

# SPIS TREŚCI

|  |    |
|--|----|
| Wykaz ważniejszych oznaczeń .....  | 5  |
| Wstęp .....  | 6  |
| 1. Zagadnienia optymalizacyjne w zakładach przetwórczych.....                    | 8  |
| 1.1. Wprowadzenie .....  | 8  |
| 1.1.1. Arkusz przebiegu procesu .....  | 9  |
| 1.1.2. Rodzaje procesów projektowania.....                                       | 9  |
| 1.1.3. Bilans energii i surowców .....   | 10 |
| 1.1.4. Projektowanie aparatów i urządzeń.....                                    | 11 |
| 1.1.5. Wspomagane komputerowo projektowanie procesów/installacji.....            | 12 |
| 1.2. Projektowanie procesów spożywczych.....                                     | 13 |
| 1.3. Operacje jednostkowe w przetwórstwie spożywczym.....                        | 15 |
| 1.4. Bilans masy i energii .....   | 18 |
| 1.5. Media zakładów spożywczych .....  | 19 |
| 1.6. Wspomagane komputerowo projektowanie procesów.....                          | 22 |
| 1.7. Poprawa efektywności działania zakładu zakładu .....                        | 23 |
| 2. Systemy wspomagania zmian technologicznych w przemyśle .....                  | 24 |
| 2.1. Wprowadzenie .....  | 24 |
| 2.2. Taksonomia wspomagająca podejmowanie decyzji .....                          | 25 |
| 2.3. Ramy inżynierii systemów wspomagania decyzji .....                          | 27 |
| 2.3.1. Modele i modelowanie .....  | 28 |
| 2.3.2. Problemy z budową modeli .....  | 29 |
| 3. Podejście systemowe do procesów energetycznych w przetwórstwie żywności ..... | 30 |
| 3.1. Nowe technologie .....  | 31 |
| 4. Zagadnienia energetyczne w procesach przetwórstwa żywności.....               | 37 |
| 4.1. Zmiany fazowe i przejścia między stanami .....                              | 39 |
| 4.1.1. Żywność o niskiej zawartości wilgoci.....                                 | 39 |
| 4.1.2. Żywność mrożona.....  | 40 |
| 4.1.3. Diagramy stanów .....   | 42 |
| 4.2. Czynniki wpływające na szybkość reakcji w żywności .....                    | 43 |
| 4.2.1. Temperatura.....  | 43 |
| 4.2.2. Ciśnienie.....  | 43 |
| 4.2.3. Zawartość wody.....   | 44 |
| 4.3. Przemiany fazowe.....   | 44 |
| 4.4. Podsumowanie .....  | 48 |
| 5. Zagadnienia reologiczne w inżynierii procesów spożywczych.....                | 49 |
| 5.1. Operacje przenoszenia pędu .....  | 51 |
| 5.2. Operacje transportu energii.....  | 54 |
| 5.3. Operacje transportu masy .....  | 57 |
| 5.4. Charakterystyka strukturalna i zmiany fizyczne.....                         | 58 |
| 5.5. Reologia w warunkach wysokich temperatur i ciśnień.....                     | 59 |
| 6. Efekty termiczne w warunkach ogrzewania mikrofalowego .....                   | 63 |
| 6.1. Termiczne, nietermiczne i wzmocnione efekty mikrofalowe .....               | 63 |
| 6.1.1. Termiczny wpływ mikrofal na niszczenie drobnoustrojów .....               | 65 |
| 6.1.2. Mikrofalowe efekty nietermiczne i efekty specyficzne .....                | 66 |
| 6.2. Kinetyka niszczenia drobnoustrojów .....                                    | 68 |
| 6.3. Mikrofalowe efekty nietermiczne i efekty specyficzne.....                   | 70 |
| 6.3.1. Ogrzewanie wsadowe (proces standardowy).....                              | 70 |
| 6.3.2. Ogrzewanie mikrofalowe o ciągłym przepływie medium .....                  | 71 |

|   |     |
|---|-----|
| 6.4. Kinetyka inaktywacji mikrofalowej PME w soku pomarańczowym .....                                   | 72  |
| 6.5. Modele predykcyjne profili temperaturowych .....   | 74  |
| 6.6. Wnioski .....  | 77  |
| 7. Symulacje procesów przetwórczych .....   | 78  |
| 7.1. Wprowadzenie .....   | 78  |
| 7.2. Symulacja procesu .....  | 78  |
| 7.3. Symulacja w warunkach niepewności .....  | 83  |
| 7.3.1. Elastyczna strategia projektowania .....   | 83  |
| 7.3.2. Strategie wieloscenariuszowe .....   | 86  |
| 7.4. Etapy projektowania w inżynierii wspomaganej komputerowo .....                                     | 87  |
| 7.4.1. Równania opisujące proces i warunki brzegowe .....   | 87  |
| 7.4.2. Tworzenie siatki i właściwości opisujące surowiec .....  | 87  |
| 8. Aparat matematyczny użyty w symulacjach komputerowych .....  | 89  |
| 8.1. Opis transportu masy dla separacji układów dwufazowych .....                                       | 89  |
| 8.2. Modele przepływów wielofazowych .....  | 92  |
| 9. Analiza wybranych rozwiązań aplikacyjnych zwiększających efektywność energetyczną procesu .....      | 96  |
| 9.1. Pompa do tłoczenia cieczy o właściwościach pianotwórczych .....                                    | 96  |
| 9.1.1. Opis problemu technologicznego .....   | 96  |
| 9.1.2. Plan badań .....   | 100 |
| 9.1.3. Badania stanowiskowe .....   | 105 |
| 9.1.4. Model matematyczny dla symulacji CFD .....   | 107 |
| 9.1.5. Wyniki symulacji dla wody 109  |     |
| 9.1.6. Wyniki symulacji i badań stanowiskowych dla medium – mieszanina dwufazowa (woda/powietrze) ..... | 114 |
| 9.1.7. Podsumowanie i wnioski .....   | 116 |
| 9.2. Technologia produkcji suszonych przekąsek z wołowiny .....   | 119 |
| 9.2.1. Opis problemu technologicznego .....   | 119 |
| 9.2.2. Plan badań i stanowisko badawcze .....   | 122 |
| 9.2.3. Model matematyczny dla symulacji CFD .....   | 127 |
| 9.2.4. Wyniki symulacji .....   | 128 |
| 9.2.5. Badania stanowiskowe .....   | 132 |
| 9.2.6. Omówienie wyników stanowiskowych .....   | 138 |
| 9.2.7. Wnioski .....  | 145 |
| 9.3. Transport surowców delikatnych .....   | 146 |
| 9.3.1. Opis problemu technologicznego .....   | 146 |
| 9.3.2. Modelowanie oddziaływań surowca podczas transportu .....   | 149 |
| 9.3.3. Model obliczeniowy .....   | 152 |
| 9.3.4. Wyniki symulacji oddziaływań cząstek podczas transportu na rynnice przenośnika .....             | 157 |
| 9.3.5. Omówienie wyników uzyskanych podczas symulacji .....   | 171 |
| 9.3.6. Wyniki badań stanowiskowych .....  | 173 |
| 9.3.7. Wnioski końcowe z badań stanowiskowych .....   | 181 |
| 9.3.8. Wnioski końcowe .....  | 183 |
| 10. Podsumowanie .....  | 184 |
| Literatura .....  | 186 |
| Spis rysunków .....   | 204 |
| Spis tabel .....  | 209 |
| Streszczenie .....  | 211 |
| Summary .....   | 212 |

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

|               |  |                          |
|---------------|--|--------------------------|
| $E$           | moduł Younga   | $\text{N/m}^2$           |
| $F_D$         | siła oporu działająca na ziarno podczas przemieszczania się w medium transportowym | $\text{N}$               |
| $g$           | przyspieszenie ziemskie  | $\text{m/s}^2$           |
| $k$           | stała zależna od współczynnika kształtu  | –                        |
| $k_n$         | stała sztywności materiału nadawy w kierunku normalnym do powierzchni              | $\text{N/m}$             |
| $k_t$         | stała sztywności materiału nadawy w kierunku stycznym do powierzchni ziarna        | $\text{N/m}$             |
| $n$           | liczba pomiarów  | –                        |
| $SD$          | odchylenie standardowe   | –                        |
| $v_T$         | prędkość opadania  | $\text{m/s}$             |
| $V_n$         | objętość nadawy  | $\text{m}^3$             |
| $\varepsilon$ | współczynnik restytucji energii  | –                        |
| $\eta$        | lepkość dynamiczna cieczy  | $\text{Pa}\cdot\text{s}$ |
| $\rho_f$      | gęstość nasypowa nadawy  | $\text{kg/m}^3$          |
| $\rho_F$      | gęstość cieczy   | $\text{kg/m}^3$          |
| $\rho_z$      | gęstość właściwa fazy stałej   | $\text{kg/m}^3$          |

# WSTĘP

Utylitarne wykorzystanie badań w obszarze zmian technologii wytwórczych dotyczy między innymi zwiększenia sprawności procesu lub uzyskania produktu akceptowanego przez konsumenta oraz spełniającego rygorystyczne normy bezpieczeństwa. Zmiany postaw społecznych oraz rosnąca świadomość konsumentów zmuszają producentów do zmiany filozofii organizacji produkcji.

Inkluzywny i zrównoważony rozwój przemysłu powinien być podstawowym źródłem generowania dochodu i drogą do szybkiego podwyższania standardów życia. Ma on także dostarczać rozwiązań technologicznych zapewniających przyjazne dla środowiska uprzemysłowienie.

U podstaw wysiłków zmierzających do realizacji celów środowiskowych, określonych przez ONZ, leży postęp technologiczny, w tym zwiększenie efektywności materiałowej i energetycznej. Bez innowacji technologicznych, wrażliwych na aspekty środowiskowe nie będzie industrializacji, która w sposób zrównoważony mogłaby rozwiązać problemy rozwoju społeczeństw w XXI wieku.

Ambitne plany Unii Europejskiej w zakresie zmian paradygmatów technologicznych zmuszają inżynierów i technologów produkcji do większej efektywności w wykorzystaniu zasobów surowcowych oraz stosowania przyjaznych dla środowiska technologii i procesów produkcji. Takie poczynania skłaniają do poszukiwania oszczędności w nakładach energetycznych niezbędnych do wytworzenia nowoczesnych produktów.

Skala procesów gospodarczych, w których znaczący wkład mają technologie przetwórstwa surowców, determinuje działania zmierzające do maksymalizacji zysku, przy możliwie najniższych kosztach produkcji. Wymagania środowiskowe związane z ograniczeniem emisji gazów, wymuszają optymalizację procesów przetwórczych realizowanych w produkowanych urządzeniach. Aspekt ekonomiczny procesu jest równie istotny jak jakość uzyskanego produktu końcowego. Nawet organizacje, których zyski sięgają wielu milionów dolarów, starają się utrzymywać na najniższym poziomie relację kosztów operacyjnych do kosztów stałych. Sukces ekonomiczny przedsięwzięcia zależy niejednokrotnie od poprawnej oceny procesu technologicznego, którą uzyskuje się w wyniku analiz ograniczonej liczby prób. Jest to podyktowane wysokością kosztów, które należy ponieść podczas doboru parametrów pracy ciągu technologicznego. W związku z tym poprawność wniosków, które można uzyskać z ograniczonej liczby prób, prowadzonych w skali przemysłowej oraz półprzemysłowej, znacząco ogranicza koszty funkcjonowania organizacji.

Celem monografii jest opracowanie modeli bilansujących masę i energię wybranych procesów jednostkowych, pozwalających na ich zoptymalizowanie w oparciu o zdefiniowane funkcje celu. Technologie przeanalizowano pod kątem ograniczenia

strat surowca oraz minimalizacji nakładów energetycznych, przyjmując jako cel nadrzędny jakość produktu

W rozdziale pierwszym opisano zagadnienia optymalizacyjne w zakładach przetwórczych, decydujących o wyborze technologii oraz procesach jednostkowych niezbędnych do jej wdrożenia.

Rozdział drugi i trzeci opisują narzędzia wspomagające proces decyzyjny w przedsiębiorstwie produkcyjnym oraz podejście systemowe do zagadnień energetycznych.

Rozdział czwarty poświęcony jest opisowi wpływu przemian fazowych w procesach obróbki żywności na fizykochemiczne właściwości surowca. W rozdziale piątym odniesiono się do zjawisk reologicznych towarzyszącym tym przemianom. Kolejny rozdział opisuje efekty termiczne podczas ogrzewania mikrofalowego.

Część eksperymentalną (rozdział siódmy) rozpoczynają opisy narzędzi wykorzystywanych do symulacji procesów przetwórczych zachodzących podczas przetwórstwa żywności. Uzupełnieniem treści rozdziału siódmego jest rozdział ósmy, opisujący użycie modelu matematycznego wykorzystywanego do symulacji komputerowych.

Rozdział dziewiąty opisuje użyteczne rozwiązania prowadzące do osiągnięcia efektywności energetycznej w oparciu o wybrane funkcje celu. Badania dotyczą trzech wybranych procesów/technologii obejmujących: (I) transport cieczy wysokodispersyjnych, (II) wydatki energii podczas dehydratacji mięsa oraz (III) ograniczenie strat surowca podczas transportu.