

Aneta OCIECZEK

e-mail: daszenka@am.gdynia.pl

Katedra Organizacji Usług Turystyczno-Hotelarskich, Wydział Przedsiębiorczości i Towaroznawstwa, Akademia Morska, Gdynia

Wpływ stopnia rozdrobnienia kawy palonej na jej właściwości higroskopijne

Wstęp

Rosnąca popularność kawy mielonej uwarunkowana jest łatwością jej przygotowania do spożycia. Zmieniające się upodobania konsumentów stały się główną przyczyną problemów związanych z przechowywaniem kawy, ponieważ kawa mielona jest bardziej wrażliwa na działanie czynników prowadzących do pogorszenia jej jakości niż kawa ziarnista. Problemy takie nie istniały, kiedy w obrocie znajdowała się jedynie kawa zielona, która jako ziarno charakteryzuje się wieloma mechanizmami zabezpieczającymi ją przed działaniem czynników prowadzących do pogorszenia jakości i zapewnia trwałość od 1 do 3 lat [Matyjaszczyk, 1997; Chrostowska-Siwiek, 2011].

Ziarnista kawa palona należy do produktów stosunkowo trwałych. Działanie wysokiej temperatury podczas procesu prażenia i niska aktywność wody zapobiegają psuciu się produktu na skutek wyeliminowania aktywności enzymów i mikroorganizmów. W czasie przechowywania kawy zachodzą jednak zmiany, wpływające na jej jakość, a określane jako wietrzenie i starzenie [Chrostowska-Siwiek, 2011].

Znaczne rozdrobnienie palonego ziarna kawy do cząstek o wielkości około (0,1÷0,5) mm powoduje znaczne rozwinięcie powierzchni właściwej kawy, a w konsekwencji łatwiejsze oddziaływanie jej składników z otoczeniem. Czynnikiem w znacznym stopniu przyczyniającymi się do niekorzystnych zmian jakości kawy w czasie przechowywania są obecność tlenu oraz pary wodnej. Kawa staje się produktem higroskopijnym na skutek znacznego obniżenia zawartości wody po procesie jej upalania i chłodzenia powietrzem (około 1%), z kolei w przypadku chłodzenia jej zimną wodą zawartość wody kształtuje się na poziomie 5%. Niezależnie jednak od zastosowanej metody chłodzenia kawa zdolna jest do pochłaniania pary wodnej nawet z powietrza o wilgotności względnej 25% [Nicoli i Manzocco, 2007].

Stopień rozdrobnienia kawy powinien być uzależniony od sposobu jej parzenia. Do kawy parzonej po turecku najlepsza jest kawa bardzo drobno mielona. Do ekspresów przelewowych i ciśnieniowych musi charakteryzować się nieco mniejszym stopniem rozdrobnienia, przy czym im krótszy jest czas działania wody na kawę, tym większym stopniem rozdrobnienia powinna charakteryzować się kawa. Stopień rozdrobnienia kawy palonej, decydujący o jej podatności na ekstrakcję za pomocą wody w czasie parzenia, może mieć również wpływ na jej higroskopijność, warunkującą trwałość przechowalniczą. Wzrost zawartości wody przyczynia się do hydrolizy niektórych związków kształtujących aromat naparu jak również intensyfikuje niekorzystne działanie tlenu. Radtke [1979] w badaniach dotyczących zużycia tlenu przez kawę wykazał, że wzrasta ono przy wyższej zawartości wody, co jest nietypowe dla żywności ubogiej w wodę i zawierającej tłuszcz. W konsekwencji postawiono hipotezę, że oksydacja tłuszczów nie jest główną przyczyną obniżania jakości kawy.

Celem pracy była ocena właściwości higroskopijnych kawy palonej zróżnicowanej pod względem stopnia rozdrobnienia.

Materiał i metody badań

Materiał badawczy stanowiła palona kawa ziarnista otrzymana z owoców drzewa kawowego odmiany *Coffea arabica L.*, charakteryzująca się ciemnym upaleniem, którą rozdrabniano w celu uzyskania mieszaniny o znacznym rozdrobnieniu (1) przeznaczonej do parzenia po turecku oraz mieszaniny o mniejszym stopniu rozdrobnienia (5) przeznaczonej do parzenia w ekspresie ciśnieniowym. Materiał rozdrabniano młynkiem *Espressomühle Kaffeemühle Stawert VTA6S*.

Oznaczanie zawartości wody wykonano metodą suszenia termicznego w temperaturze 100±105°C pod normalnym ciśnieniem.

Wyznaczenie aktywności wody przeprowadzono w aparacie *AquaLab* (Seria 3 model TE firmy *Decagon Devices, Inc.*, Pullman, WA, USA) o dokładności ± 0,003 w temperaturze 293,15 K.

Izotermie sorpcji wyznaczono stosując metodę statyczno-eksykatorową w zakresie a_w od 0,07 do 0,98. Temperatura badania wynosiła 20°C. Czas ustalania równowagi wynosił 30 dni [Ociecek, 2012].

Zróżnicowanie przebiegu izoterm sorpcji w całym zakresie a_w analizowano statystycznie stosując test *t-Studenta* różnic między średnimi dla par wiązanych, uznając za statystycznie istotne różnice na poziomie istotności nie przekraczające wartości $P = 0,001$ [Łomnicki, 2006].

Równanie GAB postaci:

$$v = \frac{v_m C K a_w}{(1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)} \quad (1)$$

gdzie:

a_w – aktywność wody, –

v – równowagowa zawartość wody, [g H₂O/100g s.m.]

v_m – zawartość wody w monowarstwie, [g H₂O/100g s.m.]

C – stała energetyczna *Guggenheima*

K – stała korygująca właściwości cząsteczek tworzących wielowarstwę w porównaniu do fazy ciekłej [Paderewski, 1999; Figura i Teixeira, 2007].

wyznaczono na podstawie danych empirycznych, stosując algorytm *Monte Carlo*. Funkcją celu była minimalizacja sumy kwadratów reszt [Ociecek i Kostek, 2009]. Obliczenia wykonano w arkuszu kalkulacyjnym *Excel 2003*. Błędy wyznaczonych parametrów równania GAB oszacowano przy wykorzystaniu makropolecenia *SolverAid*.

W celu oceny stopnia dopasowania modelu do danych empirycznych wyznaczono sumę kwadratów odchyłeń wartości empirycznych od wartości teoretycznych (SKO) oraz średnie względne odchylenie procentowe (P) obliczone na podstawie równania:

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|M_{exp} - M_{pre}|}{M_{exp}} \quad (2)$$

gdzie:

P – średnie względne odchylenie procentowe, [%]

n – liczba obserwowanych danych

M_{exp} – eksperymentalna wartość równowagowej zawartości wody, [g/100 g s.s.]

M_{pre} – teoretyczna (obliczona według modelu) wartość równowagowej zawartości wody, [g/100 g s.s.] [Corréa i in., 2010].

Powierzchnię właściwą adsorbentu obliczono w oparciu o równanie:

$$a_{sp} = \omega \frac{v_m}{M} N \quad (3)$$

gdzie:

a_{sp} – powierzchnia właściwa sorpcji, [m²/g s.m.]

N – liczba Avogadra (6,023·10²³ cząsteczek/mol)

M – masa cząsteczkowa wody, g/mol

ω – powierzchnia siadania wody (1,05·10⁻¹⁹ m²/cząsteczkę)

[Paderewski, 1999; Figura i Teixeira, 2007].

Rozmiary i objętość kapilar badanego materiału wyznaczono dla obszaru kondensacji kapilarnej stosując równanie *Kelvina* i zakładając cylindryczny kształt kapilar:

$$\ln a_w = \frac{2\sigma V}{r_k RT} \quad (4)$$

gdzie:

σ – napięcie powierzchniowe cieczy w temperaturze T , [N/m]

r_k – promień kapilary, [nm]

R – uniwersalna stała gazowa, [kJ/mol·K]
 T – temperatura procesu, [K]
 V – objętość molowa adsorbentu, [m³/mol]
 [Paderewski, 1999; Figura i Teixeira, 2007].

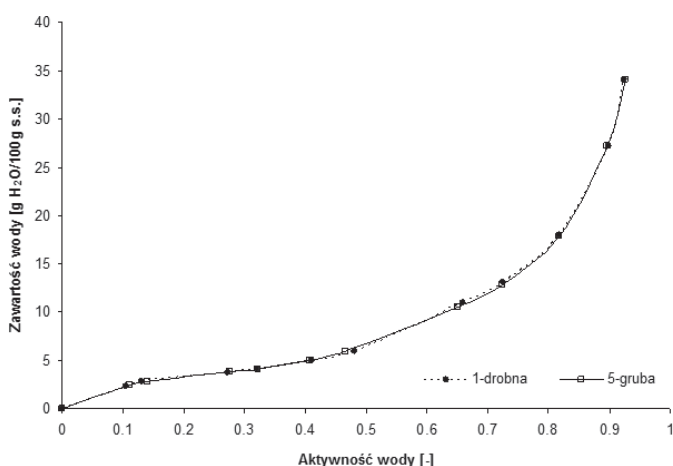
Omówienie wyników

Upalenie badanej kawy spowodowało obniżenie zawartości wody do poziomu 4,8873g H₂O/100 g s.s. i aktywności wody do poziomu 0,368. Tak niska zawartość wody, determinująca niski poziom aktywności wody, wskazywała na stosunkowo wysoką trwałość kawy oraz bezpieczeństwo mikrobiologiczne, szczególnie po zapewnieniu odpowiedniego barierowego opakowania.

Zapewnienie satysfakcjonującej trwałości kawy wymaga znajomości jej właściwości higroskopijnych. W literaturze przedmiotu można znaleźć charakterystyki właściwości higroskopijnych wielu produktów rolniczych, bazujące na różnych modelach pozwalających wyznaczyć pojemność warstwy monomolekularnej w funkcji temperatury i aktywności wody [Corréa i in., 2007; Iguaz i Virseda, 2007]. Funkcjonuje ponad 200 modeli służących opisowi stanu dynamicznej równowagi wilgotnościowej, która utożsamiana jest z właściwościami higroskopijnymi produktów rolniczych. Charakterystykę izoterm sorpcji produktów rolniczych można wykonać z zastosowaniem więcej niż jednego modelu, którego parametrem jest pojemność monowarstwy. Zasadniczym kryterium wyboru odpowiedniego modelu jest stopień dopasowania wartości modelowych do empirycznych oraz jego prostota kalkulacyjna [Furmaniak i in., 2007].

Biorąc pod uwagę znaczenie higroskopijności kawy w kształtowaniu się jej jakości podczas przechowywania, celem pracy jest określenie wpływu stopnia rozdrobnienia palonych ziaren kawy na jej właściwości higroskopijne i opisanie tych właściwości z zastosowaniem matematycznego modelu izoterm sorpcji, jakim jest model *Guggenheima – Andersona – de Boera* (GAB). Równanie GAB postrzegane jest jako najbardziej przydatny w badaniach nad żywnością model sorpcji. Choć większość nowszych modeli lepiej odwzorowuje dane empiryczne niż model GAB, to ich parametry są jedynie stałymi charakterystycznymi, a zatem nie mają określonego wymiaru fizycznego i nie pozwalają na termodynamiczną analizę zjawiska sorpcji [Ocieczek i Palich, 2004; Goneli i in., 2013].

Wpływ procesu rozdrabniania na właściwości sorpcyjne oceniano m.in. na podstawie porównania izoterm adsorpcji pary wodnej wyznaczonych w temperaturze 20°C (Rys. 1).



Rys. 1. Izoterm adsorpcji pary wodnej przez próbki kawy palonej mielonej wyznaczone w temperaturze 20°C [badania własne]

Wyznaczone izotermę charakteryzowały się kształtem sigmoidalnym, który wskazywał na porowatą strukturę adsorbentu i zjawisko tworzenia się wielocząsteczkowych warstw molekuł wody na jego powierzchni [Limousin i in., 2007; Ocieczek, 2007]. W procesie prażenia kawy zawarta w niej skrobia ulega rozkładowi do cukrów, podlegających procesowi karmelizacji na skutek oddziaływania wysokiej temperatury. Ponadto proces palenia powoduje powstawanie we wnętrzu ziaren

podwyższonego ciśnienia na skutek wydzielania się CO₂ w ziarnach kawy. Znaczne ilości CO₂ prowadzą do zniszczenia struktury komórkowej ziarna i wzrostu jego objętości nawet do 60%. Na skutek procesu prażenia kawy struktura jej ziarn staje się porowata, a część składników przechodzi w stan amorficzny. W konsekwencji ziarno kawy palonej jest bardziej podatne na oddziaływanie z otoczeniem niż ziarno zielone. Ponadto proces mielenia kawy powoduje jeszcze silniejsze rozwinięcie powierzchni właściwej przyczyniając się do podwyższenia wrażliwości kawy w czasie jej przechowywania na zmiany jakościowe wywołane oddziaływaniem z cząsteczkami wody i tlenu zawartymi w otaczającym środowisku.

Izoterma sorpcji kawy cechowała się ciągłością przebiegu w całym zakresie a_w wskazującą, że w czasie pochłaniania wody nie dochodziło do zmiany struktury zdeterminowanej krystalizacją składników matrycy. Pochłanianie wody z otoczenia stawało się szczególnie wyraźne powyżej 0,70 a_w , co interpretować należy jako efekt zjawiska kondensacji kapilarnej. Kawa (1) w całym zakresie aktywności wody nie pochłaniała więcej wody niż kawa (5). Tang i in. [2000] w pracy dotyczącej wpływu mikrostruktury granul skrobi na stan dynamiczny wody zaadsorbowanej powierzchniowo również wskazywał na brak takiej zależności. Otrzymane w tej pracy wyniki mogą stanowić potwierdzenie tezy Tang i in. [2000] i jednocześnie wskazywać na konieczność prowadzenia głębszych badań związanych z określeniem roli mikrostruktury cząstek w oddziaływaniu z molekułami wody.

Ze względu na brak widocznych przesłanek do twierdzenia, że kawa (1) charakteryzuje się wyższą pojemnością adsorpcyjną opisaną wyższym położeniem izoterm niż kawa (5), co wynika z położenia izoterm sorpcji, dokonano statystycznej oceny wzajemnego położenia izoterm z zastosowaniem testu *t-Studenta* różnicy między średnimi dla par wiązanych. W celu statystycznego zweryfikowania hipotezy zerowej zakładającej brak różnic w przebiegu obu izoterm adsorpcji obliczono wartości statystyki t dla poziomu istotności 0,05. Obliczona wartość statystyki t wynosiła 0,781 i była niższa od wartości krytycznej statystyki t dla tego poziomu istotności i 10 stopni swobody, która wynosiła 2,228. Hipotezę zerową należy zatem przyjąć, stwierdzając, że izoterma opisująca właściwości sorpcyjne kawy (1) nie jest położona istotnie wyżej niż kawy (5).

Kolejnym etapem oceny wpływu procesu rozdrabniania na właściwości sorpcyjne kawy było porównanie parametrów modelu GAB wyznaczonych na podstawie izoterm adsorpcji (Tab. 1).

Analizując wartości SKO stwierdzić można, że model GAB dobrze opisywał izotermę obu prób, co znalazło również potwierdzenie w wartościach statystyki P . Według Mohapatra i Rao [2005] wartość P mniejsza niż 10% wskazuje, że badany model jest dobrze dopasowany do danych empirycznych.

Tab. 1. Parametry równania GAB badanych próbek kawy i a_w odpowiadające v_m

Parametr równania GAB	Produkt	
	1-drobna	5-gruba
SKO	2,373 ± 0,583	1,303 ± 0,432
P, %	6,955%	5,998%
v_m – zawartość wody w monowarstwie, g H ₂ O/100 g s.m.	4,158 ± 0,213	4,149 ± 0,157
K – stała korygująca właściwości cząsteczek tworzących wielowarstwę w porównaniu do fazy ciekłej	0,951 ± 0,007	0,951 ± 0,005
C – stała energetyczna <i>Guggenheima</i>	6,688 ± 1,991	6,772 ± 1,492
a_w – aktywność wody, –	0,293	0,292

Pojemność monowarstwy (v_m) jest wskaźnikiem dostępności miejsc polarnych dla pary wodnej. O pojemności v_m decyduje ilość poszczególnych składników bogatych w miejsca polarne oraz ich stan fizyczny, determinując ilość wody, która jest silnie związana z matrycą żywności [Ocieczek, 2007]. Wyznaczone pojemności monowarstwy zawierały się w zakresie od 4,149±0,16 do 4,158±0,21 g H₂O na 100 g suchej masy produktu, co jest zbliżone z wielkościami wyznaczonymi w pracy [Karel, 1975] dla różnych produktów spożywczych. Stwierdzono, że wartości v_m były jednakowe, co wskazywać może, że stopień rozdrobnienia nie

ma wpływu na właściwości sorpcyjne mielonej kawy palonej. Również aktywności wody odpowiadające v_m były jednakowe.

Wartość parametru K w równaniu GAB opisuje różnicę między ciepłem adsorpcji i ciepłem skraplania [Jong i in., 1996]. Wartość stałej K pozwala również stwierdzić czy równanie GAB dobrze odwzorowuje określony zbiór danych empirycznych. Lewicki [1997] wykazał, że równanie GAB może być użyte do opisu eksperymentu tylko wówczas, gdy $0,24 < K \leq 1$. Otrzymane wartości parametru K wskazują, że stopień rozdrobnienia kawy nie ma wpływu na stan energetyczny układu.

Drugim parametrem wskazującym na przydatność modelu GAB do opisywania określonych danych jest stała Guggenheima C , nazywana stałą energetyczną. Według Lewickiego [1997] parametr ten wskazuje, że błąd obliczenia zawartości wody w monowarstwie jest niższy niż 15,5%, jeżeli jego wartość jest większa niż 5,67. Wartość parametru C służy również ocenie charakteru zjawiska adsorpcji. Parametr ten bowiem odzwierciedla różnicę pomiędzy entalpią desorpcji z monowarstwy i entalpią parowania ciekłego adsorbentu. Niektórzy autorzy [Pérez-Alonso i in., 2006] jednak sugerują, że wartość empirycznego parametru C uzyskanego w wyniku zastosowanych procedur obliczeniowych może być pozbawiona sensu fizycznego.

Tab. 2. Strukturalna charakterystyka badanych próbek kawy

Produkt	Powierzchnia właściwa sorpcji, $m^2 g^{-1}$ s.s.	Ogólna objętość kapilar, $mm^3 100 g^{-1}$ s.s.	Rozmiar kapilary ulegającej wypełnieniu przy $a_w = 0,75$ nm
1	146,09	93,10	2,943
5	145,77	92,97	2,839

W pracy określono również charakterystykę strukturalną badanych próbek kawy stosując równanie *Kelvina* (Tab. 2). Równanie to umożliwia przeliczenie równowagowych ciśnień względnych na odpowiadające im promienie kapilar. Założono, że pory badanego materiału mają kształt cylindryczny. Jest to model realny i pozwalający na znaczne uproszczenie obliczeń w przypadku wielu adsorbentów.

Objętość kapilar badanego materiału obliczono jako sumę objętości wody zaadsorbowanej przez materiał w zakresie aktywności wody od 0,75 do 0,98. Sposób postępowania podany został w pracach [Paderewski, 1999]; [Figura i Teixeira, 2007]. Objętości wody odpowiadające poszczególnym poziomom aktywności wody obliczono na podstawie równania GAB stosując narzędzie *Solver*.

Oszacowanie mikrostruktury powierzchni badanych próbek kawy pozwoliło stwierdzić, że powierzchnia właściwa adsorpcji mielonej kawy palonej nie uległa rozwinięciu na skutek poddania próbki procesowi rozdrabniania. Faktem jest, że rozdrabnianie powoduje zmniejszenie wymiarów pojedynczych cząstek czemu towarzyszy rozwinięcie powierzchni sumarycznej i potencjalnie prowadzić może także do odsłaniania obszarów zdolnych do przyjęcia molekuł wody. Podkreślić jednak należy, że wielkość powierzchni adsorpcji jest wypadkową powierzchni sumarycznej i jej powinowactwa do cząsteczek wody zdefiniowanego dystrybucją grup funkcyjnych. Oszacowanie promieni kapilar oraz ogólnej objętości kapilar ulegających wypełnieniu po zainicjowaniu kondensacji kapilarnej ($a_w = 0,75$) wykazało, że badane próbki cechowały się zbliżonymi wartościami tych parametrów. Stwierdzenie to wskazuje, że pory o zbliżonej charakterystyce determinują zbliżoną objętość ogólną kapilar w produkcji. Podobna porowatość materiału warunkuje podobny przebieg procesu dyfuzji wody, a przez to nie różnicuje przebiegu adsorpcji pary wodnej. Bezpośrednie przedyskutowanie otrzymanych wyników dotyczących mikrostruktury powierzchni cząstek kawy było niemożliwe ze względu na brak takich danych w literaturze.

Z dużą dozą prawdopodobieństwa przypuszczać można, że powinowactwo cząstek mielonej kawy palonej do wody badane w całej objętości materiału może cechować się zdecydowanie większym zróżnicowaniem zdolności do oddziaływania z wodą niż w przypadku procesu zachodzącego jedynie na powierzchni cząstek. Wyższy stopień rozdrobnienia kawy palonej nie wpływa na jej higroskopijność, ale decyduje o podatności na ekstrakcję za pomocą wody w postaci cieczy i o walorach otrzymanego naparu.

Wnioski

- Izotermy sorpcji obu badanych próbek kawy (1 i 5) charakteryzowały się kształtem sigmoidalnym wskazując, że zjawisko adsorpcji miało przebieg wielowarstwowy, a struktura cząstek była porowata.
- Ocena wzajemnego położenia izoterm sorpcji pozwoliła stwierdzić, że wyższy stopień rozdrobnienia nie przyczyniał się do podniesienia higroskopijności kawy.
- Kawa drobno rozdrobniona (1) charakteryzowała się podobnymi wartościami ogólnej objętości kapilar, co kawa grubo rozdrobniona (5). Początkowi procesowi kondensacji kapilarnej towarzyszyło wypełnianie kapilar o zbliżonym promieniu.
- Badane próbki kawy palonej, będąc jednorodnie chemicznie, nie różniły się właściwościami higroskopijnymi.

LITERATURA

- Chrostowska-Siwiek I., 2011. *Związki lotne jako wyróżniki zmian przechowalniczych kawy*. Praca doktorska. Uniwersytet Ekonomiczny, Poznań
- Corrêa P.C., Goneli A.L.D., Júnior P.C.A., de Oliveira G.H.H., Valente D.S.M., 2010. Moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of coffee in different processing levels. *IJFST*, 45, 2016-2022. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2010.02373.x
- Figura L.O., Teixeira A.A., 2007. *Food physics. Physical properties – measurement and applications*. Springer – Verlag, Berlin Heidelberg New York
- Furmaniak S., Terzyk A.P., Gauden P.A., 2007. The general mechanism of water sorption on foodstuffs – Importance of the multitemperature fitting of data and the hierarchy of models. *J. of Food Eng.*, 82, 528-535. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2007.03.012
- Goneli A.L.D., Corrêa P.C., de Oliveira G.H.H., Júnior P.C.A., 2013. Water sorption properties of coffee fruits, pulped and green coffee. *LWT – Food Sci. and Technol.*, 50, 386-391. DOI: 10.1016/j.lwt.2012.09.006
- Iguaz A., Virseda P., 2007. Moisture desorption isotherms of rough rice at high temperatures. *J. of Food Eng.*, 79, 794-802. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2006.03.002
- Jong G.I.W., Van den Berg C., Kokelaar A.J., 1996. Water sorption behaviour of original and defatted wheat gluten. *IJFST*, 31, 519-526. DOI: 10.1046/j.1365-2621.1996.00365.x
- Lewicki P.P., 1997. The applicability of the GAB model to food water sorption isotherms. *IJFST*, 32, 553-557. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1997.tb02131.x
- Limousin G., Gaudet J.-P., Charlet L., Szenknecht S., Barthès V., Krimissa M., 2007. Sorption isotherms: A review on physical bases, modeling and measurement. *Applied Geochem.* 22, 249-275. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2006.09.010
- Łomnicki A., 2006. *Wprowadzenie do statystyki dla przyrodników*. PWN, Warszawa
- Matyjaszczyk E., 1997. Zmiany jakości kawy palonej. *Przem. Spoż.*, nr 9, 40-41
- Mohapatra D., Rao P.S., 2005. A thin layer drying model of parboiled wheat. *J. of Food Eng.*, 66, 513-551. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2004.04.023
- Nicoli M., Manzocco L., 2007. Modeling the effect of water activity and storage temperature on chemical stability of coffee brew. *J. Agric. Food Chem.*, 55, 16, 6521-6526. DOI: 10.1021/jf070166k
- Ocieczek A., Kostek R., 2009. The effect of micronization on sorptive properties wheat cellulose. *Inż. Ap. Chem.*, 48, nr 2, 108-109
- Ocieczek A., Palich P., 2004. Restraints in GAB equation for determining of adsorbent structure. *Acta Agroph.*, 4, 1, 115-122
- Ocieczek A., 2007. Comparison of sorption properties of semolina and farina. *Acta Agroph.*, 9, 1, 135-145.
- Ocieczek A., 2012. *Właściwości hydratacyjne jako wyróżnik jakości użytkowej mąk pszennych pasażowych*, Pr. Nauk. Akademii Morskiej, Gdynia
- Paderewski M.L., 1999. *Procesy adsorpcyjne w inżynierii chemicznej*. WNT, Warszawa.
- Pérez-Alonso C., Beristain C.I., Lobato-Calleros C., Rodríguez-Huezo M.E., Vernon-Carter E.J., 2006. Thermodynamic analysis of the sorption isotherms of pure and blended carbohydrate polymers. *J. Food Eng.* 77, 753-760. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2005.08.002
- Radtke R., 1979. Zur Kenntnis des Sauerstoffverbrauchs von Röststoffe und seiner Auswirkung auf die sensorisch ermittelte Qualität des Kaffeegetränks. *Chemie. Mikrobiologie, Technologie der Lebensmittel*. 6.
- Tang H.R., Godward J., Hills B., 2000. The distribution of water in native starch granules – a multinuclear NMR study. *Carbohydrate Polymers*, 43, 375-387. DOI: 10.1016/S0144-8617(00)00183-1