, namely B3–B6, the distributions for which are presented in Figure 5. The concretes, air-entrained with an air-entraining admixture, were characterised by a similar air content $A \approx 5.79\text{--}6.46\%$, but they differed in the number of measured chords $N \approx 381\text{--}2020$, and also in pore spacing factor $L \approx 0.081\text{--}0.424$ mm. The number of chords in individual classes was determined in

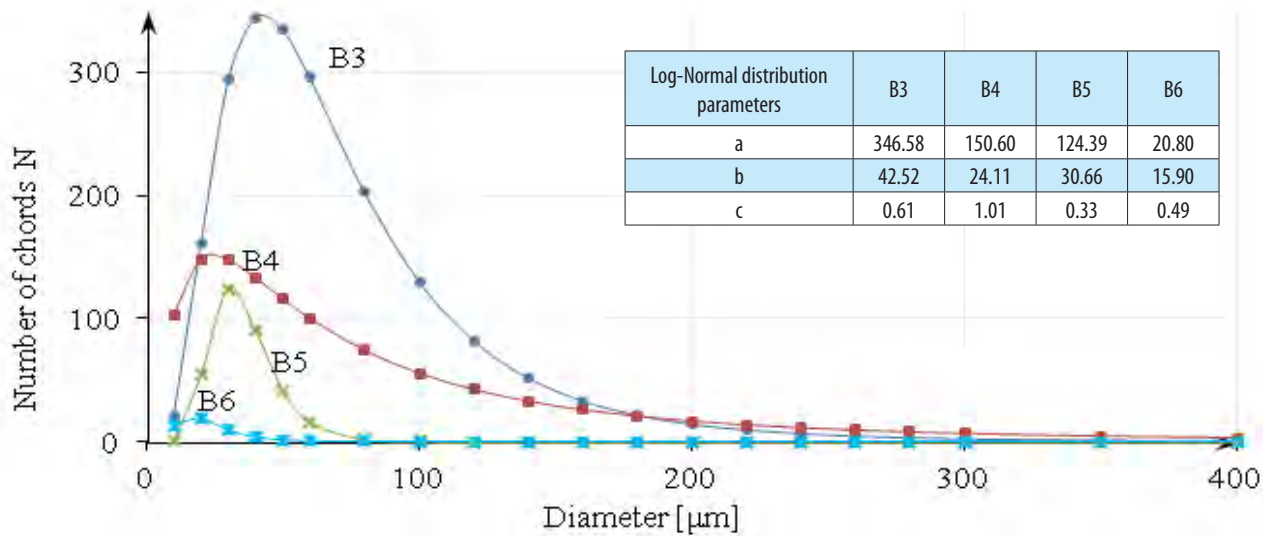


Fig. 5. Parameters of Log-normal distribution for B3÷B6 concretes.

accordance with adopted Log-normal distribution. For the data assumed in this manner, the parameters of the pore structure were determined in accordance with the code. Those, together with the parameters determined by means of microscopy analyses are presented in Table 2.

Table 2. Comparison of the parameters of air pore structure in concretes having a similar air content A , determined on the basis of image analysis (1) and Log-normal distribution (2).

CONCRETE	r^2	N		A [%]		L [mm]	
		1	2	1	2	1	2
B3	0.97	2020	2013	6.46	4.41	0.081	0.081
B4	0.87	1170	1072	5.92	3.08	0.135	0.103
B5	0.73	552	329	5.79	0.97	0.147	0.091
B6	0.25	381	47	6.44	0.04	0.424	0.182

B3 concrete is well air-entrained, because it has a low spacing factor $L = 0.081\text{mm}$ and a large number of chords $N = 2020$, which indicates a fine pore structure. For B3 concrete, the fit coefficient $r^2 = 0.97$ was the best, thus the estimation of the structure parameters was the most accurate. Series B6 concrete is poorly air-entrained. Although the air content is high $A = 6.44\%$, the concrete has only $N = 381$ chords, which points to a relatively small amount of large bubbles. Those fall outside the analysed range, consequently the pore spacing factor is high $L = 0.424\text{mm}$. As the pore number in the concrete decreases, the differences in estimating pore structure parameters grow. To use distribution, it is necessary to specify how many samples need to be investigated to make estimation more accurate.

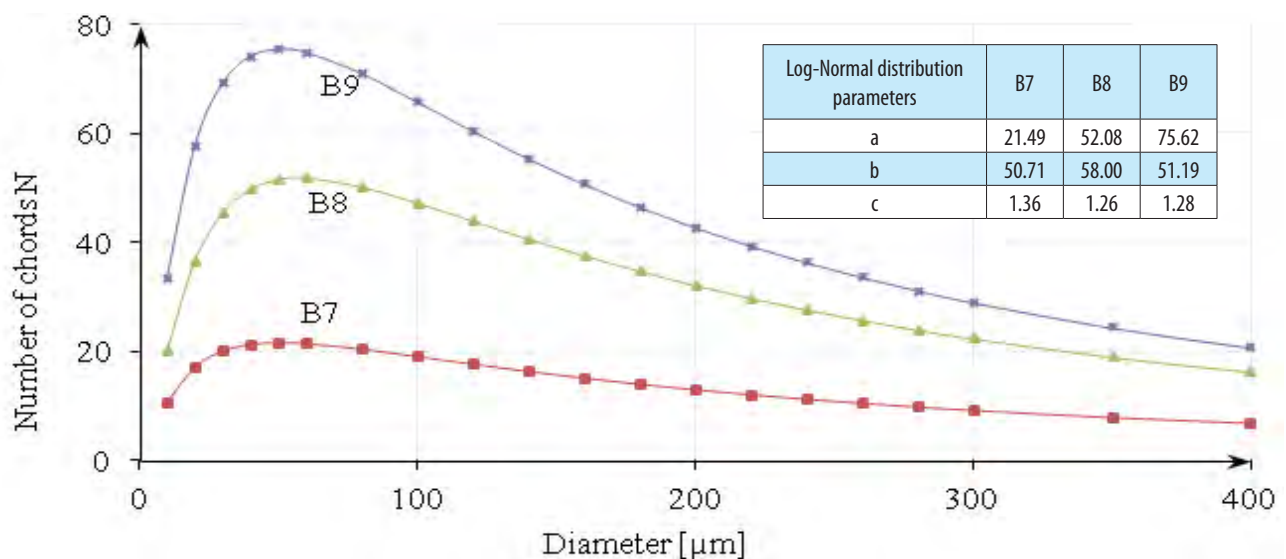


Fig. 6. Log-normal distributions for B7–B9 concretes

In the next stage of investigations, concretes showing a similar structure of air pore system (Fig. 6), but having a different air content $A \approx 3.92\% - 6.59\%$ were analysed. The results concerning pore structure parameters in those concretes, obtained from measurements and distribution are presented in Table 3.

Table 3. Comparison of the parameters of air pore structure in concretes having a similar composition and a different air content A, determined on the basis of image analysis (1) and Log-normal distribution (2)

CONCRETE	r^2	N		A [%]		L [mm]	
		1	2	1	2	1	2
B7	0.32	370	309	3.92	2.04	0.348	0.291
B8	0.59	744	738	5.17	4.73	0.202	0.194
B9	0.53	1034	1035	6.59	6.30	0.154	0.154

The data collected in Table 3 indicates that the larger the amount of air A is, the greater the number of chords N is, and consequently, the smaller the difference in the estimation of pore structure diameters is, obtained through chord measurement and on the basis of distribution.

5. Conclusions

On the basis of analysis of the results of investigations on a few series of concretes, it was found that Log-normal distribution is the most suitable tool to describe chord size distribution in the concrete.

The analysis aimed to assess the possibility of substituting chords in the 0 to 400 μm range with their distribution. Also, the analysis was used to validate the parameters of air pore structure, obtained on the basis of computations made on raw data against the results obtained on the basis of pore system distribution for a given concrete. The number of pores, thus the air content, constitutes the basic parameter that substantially affects the quality of the distribution fit and the estimation accuracy of the pore structure parameters. Concretes of concern were categorised into two groups. Group I contained concretes with similar air content, in Group II, concretes varied in air content. For both groups, the analysis confirms that the larger the number of measured chords is, the better the distribution fit and more precise the estimation of porosity characteristics. In such cases, using Log-normal distribution in computations produces similar results. For concretes having low air content or large pores, a considerable difference is found between results of computations on the raw data and those obtained from the distribution, which

produces incongruent results. In such a case it would be advisable to increase a number of tested sample. It is planned to conduct studies which will aim at determining air pore size distribution on the basis of the measurements of their diameters (2D), instead of chords (1D). That is supposed to significantly facilitate producing a more reliable image of the real porosity structure in air-entrained concretes.

References:

- [1] Attiogbe E.K., *Volume Fraction of Protected Paste and Mean Spacing of Air Voids*, ACI Materials Journal, No. 94-M66, 1997, pp. 588-591.
- [2] Elsen J., Lens N., Vyncke J., Aarre T., Quenard D., Smolej V., *Quality assurance and quality control of air entrained concrete*, Cement and Concrete Research, Vol. 24, No. 7, 1994, pp.1267–1276.
- [3] Fagerlund G., *Trwałość konstrukcji betonowych*, Arkady, Warszawa 1997.
- [4] Jin.S., Zhang J., Huang B., *Fractal analysis of effect of air void on freeze-thaw resistance of concrete*, Construction and Building Materials 47 (2013), pp. 126–130.
- [5] Kong M., Bhattacharya R.N., James C., Basu A., *A statistical approach to estimate the 3D size distribution of spheres from 2D size distributions*. Bull. Geol. Soc. Am., 2005, 117:244–249.
- [6] Philleo R.E., *A Method for Analyzing Void Distribution In Air-Entrained Concrete*, Cement, Concrete and Aggregates, No. 2, 1983, pp. 128–130.
- [7] Pigeon M., Pleau R., *Durability of concrete in cold climates*, E&FN SPON.
- [8] PN-EN 480-11 *Determination of the characteristics of air pores in hardened concrete* (in Polish), 2008.
- [9] Powers T.C., *Air requirement of frost resistant concrete*, Proceedings, Highway Research Board, V. 29, 1949, pp. 184–202.
- [10] Sommer H., *Choosing admixtures for air-entrained concrete*, *Betonwerk + Fertigteil – Technik*, No. 12, 1987, pp. 813–816.
- [11] Springenschmidt R., Breitenbucher R., Setzer M.J., *Air-entrained concrete – recent investigations on the fine sand composition. Waiting time before compaction and redosing of air-entraining agents*, *Betonwerk+Fertigteil-Technik*, No. 11, 1987, pp. 742–748.
- [12] Table Curve 2D, SYSTAT.
- [13] Wawrzeniuk J., Molendowska A., *Use of microspheres as an alternative method of concrete air-entrainment* (in Polish), *Budownictwo – Technologie – Architektura*, nr 4/2011, s. 51–55.
- [14] Yim H.J., Kim J.H., Lee B.Y., Kwak H.G., *Air voids size distribution determined by ultrasonic attenuation*, Construction and Building Materials 47 (2013), pp. 502–510.

Jerzy Wawrzeniuk
Wioletta Kozak
Adam Klak

Możliwość stosowania rozkładu wielkości porów do opisu parametrów struktury porowatości betonów napowietrzonych

1. Wstęp

Napowietrzanie, jako podstawowa metoda zabezpieczająca beton przed szkodliwym działaniem mrozu, wody oraz soli odladzających, jest znana od ponad 70 lat. Technologia napowietrzania polega na wprowadzaniu do mieszanki betonowej substancji powierzchniowo czynnej, która w trakcie mieszania składników pozwala na wytworzenie i równomierne rozproszenie drobnych pęcherzyków powietrza w betonie. System niewielkich pustek powietrznych chroni beton przed uszkodzeniami spowodowanymi wzrostem objętości zamarzającej wody. Właściwe rozmieszczenie pustek powietrza w stwardniałym zaczynie cementowym znacznie skraca odległość, jaką musi przebyć niezamarznięta jeszcze woda, od dowolnego punktu wewnątrz stwardniałego zaczynu cementowego do najbliższej położonej pustki powietrznej [9]. Zapewnienie stabilnego w czasie systemu drobnych pęcherzyków powietrznych, rozmieszczonych odpowiednio blisko siebie, przy możliwie jak najmniejszej całkowitej zawartości powietrza, jest podstawową sprawą istotną dla zagwarantowania mrozoodporności betonu. We współczesnej technologii betonu, w przeciwieństwie do betonów tradycyjnie napowietrzonych, stosuje się kombinacje cementu, dodatków i domieszek, co powoduje, że często występują istotne problemy z uzyskaniem stabilnego w czasie systemu porów powietrznych. Efekty napowietrzania mogą się również znacznie różnić w zależności od konsystencji i temperatury mieszanki betonowej, czasu mieszania i transportu, sposobu układania i zagęszczania [3]. Znaczne straty powietrza występują podczas podawania mieszanki betonowej pompą (ok. 1-1,5%), a także podczas wibrowania [13]. Napowietrzanie może być również uzależnione od charakterystyk ziaren kruszywa, a przede wszystkim piasku (chropowatości, ilości i kształtu ziaren) [11], co nieczęsto jest uwzględniane. Biorąc pod uwagę dużą liczbę czynników, wpływają-

cych na jakość napowietrzania, należy liczyć się z tym, że pomimo zastosowania środków napowietrzających można nie uzyskać wymaganej struktury porów. Mogą powstawać grubsze systemy porów, niestabilne w czasie [10]. Konsekwencją tego będzie wzrost maksymalnej odległości, jaką musi przebyć zamarzająca woda od dowolnego punktu zaczynu cementowego do krawędzi pustki powietrznej, mierzonej wzdłuż zaczynu (wzrost wskaźnika rozmieszczenia porów L), bez widocznej zmiany w całkowitej zawartości powietrza A [13]. W związku z tym, na podstawie prostych pomiarów zawartości powietrza nie można ocenić jakości porowatości betonów napowietrzonych. Kontrola jakości napowietrzania, polegająca na mikroskopowej ocenie struktury porów powietrznych, jest więc konieczna. Podstawowym parametrem, określającym związek pomiędzy jakością betonu napowietrzonego a jego mrozoodpornością, jest rozstaw pęcherzyków L . Norma [8] przedstawia sposób wyznaczania parametrów struktury porów w oparciu o model Powersa, który zakłada, że wszystkie pęcherzyki mają jednakową średnicę i są rozmieszczone w narożach sześcianu (rys. 1.). Wskaźnik rozmieszczenia L odpowiada zatem połowie przekątnej sześcianu. Struktura porów powietrznych opisana jest następującymi parametrami: całkowita zawartość powietrza A , powierzchnia właściwa porów powietrznych α , wskaźnik rozmieszczenia L , zawartość mikroporów A_{300} oraz rozkład wielkości porów powietrznych [8]. Założenia modelu Powersa sprawiają, że w niektórych sytuacjach może on mieć niewiele wspólnego z rzeczywistą strukturą porów powietrznych w betonie. Na rysunku 2 pokazano przykładowe zdjęcia struktury porów powietrznych ilustrujące, że często we współczesnych betonach pory łączą się ze sobą, czyli grupują się w większe systemy lub mają dziwne kształty. Poszukiwane są więc inne sposoby opisu tej struktury proponowane m.in. przez Philleo [6], Attiogbe [1], Jin i inni [4] czy

Elsen i inni [2]. Strukturę porów powietrznych bada się metodą zliczania cięciw [8], na podstawie których określany jest rozkład wielkości porów powietrznych (przejście z 1D na 3D). Na podstawie tych pomiarów określone są zawartość powietrza A , wskaźnik rozmieszczenia porów L , powierzchnia właściwa porów α oraz zawartość mikroporów A_{300} . Należy przypuszczać, że rozwój metod automatycznej analizy obrazu pozwoli, w nieodległej przyszłości, na wykonywanie pomiarów 2D, które umożliwią uzyskanie pełniejszego odzwierciedlenia rzeczywistej struktury porowatości betonów napowietrzonych. Takie podejście stosowali m.in. Yim i inni [14].

2. Rozkład porów powietrznych w betonie napowietrzonym

Norma PN-EN 480-11 [8] definiuje sposób obliczania parametrów struktury porów powietrznych i umożliwia przejście z klas (1D) na rozkład wielkości porów (3D) w betonie. Ustalenie modelu uwzględniającego różnorodność wielkości średnic porów i ich losowe rozmieszczenie w przestrzeni zaczynu jest więc niezbędne, by opisać rzeczywistą strukturę pęcherzyków powietrznych, a tym samym precyzyjniej określić zależność pomiędzy parametrami struktury a mrozoodpornością betonu [9]. Wielu badaczy podkreśla konieczność stosowania rozkładu w opisie parametrów struktury porowatości betonu [1, 2, 4, 6]. W artykule przedstawione zostaną analiza typu rozkładu oraz porównanie charakterystyk porowatości uzyskanych z pomiarów i na podstawie rozkładu. Badania struktury porów betonów napowietrzonych prowadzone są od wielu lat w Pracowni Mikroskopii Optycznej Katedry Technologii i Organizacji Budownictwa Politechniki Świętokrzyskiej. Analizę wyznaczenia parametrów rozkładu cięciw przeprowadzono stosując program Table Curve 2D [12].

3. Badanie postaci rozkładu systemu porów w betonie napowietrzonym

Przedmiotem badań były betony napowietrzane o zróżnicowanych parametrach struktury porowatości. W pierwszym etapie badań analizie poddano różne typy rozkładów spośród dostępnych w literaturze. Najczęściej do opisu rozkładu wielkości porów stosowano rozkłady: logarytmo-normalny (Log-normal), Gamma oraz Weibull. Funkcje gęstości opisujące te rozkłady przedstawiono w postaci równań 1–3.

Na przykładzie dwóch wybranych betonów przeprowadzono próbę oceny, który typ rozkładu najlepiej odzwierciedla system porów o średnicach w zakresie od 0 do 400 μm w betonie. Rozkłady wybranych be-

tonów przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Wyniki tych analiz i porównań przedstawiono w tabeli 1. Ocena dokładności dopasowania danej postaci rozkładu do wyników pomiarów dokonywana jest w oparciu o współczynnik dopasowania r^2 . Na podstawie wyników zamieszczonych w tabeli 1 stwierdzono, że wartości parametru r^2 dla rozkładu Log-normal przyjmują najkorzystniejsze wartości. Powyższe wnioski są zbieżne z opinią innych badaczy [14].

4. Porównanie parametrów systemu porów otrzymanych na podstawie pomiarów i rozkładu Log-normal

Przedmiotem analizy jest ocena możliwości zastąpienia cięciw, z zakresu od 0 do 400 μm , ich rozkładem oraz weryfikacja parametrów struktury porów powietrznych otrzymanych na podstawie obliczeń przeprowadzonych na surowych danych z wynikami uzyskanymi w oparciu o rozkład systemu porów dla danego betonu. W drugim etapie badań wyznaczono współczynniki funkcji gęstości rozkładu Log-normal dla czterech wybranych betonów B3–B6, a ich rozkłady przedstawiono na rysunku 5. Betony były napowietrzane za pomocą domieszki napowietrzającej i charakteryzowały się zbliżoną zawartością powietrza $A \approx 5,79\text{--}6,46\%$, natomiast różniły się ilością zmierzonych cięciw $N \approx 381\text{--}2020$ oraz wskaźnikiem rozmieszczenia porów $L \approx 0,081\text{--}0,424$ mm. Zgodnie z przyjętym rozkładem Log-normal wyznaczono ilość cięciw w poszczególnych klasach i dla tak przyjętych danych wyznaczono w sposób normowy parametry struktury porów, które wraz z parametrami wyznaczonymi w wyniku przeprowadzonych analiz mikroskopowych zamieszczono w tabeli 2. Beton B3 należy do bardzo dobrze napowietrzonych, ponieważ ma niski współczynnik rozstawu pęcherzyków $L = 0,081$ mm i dużą ilość cięciw $N = 2020$, co wskazuje na drobną strukturę porów. Dla betonu B3 współczynnik dopasowania był najlepszy $r^2 = 0,97$, a w konsekwencji oszacowanie parametrów struktury najbardziej precyzyjne. Beton serii B6 zaliczany jest do bardzo źle napowietrzonych. Pomimo dużej zawartości powietrza $A = 6,44\%$ miał on zaledwie $N = 381$ cięciw, co świadczy o tym, że zawiera on stosunkowo mało dużych pęcherzy, które znajdują się poza analizowanym zakresem, czego konsekwencją jest wysoki wskaźnik rozmieszczenia porów $L = 0,424$ mm. Wraz ze spadkiem ilości porów powietrznych, które są w betonie, różnica w oszacowaniu parametrów struktury porów zwiększa się. Możliwość zastosowania rozkładu wymaga określenia ile próbek należałoby badać, żeby oszacowanie było dokładniejsze.

W kolejnym etapie badań analizowano betony o podobnej strukturze systemu porów powietrznych (rys. 6), ale różnej zawartości powietrza $A \approx 3,92\%$ – $6,59\%$. Wyniki parametrów struktury tych betonów uzyskane z pomiarów i z rozkładu przedstawiono w tabeli 3. Z danych zamieszczonych w tabeli 3 wynika, że im większa ilość powietrza A , tym większa ilość cięciw N , a tym samym mniejsza różnica w oszacowaniu parametrów struktury porów uzyskanych z pomiaru cięciw i na podstawie rozkładu.

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań kilku serii betonów stwierdzono, że rozkład Log-normal jest najbardziej przydatny do opisu rozkładu wielkości cięciw w betonie.

Celem analizy była ocena możliwości zastąpienia cięciw, z zakresu od 0 do 400 μm , ich rozkładem oraz weryfikacja parametrów struktury porów powietrznych otrzymanych na podstawie obliczeń przeprowadzonych na surowych danych z wynikami uzyskanymi w oparciu o rozkład systemu porów dla danego betonu. Podstawowym parametrem, mającym istotny wpływ na jakość dopasowania rozkładu oraz dokładność oszacowania parametrów struktury porów jest liczba porów, a tym samym zawartość powietrza. Analizowano dwa warianty betonów. Wariant I to betony o podobnej zawartości powietrza, a wariant II to betony o różnej zawartości powietrza. Oba warianty potwierdzają, że im większa liczba zmierzonych cięciw, tym lepsze dopasowanie rozkładu i bardziej precyzyjne oszacowanie charakterystyk porowatości. W takich przypadkach posługiwanie się w obliczeniach postacią rozkładu Log-normal daje zbliżone efekty. Dla betonów o małej ilości powietrza lub o dużych porach różnica obliczeń na surowych danych i z rozkładu jest znaczna i prowadzi do rozbieżności wyników. W takim przypadku należałoby zwiększyć ilość badanych zglądów. Planuje się prace mające na celu oznaczenie rozkładu wielkości porów powietrznych na podstawie pomiarów ich średnic (2D) zamiast cięciw (1D), co znacząco wpłynie na uzyskanie pełniejszego obrazu rzeczywistej struktury porowatości betonów napowietrzonych.