



¹ Katedra Agronomii, Wydział Rolnictwa i Biotechnologii, Politechnika Bydgoska,
ul. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska

² Centrum Badawczo-Rozwojowe, ul. Kościelna 1, Śmielin, 89-110 Sadki, Polska

³ Instytut Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie,
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, Polska

* e-mail: darekjas@pbs.edu.pl

DARIUSZ JASKULSKI^{1*}, IWONA JASKULSKA¹,
EMILIAN RÓŹNIAK², MAJA RADZIEMSKA³

Efekty zmian konstrukcyjnych elementów roboczych maszyny do uprawy pasowej. Cz. I: Wydajność eksploatacyjna, zużycie paliwa, emisja CO₂

The effects of design changes to the working elements of a strip-till machine.
Part I: Operating efficiency, fuel consumption and CO₂ emissions

Abstrakt. Innowacyjne rozwiązania materiałowe i konstrukcyjne czynią maszyny rolnicze bardziej doskonałymi, rozwijają ich rynek i umożliwiają wprowadzanie nowych technologii do polowej produkcji roślinnej. Wzrastające zainteresowanie nauki i praktyki rolniczej pasową uprawą roli z jednoczesną aplikacją nawozów i siewem nasion upoważnia do badań nad konstrukcją elementów roboczych maszyny do uprawy strip-till one-pass dostosowywanymi je do pracy w warunkach glebowo-klimatycznych Polski i Europy Środkowo-Wschodniej. W efekcie badań przemysłowych i prac rozwojowych zmieniono kształt zębów uprawowo-aplikujących i redlic siewnych hybrydowej maszyny Mzuri. Powierzchnia elementów pracujących w glebie została utwardzona przez napawanie węglikiem spiekany w celu poprawy parametrów pracy w porównaniu z maszyną standardową. Efektem wprowadzonych zmian było zmniejszenie zużycia oleju napędowego o 3,4–3,8 dm³·ha⁻¹ i emisji dwutlenku węgla do atmosfery o 9,3–10,5 kg CO₂·ha⁻¹ w agrotechnice pszenicy ozimej, rzepaku ozimego, jęczmienia jarego, grochu i kukurydzy. Zmiany konstrukcyjne elementów roboczych zwiększyły wydajność maszyny o szerokości roboczej 4 m o 28,8%, a o szerokości 6 m o 34,0% w porównaniu z maszyną standardową.

Słowa kluczowe: uprawa pasowa, elementy robocze maszyny, wydajność eksploatacyjna, zużycie paliwa, emisja CO₂

Cytowanie: Jaskulski D., Jaskulska I., Różniak E., Radziemska M., 2025. Efekty zmian konstrukcyjnych elementów roboczych maszyny do uprawy pasowej. Cz. I: Wydajność eksploatacyjna, zużycie paliwa, emisja CO₂. *Agron. Sci.* 80(1), 21–35. <https://doi.org/10.24326/as.2025.5471>

WSTĘP

Jednym z warunków doskonalenia technologii uprawy roślin i wykorzystania efektów hodowli jest postęp techniczny, mechanizacyjny, w wyniku którego zwiększa się rynkowy asortyment innowacyjnych narzędzi i maszyn rolniczych [Jiang i in. 2021, Sandhu i in. 2021, Danda 2023]. Badania i prace rozwojowe w tym zakresie obejmują wszystkie etapy powstawania nowych rozwiązań [Wang i Zhang 2019]. Innowacje dotyczą wyboru i modyfikacji materiałów [Gulyarenko i Bembenek 2022], konstrukcji elementów roboczych [Radin i in. 2023], budowy i funkcjonalności podzespołów oraz całych maszyn [Talarczyk i Łowiński 2016]. Trend ten obejmuje również maszyny do uprawy pasowej [Benincasa i in. 2017, Matin i in. 2021, Yang i in. 2023].

Ocena nowych lub dalece zmodernizowanych maszyn może być prowadzona pod różnym kątem, nie tylko konstrukcyjnym, ale również ekonomicznym i oddziaływania na środowisko [Hafezalkotob i in. 2018]. Dla bezpośredniego, końcowego użytkownika, tj. rolnika ważna jest ich wydajność, a także wydajność w stosunku do nakładów i kosztów eksploatacji. Banasiak [2008] definiuje wydajność maszyny jako ilość pracy wykonanej w jednostce czasu lub przypadającej na jednostkę nakładu energii. Taka analiza pozwala wnioskować o wykorzystaniu maszyny w określonych warunkach organizacyjno-produkcyjnych gospodarstwa, w tym ocenę możliwości dotrzymania optymalnych terminów agrotechnicznych, a także o ekonomicznej zasadności inwestycji.

Zmiana konstrukcji maszyn pozwala zwiększyć ich wydajność, poprawić jakość pracy, zmniejszyć zużycie paliwa, a tym samym ograniczyć emisję CO₂ do atmosfery. Dotyczy to zarówno narzędzi do uprawy roli [Celik i in. 2007], jak i siewu czy nawożenia [Bulgakov i in. 2021, Javaid i in. 2023]. Często już niewielkie modyfikacje materiałowo-konstrukcyjne samych elementów roboczych tych maszyn poprawiają wskaźniki eksploatacyjne. Według Astafyev i in. [2021] zmiany konstrukcji zębów brony zwiększyły wydajność roboczą narzędzia o 4–5%, przy jednocześnie mniejszym o 4–5% zużyciu paliwa. Według Zbytka [2010] zamiana konstrukcji pługa z lemiesza i odkładnicy na ząb głębosza uzupełniony zębami kultywatora i talerzami, mimo spalania do tej samej głębokości, pozwoliła zmniejszyć zużycie paliwa o 4,6 dm³·ha⁻¹. Z kolei Aduov i in. [2020] szacują, że zastosowanie w maszynie do siewu bezpośredniego redlic dwutarczowych w kombinacji z dłutowymi i kultywatorowymi pozwala zmniejszyć zużycie paliwa o 10% w porównaniu z tradycyjnymi redlicami rzędowymi. Mniejsze zużycie paliwa ogranicza emisję CO₂ do atmosfery, gdyż podczas spalania 1 dm³ paliwa powstaje według różnych źródeł 2,64–3,76 kg CO₂ [Howey i in. 2011, Manzone i Calvo 2016, Auzins i in. 2021]. Dwutlenek węgla powstający wskutek zużycia paliwa jest częścią całkowitej puli emisji gazów cieplarnianych związanej w połowę produkcją roślinną [Stośić i in. 2021]. Konstrukcja maszyn musi uwzględniać również środowiskowe warunki pracy, tak aby założone cele agrotechniczne i eksploatacyjne mogły być osiągnięte w różnych, często trudnych warunkach, np. glebowych czy klimatycznych [Yazıcı 2024, Zhang i in. 2024].

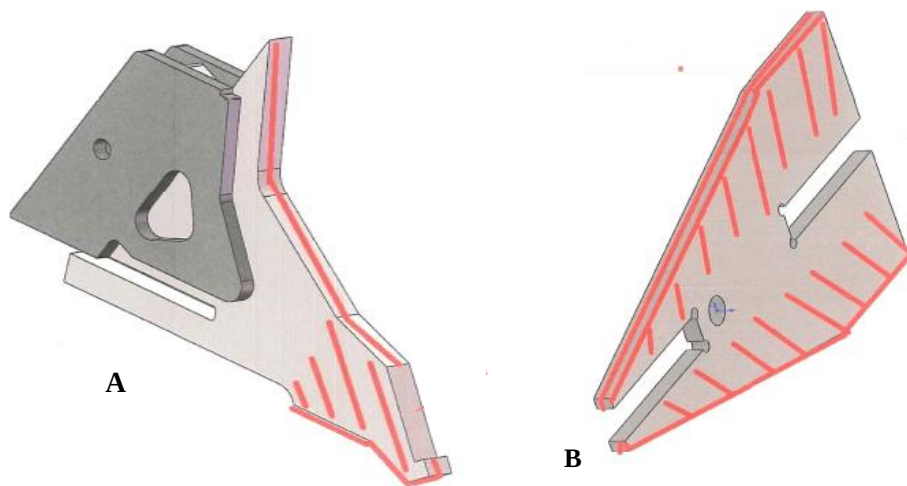
Wobec powyższego można zatem hipotetycznie zakładać, że zmiany konstrukcyjne maszyn rolniczych, także tych do uprawy pasowej, a nawet ich elementów roboczych powodują nie tylko zwiększenie wydajności, ale pozwalają ograniczyć zużycie paliwa i emisję CO₂ do atmosfery. Celem badań była ocena wpływu zmian konstrukcyjnych zębów

spulchniających pasy gleby i aplikujących nawozy mineralne oraz redlic wysiewających nasiona na wydajność maszyny Mzuri Pro-Til pracującej w technologii strip-till one-pass, na zużycie paliwa i emisję CO₂.

MATERIAŁ I METODY

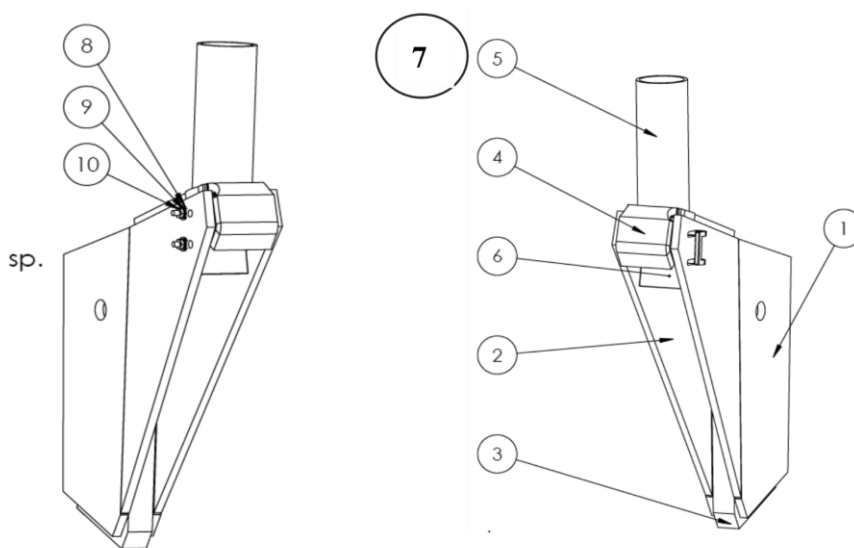
Badania przemysłowe i prace rozwojowe realizowane w ramach projektu ^{\$}PB POIR.01.01.01-00-0910/17 wykonano w latach 2018–2022. W pierwszym etapie dokonano zmian konstrukcyjnych w obrębie zębów spulchniających pasy gleby i aplikujących nawozy mineralne oraz redlic siewnych. Dotychczasowe standardowe zęby spulchniające i aplikujące nawozy ze skrzydłami mieszającymi glebę o szerokości do 15 cm posiadały krótki korpus i kąt natarcia do 5°. Elementy te aplikowały strumień nawozu w strefę spulchnianej gleby bez możliwości regulowania kierunku przepływu. Z kolei redlice siewne, jednakowe do siewu różnych gatunków roślin, posiadały skrzydła boczne formujące bruzdę siewną wyprofilowane łącznie z powierzchniami czołowymi. Materiał konstrukcyjny części roboczych zębów i redlic był utwardzany jedynie przez hartowanie. W efekcie prac projektowych elementom bezpośrednio rozcinającym i mieszającym glebę nadano wydłużone i opływowe kształty, a ich powierzchnie utwardzono przez napawanie węglikiem spiekany (ryc. 1). Wyprofilowano i utwardzono również ściany elementu aplikującego nawóz mineralny, a zastosowanie osłony czołowej i kierownicy (ryc. 2) pozwala na regulowanie jego strumienia w zależności od warunków glebowych i wymagań agrotechnicznych uprawianych roślin. W konstrukcji redlic wysiewających nasiona zastosowano płaskie powierzchnie rozcinające glebę, które utwardzono węglikiem spiekany (ryc. 3). Tak zmienione elementy robocze spulchniające głęboko (do 30 cm) wąskie (do 12 cm) pasy gleby, jednocześnie aplikujące startową dawkę nawozów mineralnych oraz wysiewające nasiona roślin uprawnych zamontowano w hybrydowej maszynie Mzuri, w modelach Pro-Til 4T (szerokość robocza 4 m) oraz Pro-Til 6T XZACT (szerokość robocza 6 m), pracującej w technologii strip-till one-pass.

W drugim etapie badań zweryfikowano pracę nowo skonstruowanych, zmodyfikowanych elementów roboczych (ST-WP) w warunkach pól uprawnych w Centrum Badawczo-Rozwojowym firmy Agro-Land w Śmielinie, województwo kujawsko-pomorskie, Polska (53°09'04.0"N, 17°29'10.7"E; 93,8 m n.p.m.). W dwóch kolejnych latach porównano wydajność eksploatacyjną maszyn Mzuri Pro-Til 4T (szerokość robocza 4 m) w agrotechnice pszenicy ozimej, rzepaku ozimego, jęczmienia jarego i grochu siewnego i Mzuri Pro-Til 6T XZACT (szerokość robocza 6 m) w agrotechnice kukurydzy z wydajnością tych modeli maszyny wyposażonych w tradycyjne, standardowe elementy robocze (ST-T) na plantacjach o powierzchni min. 10 ha. Maszyny współpracowały z ciągnikiem rolniczym Claas Axion 850. Badania przeprowadzono na obszarze objętym klimatem kontynentalnym wilgotnym, klasyfikowanym przez Köppena-Geigera [Peel i in. 2007] jako zimny, bez pory suchej z ciepłym latem (Dfb). Średnia roczna temperatura powietrza w miejscu badań w ostatnich dekadach wynosiła 8,1°C, a suma opadów 485 mm.



Ryc. 1. Schemat napawania zęba spulchniającego (A) i jego wymiennych skrzydeł (B) węglikiem spiekany (linie czerwone)

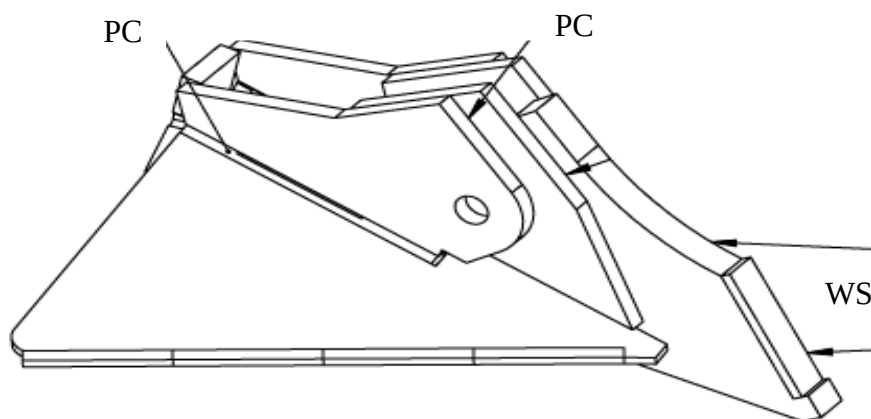
Fig. 1. Diagram of hardfacing of the loosening tooth (A) and its replaceable wings (B) with sintered carbide (red lines)



Ryc. 2. Widok ogólny aplikatora nawozów (7) z kierownicą strumienia: 1, 2 – ścianki boczne, 3 – blacha dystansowa, 4 – osłona czołowa, 5 – rura centralna, 6 – kierownica, 8 – podkładka kolistą, 9 – nakrętka, 10 – sprężyna kierownicy

Fig. 2. General view of the fertilisers applicator (7) with a flow guide: 1, 2 – side walls, 3 – spacer plate, 4 – front cover, 5 – central pipe, 6 – guide, 8 – round washer, 9 – nut, 10 – guide spring

W trakcie badań polowych określono wydajność eksploatacyjną maszyn ($\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$) poprzez bezpośredni pomiar czasu pracy niezbędnego do starannego wykonania czynności agrotechnicznych, takich jak jednoczesne spulchnianie pasów gleby, aplikacja nawozu startowego, siew nasion. Za właściwą jakość pracy maszyny przyjmowano: brak gromadzenia się resztek pozbiorowych przedplonu pomiędzy elementami roboczymi, uformowanie i zagęszczenie gleby w pasach siewnych, brak widocznego nawozu na powierzchni gleby, równomierna zadana głębokość siewu – brak nasion na powierzchni gleby. Zużycie paliwa ($\text{dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) oceniono metodą pełnego zbiornika. Maksymalnie napełniony wypoziomowany zbiornik ciągnika uzupełniano paliwem przy użyciu naczynia miarowego po zakończonej pracy na określonej powierzchni pola rejestrowanej przez komputer pokładowy maszyny.



Ryc. 3. Redlica siewna z płaskimi powierzchniami czołowymi (PC) utwardzonymi węglikiem spiekany (WS)

Fig. 3. Sowing coulter with flat front surfaces (PC) hardened with sintered carbide (WS)

Wyniki wyrażono w jednostkach bezwzględnych, odpowiednio dla wydajności ($\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$) i zużycia paliwa ($\text{dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$). Miarą względną efektu zmian konstrukcyjnych elementów roboczych maszyny była procentowa różnica (+/-) mierzonych wielkości, przyjmując za 100% wielkość właściwą dla maszyny przed zmianami konstrukcyjnymi (standardowe elementy robocze).

Emisję CO_2 ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) podczas uprawy roli, nawożenia przedsiewnego i siewu roślin ozimych oraz jarych będącą efektem zużycia paliwa przez współpracujący ciągnik rolniczy wyliczono, przyjmując, że w wyniku spalania 1 dm^3 oleju napędowego powstaje $2,75 \text{ kg CO}_2$ [Shires i in. 2009].

WYNIKI

Wydajność standardowej maszyny używanej w technologii uprawy roślin ozimych wynosiła w zależności od roku badań i gatunku 2,34–2,56 $\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$ (tab. 1). Użycie zmodyfikowanych elementów roboczych zwiększyło wydajność maszyny o 0,67 $\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$ – uprawa pszenicy ozimej i o 0,66 $\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$ – rzepak ozimy. Względny, średnio w latach badań, wzrost wydajności wyniósł odpowiednio 27,3% i 26,7%.

Tabela 1. Wydajność eksploatacyjna ($\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$) wielofunkcyjnej maszyny do uprawy roli, aplikacji nawozów i siewu w zależności od konstrukcji elementów roboczych – agrotechnika roślin ozimych
Table 1. Operating efficiency ($\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$) of a multifunctional machine for tillage, fertilisers application and sowing depending on the design of working elements – agrotechnics of winter crops

Uprawa Crop	Elementy robocze maszyny Working elements of the machine		Różnica względna Relative difference (+/- %)
	ST-WP	ST-T	100(ST-WP/ ST-T) – 100
pierwszy rok/ first year			
Pszenica ozima Winter wheat	3,13	2,56	+22,3
Rzepak ozimy Winter rapeseed	3,07	2,50	+22,8
drugi rok/ second year			
Pszenica ozima Winter wheat	3,11	2,34	+32,9
Rzepak ozimy Winter rapeseed	3,19	2,43	+31,3
średnio w latach/ average in years			
Pszenica ozima Winter wheat	3,12	2,45	+27,3
Rzepak ozimy Winter rapeseed	3,13	2,47	+26,7

ST-WP – zmodyfikowane elementy robocze/ modified working elements;

ST-T – standardowe elementy robocze/ standard working elements

Jeszcze większy wzrost wydajności maszyny do uprawy w technologii strip-till one-pass po zastosowaniu nowo skonstruowanych elementów roboczych do spulchniania pasów gleby, aplikacji nawozów i wysiewu nasion miał miejsce w agrotechnice roślin jarych (tab. 2). Średnio w latach badań wyniósł on od 27,5% – uprawa grochu do 34,0% – agrotechnika kukurydzy.

Tabela 2. Wydajność eksploatacyjna ($\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$) wielofunkcyjnej maszyny do uprawy roli, aplikacji nawozów i siewu w zależności od konstrukcji elementów roboczych – agrotechnika roślin jarych
 Table 2. Operating efficiency ($\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$) of a multifunctional machine for tillage, fertilisers application and sowing depending on the design of working elements – agrotechnics of spring crops

Uprawa Crop	Elementy robocze maszyny Working elements of the machine		Różnica względna Relative difference (+/- %)
	ST-WP	ST-T	$100(\text{ST-WP}/\text{ST-T}) - 100$
pierwszy rok/ first year			
Jęczmień jary Spring barley	3,17	2,44	+29,9
Groch siewny Pea	3,21	2,73	+17,6
Kukurydza Corn	3,95	2,99	+32,1
drugi rok/ second year			
Jęczmień jary Spring barley	3,37	2,46	+37,0
Groch siewny Pea	3,09	2,21	+39,8
Kukurydza Corn	3,61	2,64	+36,7
średnio w latach/ average in years			
Jęczmień jary Spring barley	3,27	2,45	+33,5
Groch siewny Pea	3,15	2,47	+27,5
Kukurydza Corn	3,78	2,82	+34,0

ST-WP – zmodyfikowane elementy robocze/ modified working elements;

ST-T – standardowe elementy robocze/ standard working elements

Zużycie paliwa podczas pracy wielofunkcyjnej maszyny wyposażonej w tradycyjne elementy robocze uprawiające pasy gleby, aplikujące startową dawkę nawozów i wysiewające nasiona wynosiło w zależności od roku badań i uprawianej rośliny od $16,6 \text{ dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ do $17,9 \text{ dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ – rośliny ozime (tab. 3) i od $15,5 \text{ dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ do $17,5 \text{ dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ – rośliny jare (tab. 4). Zastosowanie zmodyfikowanych elementów roboczych zmniejszyło zużycie paliwa w uprawie wszystkich gatunków roślin, w każdym roku badań. Średnio względne ograniczenie zużycia paliwa w agrotechnice roślin ozimych wyniosło 19,7% – pszenica ozima i 20,0% – rzepak ozimy (tab. 3). Jeszcze większa redukcja nakładu paliwa miała miejsce w agrotechnice roślin jarych, tj. kukurydzy 21,4%, jęczmienia jarego 22,0% i grochu 22,2% (tab. 4).

Tabela 3. Zużycie paliwa ($\text{dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) na jednoczesną uprawę roli, nawożenie i siew roślin ozimych w zależności od konstrukcji elementów roboczych wielofunkcyjnej maszyny

Table 3. Fuel consumption ($\text{dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) for simultaneous tillage, fertilisation and sowing of winter crops depending on the design of the working elements of the multifunctional machine

Uprawa Crop	Elementy robocze maszyny Working elements of the machine		Różnica względna Relative difference (+/- %)
	ST-WP	ST-T	$100(\text{ST-WP} / \text{ST-T}) - 100$
pierwszy rok/ first year			
Pszenica ozima Winter wheat	14,1	17,8	-20,8
Rzepak ozimy Winter rapeseed	14,8	17,9	-17,3
drugi rok/ second year			
Pszenica ozima Winter wheat	13,7	16,6	-17,5
Rzepak ozimy Winter rapeseed	13,1	17,0	-22,9
średnio w latach/ average in years			
Pszenica ozima Winter wheat	13,9	17,3	-19,7
Rzepak ozimy Winter rapeseed	14,0	17,5	-20,0

ST-WP – zmodyfikowane elementy robocze/ modified working elements;

ST-T – standardowe elementy robocze/ standard working elements

Zmiany konstrukcyjno-materiałowe elementów roboczych maszyny spowodowały zmniejszenie emisji dwutlenku węgla będącej skutkiem zużycia paliwa przez współpracujący ciągnik rolniczy. Redukcja emisji CO_2 miała miejsce w agrotechnice każdego gatunku roślin ozimych i jarych w obu latach badań (tab. 5). Średnio zmniejszenie emisji dwutlenku węgla wyniosło od $9,3 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ – kukurydza do $10,5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ – jęczmień jary.

Tabela 4. Zużycie paliwa ($\text{dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) na jednoczesną uprawę roli, nawożenie i siew roślin jarych w zależności od konstrukcji elementów roboczych wielofunkcyjnej maszyny
 Table 4. Fuel consumption ($\text{dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) for simultaneous tillage, fertilisation and sowing of spring crops depending on the design of the working elements of the multifunctional machine

Uprawa Crop	Elementy robocze maszyny Working elements of the machine		Różnica względna Relative difference (+/- %)
	ST-WP	ST-T	$100(\text{ST-WP} / \text{ST-T}) - 100$
pierwszy rok/ first year			
Jęczmień jary Spring barley	13,1	17,1	-23,4
Groch siewny Pea	13,0	16,5	-21,2
Kukurydza Corn	12,1	15,5	-21,9
drugi rok/ second year			
Jęczmień jary Spring barley	13,8	17,5	-21,1
Groch siewny Pea	12,9	16,9	-23,7
Kukurydza Corn	12,8	16,3	-21,5
średnio w latach/ average in years			
Jęczmień jary Spring barley	13,5	17,3	-22,0
Groch siewny Pea	13,0	16,7	-22,2
Kukurydza Corn	12,5	15,9	-21,4

ST-WP – zmodyfikowane elementy robocze/ modified working elements;

ST-T – standardowe elementy robocze/ standard working elements

Tabela 5. Emisja CO₂ (kg·ha⁻¹) podczas uprawy roli, nawożenia i siewu roślin ozimych i jarych w zależności od konstrukcji elementów roboczych wielofunkcyjnej maszyny
 Table 5. CO₂ emission (kg·ha⁻¹) during tillage, fertilisation and sowing of winter and spring crops depending on the design of the working elements of the multifunctional machine

Uprawa Crop	Elementy robocze maszyny/ Working elements of the machine					
	ST-WP	ST-T	ST-WP	ST-T	ST-WP	ST-T
	pierwszy rok badań first year of research		drugi rok badań second year of research		średnio average	
Pszenica ozima Winter wheat	38,8	49,0	37,7	45,7	38,2	47,6
Rzepak ozimy Winter rapeseed	40,7	49,2	36,0	46,8	38,5	48,1
Jęczmień jary Spring barley	36,0	47,0	38,0	48,1	37,1	47,6
Groch siewny Pea	35,8	45,4	35,5	46,5	35,8	45,9
Kukurydza Corn	33,3	42,6	35,2	44,8	34,4	43,7

ST-WP – zmodyfikowane elementy robocze/ modified working elements;

ST-T – standardowe elementy robocze/ standard working elements

DYSKUSJA

Znacząca redukcja nakładów na połowę produkcję roślinną, poprawa efektu ekonomicznego i zmniejszenie jej presji na środowisko są możliwe w pierwszej kolejności przez zmianę technologii. W odniesieniu do uprawy roli oznacza to na przykład zastąpienie klasycznej uprawy płużnej przez uprawę bezpłużną czy siew bezpośredni [Šarauskis i in. 2012]. Drugim działaniem pozwalającym osiągnąć powyższe cele jest doskonalenie elementów roboczych maszyn i narzędzi, zwłaszcza pracujących bezpośrednio w warstwie uprawianej gleby. Według Abbaspour-Gilandeh i in. [2020] nie tylko parametry pracy, tj. głębokość i prędkość, ale również konstrukcja elementów roboczych wpływają znacząco na wskaźniki pracy kultywatorów, tj. zużycie energii i siłę uciągu ciągnika. Innowacje technologiczne i techniczne nie mogą jednak ograniczać produkcji. Wielkość, a zwłaszcza jakość płodów rolnych oraz oddziaływanie na środowisko są warunkiem akceptacji uproszczonych technologii we współczesnym rolnictwie [Woźniak i Rachoń 2020]. Zachowaniu bezpieczeństwa żywnościowego przy jednocześnie wysokim stopniu realizacji rolnictwa prośrodowiskowego służy również pasowa uprawa roli i roślin [Husti i in. 2016].

Relatywnie krótka historia uprawy pasowej (ang. strip-till), od drugiej połowy XX w., sprawia, że aktualnie prowadzone są intensywne badania nad jej doskonaleniem, zwłaszcza w odniesieniu do technologii one-pass, czyli pojedynczego przejazdu [Różewicz 2022]. Prowadzone są również liczne, zagraniczne i krajowe, prace konstrukcyjne oraz testy polowe w zakresie maszyn do jednoczesnej uprawy pasów gleby, aplikacji nawozów i siewu nasion [Talarczyk i Łowiński 2018, Wang i in. 2023], w który to nurt wpisują się również badania własne autorów [Jaskulska i Jaskulski 2020]. Ich uzasadnieniem są wyniki eksperymentów, wskazujące na istotną zależność wskaźników eksploatacyjnych maszyn do uprawy roli od budowy i regulacji ich elementów roboczych. Według Malvajerdi [2023] materiał i rodzaj powierzchni elementów roboczych narzędzi uprawowych oraz parametry ich ustawienia mogą zmieniać siłę trakcyjną nawet o 40–50%. W warunkach intensywnej polowej produkcji roślinnej koniecznym jest ograniczenie tempa zużycia elementów roboczych narzędzi i maszyn do uprawy roli. Wynika to zarówno z przesłanek ekonomicznych, jak i środowiskowych, a jednym z powszechnie stosowanych sposobów wydłużenia ich żywotności jest napawanie [Aramide i in. 2021]. Także w pracach własnych napawano i utwardzano powierzchnie węglikiem spiekany w celu zwiększenia trwałości powierzchni zębów spulchniających pasy gleby oraz redlic umieszczających nasiona w łożu siewnym. Działanie to miało z założenia także zwiększyć wydajność maszyny i ograniczyć zużycie paliwa współpracującego ciągnika rolniczego. Słuszność takiej hipotezy wynika z analizy wcześniejszych badań nad doskonaleniem technologii i techniki strip-till. Lekavičienė i in. [2019] wykazali, że siła trakcyjna, zużycie paliwa i emisja CO₂ przez współpracujący ciągnik z maszyną do uprawy pasowej zależały nie tylko od głębokości pracy zębów spulchniających i prędkości agregatu, ale także od konstrukcji i regulacji elementów roboczych. Wymienione wskaźniki były tym większe, im większy był kąt natarcia między tarczami czyszczącymi pasy spulchnianej gleby z resztek pożywnych, choć wpływ ten był nieistotny statystycznie i mniejszy niż oddziaływanie prędkości i głębokości pracy. Jednak jak wskazują wyniki badań Šarausis i in. [2017], możliwość zmiany wielkości oddziaływania elementu maszyny nawet o niewielkim wpływie na zużycie paliwa i emisję CO₂ pozwala w powiązaniu z innymi optymalizować parametry jej pracy w celu istotnej poprawy efektów eksploatacyjnych i środowiskowych. Matin i in. [2015] udowodnili, że zmiana geometrii ostrza konwencjonalnego noża-zęba stosowanego w uprawie pasowej i pracującego nie na powierzchni, ale głęboko w glebie, pozwoliła zaoszczędzić 20–25% mocy ciągnika.

Stwierdzone w badaniach własnych korzystne wskaźniki eksploatacyjne i środowiskowe maszyny do uprawy pasowej po zmianach konstrukcyjnych jej elementów roboczych mają potwierdzenie w pracach innych autorów. Zwiększenie wydajności maszyny o 26,7–34,0% i zmniejszenie zużycia paliwa o 19,7–22,2% są relatywnie duże, ale osiągnięte nawet po niewielkich zmianach konstrukcyjnych maszyn rolniczych. Li i in. [2022] w efekcie wprowadzenia do agrotechniki pszenicy w technologii uprawy zerowej siewnika z obrotowym elementem spulchniającym pasy gleby typu C o małym promieniu tworzącym bruzdę siewną szerokości 50–60 mm i głębokości 30–50 mm, a także dwa koła gumowane zamiast wałka dociskowego oraz łańcuch stalowy w celu przykrycia ziarna i wyrównania gleby osiągnęli istotnie lepsze parametry pracy w porównaniu z eksploatacją nie tylko tradycyjnej maszyny do głębokiej uprawy, ale i siewnikiem tarczowym z płytką uprawą. Siewnik z innowacyjnymi elementami roboczymi zmniejszył zużycie energii w stosunku do wymienionych maszyn odpowiednio o 51,3% i 24,5%. Z kolei analiza przeprowadzona przez Koguta [2011] i Sarkar i in. [2021] wykazała silnie zróżnicowaną

energochłonność biernych i czynnych narzędzi do uprawy roli wyposażonych w elementy robocze o różnej konstrukcji. Pierwszy z cytowanych autorów, dokonując szerokiego przeglądu elementów roboczych bron talerzowych, spulchniaczy obrotowych, bron aktywnych i kultywatorów w aspekcie ich pracy w warunkach dużej ilości materiału roślinnego (mulczu), czyli w warunkach analogicznych do pracy elementów roboczych maszyn do uprawy pasowej, wskazuje na istotne zróżnicowanie zużycia paliwa i wydajności narzędzi w zależności od konstrukcji talerzy i zębów pracujących w glebie. Najmniej energochłonne podczas pracy na polach mulczowanych są narzędzia bierne. Ich pracę cechuje nawet 4-krotnie mniejsze zużycie paliwa na jednostkę powierzchni uprawianej gleby i jednocześnie wielokrotnie większa wydajność. Według Koguta [2011] narzędzia wyposażone w talerze są właściwe do mulczującej uprawy gleb optymalnie uwilgotnionych na głębokość 4–15 cm. Do głębszej uprawy, 10–25 cm, czyli takiej jaka jest stosowana przy spulchnianiu pasów gleby w technologii strip-till należy stosować kultywatory. Zęby kultywatora lepiej się zagłębiają w glebę, zwłaszcza zwięzłą i przesuszoną.

WNIOSKI

Przeprowadzone prace laboratoryjno-warsztatowe i badania polowe wykazały, że zmiany konstrukcyjne i materiałowe mogą być istotnym, choć często niedocenianym i niedoszacowanym, sposobem doskonalenia maszyn i narzędzi rolniczych. Działania te powinny dotyczyć również elementów roboczych wieloczynnościowych maszyn do pasowej uprawy gleby, aplikacji nawozów i siewu nasion w jednym przejeździe. Badania wykazały, że redukcja i utwardzenie powierzchni bezpośrednio rozcinających i spulchniających glebę zębów uprawowych i redlic wysiewających nasiona zwiększyło wydajność maszyny i zmniejszyło nakład paliwa zużywanego na jednostkę powierzchni pola. W agrotechnice roślin ozimych, pszenica i rzepak, redukcja zużycia oleju napędowego wyniosła średnio w latach testów polowych odpowiednio $3,4 \text{ dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ i $3,5 \text{ dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, a w uprawie roślin jarych – jęczmień, groch, kukurydza – $3,4\text{--}3,8 \text{ dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$. Skutkiem mniejszego zużycia paliwa było ograniczenie emisji dwutlenku węgla do atmosfery o $9,3\text{--}10,5 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1}$. Zmiany konstrukcyjne elementów roboczych zwiększyły również wydajność zarówno maszyny o szerokości roboczej 4 m (28,8%), jak i agregatu o szerokości 6 m (34,0%). Powyższe wskaźniki eksploatacyjne i środowiskowe pracy maszyny po zmianach w obrębie jej elementów roboczych obrazują osiągnięcie zakładanych celów naukowych i użytkowych, ale są jednocześnie wskazaniem potrzeby dalszych prac.

PIŚMIENNICTWO

- Abbaspour-Gilandeh Y., Fazeli M., Roshanianfard A., Hernández-Hernández J.L., Fuentes Penna A., Herrera-Miranda I., 2020. Effect of different working and tool parameters on performance of several types of cultivators. *Agriculture* 10(5), 145. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050145>
- Aduov M., Nukusheva S., Kaspakov E., Isenov K., Volodya K., Tulegenov T., 2020. Seed drills with combined coulters in No-till technology in soil and climate zone conditions of Kazakhstan. *Acta Agric. Scand. – B Soil Plant Sci.* 70(6), 525–531. <https://doi.org/10.1080/09064710.2020.1784994>

- Aramide B., Pityana S., Sadiku R., Jamiru T., Popoola P., 2021. Improving the durability of tillage tools through surface modification – a review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 116, 83–98. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07487-4>
- Astafiyev V.L., Kurach A.A., Amantayev M.A., 2021. The influence of scheme and tillage tool parameters on the material consumption and performance of chain tooth harrow. *J. Water Land Dev.* 50(6–9), 69–73. <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.138162>
- Auzins A., Kazotnieks J., Leimane I., Miglavs A., 2021. Assessment of carbon dioxide emissions from different tillage systems. In: *Proceedings of the 20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development Proceedings*, Jelgava, Latvia 2021, 26–28. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF332>
- Banasiak J., 2008. Wydajnościowa analiza w procesach eksploatacji maszyn rolniczych. *Inżynieria Rolnicza* 4(102), 63–68.
- Benincasa P., Zorzi A., Panella F., Tosti G., Trevini M., 2017. Strip tillage and sowing: Is precision planting indispensable in silage maize?. *Int. J. Plant Prod.* 11(4), 577–588. <http://dx.doi.org/10.22069/ijpp.2017.3719>
- Bulgakov V., Adamchuk O., Pascuzzi S., Santoro F., Olt J., 2021. Research into engineering and operating parameters of mineral fertilizer application machine with new fertilizer spreading tools. *Agron. Res.* 19(S1), 676–686. <https://doi.org/10.15159/AR.21.040>
- Celik A., Boydas M.G., Turgut N., 2007. Comparison of the energy requirements of an experimental plow, a moldboard plow and a disk plow. *Philipp. Agric. Sci.* 90(2), 173–178.
- Danda R.R., 2023. Innovations in agricultural machinery: assessing the impact of advanced technologies on farm efficiency. *J. Artif. Intell. Big Data*, 3(1), 29–48. <https://doi.org/10.31586/jaibd.2023.1156>
- Gulyarenko A., Bembenek M., 2022. The method of calculating ploughshares durability in agricultural machines verified on plasma-hardened parts. *Agriculture* 12(6), 841. <https://doi.org/10.3390/agriculture12060841>
- Hafezalkotob A., Hami-Dindar A., Rabie N., Hafezalkotob A., 2018. A decision support system for agricultural machines and equipment selection: A case study on olive harvester machines. *Comput. Electron. Agric.* 148, 207–216. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.03.012>
- Howey D.A., Martinez-Botas R.F., Cussons B., Lytton L., 2011. Comparative measurements of the energy consumption of 51 electric, hybrid and internal combustion engine vehicles. *Transp. Res. D Transp. Environ.* 16(6), 459–464. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.04.001>
- Husti I., Daróczy M., Kovács I., Béres K., 2016. Strip till: an economic alternative for the Hungarian agriculture. *Hung. Agric. Eng.* 29, 21–23. <http://dx.doi.org/10.17676/HAE.2016.29.21>
- Jaskulska I., Jaskulski D., 2020. Strip-till one-pass technology in Central and Eastern Europe: A MZURI pro-til hybrid machine case study. *Agronomy* 10(7), 925. <https://doi.org/10.3390/agronomy10070925>
- Javaid M.A., Zia-Ul-Haq H.S.M., Iqbal T., Ansar M., Mehmood T., Yaseen G., Asam H.M., Husain M., Islam M.A., Ali I., 2023. Design, development and testing of different shapes of flails for Pak-seeder. *Pure Appl. Biol.* 12(4), 1587–1600. <http://dx.doi.org/10.19045/bspab.2023.120160>
- Jiang S., Wang Q., Zhong G., Tong Z., Wang X., Xu J., 2021. Brief review of minimum or no-till seeders in China. *AgriEngineering* 3(3), 605–621. <https://doi.org/10.3390/agriengineering3030039>
- Kogut Z., 2011. Jakość pracy narzędzi w uprawie gleby z wykorzystaniem mulczu. *Post. Nauk Rol.* 3, 89–102.
- Lekavičienė K., Šarausis E., Naujokienė S., Buragienė S., Kriaučiūnienė Z., 2019. The effect of the strip tillage machine parameters on the traction force, diesel consumption and CO₂ emissions. *Soil Tillage Res.* 192, 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.002>
- Li C.S., Tang Y.L., McHugh A.D., Wu X.L., Liu M., Li M., Xiong T., Ling D., Tang Q., Liao M., Du S., Zhu J., Huang Y., 2022. Development and performance evaluation of a wet-resistant

- strip-till seeder for sowing wheat following rice. *Biosyst. Eng.* 220, 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.05.019>
- Malvajerdi A.S., 2023. Wear and coating of tillage tools: A review. *Heliyon* 9(6), e116669. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e116669>
- Manzone M., Calvo A., 2016. Energy and CO₂ analysis of poplar and maize crops for biomass production in north Italy. *Renew. Energy* 86, 675–681. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.047>
- Matin M.A., Fielke J.M., Desbiolles J.M.A., 2015. Torque and energy characteristics for strip-tillage cultivation when cutting furrows using three designs of rotary blade. *Biosyst. Eng.* 129, 329–340. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.11.008>
- Matin M.A., Hossain M.I., Gathala M.K., Timsina J., Krupnik T.J., 2021. Optimal design and setting of rotary strip-tiller blades to intensify dry season cropping in Asian wet clay soil conditions. *Soil Tillage Res.* 207, 104854. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104854>
- Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11(5), 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Radin S., Shubkin S., Buneev S., Yeletsikh S., 2023. Improving reliability and efficiency of cultivators with S-shape racks. W: A. Beskopylny, M. Shamtsyan, V. Artiukh (red.), XV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2022”. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 575. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21219-2_107
- Rózewicz M., 2022. Review of current knowledge on strip-till cultivation and possibilities of its popularization in Poland. *Pol. J. Agron.* 49(49), 20–30. <https://doi.org/10.26114/pja.iung.488.2022.49.03>
- Sandhu N., Yadav S., Kumar Singh V., Kumar A., 2021. Effective crop management and modern breeding strategies to ensure higher crop productivity under direct seeded rice cultivation system: a review. *Agronomy* 11(7), 1264. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071264>
- Sarkar P., Upadhyay G., Raheman H., 2021. Active-passive and passive-passive configurations of combined tillage implements for improved tillage and tractive performance: A review. *Span. J. Agric. Res.* 19(4), e02R01. <https://doi.org/10.5424/sjar/2021194-18387>
- Šarauskis E., Buragienė S., Romaneckas K., Sakalauskas A., Jasinskas A., Vaiciukevicius E., Karayel D., 2012. Working time, fuel consumption and economic analysis of different tillage and sowing systems in Lithuania. 11th International Scientific Conference ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT. *Proceedings*, Vol. 11, May 24–25, 2012, 52–59.
- Šarauskis E., Vaitauskienė K., Romaneckas K., Jasinskas A., Butkus V., Kriaučiūnienė Z., 2017. Fuel consumption and CO₂ emission analysis in different strip tillage scenarios. *Energy* 118, 957–968. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.121>
- Shires T.M., Loughran C.J., Jones S., Hopkins E., 2009. *Compendium of greenhouse gas emissions methodologies for the oil and natural gas industry*. Prepared by URS Corporation for the American Petroleum Institute (API). API, Washington DC
- Stošić M., Ivezić V., Tadić V., 2021. Tillage systems as a function of greenhouse gas (GHG) emission and fuel consumption mitigation. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28, 16492–16503. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12211-y>
- Talarczyk W., Łowiński Ł., 2016. Maszyny uprawowe i uprawowo-siewne opracowane w Przemysłowym Instytucie Maszyn Rolniczych w Poznaniu. *Techn. Rol. Ograd. Leśna* 2, 18–21.
- Talarczyk W., Łowiński Ł., 2018. Uprawa pasowa, nawożenie zlokalizowane i siew według zasad rolnictwa precyzyjnego. *Techn. Rol. Ograd. Leśna* 1, 8–10.
- Wang Q., Wang B., Sun M., Sun X., Zhou W., Tang H., Wang J., 2023. Design and testing of an automatic strip-till machine for conservation tillage of corn. *Agronomy* 13(9), 2357. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092357>
- Wang J.W., Zhang J.M., 2019. Research on innovative design and evaluation of agricultural machinery products. *Math. Probl. Eng.* 1, 8179851. <https://doi.org/10.1155/2019/8179851>

- Woźniak A., Rachoń L., 2020. Effect of tillage systems on the yield and quality of winter wheat grain and soil properties. *Agriculture* 10(9), 405. <https://doi.org/10.3390/agriculture10090405>
- Yang Y., Hu Z., Gu F., Ding Q., 2023. Simulation and experimental study of the tillage mechanism for the optimal design of wheat rotary strip-tiller blades. *Agriculture* 13(3), 632. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030632>
- Yazıcı A., 2024. Wear on steel tillage tools: A review of material, soil and dynamic conditions. *Soil Tillage Res.* 242, 106161. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106161>
- Zbytek Z., 2010. Work quality index and energy consumption index for two-layer cultivation and deep plough. *J. Res. Appl. Agric.* 55(1), 120–123.
- Zhang B., Jia Y., Fan H., Guo C., Fu J., Li S., Li M., Liu B., Ma R., 2024. Soil compaction due to agricultural machinery impact: A systematic review. *Land Degrad. Dev.* 35(10), 3256–3273. <https://doi.org/10.1002/ldr.5144>

Źródło finansowania: Pracę wykonano w ramach badań przemysłowych i prac rozwojowych współfinansowanych ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego (1.1. Projekt Badawczo-Rozwojowy; 1.1.1. Badania Przemysłowe i Prace Rozwojowe Realizowane przez Przedsiębiorstwa, Program Operacyjny Inteligentny Rozwój) w ramach projektu „Prace badawczo – rozwojowe nad innowacyjnym sposobem pasowej uprawy roli i siewu prowadzące do opracowania wysoce zaawansowanego rozwiązania dostosowanego do warunków panujących w Europie środkowo-wschodniej. Projekt nr: PB POIR.01.01.01-00-0910/17. Beneficjentem projektu była firma Mzuri World sp. z o.o.

Abstract. Innovative material and construction solutions improve agricultural machines, develop their market and enable the introduction of new technologies to field crop production. The growing interest of agricultural science and practice in strip tillage with simultaneous application of fertilisers and sowing of seeds authorizes research on the design of working elements of the strip-till one-pass cultivation machine, adapting them to work in the soil and climatic conditions of Poland and Central and Eastern Europe. As a result of industrial research and development work, the shape of the cultivation-application tines and seeding coulters of the Mzuri hybrid machine was changed. The surface of the elements working in the soil has been hardened by hardfacing with sintered carbide in order to improve the machine's operating parameters compared to a standard machine. The effect of the introduced changes was a reduction in diesel oil consumption by 3.4–3.8 dm³ ha⁻¹ and carbon dioxide emissions into the atmosphere by 9.3–10.5 kg CO₂ ha⁻¹ in the technology of cultivation of winter wheat, winter rapeseed, spring barley, peas and maize. Design changes to the working elements increased the efficiency of the 4 m working width machine by 28.8% and of the 6 m working width machine by 34.0% compared to the standard machine.

Keywords: strip-till, machine working elements, operating efficiency, fuel consumption, CO₂ emissions

Otrzymano/Received: 21.12.2024
Zaakceptowano/Accepted: 27.03.2025
Opublikowano/Published: 19.05.2025