

## AUTOREFERAT

do wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego w oparciu o objęte wspólnymi badaniami i dokonanymi opracowaniami na temat :

### **Destrukcja materiałów porowatych poddanych procesowi suszenia**

1. Imię i Nazwisko:

**Jacek Banaszak**

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

W latach 1990-1995 studiowałem na Wydziale Budowy Maszyn Politechniki Poznańskiej.

Dyplom **magistra inżyniera** w specjalności komputerowe wspomaganie wytwarzania uzyskałem na podstawie pracy magisterskiej pod tytułem „Moduł doradczy dla statystycznego sterowania procesem wytwarzania” obronionej w 1995r. na Politechnice Poznańskiej.

Promotor: prof. dr hab. inż. Adam Hamrol

W latach 1996-2001 byłem słuchaczem Studium doktoranckiego w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie. Moim opiekunem naukowym był prof. dr hab. inż. Stefan Jan Kowalski.

Dyplom **doktora nauk technicznych** w specjalności inżynieria materiałowa uzyskałem na podstawie rozprawy doktorskiej pt. „Stany naprężeń w materiałach suszonych z uwzględnieniem właściwości reologicznych” obronionej w 2001r. w IPPT PAN.

Promotor: prof. dr hab. inż. Stefan Jan Kowalski

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Julian Deputat, IPPT PAN

Prof. dr hab. inż. Jan Kołodziej, Politechnika Poznańska

*Uchwałą Rady Naukowej IPPT PAN praca doktorska została **wyróżniona***

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych .

2001 – nadal: adiunkt w Instytucie Technologii i Inżynierii Chemicznej Wydziału  
Technologii Chemicznej *Politechniki Poznańskiej*.

4. Wskazanie osiągnięcia\* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r.  
o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki  
(Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

Podstawą do ubiegania się stopnia doktora habilitowanego nauk technicznych w  
dyscyplinie inżynieria chemiczna i procesowa jest cykl publikacji zatytułowany:  
„**Destrukcja materiałów porowatych poddanych procesowi suszenia**”. Cykl ten  
tworzy 25 publikacji o spójnej tematyce wyszczególnionych w wykazie zamieszczonym  
w punkcie 4a, których treść została opisana w przewodniku w punkcie 4b niniejszego  
autoreferatu. Przedstawione publikacje stanowią własne osiągnięcia badawczo-  
naukowe dotyczące tematyki zniszczenia materiałów spowodowanej suszeniem  
materiałów.

4. a) wykaz publikacji własnych dotyczących głównego osiągnięcia: (autor/autorzy, tytuły  
publikacji, rok wydania)

Wykaz omawianych w **Przewodniku** publikacji w porządku chronologicznym jest  
następujący (pełne teksty publikacji i oświadczenia współautorów o procentowym ich  
udziale w załącznikach):

- I        **J. Banaszak**, S.J Kowalski  
Drying Induced Stresses Estimated on the Base of Elastic and Viscoelastic Models  
*Chemical Engng. Journal*, Vol. 86, pp. 139-143 (2002); **IF:3,461**
- II       S.J. Kowalski, **J. Banaszak**, K.Rajewska  
Emisja akustyczna w materiałach suszonych,  
*Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, Vol. 42 (4), pp. 3-8 (2003);

- III J. Banaszak**, S.J Kowalski, G. Musielak  
Determination of Material Coefficients for the Thermomechanical Model of Drying  
*Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. 26 (1-2), pp. 15-24 (2004);
- IV J. Banaszak**  
Risk of Cracking in Kaolin Clay Material during Drying  
The International Symposium on Trends in Continuum Physics TRECOP'04, Poznań, november 17-19, 2004; Proceedings of the International Symposium on Trends in Continuum Physics TRECOP'04 p. 48-55 (eds: B.T. Maruszewski, W. Muschlik, A. Radowicz), Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2004
- V J. Banaszak**  
Wyznaczenie efektywnego współczynnika przewodzenia ciepła dla materiałów suszonych  
XI Polskie Sympozjum Suszarnictwa, Poznań 13-16 września 2005, XI Polskie Sympozjum Suszarnictwa CD-ROM Proceedings;
- VI G. Musielak, J. Banaszak, J. Kasperek**  
Wyznaczanie zależności temperaturowej współczynnika dyfuzji wilgoci w nasączonym kaolinie  
XI Polskie Sympozjum Suszarnictwa, Poznań 13-16 września 2005, XI Polskie Sympozjum Suszarnictwa CD-ROM Proceedings
- VII J. Banaszak**, S.J. Kowalski  
Theoretical and experimental analysis of stresses and fractures in clay like materials during drying,  
*Chemical Engineering and Processing* Vol. 44, (4), pp. 497-503 (2005); **IF: 1,924**
- VIII G. Musielak, J. Banaszak**  
Non-Linear Heat and Mass Transfer during Convective Drying of Kaolin Cylinder under Non-Steady Conditions  
*Transport in Porous Media* Vol. 66, pp. 121-134 (2007); **IF: 1,811**
- IX S.J. Kowalski, G. Musielak, J. Banaszak**  
Experimental validation of heat and mass transfer model for convective drying  
*Drying Technology* Vol. 25(1), pp. 107-121 (2007); **IF: 2,084**
- X J. Banaszak**  
Analiza procesu suszenia na podstawie rozkładu temperatury w suszonych wyrobach;  
*Inżynieria i aparatura chemiczna* Vol. 46 (2), pp.14-17 (2007);
- XI J. Banaszak**  
Damage in ceramic masses during drying; *Inżynieria Chemiczna i Procesowa* Vol. 28 (2), pp. 177-188 (2007); **IF: 0,327**

- XII J. Banaszak**  
 Analiza jakościowa materiałów suszonych mikrofalowo  
*Inżynieria i Aparatura Chemiczna* Vol. 48 (3), pp. 130-135 (2009);
- XIII J. Banaszak, G. Musielak**  
 Influence of moisture content on strength and yield stress limit of ceramic masses  
 XII Polish Drying Symposium, Łódź, Poland, 14-16 Sept. 2009  
 + Proceedings of XII Polish Drying Symposium, pp 141-146.
- XIV I. Fijał-Kirejczyk, J.J. Milczarek, J. Banaszak, A. Trzeciński, J. Żołądek**  
 Dynamical Neutron Radiography studies of drying of kaolin clay cylinders  
*Nukleonika* Vol. 54(2), pp. 123-128 (2009); **IF: 0,389**
- XV J. Banaszak, I. Fijał-Kirejczyk, J.J. Milczarek, J. Żołądek, A. Trzeciński**  
 Observation and analysis of mass transfer during drying of ceramic mass samples  
 Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Drying Symposium IDS2010, Magdeburg, 3-6.10.2010, paper no 497
- XVI J. Banaszak, A. Pawłowski, D. Mierzwa**  
 Association of acoustic emission with drying process  
 Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Drying Symposium IDS2010, Magdeburg, 3-6.10.2010, paper no 498
- XVII S.J. Kowalski, G. Musielak, J. Banaszak**  
 Heat and mass transfer during microwave-convective drying  
*AIChE Journal*, Vol. 56(1), pp. 24-35 (2010); **IF: 2,261**
- XVIII S.J. Kowalski, J. Banaszak, A. Rybicki**  
 Plasticity in Materials Exposed to Drying, *Chem. Engineering Science* Vol. 65 (18), pages 5105-5116 (2010); **IF: 2,601**
- XIX S. J. Kowalski, J. Banaszak, A. Rybicki**  
 Damage Analysis of Microwave-Dried Materials, *AIChE Journal*  
 Volume 58, Issue 7, pages 2097–2104, (2012) **IF:2,261**
- XX J. Banaszak**  
 Wpływ zawartości wilgoci na parametry geotechniczne ceramicznych mas formierskich w „Obszary akademickiej wiedzy naukowej. Główne nurty i tematy do dyskusji na XXI wiek” , Wydawnictwo Altus 2012
- XXI J. Banaszak**  
 Thermal properties of kaolin clay  
 w „Obszary akademickiej wiedzy naukowej”, M.Gwoździcka-Piotrkowska, J. Wiśniewski, P. Zbiorowski (red.), pp. 159-167 , Altus 2012

- XXII J. Banaszak, T. Śliwa**  
Wyznaczanie krytycznej wartości współczynnika intensywności naprężeń w funkcji stanu zawilżenia kaolinu  
w „Obszary akademickiej wiedzy naukowej”, M.Gwoździcka-Piotrkowska, J. Wiśniewski, P. Zbiorowski (red.), pp. 187-194 , Wydawnictwo Altus 2012
- XXIII J. Banaszak, T. Śliwa, M. Stasiak**  
Badanie odporności na pękanie mas ceramicznych,  
Ceramic Materials/Materiały ceramiczne 2013 (przyjęta do publikacji)
- XXIV J. Banaszak**  
The moisture content and mechanical properties of ceramic masses,  
Ceramic Materials/Materiały ceramiczne 2013 (przyjęta do publikacji)
- XXV J. Banaszak, K. Rajewska**  
Suszenie mikrofalowe mas ceramicznych,  
Ceramic Materials/Materiały ceramiczne 2013 (przyjęta do publikacji)

## **WYKAZ POZOSTAŁYCH PUBLIKACJI I OSIĄGNIĘĆ ZWIĄZANYCH Z WŁASNĄ TEMATYKĄ BADAWCZĄ**

*(udział własny określono przy spisie wszystkich publikacji punkt 5.1 i 5.2)*

### Wykaz pozostałych publikacji związanych własną tematyką badawczą

1. **J. Banaszak, S.J Kowalski**  
Analiza destrukcji materiałów ceramicznych podczas suszenia, *Inżynieria chemiczna i procesowa*, Vol. 25 (3/1), pp. 673-678 (2004);
2. I. Fijał-Kirejczyk, J.J Milczarek, **J. Banaszak**, J. Żołądek, A. Trzcński  
Drying of Kaolin Clay Cylinders: Dynamic Neutron Radiography Studies  
*Defect and Diffusion Forum* Vols. 297-301, pp. 508-512 (2010);
3. **J. Banaszak, S.J Kowalski**  
Stresses in Viscoelastic Sphere Dried Convectively  
w serii wydawniczej: *Solid Mechanics and its Applications*, W. Ehlers (red.), Vol. 87, pp. 381-386, Kluwer 2001;
4. S. J Kowalski., **J. Banaszak**  
Stresses and Fractures in Capillary-Porous Materials Under Drying  
w “*Mechanics of 21st Century*”, W. Gutkowski, T.A. Kowalewski (red.) p.421+CD-ROM, Springer 2005;
5. **J. Banaszak, S. J Kowalski** (podręcznik akademicki)  
Metody akustyczne w badaniach inżynierskich, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, s.124,

Poznań 2011

6. J. Kowalski, **J. Banaszak**, K. Rajewska  
Acoustic Emission In Drying Materials  
w „Acoustic Emission- Research and Applications” (ed.) Wojciech Sikorski, InTech 2013,  
(przyjęta do publikacji)

### Prezentacje na konferencjach międzynarodowych i krajowych związane z głównym osiągnięciem

Zamieszczone poniżej prace były przedstawiane na konferencjach międzynarodowych i krajowych. Ze względu na interdyscyplinarne badania, które prowadziłem, prace były prezentowane na konferencjach mechanicznych i dotyczących materiałów porowatych, gdzie była dyskutowana poprawność sformułowanych założeń i szczegółów zapisu matematycznego oraz na konferencjach inżynierii chemicznej i procesowej i suszarniczych, na których w większości była analizowana doświadczalna strona prac.

### Konferencje międzynarodowe zagraniczne

1. **J. Banaszak**, S.J. Kowalski,  
Destruction of Clay Like Materials During Drying, 1-st International Conference on Energy-Saving Technologies for Drying and Hygrothermal Processing, Moskwa, 27-31 may 2002;
2. **J. Banaszak**, S.J. Kowalski,  
Identification of Acoustic Signals Generated in Clay During Drying, 1-st International Conference on Energy-Saving Technologies for Drying and Hygrothermal Processing, Moskwa, 27-31 may 2002;
3. **J. Banaszak**  
Failure of clay like materials during drying  
IDS 2006 - Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Drying Symposium Budapest, Hungary, 20-23 August 2006, Vol. A, pp. 455-500;
4. I. Fijał-Kirejczyk, J. J. Milczarek, **J. Banaszak**, J. Żołądek, A. Trzciński  
Drying of kaolin clay cylinders: dynamic neutron radiography studies  
5<sup>th</sup> International Conference on Diffusion in Solids and Liquids – Mass Transfer, Heat Transfer and Microstructure and Properties, DSL-2009, Rome, Italy, 24-26 June, 2009
5. **J. Banaszak**, G. Musielak  
Influence of moisture content on strength and yield stress limit of ceramic masses  
XII Polish Drying Symposium, Łódź, Poland, 14-16 Sept. 2009  
+ Proceedings of XII Polish Drying Symposium, pp 141-146.

6. S.J. Kowalski, **J. Banaszak**, A. Rybicki  
Plasticity in porous materials subjected to drying  
Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Drying Symposium IDS2010, Magdeburg, 3-6.10.2010, paper no 140
7. **J. Banaszak**, S.J. Kowalski, A. Rybicki  
Damage analysis of microwave dried materials  
Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Drying Symposium IDS2010, Magdeburg, 3-6.10.2010, paper no 287
8. **J. Banaszak**, I. Fijał-Kirejczyk, J.J. Milczarek, J. Żołądek, A. Trzciński  
Observation and analysis of mass transfer during drying of ceramic mass samples  
Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Drying Symposium IDS2010, Magdeburg, 3-6.10.2010, paper no 497
9. **J. Banaszak**, A. Pawłowski, D. Mierzwa  
Association of acoustic emission with drying process  
Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Drying Symposium IDS2010, Magdeburg, 3-6.10.2010, paper no 498
10. S. J. Kowalski, **J. Banaszak**, A. Rybicki  
Material destruction by microwave assisted drying, Proceedings of the European Drying Conference EuroDrying' 2011, Palma Balearic Island, Hiszpania, 26-28. October 2011

### Konferencje międzynarodowe i ogólnopolskie w kraju

1. **J. Banaszak**, S.J. Kowalski, G. Musielak  
Metodyka wyznaczania współczynników materiałowych dla termomechanicznego modelu suszenia, X Sympozjum Suszarnictwa, Łódź 17-19 września 2003;
2. **J. Banaszak**, S.J. Kowalski  
Analiza destrukcji materiałów ceramicznych podczas suszenia, XVII Ogólnopolska konferencja Naukowa Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Gliwice-Szczyrk 15-18 czerwca 2004;
3. **J. Banaszak**  
Risk of Cracking in Kaolin Clay Material during Drying  
The International Symposium on Trends in Continuum Physics TRECOP'04, Poznań, november 17-19, 2004; Proceedings of the International Symposium on Trends in Continuum Physics TRECOP'04 p. 48-55 (eds: B.T. Maruszewski, W. Muschlik, A. Radowicz), Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2004
4. S.J. Kowalski, **J. Banaszak**,  
Stresses and Fractures in Capillary-Porous Materials under Drying  
21<sup>st</sup> International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, August 15-21, 2004, Warsaw, Poland, CD-ROM Proceedings Paper No SM15L\_13006;
5. **J. Banaszak**  
Wyznaczenie efektywnego współczynnika przewodzenia ciepła dla materiałów suszonych  
XI Polskie Sympozjum Suszarnictwa, Poznań 13-16 września 2005, XI Polskie Sympozjum Suszarnictwa CD-ROM Proceedings;

6. G. Musielak, **J. Banaszak**, J. Kasperek  
Wyznaczanie zależności temperaturowej współczynnika dyfuzji wilgoci w nasączonym kaolinie  
XI Polskie Sympozjum Suszarnictwa, Poznań 13-16 września 2005, XI Polskie Sympozjum  
Suszarnictwa CD-ROM Proceedings
7. **J. Banaszak**  
Analysis of temperature distribution in kaolin cylinder during the convective drying  
5<sup>th</sup> International Conference Interpor 2006, Lubostroń/Bydgoszcz, May 24-27, 2006  
volume of extended abstracts p.17-18;
8. **J. Banaszak**, M. Datkiewicz  
Experimental investigation of influence of moisture content on the compressive strength of porous  
materials  
5<sup>th</sup> International Conference Interpor 2006, Lubostroń/Bydgoszcz, May 24-27, 2006  
volume of extended abstracts pp. 19-20;
9. G. Musielak, **J. Banaszak**  
Modelowanie strukturalne zjawisk transportu dla suszenia konwekcyjnego materiałów kapilarno-  
porowatych  
TECHEM 5 - V Kongres Technologii Chemicznej, Poznań 11-15 września 2006 r.  
Streszczenia tom 2 str. 198, Politechnika Poznańska, Wydział Technologii Chemicznej;
10. **J. Banaszak**, S.J. Kowalski, G. Musielak,  
Model suszenia umożliwiający sterowanie procesem  
XIX Ogólnopolska Konferencja Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Streszczenia Tom 3, 15-18,  
2007, Rzeszów;
11. **J. Banaszak**  
Quality of microwave dried ceramic products  
7<sup>th</sup> International Conference Interpor 2008, Lubostroń/Bydgoszcz, october 20-22, 2008, volume of  
extended abstracts p.77-78;
12. **J. Banaszak**  
Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity of kaolin clay  
7<sup>th</sup> International Conference Interpor 2008, Lubostroń/Bydgoszcz, october 20-22, 2008  
volume of extended abstracts p.57;
13. J. J. Milczarek, I. Fijał-Kirejczyk, J. Żołądek, **J. Banaszak**, Z. Jurkowski, J. Żołądek  
Neutron radiography observations during drying of capillary-porous materials  
7<sup>th</sup> International Conference Interpor 2008, Lubostroń/Bydgoszcz, October 20-22, 2008  
volume of extended abstracts p.79-80;
14. I. Fijał-Kirejczyk, J. J. Milczarek, **J. Banaszak**  
Dynamical Neutron Radiography studies of drying of kaolin clay cylinders  
Internacional Conference on Recent Developments and Applications of Nuclear Technologies,  
Białowieża, Poland 15-17 september 2008  
Conference abstracts p. 152;
15. I. Fijał-Kirejczyk, J. J. Milczarek, J. Żołądek, **J. Banaszak**, A. Trzeciński  
Badanie procesu suszenia materiałów porowatych z użyciem radiografii neutronowej  
VI Ogólnopolska Konferencja „Rozpraszanie neutronów i metody komplementarne  
w badaniach faz skondensowanych” 14-18 czerwca 2009, Chlewiska;
16. **J. Banaszak**, G. Musielak  
Influence of moisture content on strength and yield stress limit of ceramic masses  
XII Polish Drying Symposium, Łódź, Poland, 14-16 Sept. 2009  
+ Proceedings of XII Polish Drying Symposium, pp 141-146.



17. S.J. Kowalski, **J. Banaszak**, A. Rybicki  
Plasticity in porous materials subjected to drying  
Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Drying Symposium IDS2010, Magdeburg, 3-6.10.2010, paper no 140
18. S. J. Kowalski, **J. Banaszak**, G. Musielak,  
Influence of moisture content on mechanical properties in ceramic masses, SOLMECH Warszawa 2010
19. S. J. Kowalski, **J. Banaszak**, A. Rybicki  
Analiza destrukcji materiałów spowodowanej suszeniem mikrofalowym, Materiały II Kongresu Mechaniki Polskiej, Poznań, 29.08-2.09.2011
20. **J. Banaszak**, T. Śliwa, M. Stasiak  
Badanie odporności na pękanie mas ceramicznych, VII Międzynarodowa Konferencja Polska Ceramika 2012, Kraków 9-12.09.2012
21. **J. Banaszak**  
The moisture content and mechanical properties of ceramic masses, VII Międzynarodowa Konferencja Polska Ceramika 2012, Kraków 9-12.09.2012
22. **J. Banaszak**, K. Rajewska  
Suszenie mikrofalowe mas ceramicznych, VII Międzynarodowa Konferencja Polska Ceramika 2012, Kraków 9-12.09.2012

#### Udział w projektach badawczych :

1. **Kierownik projektu** badawczego MNiSzW pt.: „Modelowanie i eksperymentalna identyfikacja pęknięć w suszonych materiałach porowatych” (2009–2012)
2. **Główny wykonawca** projektu badawczego MNiSzW pt.: „Analiza spowodowanych suszeniem, trwałych deformacji oraz pęknięcia materiałów porowatych” (2008–2011), kierownik projektu: Dr hab. inż. Grzegorz Musielak
3. **Główny wykonawca** projektu badawczego KBN pt.: „Analiza efektywności złożonego suszenia konwekcyjno mikrofalowego materiałów szczególnie wrażliwych” (2005–2008), kierownik projektu: Prof. dr hab. inż. Stefan Jan Kowalski
4. **Główny wykonawca** projektu badawczego KBN pt.: „Optymalizacja komputerowo symulowanych procesów suszenia konwekcyjnego i mikrofalowego materiałów kapilarno-porowatych oraz ich weryfikacja doświadczalna” (2001–2004), kierownik projektu: Prof. dr hab. inż. Stefan Jan Kowalski

5. **Główny wykonawca** projektu badawczego KBN pt.: „Problem destrukcji intensywnie suszonych materiałów kapilarno-porowatych” (1997–2000), kierownik projektu: Prof. dr hab. inż. Stefan Jan Kowalski
6. **Uczestnik** w badaniach Instytutu Energii Atomowej, Raport IEA Nr: B 58/2007 pt.: „Obserwacje procesu schnięcia mas kaolinu metodą radiografii neutronowej”

Prowadzone badania naukowe łączą się również z prowadzonymi przeze mnie zajęciami dydaktycznymi:

- **Inżynieria ośrodków porowatych**, gdzie omawiam metody badań materiałów porowatych oraz podstawy prowadzenia procesu suszenia,
- **Metody akustyczne w zagadnieniach inżynierskich**, gdzie przedstawiam metodę emisji akustycznej – podstawy teoretyczne i jej praktyczne zastosowania, również w procesach suszarniczych.

4b) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

**Przewodnik** po ważniejszych publikacjach przedstawionych do oceny jako główne osiągnięcia naukowe przy wniosku o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego wg przepisów Ustawy o Szkolnictwie Wyższym obowiązujących od 01.10.2011r.

Temat wspólny badań i dokonanych opracowań jako główne osiągnięcie naukowe:

### **Destrukcja materiałów porowatych poddanych procesowi suszenia**

Spis treści przewodnika po publikacjach

<b>I. PRZEDMOWA .....</b>	<b>11</b>
<b>II. OPIS TEMATYKI BADAWCZEJ.....</b>	<b>15</b>
1. Wprowadzenie.....	15
2. Zakres badań .....	16
3. Przegląd najważniejszych wyników zawartych w omawianych publikacjach.....	19
<b>III. PODSUMOWANIE.....</b>	<b>37</b>

## I. PRZEDMOWA

Prezentowany przewodnik po ważniejszych publikacjach jest podsumowaniem wieloletnich badań własnych nad materiałami kapilarno-porowatymi w procesie suszarniczym, generowanych w nich naprężeniach suszarniczych, deformacjach oraz destrukcji, której ulegają podczas tego procesu oraz teoretycznych opisów tych zjawisk. Prowadzone przeze mnie prace mają charakter zarówno indywidualny jak i zespołowy, dlatego też w wielu wymienionych poniżej pracach jestem współautorem (w załączeniu zestaw oświadczeń odnośnie udziału habilitanta i współpracowników z zaznaczeniem udziałów procentowych).

Poniżej przedstawiono chronologiczny wykaz publikacji. Są one w opracowaniu oznaczone cyframi rzymskimi. W załączeniu do opracowania publikacje te dołączono w formie drukowanej, obowiązującej dla Wydawnictwa.

- I        **J. Banaszak**, S.J Kowalski  
Drying Induced Stresses Estimated on the Base of Elastic and Viscoelastic Models  
*Chemical Engng. Journal*, Vol. 86, pp. 139-143 (2002);
- II        S.J. Kowalski, **J. Banaszak**, K.Rajewska  
Emisja akustyczna w materiałach suszonych,  
*Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, Vol. 42 (4), pp. 3-8 (2003);
- III       **J. Banaszak**, S.J Kowalski, G. Musielak  
Determination of Material Coefficients for the Thermomechanical Model of Drying  
*Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. 26 (1-2), pp. 15-24 (2004);
- IV       **J. Banaszak**  
Risk of Cracking in Kaolin Clay Material during Drying  
The International Symposium on Trends in Continuum Physics TRECOP'04, Poznań,  
november 17-19, 2004; Proceedings of the International Symposium on Trends in  
Continuum Physics TRECOP'04 p. 48-55 (eds: B.T. Maruszewski, W. Muschlik, A.  
Radowicz), Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2004
- V        **J. Banaszak**  
Wyznaczenie efektywnego współczynnika przewodzenia ciepła dla materiałów suszonych  
XI Polskie Sympozjum Suszarnictwa, Poznań 13-16 września 2005, XI Polskie Sympozjum  
Suszarnictwa CD-ROM Proceedings;

- VI** G. Musielak, **J. Banaszak**, J. Kasperek  
Wyznaczanie zależności temperaturowej współczynnika dyfuzji wilgoci w nasączonym kaolinie  
XI Polskie Sympozjum Suszarnictwa, Poznań 13-16 września 2005, XI Polskie Sympozjum Suszarnictwa CD-ROM Proceedings
- VII** **J. Banaszak**, S.J. Kowalski  
Theoretical and experimental analysis of stresses and fractures in clay like materials during drying,  
*Chemical Engineering and Processing* Vol. 44, (4), pp. 497-503 (2005);
- VIII** G. Musielak, **J. Banaszak**  
Non-Linear Heat and Mass Transfer during Convective Drying of Kaolin Cylinder under Non-Steady Conditions  
*Transport in Porous Media* Vol. 66, pp. 121-134 (2007);
- IX** S.J. Kowalski, G. Musielak, **J. Banaszak**  
Experimental validation of heat and mass transfer model for convective drying  
*Drying Technology* Vol. 25(1), pp. 107-121 (2007);
- X** **J. Banaszak**  
Analiza procesu suszenia na podstawie rozkładu temperatury w suszonych wyrobach;  
*Inżynieria i aparatura chemiczna* Vol. 46 (2), pp.14-17 (2007);
- XI** **J. Banaszak**  
Damage in ceramic masses during drying; *Inżynieria Chemiczna i Procesowa* Vol. 28 (2), pp. 177-188 (2007);
- XII** **J. Banaszak**  
Analiza jakościowa materiałów suszonych mikrofalowo  
*Inżynieria i Aparatura Chemiczna* Vol. 48 (3), pp. 130-135 (2009);
- XIII** **J. Banaszak**, G. Musielak  
Influence of moisture content on strength and yield stress limit of ceramic masses  
XII Polish Drying Symposium, Łódź, Poland, 14-16 Sept. 2009  
+ Proceedings of XII Polish Drying Symposium, pp 141-146.
- XIV** I. Fijał-Kirejczyk, J.J. Milczarek, **J. Banaszak**, A. Trzeciński, J. Żołądek  
Dynamical Neutron Radiography studies of drying of kaolin clay cylinders  
*Nukleonika* Vol. 54(2), pp. 123-128 (2009);
- XV** **J. Banaszak**, I. Fijał-Kirejczyk, J.J. Milczarek, J. Żołądek, A. Trzeciński  
Observation and analysis of mass transfer during drying of ceramic mass samples  
Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Drying Symposium IDS2010, Magdeburg, 3-6.10.2010, paper no 497

- XVI J. Banaszak**, A. Pawłowski, D. Mierzwa  
Association of acoustic emission with drying process  
Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Drying Symposium IDS2010, Magdeburg, 3-6.10.2010, paper no 498
- XVII S.J. Kowalski**, G. Musielak, **J. Banaszak**  
Heat and mass transfer during microwave-convective drying  
*AIChE Journal*, Vol. 56(1), pp. 24-35 (2010);
- XVIII S.J. Kowalski**, **J. Banaszak**, A. Rybicki  
Plasticity in Materials Exposed to Drying, *Chem. Engineering Science* Vol. 65 (18), pages 5105-5116 (2010);
- XIX S. J. Kowalski**, **J. Banaszak**, A. Rybicki  
Damage Analysis of Microwave-Dried Materials,  
*AIChE Journal* Volume 58, Issue 7, pages 2097–2104, (2012)
- XX J. Banaszak**  
Wpływ zawartości wilgoci na parametry geotechniczne ceramicznych mas formierskich w „Obszary akademickiej wiedzy naukowej”, M.Gwoździcka-Piotrkowska, J. Wiśniewski, P. Zbiorowski (red.), pp. 159-167 , Altus 2012
- XXI J. Banaszak**  
Thermal properties of kaolin clay  
w „Academic areas of scientific knowledge”, M.Gwoździcka-Piotrkowska (ed.), pp.11-21, Wydawnictwo Altus, Poznań 2012
- XXII J. Banaszak**, T. Śliwa  
Wyznaczanie krytycznej wartości współczynnika intensywności naprężeń w funkcji stanu zawilżenia kaolinu  
w „Obszary akademickiej wiedzy naukowej”, M.Gwoździcka-Piotrkowska, J. Wiśniewski, P. Zbiorowski (red.), pp. 187-194 , Wydawnictwo Altus 2012
- XXIII J. Banaszak**, T. Śliwa, M. Stasiak  
Badanie odporności na pękanie mas ceramicznych,  
Ceramic Materials/Materiały ceramiczne 2013 (przyjęta do publikacji)
- XXIV J. Banaszak**  
The moisture content and mechanical properties of ceramic masses,  
Ceramic Materials/Materiały ceramiczne 2013 (przyjęta do publikacji)
- XXV J. Banaszak**, K. Rajewska  
Suszenie mikrofalowe mas ceramicznych,  
Ceramic Materials/Materiały ceramiczne 2013 (przyjęta do publikacji)

W opracowaniu przedstawiono te publikacje, jako kolejne etapy badań własnych z wyszczególnieniem ważniejszych uzyskanych rezultatów. Kolejne prace stanowią naturalne, w procesie rozwoju, uzupełnienie i rozszerzenie przeprowadzanych wcześniej badań.

Prace **I, IV, XI, XVIII, XIX** poświęcono teoretycznej analizie destrukcji w materiałach, powstającej w trakcie suszenia materiałów. W publikacjach **I, XVIII** przedstawiono wpływ przyjętego modelu teoretycznego (sprężystego **I**, lepko-sprężystego **I**, sprężysto-plastycznego **XVIII**) na rozwój naprężeń w suszarniczych w materiale. Znajomość rozkładu i ewolucji naprężeń suszarniczych pozwala na teoretyczne wskazanie miejsc najbardziej narażonych na ryzyko zniszczenia i czasu jego wystąpienia. Problem ten opisano w pracach **IV, XI**, dla suszenia konwekcyjnego i w pracy **XIX** dla suszenia mikrofalowego. Wskazano w nich, że nie tylko rejony przy powierzchni są narażone na zniszczenie, ale również wewnątrz materiału może przy spełnieniu określonych warunków ulec destrukcji. W pracy **IV** zaproponowano kryterium zniszczenia dla materiałów ceramicznych, precyzujące czy materiał ulegnie destrukcji wskutek nieodwracalnych plastycznych deformacji lub kruchemu spękaniu.

Prace **II, III, V, VI, VII, VIII, IX, X, XII, XIII, XIV, XV, XVI, XVII, XIX, XX, XXI, XXII, XXIII, XXIV, XXV** poświęcone są badaniom doświadczalnym. Badania przeprowadzono dla mas ceramicznych oraz różnych gatunków drewna. Jednakże podstawowym i najczęściej stosowanym materiałem badawczym był kaolin KOC. Przeprowadzone badania doświadczalne miały charakter wieloaspektowy. Część z nich dotyczyła bezpośrednio problematyki destrukcji suszonych materiałów kapilarno-porowatych (**II, VII, XII, XVI, XIX, XXV**).

Jako podstawową technikę pomiarową badania zniszczeń i monitorowania stanu próbek zastosowano metodę emisji akustycznej dla suszenia konwekcyjnego (**II, VII, XVI**) oraz pionierskie wykorzystanie tej metody w suszeniu mikrofalowym (**II, XXV**). Porównanie otrzymanych w doświadczeniach sygnałów emisji akustycznej w trakcie suszenia próbek z teoretycznie wyznaczonych naprężeń suszarniczych dla próbki walcowej przeanalizowano w pracy **VII**, uzyskując dobrą zgodność rezultatów.

Kolejną grupę eksperymentów, opisanych w pracach **VIII**, **X**, **XIV**, **XV**, **XVII**, wykonano w celu zbadania poprawności otrzymywanych teoretycznie wyników rozwiązywanych problemów początkowo-brzegowych. Przeprowadzone badania dotyczyły głównie charakterystyki kinetyki procesu suszenia, co pozwoliło na skorelowanie otrzymanych wyników eksperymentalnych z danymi teoretycznymi (**XVII**). W pracach **X**, **XIV**, **XV**, **XVII** badano ustalone warunki suszenia. W artykułach **X**, **XVII** analizowano rozkłady temperatury i jej zmiany w trakcie suszenia, a w pracach **XIV**, **XV**, wykorzystano metodę radiografii neutronowej do obserwacji ubytku wilgoci w próbkach w trakcie ich suszenia. Praca **VIII** poświęcona była walidacji modelu teoretycznego dla zadanej zmiennej temperatury czynnika suszącego.

Otrzymywanie poprawnych wyników symulacji numerycznych jest niemożliwe bez znajomości współczynników materiałowych, stąd uzupełniającą grupę badań stanowiły doświadczenia, mające na celu wyznaczenie współczynników materiałowych (**III**, **V**, **VI**, **XIII**, **XX**, **XXI**, **XXII**, **XXIII**, **XXIV**), wykorzystywanych w przyjętym termomechanicznym modelu teoretycznym.

Podstawowe współczynniki struktury kaolinu (m. in. gęstość szkieletu, gęstość pozorną, porowatość, skurcz suszarniczy) określono w pracy **XXI**.

W pracach **III**, **XIII**, **XXIII**, **XXIV** zbadano parametry mechaniczne mas ceramicznych. W pracy **III** wyznaczono w testach mechanicznych moduł Younga i moduł odkształceń postaciowych. Zaproponowano również metodę wyznaczania pozostałych parametrów mechanicznych sprężystych oraz współczynników lepkosprężystych. Pozostałe współczynniki sprężystości i wytrzymałości w funkcji zawartości wilgoci dla kaolinu KOC. W pracy **XXIV** przedstawiono wpływ zawartości wilgoci na wytrzymałość różnych mas ceramicznych. W pracy **XXII**, **XXIII**, wyznaczono współczynnik intensywności naprężeń w zależności od wilgotności kaolinu, który stanowi podstawową stałą materiałową wykorzystywaną w mechanice pęknięcia. Współczynnik ten wyznaczono zginania próbek z karbem (**XXII**, **XXIII**) oraz metodą uproszczoną Vickersa (**XXIII**).

Pracę **VI** poświęcono wyznaczaniu zależności temperaturowej współczynnika dyfuzji wilgoci w kaolinie. Po określeniu rzeczywistego rozkładu wilgoci w próbce suszonej, a następnie optymalizację rozwiązania jednowymiarowego problemu początkowo-brzegowego wyznaczono współczynnik dyfuzji.

W pracach **V**, **XXI** badano współczynniki cieplne kaolinu w zależności od ich wilgotności i temperatury. W pracy **V** stosując metodą „gorącego drutu” wyznaczono współczynnik przewodności cieplnej kaolinu w funkcji wilgotności i temperatury. Pozostałe współczynniki cieplne (przewodność cieplną, dyfuzyjność cieplną, ciepło właściwe) dla kaolinu w funkcji wilgotności określono w pracy **XXI**.

## **II. OPIS TEMATYKI BADAWCZEJ**

### **1. Wprowadzenie**

Pracując Instytucie Technologii i Inżynierii Chemicznej Wydziału Technologii Chemicznej Politechniki Poznańskiej moje zainteresowania naukowe ściśle odpowiadały głównej tematyce naukowej grupy prof. dr hab. inż. Stefana Jana Kowalskiego dotyczącej teoretycznych i praktycznych aspektów procesów suszenia materiałów kapilarno-porowatych. Uczestnicząc w kolejnych zadaniach badawczych tworzyłem i rozwijałem, przede wszystkim metody doświadczalne. Szczególnie interesowała mnie eksperymentalna weryfikacja osiąganych dotychczas tylko na drodze teoretycznej wyników. Wraz ze stopniowym rozwojem bazy aparaturowej starałem się wykorzystywać ją do jak najlepszego opisu procesu suszarniczego wykorzystując pomiarowe techniki tradycyjne jak i dotychczas rzadko stosowane (np. badanie pól temperatury za pomocą termowizji, badanie rozkładu wilgoci za pomocą metody radiografii neutronowej). Od 2000r zainteresowałem się możliwościami wówczas mało popularnej metody emisji akustycznej i jej zastosowania w aspekcie naukowym, poznawczym i aplikacyjnym w procesach suszarniczych. W swoich badaniach w szczególności wykorzystywałem tę metodę do analizy procesu zniszczenia materiałów suszonych. Moje zainteresowania naukowe objęły również analizę teoretyczną miejsc powstawania zniszczeń w



materiałach suszonych, uwzględniających ich właściwości sprężysto-plastyczne i reologiczne stosując kryterium energetycznego Hubera-Misesa do wskazania miejsc najbardziej podatnych na zniszczenie. Stopniowo w trakcie mojej pracy wyznaczyłem także większość współczynników materiałowych (termicznych, mechanicznych i opisujących strukturę materiału) występujących w teoretycznym modelu, co znacząco poprawiło poprawność uzyskiwanych rezultatów z symulacji numerycznych procesów suszarniczych w zespole naukowym.

## **2. Zakres badań**

W swoich wieloletnich badaniach prowadzone przeze mnie dotyczących analizy destrukcji w materiałach porowatych można wydzielić dwa główne człony: analizę teoretyczną i doświadczalną. Analiza teoretyczna (punkt. 3.1) ukierunkowana była głównie na zaproponowanie kryterium, w jakich warunkach mogą powstawać pęknięcia w suszonych materiałach. Ponieważ destrukcja materiałów jest związana bezpośrednio z generowanymi naprężeniami suszarniczymi, to głównie im poświęcono uwagę w pracach teoretycznych. W trakcie wieloletnich badań przeanalizowałem jaki wpływ na wyindukowane naprężenia ma uwzględnienie właściwości sprężystych, lepkosprężystych bądź plastycznych materiału. Symulacje numeryczne rozwoju naprężeń suszarniczych dla jednowymiarowych zagadnień początkowo-brzegowych wykonywałem osobiście korzystając z metody różnic skończonych według schematu Crancka-Nicholsona. W badaniach teoretycznych wykorzystywałem model teoretyczny opracowany i rozwijany przez Prof. Kowalskiego odpowiednio przekształcany do konkretnych rozważanych przypadków.

Badania eksperymentalne prowadziłem głównie na masach ceramicznych, a szczególnie dużo miejsca poświęciłem kaolinowi KOC, wybranemu jako materiał referencyjny. W części dotyczącej prowadzonym przeze mnie badaniom eksperymentalnym (punkt 3.2) związanych analizą zniszczeń wydzielić można trzy podgrupy.

Pierwsza grupa badań (3.2.1) dotyczyła bezpośrednio zagadnieniu destrukcji materiałów powstałych w trakcie suszenia mas ceramicznych i drewna i ich analizie za pomocą metody emisji akustycznej. Dla tej, niewykorzystywanej dotychczas przy suszeniu mas ceramicznych techniki, opisałem powiązania pomiędzy naprężeniami suszarniczymi, destrukcją materiałów a odpowiednimi deskryptorami EA. Badania przeprowadzano zarówno dla suszenia konwekcyjnego jak i mikrofalowego. W swoich badaniach wykorzystywałem również inne techniki eksperymentalne (punkt 3.2.2), uważając że stosowanie wielu metod badawczych poszerza wiedzę o destrukcji zachodzącej w materiałach podczas suszenia. Przykładowo zastosowanie termowizji pozwoliło na wskazanie miejsc w których powstaje gwałtowna przemiana wody w parę w trakcie suszenia mikrofalowego, będącymi inicjatorami pęknięć. W pracach opisywanych w punktach 3.2.1 i 3.2.2 przedstawiono również powiązanie miejsc powstawania rzeczywistych pęknięć z teoretycznymi obszarami najbardziej narażonymi na destrukcję, wskazanymi w symulacjach numerycznych.

Druga grupa badań eksperymentalnych (punkt 3.2.3) dotyczyła walidacji wykorzystywanego modelu teoretycznego. W doświadczeniach wykonanych w tym punkcie badano rozkłady temperatur i wilgoci (wykorzystując metodę radiografii neutronowej) w suszonych próbkach. Uzyskano wyniki dotyczące charakterystyki kinetyki procesu suszenia, co pozwoliło na zbadanie poprawności rezultatów otrzymywanych z rozważanego modelu teoretycznego z danymi eksperymentalnymi. Uzyskano jednocześnie wiedzę o ograniczeniach stosowalności używanych uproszczonych modeli teoretycznych

Trzecią grupę badań (punkt 3.2.4) stanowiły doświadczenia mające na celu wyznaczenie współczynników materiałowych występujących w przyjętych modelach teoretycznych. Badaano stałe materiałowe mechaniczne, cieplne i opisujące strukturę analizowanych materiałów porowatych, często z uwzględnieniem ich zmienności w funkcji wilgotności materiału. Wyznaczone przeze mnie stałe materiałowe są wykorzystywane bezpośrednio w nieliniowych obliczeniach numerycznych suszarniczych problemów początkowo-brzegowych, co znacząco wpłynęło na poprawę precyzji otrzymywanych rezultatów symulacji procesów suszenia.

### **3. Przegląd najważniejszych wyników zawartych w omawianych publikacjach**

#### **3.1 Modelowanie zjawisk mechanicznych spowodowanych suszeniem**

Zniszczenia struktury wyrobów w trakcie procesu suszenia powstają w wyniku wygenerowanych nadmiernych naprężeń suszarniczych. W pracy I rozpatrywano teoretyczną analizę naprężeń suszarniczych dla próbki o geometrii walcowej. Skoncentrowano się tutaj na różnicy przy opisie suszonego materiału modelem opartym na związku fizycznym sprężystym Hooke'a oraz lepkosprężystym Maxwella. Zauważono, że dla materiału mającego właściwości reologiczne, występuje zjawisko rewersji naprężeń (zmiany znaku ze ściskających na rozciągające), które może być jedną z przyczyn powstawania pęknięć materiałach w drugim okresie suszenia.

W pracy I rozważano również wpływ zaniku cech lepkosprężystych na badany materiał, w trakcie suszenia, co odpowiada rzeczywistym obserwacjom zaniku właściwości reologicznych wraz z ubytkiem zawartości wilgoci w materiale.

Model sprężysty nie opisuje w sposób właściwy zachowania się suszonego w całym zakresie wilgotności materiału w trakcie procesu jego suszenia. Szczególnie na początku procesu, gdy materiał jest wilgotny zastosowanie modelu sprężystego wprowadza błędy. Istnieje potrzeba stosowania modeli uwzględniających właściwości reologiczne bądź plastyczne rozpatrywanych materiałów. Stąd w pracy XVIII zaproponowano model sprężysto-plastyczny. Zgodnie z teorią plastyczności po przekroczeniu granicy plastyczności materiał ulega odkształceniom postaciowym przy niezmienniej wartości naprężeń. Tego typu deformacje kształtu są widoczne w materiałach suszonych szczególnie na początku suszenia i są poprawnie opisane za pomocą modelu plastycznego. W drugim okresie suszenia dochodzi do rewersji naprężeń. W przeciwieństwie do modelu lepkosprężystego (praca I) naprężenia nie ulegają stopniowemu wygaszaniu lecz pozostają w materiale (tzw. naprężenia resztkowe), tłumacząc powstawanie pęknięć.

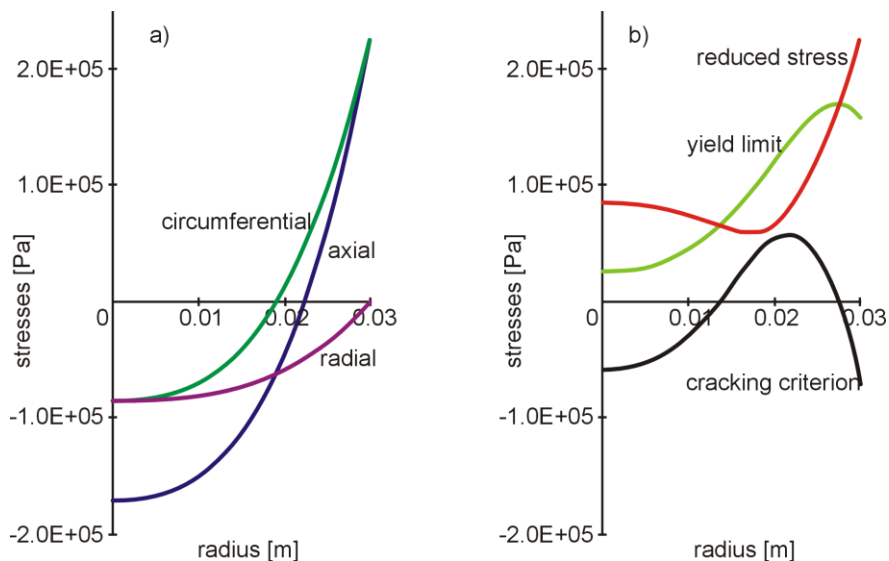
Znajomość rozkładu i ewolucji naprężeń suszarniczych pozwala na teoretyczne wskazanie momentów oraz miejsc najbardziej narażonych na ryzyko zniszczenia.

Problem ten opisano w pracach **IV**, **XI**, dla suszenia konwekcyjnego i w pracy **XIX** dla suszenia mikrofalowego.

W pracy **IV** zaproponowano kryterium destrukcji materiału poddanego suszeniu. Założono, że materiał ulega zniszczeniu, gdy teoretycznie wyznaczone zredukowane naprężenia suszarnicze przekroczą granicę plastyczności materiału

$$CC = \sigma_y - \sigma_{red}$$

gdzie  $cc$  – kryterium zniszczenia,  $\sigma_y$  – granica plastyczności materiału wyznaczona doświadczalnie dla kaolinu KOC w próbach jednoosiowego rozciągania (**XXIV**),  $\sigma_{red}$  – naprężenie zredukowane powodujące uplastycznienie materiału wyznaczone zgodnie z kryterium energetycznym Hubera-Misesa.



Rys. 1 Rozkład naprężeń w suszonym walcu: a) składowe tensora naprężeń b) kryterium pęknięcia i jego składowe: doświadczalna granica plastyczności materiału i teoretycznie wyznaczone naprężenie zredukowane [**IV** - rys. 2]

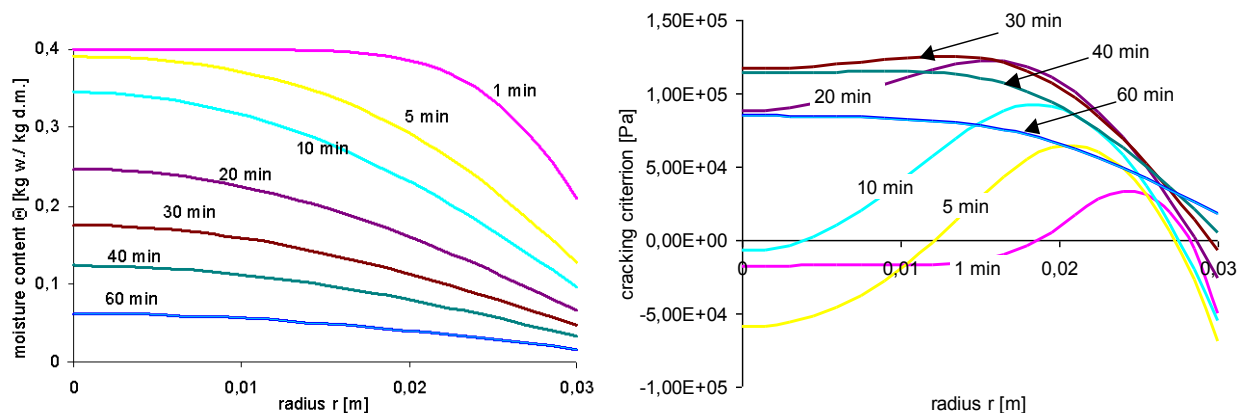
Jak wykazały symulacje numeryczne najbardziej narażonym miejscem na zniszczenie jest jego powierzchnia, gdzie wartości naprężeń szybko rosną w wyniku nierównomiernych rozkładów wilgotności. Jest to zgodne z dokonanymi obserwacjami (np. **VII**, **XII**).

W pracy **IV** wykazano, że w badanych próbkach istnieją dwa obszary, w których prawdopodobne jest przekroczenie wytrzymałości materiału przez naprężenia suszarnicze. Zazwyczaj dochodzi do zniszczeń na powierzchni próbek. Są one łatwo zauważalne i często w literaturze opisywane. Oprócz powierzchni próbki do zniszczeń może dojść także wewnątrz próbki. Zauważono, że szczególnie wrażliwe są materiały o znacznej początkowej zawartości wilgoci, gdyż granica plastyczności dla wilgotnych materiałów ma najczęściej niewielkie wartości. Zatem wygenerowane naprężenia suszarnicze wewnątrz próbki (z reguły osiągające wartości znacząco niższe niż naprężenia te powierzchni) mogą relatywnie łatwo osiągnąć wartości przewyższające granicę plastyczności materiału. Taka sytuacja najczęściej zachodzi, gdy bardzo wilgotne materiały suszone są w ostrych reżimach suszarniczych. Dochodzi wówczas do zniszczenia wnętrza próbki, co zostało opisane w pracy **XII**, gdzie zaobserwowano trwałe deformacje rdzenia w trakcie suszenia próbek po zaaplikowaniu wystarczająco dużej mocy pola mikrofalowego.

Praca **XI** stanowi kontynuację i rozwinięcie badań pracy **IV**. Celem była analiza możliwości zniszczenia różnych mas formierskich (oprócz opisywanego powyżej kaolinu KOC, badano również glinę używaną do produkcji ceramiki budowlanej oraz ceramikę elektrotechniczną C130, stosowaną do produkcji transformatorów pniowych wysokich napięć). Rozwinięto w niej opis kryterium destrukcji o sposób w jaki próbka ulega zniszczeniu. Na podstawie obserwacji doświadczalnych (**XX**) stwierdza się, że istnieje pewna wilgotność materiału, tożsama dla materiałów ilastych z tzw. wilgotnością krytyczną, związaną z powstawaniem suchych miejsc na powierzchni i przejściem z okresu stałej szybkości suszenia do okresu malejącej szybkości suszenia. Doświadczalnie zbadano że wynosi ona dla kaolinu ok. 11-12% , ceramiki C130 ok. 8% i dla gliny ok. 6-7%. Wówczas przy tak określonej wilgotności typ powstałej destrukcji w suszonych próbkach może przebiegać dwojako:

Jeżeli w pewnym miejscu w próbce kryterium pęknięcia będzie spełnione (wartość  $cc < 0$ ), a jednocześnie materiał w tym miejscu ma zawartość wilgoci powyżej wilgotności krytycznej to ulegnie on *trwałym plastycznym deformacjom*. Natomiast jeżeli

zawartość wilgoci jest mniejsza od wilgotności krytycznej to ulegnie on *kruchym pęknięciom*.



Rys. 2 Suszenie kaolinowego walca a) rozkład wilgoci b) kryterium zniszczenia [IV - rys. 5]

Tak skonstruowane teoretyczne kryterium zniszczenia materiałów poddanych suszeniu jest zależne od indywidualnych cech materiału (wytrzymałość materiału, wilgotność krytyczna) oraz uniwersalne dla różnych modeli teoretycznych opisujących materiał związkami fizycznymi sprężystości, lepkosprężystości, plastyczności bądź ich dowolną kombinacją.

### 3.2 Badania doświadczalne

Przeprowadzone badania doświadczalne miały charakter wieloaspektowy. Część z nich dotyczyła bezpośrednio problematyki destrukcji suszonych materiałów porowatych. (II, VII, XII, XVI, XIX, XXV). Pozostałe badania dotyczyły charakterystyki samego procesu suszenia (VIII, X, XIV, XV, XVII) co pozwoliło na skorelowanie wyników teoretycznych z danymi eksperymentalnymi.

Osobną grupę badań stanowiły doświadczenia mające na celu wyznaczenie współczynników materiałowych w funkcji wilgotności, występujących w przyjętych modelach teoretycznych. Pewną część z tych badań opublikowano jako osobne publikacje (III, V, VI, XIII, XX, XXI, XXII, XXIII, XXIV), jednak w większości są one

wykorzystywane bezpośrednio w nieliniowych obliczeniach numerycznych w pracach, które wskazują, że zastosowanie współczynników materiałowych zależnych od wilgotności pozwala osiągnąć znacznie lepszą korelację wyników doświadczalnych i teoretycznych modeli uwzględniających zmienność właściwości fizykochemicznych (np. VIII, XI).

### **3.2.1 Badania doświadczalne destrukcji suszonych materiałów porowatych za pomocą metody emisji akustycznej**

Podczas suszenia konwekcyjnego ciepło dostarczane jest z otoczenia przez powierzchnię materiału, na ogół od powietrza o temperaturze wyższej od temperatury materiału suszonego. Stąd strumień ciepła dostarczonego do materiału ma zwrot przeciwny do zwrotu strumienia masy. Zjawisko termodyfuzji nie sprzyja wyprowadzaniu wilgoci z wnętrza materiału, co skutkuje bardziej nierównomiernym jej rozkładem w materiale i jednocześnie generowaniem znacznych naprężeń suszarniczych. Naprężenia suszarnicze mogą powodować deformacje i pęknięcia powstające w strukturze materiałów porowatych będące źródłem emisji sygnałów akustycznych. Intensywność tych sygnałów, ich liczba oraz energia może służyć do oceny stanu naprężenia generowanego procesem suszenia w materiale wilgotnym. Do monitorowania i diagnozowania procesów suszenia użyto *metody emisji akustycznej (EA)*. Obszerny opis tej techniki pomiarowej wraz z zastosowaniami zawarto w podręczniku **E4**. Najwięcej doniesień literaturowych istnieje na temat wykorzystania metody EA do suszenia drewna, gdzie jest badana od lat 80-tych ubiegłego wieku. Sporadyczne wzmianki dotyczą suszenia betonów. Nie znaleziono dotychczas informacji o wykorzystaniu tej techniki badawczej w suszeniu mas ceramicznych.

W pracy **II** zaprezentowano możliwości tej metody do analizy on-line postępującej destrukcji materiału suszonego, na przykładzie suszenia kaolinu i drewna. Metoda ta pozwala ocenić pośrednio ewolucję naprężeń, a przede wszystkim zidentyfikować okres suszenia, w którym naprężenia suszarnicze osiągają wartości maksymalne. W tym

sensie metoda EA może wspomagać kontrolę procesu suszenia i umożliwić sterowanie nim on-line.

Dotychczasowe doniesienia literaturowe wskazywały na użyteczność tej metody podczas monitorowania suszenia konwekcyjnego drewna i sterowania procesem w celu uzyskania pożądanej jakości końcowej próbek. Przeprowadzone badania wskazały, że gdy wilgotność warstw przypowierzchniowych drewna spada poniżej punktu nasycenia włókien PNW tj. ok. 30%, a wilgotność rdzenia pozostaje powyżej PNW to dochodzi do wzmożonej aktywności akustycznej. Można przyjąć że tempo zdarzeń akustycznych jest proporcjonalne do naprężeń suszarniczych powstałych w drewnie. Drewno jest materiałem akustycznym, stosunkowo łatwym do badania metodą EA.

Natomiast badania na masach ceramicznych typu glina, kaolin, są o wiele trudniejsze do wykonania, ze względu na wysoki stopień tłumienia amplitudy fali akustycznej oraz konieczność umiejętnego odfiltrowania rzeczywistych sygnałów pomiarowych od sygnałów tła.

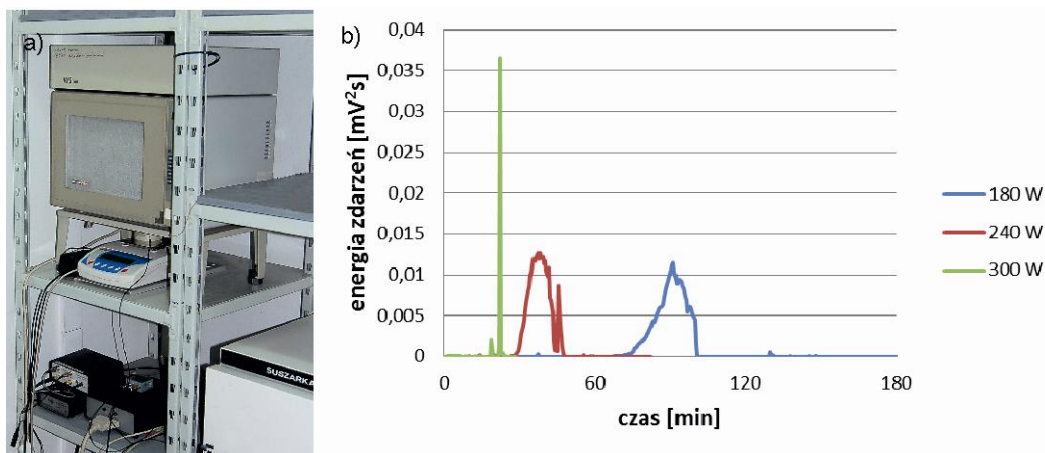
W pracy II przedstawiono także wstępne wyniki z pionierskiego w skali światowej użycia metody EA w laboratoryjnych badaniach suszenia mikrofalowego. W porównaniu z suszeniem konwekcyjnym zbierano znacznie mniej sygnałów akustycznych. Pozostaje to w zgodzie z teorią, ponieważ dla porównywalnych warunków suszenia konwekcyjnego i mikrofalowego, rozkład zawartości wilgoci w próbce dla suszenia mikrofalowego jest bardziej równomierny (strumień masy i ciepła mają ten sam zwrot skierowany na zewnątrz materiału, gdyż ciepło dostarczane jest do materiału suszonego objętościowo w wyniku dyspersji monochromatycznych fal o wysokiej częstotliwości). Równomierny rozkład wilgoci w suszeniu mikrofalowym generuje mniejsze naprężenia, a zatem i spadek aktywności akustycznej.

Rozszerzenie badań dla suszenia mikrofalowego przedstawiono w pracy **XXV**. Na rysunku 3 przedstawiono średnią energię zdarzeń akustycznych. Dla próbki suszonej z mocą magnetronu 300W w momencie powstania szczeliny wygenerowana została fala sprężysta o dużej energii akustycznej którą wychwyciła aparatura EA. Jest to uwidocznione na rysunku 3b, jako wysoki pojedynczy pik w 20 minucie procesu. Dla



próbek suszonych w 180W i 240W ich zniszczenie następowało stopniowo, poprzez odrywanie małych kawałków. W związku z tym impulsów akustycznych jest znacznie więcej niż w przypadku próbki suszonej w 300W, jednakże średnia energia przypadająca na jedno zdarzenie jest niższa (rysunek 3b). Do destrukcji próbek dochodziło głównie pod koniec procesu suszenia. Wraz z maleniem mocy suszenia destrukcja próbek i sygnały emisji akustycznej były notowane coraz później.

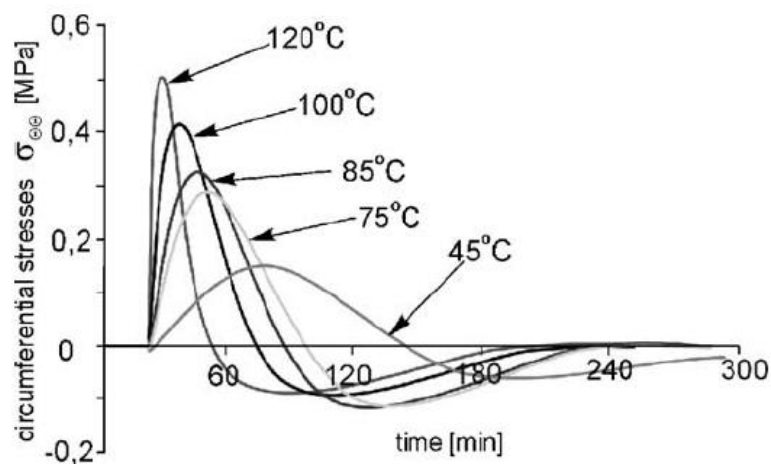
W wyniku przeprowadzonych badań można wywnioskować, że metoda EA jest szczególnie użyteczna dla próbek w których nie widać uszkodzeń zewnętrznych, a posiadających wady wewnętrzne powstałe w suszeniu – plastyczne deformacje rdzenia (np. próbki suszone w 180 W). Analizując on-line dany proces suszenia możemy na bieżąco stwierdzić, czy materiał w danej chwili ulega zniszczeniu, czy też nie. Jest to pomocne w optymalnym doborze parametrów suszenia.



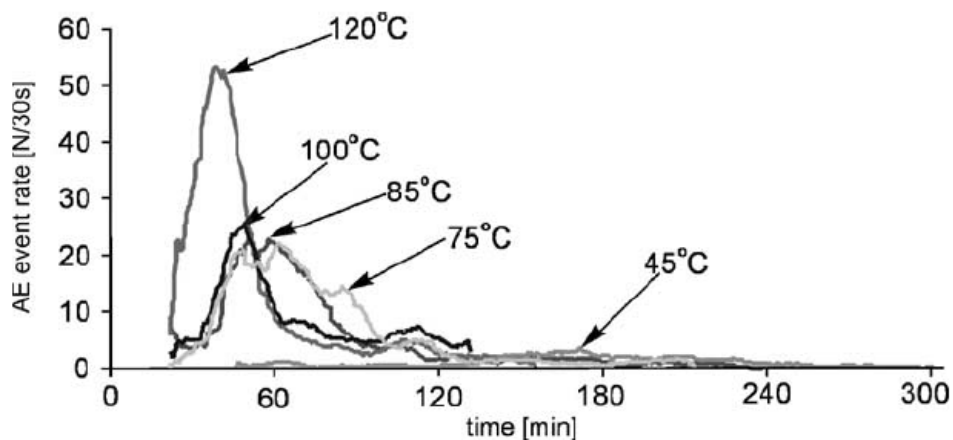
Rys. 3. Wyniki pomiaru EA dla suszenia mikrofalowego kaolinu: a) aparatura , b) średnia energia zdarzeń EA [XXV – rys. 6]

Eksperymentalną weryfikację naprężeń suszarniczych i porównanie jej z teoretycznymi rozkładami przeanalizowano w pracy VII. Badano procesy pęknięcia próbek walcowych wykonanych z kaolinu KOC dla pięciu różnych warunków suszarniczych. Porównanie tych sygnałów z wyznaczonymi w sposób analityczno-numeryczny lepkosprężystymi naprężeniami pozwala zidentyfikować momenty w trakcie procesu suszenia, w których powstawanie pęknięć w materiale jest najbardziej prawdopodobne (rys. 4 i 5). Uzyskano ewidentne podobieństwo ekstremów sygnałów i naprężeń w

określonych chwilach czasu. Wyniki te potwierdzają, że deskryptor tempo zdarzeń EA jest dobrym wyznacznikiem stanu naprężeń w masach ceramicznych.



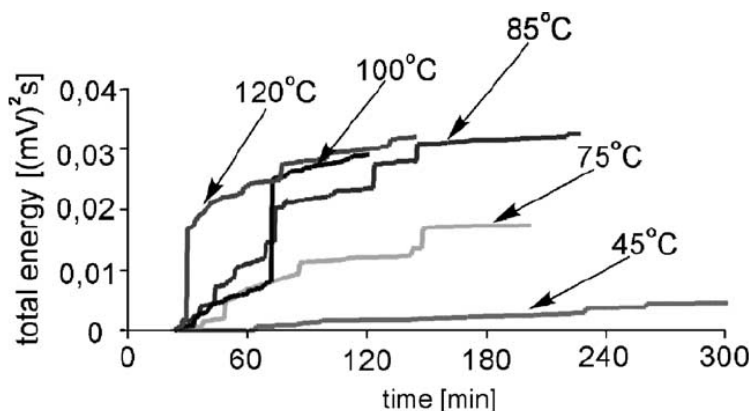
Rys. 4. Zmiany teoretycznie wyliczonych naprężeń obwodowych na powierzchni walcowej próbki suszonej konwekcyjnie [VII – rys. 5]



Rys. 5. Tempo zdarzeń EA w trakcie suszenia próbki w różnych temperaturach [VII – rys. 5]

O ile deskryptor tempo zdarzeń EA jest dobrym predyktorem powstawania pęknięć w materiale i nadaje się do odpowiedniego sterowania procesem suszenia, w celu uniknięcia destrukcji, to inny analizowany w pracy VII deskryptor EA – sumaryczna energia sygnałów akustycznych (rys. 6), jest użyteczny w stwierdzeniu czy przedmiot już uległ zniszczeniu. Jest to szczególnie ważne podczas kontroli jakości, gdy wysuszony

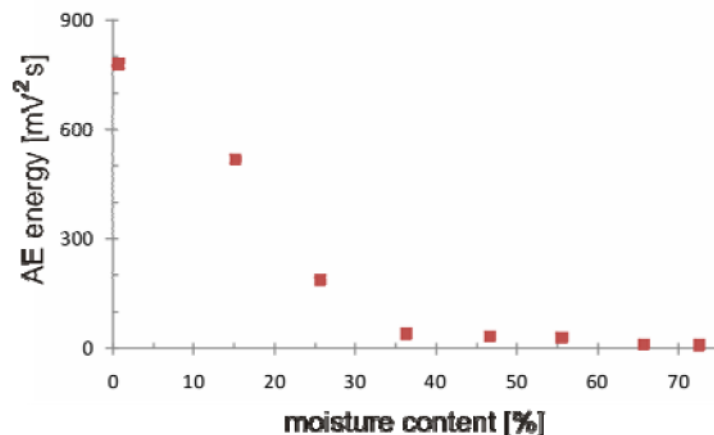
przedmiot ma ukryte wady materiałowe, których nie można zidentyfikować metodami wizualnymi.



Rys. 6. Sumaryczna energia sygnałów akustycznych w trakcie suszenia próbki w różnych temperaturach [VII – rys. 8]

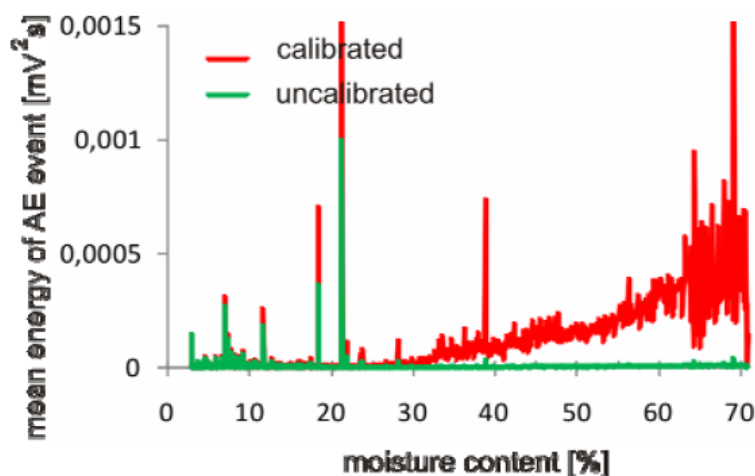
Dla ostrych warunków suszarniczych ( $100^{\circ}\text{C}$ ,  $120^{\circ}\text{C}$ ), gdy suszenie przebiega zbyt gwałtownie, powstają pojedyncze nagłe skoki energetyczne już na początku suszenia (pionowe linie na rys. 6). Dochodzi do rozerwania struktury na powierzchni materiału. Dla średnich warunków suszenia ( $75^{\circ}\text{C}$ ,  $85^{\circ}\text{C}$ ) powstają mikropęknięcia, nie zawsze widoczne gołym okiem, zobrazowane na rys. 6, jako wiele średnio-energetycznych skoków. Dla łagodnych warunków suszarniczych ( $45^{\circ}\text{C}$ ) nie zaobserwowano wad w wysuszonych przedmiotach i jednocześnie nie odnotowano nagłych skoków energii EA.

W trakcie pracy z metodą EA zauważyłem, że sygnały EA są silnie tłumione w materiałach o dużej wilgotności. Zagadnienie to przeanalizowano w pracy **XVI**. Przebadano dwa materiały: drewno orzecha i kaolin KOC. Za pomocą kalibracyjnej metody „spadającej kulki” uzyskano krzywe kalibracji tłumienia energii sygnałów EA dla badanych materiałów w zależności od ich wilgotności. Dla kaolinu wilgotny materiał tłumia 4 razy bardziej energię sygnałów niż suchy. Natomiast szczególnie wrażliwe na zmiany wilgotności jest drewno, którego tłumienie poniżej wilgotności PNW zmienia się liniowo a powyżej PNW pozostaje przy stałych wartościach. Tłumienie energii sygnałów jest bardzo silne. Sygnały dla wilgotności PNW jest ponad 900 razy słabszy niż dla suchego materiału (rys. 7).



Rys. 7. Kalibracja sygnałów akustycznych. Energia EA w zależności od zawartości wilgoci dla orzecha włoskiego [XVI – rys. 10]

Deskryptor energii zdarzeń EA przedstawiono na rysunku 8. Wyraźnie widać, że sygnały dla wysokich wilgotności (na początku procesu suszenia) są wysokoenergetyczne. Oznacza to, że odbierane dla wilgotnego materiału sygnały niosą ze sobą znacznie większą energię niż dotychczas w literaturze opisywano. Stąd wiele dotychczasowych prac i wniosków z nich płynących należałoby zrewidować. Odbierane wysokoenergetyczne sygnały tłumaczą powstawanie pęknięć w bardzo wczesnym okresie suszenia drewna.

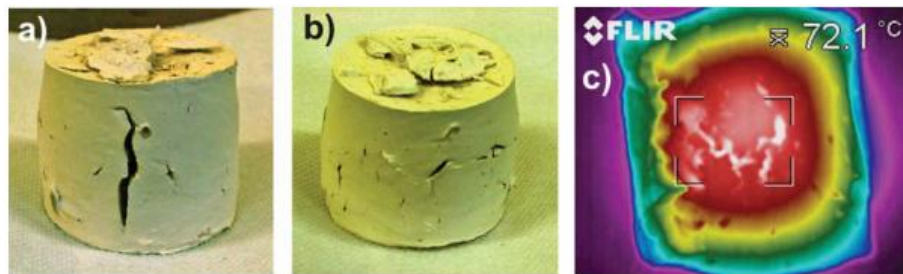


Rys. 8. Średnia energia zdarzeń EA podczas suszenia drewna orzecha włoskiego z uwzględnieniem i bez uwzględnienia kalibracji energii sygnałów [XVI – rys. 10]

### 3.2.2 Analiza teoretyczno-doświadczalna destrukcji materiałów w trakcie suszenia

Oprócz metody EA do opisu destrukcji zachodzącej w materiałach poddanych procesowi suszenia używałem również innych technik pomiarowych. W pracach **XII**, **XIX** badano proces zachowania się próbek kaolinowych w trakcie suszenia z aplikowaną różną mocą pola mikrofalowego. W wyrobach suszonych mikrofalowo przy aplikowaniu zbyt wysokiej mocy często dochodzi do spektakularnej destrukcji materiału w postaci odpadających całych kawałków próbek lub wręcz wybuchów uwięzionej wewnątrz pary wodnej. Stąd należy w suszarnictwie stosować umiarkowane moce pola mikrofalowego. Jednak także przy aplikacji niewielkich mocy często dochodzi do powstawania ukrytych wad w materiale (np. wypalenia rdzenia drewna), które trudno jest wychwycić poprzez stosując tradycyjne techniki kontroli jakości.

W pracy doświadczalnej pracy **XII** dokonano analizy wpływu pola mikrofalowego na zmiany zachodzące wewnątrz próbek poprzez ocenę wizualną deformacji oraz pomiary temperatury kamerą podczerwoną przekrojów próbek. Pozwoliło to na wychwycenie miejsc gwałtownej przemiany wody w parę, co powodowało wybuchową destrukcję materiału (rys. 9).

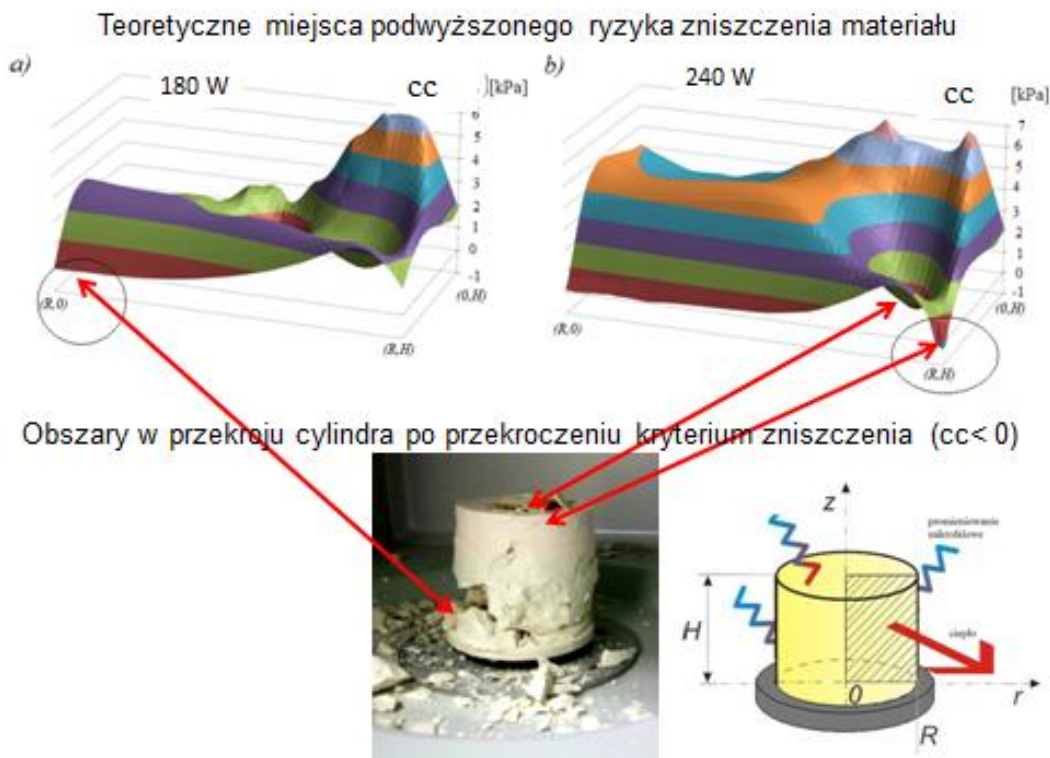


Rys. 9. Próbkka kaolinowa poddana suszeniu z 300 W: a) , b) widok ogólny [ **XII** - rys. 9] , c) rozkład temperatury w 5min suszenia w przekroju wzdłużnym cylindrycznej próbki wykonane kamerą termowizyjną [ **XII** - rys. 11]

Oprócz badania zniszczeń wewnątrz próbek obserwowano powierzchnię zewnętrzną. Pirometrem badano zmianę temperatury powierzchni próbki, a metodą wizualną i mikroskopową analizowano powstałe zarysowania i pęknięcia. Przebadano wytrzymałość na ściskanie próbek suszonych w różnych mocach pola mikrofalowego.

Uzyskane rezultaty potwierdziły niebezpieczeństwo wystąpienia niewidocznych wad struktury materiału, które w wilgotnych materiałach ceramicznych przyjmują postać plastycznych deformacji wnętrza przy niezmienionej powierzchni zewnętrznej.

W pracy **XIX** przedstawiono teoretyczno-doświadczalną analizę destrukcji materiałów suszonych mikrofalowo. Aby przybliżyć się do warunków eksperymentu rozwiązano dwuwymiarowe zagadnienie początkowo-brzegowe mikrofalowego suszenia próbki cylindrycznej. Wyznaczono teoretyczne naprężenia efektywne zgodnie z teorią Hubera-Misesa, co pozwoliło na znalezienie miejsc najbardziej narażonych na zniszczenie. Otrzymane rezultaty wskazały, że bardzo prawdopodobne zniszczenie będą widoczne na górnej zewnętrznej krawędzi powierzchni próbki, na obwodzie przy podstawie oraz wewnątrz materiału na około 2/3 wysokości materiału (naprężenia ścinające powodujące często obserwowane odpadanie całej górnej części próbki). Rezultaty te zgadzały się z destrukcją materiału zaobserwowaną w eksperymentach (np. rys. 10, **XIX** - rys. 10).

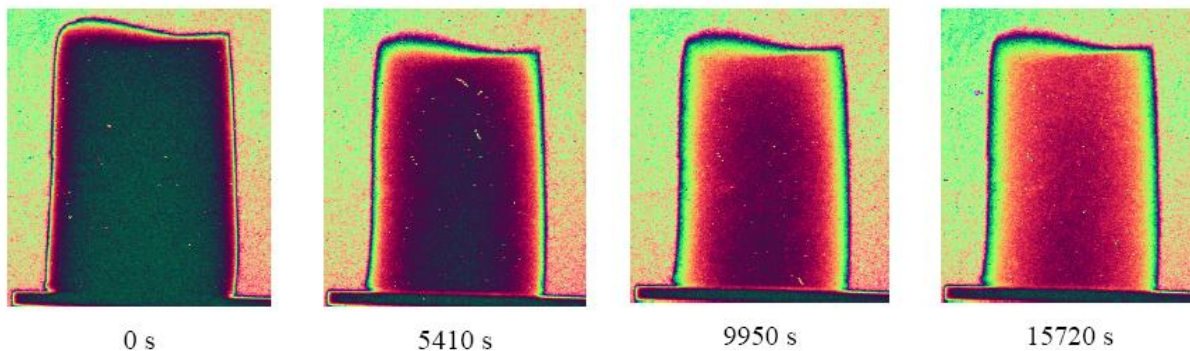


Rys. 10 Miejsca pęknięć w walcowej próbce suszonej mikrofalowo – porównanie teoretycznie wyznaczonych miejsc z eksperymentem

### 3.2.3 Walidacja modelu teoretycznego suszenia z eksperymentem

Naprężenia suszarnicze, będące przyczyną destrukcji materiałów, są wynikiem niejednorodnego rozkładu pól zawartości wilgoci oraz temperatury wewnątrz wyrobów. Niezbędna jest zatem znajomość tych rozkładów. Rozkład zawartości wilgoci w próbce jest szczególnie trudny do zbadania. Powszechnie stosowana metoda plasterkowa jest destrukcyjna i nie nadaje się do ciągłego monitorowania stanu zawilżenia próbki. Współpraca z Instytutem Energii Atomowej pozwoliła na zbadanie zastosowania techniki radiografii neutronowej do oszacowania rozkładu wilgoci w suszonym materiale oraz deformacji tego materiału. Metoda ta, z racji ograniczeń do bazy aparaturowej jest sporadycznie używana w suszarnictwie. Jak dotąd nikt nie badał możliwości badania radiografią neutronową przemieszczeń zewnętrznych i wewnętrznych suszonego materiału.

W pracach **XIV**, **XV** zawarto rezultaty z badania procesu suszenia konwekcyjnego walcowych próbek kaolinowych z użyciem radiografii neutronowej. Zauważono wyraźne zmiany w pochłanianiu neutronów w zależności od wilgotności materiału (rys. 11). Stwierdzono jednocześnie, że technika ta pozwala na oszacowanie rozkładu wilgoci w materiałach o niewielkich gabarytach.



Rys. 11. Przykładowe radiogramy z suszenia kaolinowego walca [**XV** - rys. 4]

W pracy **XV** przebadano możliwość badania kurczenia się warstw zewnętrznych (skurczu suszarniczego). Badania te porównano z teoretycznie obliczonym skurczem. Badania przemieszczania się warstw wewnętrznych prowadzono poprzez włożenie do środka znaczników wykonanych z materiałów silnie pochłaniających promieniowanie

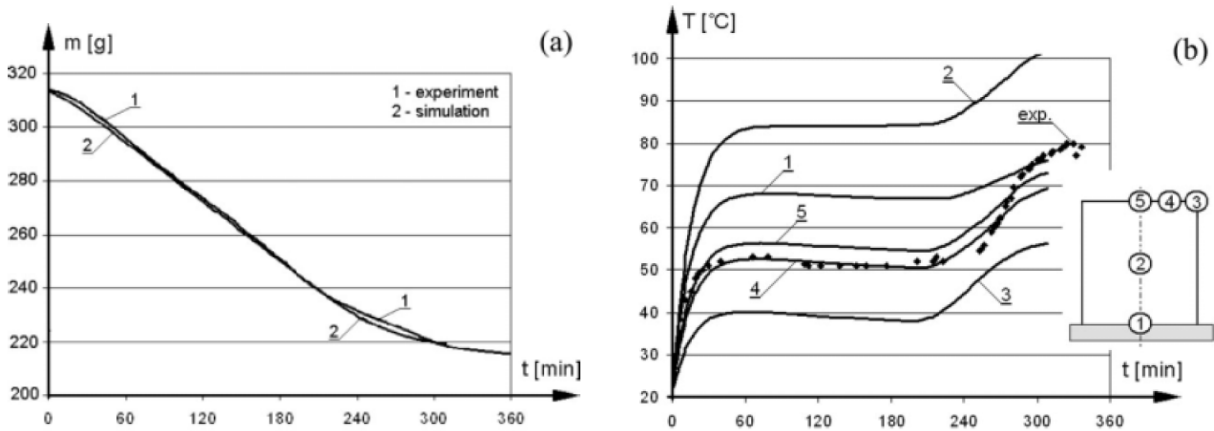
(kadm) . Ich przemieszczenie się w próbce w trakcie suszenia jest dobrze widoczne widoczne (punkt 5. raport wewnętrzny IEA B 58/2007).

Rozkład pola temperatury w kaolinowej próbce suszonej konwekcyjnie opisano w publikacji **X**. Badania te rozszerzono i wykorzystano w pracach **VIII**, **IX** do walidacji teoretycznego modelu suszenia. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów temperatury powierzchni i wnętrza próbki, wilgotności i temperatury czynnika suszącego, pomiaru ubytku masy dla walca kaolinowego suszonego konwekcyjnie w określonych warunkach suszarniczych przeanalizowano zgodność otrzymywanych z modelu teoretycznego wartości temperatury ze zmierzonymi w doświadczeniu (**VIII**) . Stwierdzono, że przyjęty model dobrze odzwierciedla rzeczywisty proces suszarniczy, szczególnie w pierwszym okresie suszarniczym, a nieco gorzej opisuje natomiast drugi okres suszenia.

Praca **IX** stanowiła dalsze rozwinięcie tej problematyki. Ponieważ duża część przemysłowych procesów suszarniczych jest obecnie sterowana poprzez zmianę parametrów suszenia, stąd przeanalizowano jaki wpływ na teoretyczne wyniki będzie miała zmiana temperatury i wilgotności czynnika suszącego. Podobnie jak w pracy **VIII** uzyskano zadowalającą zgodność.

Rozwój techniki suszarniczej w ostatnich latach wprowadza coraz częściej stosowanie suszenia hybrydowego (kombinowanego), łączącego w sobie suszenie dwoma lub więcej technikami. Stąd w pracy **XVII** przeprowadzono doświadczenia mające na celu wykazanie czy stosowany model teoretyczny nadaje się do symulacji łączonego suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego. Otrzymano ogólną dobrą zgodność jakościową wyników teoretyczno-doświadczalnych (rys.12), czasami nieznacznie nie pokrywających się danymi eksperymentalnymi szczególnie w drugim okresie suszenia.





Rys. 12. Porównanie zgodności rezultatów teoretycznych i eksperymentalnych dla suszenia mikrofalowo-konwekcyjnego kaolinowej próbki w warunkach ustalonych: a) krzywe suszenia b) krzywe temperaturowe [ XVII rys. 4]

### 3.4 Wyznaczanie współczynników materiałowych

W celu poprawnego rozwiązywania numerycznego problemów początkowo-brzegowych oprócz poprawnie sformułowanych modeli teoretycznych niezbędne są również różnorodne współczynniki materiałowe (termiczne, mechaniczne i opisujące strukturę materiału). Współczynniki te dla materiałów suszonych silnie zależą od ich wilgotności, a zatem są zmienne w trakcie procesu suszenia wraz z ubywającą zawartością wilgoci w próbce. W doniesieniach literaturowych podaje się je zazwyczaj jako niezależne od wilgotności stałe wartości. Ponadto istnieje brak kompleksowego opracowania wszystkich stałych materiałowych dla rozpatrywanego modelu suszenia, co istotnie wpływa na poprawność otrzymywanych wyników. Rzadko w literaturze są wykorzystywane stałe materiałowe dla konkretnego rozpatrywanego materiału. Zazwyczaj są to obierane współczynniki z różnorodnych tablic materiałowych, nie powiązanych ze sobą artykułów innych autorów badających podobne materiały i w ten sposób powstaje zestaw stałych materiałowych dla analizowanego materiału. Ponadto istnieje wiele skomplikowanych modeli teoretycznych uwzględniających wiele zjawisk fizycznych wykazujących naturalnie lepszą korelację teorii i doświadczenia niż proste modele. Jednak zawierają one różne współczynniki powstałe często tylko na potrzeby danego modelu. Wiele z tych współczynników trudno wyznaczyć lub wręcz nie da się

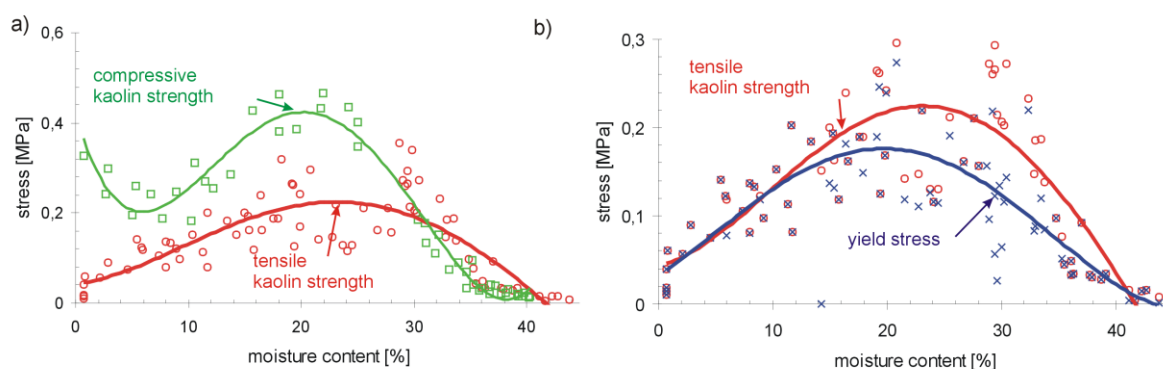
wyznaczyć, gdyż nie zawsze mają fizyczny sens, co uniemożliwia skuteczne ich określanie.

Tak dobre dopasowanie się teorii z eksperymentem opisane w przewodniku było możliwe oprócz poprawnie sformułowanego modelu teoretycznego również dzięki wykorzystaniu stałych materiałowych wyznaczonych dla konkretnego materiału badawczego. Wymienione prace (VIII, IX, XVII) wskazują ponadto, że zastosowanie współczynników materiałowych zależnych od wilgotności materiału wykorzystywane bezpośrednio w nieliniowych obliczeniach numerycznych pozwala osiągnąć znacznie lepszą korelację wyników teoretycznych i doświadczalnych.

Poszczególne współczynniki materiałowe używane w modelu teoretycznym wyznaczone były w zależności od aktualnie rozwiązywanej problematyki, najczęściej dla materiału referencyjnego jakim jest kaolin KOC. Jednym z pierwszych moich badań eksperymentalnych, po doktoracie, było wyznaczenie podstawowych stałych mechanicznych występujących w stosowanym modelu sprężystym i lepkosprężystym.

Wilgotne materiały kapilarno-porowate zmieniają swe właściwości fizyczne podczas procesu suszenia. Współczynniki materiałowe występujące w termomechanicznym modelu suszenia zostały oznaczone dla różnych wilgotności kaolinu KOC w pracy III. Podstawowy mechaniczny współczynnik materiałowy dla materiałów jakim jest moduł Younga wyznaczono w próbach jednoosiowego rozciągania, a stałą Lamé: moduł odkształceń postaciowych wyznaczono w testach ścinania. Znając te dwie stałe wyznaczono pozostałe stałe sprężyste: współczynnik Poissona oraz kolejną stałą Lamé: moduł odkształceń objętościowych. W pracy tej zaproponowano nową metodę, dotychczas nie prezentowaną w literaturze, wyznaczania współczynników lepkosprężystości występujących w modelu reologicznym Maxwella przy znajomości stałych sprężystych. Osiągnięto to poprzez dopasowanie doświadczalnych krzywych odkształcenia, przeprowadzonych w testach mechanicznych dla stałego przyrostu siły w czasie, do teoretycznych krzywych, powstałych poprzez odpowiednie przekształcenie równania Maxwella po rozdzieleniu go, odpowiednio na części aksjatorową i dewiatorową.

W pracach **XIII**, **XXIV** wyznaczono granicę plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie w funkcji zawartości wilgoci dla kaolinu KOC (rys. 13). Przeanalizowano specyfikę kaolinu KOC na tle innych mas ceramicznych. Jest to materiał w którym dominują wiązania jonowe maksimum wytrzymałości na rozciąganie przypada dla ok. 25% zawartości wilgoci. Dla odmiany glina i ceramika elektrotechniczna C130 są najwytrzymalsze w stanie wysuszonym, gdyż tutaj najważniejszą rolę odgrywają wiązania powierzchniowe Van der Waalsa. Wyniki te były wielokrotnie wykorzystywane w wielu pracach własnych oraz współautorów (np. **XI**, **XVIII**).



Rys. 13. a) Wytrzymałość na rozciąganie i ściskanie w zależności od wilgotności materiału, b) granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie w zależności od wilgotności materiału [**XXIV** - rys. 4]

W pracach **XXII**, **XXIII** wyznaczono współczynnik intensywności naprężeń w zależności od wilgotności kaolinu, który stanowi podstawową stałą materiałową wykorzystywaną w mechanice pęknięcia. Stanowi to część prac wykonanych w kierowanym przeze mnie projekcie badawczym MNiSzW pt. „Modelowanie i eksperymentalna identyfikacja pęknięć w suszonych materiałach porowatych”. Współczynnik ten wyznaczono metodą klasyczną badając zginanie próbek z karbem (**XXII**, **XXIII**) oraz metodą uproszczoną opartą na pomiarze mikrotwardości Vickersa (**XXIII**).

Uzupełnieniem mechanicznych współczynników materiałowych kaolinu są pomiary podstawowych jego parametrów: gęstości szkieletu, gęstości pozornej, porowatości, oraz skurczu suszarniczego. Pomiary te wykonano w szerokim zakresie wilgotności stosowanym w suszarnictwie i opisano w pracy **XX**.

Wykonano również serię badań mających na celu ustalenie właściwości cieplne analizowanych mas ceramicznych, a w szczególności kaolinu.

Prace **V** i **XXI** poświęcono badaniom współczynników termicznych kaolinu w zależności od ich wilgotności i temperatury. Badania przeprowadzono za pomocą metody gorącego drutu.

W pracy **V** wyznaczono współczynnik przewodności cieplnej kaolinu w metodą gorącego drutu w odmianie krzyżowej. Badania przeprowadzono dla różnych zawartości wilgoci kaolinu oraz temperatur. Zauważono, że znaczny przyrost wartości przewodności cieplnej występuje gdy materiał, wraz ze wzrostem jego wilgotności, zaczyna mieć konsystencję miękkoplastyczną (ok. 32%-38% zawartości wilgoci).

W pracy **XXI** określono wszystkie parametry cieplne kaolinu stosując metodę gorącego drutu w odmianie równoległej. Wyznaczono współczynniki przewodności cieplnej i dyfuzyjności cieplnej w zależności od wilgotności kaolinu. Znajomość tych parametrów pozwoliła na określenie pojemności cieplnej, a przy znajomości gęstości kaolinu (określonej w **XX**) możliwe było wyznaczenie ciepła właściwego.

Pracę **VI** poświęcono wyznaczaniu zależności temperaturowej współczynnika dyfuzji wilgoci w kaolinie. Wykorzystano tu metodę plasterkową do wyznaczania rozkładu wilgotności materiału. Pozwoliło to przy znajomości rzeczywistego rozkładu wilgoci w próbce suszonej w warunkach izotermicznych poprzez optymalizację rozwiązania jednowymiarowego problemu początkowo-brzegowego na wyznaczenie współczynnika dyfuzji dla dużych zawartości wilgoci.

## Podsumowanie

Realizując kolejne etapy badań pozyskałem obszerny materiał teoretyczny, a przede wszystkim doświadczalny pozwalający na analizę destrukcji zachodzącej w materiałach kapilarno-porowatych w trakcie suszenia. Uogólniając analizę otrzymanych wyników prowadzonych badań i jednocześnie jako swoje najważniejsze osiągnięcia uważam:

- *zapropozowanie teoretycznego kryterium zniszczenia dla suszonych mas ceramicznych wskazującego na typ zaistniałej destrukcji.* Masy ceramiczne poddane suszeniu mogą ulec zniszczeniu w trakcie suszenia dwojako: plastycznym deformacjom gdy materiał jest wilgotny, a naprężenia przekroczą granicę plastyczności lub pęknięciom pojawiającym się dla podsuszonych materiałów, gdy naprężenia będą większe od granicy wytrzymałości materiałów. Stwierdzono, że graniczną wilgotnością jest w przypadku mas ceramicznych wilgotność krytyczna przy której pojawiają się pierwsze suche miejsca na powierzchni materiałów.

- *wskazanie obszarów wewnątrz suszonych mas ceramicznych podatnych na zniszczenia.* Zarówno analiza teoretyczna jak i doświadczalna wskazują dwa możliwe obszary zniszczenia w materiałach suszonych. Najbardziej prawdopodobne i widoczne jest wystąpienie zniszczenia na powierzchni materiału. Tutaj, w pierwszym okresie suszenia, naprężenia suszarnicze spowodowane nierównomiernym rozkładem wilgotnościowym w próbce osiągają najwyższe wartości, co przy jednoczesnym stosowaniu zbyt ostrych reżimów suszarniczych prowadzi do przekroczenia przez nie granicy plastyczności powodując plastyczne deformacje kształtu. Do powstawania spękań na powierzchni zazwyczaj dochodzi gdy jest ona wysuszona, po przekroczeniu granicy wytrzymałości przez naprężenia resztkowe. Rzadko analizowanym w literaturze obszarem jest wnętrze materiału, gdzie naprężenia nie osiągają dużych wartości, ale w połączeniu z niewielką granicą plastyczności wilgotnych materiałów może dojść do jej przekroczenia i destrukcji materiału. Szczególnie narażone są tutaj materiały o dużej początkowej wilgotności suszonej mikrofalowo

- *zastosowanie metody emisji akustycznej w suszeniu materiałów silnie tłumiących sygnały akustyczne.* Metoda EA dobrze opisuje procesy destrukcji wywołanej suszeniem zarówno materiałach akustycznych (np. drewno, beton) jak i w badanych

przez mnie materiałach silnie tłumiących sygnały akustyczne (masach ceramicznych). Technika ta pozwala na sygnalizowanie on-line wzrostu naprężeń suszarniczych, a zatem i narastania niebezpieczeństwa zniszczenia materiału, dzięki czemu można np. odpowiednio sterować parametrami czynnika suszącego w celu zapobiegania destrukcji materiału. Wykazano zgodność między teoretycznie wyznaczonymi naprężeniami suszarniczymi i rejestrowanymi sygnałami emisji akustycznej dla mas ceramicznych.

- *stosowanie energetycznych deskryptorów EA wymaga uwzględnienia kalibracji sygnałów w zależności od wilgotności materiałów.* Odpowiednia analiza energii rejestrowanych sygnałów pozwala na stwierdzenie czy materiał uległ destrukcji. Wykazano, że szczególnie dla drewna powyżej wilgotności nasycenia włókien sygnały są silnie tłumione w materiale, a poniżej tej wilgotności akustyczność drewna gwałtownie narasta. Powoduje to znaczne zmiany w odczytywanej energii sygnałów suszonych materiałów wpływając jednocześnie znacząco na jakość otrzymywanych rezultatów.

- *zastosowanie metody emisji akustycznej do badania materiałów suszonych mikrofalowo.* Badanie suszonych materiałów metodą EA w przypadku suszenia mikrofalowego jest trudniejsze do przeprowadzenia niż w przypadku suszenia konwekcyjnego poprzez brak możliwości bezpośredniego umieszczenia sensora EA w materiale i trudności w wyeliminowaniu wpływu zakłóceń na tor pomiarowy sygnału.

- *określenie zależności wilgotnościowej zestawu współczynników materiałowych dla kaolinu KOC występujących w modelu teoretycznym.* Zmiana zawartości wilgoci w trakcie suszenia materiałów powoduje zmianę ich właściwości. Zastosowanie współczynników materiałowych zależnych od wilgotności materiału wykorzystywane bezpośrednio w nieliniowych obliczeniach numerycznych pozwala osiągnąć znacznie lepszą korelację wyników teoretycznych i doświadczalnych. Przebadano zależności wilgotnościowe większości współczynników występujących w stosowanym modelu suszarniczym (gęstość pozorna, porowatość, skurcz suszarniczy, współczynnik dyfuzji, przewodność cieplna, dyfuzyjność cieplna, ciepło właściwe, moduł Younga, moduł Poissona, stałe Lamé'go i ich odpowiedniki lepkosprężyste, wytrzymałość na ściskanie, ścinanie oraz rozciąganie, granica plastyczności, współczynnik intensywności naprężeń). Na uwagę zasługuje *metoda wyznaczania lepkosprężystych*

*współczynników materiałowych.* Przeprowadzenie zaledwie dwóch różnych testów mechanicznych, wykonanych przy odpowiednich założeniach, pozwala na szybkie określenie zestawu wszystkich modułów sprężystości i lepkości.

