

Wpływ olejków eterycznych na wybrane patogeny grzybowe pszenicy

Pszenica jest jednym z najważniejszych gatunków zbóż na świecie, a presja patogenów grzybowych stanowi stałe wyzwanie dla stabilności plonowania i jakości ziarna. Szczególne znaczenie gospodarcze mają choroby liści i kłosa, takie jak septorioza liści i plew wywoływana przez *Zymoseptoria tritici*, fuzarioza kłosów powodowana przez kompleks *Fusarium graminearum* i *F. culmorum*, brunatna plamistość liści związana z *Pyrenophora tritici-repentis*, mączniak prawdziwy zbóż i traw wywołany przez *Blumeria graminis* f. sp. *tritici*, rdze z rodzaju *Puccinia* oraz kompleks chorób korzeni i podstawy źdźbła obejmujący *Gaeumannomyces tritici* i *Rhizoctonia* spp. Wzrost częstości występowania ras o zmienionej wrażliwości na klasyczne fungicydy, presja regulacyjna ograniczająca pulę dostępnych substancji czynnych oraz oczekiwania rynku dotyczące obniżenia pozostałości chemikaliów stymulują poszukiwanie alternatywnych lub komplementarnych metod ochrony. Na tym tle rośnie zainteresowanie olejkami eterycznymi, bogatymi w biaktywną mieszaninę terpenów, fenylopropanoidów i innych lotnych metabolitów wtórnych, które wykazują szerokie spektrum działania przeciwgrzybowego i mogą wpisywać się w strategię zintegrowanej ochrony roślin.

Olejek eteryczny to mieszanina lipofilnych, lotnych związków pochodzenia roślinnego, najczęściej destylowanych z tkanek wydzielniczych liści, kwiatów, nasion lub kory. Do głównych komponentów o aktywności przeciwgrzybowej zalicza się monoterpenuoidy, takie jak tymol i karwakrol występujące w olejkach tymianku i oregano, eugenol obecny w olejku goździkowym, aldehyd cynamonowy charakterystyczny dla olejku cynamonowego, citral i geraniol spotykane w olejku cytrynowym i palmarozowym, a także 1,8-cyneol i terpinen-4-ol dominujące

w niektórych chemotypach drzew i krzewów. Skład jakościowy i ilościowy olejków zależy od chemotypu, warunków uprawy, fenologii i technologii pozyskiwania, co przekłada się na zmienność aktywności biologicznej. W kontekście patogenów pszenicy kluczowa jest zdolność tych związków do przenikania przez osłony komórkowe grzybów i zaburzania ich funkcji życiowych, a także potencjał działania w fazie pary, który umożliwia kontakt z inokulum na powierzchni roślin i w przestrzeniach międzykomórkowych.

Mechanizm działania olejków eterycznych na grzyby jest wielokierunkowy i w dużej mierze nieswoisty, co ogranicza ryzyko szybkiego rozwoju odporności. Pierwotnym celem są błony komórkowe i organelle, w których lipofilne składniki olejków wbudowują się w dwuwarstwę lipidową, obniżają jej uporządkowanie i zwiększają przepuszczalność. Następstwem jest utrata gradientów protonowych, wyciek jonów i metabolitów, zaburzenia w gospodarce redoks oraz rozspojenie procesów oddychania mitochondrialnego. Fenolowe składniki, takie jak tymol i eugenol, mogą dodatkowo denaturować białka błonowe i enzymy hydrolityczne, hamować aktywność dehydrogenaz i oksydaz, a przez generację stresu oksydacyjnego prowadzić do peroksydacji lipidów. Aldehydy aromatyczne, w tym cynamaldehyd, reagują z grupami aminowymi białek i kwasów nukleinowych, modulując ekspresję genów związanych z morfogenezą strzępek i syntezą ściany komórkowej. Wykazano również zaburzenia w syntezie chityny i β -glukanów, co zwiększa podatność komórek grzyba na lityczne enzymy gospodarza i działanie innych środków ochrony. Niejednokrotnie obserwuje się efekt synergii między różnymi komponentami jednego olejku, a także synergistyczne interakcje z fungicydami konwencjonalnymi, co pozwala obniżać dawki substancji chemicznych bez utraty skuteczności.

W odniesieniu do septoriozy liści pszenicy istotną barierą dla skuteczności fungicydów kontaktowych jest heterogeniczna architektura łanu i ukryty tryb życia patogenu w tkankach

liściowych. Olejki eteryczne wykazują aktywność wobec form zarodnikowych i kiełkujących strzępek na powierzchni liści, a ich frakcja lotna może oddziaływać w mikroprzestrzeniach blaszki liściowej. W warunkach *in vitro* obserwuje się hamowanie kiełkowania piknidiospor i wzrostu kolonii *Zymoseptoria tritici* przez komponenty fenolowe i aldehydowe w stężeniach rzędu dziesiątek do setek mg na liter pożywki, przy czym skuteczność zależy od pH, rodzaju pożywki oraz dodatków emulgujących. W doświadczeniach szklarniowych zastosowanie nanoemulsji na bazie olejku tymiankowego lub cynamonowego na powierzchnię liści we wczesnych fazach BBCH prowadziło do zmniejszenia liczby plam nekrotycznych i ograniczenia sporulacji, a łączone programy z niskimi dawkami triazoli lub inhibitorów SDHI umożliwiały utrzymanie presji choroby na poziomie porównywalnym z wariantami standardowymi, przy zmniejszeniu ładunku chemicznego. Mechanistycznie istotne jest szybsze tworzenie barier fizjologicznych rośliny po ekspozycji na niskie, niefitotoksyczne dawki olejków, co wiąże się z indukcją ekspresji genów odpowiedzi obronnej i akumulacją ligniny oraz fenoli wtórnych w tkankach liściowych.

W przypadku fuzariozy kłosów, poza zahamowaniem wzrostu grzybni i kiełkowania konidiów *Fusarium*, szczególną uwagę zwraca wpływ olejków eterycznych na biosyntezę mikotoksyn. Liczne prace wskazują, że fenylopropanoidy oraz niektóre monoterpenoidy mogą ograniczać akumulację deoksyniwalenolu i zearalenonu, co ma bezpośrednie znaczenie dla bezpieczeństwa pasz i żywności. Zjawisko to wynika zarówno z ogólnego zahamowania wzrostu patogena, jak i z ukierunkowanego oddziaływania na ekspresję klastrów genów toksynotwórczych i enzymów cytochromu P450. Jednocześnie należy podkreślić, że subletalne dawki niektórych składników olejków w niekorzystnych warunkach środowiskowych mogą indukować odpowiedź stresową grzyba i czasowo zwiększać toksynotwórczość, dlatego optymalizacja dawek, formulacji i terminów aplikacji jest kluczowa. Najkorzystniejsze wyniki uzyskuje się przy traktowaniu kłosów w oknie kwitnienia i tuż

po nim za pomocą formulacji o kontrolowanym uwalnianiu, które utrzymują efektywne stężenie par przez kilkadziesiąt godzin, ograniczając reinfekcje po opadach.

Mączniak prawdziwy, jako patogen powierzchniowy, jest wrażliwy na preparaty działające kontaktowo i parowo. Olejki bogate w tymol, karwakrol i eugenol skutecznie przerywają kiełkowanie konidiów i tworzenie appresoriów na powierzchni liścia. W badaniach szklarniowych aplikacje prewencyjne o niewielkich dawkach w technologii drobnokroplistej istotnie zmniejszały kolonizację blaszek liściowych, a rotacja z siarką lub związkami krzemu pozwalała ograniczyć liczbę zabiegów syntetycznych bez pogorszenia efektu fitosanitarnego. W praktyce polowej ograniczeniem pozostaje trwałość na promieniowanie UV i szybkie ułatnianie, dlatego kluczowe jest stosowanie nośników polimerowych, mikrokapsułkowania lub łączenie z filmotwórczymi adiuwantami poprawiającymi retencję na liściu i odporność na zmywanie.

W chorobach plamistości liści o etiologii nekrotroficznej, jak brunatna plamistość, olejki eteryczne oddziałują na wczesne etapy kolonizacji oraz na wytwarzanie toksyn gospodarza-specyficznych. Frakcje bogate w aldehydy aromatyczne i fenole wykazują zdolność obniżania aktywności proteaz i lipaz wydzielniczych patogena, a także zakłócają sygnalizację oksylipinową, co prowadzi do redukcji nekroz. Z praktycznego punktu widzenia najlepsze rezultaty osiąga się w programach prewencyjnych poprzedzających okresy wysokiego ryzyka infekcji, opartych na prognozie pogody i modelach choroby. W chorobach systemu korzeniowego i podstawy źdźbła zastosowania wymagają odmiennej drogi podania. Zaprawianie nasion formulacjami zawierającymi niewielkie dawki olejków, często w połączeniu z chitozanem lub krzemionką amorficzną, może ograniczać zgorzele siewek i poprawiać wigor wschodów, działając zarówno bezpośrednio na inokulum w strefie nasienia, jak i stymulując mechanizmy odporności nieswoistej rośliny. W uprawach o wysokiej presji *Rhizoctonia* czy *Gaeumannomyces*

techniki dogłębowe są utrudnione z uwagi na rozcieńczenie substancji czynnych, dlatego prace rozwojowe skupiają się na mikroenkapsulacji i nośnikach uwalniających substancję w ryzosferze w odpowiedzi na wilgotność i temperaturę.

Formulacja jest jednym z kluczowych zagadnień warunkujących przejście od aktywności *in vitro* do skuteczności polowej. Olejki, jako mieszaniny bardzo lotne i hydrofobowe, wymagają stabilizacji w postaci emulsji, nanoemulsji, liposomów, mikrokapsułek polimerowych lub inkluzji z cyklodekstrynami. Nanoemulsje o rozmiarze kropeł poniżej 200 nm zwiększają rozproszenie w wodzie, ułatwiają zwilżenie powierzchni liścia i przenikanie przez kutykulę, a także chronią aktywne komponenty przed degradacją fotochemiczną. Mikrokapsułkowanie w polimerach biodegradowalnych, takich jak alginiany, skrobia modyfikowana czy poli-mlekany, pozwala na stopniowe uwalnianie substancji czynnej w mikrośrodku infekcji i może redukować fitotoksyczność. W zaprawach nasiennych korzystne jest łączenie z biopolimerami poprawiającymi adhezję i utrzymanie równomiernej warstwy, co stabilizuje dawkę i ogranicza straty w trakcie manipulacji materiałem siewnym.

Bezpieczeństwo i kompatybilność z rośliną stanowią kolejny aspekt wdrożeniowy. Składniki fenolowe i aldehydowe w wyższych stężeniach mogą powodować uszkodzenia kutykuli, chlorozy lub spowolnienie fotosyntezy, szczególnie podczas upałów i wysokiej insolacji. Dlatego istotne jest precyzyjne dobranie dawek i terminów zabiegów, unikanie aplikacji w szczycie nasłonecznienia oraz testowanie fitotoksyczności dla konkretnych odmian pszenicy i warunków środowiskowych. Z punktu widzenia mikrobiomu liści i ryzosfery olejki wykazują działanie szerokospektralne, co może przejściowo redukować liczebność niektórych organizmów pożytecznych. Dobrą praktyką jest rotacja składników czynnych, stosowanie możliwie wąsko ukierunkowanych chemotypów oraz integrowanie z biopreparatami antagonistycznymi, które szybko kolonizują powierzchnię liści po zabiegu i przywracają równowagę biologiczną.

Kwestie regulacyjne i jakościowe obejmują standaryzację składu, oznaczanie markerów chemotypowych, kontrolę zanieczyszczeń oraz ocenę pozostałości. Choć większość komponentów olejków charakteryzuje się szybkim rozpadem i bardzo niskim ryzykiem akumulacji w ziarnie, wymagane są dowody bezpieczeństwa dla konsumentów i środowiska oraz ocena ryzyka dla zapylaczy i organizmów wodnych. Stabilność przechowalnicza formulacji, odporność na UV i temperaturę, a także kompatybilność z powszechnie stosowanymi adiuwantami i nawozami dolistnymi są elementami warunkującymi akceptację rolniczą. W praktyce wdrożeniowej obiecujące są programy, w których olejki eteryczne pełnią funkcję narzędzia „mostowego”: w okresach wysokiego ryzyka infekcji działają prewencyjnie i ograniczają presję inokulum, a w razie potrzeby uzupełniane są niskimi dawkami fungicydów o odmiennym mechanizmie działania, co poprawia zarządzanie odpornością patogenów.

Perspektywy badawcze koncentrują się na kilku obszarach. Pierwszym jest odkrywanie i selekcja chemotypów o zoptymalizowanym profilu aktywności przeciwko konkretnym patogenom pszenicy, z uwzględnieniem stabilności w polu i niskiej fitotoksyczności. Drugim jest inżynieria formulacji na poziomie nano i mikro, umożliwiająca kontrolowane uwalnianie, adhezję i ochronę przed degradacją środowiskową. Trzecim obszarem są badania nad sygnalizacją odporności rośliny i wykorzystaniem subletalnych dawek olejków jako induktorów odporności systemicznej, co może dawać efekt ochronny utrzymujący się dłużej niż sama obecność substancji czynnej. Czwartym kierunkiem jest modelowanie farmakokinetyki na powierzchni liścia i w strefie kłosa, wraz z walidacją w warunkach polowych, które uwzględniają dynamikę wilgotności, temperatury i nasłonecznienia. Ostatecznie, istotne jest opracowanie standardów jakości i metodyk oceny skuteczności, które pozwolą na porównywanie wyników między laboratoriami i warunkami klimatycznymi.

Podsumowując, olejki eteryczne stanowią obiecujący element

strategii ograniczania chorób grzybowych pszenicy dzięki szerokospektralnej aktywności, wielomiejscowym mechanizmom działania i możliwości integrowania z innymi narzędziami ochrony. Najbardziej perspektywiczne zastosowania obejmują prewencyjne zabiegi dolistne w formie stabilizowanych nanoemulsji przeciwko patogenom powierzchniowym i nekrotroficznym, zaprawianie nasion w celu ochrony siewek przed zgorzelami oraz zabiegi na kłosa w okresie kwitnienia w programach ograniczania fuzariozy i ryzyka mikotoksyn. Warunkiem skutecznej implementacji jest ścisła kontrola składu i jakości formulacji, optymalizacja dawek i terminów, zarządzanie fitotoksycznością oraz standaryzacja metod oceny. Integracja wiedzy z zakresu chemii naturalnych produktów, fitopatologii, technologii formulacyjnych i agrometeorologii pozwoli przekuć wysoką aktywność obserwowaną w laboratorium na powtarzalne efekty w warunkach polowych, wspierając zrównoważoną produkcję pszenicy w obliczu rosnących wyzwań fitosanitarnych i regulacyjnych.

Dla osób szukających pomocy w pisaniu prac z różnych dziedzin polecamy serwis [pisanie prac](#) z prawa, administracji, zarządzania, marketingu, pedagogiki i wielu innych dziedzin.