

Aktualne trendy w hodowli pomidora pod osłonami i w uprawie polowej na świecie

Marzena Nowakowska, Katarzyna Nowak

Instytut Ogrodnictwa - PIB w Skierniewicach

Pomidor (*Solanum lycopersicum*) należy do najważniejszych gatunków warzywnych z roczną produkcją globalną sięgającą ok. 192 mln ton [1]. Uprawa pomidora na świecie opiera się na dwóch komplementarnych systemach: intensywnej uprawie pod osłonami, zapewniającej wysoką jakość i ciągłość dostaw, oraz uprawie polowej, kluczowej dla przetwórstwa i sezonowego rynku świeżego. W obu systemach kierunki hodowli kształtują złożone czynniki: pojawianie się nowych zagrożeń fitosanitarnych (np. wirusów w uprawach pod osłonami), zmiany klimatu i ograniczenia zasobów (np. stres suszy, stres cieplny, zmienność warunków pogodowych), rosnące koszty energii i wody, rosnące oczekiwania konsumentów co do jakości sensorycznej owoców, a także konieczność dostosowania odmian do lokalnych technologii uprawy oraz metod zbioru. W efekcie nowoczesne programy hodowlane nie koncentrują się już wyłącznie na selekcji pojedynczych cech, jak odporność czy plenność, lecz na kreowaniu odmian o kompleksowym profilu użytkowym. Takie odmiany łączą trwałą odporność na kluczowe patogeny ze stabilnością plonowania w zmiennych warunkach środowiska, wysokimi walorami smakowo-zapachowymi i odpowiednią teksturą owoców, wydłużoną trwałością pozbiorczą, a także dopasowaniem do konkretnych technologii uprawy (uprawa bezglebowa, substraty organiczne, uprawa bez doświetlania, itp.) i specyfiki regionalnej (np. długości sezonu wegetacyjnego, dostępności światła czy rodzaju gleby). Strategie badawczo-rozwojowe międzynarodowych firm hodowlanych, które dysponują rozbudowanymi programami *pre-breeding*, możliwościami prowadzenia doświadczeń w różnych środowiskach oraz zapleczem do szybkiego wdrażania nowych cech na rynek koncentrują się dziś zatem na podobnej architekturze celów: odporność na kluczowe patogeny traktowana jest jako warunek podstawowy, natomiast przewaga konkurencyjna budowana jest poprzez integrację odporności z jakością, stabilnością plonowania oraz dopasowaniem do konkretnej technologii uprawy i regionu produkcji.

Priorytetem programów hodowlanych jest rozwijanie hodowli odpornościowej na ważne gospodarczo patogeny z uwzględnieniem specyfiki regionalnej. Dobitym przykładem jest walka z wirusem brunatnej wyboistości owoców pomidora (ToBRFV). Wirus ten cechuje się wyjątkową stabilnością i łatwością transmisji mechanicznej oraz zdolnością do infekowania odmian, wcześniej uważanych za odporne, dzięki obecności genu *Tm-2²*. Od czasu jego wykrycia w 2014 r. wirus szybko rozprzestrzenił się na świecie, powodując poważne straty ekonomiczne, szczególnie w intensywnych uprawach szklarniowych [2]. W odpowiedzi na to zagrożenie wiodące firmy nasienne (m.in. Enza Zaden, Syngenta, Bayer - Seminis/De Ruiters, BASF - Nunhems, Rijk Zwaan) wprowadziły na rynek nowe odmiany pomidora odporne na ToBRFV. Pierwszą odmianą odporną na ToBRFV wprowadziła już w 2021 r. firma Syngenta [3]. W kolejnych latach pojawiły się

następne materiały: Enza Zaden do 2023 r. opracowała serię odmian o wysokiej odporności HR na tego wirusa (HREZ, High Resistance by Enza Zaden), dostępnych we wszystkich segmentach odmian (typy malinowy, śliwkowy, koktajlowy itp.) [4]. Z kolei Rijk Zwaan z końcem 2022 r. wprowadził na rynek pierwsze odmiany z odpornością na ToBRFV pod marką Rugose Defense™, kontynuując ich rozwój w kolejnych sezonach [5]. Pomimo sukcesów pierwszych odmian odpornych, już wkrótce pojawiły się doniesienia o nowych wariantach ToBRFV, zdolnych do przełamywania odporności pojedynczego genu. W odpowiedzi hodowcy rozpoczęli piramidowanie genów odporności w obrębie jednej odmiany. Przykładem jest inicjatywa Vegetables by Bayer: testy nowych odmian pomidora, zawierających wielogenową odporność, wykazały, że rośliny pozostawały zdrowe nawet po inokulacji szczepem ToBRFV z mutacją przełamującą pojedynczą odporność [6,7]. Ten kierunek hodowli, tj. łączenie wielu alleli odporności dla uzyskania trwalszej odporności, staje się obecnie standardem. Choć ToBRFV w ostatnich latach stał się czynnikiem reorganizującym programy hodowlane i strategię wdrożeniową firm nasienne, równie istotne pozostają inne wirusy, często współwystępujące w uprawach i decydujące o opłacalności produkcji. Do patogenów wirusowych o trwałym znaczeniu należą przede wszystkim: wirus mozaiki pepino (PepMV), powodujący m.in. marmurkowatość i zaburzenia dojrzewania owoców, wirusy kompleksu TYLCD (w tym wirus żółtej kędzierzawości liści pomidora (TYLCV)), powiązane z presją mączlików, a także wirus brunatnej plamistości pomidora (TSWV) oraz inne tospowirusy przenoszone przez wciornastki. Problemem jest ograniczona trwałość znanych genów odporności na te wirusy, stąd hodowcy utrzymują je w puli uwagi, ciągle doskonaląc źródła odporności. Przykładowo, źródła odporności na TYLCV (geny z serii *Ty*) wprowadzane do odmian muszą być ciągle uaktualniane i łączone, zwłaszcza w obliczu migracji wektora (*Bemisia tabaci*) wraz z ociepleniem klimatu. Firmy nasienne sukcesywnie wprowadzają odporności *Ty* do odmian przeznaczonych na rynek europejski i północnoamerykański, aby zabezpieczyć je przed tym zagrożeniem. Potwierdzeniem trendu jest fakt, że wirusy TYLCD plasują się obecnie w ścisłej czołówce najbardziej szkodliwych wirusów roślin uprawnych (obok ToMV, TSWV, PepMV, ToBRV) [8], a hodowla odporności na nie postępuje dzięki introgresji alleli z dzikich *Solanum* i łączeniu ich w odmianach.

W uprawie pomidora duże znaczenie ma odporność na patogeny grzybowe i bakteryjne. Dzięki dostępności trwałych genów odporności większość odmian pomidora wykazuje odporność na m.in. *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici* (*Fol*) oraz *Verticillium* spp.. Na przykład geny *I-1* i *I-2* zapewniają odporność odpowiednio na rasę 1 i 2 *Fol*, a gen *Ve* chroni przed wertycyliozą wywoływaną przez *V. dahliae* (rasę 1). Problemem jest jednak pojawianie się nowych ras (np. *Fol* rasa 3, *Verticillium* rasa 2), przeciw którym brakuje jeszcze powszechnie dostępnych genów odporności. Trwają zatem intensywne poszukiwania nowych źródeł odporności w dzikich gatunkach *Solanum* i ich introgresja do puli genowej pomidora uprawnego. Prowadzone są rozbudowane programy *pre-breeding* z udziałem ośrodków naukowych, m.in. INRA (Francja), Uniwersytetu Wageningen

(Holandia) czy Cornell University (USA). Wykorzystywane są szerokie zasoby dzikich gatunków (np. *S. habrochaites*, *S. chilense*, *S. peruvianum*, *S. pennellii*) w celu znalezienia nowych alleli odporności i jednoczesnego usunięcia niekorzystnych cech sprzężonych przed wprowadzeniem do odmian uprawnych. Przykładowo, w USA w ramach projektu wielostanowego NE-9, Cornell University prowadzi testy przesiewowe na zasobach spokrewnionych z pomidorem uprawnym dzikich gatunków z rodzaju *Solanum* pod kątem odporności na rasę 3 *Fol*, ponieważ obecnie dostępny gen *I-3* (pochodzący z *S. pennellii*) powoduje pewne negatywne efekty uboczne. Gen *I-3* jest np. powiązany z cechami niepożądanymi: rośliny homozygotyczne *I-3/I-3* mają mniejsze owoce (średnio o ok. 21% mniejsze niż linie *i-3/i-3*) i wykazują silniejszą podatność na bakteryjną plamistość [9]. Dopiero niedawno udało się wyselekcjonować linie z odcinkiem chromosomu zawierającym gen *I-3* skróconym do 140 kb, pozbawionym tych negatywnych sprzężeń [9]. Niemniej jednak postęp w hodowli odpornościowej na patogeny z rodzaju *Fusarium* czy *Verticillium* wymaga ciągłego monitoringu pojawiania się nowych ras patogenów i do dostosowywania programów hodowlanych do rosnącej zmienności genetycznej patogenów oraz ich zdolności do przełamывania istniejących źródeł odporności.

W wielu regionach świata niezmiennie groźna pozostaje także zaraza ziemniaka (*Phytophthora infestans*) w uprawie polowej pomidora [10]. Ze względu na dużą zmienność populacji tego patogenu oraz silne uzależnienie nasilenia choroby od warunków pogodowych, hodowla odpornościowa ma charakter długofalowy. Praktyka hodowlana zmierza do łączenia znanych genów odporności *Ph-1*, *Ph-2*, *Ph-3* (często będących introgresjami z dzikich gatunków, np. *S. pimpinellifolium*) z poligeniczną komponentą ilościową oraz do weryfikacji skuteczności tak powstałych kombinacji w różnych regionach i latach. Podobne podejście stosuje się wobec alternariozy (*Alternaria* spp.) [10]. Odporność na tę chorobę ma podłoże wielogenowe, dlatego postęp hodowlany opiera się na mapowaniu QTL (quantitative trait loci) oraz analizach GWAS w celu identyfikacji markerów ułatwiających selekcję odporności. Takie markery pozwalają skrócić cykl hodowlany cechy, która ma złożoną determinację genetyczną i silnie zależy od środowiska. Na poziomie badań naukowych widoczny jest zwrot ku integrowaniu klasycznych danych fenotypowych z analizami transkryptomicznymi i funkcjonalnymi, celem jest zwiększenie trafności selekcji i ograniczenie związanego z introgresją genów z dzikich form efektu niepożądanych cech. W przypadku ważnych chorób bakteryjnych (np. bakteryjna cętkowatość pomidora (*Pseudomonas syringae* pv. *tomato*), bakteryjna plamistość pomidora (*Xanthomonas* ssp.), rak bakteryjny pomidora (*Clavibacter michiganensis* ssp. *michiganensis*), prace hodowlane również trwają, lecz postępy są stosunkowo powolne. Wiele firm i ośrodków naukowych prowadzi prace hodowlane w kierunku odporności na te choroby, ale postęp jest stosunkowo ograniczony ze względu na złożone uwarunkowania genetyczne odporności oraz zmienną presję infekcyjną między sezonami, silnie uzależnioną od przebiegu pogody i lokalnych warunków agroekologicznych [10,11,12].

Podsumowując hodowlę odpornościową, strategie wiodących firm nasiennych opierają się obecnie na trzech głównych filarach. Pierwszym jest systematyczne poszukiwanie nowych źródeł odporności w zasobach gatunków dzikich rodzaju *Solanum* oraz prace typu *pre-breeding*, pozwalające wprowadzać do puli hodowlanej allele wcześniej niedostępne. Drugim filarem jest selekcja wspomagana markerami i ukierunkowane piramidowanie alleli, prowadzące do budowania trwalszych kombinacji genów, a nie jedynie do wprowadzania pojedynczego źródła odporności. Trzecim filarem stała się ocena trwałości odporności w czasie i przestrzeni, obejmująca testy materiałów hodowlanych z wykorzystaniem różnych izolatów/szczepów/ras patogena oraz w warunkach wysokiej presji patogena, co w praktyce ma ograniczać ryzyko przełamania odporności i utraty skuteczności odmiany w danym środowisku. Warto zaznaczyć, że innowacje hodowlane w firmach często są wynikiem współpracy z ośrodkami naukowymi. W ostatnich kilku latach opublikowano wiele badań mapujących QTL dla nowych źródeł odporności oraz opracowujących markery ułatwiające selekcję odpornych roślin. Przykładowo zidentyfikowano 14 QTL związanych z odpornością na ToBRFV w wyniku analiz GWAS na kolekcji 161 genotypów pomidora [13]. Tego typu odkrycia naukowe są szybko implementowane przez działy R&D firm nasiennych, skracając cykl hodowli nowych odpornych odmian.

Oprócz patogenów chorobotwórczych, programy hodowlane realizowane przez firmy nasienne czy też jednostki naukowe koncentrują się również na ograniczeniu strat powodowanych przez szkodniki, zarówno te bezpośrednio uszkadzające rośliny, jak i będące wektorami groźnych wirusów. Kluczową rolę w uprawach pomidora odgrywają: mączlik szklarniowy, wciornastki, mszyce, a także miniarki i przędziorki. Problemem staje się rosnąca odporność tych organizmów na środki ochrony roślin oraz ograniczenia legislacyjne w stosowaniu pestycydów. Nowym kierunkiem badań są odmiany o podwyższonej odporności mechanicznej i chemicznej na żerowanie owadów. Szczególnie obiecujące są genotypy z podwyższoną zawartością acylocukrów, które negatywnie wpływają na ograniczenie aktywności żerującej owadów. Badania zespołu z Cornell University wykazały, że dzikie gatunki *Solanum* (np. *Solanum pennellii*), posiadają wysoką naturalną tolerancję na szkodniki dzięki biosyntezie acylocukrów i lotnych estrów odstraszaających szkodniki [14]. W testach laboratoryjnych i polowych stwierdzono, że rośliny z introgresją genu cechującego wysoki poziom acylocukrów były istotnie mniej zasiedlane przez wciornastki i mączliki. W konsekwencji liczba infekcji TSWV i TYLCV na tych roślinach była znacząco mniejsza, a jeśli objawy chorób się pojawiały, to dopiero późno w sezonie. Co istotne, udało się połączyć cechę wysokiej zawartości acylocukrów z dobrym smakiem i wielkością owoców. Linie te zostały przekazane do publicznych banków genów (TGRC, Tomato Genetics Resource Center, UC Davis) i udostępnione firmom nasiennym. Część firm nasiennych (m.in. Bayer i Sakata) rozpoczęło wdrażanie tych cech do materiałów hodowlanych przeznaczonych dla segmentu ekologicznego i do uprawy zrównoważonej.

Jednym z kluczowych priorytetów współczesnej hodowli pomidora pozostaje poprawa cech jakościowych owocu, zwłaszcza smaku, aromatu, tekstury i trwałości pozbiórcej owoców. Coraz bardziej świadomy konsument staje się głównym moderatorem trendów rynkowych, oczekując odmian o wysokiej wartości sensorycznej, zróżnicowanych kształtach i barwach, przy jednoczesnym zachowaniu odporności na patogeny oraz zdolności do przetrwania w długim łańcuchu logistycznym. Smak pomidora to efekt złożonej interakcji cukrów, kwasów organicznych i lotnych związków aromatycznych. Intensywna hodowla ukierunkowana na plon i trwałość przez lata powodowała utratę niektórych nut smakowych, obecnych wcześniej w odmianach. Przykładowo, dążenie do jednorodnego czerwonego koloru owoców spowodowało eliminację genu *TomLoxC* w wielu genotypach, odpowiedzialnego za syntezę aromatycznych lotnych związków lipidowych [15]. W odpowiedzi na to zjawisko, współczesna hodowla dąży do przywrócenia utraconych alleli poprawiających smak. Dzięki postępowi w genomice (np. opracowaniu pangenomu pomidora) zidentyfikowano allele warunkujące syntezę pożądaných substancji aromatycznych, które są obecnie integrowane do nowych linii hodowlanych. Selekcja obejmuje zarówno parametry instrumentalne (Brix, kwasowość), jak i rozbudowane testy sensoryczne. Wiodące firmy nasienne, takie jak Rijk Zwaan, Enza Zaden, Hazera, Syngenta, Sakata, Tozer Seeds czy KWS, inwestują w rozwój odmian łączących odporność z wysoką jakością organoleptyczną. Szczególną dynamiką wyróżnia się segment pomidorów drobnoowocowych typu cherry i koktajlowego, o wysokim poziomie cukrów ($Brix \geq 8$), intensywnym aromacie i atrakcyjnym wyglądem. Przykładem są najnowsze mieszańce F₁ Rijk Zwaan z programu Taste & Visual™ (sezon 2024-2025), takie jak Sandroso F₁ (koktajlowy na grona), Necluda F₁ (mini-cherry na grona) czy Anizalla F₁ (mini-śliwka na grona), które łączą odporność (np. na ToBRFV) z wyjątkowym smakiem, chrupkością i trwałością pozbiórczą [16]. Równolegle firmy nasienne reagują na rosnącą potrzebę produkcji lokalnej i ograniczania śladu węglowego. Trend „kupuj lokalnie” sprzyja rozwojowi odmian dostosowanych do warunków klimatycznych danego odbiorcy, np. odmiany dostosowanych do klimatu północnej Europy oferują jakość porównywalną do pomidorów uprawianych na południu kontynentu. Firmy takie jak Hazera koncentrują się na selekcji odmian szklarniowych zachowujących wysoki stopień Brix i bogaty aromat nawet przy ograniczonym nasłonecznieniu [17]. Dynamicznie rośnie też segment „snack tomatoes” (przekąskowych pomidorków drobnych), co niesie wyzwania logistyczne: ręczny zbiór drobnych owoców bywa kosztowny i czasochłonny. W odpowiedzi hodowcy tworzą odmiany o długich gronach ułatwiających jednorazowy zbiór grona oraz zmniejszonej skłonności do opadania owoców. Selekcja ukierunkowana jest na wysoką plenność, łatwość pakowania i powtarzalność parametrów sensorycznych. Asortyment pomidora na rynku dynamicznie się różnicuje, rośnie znaczenie odmian malinowych (szczególnie cenionych w Europie Środkowo-Wschodniej), a także odmian o niestandardowych barwach i kształtach: żółtych, pomarańczowych, czarnych (z

antocyjanami), prążkowanych (typu Tiger) itp.. Hodowla ukierunkowuje się również na precyzyjne nisze rynkowe: odmiany do upraw hydroponicznych i wertykalnych (indoor farming), do zbioru ręcznego całych gron, a także do mechanicznego zbioru w przetwórstwie. W każdej z tych nisz dąży się do połączenia cech użytkowych z odpornością na stresy biotyczne i abiotyczne oraz wymaganiami konsumentów w zakresie smaku. Ostatecznym celem współczesnej hodowli jakościowej jest stworzenie odmian łączących wysoki poziom parametrów sensorycznych, odporność na czynniki chorobotwórcze, trwałość pozbiorczą oraz dopasowanie do lokalnych warunków i technologii uprawy, tak aby odpowiedzieć na kompleksowe potrzeby zarówno rynku, jak i producentów.

Postępujące zmiany klimatyczne oraz rosnące koszty produkcji wymuszają nowy kierunek w hodowli pomidora, oparty na zwiększonej tolerancji stresów abiotycznych. Szczególne znaczenie mają cechy takie jak tolerancja na wysoką temperaturę, zdolność do efektywnego zawiązywania owoców w stresie termicznym, a także odporność na zaburzenia fizjologiczne wywołane stresem (np. sucha zgnilizna wierzchołkowa, mikro-pęknięcia skórki). W Holandii oraz innych krajach rozwijających model szklarni “low energy” (o ograniczonym zużyciu energii cieplnej) kluczowe staje się dopasowanie odmian do nowych strategii sterowania klimatem. Obejmuje to uprawę przy niższych nocnych temperaturach (15-16°C) i ograniczonym doświetlaniu, przy jednoczesnym utrzymaniu wysokiej jakości owoców [18]. Firmy takie jak BASF/Nunhems, Enza Zaden czy Rijk Zwaan rozwijają tzw. odmiany „cool-set”, odznaczające się stabilnym zawiązywaniem owoców i prawidłowym rozwojem przy relatywnie niskim natężeniu promieniowania fotosyntetycznie czynnego (PAR) i chłodniejszym klimacie szklarni. Z drugiej strony coraz większym wyzwaniem stają się susza i ekstremalne upały. Pomidor jest wrażliwy na temperatury powyżej 30°C, zwłaszcza w fazie zapylenia (wysoka temperatura może hamować kielkowanie i wzrost łagiewki pyłkowej), prowadząc do opadania kwiatów. Badacze z Brown University opisali mechanizmy molekularne warunkujące wzrost łagiewki pyłkowej w wysokiej temperaturze, kluczowe dla skutecznego zawiązywania owoców [19]. To ważny przełom: wskazano potencjalne markery molekularne termotolerancji oraz ścieżki metaboliczne, które można modulować. Choć to na razie koncepcja, samo poznanie mechanizmów umożliwi hodowcom wprowadzenie tych korzystnych wariantów genów do nowych odmian. Równolegle USDA i Texas A&M realizują projekt, mający na celu wyhodowanie odmian łączących tolerancję cieplną (HT), efektywność wykorzystania wody (WUE), odporność na patogeny oraz jakość sensoryczną [20]. Na uwagę zasługują również programy hodowli podkładek (rootstock breeding), rozwijane m.in. przez firmy De Ruiter, czy Takii Seed, które oferują silne systemy korzeniowe odporne na zasolenie i suszę. Podkładowki umożliwiają poprawę poboru wody i składników odżywczych, zwiększając adaptację roślin do trudnych warunków glebowych. W odpowiedzi na ekstremalne zjawiska pogodowe, m.in. przymrozki późnowiosenne, ulewne opady i chłodne lata, hodowcy prowadzą także selekcję odmian tolerujących niższe

temperatury. Postęp w tym kierunku opiera się m.in. na wykorzystaniu dzikich gatunków spokrewnionych z pomidorem uprawnym jako źródeł genów tolerancji na chłód (np. *S. habrochaites* i *S. chilense*) oraz na identyfikacji loci/markerów związanych z cechami fizjologicznymi w tym parametrów fotosyntezy, które stanowią ważny komponent odporności na stres [21-23]. Nowoczesna hodowla pomidora wchodzi w fazę „climate-smart breeding” – selekcji odmian zintegrowanej pod kątem odporności na zmienne i ekstremalne warunki środowiskowe, bez utraty jakości i plonu [24,25].

Odmiany pomidora przeznaczone do przetwórstwa stanowią osobną kategorię hodowlaną. Zazwyczaj są to odmiany o pokroju kompaktowym i samokończącym, co umożliwia jednorazowy zbiór mechaniczny kombajnem. Wymagania rynku przetwórczego determinują kreowanie odmian pod kątem wysokiego plonu, wysokiej zawartości suchej masy i cukrów ($Brix \geq 5,5$), jednolitego dojrzewania, wytrzymałości mechanicznej oraz przydatności do intensywnej obróbki termicznej. Ważną cechą jest również brak kolanka w szypułce (tzw. szypułka bezkolankowa; gen *j-2*) co pozwala na odrywanie owoców bez ogonka ułatwiając w ten sposób zbiór, oraz ogranicza uszkodzenia zebranych owoców. Postęp hodowlany w tym segmencie dotyczy również składu chemicznego owoców: nowe odmiany mają coraz więcej likopenu oraz beta-karotenu, poprawiany jest także profil kwasów organicznych. W hodowli realizowanej w ośrodkach publicznych i prywatnych prowadzi się innowacyjne projekty tzw. biofortyfikacji pomidora, czyli tworzenia odmian o podwyższonej zawartości związków prozdrowotnych. W 2023 r. w USA dopuszczono do sprzedaży amatorskiej pierwszą genetycznie zmodyfikowaną odmianę pomidora o wysokiej zawartości antocyjanów („purple tomato” o fioletowej skórce), opracowaną przez John Innes Centre (UK) [26]. Dane z badań laboratoryjnych wskazują, że owoce kumulują antocyjany o działaniu przeciwutleniającym na poziomie porównywalnym z owocami jagodowymi. Równolegle badacze wykorzystują technikę edycji genomu (CRISPR/Cas9) do modyfikowania szlaków metabolicznych pomidora biosyntezy. Przykładem jest pomidor z podwyższoną zawartością prowitaminy D3, co może w przyszłości wspomóc walkę z jej niedoborem w diecie [27]. Choć na razie to rozwiązania eksperymentalne, wskazują kierunek rozwoju: łączenie cech technologicznych z wartością odżywczą przy wykorzystaniu najnowszych narzędzi biologii molekularnej.

Ostatnie lata przyniosły prawdziwą rewolucję w metodach doskonalenia roślin uprawnych, w tym pomidora. Największy przełom to wprowadzenie technik precyzyjnej edycji genomu, takich jak CRISPR/Cas9. Narzędzie to umożliwia celową modyfikację konkretnego genu bez wprowadzania obcego DNA. Przykładem zastosowania CRISPR/Cas9 w pomidorze jest uzyskanie odpornego genotypu (‘Tomelo’) na mączniaka prawdziwego (*Oidium neolycopersici*) poprzez wyłączenie (knock-out) genu *Mlo1* [28]. Innym osiągnięciem jest uzyskanie odmiany o wysokiej zawartości kwasu gamma-aminomasłowego (GABA), związku korzystnie wpływającego na układ nerwowy i ciśnienie krwi. W 2021 r. japońska firma Sanatech rozpoczęła sprzedaż świeżych owoców

i sadzonek tej odmiany (znanej jako Sicilian Rouge High GABA) [29]. Warto podkreślić, że był to pierwszy produkt spożywczy z edycji genomu dostępny komercyjnie. Ogromną rolę w hodowli odgrywa wciąż selekcja wspomagana markerami molekularnymi (MAS), dzięki której hodowca może wybrać rośliny z pożądanymi cechami już na etapie siewek. Coraz częściej jednak stosuje się też selekcję genomową (GS), w której na podstawie profilu DNA całego genomu przewiduje się wartość hodowlaną rośliny. Choć GS stosowana jest stosunkowo od niedawna w warzywnictwie, spadające koszty sekwencjonowania i rozwój algorytmów sztucznej inteligencji (AI) dają perspektywę znacznego przyspieszenia postępu, zwłaszcza w cechach ilościowych [30,31]. W parze z nowoczesnymi technikami molekularnymi idą technologie fenotypowania wysokoprzepustowego: drony, kamery multispektralne, termowizja, obrazowanie 3D umożliwiają analizę setek roślin w ciągu godzin. Wspierają je algorytmy AI, które przetwarzają zebrane dane, wyszukują różnice i pomagają w selekcji najlepszych genotypów, np. pomidorów idealnych do upraw wertykalnych [32-36]. Ponadto coraz większe znaczenie ma integracja danych “omicznych” (genomika, transkryptomika, metabolomika), co pozwala lepiej zrozumieć genetyczne i biochemiczne podstawy cech takich jak smak, aromat czy wartość odżywcza pomidora [37,38]. Dzięki temu można nie tylko odtwarzać utracone cechy z dawnych odmian, ale też świadomie tworzyć nowe, łączące odporność, jakość i smak.

W Polsce trendy hodowlane w zakresie pomidora coraz wyraźniej odzwierciedlają globalne kierunki, z uwzględnieniem lokalnych uwarunkowań klimatu i rynku. Krajowe programy hodowlane prowadzone są zarówno przez firmy nasienne (np. PlantiCo Sp. z o.o.), jak i jednostki naukowe (np. Instytut Ogrodnictwa - PIB w Skierniewicach). Przykładowo firma PlantiCo koncentruje się na odmianach dedykowanych do przemysłu. Główne kierunki hodowli w firmie obejmują zarówno ustalone odmiany, jak i mieszańce F_1 , które cechują się skoncentrowanym dojrzewaniem, twardymi, dobrze wybarwionymi owocami o dużej zawartości suchej masy oraz cechą bezkolankowej szypułki, dzięki czemu odmiany te nadają się do zbioru mechanicznego i transportu luzem. Hodowla heterozyjna w ich przypadku prowadzona jest w oparciu o linie mateczne z cechą *ps* (funkcjonalna męska sterylność), przy selekcji których szczególna uwaga zwracana jest na cechę bezkolankowej szypułki oraz twarde i lepiej wybarwione owoce. Prowadzi się też selekcję form ojcowskich o wysokich parametrach użytkowych i odporności na najważniejsze patogeny. W pracach hodowlanych poszukuje się heterozji wykorzystując krzyżowanie międzyliniowe oddalonych linii płodnych uwzględniając wszystkie cechy jakościowe oczekiwane na rynku.

Instytut Ogrodnictwa - PIB w Skierniewicach odgrywa istotną rolę w rozwoju krajowej hodowli pomidora, realizując wieloletnie programy badawcze i hodowlane ukierunkowane na tworzenie odmian dostosowanych do warunków klimatyczno-gospodarczych Polski. Prowadzone prace koncentrują się na zwiększeniu odporności na kluczowe czynniki biotyczne (w tym na TSWV i *P. infestans*), a także na poprawie cech

jakościowych owoców, w tym parametrów sensorycznych i technologicznych. Szczególny nacisk kładzie się również na uzyskiwanie materiałów dostosowanych do zbioru mechanicznego, co ma kluczowe znaczenie w kontekście rosnących kosztów pracy i wymogów rynku przetwórczego. IO-PIB aktywnie uczestniczy w działaniach na rzecz poszerzania różnorodności odmianowej, zarówno w segmencie pomidorów drobnoowocowych (cherry, koktajlowe), jak i wielkoowocowych, dostosowanych do lokalnych warunków uprawy i oczekiwań konsumentów. W ramach prac badawczych wykorzystywane są cenne źródła odporności pochodzące z dzikich gatunków rodzaju *Solanum*, a także nowoczesne narzędzia biologii molekularnej. W wybranych projektach wdrażane są również elementy analiz „omicznych”, służące identyfikacji ważnych cech użytkowych.

Skala realizowanych w Polsce programów hodowlanych oraz dostępne nakłady finansowe są znacznie mniejsze niż w przypadku globalnych liderów branży, co przekłada się na wolniejsze tempo wdrażania nowych cech i technologii. Narzędzia nowoczesnej hodowli, takie jak selekcja wspomagana markerami (MAS), selekcja genomowa (GS), sztuczna inteligencja (AI), fenotypowanie wysokoprzepustowe (HTP) czy integracja danych „omicznych”, nie są już rozwiązaniami przyszłościowymi, lecz standardem stosowanym w największych firmach nasiennych. Różnice pomiędzy krajowymi a międzynarodowymi programami hodowlanymi wynikają dziś nie tylko z samego dostępu do technologii, ale przede wszystkim z poziomu ich integracji, jakości danych fenotypowych oraz skali selekcji i liczby testowanych kombinacji genetycznych. Niestety, ograniczenia budżetowe sprawiają, że polskie jednostki hodowlane nie są w stanie rywalizować z globalnymi koncernami na równych zasadach, zwłaszcza w zakresie intensywności i szybkości prac badawczo-rozwojowych.

Do przygotowania niniejszego opracowania wykorzystano następujące źródła:

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). FAOSTAT statistical database.
2. Zhang S, Griffiths JS, Marchand G, Bernards MA, Wang A. Tomato brown rugose fruit virus: An emerging and rapidly spreading plant RNA virus that threatens tomato production worldwide. *Mol Plant Pathol.* 2022 Sep;23(9):1262-1277. doi: 10.1111/mpp.13229. Epub 2022 May 22. PMID: 35598295; PMCID: PMC9366064.
3. <https://www.syngentavegetables.com/news/innovation-impact/first-commercial-tobr-fv-resistant-tomato-variety#:~:text=ENKHUIZEN%2C%C2%A0NETHERLANDS%20%E2%80%93%20Syngenta%20Vegetable%20Seeds%20today,will%20support%20against%20crop%20losses>
4. <https://www.enzazaden.com/news-and-events/news/2023/new-enza-zaden-varieties-bring-high-resistance-to-tobr-fv#:~:text=With%20over%201000%20ha%20of,all%20major%20tomato%20production%20regions>
5. https://www.seedquest.com/news.php?type=news&id_article=151567#:~:text=After%20introducing%20the%20first%20tomato,plum%20tomatoes%2C%20and%20cocktail%20tomatoes
6. Zisi Z, Ghijssels L, Vogel E, Vos C and Matthijns J (2024). Single amino acid change in tomato brown rugose fruit virus breaks virus-specific resistance in new resistant tomato cultivar. *Front. Plant Sci.* 15:1382862. doi: 10.3389/fpls.2024.1382862

7. <https://www.vegetables.bayer.com/se/en-se/knowledge-centre/news/new-tomato-varieties-offer-protection-against-tobrfv-mutation.html#:~:text=Recently%2C%20a%20new%20threat%20has,resistant%20varieties%20on%20the%20market>
8. Yan, Z.; Wolters, A.-M.A.; Navas-Castillo, J.; Bai, Y. The Global Dimension of Tomato Yellow Leaf Curl Disease: Current Status and Breeding Perspectives. *Microorganisms* **2021**, *9*, 740. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9040740>
9. Chitwood-Brown, J.; Vallad, G.E.; Lee, T.G.; Hutton, S.F. Breeding for Resistance to Fusarium Wilt of Tomato: A Review. *Genes* **2021**, *12*, 1673. <https://doi.org/10.3390/genes12111673>
10. Ajaharuddin, SK MD, Madan Lal, Ashwani Yadav, Nitin Kumar, Atul Dhakad, Gayatri Sinha, Budhesh Pratap Singh, and Archana Upadhyay. 2024. "Breeding for Resistance Against Pest and Diseases in Tomatoes: A Review". *Journal of Scientific Research and Reports* 30 (6):469-79. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i62063>.
11. Adhikari P, Adhikari TB, Louws FJ, Panthee DR. Advances and Challenges in Bacterial Spot Resistance Breeding in Tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Int J Mol Sci.* 2020 Mar 3;21(5):1734. doi: 10.3390/ijms21051734. PMID: 32138355; PMCID: PMC7084486.
12. de Almeida, G. Q., Silva, J. de O., Copati, M. G. F., Dias, F. de O., & Santos, M. C. dos. (2020). Tomato breeding for disease resistance. *Multi-Science Journal*, 3(3), 8–16. <https://doi.org/10.33837/msj.v3i3.1287>
13. Topcu, Y., Yildiz, K., Kayikci, H. C., Aydin, S., Feng, Q., & Sapkota, M. (2025). Deciphering resistance to Tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV) using Genome-Wide Association Studies. *Scientia Horticulturae*, 341, 113968.
14. <https://news.cornell.edu/stories/2023/01/new-tomato-bred-naturally-resist-pests-and-curb-disease#:~:text=In%20field%20and%20laboratory%20tests,occurred%20late%20in%20the%20season>
15. <https://www.morningagclips.com/tomato-pan-genome-brings-back-the-flavor/#:~:text=%E2%80%9COne%20of%20the%20most%20important,contribute%20to%20aroma%2C%E2%80%9D%20explained%20Giovannoni>
16. <https://rijkzwaan.com/en/news/rijk-zwaans-resistant-tomato-varieties-combine-high-resistance-with-flavour>
17. <https://www.hazera.com/category/crops/tomato/#:~:text=But%20growing%20Mediterranean,with%20a%20longer%20transport%20life>
18. Yang E-Y, Rajametov SN, Cho M-C, Jeong H-B, Chae W-B. Factors Affecting Tolerance to Low Night Temperature Differ by Fruit Types in Tomato. *Agriculture*. 2021; 11(7):681. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070681>
19. <https://www.brown.edu/news/2024-11-08/tomatoes#:~:text=The%20team%E2%80%99s%20partners%20in%20Arizona,that%20were%20associated%20with%20thermotolerance>
20. <https://portal.nifa.usda.gov/web/crisprojectpages/1032975-climate-resilient-high-quality-tomato-varieties-for-sustainable-production.html#:~:text=Goals%20%2F%20Objectives%20The%20long,field%2C%20greenhouse%2C%20and>
21. Shah LR, Ahmed N, Hussain K, Mansoor S, Khan T, Khan I, Narayan S, Afroza B, Murtaza I, Shikari AB, Bhat B, Masoodi KZ. Mapping phenotypic performance and novel SNPs for cold tolerance in tomato (*Solanum lycopersicum*) genotypes through GWAS and population genetics. *BMC Genom Data*. 2024 Jan 27;25(1):9. doi: 10.1186/s12863-024-01190-5. PMID: 38281048; PMCID: PMC10822167.
22. Dong, Haiqiang, et al. "The genetic basis and improvement of photosynthesis in tomato." *Horticultural Plant Journal* 11.1 (2025): 69-84.

23. Laura Ellen Rose, Zahra Zangishei, Alisdair R Fernie, Björn Usadel, Tomato and its relatives are breaking the genomics barriers, *Journal of Experimental Botany*, Volume 76, Issue 21, 25 November 2025, Pages 6259–6273, <https://doi.org/10.1093/jxb/eraf298>
24. Benitez-Alfonso, Y., Soanes, B. K., Zimba, S., Sinanaj, B., German, L., Sharma, V., ... & Foyer, C. H. (2023). Enhancing climate change resilience in agricultural crops. *Current Biology*, 33(23), R1246-R1261.
25. Causse, M. et al. (2020). Genomic Designing for Climate-Smart Tomato. In: Kole, C. (eds) *Genomic Designing of Climate-Smart Vegetable Crops*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97415-6_2
26. <https://www.nongmoproject.org/blog/new-gmo-alert-is-the-gm-purple-tomato-here-to-stay-or-just-the-sexy-new-thing/#:~:text=Officially%20known%20as%20Del%2FRos1%2C%20the,blackberries%2C%20cherries%20and%20purple%20grapes>
27. <https://www.theguardian.com/science/2022/may/23/scientists-create-tomatoes-genetically-edited-boost-vitamin-d-levels#:~:text=In%20this%20case%2C%20their%20focus,the%20tomatoes%E2%80%99%20fruits%20and%20leaves>
28. Nekrasov, V., Wang, C., Win, J. *et al.* Rapid generation of a transgene-free powdery mildew resistant tomato by genome deletion. *Sci Rep* 7, 482 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00578-x>
29. Waltz, E. (2022). GABA-enriched tomato is first CRISPR-edited food to enter market. *Nat. Biotechnol*, 40(1), 9-11.
30. Mahadevaiah, Channappa, et al. "Genomic selection in sugarcane: current status and future prospects." *Frontiers in Plant Science* 12 (2021): 708233.
31. Wang, Yan, et al. "The genomic route to tomato breeding: Past, present, and future." *Plant physiology* 195.4 (2024): 2500-2514.
32. Zolkin, A. L., et al. "Digital technologies and automation in breeding and agriculture." *E3S Web of Conferences*. Vol. 474. EDP Sciences, 2024.
33. Shomali, Aida, et al. "Artificial neural network (ANN)-based algorithms for high light stress phenotyping of tomato genotypes using chlorophyll fluorescence features." *Plant Physiology and Biochemistry* 201 (2023): 107893.
34. Lee, Youngsil, Chris Speed, and Larissa Pschetz. "Pheno-data: knowledge from tomatoes' becoming with different ecological worlds. *Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2024.
35. Prigigallo, Maria Isabella, et al. "High-throughput plant phenotyping identifies and discriminates biotic and abiotic stresses in tomato." *Plant Phenomics* (2025): 100124.
36. Angidi, S.; Madankar, K.; Tehseen, M.M.; Bhatla, A. Advanced High-Throughput Phenotyping Techniques for Managing Abiotic Stress in Agricultural Crops—A Comprehensive Review. *Crops* **2025**, 5, 8. <https://doi.org/10.3390/crops5020008>
37. Rajendra, V. (2025). Marker-Assisted Selection (MAS) Revolutionized: Integrating ‘Omics’ Data into Tomato Breeding. In: Waseem, M., S. Prakash, C., Faiz, S., Li, Z. (eds) *Omics Approaches for Tomato Yield and Quality Trait Improvement*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-3890-1_13
38. Ullah, Z. *et al.* (2025). Future Horizons: Emerging “Omics” Technologies and Challenges in Tomato. In: Waseem, M., S. Prakash, C., Faiz, S., Li, Z. (eds) *Omics Approaches for Tomato Yield and Quality Trait Improvement*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-3890-1_16