

CASRA – WIELOPARAMETRYCZNA METODA BADANIA REOLOGICZNYCH WŁAŚCIWOŚCI ŻYWNOSCI I INNYCH STAŁYCH CIAŁ RZECZYWISTYCH

Stanisław Tyszkiewicz, Michał Olkiewicz

Instytut Biotechnologii Przemysłu Rolno-Spożywczego im. prof. Wacława Dąbrowskiego

Oddział Technologii Mięsa i Tłuszczu

04-190 Warszawa, ul. Jubilerska 4

styszkiewicz@ipmt.waw.pl

Streszczenie

CASRA to akronim utworzony z pierwszych liter angielskiej nazwy metody *Continuously Alternating Stress-Relaxation Analysis*. Metoda polega na badaniu zależności między deformacją badanego obiektu (ciała rzeczywistego) a naprężeniem wywołanym naciskiem na niego płasko zakończonym trzpieniem z określoną siłą, przy czym siła ta działa przez określony czas (etap stresu – bit), po czym całkowicie zanika (etap relaksacji). Takie oddziaływania na obiekt powtarza się wielokrotnie, kolejno zwiększając działającą siłę o liniowo rosnącą wartość. Zależność między deformacją a siłą nacisku zapisuje się, uzyskując reogram o charakterystycznym kształcie przypominającym grzebień o początkowo krótkich, a potem coraz dłuższych ząbkach. Przy osiągnięciu wystarczająco dużej siły nacisku odporność struktury mechanicznej obiektu zostaje przekroczona i trzpień szybko wciska się w obiekt i nie powraca do swojej pierwotnej pozycji w czasie etapu relaksacji. Siłę lub parametr pochodny siły, uwzględniając jej rozkład na powierzchnię styku trzpień/obiekt oraz linię cięcia (długość krawędzi tnącej trzpienia), można przyjąć za miarę odporności obiektu na niszczące działanie i opisać pojedynczym parametrem. Parametr ten nazwany został plastycznością (plasticity) – P. Z długości „zębów grzebienia” reogramu możemy wnioskować o sprężystości obiektu. Parametr będący miarą długości „zęba” (różnica na początku i końcu etapu stres) charakteryzuje odkształcenie całkowite, z którego część (różnica na początku i końcu etapu relaksacja) jest odkształceniem odwracalnym nazwanym elastycznością (elasticity) – E, a pozostałe odkształcenie odkształceniem nieodwracalnym nazwanym płynnością (fluidity) – F. Te trzy parametry pozwalają na zintegrowanie opisu matematycznego reogramu typowych przetworów mięsnych, zastępując parametry opisujące analitycznie reogram ciała złożonego z modułów elastyczności i współczynników lepkości modeli reologicznych, ciała Kelvina-Voigta oraz cieczy Maxwella połączonych szeregowo w tzw. układzie Burgersa oraz zawierającego element

plastyczny ciała Binghama. Kombinacja tych elementów stanowi uniwersalny siedmioelementowy układ Tyszkiewicza, proponowany dla opisu właściwości reologicznych mięsa i jego przetworów, różnego rodzaju żywności o charakterze ciała stałego oraz innych ciał rzeczywistych, w tym również drewna.

Słowa kluczowe: żywność, ciała rzeczywiste, modele reologiczne, plastyczność, elastyczność, płynność

CASRA – MULTIPARAMETRIC METHOD FOR EVALUATION OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SOLID FOODS AND OTHER REAL MATERIALS

Summary

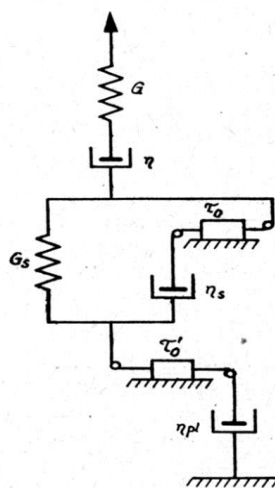
CASRA stands for the first letters of English name of the method of Continuously Alternating Stress-Relaxation Analysis. The said method consists in examination of relationship between deformation of the tested object (real material) and stress induced by its pressure exerted by flat-terminated mandrel with a specified force and the said force acts for a specified time (stage of stress – bite) and after it, it completely decays (stage of relaxation). Such effects on the object are repeated many times, sequentially increasing the load by linearly growing value. The relationship between the deformation and the force of stress is recorded and we obtain rheogram with a characteristic shape, resembling a comb with initially short and later, longer and longer “teeth”. After reaching the sufficiently high force of stress, the resistance of mechanical structure of the object becomes exceeded and the mandrel is quickly squeezed into the object and does not return to its initial position during the relaxation stage. The force or force-derivate parameter considering its distribution on the surface of contact of mandrel/object and the shear line (length of shearing edge of the mandrel) may be adopted as a measure of the object’s resistance to destroying action, and described by a single parameter. The said parameter has been called plasticity P. We may conclude on the springiness of the object on the basis of the length of “comb teeth” of the rheogram. The parameter, being the measure of the length of “tooth” (a difference at the beginning and at the end of stress stage) is characteristic of the complete deformation, from which a part (a difference at the beginning and at the end of relaxation stage) is a restorative deformation, being called fluidity F. The three discussed parameters allow integrating the mathematic description of rheogram of typical meat products, replacing the parameters which describe analytically the rheogram of material, composed of elasticity modules and viscosity coefficients of rheological models, Kelvin-Voigt system and Maxwell fluid, being in-series combined in the so-called Burgers system, and containing the plastic element of

Bingham model. The combination of the mentioned elements constitutes the universal seven-element system of Tyszkiewicz, suggested for description of rheological properties of meat and its products, various foods, having a character of solid substance and of other real materials.

Key words: foods, real materials, rheological models, plasticity, elasticity, fluidity

Wprowadzenie

Metoda CASRA swoją aktualną nazwę otrzymała wiele lat po jej wymyśleniu i zastosowaniu do badania, początkowo produktów mięsnych, później również mięsa w różnych stanach związanych z jego przetwarzaniem. CASRA to akronim utworzony z pierwszych liter angielskiej nazwy metody – *Continuously Alternating Stress-Relaxation Analysis* – opisaney w publikacji zamieszczonej w 1997 r. w „Journal of Texture Studies” [Tyszkiewicz i in. 1997]. Po raz pierwszy zasady metody zostały opublikowane w Rocznikach Instytutu Przemysłu Mięsnego w roku 1970 [Tyszkiewicz 1970] jako wniosek praktyczny z badań służących stworzeniu modelu reologicznego typowych kiełbas o farszu homogennym. Przeprowadzone badania wykazały, że kiełbasa jest ciałem lepko-sprężysto-plastycznym, o właściwościach mechanicznych dających się opisać równaniami o wielu parametrach (model z siedmioma parametrami przedstawiony na rysunku 1).

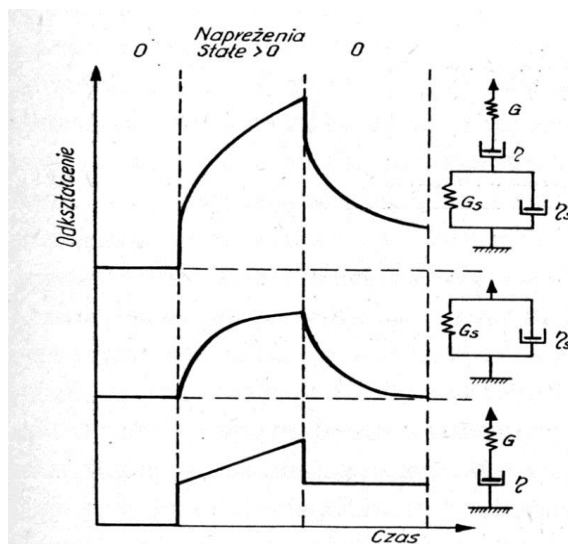


Rysunek 1. Proponowany model reologiczny dla kiełbas drobnorozdrobnionych

Źródło: Tyszkiewicz S. (1970). Badanie właściwości mechanicznych kiełbas drobnorozdrobnionych drogą konstrukcji i analizy modelu reologicznego. Roczn. Inst. Przem. Mięs., VII, 85.

Model jest złożony z elementów lepkich (symbol: nieszczelny tłok w cylindrze),

sprężystych (symbol: sprężyna) i plastycznych (symbol: klocek leżący na chropowatej powierzchni) połączonych w specyficznej konfiguracji. Modelowe wykresy zależności odkształcenia ciał zbudowanych z elementów lepkich i sprężystych w czasie działania i niedziałania naprężeń przedstawiono dla różnych układów: szeregowego (ciało Maxwella), równoległego (ciało Kelvina-Voigta) i ich połączenia szeregowego w układzie Burgersa na rysunku 2.

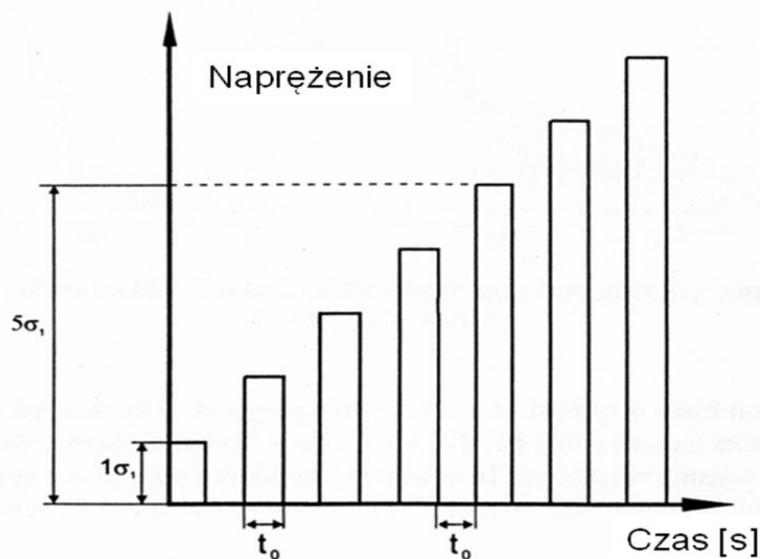


Rysunek 2. Typowe reogramy układów Maxwella i Kelvina-Voigta oraz reogram układu Burgersa stanowiącego szeregowo ich połączenie

Źródło: Tyszkiewicz S. (1970). Badanie właściwości mechanicznych kiełbas drobnorozdrobnionych drogą konstrukcji i analizy modelu reologicznego. Roczn. Inst. Przem. Mięs., VII, 85.

Zasada metody

Zaproponowano metodę wywoływania naprężeń (przebiegów) i odprężeń według założonego rozkładu w czasie i pomiaru wywoływanych tym odkształceń oraz ich zapisu. Przedstawiono propozycję uproszczonego matematycznego opisu badanych zależności. Naprężenia wywołane są naciskiem z określoną siłą na badany obiekt płasko zakończonym trzpieniem, przy czym siła ta działa przez określony czas (etap stresu – bit), po czym zanika całkowicie na taki sam czas (etap relaksacji). Takie oddziaływania na obiekt powtarza się wielokrotnie, kolejno zwiększając działające siły o liniowo rosnącą wartość naprężenia jednostkowego (rysunek 3).



Rys. 3 Rozkład naprężeń podczas testu CASRA

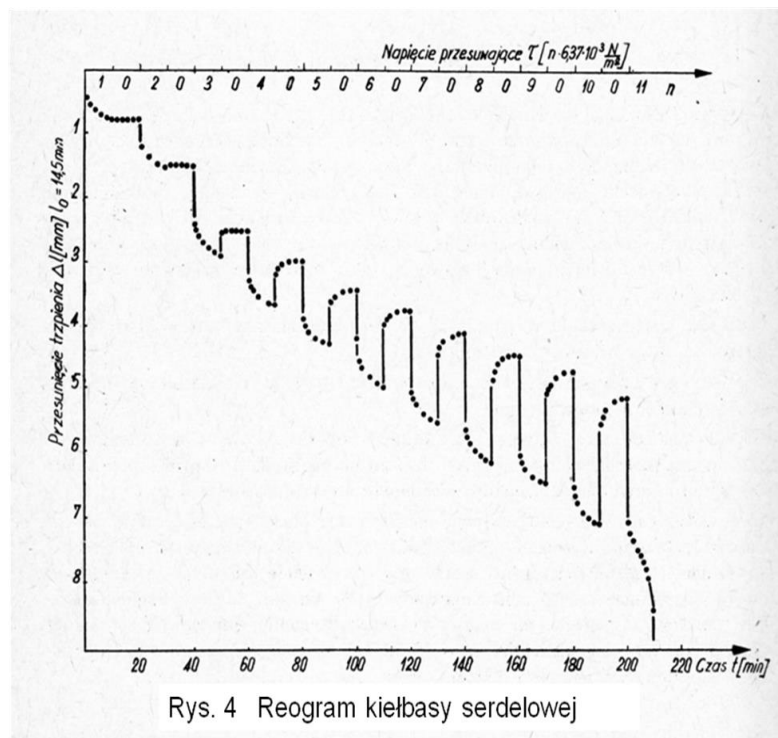
Źródło: S.Tyszkiewicz, M. Olkiewicz, H. Daun – Multiparametric method for the rheological evaluation of the meat and other solid foods. *Journal of Texture Studies*, 1997, 28, 339.

Rysunek 3. Rozkład naprężeń podczas testu CASRA

Źródło: Tyszkiewicz S., Olkiewicz M., Daun H. (1997). Multiparametric method for the rheological evaluation of meat and other solid foods. *Journal of Texture Studies*, 28, 339.

Stopień deformacji mierzy się pozycją elementu przenoszącego siłę. Zależność między deformacją a siłą nacisku zapisuje się, uzyskując reogram o charakterystycznym kształcie przypominającym grzebień o początkowo krótkich, a potem coraz dłuższych ząbkach (rysunek 4). Przy osiągnięciu wystarczająco dużej siły nacisku odporność struktury mechanicznej obiektu zostaje przekroczona i trzpień szybko wciska się w obiekt i nie powraca do swojej pierwotnej pozycji w czasie etapu relaksacji. Siłę lub parametr pochodny siły, uwzględniające jej rozkład na powierzchnię styku trzpień/obiekt oraz linię cięcia (długość krawędzi trącej trzpienia), można przyjąć za miarę odporności obiektu na niszczące działanie i opisać pojedynczym parametrem. Parametr ten nazwany został plastycznością (plasticity) – P. Na rysunku 1 odpowiada mu element plastycznościowy τ_0' i w mniejszym stopniu τ_0 . Z długości „zębów grzebienia” reogramu możemy wnioskować o sprężystości obiektu. Parametr będący miarą długości „zęba” (różnica na początku i końcu etapu stres) charakteryzuje odkształcenie całkowite, z którego część (różnica na początku i końcu etapu relaksacja) jest odkształceniem odwracalnym nazwanym elastycznością (elasticity) – E, a pozostałe odkształcenie odkształceniem nieodwracalnym nazwanym płynnością (fluidity) – F. Te trzy parametry pozwalają na

zintegrowanie opisu matematycznego reogramu typowych przetworów mięsnych, zastępujących siedem parametrów opisujących analitycznie reogram składający się z modułów elastyczności i współczynników lepkości modeli reologicznych Maxwella i Kelvina-Voigta, połączonych szeregowo w układzie Burgersa, oraz parametrów określających granice plastyczności wewnętrznej w układzie Kelvina-Voigta i zewnętrznej, charakteryzującej siły potrzebne do całkowitego zniszczenia badanej struktury i pozwalającej na upłynnienie ciała. Osobny współczynnik lepkości charakteryzuje przepływ takiej upłynnionej substancji.



Rys. 4 Reogram kielbasy serdelowej

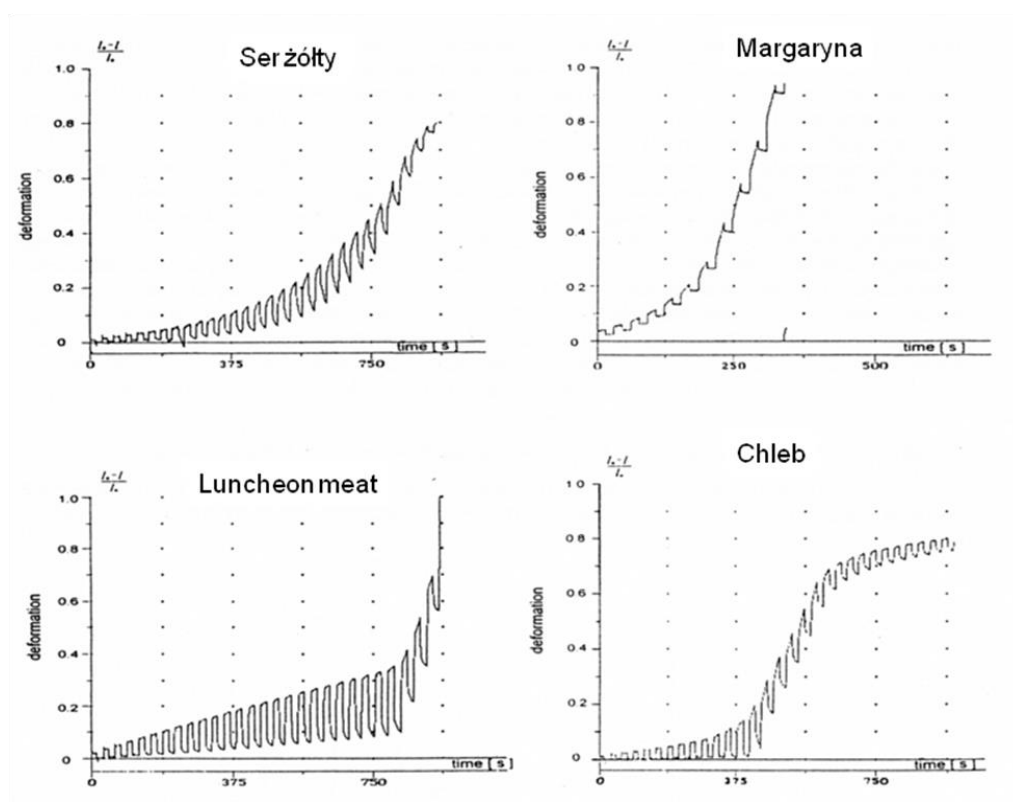
Rysunek 4. Reogram kielbasy serdelowej

Źródło: Tyszkiewicz S. (1970). Badanie właściwości mechanicznych kielbas drobnorozdrobnionych drogą konstrukcji i analizy modelu reologicznego. Roczn. Inst. Przem. Mięs., VII, 84.

Układ Burgersa jest podstawową częścią siedmioelementowego układu Tyszkiewicza, proponowanego dla opisu właściwości reologicznych dla kielbas drobnorozdrobnionych [Tyszkiewicz 1970]. Pierwsze reogramy metody CASRA w uproszczonej formie ukazały się w wydanej w 1969 r. książce „Badanie fizycznych właściwości mięsa” [Tyszkiewicz 1969]. Początkowo pomiar opisaną metodą odbywał się z zastosowaniem starego penetrometru, ze wzrokowym odczytem na tarczy ze wskazówką stopnia penetracji w badany obiekt cylindrycznego płasko zakończonego trzpienia. Monotoniczny wzrost nacisku trzpienia na badany obiekt realizowano, nakładając na szalkę aparatu kolejne 50 g lub 100 g odważniki z ołowiu. Odciążenie następowało błyskawicznie przez podniesienie szalki z odważnikami. Czas

trwania etapu dobierano do sytuacji. Im krótszy był czas trwania etapu, tym mniejszy był stopień wywołania całkowitego naprężenia, a w szczególności całkowitego odprężenia zależnego od czasu relaksacji, istotnego parametru w równaniu opisującym zjawisko pełzania, które zachodzi w większości przypadków badanej żywności pochodzenia zwierzęcego (ciała lepko-sprężyste). Im krótszy czas etapów, tym kształt „zębów grzebienia” bardziej ostry, a obrys reogramu węższy. Powtarzalne wyniki pomiarów parametrów P, E i F w zasadzie uzyskuje się, gdy ustalone w całym eksperymencie warunki są stałe. Dotyczy to przede wszystkim kształtu końcówki elementu tnąco-ściskającego. Początkowo stosowano w tym charakterze stalowe trzpienie w kształcie płasko zakończzonego walca [Tyszkiewicz 1989].

Rys. 5. Reogramy CASRA wybranych produktów spożywczych

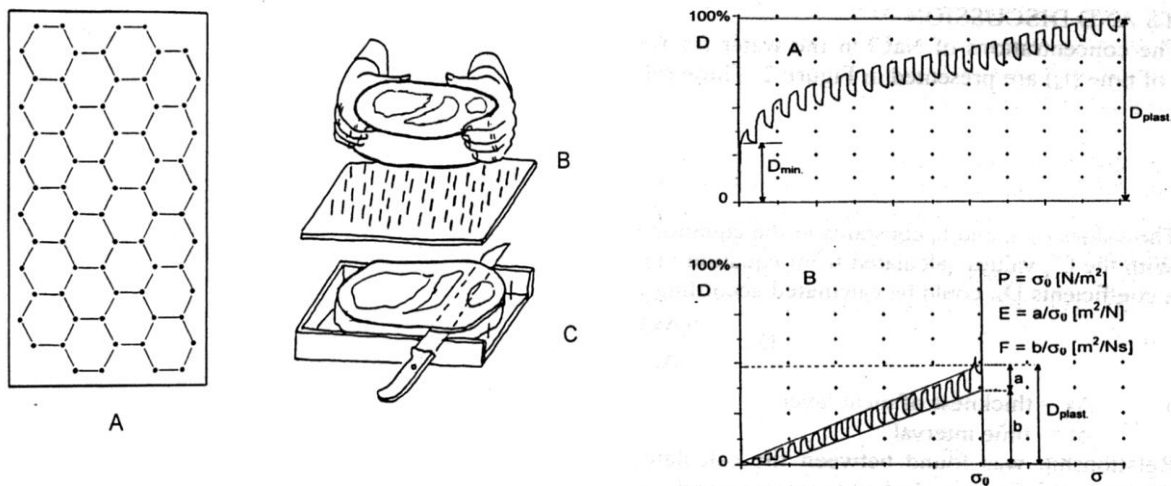


Rysunek 5. Reogramy przykładowych produktów spożywczych

Źródło: Tyszkiewicz S., Olkiewicz M., Daun H. (1997). Multiparametric method for the rheological evaluation of meat and other solid foods. *Journal of Texture Studies*, 28, 340.

Aktualnie autorzy stosują trzpienie (noże) o przekroju prostokątnym, ze stałym krótszym bokiem. Równie ważnymi czynnikami rzutującymi na powtarzalność wyników są kształt i rozmiar, a przede wszystkim grubość penetrowanej próbki. W przypadku surowego mięsa wycięcie powtarzalnej grubości próbki jest prawie niewykonalne, gdyż sam nacisk noża

deformuje krojony kawałek mięsa. Prace badawcze nad procesem dojrzewania szynek surowo solonych, w czasie którego proces suszenia powoduje ztwardnienie mięsa, nie byłyby możliwe bez wymyślenia specyficznego narzędzia – „łoża madejowego”, czyli płytki z ostrymi pionowo osadzonymi szpilkami, na które nakłada się cały duży płaski kawałek mięsa i dopiero tak usztywnione mięso przekrawa się do żądanej grubości plastra. Pomiary polegające na penetracji próbki trzpieniem wykonuje się w centrach pomiędzy szpilkami, rozstawionymi w sześciokąt podobnie jak w plastrze miodu. Prace badawcze nad dojrzewaniem mięsa wieprzowego doprowadziły do poszerzenia zestawu określonych parametrów o dwa nowe, będące miarą odkształcenia próbki podczas testu: D_{\min} [%] – charakteryzujące odkształcenie przy minimalnym naprężeniu i D_{plast} [%] – charakteryzujące odkształcenie przy naprężeniu powodującym nieodwracalne uszkodzenie struktury.



Rysunek 6. Modyfikacje metody CASRA zastosowane do badania konsystencji szynek surowo dojrzewających

Źródło: Tyszkiewicz S., Olkiewicz M. (1998). Meat consistency changes caused by dehydration and salting in the production of raw ripening ham. 44 ICoMST Barcelona Proceedings, II, 75, 974-975.

Najistotniejszym czynnikiem warunkującym rutynowe stosowanie tej metody jest dysponowanie zautomatyzowanym sprzętem, który jest w stanie zrealizować zadany program kolejnych etapów rosnących stresów, przedzielonych okresami relaksacji. Przydatne do tego celu okazało się urządzenie o nazwie Zwick Uniwersal Tasting Machine model 1445, realizujące przesuw trawersy między bitami z szybkością wystarczającą do skokowego zwiększenia i zmniejszenia naprężeń do zakładanych oraz utrzymanie ich na stałym poziomie w czasie trwania bitów. Przykładowy program maszyny w czasie badania próbek mięsa wieprzowego dojrzewającego przewidywał:

- penetracja przy użyciu prostokątnego trzpienia o wymiarach 2 mm x 6 mm i powierzchni przekroju $S=1,2 \cdot 10^{-5} \text{m}^2$,
- jednostkowa siła $F_1=1 \text{ N}$
- przyrost siły $F=1 \text{ N}$ na bit
- czasy stresu 15 s
- czasu relaksacji 15 s
- szybkość przesuwu trawersy $120 \text{ mm} \times \text{min}^{-1}$ między bitami i $2 \text{ mm} \times \text{min}^{-1}$ w czasie bitu [Olkiewicz 2009].

Powtarzalność metody w przypadku badania modelowego (homogennego) produktu mięsnego [Tyszkiewicz i in. 1997]:

- plastyczność P: zmienność w zakresie od $(1,7 \text{ do } 2,0) \times 10^5 \text{ N/m}^2$ bez istotnych statystycznie różnic rozmiarów powierzchni przekroju trzpieni od 2 mm x 6 mm do 2 mm x 20 mm, statystycznie istotna różnica dla trzpienia o rozmiarach powierzchni przekroju 2 mm x 4 mm, $P=2,2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$,
- elastyczność E: zmienność od 1,2 do $1,4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{N}$ bez istotnych statystycznie różnic przy trzpieniach zmienności o rozmiarach jak wyżej. Istotne różnice dla trzpienia o wymiarach 2 mm x 4 mm, $E=0,9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{N}$.
- płynność F: zmienność w zakresie od $(5,7 \text{ do } 7,1) \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{N} \times \text{s}$ bez istotnych statystycznie różnic rozmiarów powierzchni przekroju trzpieni od 2 mm x 8 mm do 2 mm x 20 mm. Istotna statystycznie różnica dla trzpieni o wymiarach 2 mm x 4 mm i 2 mm x 6 mm – odpowiednio 4,1 i $4,0 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{N} \times \text{s}$

Tabela 1. Wpływ wielkości trzpienia na wartości parametrów reologicznych modelowego produktu mięsnego

Wymiary trzpienia [mm]	Plastyczność [$\times 10^5$ N/mm ²]	Elastyczność [$\times 10^{-6}$ m ² /N]	Płynność [$\times 10^{-8}$ /N x s]
2 x 4	2,2*	0,9*	4,1*
2 x 6	1,7	1,2	4,0*
2 x 8	1,8	1,3	5,8
2 x 10	1,9	1,2	6,4
2 x 12	1,9	1,2	6,2
2 x 14	1,6	1,4	7,3
2 x 16	1,8	1,2	7,1
2 x 18	1,8	1,3	6,9
2 x 20	2,0	1,2	5,7

* – różnice istotne statystycznie

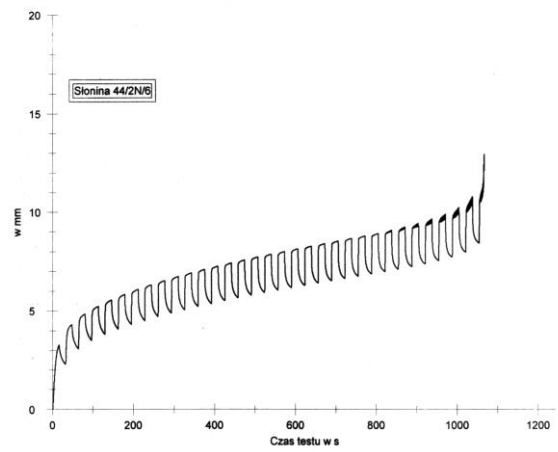
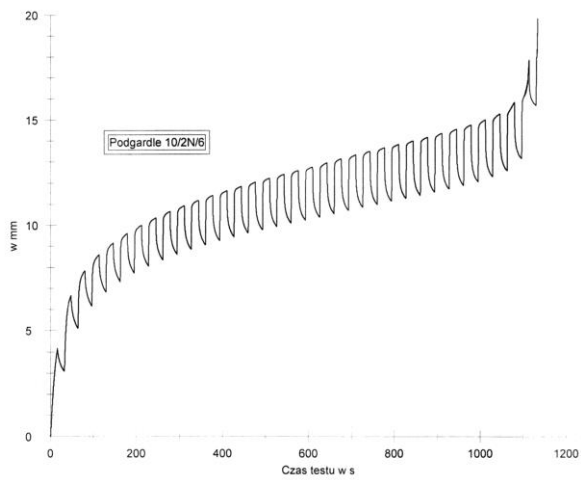
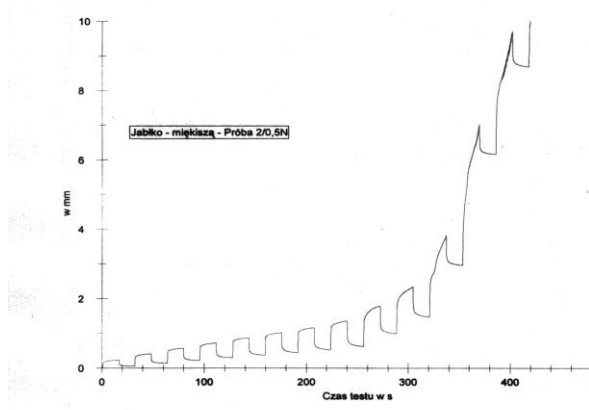
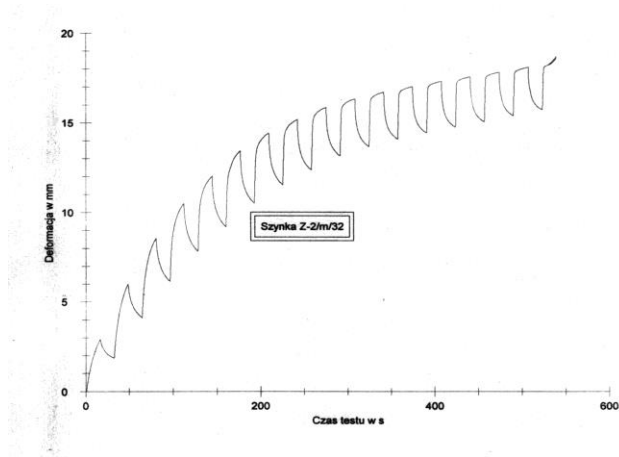
Źródło: Tyszkiewicz S., Olkiewicz M., Daun H. (1997). Multiparametric method for the rheological evaluation of meat and other solid foods. Journal of Texture Studies, 28, 345.

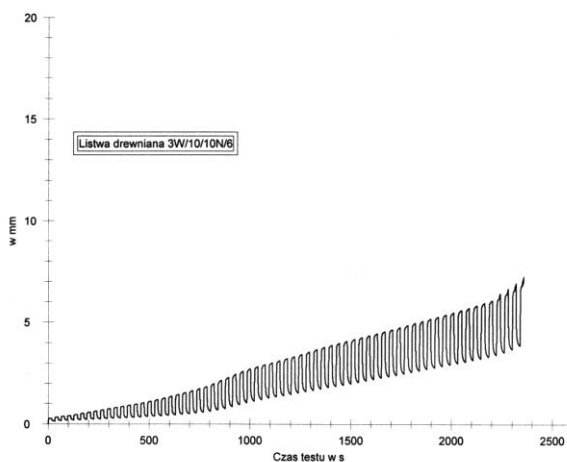
Tabela 2. Precyzja metody CASRA

Parametr	Precyzja metody	Współczynnik zmienności
Plastyczność – P	$3,00 \times 10^4$ N/m ²	14,8%
Elastyczność – E	$1,45 \times 10^{-7}$ m ² /N	9,7%
Płynność –F	$4,27 \times 10^{-9}$ m ² /N·x s	8,8%

Źródło: Tyszkiewicz S., Olkiewicz M., Daun H. (1997). Multiparametric method for the rheological evaluation of meat and other solid foods. Journal of Texture Studies, 28, 345.

Metodę CASRA z powodzeniem stosowano do badania pasztetów, słoniny, serów, pieczywa, czekolad, cukierków, owoców oraz warzyw surowych i gotowanych oraz innych obiektów niespożywczych.





Rysunek 7. Przykładowe reogramy wybranych ciał stałych

Źródło: Badania własne autorów.

Podsumowanie

Zastosowanie metody CASRA w opisanym w artykule wersji nie ogranicza się tylko do mierzenia umownych parametrów reologicznych, mogących służyć do syntetycznego opisu zjawisk związanych z klasycznym przetwórstwem i użytkowaniem żywności. Możliwe jest także na przykład, w razie potrzeby, termostatowanie badanych obiektów i badanie przemian właściwości mechanicznych wywołanych zmianą stanu skupienia, krystalizacji i żelowania, a ogólnie mówiąc – tworzenia nowych struktur przestrzennych i zanikania istniejących. Przydatne jest wtedy konstruowanie modeli reologicznych o większej ilości elementów i przypisywanie każdemu z nich określonej funkcji w procesach przemian. Klasycznymi przykładami mogą być procesy tworzenia się struktury lodów konsumpcyjnych (model Droke’go) lub czerstwienia struktur skrobiowo-białkowych pieczywa czy przemian deformacyjnych tuszy zwierzęcej w czasie rozbioru i wykrawania elementów anatomicznych i tkankowych. Szczególnie interesujące i przydatne mogą być przypadki, gdy działają duże siły przez bardzo krótki okres (np. podwodne eksplozje ładunków wybuchowych), kiedy objawiają się właściwości tyksotropowe i dylatacja struktur wewnętrznych badanych obiektów. Bardzo różne może być zarówno oprzyrządowanie techniczne prowadzonych eksperymentów, jak i metody interpretacji wyników badań metodą CASRA, ale niezmienna pozostaje istota metody – naprzemienne generowanie naprężeń i odprężeń materiałów i mierzenie odkształceń lub zmian wywołanych w ich strukturze. Dla pomysłowego badacza właściwości fizycznych ciał rzeczywistych metoda CASRA może okazać się instrumentem stwarzającym możliwość zrozumienia mechanizmów zachodzących zjawisk, szczególnie w sytuacjach pozwalających na

stworzenie porównywalnych warunków prowadzenia obserwacji lub wykonywania eksperymentów.

PIŚMIENNICTWO

1. Olkiewicz M. (2009). Zmiany konsystencji szynek surowo dojrzewających w czasie produkcji na przykładzie szynek z wybranych polskich ras. *Acta Agrophys.* 14(3), 691-700
2. Tyszkiewicz S. (1969). *Badanie fizycznych właściwości mięsa.* Warszawa: WNT, 20
3. Tyszkiewicz S. (1970). Badanie właściwości mechanicznych kiełbas drobnorozdrobnionych drogą konstrukcji i analizy modelu reologicznego. *Rocz. Inst. Przem. Mięsn. Tłuszcz.*, VII, 83-95
4. Tyszkiewicz S. (1989). Effect of amount and origin of protein on the rheological characteristic of cooked sausages, *Acta Aliment. Pol.*, XI/(XXXIX), 4, 278-289
5. Tyszkiewicz S., Olkiewicz M., Daun H. (1997). Multiparametric method for the rheological evaluation of meat and other solid foods. *J. Texture Stud.*, 28, 337-348
6. Tyszkiewicz S., Olkiewicz M. (1998). Meat consistency changes caused by dehydration and salting in production of raw ripening ham., 44 ICoMST Barcelona Proceedings, II, 75, 974-975
7. Tyszkiewicz S., Olkiewicz M., Kłossowska B., Moch P. (1998). Changes of rheological characteristic of raw pork meat caused by dehydration and salting. Methodological aspects. XXIX Sesja Naukowa KTChŻ PAN, Olsztyn, 22-23.09.1998
8. Tyszkiewicz S., Olkiewicz M. (2011). CASRA. Wieloparametryczna metoda badania reologicznych właściwości ciał rzeczywistych. Referat wygłoszony na Konferencji Naukowej „Metody fizyczne w badaniu środowiska rolno-spożywczego i leśnego” Białowieża, 7-9.09.2011