

Wiesława Popławska, Maria Ogrodowczyk, Iwona Bartkowiak-Broda, Krystyna Krótka
Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin, Oddział w Poznaniu

Analiza zmienności składników plonu oraz wielkości efektu heterozji u mieszańców F₁ rzepaku ozimego (*Brassica napus* L.)

Analysis of yield components and heterosis effect variability in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) F₁ hybrids

Słowa kluczowe: rzepak ozimy (*Brassica napus* L.), mieszańce F₁, CMS *ogura*, efekt heterozji, plon, dystans Mahalanobisa

Dotychczasowe wyniki hodowli odmian mieszańcowych rzepaku ozimego pokazały możliwość podniesienia plenności tej rośliny poprzez wykorzystanie efektu heterozji. Badania mające na celu opracowanie skutecznej metody hodowli odmian mieszańcowych rzepaku ozimego są prowadzone przy wykorzystaniu systemu hybrydyzacji CMS *ogura*. Otrzymywane mieszańce doświadczalne F₁ plonują na zróżnicowanym poziomie, w związku z tym prowadzone są badania nad czynnikami decydującymi o plonie mieszańców. W tym celu w sezonach wegetacyjnych 2007/2008 i 2008/2009 przebadano 15 mieszańców F₁ i ich linie rodzicielskie (trzy linie CMS *ogura* i pięć linii restorerów — podwojonych haploidów) w doświadczeniach polowych założonych w układzie bloków kompletnie zrandomizowanych w czterech powtórzeniach, w trzech środowiskach. Przeprowadzono analizę statystyczną efektów heterozji dla badanych cech. Ponadto oceniono odległość fenotypową między liniami rodzicielskimi i mieszańcami F₁ poprzez określenie dystansu Mahalanobisa. Związek między efektem heterozji a dystansem fenotypowym zbadano dla plonu nasion, 5 cech struktury plonu (liczby rozgałęzień na roślinie, liczby łuszczyń na roślinie, długości łuszczyzny, liczby nasion w łuszczyźnie i masy 1000 nasion) oraz zawartości oleju i sumy glukozyolanów. Stwierdzono, że plon badanych mieszańców, a także zawartość tłuszczu i glukozyolanów w nasionach zależą istotnie od genotypu i warunków środowiska. Największe znaczenie dla tworzenia wysokiego plonu mieszańców F₁ ma efekt heterozji. Otrzymane wyniki w tej pracy jak i wcześniej opublikowanych pokazują, że zmienność fenotypowa badanych linii CMS i restorerów rzepaku była zbyt mała znacząca, co nie pozwala na przewidywanie efektu heterozji na podstawie dystansu Mahalanobisa.

Key words: winter oilseed rape, F₁ hybrids, CMS *ogura*, heterosis effect, yield, Mahalanobis distance

Hybrids of oilseed rape obtained so far have revealed the possibility of seed yield growth of this plant through the heterosis effect. The investigations on the development of an effective breeding method of winter rapeseed hybrids are conducted using CMS *ogura* hybridization system. The obtained experimental F₁ hybrids yield at different levels, therefore the investigations of factors deciding about hybrid yield are being carried out. For these purposes fifteen F₁ hybrids and their parental lines (three CMS *ogura* lines and five doubled haploid-restorer lines) have been investigated in the field trials in design of completely randomized blocs, in four replications, in three environments in the crop seasons of 2007/2008 and 2008/2009. Statistical analysis of heterosis effects for investigated traits in all

environments have been conducted. Moreover, the phenotypic distance between parental lines of F_1 hybrids has been evaluated using Mahalanobis distance. Also, the relationship between heterosis effect and phenotypic distance for seed yield, 5 traits of yield components (number of branches per plant, number of pods per plant, length of pod, number of seeds in pod, weight of 1000 seeds), oil and total of glucosinolate contents were investigated. It has been stated that the yield of hybrids and qualitative traits such as oil and glucosinolate content in seeds are significantly dependent on genotypes and environmental conditions. The heterosis effect has more important impact on the seed yield while the influence of phenotypic distance between the parental lines was not significant.

Wstęp

Efekt heterozji występujący w plonie nasion rzepaku stwierdzony przez wielu badaczy na różnym materiale genetycznym (Lefort-Buson et Datté 1987, Grant i Beversdorf 1985, Bartkowiak-Broda 1991, Krzymański i in. 1993, 1994, 1998; Liersch i in. 2000, Kudła 1996, Piętka i in. 2000) oraz odkrycie systemów kontrolujących zapylenie krzyżowe było przesłanką do hodowli odmian mieszańcowych i wdrożenia ich do uprawy.

Obecne badania mają na celu opracowanie skutecznej metody hodowli odmian mieszańcowych rzepaku ozimego przy wykorzystaniu systemu genowo-cytoplazmatycznej męskiej sterility CMS *ogura* (Bartkowiak-Broda 1994, 1998; Bartkowiak-Broda i in. 2003, Popławska i in. 1999, 2001). Szczególnie istotnym etapem hodowli, decydującym o uzyskaniu plennych mieszańców, jest właściwy dobór komponentów mieszańców — linii rodzicielskich wytwarzających wysokoplonujące potomstwo. Kombinacje genotypów gwarantujących wysokie plonowanie wyznacza się na podstawie ich ogólnej i specyficznej zdolności kombinacyjnej ocenianej w krzyżowaniach testowych oraz w oparciu o ocenę dystansu genetycznego i fenotypowego komponentów rodzicielskich i jego związku z efektem heterozji u mieszańców F_1 . Uzyskiwane mieszańce doświadczalne F_1 plonują na zróżnicowanym poziomie, w związku z tym prowadzone są badania nad czynnikami decydującymi o ich plenności (Liersch i in. 2004, 2009; Nowakowska i in. 2004, 2005).

Celem pracy było kreślenie czynników mających największe znaczenie dla tworzenia plonu przez mieszańce F_1 na podstawie oceny plonowania i zmienności składników plonu mieszańców F_1 i ich linii rodzicielskich, efektu heterozji w odniesieniu do form rodzicielskich badanych mieszańców, a także analiza cech jakościowych, takich jak zawartość tłuszczu i glukozyolanów w nasionach pokolenia F_1 .

Material i metody

Material do badań stanowiło 15 mieszańców F_1 oraz ich linie rodzicielskie (trzy linie CMS *ogura*: PN 64/07, PN 66/07, PN 68/07 i pięć linii restorerów — podwojonych haploidów (DH): PN 5/4/07, PN 7/5/07, PN 17/5/07, PN 18/5/07,

PN 21/3/07). Plon mieszańców i ich linii rodzicielskich oceniono w sezonach wegetacyjnych 2007/2008 i 2008/2009 na podstawie plonu nasion z całych poletek o powierzchni 10 m², przy normie wysiewu 80 roślin/m².

Doświadczenia polowe założono w układzie bloków kompletnie zrandomizowanych w czterech powtórzeniach, w trzech miejscowościach: w Rolniczym Zakładzie Doświadczalnym Wielichowo – Zieleńcin, w Małyszynie (Oddział Spółki HR Strzelce – Grupa IHAR) oraz w Łągiewnikach (Oddział Spółki HR Smolice – Grupa IHAR).

Liczbę rozgałęzień na roślinie oraz liczbę łuszczyń na roślinie określano dla 5 roślin pobranych z każdego poletka (20 roślin z obiektu). W celu określenia długości łuszczyń i liczby nasion w łuszczyńce dwa tygodnie przed zbiorem rzepaku pobrano z każdego poletka po 25 łuszczyń ze środkowej części pędu głównego, tj. po 100 łuszczyń z każdego obiektu. Określono długość łuszczyń, liczbę nasion w łuszczyńce oraz masę 1000 nasion. Zawartość tłuszczu oznaczono za pomocą analizatora NMR firmy Newport, a zawartość glukozyolanów za pomocą chromatografii gazowej sililowych pochodnych desulfoglukozyolanów (Michalski i in. 1995).

Wyniki doświadczeń polowych zostały opracowane statystycznie przy pomocy programu Sergen (1998), Statistica oraz arkusza kalkulacyjnego MS Excel. Przeprowadzono analizę statystyczną efektów heterozji dla badanych cech we wszystkich środowiskach, określono współczynniki zmienności oraz macierz korelacji pomiędzy badanymi cechami. Ponadto oceniono odległość fenotypową między liniami rodzicielskimi dla poszczególnych mieszańców F₁ poprzez określenie dystansu Mahalanobisa. Dystans Mahalanobisa wyliczono w oparciu o następujące cechy: plon nasion, 5 cech struktury plonu (liczby rozgałęzień na roślinie, liczby łuszczyń na roślinie, długości łuszczyń, liczby nasion w łuszczyńce, masy 1000 nasion) oraz dwie cechy stanowiące o wartości nasion, tj. zawartości oleju i sumy glukozyolanów, a następnie określono związek między efektami heterozji mieszańców F₁ a wyliczonymi odległościami fenotypowymi Mahalanobisa.

Wyniki i dyskusja

Proces selekcji, któremu poddawane są materiały hodowlane rzepaku pod względem specyficznych cech jakościowych, przyczynia się do ciągłego zawężania puli genów tego gatunku. Dodatkowo wprowadzenie do hodowli linii podwojonych haploidów rzepaku ogranicza zmienność genetyczną i fenotypową wielu cech pożądaných dla celów hodowlanych. Wszystkie te czynniki są szczególnie niekorzystne dla hodowli mieszańcowej rzepaku, gdzie o efekcie heterozji decyduje genetyczna różnorodność, czyli dystans genetyczny komponentów rodzicielskich (Snowdon i Friedt 2004). Na podstawie 6 cech fenotypowych: plonu nasion, liczby rozgałęzień na roślinie, liczby łuszczyń na roślinie, długości łuszczyń, liczby

nasion w łuszczyńce i masy 1000 nasion, ocenionych w badanych środowiskach, został wyznaczony dystans Mahalanobisa (tab. 1).

Tabela 1

Plon nasion mieszańców F_1 i efekt heterozji w stosunku do średniej rodziców w doświadczeniach polowych — *Seed yield and heterosis effect in F_1 hybrids in field trials in comparison to mean of parental lines*

Mieszańiec F_1 <i>Hybrid</i>	Plon nasion — <i>Seed yield</i> [dt/ha]				Efekt heterozji <i>Heterosis effect</i> [%]*	Dystans fenotypowy <i>Phenotype Mahalanobis distance</i>
	mieszańca F_1 <i>hybrid</i>	linii matecznej <i>maternal line</i>	linii ojcowskiej <i>paternal line</i>	średni rodziców <i>mean of parents</i>		
PN 64 × PN 5/4/07	50,20	37,38	41,97	39,7	10,52	12,408
PN 64 × PN 7/5/07	55,87	37,38	38,25	37,8	18,05	14,316
PN 64 × PN 17/5/07	54,43	37,38	35,68	36,5	17,90	6,433
PN 64 × PN 18/5/07	50,83	37,38	35,83	36,6	14,22	8,862
PN 64 × PN 21/3/07	53,71	37,38	39,83	38,6	15,10	22,546
PN 66 × PN 5/4/07	55,48	39,14	41,97	40,6	14,92	32,003
PN 66 × PN 7/5/07	53,14	39,14	38,25	38,7	14,45	27,867
PN 66 × PN 17/5/07	52,48	39,14	35,68	37,4	15,07	26,255
PN 66 × PN 18/5/07	51,38	39,14	35,83	37,5	13,90	22,255
PN 66 × PN 21/3/07	53,36	39,14	39,83	39,5	13,87	24,865
PN 68 × PN 5/4/07	53,52	39,27	41,97	40,6	12,90	23,993
PN 68 × PN 7/5/07	52,34	39,27	38,25	38,8	13,58	17,255
PN 68 × PN 17/5/07	55,32	39,27	35,68	37,5	17,85	17,655
PN 68 × PN 18/5/07	52,39	39,27	35,83	37,6	14,84	23,101
PN 68 × PN 21/3/07	51,47	39,27	39,83	39,6	11,92	28,657
Średnia — <i>Mean</i>	53,06	38,59	38,31	38,45	14,61	
Minimum — <i>Minimum</i>	50,20	37,38	35,68	36,53	10,52	
Maksimum — <i>Maximum</i>	55,87	39,27	41,97	40,62	18,05	
Współ. zmienności <i>Coefficient of variation</i>	3,24	2,31	6,48	3,43	14,52	
$F_{obl.} — F_{cal.}$	1,54					

* — efekt heterozji liczony w stosunku do średniej linii rodzicielskich
heterosis effect calculated in comparison to mean of parental lines

Zastosowanie hierarchicznej analizy skupień techniką aglomeracji obiektów w skupienia metodą Warda umożliwiło wykreślenie dendrogramu obrazującego istniejące podobieństwo. Przeprowadzone badania wykazały, że zróżnicowanie fenotypowe zarówno linii rodzicielskich jak i mieszańców F_1 odnośnie większości cech było niewielkie (tab. 2). Jednak mimo stosunkowo niskiej zmienności większości badanych cech fenotypowych rzepaku wielkości dystansu fenotypowego

linii rodzicielskich poszczególnych mieszańców F_1 określone dystansem Mahalanobisa były zróżnicowane. Na dendrogramie badane obiekty zostały przyporządkowane do trzech odrębnych grup skupień: mieszańców, linii DH restorerów oraz linii CMS *ogura* (rys. 1). Dystans Mahalanobisa pomimo niewielkiego zróżnicowania fenotypowego rzepaku może wspomóc dobór możliwie najbardziej zróżnicowanych komponentów rodzicielskich do tworzenia mieszańców F_1 . Dystans Mahalanobisa znalazł również zastosowanie w badaniach Shengwu Hu i in. (2007) do określenia dystansu fenotypowego pomiędzy europejskimi i chińskimi odmianami i liniami hodowlanymi rzepaku oraz w badaniach Krystkowiak i in. (2009) do oszacowania dystansu fenotypowego pomiędzy formami rodzicielskimi mieszańców pszenicy.

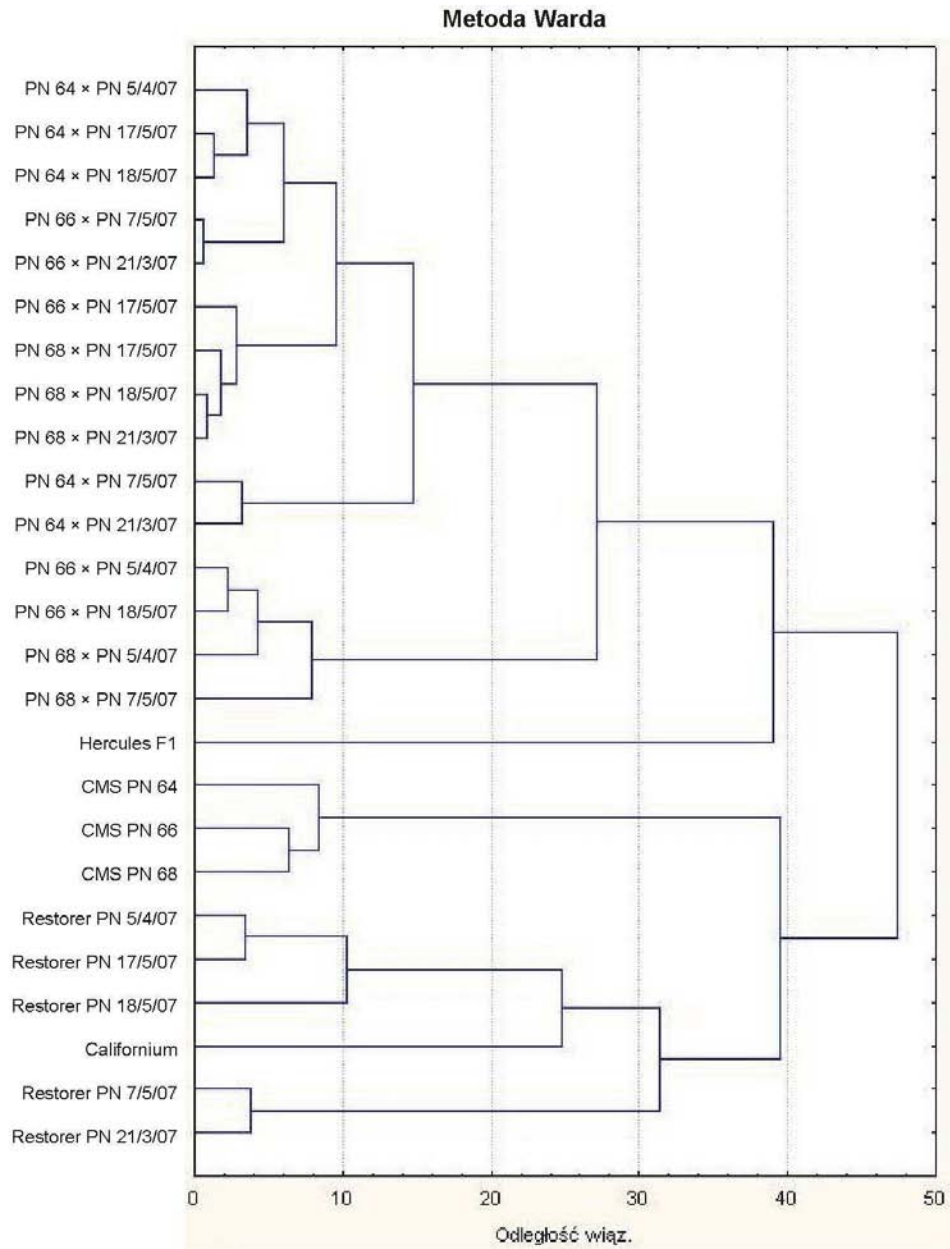
Tabela 2
Charakterystyka mieszańców F_1 i ich rodziców na podstawie doświadczenia polowego w trzech środowiskach — *Characteristic of F_1 hybrids and their parental lines in field trials in three environments*

Cecha <i>Trait</i>	Mieszańiec <i>Hybrid</i>	Linia mateczna <i>Maternal line</i>	Linia ojcowska <i>Paternal line</i>	Efekt heterozji <i>Heterosis effect</i> [%]
Plon nasion — <i>Seed yield</i> [dt/ha]				
Średnia — <i>Mean</i>	53,1	38,6	38,3	14,6
Minimum — <i>Minimum</i>	50,2	37,4	35,7	10,5
Maksimum — <i>Maximum</i>	55,9	39,3	42,0	18,1
Współczynnik zmienności <i>Coefficient of variation</i>	3,2	2,3	6,5	14,5
Średnia doświadczenia <i>Mean in experiment</i>				
Łagiewniki	44,1	30,3	35,2	11,3
Zielęcín	49,6	34,1	33,4	15,8
Małyszyn	65,5	50,4	47,3	16,6
Liczba rozgałęzień na roślinie — <i>Number of branches per plant</i>				
Średnia — <i>Mean</i>	8,4	8,3	8,3	0,1
Minimum — <i>Minimum</i>	7,5	7,7	7,6	-0,1
Maksimum — <i>Maximum</i>	9,4	8,7	9,2	0,4
Współczynnik zmienności <i>Coefficient of variation</i>	6,1	5,2	7,3	440,0
Liczba łuszczyn na roślinie — <i>Number of pods per plant</i>				
Średnia — <i>Mean</i>	251,9	220,9	218,2	32,2
Minimum — <i>Minimum</i>	221,2	208,5	195,9	-8,3
Maksimum — <i>Maximum</i>	281,8	235,7	255,6	57,8
Współczynnik zmienności <i>Coefficient of variation</i>	6,6	5,3	11,6	58,7

ciąg dalszy tabeli 2

Długość łuszczyzny — <i>Length of pods</i> [cm]				
Średnia — <i>Mean</i>	77,6	73,6	65,9	7,9
Minimum — <i>Minimum</i>	75,0	69,8	64,3	4,4
Maksimum — <i>Maximum</i>	80,4	75,8	67,1	11,5
Współczynnik zmienności <i>Coefficient of variation</i>	2,1	3,8	1,7	24,1
Liczba nasion w łuszczyźnie — <i>Number of seeds per pod</i>				
Średnia — <i>Mean</i>	23,1	19,1	19,9	3,6
Minimum — <i>Minimum</i>	19,7	17,8	19,4	0,1
Maksimum — <i>Maximum</i>	25,4	20,0	20,3	5,9
Współczynnik zmienności <i>Coefficient of variation</i>	6,2	5,1	1,7	39,4
Masa 1000 nasion — <i>Weight of 1000 seeds</i> [g]				
Średnia — <i>Mean</i>	5,1	5,6	5,2	-0,3
Minimum — <i>Minimum</i>	5,0	5,6	5,1	-0,5
Maksimum — <i>Maximum</i>	5,4	5,7	5,3	-0,1
Współczynnik zmienności <i>Coefficient of variation</i>	2,5	0,3	1,8	48,4
Zawartość tłuszczu — <i>Oil content</i> [%]				
Średnia — <i>Mean</i>	46,5	45,1	44,8	1,6
Minimum — <i>Minimum</i>	45,6	44,4	42,6	0,6
Maksimum — <i>Maximum</i>	47,8	46,4	46,0	3,1
Współczynnik zmienności <i>Coefficient of variation</i>	1,4	2,1	2,8	46,3
Suma glukozynolanów — <i>Total of glucosinolates</i> [$\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ of seeds]				
Średnia — <i>Mean</i>	8,2	10,4	8,6	-1,3
Minimum — <i>Minimum</i>	7,1	10,2	7,9	-3,0
Maksimum — <i>Maximum</i>	9,6	10,6	9,7	-0,1
Współczynnik zmienności <i>Coefficient of variation</i>	8,8	1,9	8,7	66,1

Osiągnięty przez badane mieszańce F_1 średni efekt heterozji w porównaniu do średnich plonów z linii rodzicielskich wyniósł 14,61% i zawierał się w przedziale od 10,52 do 18,05% (tab. 1); 7 mieszańców F_1 wykazało efekt heterozji powyżej wartości średniej. Największy efekt heterozji wynoszący 18,05 i 17,90% wykazały dwa najwyżej plonujące mieszańce PN 64 \times PN 7/5/07 i PN 64 \times PN 17/5/07, których plon wyniósł odpowiednio 55,87 i 54,43 dt/ha. Najmniejszy efekt heterozji, wynoszący 10,52%, stwierdzono dla najniżej plonującego, na poziomie



Rys. 1. Dendrogram mieszańców F₁ i ich linii rodzicielskich utworzony w oparciu o 6 cech fenotypowych — *Dendrogram of hybrids and their parental lines based on 6 phenotypic traits*

50,2 dt/ha, mieszańca PN 64 × PN 5/4/07. Średni plon nasion 15 mieszańców w trzech środowiskach wyniósł 53,1 dt/ha i był wyższy od średnich wartości dla linii rodzicielskich (matecznych — 38,6 i ojcowskich — 38,3 dt/ha). Linie mateczne badanych mieszańców nie różniły się znacząco pod względem plonu, podczas gdy Linie ojcowskie charakteryzowały się większą zmiennością plonowania (współczynnik zmienności — 6,5) w porównaniu do mieszańców (3,2) i linii matecznych (2,3) (tab. 2).

Analizując składniki plonu stwierdzono, że ich zmienność dla mieszańców i linii rodzicielskich nie była wysoka i występowała na podobnym poziomie (tab. 2). Dla składników plonu odnotowano średni efekt heterozji wynoszący zaledwie 0,1% dla liczby rozgałęzień na roślinie, 32,3% dla liczby łuszczyń na roślinie, 7,9% dla długości łuszczyń i 3,6% dla liczby nasion w łuszczyźnie, natomiast nie stwierdzono go w masie 1000 nasion. Podobne wyniki uzyskali również Kudła (1996) badając efekt heterozji u mieszańców F_1 linii wsobnych rzepaku ozimego i Liersch i in. (2004), którzy badając mieszańce F_1 CMS *ogura* stwierdzili, że średni efekt heterozji dla składników plonu był najniższy dla masy 1000 nasion. Oznacza to, że największe znaczenie dla uzyskania wysokiego plonu i efektu heterozji w plonie ma liczba łuszczyń na roślinie i liczba nasion w łuszczyźnie.

Obserwowano także dużą zmienność całkowitej zawartości glukozyolanów w nasionach oraz brak efektu heterozji dla tej cechy u mieszańców F_1 (tab. 2). Oznacza to, że spodziewany efekt heterozji nie może spowodować znaczącego wzrostu zawartości glukozyolanów w nasionach zebranych z roślin pokolenia F_1 w stosunku do ich zawartości w nasionach siewnych. Krzymański i in. (1995, 1998) także wykazali brak korelacji efektu heterozji w plonie nasion mieszańców F_1 linii podwójnie ulepszonych rzepaku ozimego z efektem heterozji glukozyolanów.

Badane obiekty były najściślej zróżnicowane pod względem zawartości tłuszczu w nasionach. Zmienność zawartości tłuszczu była niska zarówno dla mieszańców (1,4), jak i ich form rodzicielskich (2,1 i 2,8) (tab. 2). Średnia zawartość tłuszczu dla mieszańców (46,5%) była wyższa w stosunku do form rodzicielskich (45,15 i 44,8%). Efekt heterozji dla tej cechy wyniósł średnio 1,6%.

Stwierdzono istotny wpływ warunków środowiska na plon nasion, składniki struktury plonu oraz cechy jakościowe. W przypadku plonu nasion wysoce istotne było współdziałanie genotypu i środowiska (tab. 3).

Ze względu na małe zróżnicowanie linii rodzicielskich mieszańców F_1 zaobserwowano istotny wpływ genotypu tylko w przypadku niektórych komponentów struktury plonu, takich jak liczba rozgałęzień na roślinie, liczba nasion w łuszczyźnie, masa 1000 nasion, a także w przypadku zawartości tłuszczu i glukozyolanów w nasionach (tab. 3).

Tabela 3

Analiza wariancji doświadczenia polowego z mieszańcami F₁ przeprowadzonego w trzech środowiskach — *Analysis of variance of field trials in three environments*

Źródło zmienności <i>Source of variability</i>	Liczba stopni swobody <i>Degrees of freedom</i>	Średni kwadrat <i>Mean square</i>	F _{obl.} F _{cal.}
Plon nasion — <i>Seed yield [dt/ha]</i>			
Środowisko — <i>Environment</i>	2	1859,87	324,27**
Genotyp — <i>Genotype</i>	14	8,85	1,54
Interakcja genotyp × środowisko <i>Genotype × environment</i>	28	13,72	2,39**
Błąd — <i>Error</i>	126	5,74	
Liczba rozgałęzień na roślinie — <i>Number of branches per plant</i>			
Środowisko — <i>Environment</i>	2	17,43	37,67**
Genotyp — <i>Genotype</i>	14	0,89	1,93*
Interakcja genotyp × środowisko <i>Genotype × environment</i>	28	0,29	0,63
Błąd — <i>Error</i>	126	0,46	
Liczba łuszczyń na roślinie — <i>Number of pods per plant</i>			
Środowisko — <i>Environment</i>	2	19972	13,39**
Genotyp — <i>Genotype</i>	14	895	0,60
Interakcja genotyp × środowisko <i>Genotype × environment</i>	28	1329	0,89
Błąd — <i>Error</i>	126	1492	
Długość łuszczyń — <i>Length of pods [cm]</i>			
Środowisko — <i>Environment</i>	2	305,84	74,96**
Genotyp — <i>Genotype</i>	14	6,43	1,58
Interakcja genotyp × środowisko <i>Genotype × environment</i>	28	4,04	0,99
Błąd — <i>Error</i>	126	4,08	
Liczba nasion w łuszczyńce — <i>Number of seeds per pod</i>			
Środowisko — <i>Environment</i>	2	373,52	282,86**
Genotyp — <i>Genotype</i>	14	5,62	4,26**
Interakcja genotyp × środowisko <i>Genotype × environment</i>	28	1,05	0,79
Błąd — <i>Error</i>	126	1,32	
Masa 1000 nasion — <i>Weight of 1000 seeds [g]</i>			
Środowisko — <i>Environment</i>	2	7,72	1110,08**
Genotyp — <i>Genotype</i>	14	0,05	5,19**
Interakcja genotyp × środowisko <i>Genotype × environment</i>	28	0,02	2,48**
Błąd — <i>Error</i>	126	0,01	

ciąg dalszy tabeli 3

Zawartość tłuszczu — <i>Oil content</i> [%]			
Środowisko — <i>Environment</i>	2	13,05	68,58**
Genotyp — <i>Genotype</i>	14	1,35	7,10**
Interakcja genotyp × środowisko <i>Genotype × environment</i>	28	0,17	0,92
Błąd — <i>Error</i>	126	0,19	
Suma glukozynolanów — <i>Total of glucosinolates</i> [$\mu\text{mol g}^{-1}$ nasion]			
Środowisko — <i>Environment</i>	2	31,14	46,19**
Genotyp — <i>Genotype</i>	14	1,56	2,33**
Interakcja genotyp × środowisko <i>Genotype × environment</i>	28	0,81	1,20
Błąd — <i>Error</i>	126	0,67	

** — istotne na poziomie $\alpha = 0,01$ — *significant at $\alpha = 0.01$*

Szczegółowa analiza efektu heterozji poszczególnych kombinacji mieszańcowych pod względem ich efektów głównych i interakcji ze środowiskiem pokazuje, że na 15 porównywanych mieszańców 12 odznacza się wysoce istotnie lepszymi efektami głównymi – są stabilne w plonowaniu. Tylko jeden z nich wykazuje słabo istotną korelację ze środowiskiem. Pozostałe trzy mieszańce mimo wysokiego ale nieistotnego efektu głównego wykazują istotną interakcję ze środowiskiem (tab. 4). Mogą się one okazać mieszańcami niewiernymi w plonowaniu.

W tabeli 5 przedstawiono współczynniki korelacji pomiędzy plonem nasion mieszańców F_1 ($n = 15$) i składnikami plonu. Stwierdzono wysoce istotną dodatnią korelację między liczbą nasion w łuszczyńce a długością łuszczyzny (0,66) oraz wysoce istotną ujemną korelację między masą 1000 nasion a liczbą nasion w łuszczyńce (–0,73) i liczbą łuszczyzn na roślinie a liczbą nasion w łuszczyńce (–0,61). Istotnie ujemną korelację zaobserwowano również pomiędzy liczbą rozgałęzień na roślinie a masą 1000 nasion (–0,55). Istotne korelacje wskazują na istnienie efektów kompensacji składników plonu, co może tłumaczyć fakt, że żadna z badanych cech nie korelowała w sposób istotny z plonem nasion.

Tabela 4

Testowanie efektów heterozji mieszańców F_1 dla plonu i ich interakcji ze środowiskami
Testing the heterosis effects of F_1 hybrids yield and their interaction with environments

Mieszańiec <i>Hybrid</i>	Linia mateczna <i>Maternal line</i>	Linia ojcowska <i>Paternal line</i>	Ocena efektu głównego <i>Assessment of the main effect</i> [dt/ha]	Statystyka F dla efektu głównego <i>F Statistics of the main effect</i>	Statystyka F dla interakcji <i>F Statistics for interaction</i>
1	PN 64/07	PN 5/4/07	10,520	173,21**	0,21
2	PN 64/07	PN 7/5/07	18,055	16,16	6,71**
3	PN 64/07	PN 17/5/07	17,900	47,30**	2,25
4	PN 64/07	PN 18/5/07	14,224	11,38	5,91**
5	PN 64/07	PN 21/3/07	15,104	38,35**	1,98
6	PN 66/07	PN 5/4/07	14,922	21,03**	3,52*
7	PN 66/07	PN 7/5/07	14,448	34,92**	1,99
8	PN 66/07	PN 17/5/07	15,067	44,07**	1,71
9	PN 66/07	PN 18/5/07	13,896	23,23**	2,76
10	PN 66/07	PN 21/3/07	13,869	148,77**	0,43
11	PN 68/07	PN 5/4/07	12,901	73,83**	0,75
12	PN 68/07	PN 7/5/07	13,577	27,32**	2,24
13	PN 68/07	PN 17/5/07	17,850	44,91**	2,36
14	PN 68/07	PN 18/5/07	14,840	65,51**	1,12
15	PN 68/07	PN 21/3/07	11,915	13,75	3,43*

* — istotne na poziomie $\alpha = 0,05$ — *significant at $\alpha = 0.05$*

** — istotne na poziomie $\alpha = 0,01$ — *significant at $\alpha = 0.01$*

Tabela 5

Współczynniki korelacji pomiędzy plonem nasion i składnikami plonu
Correlation coefficients between seed yield and yield components

Cecha — <i>Trait</i>	1	2	3	4	5	6
1 plon nasion — <i>seed yield</i>	1					
2 liczba rozgałęzień na roślinie <i>number of branches per plant</i>	-0,05	1				
3 liczba łuszczyń na roślinie <i>number of pods per plant</i>	-0,03	0,33	1			
4 długość łuszczyzny — <i>length of pod</i>	-0,02	0,28	-0,44	1		
5 liczba nasion w łuszczyźnie <i>number of seeds per pod</i>	0,11	0,19	-0,61**	0,66**	1	
6 masa 1000 nasion <i>weight of 1000 seeds</i>	-0,02	-0,55*	0,10	-0,33	-0,73**	1

* — istotne na poziomie $\alpha = 0,05$ — *significant at $\alpha = 0.05$*

** — istotne na poziomie $\alpha = 0,01$ — *significant at $\alpha = 0.01$*

Badając zależności między plonem mieszańców F_1 a plonem linii matecznej, linii ojcowskiej i średnim plonem rodziców (tab. 6) stwierdzono, że współczynniki korelacji są nieistotne. Natomiast współczynnik korelacji między plonem mieszańca i heterozją policzoną w stosunku do średniej rodziców jest wysoce istotny i wynosi 0,78. Jest to wynik podobny od uzyskanego dla plonu mieszańców F_1 między rodami rzepaku ozimego podwójnie ulepszanego (Krzymański i in. 1994), który nie był skorelowany z plonem rodziców, ale był również wysoce istotnie zależny od efektu heterozji.

Tabela 6
Współczynniki korelacji pomiędzy plonem nasion mieszańców a plonem nasion ich rodziców — *Correlation coefficient of seed yield of hybrids with yield of their parental lines*

Cecha <i>Trait</i>	Współczynnik korelacji <i>Correlation coefficient</i>
Plon mieszańca — plon linii matecznej <i>Yield of hybrid — yield of maternal line</i>	0,02
Plon mieszańca — plon linii ojcowskiej <i>Yield of hybrid — yield of paternal line</i>	0,04
Plon mieszańca — średni plon rodziców <i>Yield of hybrid — mean yield of parents</i>	0,04
Plon mieszańca — heterozja względem średniej rodziców <i>Yield of hybrid — heterosis effect in comparison to mean of parental lines</i>	0,78**

** — istotne na poziomie $\alpha = 0,01$ — *significant at $\alpha = 0.01$*

Tabela 7
Współczynniki korelacji pomiędzy efektem heterozji badanych cech a dystansem fenotypowym Mahalanobisa — *Correlation coefficients between heterosis effect and phenotypic distance (Mahalanobis)*

Cecha <i>Trait</i>	Współczynniki korelacji efektu heterozji z dystansem fenotypowym <i>Correlation coefficients between heterosis effect and phenotypic distance</i>
Plon nasion — <i>Seed yield</i>	-0,28
Liczba rozgałęzień na roślinie <i>Number of branches per plant</i>	0,08
Liczba łuszczyń na roślinie — <i>Number of pods per plant</i>	-0,32
Długość łuszczyzny — <i>Length of pods</i>	-0,32
Liczba nasion w łuszczyźnie — <i>Number of seeds per pod</i>	-0,04
Masa 1000 nasion — <i>Weight of 1000 seeds</i>	-0,49

Analizując współczynniki korelacji efektu heterozji badanych cech z dystansem fenotypowym nie stwierdzono istotnych korelacji (tab. 7). Dystans Mahalanobisa wyznaczony na podstawie badanych składników struktury plonu nie koreluje z efektami heterozji plonu i pozostałych badanych cech. Brak istotnej korelacji plonu nasion mieszańców złożonych i zrestorowanych z odległością fenotypową wyznaczoną na podstawie dziewięciu cech fenotypowych wykazała także w swojej pracy Liersch (2005).

Wnioski

1. Mimo małego zróżnicowania fenotypowego linii rodzicielskich (linie CMS i linie restorery) stwierdzono występowanie efektów heterozji w plonie nasion mieszańców F_1 .
2. Na podstawie otrzymanych wyników w tej pracy jak i wcześniej opublikowanych nie stwierdzono związku dystansu Mahalanobisa obliczonego dla cech fenotypowych badanych linii CMS *ogura* i restorerów rzepaku ozimego z efektem heterozji utworzonych z nich mieszańców F_1 .

Literatura

- Bartkowiak-Broda I. 1991. Studia nad systemami męskiej niepłodności u rzepaku *Brassica napus* L. var. *oleifera*. Hodowla Roślin Aklimatyzacja i Nasiennictwo, 35: 3-60.
- Bartkowiak-Broda I. 1994. Hodowla odmian mieszańcowych. Rośliny Oleiste – Oilseed Crops, XV (1): 11-20.
- Bartkowiak-Broda I. 1998. Odmiany mieszańcowe rzepaku – osiągnięcia i perspektywy. Rośliny Oleiste – Oilseed Crops, XIX: 359-370.
- Bartkowiak-Broda I., Popławska W., Fürguth A., Mikołajczyk K. 2003. Double low restorer lines of winter rapeseed for CMS *ogura* system. Rośliny Oleiste – Oilseed Crops, XXIV (2): 343-352.
- Grant I., Beversdorf W.D. 1985. Heterosis and combining ability estimates in spring – planted oilseed rape (*Brassica napus* L.). Can. J. Genet. Cytol., 27: 472-478.
- Krystkowiak K., Adamski T., Surma M., Kaczmarek Z. 2009. Relationship between phenotypic and genetic diversity of parental genotypes and the specific combining ability and heterosis effects in wheat (*Triticum aestivum* L.). Euphytica, 165: 419-434.
- Krzymański J., Piętka T., Krótka K. 1993. Zdolność kombinacyjna i heterozja mieszańców diallelicznych rzepaku ozimego podwójnie ulepszanego. I. Pokolenie F_1 . Postępy Nauk Rolniczych, 5: 41-52.
- Krzymański J., Piętka T., Krótka K. 1994. Zdolność kombinacyjna i heterozja mieszańców diallelicznych rzepaku ozimego podwójnie ulepszanego. II. Pokolenie F_1 i F_2 . Rośliny Oleiste, XV (1): 21-32.

- Krzymański J., Piętka T., Krótka K., Michalski K. 1995. Zawartość glukozyzolanów u mieszańców F₁ rzepaku ozimego podwójnie ulepszonego. *Rośliny Oleiste – Oilseed Crops*, XVI (1): 13-24.
- Krzymański J., Piętka T., Krótka K., Michalski K. 1998. Współzależność między plonem nasion a zawartością glukozyzolanów u pokolenia F₁ mieszańców rzepaku ozimego. *Rośliny Oleiste – Oilseed Crops*, XIX (2): 389-398.
- Kudła M. 1996. Ogólna wartość kombinacyjna linii wsobnych i efekty heterozji mieszańców F₁ i F₂ rzepaku ozimego. *Rośliny Oleiste – Oilseed Crops*, XVII (1): 61-72.
- Lefort-Buson M., Datteé Y. 1987. Heterosis and combining ability estimates in spring oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Can J. Genet. Cytol.*, 27: 472-478.
- Liersch A., Bartkowiak-Broda I., Ogrodowczyk M. 2000. Ocena plonowania i cech jakościowych różnych typów odmian mieszańcowych rzepaku ozimego. *Rośliny Oleiste – Oilseed Crops*, XXI (2): 341-358.
- Liersch A., Bartkowiak-Broda I., Ogrodowczyk M. 2004. Analiza zmienności składników plonu oraz wielkości efektu heterozji mieszańców CMS *ogura* rzepaku ozimego. *Rośliny Oleiste – Oilseed Crops*, XXV (2): 371-382.
- Liersch A. 2005. Wpływ zmienności genetycznej na efekt heterozji u rzepaku ozimego. Praca doktorska wykonana w Zakładzie Genetyki i Hodowli Roślin Oleistych IHAR w Poznaniu.
- Michalski K., Kołodziej K., Krzymański J. 1995. Quantitative analysis of glucosinolates in seeds of oilseed rape – effect of sample preparation on analytical results. *Proc. 9th International Rapeseed Congress, Cambridge UK, 4-7.07.1995*, t. 3: 911-913.
- Nowakowska J., Mikołajczak K., Krótka K., Bartkowiak-Broda I. 2004. Ocena dystansu linii rodzicielskich mieszańców F₁ rzepaku ozimego (*Brassica napus* L.) za pomocą metody RAPD. *Rośliny Oleiste – Oilseed Crops*, XXV (2): 353-370.
- Nowakowska J., Bartkowiak-Broda I., Ogrodowczyk M. 2005. Wstępne badania związku między efektem heterozji mieszańców F₁ rzepaku ozimego (*Brassica napus* L.) a dystansem genetycznym linii rodzicielskich. *Rośliny Oleiste – Oilseed Crops*, XXVI (1): 19-33.
- Piętka T., Krótka K., Krzymański J. 2000. Ocena wartości kombinacyjnej mieszańców między liniami wsobnymi rzepaku ozimego i odmianami wykonana w układzie czynnikowym. II. Pokolenia F₁ i F₂. *Rośliny Oleiste – Oilseed Crops*, XXI (2): 329-340.
- Popławska W., Bartkowiak-Broda I., Ogrodowczyk M., Jędrzejowska H. 1999. Badania nad metodą hodowli linii restorerów dla genowo-cytoplazmatycznej męskiej niepłodności typu CMS *ogura* u rzepaku ozimego. *Rośliny Oleiste – Oilseed Crops*, XX (1): 29-42.
- Popławska W. 2000. Badania nad formami restorującymi genowo-cytoplazmatyczną męską niepłodność typu *Polima* i *Ogura* u rzepaku ozimego (*Brassica napus* L. var. *oleifera*). Praca doktorska. wykonana w Zakładzie Roślin Oleistych IHAR w Poznaniu.
- Popławska W., Bartkowiak-Broda I., Liersch A., Fürguth A. 2001. Ocena jakościowa linii restorerów dla CMS *ogura* i ich przydatność do tworzenia zrestorowanych mieszańców pokolenia F₁ rzepaku ozimego (*Brassica napus* L.). *Rośliny Oleiste – Oilseed Crops*, XXII (2): 335-348.
- SERGEN 1998. Program – Analiza serii doświadczeń odmianowych i genetyczno-hodowlanych. Caliński T., Czajka S., Kaczmarek S., Krajewski P., Siatkowski I. IGR PAN w Poznaniu.
- Shengwu Hu, Chengyu Yu, Huixian Zhao, Genlou Sun, Suolao Zhao, Vyvadilova M., Kucera V. 2007. Genetic diversity of *Brassica napus* L. Germplasm from China and Europe assessed by some agronomically important characters. *Euphytica*, 154: 9-16.
- Snowdon R.J., Friedt W. 2004. Molecular markers in *Brassica* oilseed breeding: current status and future possibilities. *Plant Breeding*, 123: 1-8.