

MODELOWANIE KINETYKI PROCESU KIEŁKOWANIA NASION RZODKWI

B. Gładyszewska, R. Koper, G. Gładyszewski¹

Katedra Fizyki, Akademia Rolnicza w Lublinie, ul. Akademicka 13, 20-033 Lublin

e-mail: broz@ursus.ar.lublin.pl

¹Institut Fizyki, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 38, 20-618 Lublin

Streszczenie. Przeprowadzono badania kiełkowania nasion rzodkwi odmiany Murzynka. W doświadczeniu użyto inkubatora termostaticznego, wyposażonego w wymuszony obieg powietrza wewnątrz komory oraz półkę kiełkownika typu Wageningen. Kiełkowanie przeprowadzono w temperaturach 20°C, 30°C, a także 35°C. Stosując metody zalecane przez międzynarodowe normy wyznaczono zdolność i średni czas kiełkowania nasion. Kinetykę procesu kiełkowania opisano stosując dwa modele matematyczne: model analityczny oraz model symulacyjny. Analizę przeprowadzono także dla nasion kiełkujących w zmiennych warunkach temperaturowych.

Słowa kluczowe: Kiełkowanie nasion rzodkwi, modelowanie matematyczne.

WSTĘP

Jakość nasion i możliwość szczegółowej oceny procesu ich kiełkowania mają ogromne znaczenie dla rolnictwa, a także dla tych gałęzi przemysłu, które z rolnictwem są blisko związane. Nasiona służą zarówno do produkcji roślin gruntowych jak i szklarniowych, wymagają zaangażowania w tę produkcję znacznych środków finansowych i pracy. W tych warunkach kontrola kiełkowania nasion staje się niezbędna - zbyt niskie szybkość czy zdolność kiełkowania mogą prowadzić do znacznych strat finansowych. Kontrola taka wymaga szczegółowej analizy procesu kiełkowania nasion. Przeprowadzone przez nas badania [2, 4] wskazują na to, że sposób oceny żywotności nasion zalecany przez normy

[6] jest daleki od dokładności wymaganej w szczegółowych badaniach naukowych (oczywiście poza prostą do obliczenia zdolnością kiełkowania). Nieścisłości terminu określania szybkości kiełkowania, a także fakt, iż średni czas kiełkowania nasion, określany za Pieperem, jest niezależny od tego, jaka jest intensywność kiełkowania w czasie wskazują na to, iż naukowe podejście do opisu procesu kiełkowania powinno być oparte na parametrach wynikających z bardziej zaawansowanych i ścisłych modeli niż te, które wynikają z norm PN-R-65950. Spostrzeżenia te spowodowały, iż w ramach badań nad kiełkowaniem nasion, prowadzonych w naszym zespole, podjęto próbę udoskonalenia opisu procesu kiełkowania. Opracowano dwie nowe metody modelowania procesu kiełkowania: model analityczny [4] i model symulacyjny [2].

W tej pracy oba wspomniane wyżej modele matematyczne zostały wykorzystane w celu precyzyjnego opisanie i analizy kinetyki procesu kiełkowania nasion rzodkwi.

WARUNKI DOŚWIADCZALNE

W badaniu użyto nasion rzodkwi Murzynka, odmiany przeznaczonej do uprawy gruntowej, w naturalnych warunkach wymagającej gleby próchniczej i wilgotnej. Doświadczenie prowadzono w inkubatorze termostatycznym, wyposażonym w wymuszony obieg powietrza wewnątrz komory oraz półkę kiełkownika typu Wageningen, zapewniającą stałą 100% wilgotność. Kiełkowanie przeprowadzano w temperaturach 20⁰C, 30⁰C i 35⁰C przy stabilizacji temperatury $\pm 0,3^0$ C. Każda badana grupa była reprezentowana przez 500 nasion. Za nasiona wykiełkowane uznawane były nasiona, które uformowały co najmniej 2 mm kiełek. Zliczanie wykiełkowanych nasion przeprowadzano w odstępach 2-3 godzinnych, tak by nawet w okresie maksymalnej intensywności kiełkowania uzyskać dane, pozwalające na sporządzenie dokładnej krzywej kiełkowania.

WYNIKI I DYSKUSJA

Zalecane przez normę *metody fizjologiczne* są metodami powszechnie przyjętymi i stosowanymi przez wszystkie stacje oceny nasion (SON) w skali światowej. Polegają one na wywołaniu kiełkowania w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych. Normy określają zdolność do kiełkowania jako procentową liczbę nasion normalnie kiełkujących w określonych warunkach i w ciągu określonego, odpowiednio długiego czasu. Zdolność kiełkowania można więc zdefiniować wzorem:

$$Z_k [\%] = \frac{n_k}{n_c} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie: n_k jest liczbą nasion wykiełkowanych, n_c jest liczbą wszystkich wysianych nasion, Z_k natomiast oznacza zdolność kiełkowania. Normy zalecają także wyznaczenie „szybkości kiełkowania”. Jednak ze względu na wspomnianą we wstępie nieściśłość określania tej wielkości, w niniejszej pracy odstawiliśmy od jej wyznaczania. Znacznie słuszniejsza wydaje się ocena żywotności według średniego czasu potrzebnego do wykiełkowania jednego nasiona [5]. Im dłuższy jest ten czas, tym mniejsza jest żywotność nasion. Zgodnie z propozycją Piepera średni czas potrzebny do wykiełkowania jednego nasiona wyraża się jako średnią ważoną:

$$t_p = \frac{\sum_{i=1}^{n_k} n_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^{n_k} n_i} \quad (2)$$

gdzie: n_i jest liczbą nasion kiełkujących w danych przedziałach czasu, $i=1,2,3,\dots,n_k$, t_i jest czasem kiełkowania nasion, zaś t_p jest średnim czasem potrzebnym do wykiełkowania jednego nasiona. Tabela 1 przedstawia obliczone wartości zdolności kiełkowania Z_k oraz czasu t_p na podstawie rezultatów przeprowadzonych doświadczeń w różnych temperaturach. Jak widać z pierwszych trzech wierszy Tab. 1, najwyższą zdolność kiełkowania uzyskano w temperaturze 20°C, podczas gdy najwyższa żywotność charakteryzowana przez najkrótszy czas Piepera) wystąpiła u nasion kiełkujących w temperaturze 30°C. Następnie podjęliśmy próbę określenia kinetyki procesu kiełkowania przez zastosowanie modeli analitycznego i symulacyjnego. Ze względu na limit objętościowy pracy, ograniczamy się tutaj jedynie do zasygnalizowania, iż model analityczny oparty jest na założeniu, iż krzywe kiełkowania (zależność liczby wykiełkowanych nasion od czasu) opisać można równaniem analogicznym do znanego z teorii kinetyki populacji równania Verhulsta-Pearla, podczas gdy model symulacyjny wykorzystuje metodę Monte Carlo zakładając, iż proces kiełkowania składa się z trzech sukcesywnie następujących po sobie etapów (fizycznego, biochemicznego i fizjologicznego), zaś krzywa kiełkowania jest odzwierciedleniem charakterystycznych czasów przejść z danego etapu do etapu następnego. Oba modele zostały szczegółowo opisane w pracach [2,4].

Tabela 1. Wartości zdolności kiełkowania Z_k , oraz średniego czasu Piepera t_p obliczone dla nasion rzodkwi kiełkujących w różnych temperaturach (objaśnienie symboli przedstawiono w tekście pracy)

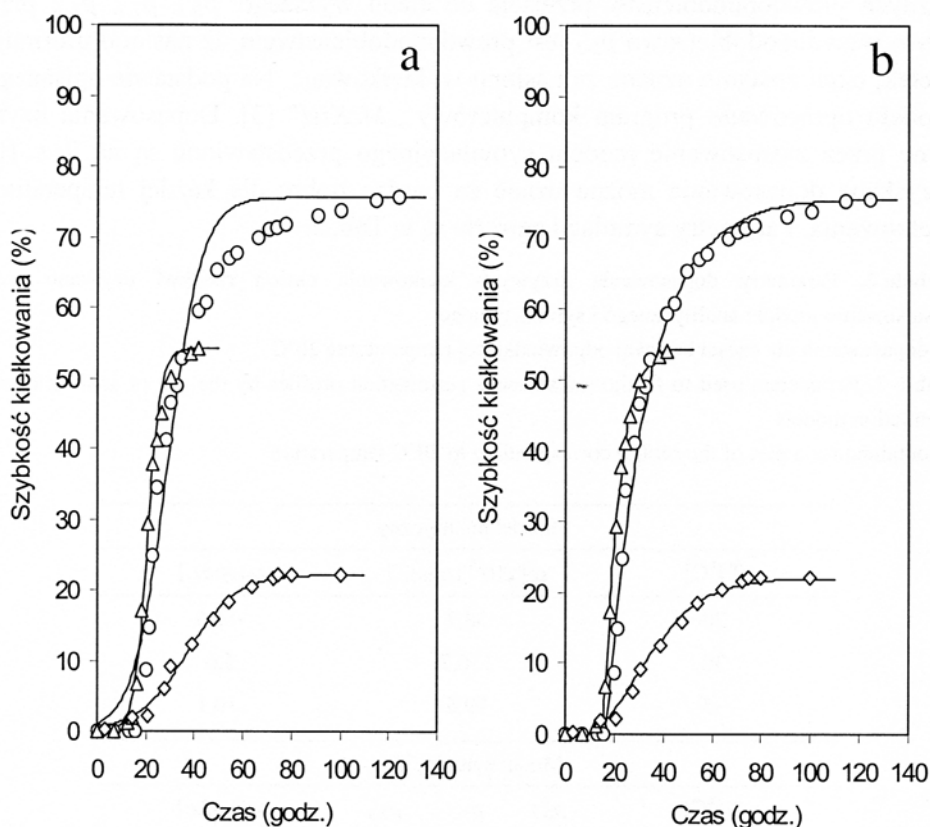
Table 1. Germination efficiency Z_k and Pieper's averages t_p calculated for radish seeds germinating at different temperatures (see the text for details)

$T [^{\circ}\text{C}]$	$n_k [-]$	$Z_k [\%]$	$t_p [\text{godz.}]$
20	378	75,6	29
30	271	54,2	21
35	111	22,2	37
35+20	356	71,2	-

Równanie opisujące krzywą kiełkowania w ramach modelu analitycznego ma postać:

$$n(t) = \frac{n_k}{1 + (n_k - 1) \cdot e^{-\alpha \cdot n_k \cdot (t - t_0)}} \quad (3)$$

Współczynnik α decyduje o zmianie stałej czasowej, zaś t_0 charakteryzuje czas wyjścia z etapu utajonego rozwoju kiełków rozpoczęcie etapu formowania kiełków. Model analityczny, może poprawnie opisać te procesy kiełkowania, które charakteryzują się symetryczną postacią przebiegu intensywności kiełkowania w czasie. Większość badań [1, 2, 8] wskazuje jednak na to, że zależność intensywności kiełkowania nie jest symetryczna. Tak też jest w przypadku zależności intensywności kiełkowania otrzymanej dla nasion rzodkwi kiełkujących w temperaturze 20°C. Prowadzi to do słabego odwzorowania krzywej kiełkowania modelem analitycznym (patrz Rys.1a). Również parametry dopasowania sprawiają problem interpretacyjny. Jak wynika z Tab. 2, parametry t_0 otrzymane przy temperaturze kiełkowania 20°C i 35°C są ujemne co prowadziłoby do wniosku, iż nasiona wyszły z etapu utajonego rozwoju na kilkanaście godzin przed ich wysianiem. Ponieważ jednak nasiona nie były poddane żadnemu procesowi przedsiewnemu, taka interpretacja byłaby błędna. Słabe dopasowanie krzywych modelem analitycznym jest po prostu spowodowane niesymetrią wspomnianej wcześniej przebiegu intensywności kiełkowania. Problem ten jest rozwiązany w ramach modelu symulacyjnego.



Rys. 1. Doświadczalne krzywe kiełkowania nasion rzodkwi w temperaturach kiełkowania 20°C (O), 30°C (Δ) oraz 35°C (◊) wraz z dopasowaniami (linia ciągła) uzyskanymi przez zastosowanie modelu analitycznego (a) i modelu symulacyjnego (b). Każda grupa reprezentowana była przez 500 nasion.

Fig. 1. Experimental radish seeds germination profiles obtained at 20°C (O), 30°C (Δ) and 35°C (◊) fitted (solid line) by the use of analytical (a) and simulation (b) models. Each sample consisted with 500 seeds.

Model ten zakłada, iż prawdopodobieństwo wyjścia z każdego etapu rozwoju jest określone oraz, że proces ma charakter sukcesywny, tzn. nasiono nie może przejść np. do etapu fizjologicznego bez wcześniejszego wyjścia z etapu fizycznego. Wobec braku liczbowych danych określających prawdopodobieństwa przechodzenia z jednego etapu do drugiego, proces kiełkowania symulowano dla

różnych prawdopodobieństw przejścia do etapu wyższego: p_{0-1} , p_{1-2} , p_{2-3} , przy czym prawdopodobieństwo p_{2-3} jest prawdopodobieństwem, iż nasiono uformuje kieltek, czyli zostanie uznane za nasiono wykiełkowane. Na podstawie opisanego modelu opracowano program komputerowy „McKiel” [3]. Dopasowania uzyskane przez zastosowanie modelu symulacyjnego przedstawione są na Rys. 1b. Uzyskane dopasowania można uznać za bardzo dobre dla każdej temperatury kiełkowania. Parametry symulacji zawarte są w Tab. 2.

Tabela 2. Parametry dopasowania krzywych kiełkowania nasion rzodkwi uzyskane przy zastosowaniu modelu analitycznego i symulacyjnego

*) dopasowania dla części krzywej odpowiadającej temperaturze 20°C

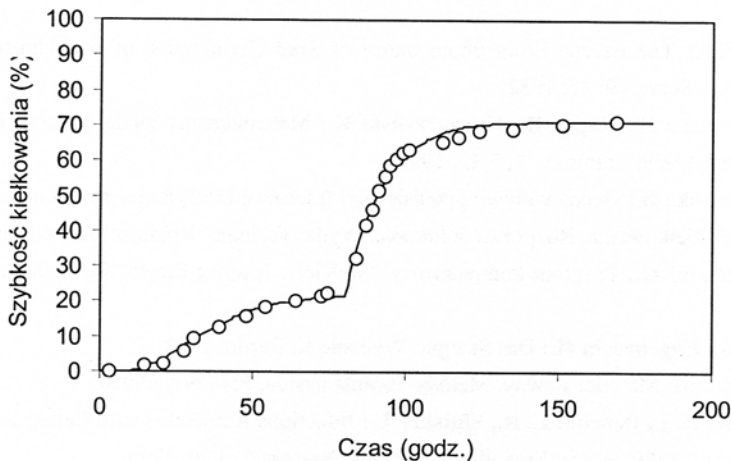
Table 2. Parameters used to fit the radish seeds germination profiles by the use of analytical and simulation models

*) obtained for a part of the profile corresponding to 20°C temperature

Model analityczny				
T [°C]	α [$\times 10^{-5}$ 1/godz.]			t_0 [godz.]
20	38,7			-11,6
30	136,7			5,6
35	89,6			-10,1
Model symulacyjny				
T [°C]	p_{0-1}	p_{1-2}	p_{2-3}	t_0 [godz.]
20	0,7	0,06	0,7	14
30	0,7	0,15	0,7	13
35	0,09	0,09	0,09	5
35 + 20 *)	0,7	0,08	0,7	73

W tej pracy nie możemy przedstawić obszernej interpretacji uzyskanych parametrów dopasowań. Pragniemy jednak zwrócić uwagę na wyraźne zwiększenie intensywności kiełkowania w temperaturze 30°C w porównaniu do temperatury 20°C, wyrażone ponad dwukrotnie wyższą wartością prawdopodobieństwa p_{1-2} (przy zachowaniu takich samych wartości prawdopodobieństw p_{0-1} i p_{2-3}). Wynik ten jest zgodny z modelem analitycznym (przy zastrzeżeniu dotyczącym samej jego stosowalności). Analiza, oparta zarówno na tradycyjnym określaniu żywotności nasion, jak i modelowaniu matematycznym wskazuje na

to, że warunki najbardziej sprzyjające uzyskaniu maksymalnych zdolności kiełkowania nasion rzodkwi są w temperaturze 20°C, podczas gdy najwyższą intensywność kiełkowania uzyskuje się w temperaturach wyższych. W związku z tym, przeprowadziliśmy kiełkowanie nasion w zmiennych warunkach temperaturowych. Nasiona, kiełkujące w temperaturze 35°C, po czasie wystarczającym dla nasycenia krzywej kiełkowania (75 godz.) pozostawiono w inkubatorze w temperaturze 20°C. Uzyskana krzywa kiełkowania wraz z dopasowaniem modelem symulacyjnym przedstawiona jest na Rys. 2, zaś parametry dopasowania zostały zawarte w Tab. 2. Jak widać na Rys. 2, nasiona "odzyskały" swoją żywotność w temperaturze 20°C i kontynuowały proces kiełkowania, aż do uzyskania takiej samej (w granicach błędu) zdolności kiełkowania, co nasiona kiełkujące tylko w temperaturze 20°C. Kinetyka procesu kiełkowania również charakteryzowała się bardzo zbliżonymi parametrami p_{0-1} , p_{1-2} , p_{2-3} . Świadczyć to może o tym, że zastosowanie zmiennych warunków kiełkowania doprowadzi do wyższych zdolności kiełkowania przy odpowiednim doborze czasów inkubacji w danych warunkach. Takie stwierdzenie - by stało się faktem - wymaga dalszych, szczegółowych prac.



Rys. 2. Doświadczalna (O) krzywa kiełkowania nasion rzodkwi w zmiennych warunkach temperaturowych (35°C i 20°C) wraz z dopasowaniem (linia ciągła) uzyskaniem przez zastosowanie modelu symulacyjnego. Badana grupa reprezentowana była przez 500 nasion.

Fig. 2. Experimental (O) radish seeds germination profile obtained at temperature transition from 35°C to 20°C fitted (solid line) by the use of the simulation model. The sample consisted with 500 seeds.

PODSUMOWANIE

Omawiany problem jest istotny nie tylko z przyczyn czysto komercyjnych. W ostatnich latach, kiełki różnych roślin (głównie pszenicy, soi, rzodkiewki, słonecznika i wielu innych) postrzegane są coraz częściej, jako ważne źródło składników odżywczych, stając się istotnym elementem codziennej diety. Jednocześnie, zmiany zachodzące w produkcji żywności i żywieniowych przyzwyczajeniach, wykreowały nowe drogi możliwych infekcji, stając się zagrożeniem dla zdrowia [7]. Bakterie i grzyby mogące znajdować się w materiale nasiennym modyfikują proces kiełkowania, zaś jego szczegółowa analiza może pozwolić na wcześniejsze ich wykrycie. Także prowadzone badania nad odtwarzaniem gatunków ginących roślin wymagają szczegółowej analizy procesu kiełkowania nasion, zaś samo zagadnienie maksymalizacji ich zdolności kiełkowania jest zagadnieniem podstawowym. Uzyskane w tej pracy wyniki potwierdzają użyteczność opracowanych modeli matematycznych, szczególnie w przypadkach skomplikowanej postaci krzywych charakteryzujących kinetykę procesu kiełkowania.

PIŚMIENNICTWO

1. **Cone W. J.:** The Escape From Photocontrol of Seed Germination of *Arabidopsis Thaliana*. *Arabid. Inf. Serv.*, 19: 35, 1982.
2. **Gładyszewska B., Koper R., Kornarzyński K.:** Matematyczny model procesu kiełkowania nasion. *Inżynieria Rolnicza*, 2, 7-12, 1999.
3. **Gładyszewska B.:** Ocena wpływu przedświejnej laserowej biostymulacji nasion pomidorów na proces ich kiełkowania. Rozprawa doktorska. Wyd. Techniki Rolniczej AR w Lublinie, 1998.
4. **Gładyszewski G.:** Program komputerowy "McKieł". Instytut Fizyki, Politechnika Lubelska, 1999.
5. **Pieper G., Eggebrecht H.:** *Das Saatgut*. Wydanie II, Berlin. 1952.
6. Polska Norma. Materiał siewny. Metody badania nasion, PN-96/R-65950.
7. **Taormina P. J., Beuchat L. R., Slutsker L.:** Infections Associated with Eating Seed Sprouts: An International Concern. *Emerging Infectious Diseases* 5, 626, 1999.
8. **Zimmermann M., Sommer S., Pickert M., Kranz A. R., Gartenbach K., Bork U.:** Interim Results of an Experiment on Kosmos 1887 Satellite with *Arabidopsis* Seeds Exposed in Space. *Arabid. Inf. Serv.*, 26, 47, 1988.

KINETICS OF THE RADISH SEEDS GERMINATION PROCESS MODELING

B. Gładyszewska, R. Koper, G. Gładyszewski¹

Department of Physics, University of Agriculture, Akademicka 13, 20-033 Lublin

e-mail: broz@ursus.ar.lublin.pl

¹Institute of Physics, Technical University of Lublin, Nadbystrzycka 38, 20-618 Lublin

Summary. Germination of radish seeds was studied by the use of Wageningen germination set-up. The germination process was observed at different temperatures: 20°C, 30°C and 35°C. Basing on the standards the germination efficiency and the average germination time were calculated. In order to analyze the germination process in detail, two mathematical models were used: the analytical model and the simulation model based on a Monte Carlo method.

Key words: Germination of radish seeds, mathematical modeling.