

Received: 11.10.2019 / Accepted: 03.12.2019

## Effect of temperature, humidity and soil pH on development of *Plasmodiophora brassicae*

### Wpływ temperatury, wilgotności i pH gleby na rozwój *Plasmodiophora brassicae*

Ewa Jajor<sup>1\*</sup>, Jan Bocianowski<sup>2</sup>, Ilona Świerczyńska<sup>1</sup>, Katarzyna Pieczul<sup>1</sup>,  
Joanna Horoszkiewicz-Janka<sup>1</sup>, Marek Korbas<sup>1</sup>

#### Summary

*Plasmodiophora brassicae* is a pathogen that causes clubroot – one of the most serious and economically most important diseases of the Brassica family. Development of *P. brassicae* is influenced by factors such as temperature, humidity and soil pH. The effect of these factors may vary due to the adaptability of *P. brassicae* and unequal degree of resistance of plants to infection. The aim of the study was to determine the effect of temperature, humidity and soil pH on *P. brassicae* infection of plants susceptible to infection and plants with increased resistance. The experiment included three pH ranges of the substrate, 3 humidity variants and 4 temperature ranges. The study revealed that the development of *P. brassicae* was limited the most by the lowest temperature (13°C) and low humidity of the substrate, while high temperature and excess humidity showed the most stimulating effect on the pathogen. The optimum temperature for the development of the disease on sensitive varieties was 20–24°C, while on varieties with increased resistance 16–20°C.

**Key words:** *Plasmodiophora brassicae*, soil pH, temperature, humidity

#### Streszczenie

*Plasmodiophora brassicae* to patogen powodujący kiłę kapusty – jedną z najgroźniejszych i najważniejszych ekonomicznie chorób roślin z rodziny kapustowatych. Na jego rozwój wpływają m.in. takie czynniki, jak: temperatura, wilgotność oraz pH gleby. Działanie wymienionych czynników może się zmieniać w związku ze zdolnościami adaptacyjnymi *P. brassicae* oraz niejednakowym stopniem odporności uprawianych odmian. Celem pracy było określenie wpływu temperatury, wilgotności oraz pH podłoża na porażenie przez *P. brassicae* roślin wrażliwych na infekcję oraz roślin o podwyższonej odporności. W doświadczeniach uwzględniono trzy zakresy pH podłoża, 3 warianty wilgotności oraz 4 zakresy temperatur. Doświadczenia wykazały, że rozwój *P. brassicae* najbardziej ograniczała najniższa temperatura (13°C) oraz niska wilgotność podłoża, natomiast najbardziej stymulująco na patogena wpływała wysoka temperatura oraz wysoka wilgotność. Optymalna dla rozwoju choroby na odmianach wrażliwych była temperatura 20–24°C, natomiast na odmianach o podwyższonej odporności 16–20°C.

**Słowa kluczowe:** *Plasmodiophora brassicae*, pH podłoża, temperatura, wilgotność

<sup>1</sup>Institut Ochrony Roślin – Państwowy Instytut Badawczy  
Władysława Węgorka 20, 60-318 Poznań

<sup>2</sup>Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu  
Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznań

\*corresponding author: e.jajor@iorpib.poznan.pl

ORCID: 0000-0002-4412-1766

## Wstęp / Introduction

*Plasmodiophora brassicae* to patogen powodujący kiłę kapusty – jedną z najgroźniejszych oraz najważniejszych ekonomicznie chorób roślin z rodziny kapustowatych (Korbas i Jajor 2013). Jest szeroko rozpowszechniony na całym świecie szczególnie na obszarach o umiarkowanym i wilgotnym klimacie. Według danych EPPO z 2017 roku *P. brassicae* występuje na sześciu kontynentach: w Afryce, Ameryce Północnej i Południowej, Azji, Europie oraz Oceanii.

W Polsce *P. brassicae* stanowi poważny problem przede wszystkim w uprawach rzepaku (Korbas i wsp. 2009). Szacuje się, że na około 250 tys. ha w naszym kraju, gdzie uprawiany jest rzepak, w glebie znajdują się zarodniki tego patogena (Konieczny 2012). Kiła kapusty spotykana jest w wielu regionach Polski, jednak nasilenie jej występowania jest bardzo zróżnicowane. W związku z brakiem skutecznej metody chemicznej do zwalczania tej choroby, szczególnie znaczenie ma uprawa odmian o podwyższonej odporności na porażenie przez patogena.

Badania wpływu warunków środowiska na rozwój *P. brassicae* wskazują, że najistotniejsze są wartości temperatury, wilgotności oraz pH gleby (Rod 1996; Dixon 2009). W optymalnych warunkach już 1 zarodek w 10 g gleby wystarczy do zainfekowania rośliny (Rod 1996; Rennie i wsp. 2011). Działanie wymienionych czynników może być zmienne w związku ze zdolnościami adaptacyjnymi *P. brassicae* oraz niejednakowym stopniem odporności roślin.

Celem pracy było określenie wpływu temperatury, wilgotności oraz pH podłoża na porażenie przez *P. brassicae* roślin wrażliwych na infekcję oraz roślin o podwyższonej odporności.

## Materiały i metody / Materials and methods

Doświadczenia przeprowadzono w kabinach szklarniowych o ściśle kontrolowanych warunkach przy fotoperiodzie 14 godz. światła/10 godz. ciemności. Doniczko-palety wypełniono podłożem do uprawy roślin o 3 wartościach pH: 3,5–4,5; 5,0–5,5; 6,0–6,5. Do doniczek wysiewano 20 nasion (po 5 nasion do pojedynczej komory w doniczko-palecie) 2 gatunków roślin z rodziny kapustowatych:

- rzepak (*Brassica napus*), odmiany o podwyższonej odporności na porażenie przez patogena: Alister, Mendel oraz odmiany wrażliwe na porażenie przez patogena: Poznaniak, Pamela,
- gorczyca biała (*Sinapis alba*), odmiana: Bamberka, popularna roślina poplonowa.

Po pięciu dniach od wysiewu nasion przygotowywano zawiesinę zarodników przetrwalnikowych do inokulacji. Materiał przeznaczony do sporządzenia inokulum pochodził

z terenu województwa zachodniopomorskiego. W rejonie tym zaobserwowano przełamanie odporności uprawianych odmian, co jest wynikiem dużej zmienności genetycznej *P. brassicae* (Řičářová i wsp. 2016). Rozwinięte narośla korzeniowe dokładnie homogenizowano za pomocą blendera, następnie filtrowano przez kilkuwarstwową gazę oraz rozcieńczano w celu uzyskania pożądanego stężenia. Zagęszczenie zarodników w uzyskanym inokulacie obliczano za pomocą komory zliczeniowej według Neubauer-improved o głębokości 0,1 mm (Marienfeld-Superior) pod mikroskopem optycznym. Wykiełkowane rośliny inokulowano zawiesiną o stężeniu  $1 \times 10^7$  zarodników/ml (po 40 ml zawiesiny do każdej komory w doniczko-palecie). Doświadczenia przeprowadzono w dwóch seriach, każdorazowo po 4 powtórzenia.

Rośliny były podlewane co 4–5 dni w trzech objętościach wody na pojedynczą komorę w doniczko-palecie:

- 50 ml wody – wariant nadmiaru wody,
- 40 ml wody – wariant optymalny dla roślin w danej temperaturze,
- 30 ml wody – wariant niedoboru wody.

Powyższe warianty wody zostały wyznaczone na podstawie doświadczenia umożliwiającego wskazanie, która objętość wody przy danym rodzaju podłoża pozwala na uzyskanie nadmiaru wody w doniczce, na jej optymalną zawartość oraz niedobór.

Doświadczenia wykonano w temperaturach:

- 13°C przez całą dobę,
- 18°C w dzień/14°C w nocy,
- 20°C w dzień/16°C w nocy,
- 24°C w dzień/20°C w nocy.

Stopień porażenia roślin oceniano po 6 tygodniach w 4-stopniowej skali (Vigier i wsp. 1989), gdzie:

- 0 – oznacza roślinę o zdrowym systemie korzeniowym,
- 1 – niewielkie guzy na korzeniach bocznych (1 do 10%),
- 2 – objawy porażenia występują na 11 do 50% systemu korzeniowego,
- 3 – objawy porażenia występują na 51 do 100% systemu korzeniowego.

Z uzyskanych wyników obliczono procent porażonych roślin oraz indeks porażenia (ID) według wzoru (Strelkov i wsp. 2006):

$$ID = (0n_0 + 1n_1 + 2n_2 + 3n_3) \times 100/3N_t$$

gdzie:  $n_0$ – $n_3$  – liczba roślin porażonych w danym stopniu,  $N_t$  – całkowita liczba badanych roślin.

Normalność rozkładu obserwowanej cechy testowano z użyciem testu normalności Shapiro-Wilka (Shapiro i Wilk 1965). Czteroczynnikowa analiza wariancji (ANOVA) została przeprowadzona w celu weryfikacji hipotez zerowych o brak wpływu wilgotności, pH, odmiany i temperatury oraz weryfikacji hipotez o brak wpływu interakcji

podwójnych, potrójnych i poczwórnej na zmienność obserwowanej cechy.

## Wyniki i dyskusja / Results and discussion

Odmiany odporne na porażenie przez *P. brassicae* charakteryzuje zdolność hamowania rozwoju patogena wewnątrz rośliny, a zatem komórki korzenia zostają porażone, jednak nie obserwuje się powstania objawów choroby oraz nie dochodzi do wytworzenia zarodników przetrwalnikowych (Hwang i wsp. 2012). Badania prowadzone na odpornych oraz wrażliwych odmianach rzepaku wykazały, że plazmodia *P. brassicae* powstające w korzeniach odmian o podwyższonej odporności posiadają znacznie mniej jąder i ostatecznie nie dojrzewają (Hwang i wsp. 2011). Związane jest to z obecnością genu lub genów odporności warunkujących odpowiedź komórek rośliny (Crute i wsp. 1980; Voorrips 1996).

Odporność obecnie dostępnych na rynku odmian nie jest całkowita i zależy od wielu czynników. Potwierdzają to wyniki przeprowadzonych doświadczeń, w których we wszystkich badanych wariantach testu biologicznego obserwowano rośliny z objawami kiły kapusty. Liczba porażonych roślin oraz stopień ich porażenia zależał od

zastosowanej wilgotności, wartości pH, temperatury oraz gatunku/odmiany rośliny (tab. 1).

Wyniki przeprowadzonej analizy wariancji (ANOVA) wykazały istotny statystycznie wpływ wszystkich badanych czynników na wartości indeksu porażenia (tab. 2). Istotny statystycznie wpływ na wartości obserwowanej cechy miały wszystkie interakcje, oprócz: wilgotność × pH, pH × odmiana, wilgotność × pH × odmiana oraz wilgotność × pH × odmiana × temperatura (tab. 2).

Wykresy pudełkowe rozkładu wartości indeksu porażenia wykonane dla poszczególnych gatunków oraz odmian badanych roślin, obrazują różnice w wartościach ID, które potwierdziły wrażliwość badanych roślin rzepaku odmian Poznaniak i Pamela oraz gorczycy (odmiana Bamberka), jak również podwyższoną odporność rzepaku odmian Alister i Mendel (rys. 1).

Rośliny podatne na porażenie *P. brassicae*: gorczyca biała oraz rzepak odmiany Poznaniak oraz Pamela charakteryzowały się szerokim zakresem ID od 0 do 100%, jednak najczęściej indeks porażenia przekraczał wartość 40% w przypadku rzepaku odmiany Poznaniak, 55% dla rzepaku odmiany Pamela oraz 65% dla gorczycy białej. Najbardziej podatną na porażenie przez *P. brassicae* rośliną była gorczyca biała, w przypadku której ponad połowa uzyskanych wartości ID przekraczała 90%. Odmiany

Tabela 1. Średni indeks porażenia roślin (ID) oraz odchylenie standardowe w poszczególnych wariantach testu biologicznego  
Table 1. Average index of disease (ID) and standard deviation in individual variants of the biological test

| Wariant wilgotności<br>Humidity variant | pH podłoża<br>soil pH | Gatunek/odmiana<br>Species/variety | Zakres temperatur – Temperature range |   |         |   |         |   |         |   |
|---|-----------------------|------------------------------------|---------------------------------------|---|---------|---|---------|---|---------|---|
|   |                       |                                    | 13°C                                  |   | 14–18°C |   | 16–20°C |   | 20–24°C |   |
|   |                       |                                    | ID [%]                                | odchylenie standardowe standard deviation | ID [%]  | odchylenie standardowe standard deviation | ID [%]  | odchylenie standardowe standard deviation | ID [%]  | odchylenie standardowe standard deviation |
| 1                                       | 2                     | 3                                  | 4                                     | 4   | 6       | 7   | 8       | 9   | 10      | 11  |
| 30 ml                                   | 3,5–4,5               | Alister                            | 0,78                                  | 1,386                                     | 21,21   | 22,499                                    | 37,50   | 12,720                                    | 23,19   | 0,181                                     |
|   |                       | Mendel                             | 2,90                                  | 5,893                                     | 19,88   | 26,364                                    | 39,29   | 35,418                                    | 41,18   | 17,350                                    |
|   |                       | Poznaniak                          | 2,86                                  | 2,555                                     | 42,71   | 8,995                                     | 34,31   | 17,142                                    | 64,10   | 18,267                                    |
|   |                       | Pamela                             | 3,30                                  | 4,660                                     | 69,57   | 30,936                                    | 90,20   | 1,964                                     | 83,33   | 13,775                                    |
|   |                       | Gorczyca                           | 33,33                                 | 11,785                                    | 42,86   | 44,194                                    | 90,20   | 1,964                                     | 100,00  | 0   |
|   | 5,0–5,5               | Alister                            | 3,42                                  | 2,543                                     | 48,89   | 4,835                                     | 40,58   | 24,295                                    | 28,89   | 2,346                                     |
|   |                       | Mendel                             | 2,63                                  | 5,051                                     | 38,57   | 3,990                                     | 20,83   | 7,071                                     | 36,36   | 2,143                                     |
|   |                       | Poznaniak                          | 9,52                                  | 0,556                                     | 66,67   | 4,005                                     | 36,17   | 11,828                                    | 71,54   | 4,770                                     |
|   |                       | Pamela                             | 20,51                                 | 16,189                                    | 79,71   | 6,547                                     | 91,67   | 3,571                                     | 83,33   | 7,464                                     |
|   |                       | Gorczyca                           | 76,19                                 | 1,964                                     | 69,37   | 19,070                                    | 72,73   | 18,407                                    | 100,00  | 0   |
|   | 6,0–6,5               | Alister                            | 3,03                                  | 3,286                                     | 23,81   | 17,980                                    | 46,03   | 12,642                                    | 27,78   | 11,575                                    |
|   |                       | Mendel                             | 4,55                                  | 5,439                                     | 8,06    | 7,767                                     | 41,27   | 29,010                                    | 30,43   | 2,050                                     |
|   |                       | Poznaniak                          | 2,02                                  | 3,143                                     | 36,94   | 10,289                                    | 76,92   | 6,547                                     | 52,85   | 2,058                                     |
|   |                       | Pamela                             | 4,63                                  | 5,619                                     | 51,28   | 28,284                                    | 47,44   | 7,241                                     | 83,33   | 6,285                                     |
|   |                       | Gorczyca                           | 37,04                                 | 26,937                                    | 47,31   | 2,562                                     | 87,65   | 12,405                                    | 94,44   | 5,893                                     |

Tabela 1. Średni indeks porażenia roślin (ID) oraz odchylenie standardowe w poszczególnych wariantach testu biologicznego – cd.  
Table 1. Average index of disease (ID) and standard deviation in individual variants of the biological test – continued

| 1     | 2       | 3         | 4      | 4      | 6     | 7      | 8      | 9      | 10     | 11     |
|-------|---------|-----------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 40 ml | 3,5–4,5 | Alister   | 5,13   | 4,285  | 53,47 | 20,302 | 52,56  | 28,427 | 31,53  | 2,773  |
|       |         | Mendel    | 7,58   | 14,240 | 32,76 | 5,836  | 68,18  | 2,619  | 26,09  | 11,996 |
|       |         | Poznaniak | 4,94   | 7,857  | 82,91 | 11,785 | 65,87  | 1,071  | 81,90  | 15,559 |
|       |         | Pamela    | 22,92  | 10,607 | 60,87 | 10,733 | 100,00 | 0      | 65,00  | 7,857  |
|       |         | Gorzycza  | 44,44  | 47,140 | 95,83 | 10,102 | 91,67  | 5,143  | 100,00 | 0      |
|       | 5,0–5,5 | Alister   | 1,75   | 1,684  | 49,44 | 0,419  | 68,12  | 10,153 | 45,16  | 4,027  |
|       |         | Mendel    | 10,75  | 2,306  | 47,11 | 10,371 | 76,92  | 6,173  | 35,56  | 1,414  |
|       |         | Poznaniak | 33,33  | 3,286  | 88,48 | 3,468  | 80,95  | 3,536  | 82,31  | 9,114  |
|       |         | Pamela    | 75,00  | 13,499 | 87,42 | 9,933  | 97,78  | 2,143  | 85,00  | 0,238  |
|       |         | Gorzycza  | 91,67  | 7,857  | 89,90 | 9,821  | 98,77  | 1,309  | 96,97  | 2,619  |
|       | 6,0–6,5 | Alister   | 4,50   | 4,367  | 44,64 | 14,273 | 26,98  | 3,274  | 29,63  | 8,547  |
|       |         | Mendel    | 6,90   | 1,733  | 26,44 | 12,715 | 56,41  | 12,066 | 30,00  | 1,263  |
|       |         | Poznaniak | 31,75  | 17,892 | 74,47 | 28,192 | 52,63  | 2,481  | 77,42  | 1,486  |
|       |         | Pamela    | 63,49  | 19,258 | 61,36 | 45,766 | 86,67  | 14,142 | 91,03  | 0,842  |
|       |         | Gorzycza  | 79,17  | 19,642 | 60,49 | 23,016 | 90,80  | 5,213  | 96,67  | 3,928  |
| 50 ml | 3,5–4,5 | Alister   | 1,96   | 2,946  | 30,21 | 1,756  | 42,22  | 15,713 | 28,57  | 11,785 |
|       |         | Mendel    | 2,67   | 4,714  | 29,06 | 13,150 | 61,40  | 13,928 | 21,90  | 5,636  |
|       |         | Poznaniak | 7,41   | 3,256  | 93,10 | 10,102 | 69,77  | 8,374  | 79,49  | 17,142 |
|       |         | Pamela    | 12,72  | 10,002 | 94,44 | 2,619  | 100,00 | 0      | 82,46  | 1,684  |
|       |         | Gorzycza  | 33,33  | 23,570 | 44,93 | 30,641 | 93,33  | 8,418  | 100,00 | 0      |
|       | 5,0–5,5 | Alister   | 10,00  | 4,714  | 65,15 | 4,664  | 78,33  | 13,571 | 25,29  | 2,020  |
|       |         | Mendel    | 22,58  | 18,106 | 37,95 | 36,665 | 80,70  | 0,820  | 17,61  | 0,576  |
|       |         | Poznaniak | 56,76  | 16,196 | 89,33 | 9,428  | 75,21  | 8,949  | 80,18  | 2,842  |
|       |         | Pamela    | 86,46  | 10,630 | 88,89 | 1,894  | 96,67  | 4,285  | 93,10  | 7,071  |
|       |         | Gorzycza  | 100,00 | 0      | 86,11 | 9,560  | 98,81  | 1,241  | 100,00 | 0      |
|       | 6,0–6,5 | Alister   | 15,05  | 14,163 | 20,00 | 18,036 | 58,67  | 8,008  | 13,89  | 8,755  |
|       |         | Mendel    | 9,68   | 0,705  | 29,46 | 23,788 | 58,02  | 3,143  | 12,96  | 5,833  |
|       |         | Poznaniak | 56,25  | 20,624 | 72,22 | 8,929  | 65,04  | 11,561 | 78,43  | 14,895 |
|       |         | Pamela    | 82,29  | 5,893  | 53,54 | 12,305 | 100,00 | 0      | 81,61  | 5,752  |
|       |         | Gorzycza  | 93,33  | 5,893  | 57,78 | 3,158  | 92,06  | 11,785 | 100,00 | 0      |

rzepaku o podwyższonej odporności (Alister oraz Mendel) wykazały mniejszy zakres rozkładu ID, który w żadnym wariantcie testu biologicznego nie przekroczył wartości 80% (Mendel) oraz 90% (Alister). Większą odpornością charakteryzowały się rośliny rzepaku odmiany Mendel, w której indeks porażenia najczęściej nie przekraczał 40% (rys. 1).

Jednym z czynników wpływających na porażenie roślin przez *P. brassicae* jest pH. Środowisko zasadowe hamuje infekcje włośników, jak również opóźnia dojrzewanie plazmodiów oraz formowanie narośli na korzeniach (Palm 1958; Webster i Dixon 1991). Badania wykazują, że wysokie stężenie jonów wapnia w pH 6,2–7,2 istotnie zmniejsza liczbę infekcji i spowalnia rozwój patogena, natomiast wyższe stężenia całkowicie hamują dalsze etapy rozwoju *P. brassicae*, nawet mimo dużej zawartości zarodników w glebie (Karling 1942; Colhoun 1958; Dixon 2009).

Przeprowadzone doświadczenia nie wykazały znaczącego wpływu tego czynnika na rozwój choroby. Analiza rozkładu wartości ID ze względu na pH podłoża (rys. 2A) wykazała niewielkie różnice pomiędzy badanymi wariantami. W przypadku podłoża o pH w zakresach 3,5–4,5 oraz 6,0–6,5 rozkład wartości indeksu porażenia roślin był bardzo równomierny, natomiast przy pH 5,0–5,5 połowa uzyskanych wartości ID przekraczała 70%.

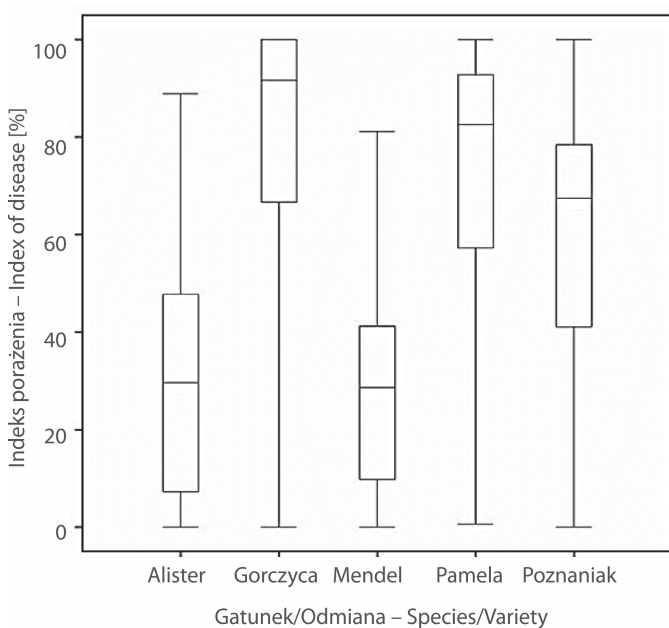
Temperatura otoczenia wpływa na proces porażania włośników przez zarodniki płytkowe oraz rozwój plazmodium w drugim tygodniu infekcji (Rod 1996). Według Wellman (1930) kiła kapusty najlepiej rozwija się w temperaturach 18–24°C, natomiast jej rozwój zostaje zahamowany poniżej 12°C oraz powyżej 27°C. Wykresy pudełkowe rozkładu wartości ID ze względu na zastosowaną temperaturę hodowli (rys. 2B) wskazują, że największy hamujący wpływ na porażenie roślin miała

Tabela 2. Wyniki analizy wariancji (ANOVA)

Table 2. Results of analysis of variance (ANOVA)

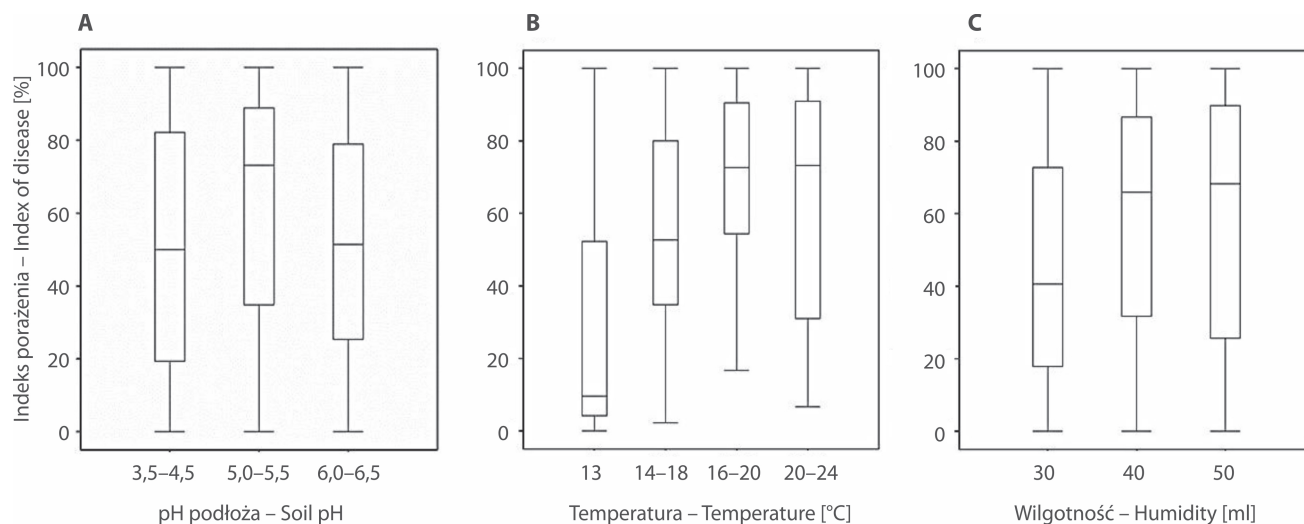
| Źródło zmienności<br>Source of variation  | d.f. | Suma kwadratów<br>Sum of squares | Średni kwadrat<br>Mean square | Statystyka F<br>F-statistic | p-wartość<br>p-value |
|---|------|----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| Wilgotność – Humidity   | 2    | 16478,2                          | 8239,1                        | 46,92                       | <0,001               |
| pH – Soil pH  | 2    | 11319,9                          | 5659,9                        | 32,23                       | <0,001               |
| Odmiana – Variety   | 4    | 154192,5                         | 38548,1                       | 219,50                      | <0,001               |
| Temperatura – Temperature   | 3    | 85440,3                          | 28480,1                       | 162,17                      | <0,001               |
| Wilgotność × pH<br>Humidity × soil pH   | 4    | 1359,2                           | 339,8                         | 1,93                        | 0,107                |
| Wilgotność × odmiana<br>Humidity × variety  | 8    | 4410,9                           | 551,4                         | 3,14                        | 0,002                |
| pH × odmiana<br>Soil pH × variety   | 8    | 2054,8                           | 256,8                         | 1,46                        | 0,174                |
| Wilgotność × temperatura<br>Humidity × temperature                                    | 6    | 6274,9                           | 1045,8                        | 5,96                        | <0,001               |
| pH × temperatura<br>Soil pH × temperature   | 6    | 12386,3                          | 2064,4                        | 11,75                       | <0,001               |
| Odmiana × temperatura<br>Variety × temperature  | 12   | 28662,3                          | 2388,5                        | 13,60                       | <0,001               |
| Wilgotność × pH × odmiana<br>Humidity × soil pH × variety                             | 16   | 2691,5                           | 168,2                         | 0,96                        | 0,505                |
| Wilgotność × pH × temperatura<br>Humidity × soil pH × temperature                     | 12   | 5723,0                           | 476,9                         | 2,72                        | 0,002                |
| Wilgotność × odmiana × temperatura<br>Humidity × variety × temperature                | 24   | 8807,1                           | 367,0                         | 2,09                        | 0,003                |
| pH × odmiana × temperatura<br>Soil pH × variety × temperature                         | 24   | 9230,0                           | 384,6                         | 2,19                        | 0,002                |
| Wilgotność × pH × odmiana × temperatura<br>Humidity × soil pH × variety × temperature | 48   | 9928,3                           | 206,8                         | 1,18                        | 0,222                |
| Błąd – Residual   | 180  | 31611,1                          | 175,6                         | –                           | –                    |
| Całość – Total  | 359  | 390570,0                         | –                             | –                           | –                    |

d.f. – liczba stopni swobody – number of degrees of freedom



Rys. 1. Rozkład wartości indeksu porażenia (ID) dla poszczególnych gatunków/odmian badanych roślin dla obu serii doświadczeń

Fig. 1. Distribution of index disease (ID) values for individual species/varieties of tested plants for both series of experiments



Rys. 2. Rozkład wartości indeksu porażenia (ID) dla poszczególnych wariantów: A – pH podłoża, B – temperatury, C – wilgotności podłoża dla obu serii doświadczeń

Fig. 2. Distribution of index disease (ID) values for individual variants: A – substrate pH, B – temperature, C – substrate moisture content for both series of experiments

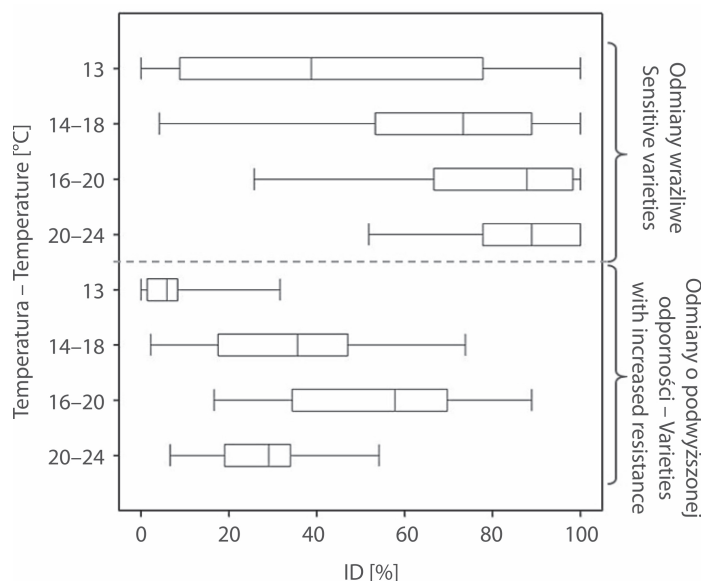
najniższa analizowana temperatura (13°C), w której połowa uzyskanych wartości ID nie przekroczyła 10%. W pozostałych zakresach temperatur uzyskane wartości ID były znacznie wyższe. Najbardziej stymulująco na patogena działały temperatury w przedziałach: 16–20°C oraz 20–24°C. W obu przypadkach połowa uzyskanych wartości indeksu porażenia przekraczała 70%. Potwierdzają to również badania Gossen i wsp. (2012), których wyniki wskazują, że w przypadku rzepaku optymalna temperatura zawiera się w przedziale 23–26°C, natomiast poniżej 17°C i powyżej 26°C efektywność infekcyjna *P. brassicae* jest zdecydowanie niższa.

Obecność wody w glebie jest niezbędna w procesie przemieszczania się zarodników pływkowych (Karling 1968), jednak zbyt wysoka wilgotność powoduje zahamowanie infekcji, ponieważ kiełkowanie zarodników *P. brassicae* wymaga warunków tlenowych (Rod 1996). W przeprowadzonych badaniach najniższe wartości indeksu porażenia obserwowano w wariacie niedoboru wody, w którym rośliny podlewane były objętością 30 ml (rys. 2C). Połowa uzyskanych wyników ID w tej wersji testu biologicznego nie przekroczyła wartości 40%. Wyniki uzyskane w wariantach optymalnego podlewania (40 ml) oraz nadmiaru wody (50 ml) były do siebie zbliżone.

Optymalna temperatura dla rozwoju *P. brassicae* uzależniona jest od regionu geograficznego, gatunku porażanej rośliny, czy panujących warunków środowiskowych (Dixon 2009). Potwierdzają to również przedstawione w niniejszej pracy wyniki. Porównanie wykresów pudełkowych rozkładu wartości ID odrębnie dla roślin wrażliwych oraz roślin o podwyższonej odporności ze względu na temperaturę wykazało znaczące różnice pomiędzy badanymi obiektami

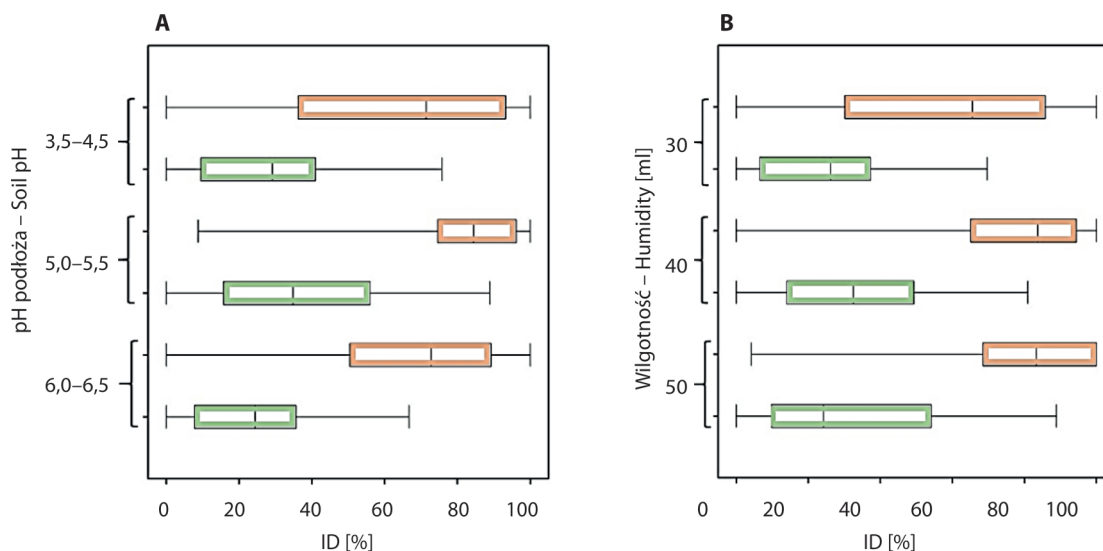
(rys. 3). Rośliny wrażliwe na porażenie przez *P. brassicae*: gorczyca biała oraz rzepak odmiany Poznaniak i Pamela charakteryzowały się wysokimi wartościami indeksu porażenia. Rozkład wartości ID tych roślin w najniższej temperaturze (13°C) miał szeroki zakres, obejmujący przedział od 0 do 100%. Zakres wartości indeksu porażenia zmniejszał się wraz ze wzrostem temperatury. W najwyższej badanej temperaturze (20–24°C) wszystkie uzyskane wartości ID przekraczały 50%, natomiast połowa z nich osiągnęła poziom powyżej 90%. W przypadku odmian rzepaku o podwyższonej odporności (Alister i Mendel) najniższe ID obserwowano w temperaturze 13°C. Jego wartości najczęściej nie przekraczały 10%. Zakres wartości indeksu porażenia wzrastał wraz ze wzrostem temperatury do 16–20°C, w której ponad połowa uzyskanych wyników przekroczyła wartość 55%. W temperaturze 20–24°C zaobserwowano mniejsze porażenie roślin. Połowa uzyskanych wartości ID w tym zakresie temperatury nie przekroczyła 30% (rys. 3).

Wykresy pudełkowe rozkładu wartości ID wykonane odrębnie dla roślin wrażliwych oraz roślin o podwyższonej odporności w różnych zakresach pH oraz wilgotności podłoża wykazały różnice pomiędzy badanymi obiektami (rys. 4). W każdym wariacie badanych czynników, rośliny wrażliwe wykazywały znacznie wyższe wartości indeksu porażenia, jednak reakcja na poszczególne czynniki w obu przypadkach była podobna. Największe wartości ID w zależności od pH podłoża obserwowano w zakresie 5,0–5,5. W przypadku roślin wrażliwych na porażenie przez *P. brassicae* ponad połowa uzyskanych wyników przekraczała 80%, podczas gdy wartość indeksu porażenia roślin o podwyższonej odporności najczęściej nie przekraczała 60% (rys. 4A).



Rys. 3. Rozkład wartości indeksu porażenia (ID) dla roślin wrażliwych oraz roślin o podwyższonej odporności w różnych wariantach temperatury dla obu serii doświadczeń

Fig. 3. Distribution of index disease (ID) values for sensitive plants and plants with increased resistance in various temperature variants for both series of experiments



Rys. 4. Rozkład wartości indeksu porażenia (ID) dla roślin wrażliwych (kolor pomarańczowy) oraz roślin o podwyższonej odporności (kolor zielony) w różnych wariantach pH podłoża (A) oraz wilgotności (B) dla obu serii doświadczeń

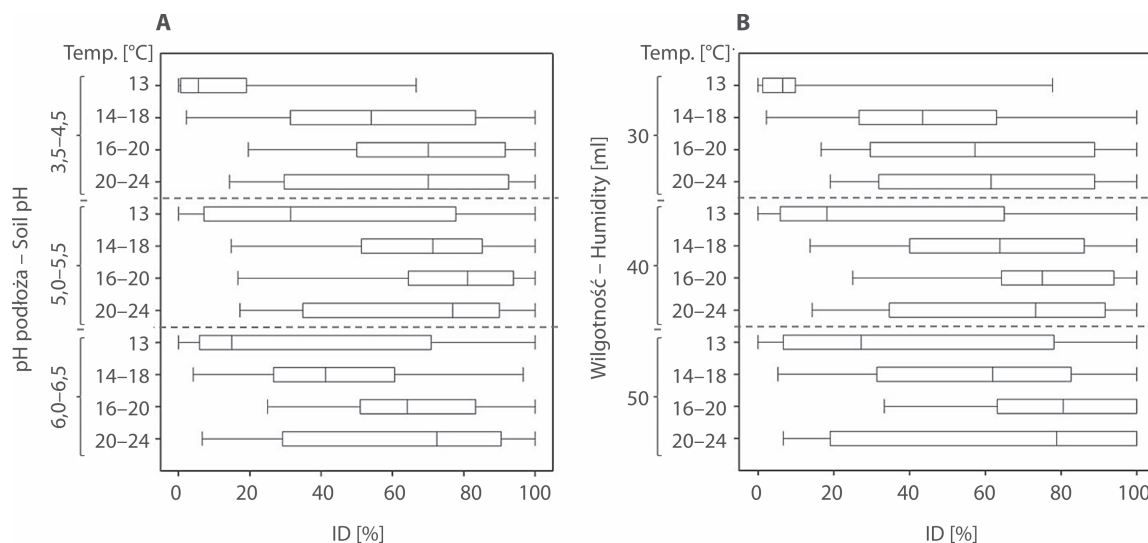
Fig. 4. Distribution of index disease (ID) values for sensitive plants (orange) and plants with increased resistance (green) in various variants of substrate pH (A) and humidity (B) for both series of experiments

Analiza wykresu pudełkowego uwzględniającego różne warianty wilgotności podłoża wskazuje, że najwyższe wartości indeksu porażenia roślin zarówno wrażliwych, jak i roślin o podwyższonej odporności wystąpiły w wariantach optymalnego oraz nadmiernego nawadniania roślin (40 i 50 ml) (rys. 4B).

Wykresy pudełkowe obrazujące rozkład wartości ID w zależności od pH podłoża oraz wilgotności w różnych zakresach temperatury wskazują, że porażenie roślin najsilniej ograniczała temperatura 13°C (rys. 5). Najniższe wartości indeksu porażenia obserwowano przy niskiej temperaturze (13°C) oraz niedoborze wody (30 ml). W tym wariantcie doświadczeń ID najczęściej nie przekraczał

wartości 10% (rys. 5B). Podobne wyniki otrzymano w kombinacji niskiej temperatury (13°C) oraz niskiego pH podłoża 3,5–4,5 (rys. 5A). Natomiast najbardziej stymulująco na porażenie roślin wpływała wysoka temperatura (16–20°C oraz 20–24°C) w połączeniu z nadmiarem wody (50 ml) (rys. 5B) oraz pH 5,0–5,5 (rys. 5A).

Pomimo braku całkowitej odporności odmian rzepaku, przeprowadzone doświadczenia wykazały istotne różnice pomiędzy reakcją na patogena odmian wrażliwych oraz odmian o podwyższonej odporności. Dlatego tak ważne są badania nad znalezieniem nowych źródeł odporności, które w przyszłości mogłyby umożliwić bardziej efektywną walkę z kiłą kapusty (Diederichsen i wsp. 2014).



Rys. 5. Rozkład wartości indeksu porażenia (ID) w zależności od pH podłoża (A) oraz wilgotności (B) w różnych zakresach temperatury dla obu serii doświadczeń

Fig. 5. Distribution of index disease (ID) values depending on substrate pH (A) and humidity (B) in different temperature ranges for both series of experiments

## Wnioski / Conclusions

1. Rozwój *P. brassicae* najbardziej ograniczało zastosowanie najniższej temperatury (13°C) oraz niskiej wilgotności podłoża.
2. Temperatura powyżej 16–20°C oraz wysoka wilgotność gleby najsilniej stymulowały rozwój patogena.
3. Optymalna dla rozwoju choroby na odmianach wrażliwych była temperatura 20–24°C, natomiast na odmianach o podwyższonej odporności 16–20°C.

## Literatura / References

- Colhoun J. 1958. Club root disease of crucifers caused by *Plasmodiophora brassicae* Woronin, a monograph. Phytopathological Paper No 3. Surrey, Commonwealth Mycological Institute, Kew, 108 ss.
- Crute I.R., Gray A.R., Crisp P., Buczacki S.T. 1980. Variation in *Plasmodiophora brassicae* and resistance to clubroot disease in *Brassicaceae* and allied crops - a critical review. *Plant Breeding Abstracts* 50 (2): 91–104.
- Diederichsen E., Frauen M., Ludwig-Müller J. 2014. Clubroot disease management challenges from a German perspective. *Canadian Journal of Plant Pathology* 36 (1): 85–98. DOI: 10.1080/07060661.2013.861871
- Dixon G.R. 2009. *Plasmodiophora brassicae* in its environment. *Journal of Plant Growth Regulation* 28 (3): 212–228. DOI: 10.1007/s00344-009-9098-3
- Gossen B.D., Adhikari K.K.C., McDonald M.R. 2012. Effects of temperature on infection and subsequent development of clubroot under controlled conditions. *Plant Pathology* 61 (3): 593–599. DOI: 10.1111/j.1365-3059.2011.02536.x  
<https://gd.eppo.int/taxon/PLADBR/distribution>
- Hwang S.F., Ahmed H.U., Zhou Q., Strelkov S.E., Gossen B.D., Peng G., Turnbull G.D. 2011. Influence of cultivar resistance and inoculum density on root hair infection of canola (*Brassica napus*) by *Plasmodiophora brassicae*. *Plant Pathology* 60 (5): 820–829. DOI: 10.1111/j.1365-3059.2011.02457.x
- Hwang S.F., Ahmed H.U., Zhou Q., Strelkov S.E., Gossen B.D., Peng G., Turnbull G.D. 2012. Assessment of the impact of resistant and susceptible canola on *Plasmodiophora brassicae* inoculum potential. *Plant Pathology* 61 (5): 945–952. DOI: 10.1111/j.1365-3059.2011.02582.x
- Karling J.S. 1942. *The Plasmodiophorales*. 1st ed. J.S. Karling, New York, 144 ss.
- Karling J.S. 1968. *The Plasmodiophorales*. 2nd ed. Hafner Publishing Co. Inc., New York, 256 ss.
- Konieczny W. 2012. Kiła opanowała 250 tys. hektarów. *Farmer* 5: 38–42.
- Korbas M., Jajor E. 2013. Kiła kapusty – narastający problem w uprawie rzepaku. Materiały informacyjne. Instytut Ochrony Roślin – Państwowy Instytut Badawczy, Poznań, Syngenta, Warszawa, 15 ss.
- Korbas M., Jajor E., Budka A. 2009. Clubroot (*Plasmodiophora brassicae*) – a threat for oilseed rape. *Journal of Plant Protection Research* 49 (4): 446–451. DOI: 10.2478/v10045-009-0071-8
- Palm E.T. 1958. Effect of mineral nutrition on invasiveness of *Plasmodiophora brassicae* Wor. and the development of clubroot. *Dissertation Abstracts* 19: 425–426.



- Rennie D.C., Manolii V.P., Cao T., Hwang S.F., Howard R.J., Strelkov S.E. 2011. Direct evidence of surface infestation of seeds and tubers by *Plasmodiophora brassicae* and quantification of spore load. *Plant Pathology* 60 (5): 811–819. DOI: 10.1111/j.1365-3059.2011.02449.x
- Řičářová V., Kaczmarek J., Strelkov S.E., Kazda J., Lueders W., Rysanek P., Manolii V., Jędryczka M. 2016. Pathotypes of *Plasmodiophora brassicae* causing damage to oilseed rape in the Czech Republic and Poland. *European Journal of Plant Pathology* 145 (3): 559–572. DOI: 10.1007/s10658-016-0939-1
- Rod J. 1996. Reports – Agent of clubroot of crucifer. Brno, UKZUZ, 37 (Special Issue): 1–45.
- Shapiro S.S., Wilk M.B. 1965. An analysis of variance test for normality. *Biometrika* 52 (3/4): 591–611. DOI: 10.2307/2333709
- Strelkov S.E., Tewari J.P., Smith-Degenhardt E. 2006. Characterization of *Plasmodiophora brassicae* populations from Alberta, Canada. *Canadian Journal of Plant Pathology* 28 (3): 467–474. DOI: 10.1080/07060660609507321
- Vigier B., Chiang M.S., Hume D.J. 1989. Source of resistance to clubroot (*Plasmodiophora brassicae* Wor.) in triazine-resistant spring canola (rapeseed). *Canadian Plant Disease Survey* 69 (2): 113–115.
- Voorrips R.E. 1996. Production, characterization and interaction of single-spore isolates of *Plasmodiophora brassicae*. *European Journal of Plant Pathology* 102 (4): 377–383. DOI: 10.1007/BF01878132
- Webster M.A., Dixon G.R. 1991. Calcium, pH and inoculum concentration influencing colonization by *Plasmodiophora brassicae*. *Mycological Research* 95 (1): 64–73. DOI: 10.1016/S0953-7562(09)81362-2
- Wellman F.L. 1930. Clubroot of crucifers. Technical Bulletin No. 181. United States Department of Agriculture, Washington, D. C., 31 ss.