



„Europejski Fundusz Rolny na rzecz Rozwoju Obszarów Wiejskich: Europa inwestująca w obszary wiejskie”

Operacja pn. „*Innowacyjna technologia uprawy warzyw w zamkniętym cyklu wody*” realizowana w ramach działania 16 „Współpraca” Programu Rozwoju Obszarów Wiejskich 2014-2020. Operacja współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Rolnego na rzecz Rozwoju Obszarów Wiejskich.

Innowacyjna technologia uprawy warzyw w zamkniętym cyklu wody

Raport z badań

Wrocław

Wrzesień 2023

SPIS TREŚCI

SPIS TREŚCI.....	2
1. CEL RAPORTU.....	3
2. WSTĘP	3
3. ZAKRES PROJEKTU	3
4. WYMIENNIK CIEPŁA Z JEDNOSTOPNIOWYM WYKRAPLANIEM WILGOCI	4
5. WYMIENNIK CIEPŁA Z DWUSTOPNIOWYM WYKRAPLANIEM WILGOCI	5
6. SYSTEM WSPOMAGANIA WYKRAPLANIA.....	6
7. SYSTEM ODZYSKU WILGOCI ZA POMOCĄ ABSORPCJI	7
7.1. DESORPCJA.....	14
7.2. SORPCJA	19
8. ODZYSK WODY.....	25
9. SKRAPLANIE WODY NA ŚCIANKACH TUNELU	31
10. SYSTEM DO ZADYMIANIA ATMOSFERY POMIĘDZY POWŁOKAMI TUNELU.....	32
11. ODPROWADZANIE CIEPŁA Z TUNELU, A ODZYSK WODY	33
12. BEZGLEBOWA UPRAWA WARZYW W RÓŻNYCH PODŁOŻACH.....	34
13. NAPOTKANE PROBLEMY	59
14. WNIOSKI	60
15. BIBLIOGRAFIA.....	60

1. Cel raportu

Celem raportu jest przedstawienie prac badawczych przeprowadzonych przez Politechnikę Wrocławską oraz Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu w ramach realizacji projektu „Innowacyjna technologia uprawy warzyw w zamkniętym cyklu wody” dofinansowanego przez Agencję Rozwoju i Modernizacji Rolnictwa w ramach Działania 16 Współpraca (umowa o dofinansowanie o dofinansowanie 00022.DDD.6509.00098.2019.01 z dnia 10 marca 2021 r.).

2. Wstęp

W obliczu postępujących zmian klimatu, rosnącej liczby ludności oraz rozwoju gospodarczego zmniejszanie wodochłonności rolnictwa poprzez zamykanie obiegu wody jest jednym z kluczowych zagadnień. Polska charakteryzuje się jednym z najniższych zasobów wody na mieszkańca w Europie. W ostatnich latach na terytorium Polski występowały susze meteorologiczne, które przyczyniły się do niedoborów wody na większości jej terytorium [1]. Prognozy wskazują, że w latach 2061-2090 niedobory wody będą częstsze i bardziej dotkliwe. Natomiast problem zapewnienia stałych dostaw wody będzie dotyczył większości producentów rolnych [2]. Rosnące koszty wody oraz jej ciągłych dostaw do gospodarstw dotyczą nie tylko Polski, ale również większości Europy i świata.

Odpowiedzią na pogłębiający się globalny problem niedoborów wody są innowacyjne rozwiązania zmniejszające wodochłonność upraw rolniczych. Coraz większą popularność zyskuje stosowanie uprawy bezglebowej, która eliminuje utratę wody w gruncie. Straty wody są nawet 10-20 krotnie niższe w stosunku do upraw glebowych [3]. W trakcie wzrostu roślin powstają również istotne straty wody wywołane procesem ewapotranspiracji. Stanowią one od 97-99,5% wody pobranej przez korzenie [4]. Rośliny uprawiane dla pozyskania warzyw takich jak pomidory, papryka czerwona, ogórki transpirują od 550 do 700 kg wody/rok·m² [5]. Jest to ogromna ilość wody, której odzysk może w znacznym stopniu uniezależnić rolników od zewnętrznych dostaw wody.

Niniejszy projekt obejmuje budowę systemu odzysku transpirującej wody i w konsekwencji ograniczenie zużycia wody do poziomu możliwie bliskiego ilości wbudowywanej w rośliny. W ramach proponowanego rozwiązania wykraplanie wody z wilgotnego powietrza zachodzi na wymienniku ciepła o specjalnej konstrukcji współpracującego z układem sorpcyjno/desorpcyjnym. Dodatkowym atutem tego rozwiązania jest usuwanie ciepła z wnętrza tunelu, które ułatwia utrzymanie pożądanej temperatury bez stosowania dodatkowej wentylacji. Przetestowano również możliwości wsparcia procesu odzysku wody poprzez udoskonalenie konstrukcji tunelu oraz zastosowanie dwustopniowego wykraplania. Kompleksowe rozwiązanie będące rezultatem niniejszego projektu może być zastosowane pod osłonami zarówno w uprawach tradycyjnych jak i bezglebowych.

3. Zakres projektu

Zgodnie z wnioskiem konkursowym projekt składa się z następujących prac rozwojowych:

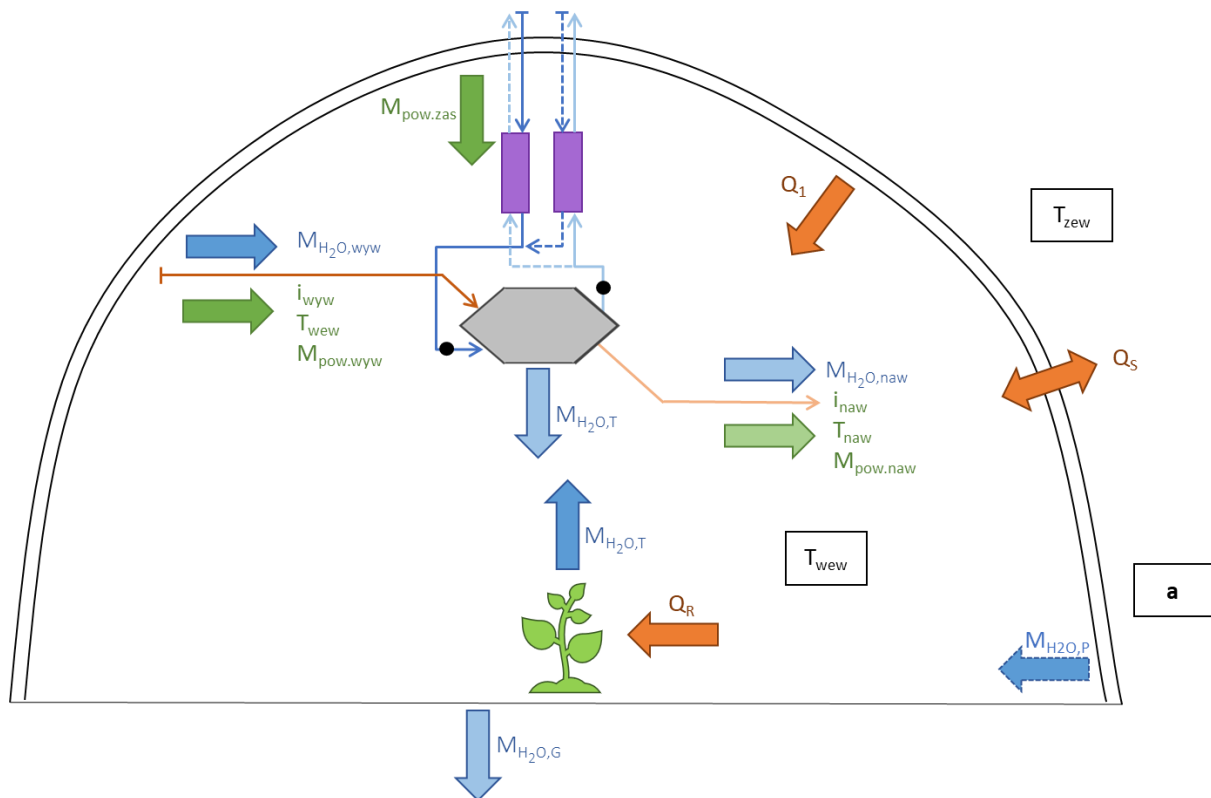
1. Budowa i optymalizacja wymiennika ciepła z jednostopniowym wykraplaniem wilgoci.
2. Budowa i optymalizacja wymiennika ciepła z dwustopniowym wykraplaniem wilgoci.
3. Budowa i optymalizacja systemu wspomaganie wykraplania.
4. Budowa i optymalizacja systemu odzysku wilgoci za pomocą absorpcji.
5. Budowa i optymalizacja szczelnego tunelu umożliwiającego wdrożenie ww. rozwiązań
6. Budowa systemu do zadymiania atmosfery pomiędzy powłokami tunelu.
7. Bezglebowa uprawa papryki w różnych podłożach.

A rezultatami projektu mają być:

- Uzyskanie korzystnych plonów przy funkcjonującym systemie odzysku wody i ciepła.
- Maksymalny odzysk wody przy zachowaniu zadanych parametrów środowiskowych uprawy (T, RH).
- Określone progi opłacalności prowadzenia upraw przy różnych cenach wody, plonów i energii.
- Wzrost świadomości wiedzy rolników, ogrodników.

4. Wymiennik ciepła z jednostopniowym wykraplaniem wilgoci

Na rysunku 1. przedstawiono schemat technologii w układzie z jednostopniowym wykraplaniem.



Rysunek 1. Schemat technologii w układzie z jednostopniowym wykraplaniem.

W klasycznym układzie wykorzystującym wymiennik przeciwprądowy, powietrze usuwane z tunelu (wywiewane) wymienia ciepło/chłód z powietrzem zewnętrznym, które jest do niego dostarczane (nawiewane). W ten sposób następuje wymiana powietrza w układzie, którą zwykle określa się w ilościach wymian powietrza (kubatur) na godzinę. Podstawową różnicą omawianego układu w porównaniu do klasycznego jest brak wymiany powietrza w układzie (wymiany masowej). Zamiast tego powietrze zewnętrzne $M_{pow,zas}$ służy jako medium do pracy z układem sorpcyjnym i następnie z powrotem trafia na zewnątrz. Takie rozwiązanie niesie za sobą szereg konsekwencji. Przede wszystkim nie powoduje obniżenia zawartości dwutlenku węgla w układzie, co z perspektywy uprawy roślin ma pewną zaletę. Dodatkową korzyścią (głównie techniczną) takiego rozwiązania jest możliwość zmiany wielkości strumieni po obu stronach wymiennika, co nie jest możliwe w klasycznym układzie, gdzie oba strumienie muszą być równe.

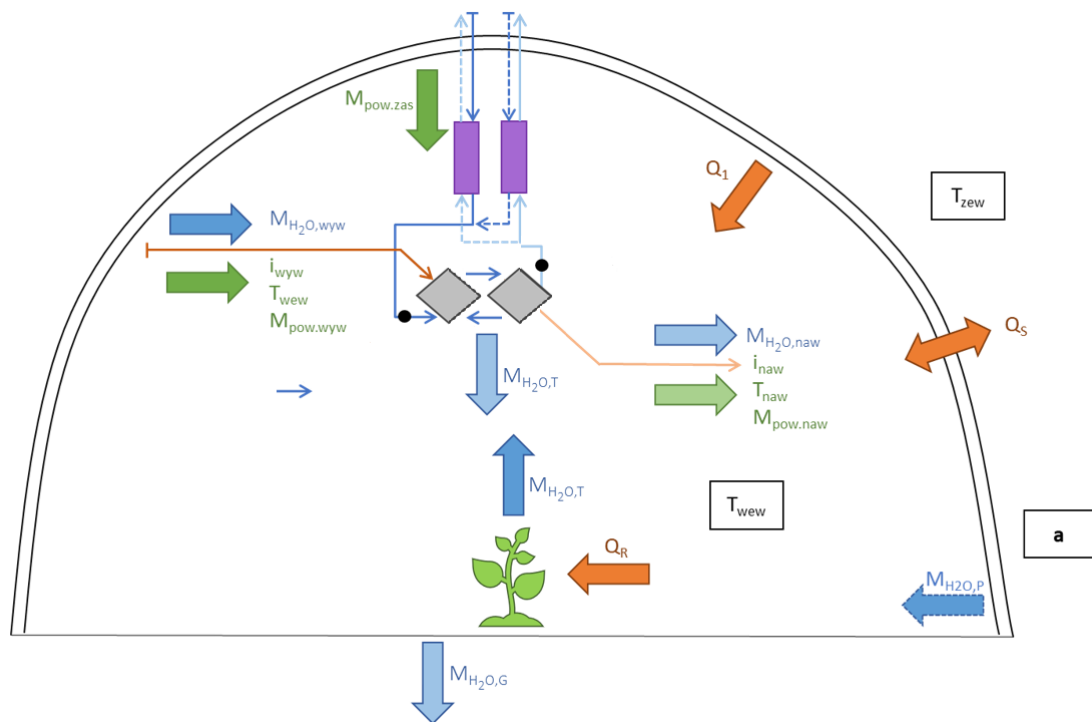
Z drugiej strony, omawiane rozwiązanie uniemożliwia usuwanie nadmiaru ciepła w sposób bezpośredni, poprzez wentylowanie tunelu, co powoduje konieczność ograniczenia zysków ciepła w układzie przez np. ograniczenie promieniowania cieplnego Q_1 .

W projekcie wykorzystano przeciwprądowy wymiennik ciepła do układu sorpcyjnego, nieentalpiczny. Jest to urządzenie o wysokiej sprawności transferu ciepła rzędu 90%. Badania przeprowadzone w

ramach projektu (przedstawione niżej) wykazały, że klasyczny, typowy wymiennik ciepła jak zastosowany w projekcie nie jest kompatybilny z celami projektu. W tym celu wymagane będzie zaprojektowanie nowego, dedykowanego odzyskowi wody, wymiennika ciepła.

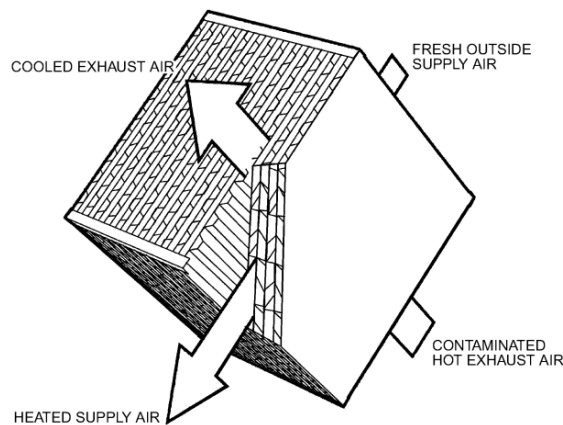
5. Wymiennik ciepła z dwustopniowym wykraplaniem wilgoci

Na rysunku 2. przedstawiono schemat technologii w układzie z dwustopniowym wykraplaniem.



Rysunek 2. Schemat technologii w układzie z dwustopniowym wykraplaniem.

W tym układzie zamiast zastosowania jednego wymiennika przeciwprądowego zaproponowano użycie dwóch wymienników krzyżowych w układzie szeregowym. Podstawową zaletą takiego rozwiązania jest prosta budowa wymiennika krzyżowego, która cechuje się ułożonymi naprzemian warstwami karbowanej przepony, które są obrócone względem siebie o 90 stopni.



Rysunek 3. Schemat wymiennika krzyżowego

(https://www.researchgate.net/publication/301544606_Review_on_Waste_Heat_Recovery_Techniques_in_Air_Conditioning_Application)

W przypadku wymienników przeciwprądowych, ich budowa jest bardziej skomplikowana, co wpływa na ich większą cenę. Dodatkowo dwa wymienniki krzyżowe będą miały mniejszy spadek ciśnienia powietrza, co przekłada się na mniejsze opory przepływu.

Analiza wykazała, że podstawową wadą wymiennika krzyżowego jest jego mniejsza sprawność (50-60%), która jest spowodowana szeregiem stref (głównie w narożnikach), w których wymiana temperatur nie następuje. Kombinacja dwóch szeregowo połączonych wymienników krzyżowych podwyższa ogólną sprawność układu o kilkanaście procent. Sprawność ta jest niższa niż wymiennika przeciwprądowego, co znacząco ogranicza skalę możliwego odzysku wody. Każde 10% sprawności to przynajmniej 1 gH₂O/kg powietrza.

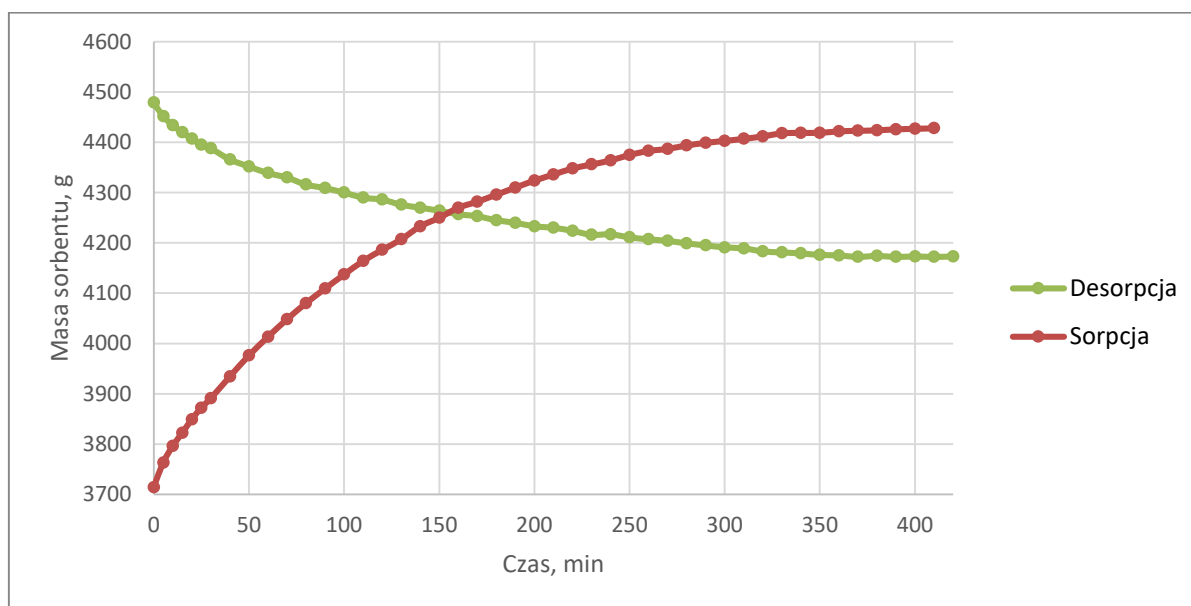
W związku z czym zdecydowano się na prowadzenie dalszych prac wyłącznie na wymienniku przeciwprądowym, którego sprawność w badanych warunkach sięga 90%.

6. System wspomaganie wykrapiania

Analizując zmianę temperatury zewnętrznej w okresie uprawowym można zauważyć, że w nocy występują warunki sprzyjające kondensacji wilgoci zawartej w powietrzu na ściankach wewnętrznych tunelu. W ramach niniejszego projektu przewidziano rozwiązania umożliwiające wykorzystanie tego zjawiska do maksymalizacji odzysku wody z układu.

W przypadku zastosowania tunelu z podwójnej folii, do której wdmuchuje się powietrze z wnętrza tunelu, zjawisko kondensacji pary wodnej zostaje ograniczone. Kierując powietrze zewnętrzne do wewnętrznych ścianek tunelu zwiększa się efektywność wykroplenia wilgoci. Odzyskaną w ten sposób wodę można gromadzić za pomocą systemu rynien usytuowanych przy powierzchni gleby z nachyleniem umożliwiającym grawitacyjny spływ wody. Na podstawie danych literaturowych można przyjąć wykroplenie około 161 kg/rok wody z każdego metra kwadratowego uprawy czerwonej papryki [5]. Skuteczność tego procesu jest zależna od ilości wilgoci transpirowanej przez rośliny, różnicy temperatur i wilgotności względnej wewnątrz tunelu. Uśredniając wyniki obliczeń można się spodziewać do 0,5 kg/d·m² wody wykraplanej na ściankach tunelu [5–7].

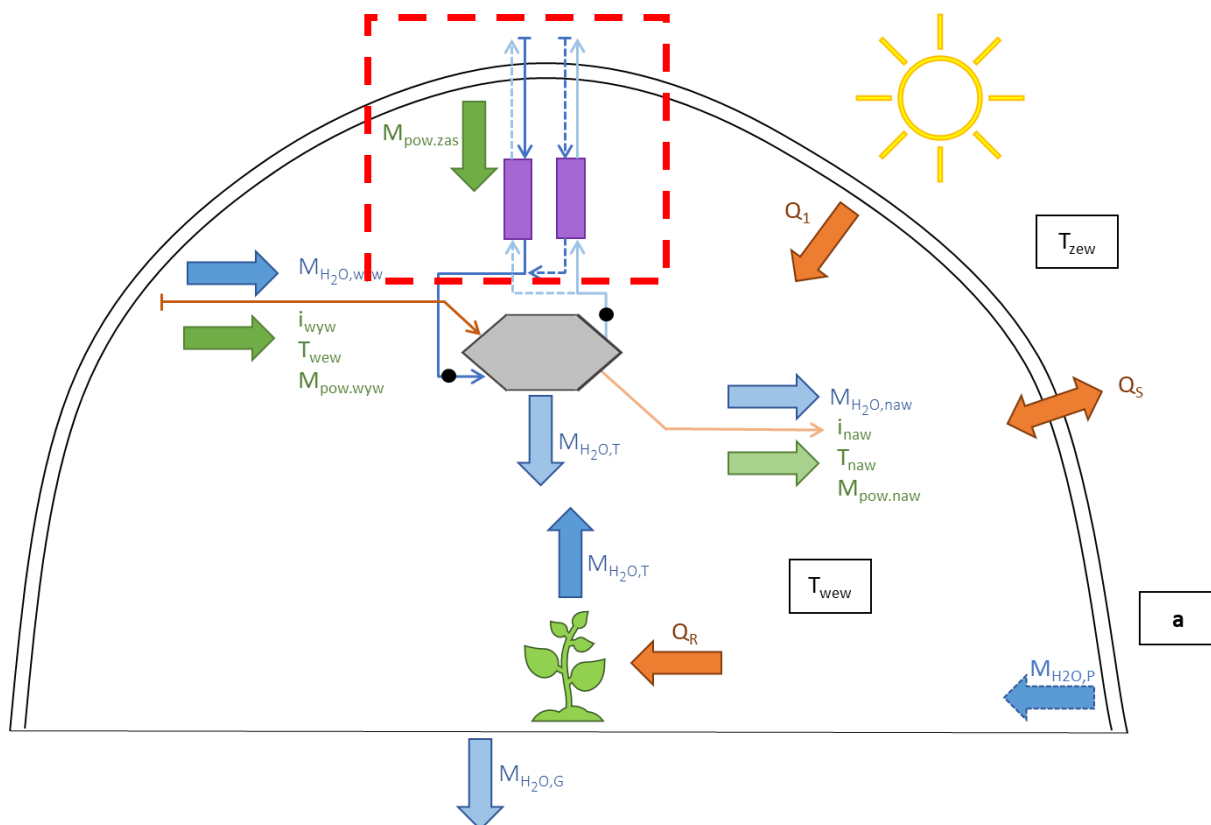
Rozwiązaniem wspomagającym wykrapianie wilgoci jest zastosowanie sorbentu, który niezależnie będzie gromadził wilgoć w czasie dnia i oddawał w nocy. Zastosowanie odpowiednio dużej masy sorbentu umożliwi akumulację wilgoci trwającą nawet kilka godzin. W ramach projektu przetestowano takie rozwiązanie z zastosowaniem silikażelu granulowanego jako sorbentu. Na rysunku 4 przedstawiono wyniki dla złoża o początkowej masie wynoszącej 3,7 kg. W czasie 6 godzin sorpcji zakumulowano blisko 0,7 kg wody, które może być ponownie wykorzystane.



Rysunek 4. Sorpcja ($R_h=60\%$, $T=25^\circ\text{C}$) i Desorpcja ($R_h=30\%$, $T=25^\circ\text{C}$) dla Q powietrza= $120\text{ m}^3/\text{h}$, kasetka D

7. System odzysku wilgoci za pomocą absorpcji

W skład układu wchodzi przynajmniej dwie kolumny sorpcyjne pracujące naprzemiennie w cyklach **sorpcji** i **desorpcji**. Kolumny pracują w równych cyklach czasowych zsynchronizowanych tak, by gdy jedna kolumna pracuje w cyklu desorpcji, druga pracowała w cyklu sorpcji (patrz Rysunek 5).



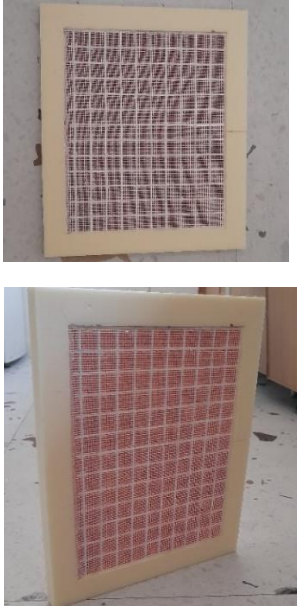
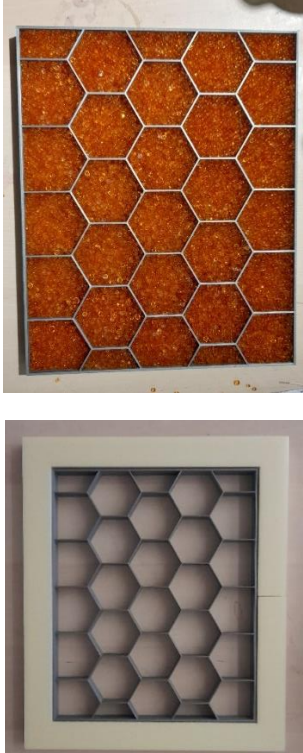
Rysunek 5. Kolumny desorpcji i sorpcji działające naprzemiennie w proponowanym układzie technologicznym

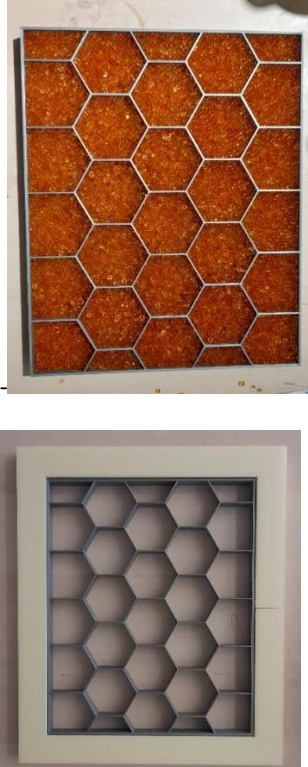
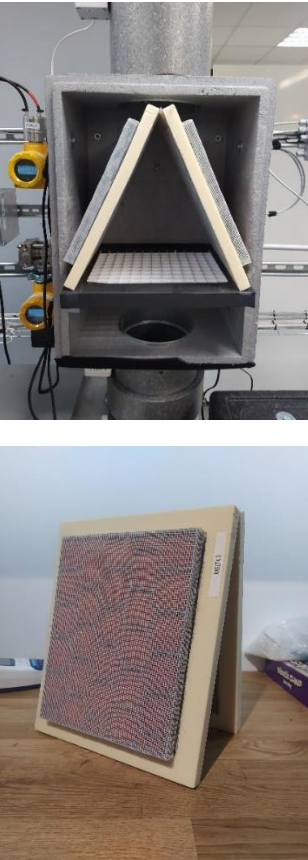
Celem procesu **desorpcji** jest **maksymalne obniżenie temperatury** powietrza zewnętrznego zasysanego do układu. Im niższa jest uzyskana temperatura, tym większy jest możliwy spadek temperatury powietrza w tunelu podczas procesu wymiany ciepła. W konsekwencji są to warunki największego odzysku wody. Bez wydajnego procesu desorpcji, odzysk wody jest praktycznie niemożliwy.



Celem procesu **sorpcji** jest **maksymalne podniesienie temperatury** powietrza wyprowadzanego z układu na zewnątrz. Im wyższa temperatura powietrza wyprowadzanego na zewnątrz, tym większa ilość ciepła odprowadzonego.


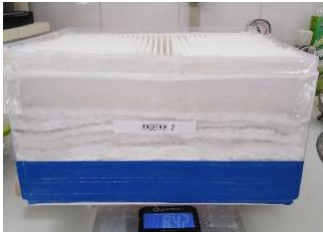

Ze względu na kluczowy charakter desorpcji i sorpcji w proponowanym rozwiązaniu przeprowadzono szeroko zakrojone badania mające na celu wybór optymalnych materiałów sorpcyjnych, rodzaju złoża jak i jego konstrukcji. Poniżej scharakteryzowano wszystkie przetestowane rozwiązania (Tabela 1.)



Tabela 1. Wykonane prototypy kolumn sorpcyjnych

Nazwa Kasety	Budowa kasety	Waga kasety	Rodzaj sorbentu	Waga sorbentu	Zdjęcia
A (1,2.3)	<p>Ramka zewnętrzna z EPS o wymiarach 270 x 320 x 20 mm (szerokość ramki 30 mm),</p> <p>ramka wewnętrzna z tworzywa sztucznego składająca się z małych kwadratów w celu równomiernego rozłożenia sorbentu</p>	160g	Silikażel granulowany, d=2-4mm	720g	
B (1,2.3)	<p>ramka zewnętrzna z EPS o wymiarach 270 x 320 x 20 mm (szerokość ramki 30 mm),</p> <p>ramka wewnętrzna z tworzywa sztucznego składająca się z małych sześciokątów - o wymiarze boku 30mm - w celu równomiernego rozłożenia sorbentu</p>	120g	Silikażel granulowany, d=2-4mm	720g	

<p>C (1,2.3)</p>	<p>Kasety typu B, o poprawionej konstrukcji zapobiegającej wysypywaniu się silikażelu</p>	<p>110g</p>	<p>Silikażel granulowany, d=2-4mm</p>	<p>750g</p>	
<p>D</p>	<p>Dwie kasety typu B o pogrubionej szerokości siatki o 20mm, połączone ze sobą krótszą krawędzią. Istnieje możliwość złożenia kasety lub ustawienia jej w kształcie litery V</p> <p>Ramki zewnętrzne z EPS o wymiarach 270 x 320 x 20mm (szerokość ramki 30mm).</p> <p>Ramka wewnętrzna z tworzywa sztucznego składająca się z małych sześciokątów o wymiarze boku 30mm - w celu równomiernego rozłożenia sorbentu</p>	<p>410g</p>	<p>Silikażel granulowany, d=2-4mm</p>	<p>3200g</p>	

E	<p>Kaseta zbudowana z pleksi o wymiarach 205 x 255 x 130mm, zwieńczona u góry filtrem F9, zamkniętym w ramce z EPS.</p> <p>Napływ powietrza do wnętrza kasety przez podłużne krawędzie znajdujące się wzdłuż dłuższego boku przekrojonego walca; walec wykonany z tworzywa PVC</p>	790g	<p>Tlenek glinu, d>50µm; Silikażel sproszkowany,</p>	Możliwość zasypu różnych ilości sorbentu, fluid	
F	<p>Kaseta w kształcie uciętego ostrosłupa z plexiglas o wymiarach górnej powierzchni 195 x 240mm, dolnej powierzchni 65 x 75mm i wysokości 230mm.</p> <p>Zwieńczona u góry filtrem F9, zamkniętym w ramce z EPS, napływ powietrza do wnętrza kasety przez filtr w dolnej części kasety.</p>	640g	<p>Silikażel sproszkowany, d- nieokreślona</p>	Możliwość zasypu różnych ilości sorbentu, fluid	

<p>G (1,2,3)</p>	<p>Kaseta składa się z kilku warstw włókniny nasyconej silikażelem lub namaczonej w silikażelu;</p> <p>Między dwoma filtrami plisowanymi F9 znajdują się 3 warstwy włókniny filtracyjnej G4, która utrzymuje sorbent w zawieszeniu</p>	<p>740g</p>	<p>Silikażel sproszkowany, d- nieokreślona</p>	<p>Możliwość zasypu różnych ilości sorbentu, nasycona (G1); namaczana (G2, G3)</p>	
<p>H (1,2,3,4, 5)</p>	<p>Kaseta składa się z kilku warstw porowatego materiału nasyconego silikażelem lub namaczonego w silikażelu;</p> <p>Między dwoma filtrami plisowanymi F9 znajdują się warstwy materiału porowatego</p>	<p>880g</p>	<p>Silikażel sproszkowany, d- nieokreślona</p>	<p>Możliwość zasypu różnych ilości sorbentu, nasycona (H1); namaczana (H2, H3)</p>	
<p>I</p>	<p>Środkowa część zbudowana z prostopadłościanu z EPS o długości 750mm i wymiarach przekroju 205 x 260mm;</p> <p>Górna część w kształcie uciętego ostrosłupa – wymiary górnej płaszczyzny 400 x 260mm, zakończona filtrem F9;</p> <p>Dolna część w kształcie uciętego ostrosłupa z plexiglas – wymiary dolnej płaszczyzny 90 x 40mm,</p> <p>Dolna płaszczyzna zabezpieczona przed wysypaniem się sorbentu dodatkową warstwą plexiglas, umożliwiającą napływ powietrza wokół krawędzi wlotowych od boku;</p> <p>Dolna płaszczyzna stabilizowana jest przez dodatkową warstwę plexiglas o wymiarach równych środkowej części 205 x 260mm</p>	<p>600g</p>	<p>Silikażel sproszkowany, d- nieokreślona</p>	<p>Możliwość zasypu różnych ilości sorbentu, fluid</p>	

<p>J</p>	<p>Kaseta z plexiglas w kształcie uciętego graniastosłupa o wymiarach górnej powierzchni 190 x 190mm, dolnej powierzchni 65 x 65mm wysokości 435 mm;</p> <p>Zakończona od góry i od dołu siatką metalową o szerokości oczek 0,07mm oraz ramkami z EPS</p>	<p>250g</p>	<p>Silikażel sproszkowany, d- nieokreślona</p>	<p>Możliwość zasypu różnych ilości sorbentu, fluid</p>	
<p>K</p>	<p>Przewód z PE o średnicy zewnętrznej 50mm i długości 1200mm, z okienkiem rewizyjnym;</p> <p>Zakończony u dołu i u góry siatką stalową o szerokości oczka 0,07mm; w górnej części zamontowano otwór do wymiany sorbentu z zaślepką</p>	<p>200g</p>	<p>Silikażel granulowany</p>	<p>Możliwość zasypu różnych ilości sorbentu, fluid</p>	

7.1. Desorpcja

Najważniejsze wyniki uzyskane dla kolejnych kaset w procesie desorpcji przedstawiono w tabelach (2-5). Spośród rozwiązań przedstawionych w Tabeli 1 kilka osiągało efekty poniżej wymogów minimalnych. Z tego powodu poniższe zestawienie nie zawiera wyników dla kaset: A, C, E, J, K.

Tabela 2. Wyniki pomiarów desorpcji dla kaset B; zmiana temperatury podana po 5 minutach, w pozostałych przypadkach czas podano w nawiasie

Nazwa testu	Temperatura przed [°C]	Wilgotność względna przed [%]	Wilgotność bezwzględna przed [g/m ³]	Maksymalna wilgotność bezwzględna przed [g/m ³]	Deficyt wilgotności [g/m ³]	Masa początkowa kaset [g]	Masa końcowa kaset [g]	Różnica mas według wagi [g]	Różnica mas według pomiarów RH i T [g]	KI [1/min]	Q [m ³ /h]	Zmiana temperatury [°C]
Q=110, 3xB	25	41	9.4	23.0	13.7	3143	2987	156	205	0.0130	110	-4.6 (10min)
Q=110, 3xB	21	61	10.9	17.9	7.0	3177	3133	44	30	0.0580	110	-3.0
Q=110, 3xB	21	40	7.4	18.5	11.1	3163	3050	113	299	0.0280	110	-6.2
Q=110, 3xB	16	63	8.4	13.3	4.9	3167	3143	24	-2	0.1210	110	-3.2
Q=110, 3xB	16	46	6.2	13.6	7.4	3162	3110	52	124	0.0640	110	-5.7
Q=110, 3xB	11	58	5.7	9.7	4.1	3172	3134	38	-21	0.0490	110	-4.0
Q=110, 3xB	17	40	5.6	14.0	8.5	3169	3056	113	336	0.0140	110	-5.2
Q=110, 3xB	30	38	11.3	29.7	18.4	3185	2856	329	238	0.0090	110	-7.8
Q=110, 3xB	31	30	9.6	32.2	22.6	3166	2795	371	692	0.0100	110	-9.2
Q=110, 3xB	22	31	5.9	19.2	13.3	3161	2818	343	157	0.0100	110	-7.6
Q=110, 3xB	20	52	9.0	17.4	8.4	3178	3130	48	204	0.0710	110	-3.8
Q=110, 3xB	15	82	10.5	12.8	2.2	3181	3186	-5	0.4	0.1280	110	-0.3
Q=110, 3xB	16	72	9.9	13.7	3.9	3169	3173	-4.0	40	0.0590	110	-0.3
Q=110, 3xB	16	54	7.4	13.6	6.2	3186	3130	56.0	45	0.0400	110	-3.2
Q=110, 3xB	25	32	7.4	22.9	15.5	3168	2865	303.0	662	0.0090	0.009	-7.3
Q=175, 3xB	21	42	7.8	18.5	10.7	3165	3053	112.0	186	0.0240	0.024	-4.1
Q=175, 3xB	30	35	10.7	30.9	20.2	3168	2912	256.0	767	0.0200	0.020	-6.1
Q=75, 3xB	21	42	7.8	18.6	10.8	3160	3026	134.0	189	0.0070	0.007	-5.9
Q=75, 3xB	30	33	10.0	30.3	20.2	3168	2884	284.0	622	0.0080	0.008	-8.7
Q=120, 4xB	25.4	26.8	6.3	23.6	17.3	4412.0	4099.0	313.0	545.3	0.0094	0.0094	-4.5 (20min)

Tabela 3. Wyniki pomiarów desorpcji dla kaset D, F, I; zmiana temperatury podana po 5 minutach, w pozostałych przypadkach czas podano w nawiasie

Nazwa testu	Temperatura przed [°C]	Wilgotność względna przed [%]	Wilgotność bezwzględna przed [g/m ³]	Maksymalna wilgotność bezwzględna przed [g/m ³]	Deficyt wilgotności [g/m ³]	Masa początkowa kaset [g]	Masa końcowa kaset [g]	Różnica mas według wagi [g]	Różnica mas według pomiarów RH i T [g]	KI [1/min]	Q [m ³ /h]	Zmiana temperatury [°C]
Q=120, D	24.5	31.3	7.0	22.4	15.4	4479	4173	306.0	476.2	0.0087	120	-6.7
Q=50, F, SG	30.2	35.8	11.0	30.6	19.7	1336.0	1303.0	33.0	46.2	0.0040	50	-1.2 (10min)
Q=50, F, TG	30.94	34.06	10.9	31.9	21.1	1278	1275	3.0	-5.8	0.1166	50	-0.6
Q=50, I	33	33	11.6	34.7	23.2	2414	2375	39.0	127	0.0675	50	-7.7 (10min)
Q=50, I	15	73	9.6	13.2	3.6	2371	2351	20.0	-596	0.0914	50	-5.9
Q=50, I	26	39	9.5	24.5	15.0	2365	2319	46.0	-751	0.0663	50	-10.6
Q=50, I	22	46	8.7	19.0	10.3	2336	2297	39.0	-382	0.0437	50	-7.1
Q=50, I	15	51	6.7	13.1	6.3	2316	2294	22.0	-519	0.1733	50	-4.8

Tabela 4. Wyniki pomiarów desorpcji dla kaset G; zmiana temperatury podana po 5 minutach, w pozostałych przypadkach czas podano w nawiasie

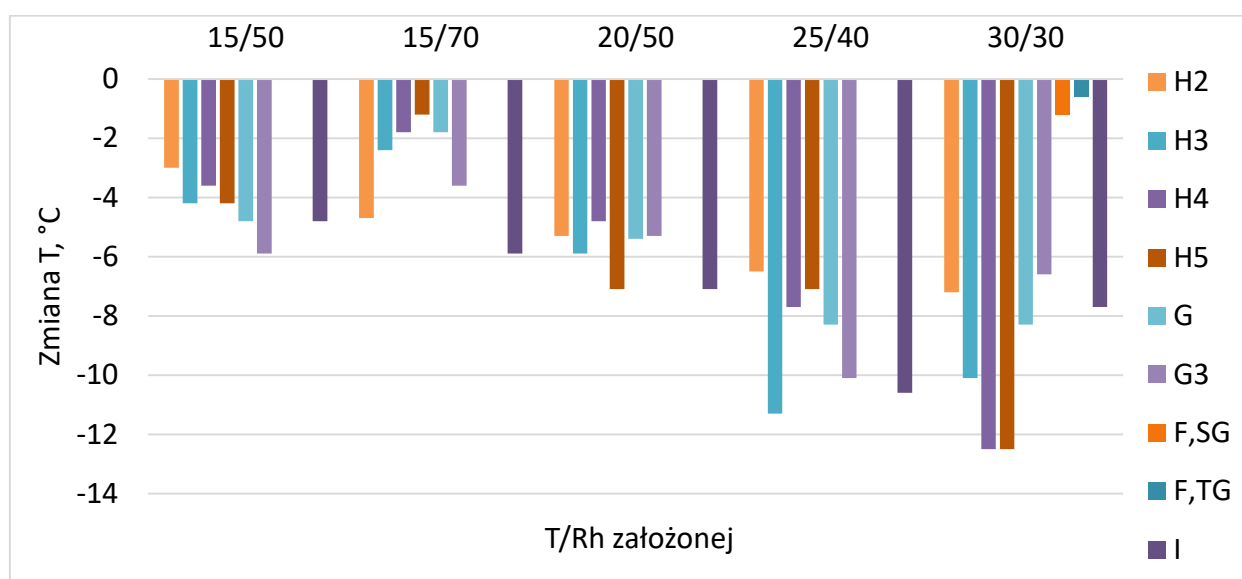
Nazwa testu	Temperatura przed [°C]	Wilgotność względna przed [%]	Wilgotność bezwzględna przed [g/m ³]	Maksymalna wilgotność bezwzględna przed [g/m ³]	Deficyt wilgotności [g/m ³]	Masa początkowa kaset [g]	Masa końcowa kaset [g]	Różnica mas według wagi [g]	Różnica mas według pomiarów RH i T [g]	KI [1/min]	Q [m ³ /h]	Zmiana temperatury [°C]
Q=50, G	31	37	11.7	31.9	20.2	935	910	25.0	-33	0.1509	50	-8.3
Q=50, G	16	73	9.7	13.3	3.6	948	933	15.0	-44	0.0445	50	-1.8
Q=50, G	25	42	9.9	23.5	13.7	945	910	35.0	-34	0.0737	50	-8.3
Q=50, G	21	51	9.2	18.1	8.9	949	914	35.0	-26	0.0508	50	-5.4
Q=50, G	15	54	7.1	13.1	6.0	942	915	27.0	-22	0.0489	50	-4.8
Q=50, G3	30	30	8.9	29.8	20.9	928	911	17.0	-5	0.2302	50	-6.6
Q=50, G3	15	50	6.4	12.8	6.4	950	915	35.0	-31	0.0418	50	-5.9 (15min)
Q=50, G3	21	52	9.5	18.2	8.7	936	908	28.0	-21	0.0850	50	-5.3

Q=50, G3	26	39	9.5	24.1	14.6	935	904	31.0	-23	0.1404	50	-10.1
Q=50, G3	15	70	9.1	13.0	4.0	932	919	13.0	-25	0.1036	50	-3.6

Tabela 5. Wyniki pomiarów desorpcji dla kaset H; zmiana temperatury podana po 5 minutach, w pozostałych przypadkach czas podano w nawiasie

Nazwa testu	Temperatura przed [°C]	Wilgotność względna przed [%]	Wilgotność bezwzględna przed [g/m ³]	Maksymalna wilgotność bezwzględna przed [g/m ³]	Deficyt wilgotności [g/m ³]	Masa początkowa kaset [g]	Masa końcowa kaset [g]	Różnica mas według wagi [g]	Różnica mas według pomiarów RH i T [g]	KI [1/min]	Q [m ³ /h]	Zmiana temperatury [°C]
Q=50, H2	30	31	9.2	29.6	20.4	864	824	40.0	-23	0.0906	50	-7.2
Q=50, H2	15	70	8.9	12.8	3.9	860	847	13.0	-19	0.1615	50	-4.7
Q=50, H2	26	41	9.7	23.9	14.2	857	826	31.0	-23	0.0921	50	-6.5
Q=50, H2	14	51	6.2	12.2	6.0	851	830	21.0	-8	0.0574	50	-3.0 (10min)
Q=50, H2	21	54	9.7	18.1	8.4	854	829	25.0	-18	0.0821	50	-5.3
Q=50, H3	31	33	10.6	32.4	21.8	990	941	49.0	-21	0.1014	50	-10.1 (10min)
Q=50, H3	26	40	10.0	24.7	14.8	992	946	46.0	-29	0.1091	50	-11.3
Q=50, H3	22	54	10.6	19.8	9.1	990	951	39.0	-19	0.0571	50	-5.9 (10min)
Q=50, H3	14	49	6.0	12.3	6.3	995	951	44.0	-31	0.0345	50	-4.2 (10min)
Q=50, H3	14	71	8.8	12.3	3.5	990	975	15.0	-29	0.0320	50	-2.4 (20min)
Q=50, H4	30	27	8.0	29.6	21.6	986	927	59.0	-12	0.0824	50	-12.5
Q=50, H4	21	55	10.2	18.5	8.3	987	939	48.0	-37	0.0187	50	-4.8
Q=50, H4	26	41	9.8	24.1	14.3	987	934	53.0	-33	0.0562	50	-7.7 (10min)
Q=50, H4	16	57	7.6	13.5	5.8	987	948	39.0	-3	0.0309	50	-3.6 (10min)
Q=50, H4	15	75	9.7	12.9	3.2	988	980	8.0	-20	0.0438	50	-1.8
Q=50, H5	14	75	9.0	12.1	3.0	940	935	5.0	-13	0.1395	50	-1.2 (10min)
Q=50, H5	30	29	8.9	31.0	22.1	940	881	59.0	-41	0.1031	50	-12.5
Q=50, H5	14	52	6.4	12.3	5.8	945	899	46.0	-23	0.0367	50	-4.2
Q=50, H5	24	44	9.6	22.1	12.5	943	888	55.0	-47	0.0624	50	-7.1
Q=50, H5	22	52	10.1	19.3	9.3	941	893	48.0	-59	0.0504	50	-7.1

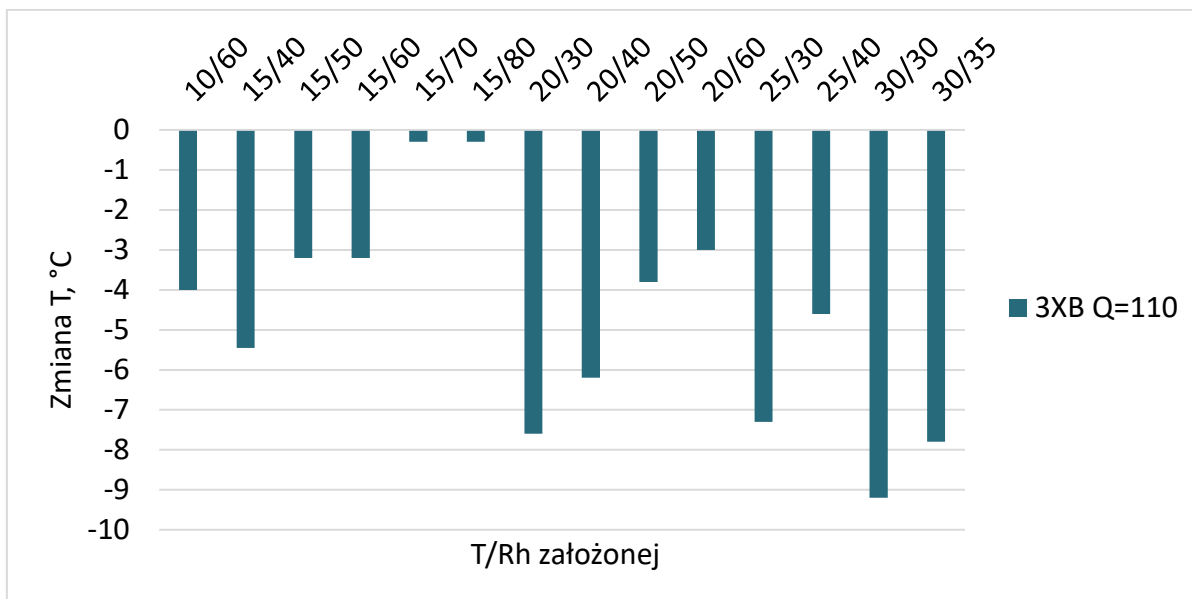
Na rysunku 5 zestawiono maksymalne spadki temperatury uzyskane w procesie desorpcji dla wszystkich kaset testowanych przy przepływie powietrza wynoszącym $50\text{m}^3/\text{h}$. Spośród przetestowanych rozwiązań konstrukcyjnych najwyższą skuteczność (zmiana T o $12,5^\circ\text{C}$) odnotowano dla kaset H (H4, H5) w warunkach początkowych wynoszących 30°C i 30% wilgotności (Rysunek 6). Uzyskany wynik był wyższy o ponad 2°C od pozostałych. Wraz ze spadkiem temperatury początkowej uzyskiwane zmiany temperatury były generalnie niższe dla większości kaset. Kasetą G wykazała taką samą skuteczność w temperaturze początkowej 25 i 30°C . Kasety G i G3 wykazały zbliżoną efektywność do kaset H w warunkach początkowych temperatury poniżej 30°C . Wynika to ze zbliżonej konstrukcji, i wskazuje na wyższą efektywność materiału porowatego zastosowanego w kasetach H niż włókniny filtracyjnej (zastosowanej w kasetach G) w warunkach początkowej temperatury 30°C . Porównywalną skuteczność do kaset G w procesie desorpcji uzyskała kasetą I. Jednak jest to złoże fluidalne, co powodować będzie wyższe koszty inwestycyjne w porównaniu z kasetami G, H.



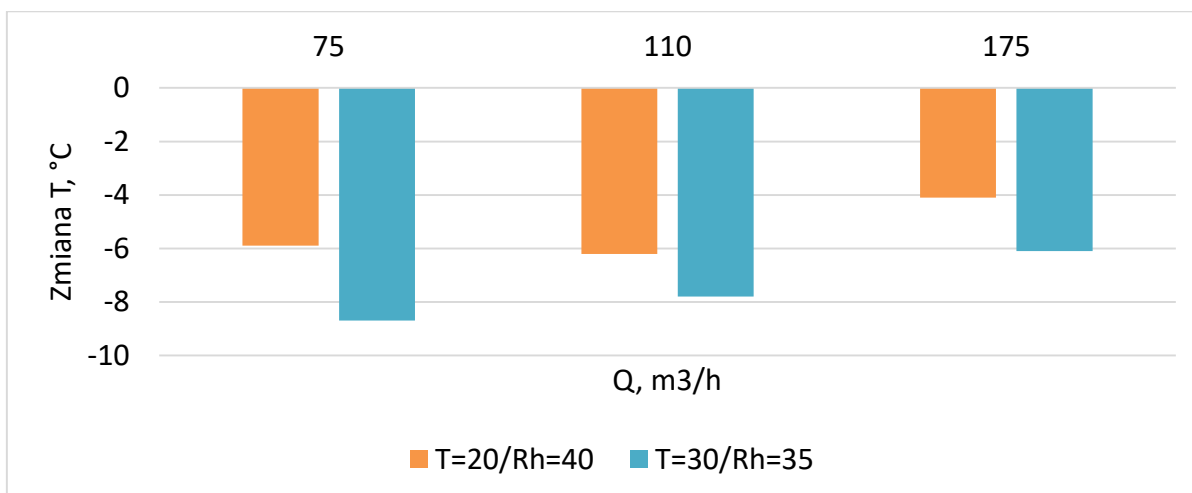
Rysunek 6. Wpływ warunków początkowych (T , Rh) na uzyskany maksymalny spadek temperatury w procesie desorpcji przy przepływie powietrza $Q=50\text{m}^3/\text{h}$

Na rysunku 7 przedstawiono wpływ warunków początkowych (T , Rh) na spadek temperatury w procesie desorpcji z wykorzystaniem trzech kaset B. Wzrost temperatury początkowej powoduje wzrost skuteczności procesu desorpcji. Natomiast wzrost wilgotności prowadzi do spadku efektywności procesu. Gdy wilgotność powietrza zewnętrznego wynosi powyżej 60% odnotowywany spadek temperatury jest bliski zera. Optymalne warunki dla procesu desorpcji wynoszą 30°C i 30% wilgotności

Ponadto, zbadano wpływ wielkości strumienia powietrza na skuteczność desorpcji (Rysunek 8). Niezależnie od warunków początkowej temperatury i wilgotności powietrza, wzrost jego strumienia powyżej $110\text{m}^3/\text{h}$ powodował wyraźny spadek skuteczności procesu desorpcji. Wyniki uzyskane dla $Q=75$ i $110\text{m}^3/\text{h}$ były porównywalne.



Rysunek 7. Wpływ warunków początkowych (T, Rh) na uzyskany maksymalny spadek temperatury w procesie desorpcji przy przepływie powietrza Q=110m³/h



Rysunek 8. Wpływ wielkości strumienia powietrza na skuteczność procesu desorpcji

7.2. Sorpcja

Najważniejsze wyniki uzyskane dla kolejnych kaset w procesie sorpcji przedstawiono w tabelach (6-8). Spośród rozwiązań przedstawionych w Tabeli 1 kilka wykazało różnego rodzaju wady konstrukcyjne, co uniemożliwiło uzyskanie miarodajnych wyników. Z tego powodu poniższe zestawienie nie zawiera wyników dla kaset: A, C, E, F, J, K.

Tabela 6. Wyniki pomiarów sorpcji dla kaset B; zmiana temperatury podana po 5 minutach, w pozostałych przypadkach czas podano w nawiasie

Nazwa testu	Temperatura przed [°C]	Wilgotność względna przed [%]	Wilgotność bezwzględna przed [g/m ³]	Maksymalna wilgotność bezwzględna przed [g/m ³]	Deficyt wilgotności [g/m ³]	Masa początkowa kaset [g]	Masa końcowa kaset [g]	Różnica mas według wagi [g]	Różnica mas według pomiarów RH i T [g]	KI [1/min]	Q [m ³ /h]	Zmiana temperatury [°C]
Q=110, 3xB	20.8	71	12.9	18.1	5.2	2694	3146	452	488	0.0152	110	14.7
Q=110, 3xB	15.6	70	9.3	13.3	4.0	2680	3172	492	398	0.0150	110	11.2
Q=110, 3xB	30.6	68	21.3	31.4	10.1	2641	3135	494	-27	0.0185	110	13.3 (10min)
Q=110, 3xB	25.3	70	16.5	23.5	7.0	2684	3149	465	405	0.0168	110	14.9
Q=110, 3xB	24.4	51	11.3	22.3	10.9	2690	2961	271	32	0.0163	110	9.3
Q=110, 3xB	20.6	51	9.2	17.8	8.7	2654	3079	425	336	0.0112	110	9.6
Q=110, 3xB	14.9	53	6.7	12.8	6.0	2638	3056	418	411	0.0088	110	6.5 (15min)
Q=110, 3xB	15.0	68	8.7	12.8	4.0	2635	3159	524	670	0.0095	110	10.1
Q=110, 3xB	29.1	78	22.6	28.9	6.2	2623	3169	546	349	0.0267	110	22.2
Q=110, 3xB	29.4	53	15.6	29.4	13.9	2658	3031	373	148	0.0169	110	10.9
Q=110, 3xB	15.2	80	10.4	13.0	2.6	2608	3173	565	436	0.0182	110	12.5
Q=110, 3xB	24.4	60	13.2	22.2	9.0	2641	3112	471	335	0.0145	110	11.4
Q=110, 3xB	24.8	82	18.7	22.8	4.1	2652	3173	521	280	0.0261	110	19.2
Q=110, 3xB	18.9	76	12.4	16.2	3.8	2681	3174	493	602	0.0171	110	15.2
Q=110, 3xB	14.7	62	7.8	12.6	4.8	2713	3129	416	124	0.0123	110	8.2
Q=110, 3xB	21.0	61	11.1	18.3	7.2	2685	3147	462	531	0.0114	110	9.3
Q=110, 3xB	29.7	59	17.6	29.9	12.3	2654	3120	466	88	0.0171	110	12.0
Q=175, 3xB	25.4	47.5	11.2	23.5	12.3	2641	2983	342	-42	0.0182	175	9.4
Q=175, 3xB	25.1	61	14.2	23.2	9.1	2647	3121	474	441	0.0214	175	11.3
Q=75, 3xB	26.0	68	16.6	24.4	7.8	2650	3143	493	262	0.0141	75	19.1
Q=75, 3xB	25.3	50	11.8	23.4	11.6	2694	3005	311	226	0.0114	75	10.4

Tabela 6. Wyniki pomiarów sorpcji dla kaset D,I; zmiana temperatury podana po 5 minutach, w pozostałych przypadkach czas podano w nawiasie

Nazwa testu	Temperatura przed [°C]	Wilgotność względna przed [%]	Wilgotność bezwzględna przed [g/m ³]	Maksymalna wilgotność bezwzględna przed [g/m ³]	Deficyt wilgotności [g/m ³]	Masa początkowa kaset [g]	Masa końcowa kaset [g]	Różnica mas według wagi [g]	Różnica mas według pomiarów RH i T [g]	KI [1/min]	Q [m ³ /h]	Zmiana temperatury [°C]
Q=120, D	25.77	61.09	14.69	24.04	9.35	3714	4428	714	146	0.0090	120	12.2
Q=50, I	32	77	25.51	33.25	7.74	2386	2415	29	609	0.0894	50	5.3
Q=50, I	26	74	18.23	24.51	6.28	2376	2396	20	562	0.1092	50	4.7 (10min)
Q=50, I	26.5	47	11.88	25.03	13.16	2346	2351	5	-45	0.0956	50	1.2 (10min)
Q=50, I	19.5	79	13.18	16.78	3.60	2340	2361	21	-1	0.1939	50	4.2
Q=50, I	15.8	70	9.41	13.48	4.06	2333	2337	4	-720	0.2575	50	2.4 (10min)
Q=50, I	22.1	48	9.31	19.49	10.18	2310	2309	-1	-475	0.0000	50	1.8
Q=50, I	14.7	51	6.38	12.60	6.22	2304	2308	4	-545	0.0965	50	1.8 (10min)
Q=50, I	19.0	53	8.57	16.29	7.71	2292	2292	0	-256	0.0000	50	1.2 (20min)

Tabela 7. Wyniki pomiarów sorpcji dla kaset G; zmiana temperatury podana po 5 minutach, w pozostałych przypadkach czas podano w nawiasie

Nazwa testu	Temperatura przed [°C]	Wilgotność względna przed [%]	Wilgotność bezwzględna przed [g/m ³]	Maksymalna wilgotność bezwzględna przed [g/m ³]	Deficyt wilgotności [g/m ³]	Masa początkowa kaset [g]	Masa końcowa kaset [g]	Różnica mas według wagi [g]	Różnica mas według pomiarów RH i T [g]	KI [1/min]	Q [m ³ /h]	Zmiana temperatury [°C]
Q=50, G	29.2	80	23.29	29.00	5.71	906	931	25	-79	0.0829	50	5.9
Q=50, G	25.3	51	11.95	23.42	11.47	909	912	3	-10	0.2688	50	1.2
Q=50, G	18.6	82	12.99	15.92	2.93	906	938	32	-1	0.0316	50	5.3
Q=50, G	15.9	71	9.57	13.55	3.98	910	926	16	-17	0.0497	50	1.8 (20min)
Q=50, G	21.6	62	11.70	18.97	7.27	907	916	9	4	0.0641	50	2.4
Q=50, G	15.6	56	7.46	13.27	5.81	908	913	5	16	0.1385	50	1.2
Q=50, G	25.1	81	18.82	23.14	4.32	909	930	21	-77	0.0501	50	5.3
Q=50, G3	29.8	81	24.21	30.04	5.83	912	927	15	-78	0.2053	50	6.4 (10min)
Q=50, G3	24.6	82	18.55	22.54	3.99	914	932	18	-68	0.0914	50	3.5

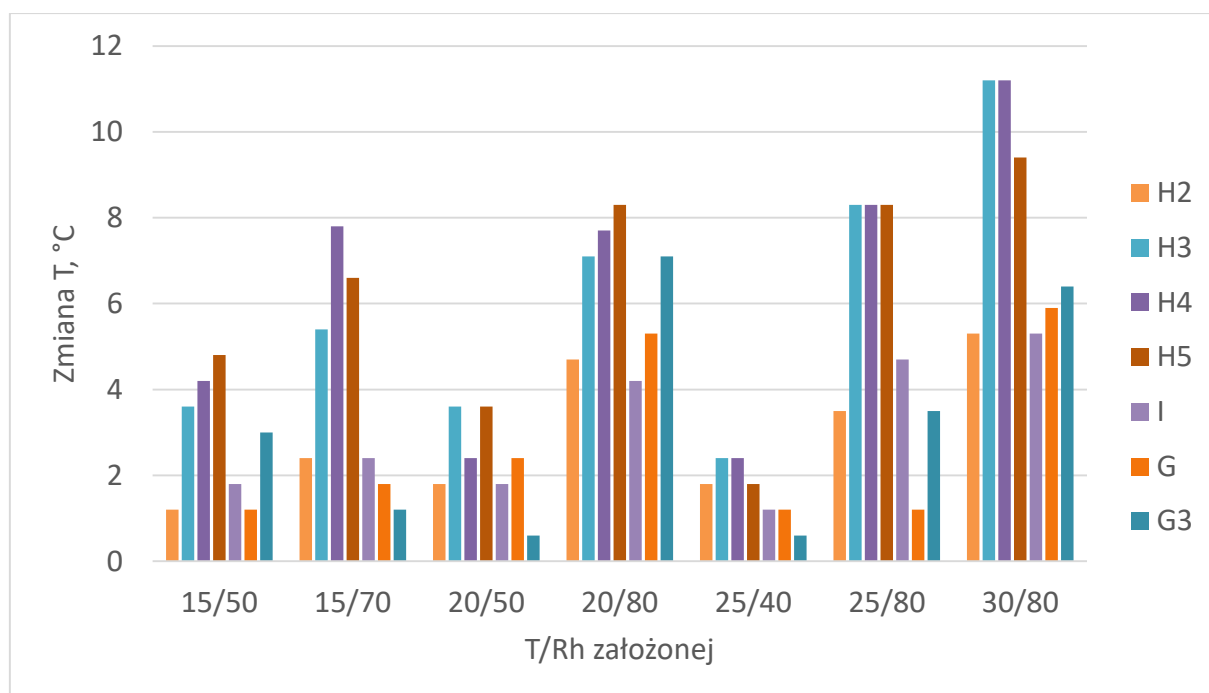
Q=50, G3	19.8	81	13.79	17.12	3.33	909	931	22	-11	0.1120	50	7.1
Q=50, G3	14.3	52	6.40	12.26	5.86	910	910	0	4	0.0268	50	3.0
Q=50, G3	14.2	72	8.81	12.21	3.41	908	920	12	-2	0.0228	50	1.2
Q=50, G3	21.0	51	9.32	18.33	9.00	907	906	-1	-6	0.0912	50	0.6
Q=50, G3	25.9	41	9.92	24.17	14.25	907	905	-2	0	0.6707	50	0.6 (15min)

Tabela 8. Wyniki pomiarów sorpcji dla kaset H; zmiana temperatury podana po 5 minutach, w pozostałych przypadkach czas podano w nawiasie

Nazwa testu	Temperatura przed [°C]	Wilgotność względna przed [%]	Wilgotność bezwzględna przed [g/m ³]	Maksymalna wilgotność bezwzględna przed [g/m ³]	Deficyt wilgotności [g/m ³]	Masa początkowa kaset [g]	Masa końcowa kaset [g]	Różnica mas według wagi [g]	Różnica mas według pomiarów RH i T [g]	Kl [1/min]	Q [m ³ /h]	Zmiana temperatury [°C]
Q=50, H2	30.1	80	24.54	30.51	5.97	827	851	24	-129	0.0810	50	5.3
Q=50, H2	25.0	79	18.21	22.96	4.76	826	853	27	-95	0.0442	50	3.5 (10min)
Q=50, H2	16.9	68	9.74	14.35	4.61	829	843	14	-169	0.0370	50	2.4
Q=50, H2	18.8	78	12.47	16.05	3.58	828	852	24	-39	0.0382	50	4.7
Q=50, H2	16.4	54	7.53	13.95	6.43	826	830	4	25	0.1431	50	1.2
Q=50, H2	26.0	41	9.93	24.39	14.46	829	824	-5	1	1.4250	50	1.8 (15min)
Q=50, H2	20.6	54	9.64	17.88	8.23	821	827	6	0	0.2047	50	1.8
Q=50, H3	29.5	86	25.52	29.55	4.03	938	980	42	-77	0.0976	50	11.2
Q=50, H3	26.0	44	10.60	24.31	13.70	939	945	6	16	0.3366	50	2.4
Q=50, H3	25.4	81	19.13	23.59	4.47	939	973	34	12	0.0848	50	8.3
Q=50, H3	19.1	83	13.53	16.35	2.82	939	988	49	55	0.0381	50	7.1
Q=50, H3	14.5	55	6.85	12.45	5.59	940	951	11	43	0.2083	50	3.6
Q=50, H3	22.2	53	10.48	19.67	9.19	939	946	7	2	0.2566	50	3.6
Q=50, H3	13.9	71	8.52	11.95	3.43	939	970	31	36	0.0512	50	5.4
Q=50, H4	29.1	88	25.28	28.87	3.60	923	986	63	-116	0.0576	50	11.2
Q=50, H4	20.3	79	13.80	17.56	3.76	924	975	51	-18	0.0470	50	7.7
Q=50, H4	25.6	78	18.56	23.82	5.26	924	962	38	-31	0.0707	50	8.3
Q=50, H4	20.7	49	8.83	18.03	9.20	925	936	11	4	0.0907	50	2.4
Q=50, H4	24.7	39	8.85	22.62	13.77	925	931	6	8	0.1919	50	2.4

Q=50, H4	14.2	53	6.51	12.23	5.73	925	942	17	17	0.0910	50	4.2
Q=50, H4	14.6	69	8.62	12.50	3.88	924	956	32	26	0.0586	50	7.8
Q=50, H5	28.2	78	21.54	27.52	5.98	880	925	45	-87	0.0590	50	9.4
Q=50, H5	25.4	79	18.68	23.54	4.86	882	922	40	-35	0.0724	50	8.3
Q=50, H5	25.2	39	9.19	23.33	14.14	882	886	4	9	0.1990	50	1.8
Q=50, H5	21.0	81	14.90	18.33	3.43	881	929	48	9	0.0570	50	8.3
Q=50, H5	20.0	52	9.00	17.27	8.27	883	893	10	-14	0.2338	50	3.6
Q=50, H5	13.9	57	6.83	11.98	5.15	882	898	16	10	0.1500	50	4.8
Q=50, H5	14.0	68	8.20	12.09	3.89	882	914	32	20	0.0463	50	6.6

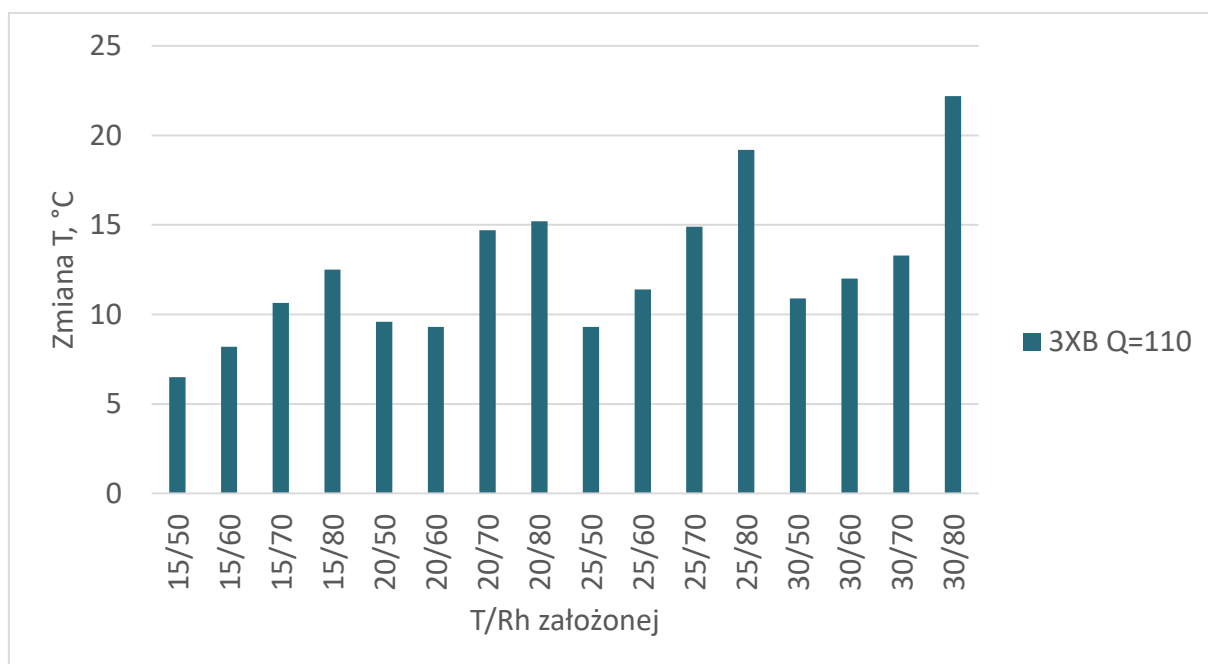
Na rysunku 8 przedstawiono maksymalne odnotowane wzrosty temperatury uzyskane w procesie sorpcji dla wszystkich kaset testowanych przy przepływie powietrza wynoszącym $50\text{m}^3/\text{h}$. Najwyższą skuteczność (zmiana T o $11,2^\circ\text{C}$) odnotowano dla kaset H (H3, H4) w warunkach początkowych wynoszących 30°C i 80% wilgotności (Rysunek 9). Wyniki uzyskane dla kaset H3, H4, H5 były istotnie wyższe od pozostałych w większości zbadanych wariantów. Skuteczność procesu sorpcji wzrasta wraz ze wzrostem wilgotności powietrza. Wzrost temperatury nie ma jednoznacznie pozytywnego wpływu na skuteczność procesu. Jak przedstawiono na rysunku 8 przy stałym poziomie wilgotności (50%) kasety H uzyskały nieznacznie niższe wyniki w temperaturze 20°C niż 15°C . Natomiast zmiana temperatury z 20 do 30°C przy wilgotności wynoszącej 80% skutkowała wzrostem skuteczności procesu.



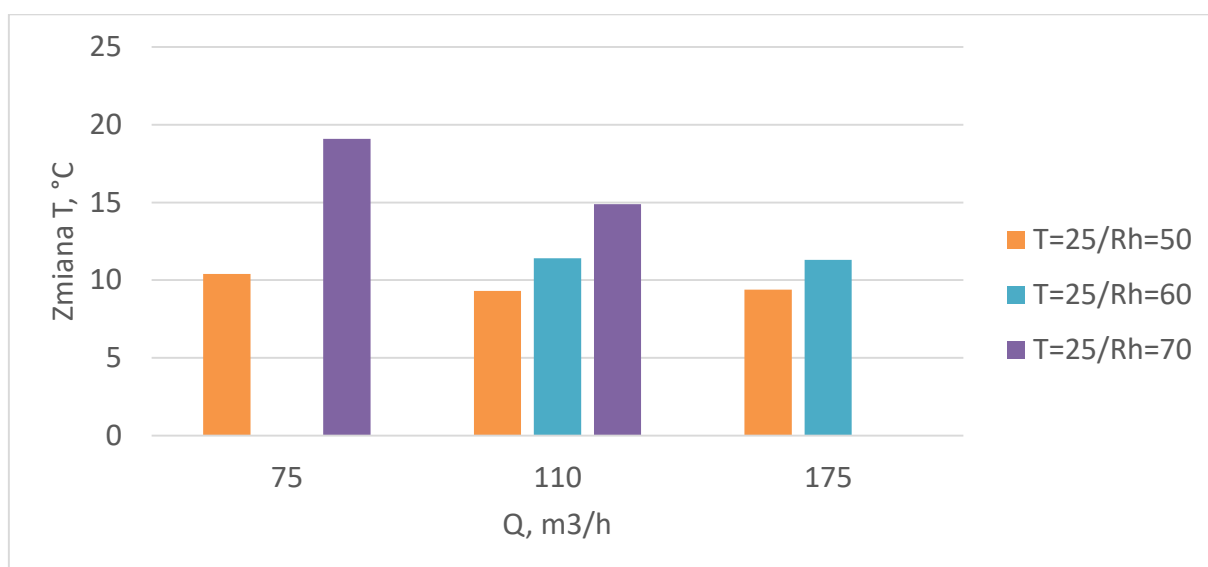
Rysunek 9. Wpływ warunków początkowych (T , Rh) na uzyskany maksymalny wzrost temperatury w procesie sorpcji przy przepływie powietrza $Q=50\text{m}^3/\text{h}$

Na rysunku 10 przedstawiono wpływ warunków początkowych (T , Rh) na wzrost temperatury w procesie sorpcji z wykorzystaniem trzech kaset B. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono wzrost skuteczności procesu sorpcji wraz ze wzrostem wilgotności. Maksymalna uzyskana zmiana temperatury była istotnie wyższa niż w przypadku kaset H i wyniosła $22,2^\circ\text{C}$. Odnotowano również wyraźny wzrost zmian temperatury dla stałej wilgotności powietrza (80%) i rosnącej temperatury początkowej ($15-30^\circ\text{C}$).

Ponadto, zbadano wpływ wielkości strumienia powietrza na skuteczność sorpcji (Rysunek 11). Dla początkowej wilgotności powietrza wynoszącej 50 i 60% nie odnotowano istotnego wpływu wielkości strumienia powietrza na skuteczność procesu. W warunkach początkowej wilgotności wynoszącej 70% odnotowano spadek efektywności procesu wraz ze wzrostem Q .



Rysunek 10. Wpływ warunków początkowych (T, Rh) na uzyskany maksymalny wzrost temperatury w procesie sorpcji przy przepływie powietrza Q=110m³/h



Rysunek 11. Wpływ wielkości strumienia powietrza na skuteczność procesu sorpcji

Na podstawie przedstawionych powyżej wyników do dalszych prac wybrano kasety H. Ich konstrukcja umożliwia najwyższą skuteczność zarówno procesu desorpcji jak i sorpcji, co w konsekwencji zapewni maksymalny możliwy odzysk wody z układu. Ponieważ w większości przypadków maksymalną zmianę temperatury dla obu procesów przedstawioną w tabelach 6-8 uzyskano po upływie 5-10 minut, czas każdego cyklu pracy kolumn sorpcyjnych/desorpcyjnych ustalono jako 10minut.

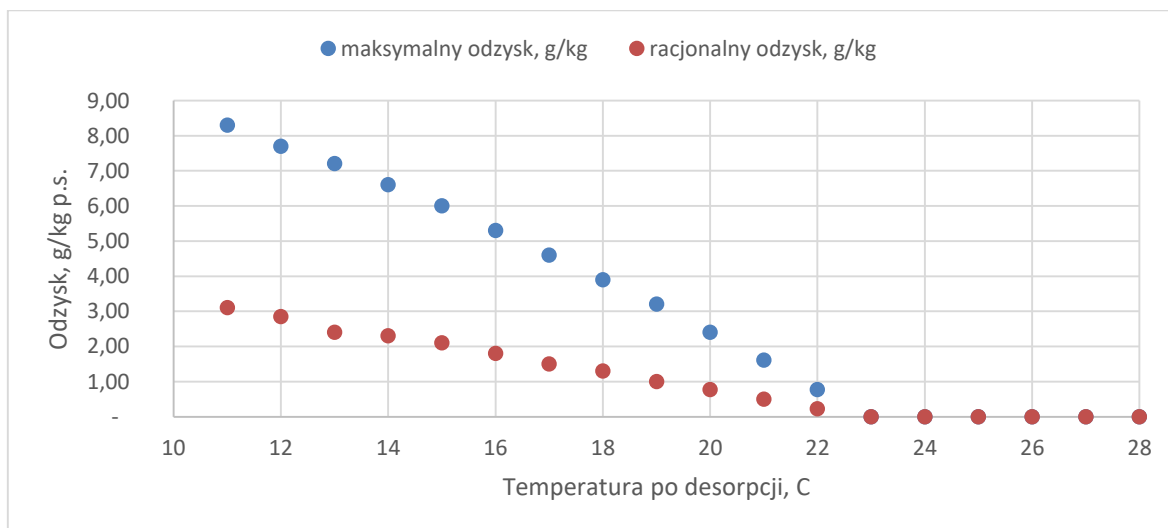
8. Odzysk wody

W ramach projektu przeprowadzono szereg obliczeń, a następnie eksperymentów, mających na celu określenie maksymalnego odzysku wody. Przeanalizowano wpływ zmiany temperatury powietrza zewnętrznego w zakresie 20-30°C przy założeniu stałej wilgotności (Rh=30%) na odzysk wody. Obliczenia dla temperatury i wilgotności powietrza wewnątrz tunelu wynoszących odpowiednio T=30°C i RH=70%

przedstawiono w Tabeli 9. Ponadto w ramach projektu przeprowadzono analogiczne obliczenia i zestawienia tabelaryczne dla pozostałych wariantów temperatury (30, 40°C) i wilgotności powietrza wewnętrznego (60, 70, 80, 90%).

W ramach obliczeń opracowano model matematyczny dla układu z jednym wymiennikiem ciepła. Założono wymianę ciepła ze sprawnością temperaturową wymiennika suchego wynoszącą 90%. Na podstawie uzyskanej temperatury, obliczana jest wilgotność powietrza po wymienniku ciepła. Natomiast różnica wilgotności między powietrzem zewnętrznym przed i po wymienniku stanowi ilość możliwej do odzyskania wody. Wartość ta została pomniejszona o straty związane z wydzielaniem ciepła utajonego w procesie wykrapłania. Zgodnie z przeprowadzonymi obliczeniami (Tabela 9) maksymalny odzysk wody wynoszący 10 kg/h (8,3 g/kg p.s.) jest możliwy do uzyskania dla temperatury zewnętrznej wynoszącej 20°C. Wartość ta stanowi 47% wilgotności powietrza wewnątrz tunelu. Dla uzyskania tak dużego odzysku wody konieczne jest spełnienie założenia, że ciepło utajone uwalniane w procesie wykrapłania wilgoci wewnątrz wymiennika nie ogrzewa strumienia powietrza po desorpcji. W przypadku równomiernego ogrzewania obu strumieni możliwy maksymalny odzysk wody wyniesie około 3,8 kg/h (3,1 g/kg p.s.). Wzrost temperatury na zewnątrz tunelu powoduje spadek gradientu temperatur między strumieniem powietrza po desorpcji a powietrzem wewnątrz, co skutkuje niższym odzyskiem wody. Istotnym parametrem ograniczającym efektywność odzysku wody poprzez wpływ na gradient temperatur jest wilgotność powietrza zewnętrznego. Jeśli jej wartość będzie wyższa niż wyznaczona wartość graniczna (Tabela 9) nie będzie możliwe efektywne obniżenie temperatury w procesie desorpcji. Zależność maksymalnego i racjonalnego teoretycznego odzysku wody od temperatury po desorpcji przedstawiono na rysunku 12. Jak przedstawiono w Tabeli 9 przy temperaturze 30°C na zewnątrz tunelu maksymalny odzysk wody będzie najniższy i wyniesie od 0 do niespełna 2 kg/h.

Wyniki te oznaczają, że rozwiązanie będzie zależne od warunków zewnętrznych. Im wyższa temperatura zewnętrzna tym trudniej będzie wykroplić wodę. Obliczenia te zostały przeprowadzone dla maksymalnego spadku temperatury w procesie desorpcji (ΔT_d) wynoszącym 9°C (jest to realna wartość uzyskana w trakcie badań). Sprawność wykrapłania można więc poprawić, dalej obniżając temperaturę powietrza np. stosując wymiennik gruntowy. Badania takie nie były jednak elementem projektu.



Rysunek 12. Zależność teoretycznego odzysku wody od temperatury strumienia powietrza po desorpcji (dla $T=30^\circ$, $R_h=70\%$)

Tabela 9. Odzysk wody dla różnych warunków temperatury (20-30°C) i stałej wilgotności (RH=30%) powietrza zewnętrznego oraz stałych warunków wewnątrz tunelu uprawowego wynoszących T=30°C i RH=70%

Tz	Xz	Hz	ΔTd	T1	RH1	η	T2	Q M1	Q M2	OWmax		OWr		RHz graniczna
										g/kg p.s.	kg/h	g/kg p.s.	kg/h	
°C	g/kg p.s.	kJ/kg	°C	°C	%	%	°C	kg/h	kg/h	g/kg p.s.	kg/h	g/kg p.s.	kg/h	%
30	7.5	49.4	9	21	74	90	21.9	1210	1210	1.6	1.9	0.5	0.6	40
			8	22	67		22.8			0.8	0.9	0.2	0.3	44
			7	23	61		23.7			0.0	0.0	0.0	0.0	-
			6	24	55		24.6			0.0	0.0	0.0	0.0	-
			5	25	50		25.5			0.0	0.0	0.0	0.0	-
			4	26	45		26.4			0.0	0.0	0.0	0.0	-
			3	27	41		27.3			0.0	0.0	0.0	0.0	-
			2	28	37		28.2			0.0	0.0	0.0	0.0	-
28	6.7	45.4	9	19	77	90	20.1	1210	1210	3.2	3.9	1.0	1.2	37
			8	20	70		21.0			2.4	2.9	0.8	0.9	43
			7	21	63		21.9			1.6	1.9	0.5	0.6	48
			6	22	57		22.8			0.8	0.9	0.2	0.3	53
			5	23	52		23.7			0.0	0.0	0.0	0.0	-
			4	24	47		24.6			0.0	0.0	0.0	0.0	-
			3	25	42		25.5			0.0	0.0	0.0	0.0	-
			2	26	38		26.4			0.0	0.0	0.0	0.0	-
26	6.0	41.5	9	17	81	90	18.3	1210	1210	4.6	5.6	1.5	1.8	35
			8	18	72		19.2			3.9	4.7	1.3	1.6	40
			7	19	65		20.1			3.2	3.9	1.0	1.2	46
			6	20	59		21.0			2.4	2.9	0.8	0.9	-
			5	21	53		21.9			1.6	1.9	0.5	0.6	-
			4	22	47		22.8			0.8	0.9	0.2	0.3	-
			3	23	42		23.7			0.0	0.0	0.0	0.0	-
			2	24	38		24.6			0.0	0.0	0.0	0.0	-

24	5.4	37.9	9	15	85	90	1210	1210	16.5	6.0	7.3	2.1	2.5	33
			8	16	77				17.4	5.3	6.4	1.8	2.2	38
			7	17	69				18.3	4.6	5.6	1.5	1.8	44
			6	18	62				19.2	3.9	4.7	1.3	1.6	50
			5	19	55				20.1	3.2	3.9	1.0	1.2	56
			4	20	49				21.0	2.4	2.9	0.8	0.9	62
			3	21	44				21.9	1.6	1.9	0.5	0.6	69
			2	22	39			22.8	0.8	0.9	0.2	0.3	76	
22	4.8	34.3	9	13	90	90	1210	1210	14.7	7.2	8.7	2.4	2.9	30
			8	14	81				15.6	6.6	8.0	2.3	2.8	36
			7	15	72				16.5	6.0	7.3	2.1	2.5	42
			6	16	64				17.4	5.3	6.4	1.8	2.2	48
			5	17	56				18.3	4.6	5.6	1.5	1.8	54
			4	18	50				19.2	3.9	4.7	1.3	1.6	60
			3	19	45				20.1	3.2	3.9	1.0	1.2	67
			2	20	39			21.0	2.4	2.9	0.8	0.9	-	
20	4.3	31.0	9	11	95	90	1210	1210	12.9	8.3	10.0	3.1	3.8	26
			8	12	86				13.8	7.7	9.3	2.9	3.4	33
			7	13	76				14.7	7.2	8.7	2.4	2.9	39
			6	14	68				15.6	6.6	8.0	2.3	2.8	46
			5	15	60				16.5	6.0	7.3	2.1	2.5	52
			4	16	52				17.4	5.3	6.4	1.8	2.2	60
			3	17	46				18.3	4.6	5.6	1.5	1.8	66
			2	18	40			19.2	3.9	4.7	1.3	1.6	74	

Tz - temperatura powietrza zewnętrznego
RH_z – wilgotność powietrza zewnętrznego
X_z - zawartość wilgoci X powietrza zewnętrznego
H_z - entalpia powietrza zewnętrznego
ΔT_d - spadek T na desorpcji
T1 - temperatura powietrza po desorpcji
RH1 - wilgotność powietrza po desorpcji

η - sprawność wymiennika suchego
T2 - temperatura powietrza M2 opuszczającego wymiennik
QM1; QM2 – przepływ powietrza M1; M2
OW_{max} – maksymalny odzysk wody
OW_r – racjonalny odzysk wody
RH_z graniczna - graniczna wilgotność powietrza zewnętrznego
(maksymalna wilgotność po desorpcji - 90%)

Ww. wyniki zostały zweryfikowane eksperymentalnie w prototypie 1.0 (rysunek 13. i 14., parametry eksperymentu opisano w tabeli 7.)



Rysunek 13. Prototyp 2.0 – urządzenie I



Rysunek 14. Koryto w wymienniku wykonane w celu odzysku wykraplanej wody

Uzyskane wyniki były zbliżone do obliczeń dla wariantu zakładającego równomierne rozchodzenie się ciepła utajonego (tzw. wariant racjonalny). Występowały straty związane z nieszczelnościami oraz wtórnym odparowywaniem wody.

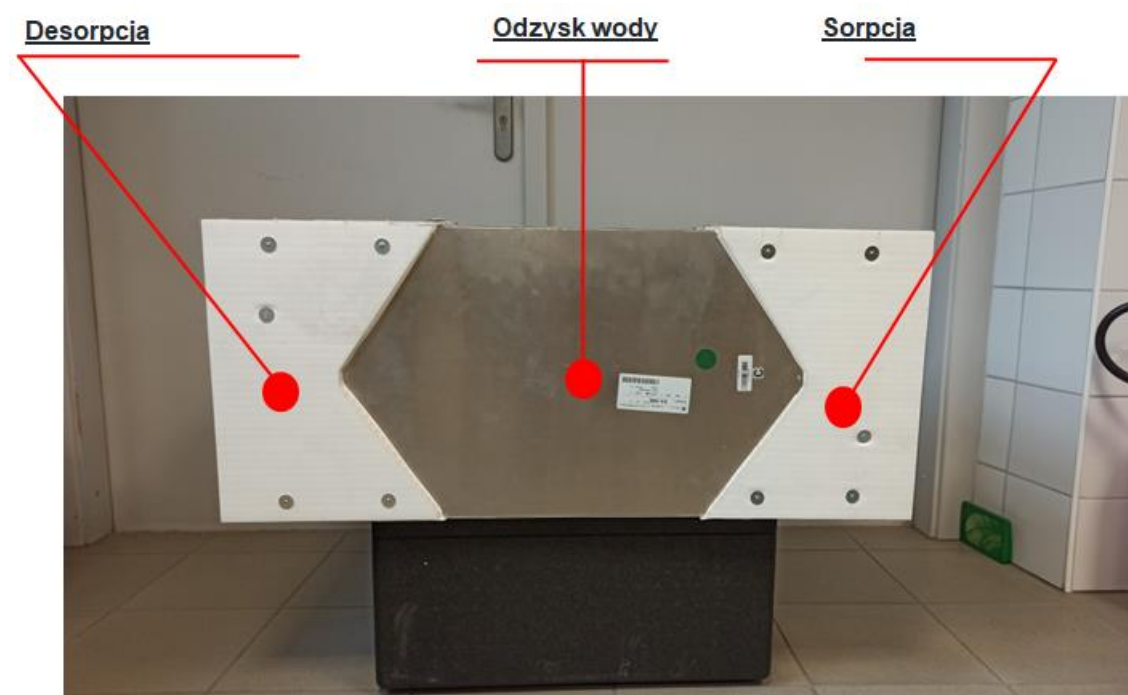
Tabela 7. Parametry eksperymentu weryfikującego odzysk wody

Powietrze po desorpcji	Powietrze z tunelu	Odzysk wody [g/kg p.s]
18 C RH 80, Q=150 m ³ /h	30C, RH 70, Q=150 m ³ /h	1.0
22 C RH 90, Q=150 m ³ /h	30C, RH 70, Q=150 m ³ /h	0.1
11 C RH 90, Q=150 m ³ /h	30C, RH 70, Q=150 m ³ /h	2.6

Link do filmiku pokazującego zachodzący odzysk wody:

https://drive.google.com/file/d/15leUlxAxDI_hXvbbI95Kt4On_bov-A0j/view

Na podstawie uzyskanych wyników wykonano kolejny prototyp (rysunek 15.)



Rysunek 15. Prototyp 2.0 urządzenia do odzysku wody (bez podłączeń i automatyki)

9. Skraplanie wody na ściankach tunelu

W nocy, spadek temperatury zewnętrznej wraz z wysoką wilgotnością w tunelu, może skutkować wykraplaniem wilgoci na ściankach tunelu. W tabeli 7 przedstawiono wyliczenia wykroplonej wody przy założeniu skrajnego scenariusza silnego spadku temperatury zewnętrznej w nocy – do zera °C) i przyjęciu, że możliwy będzie odzysk 80% wody. Obliczenia przeprowadzono dla tunelu o szerokości 10 m długości 12 m i wysokości 4 m. W tunelu posadzone jest 336 papryk, a ilość zużytej wody wynosi 500 l/d (około 1.5 l/d roślinę).

Ilość odzyskanej wody wyniesie około 16 kg/noc. Wykraplanie wody pozwoli na odzysk około 3% wody, co jest wartością niewielką biorąc pod uwagę, że jej uzyskanie wymagać będzie wyposażenia tunelu w system zbierania wykroplonej wody.

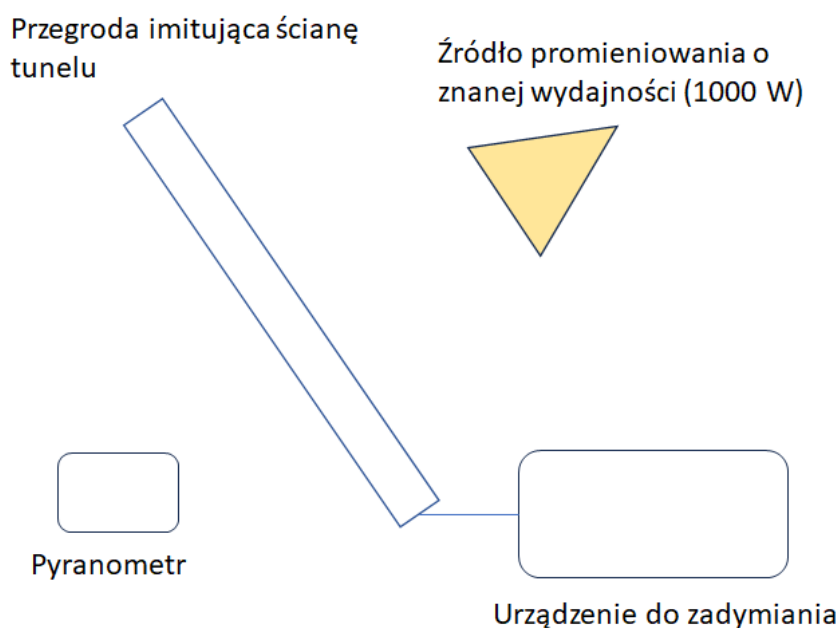
Tabela 8. Obliczenia tempa wykraplania wody na ściankach tunelu.

szybkość skraplania (dla temp wewnątrz 20°C, na zewnątrz 0°C)	4.1	mg/m ² s
wilgotność względna	70	%
powierzchnia ścian	433.4	m ²

czas skraplania	4	h
skraplanie na 1 noc	25.6	kg/noc
skuteczność odzysku	80%	
Realny odzysk	20.5	kg/noc

10. System do zadymiania atmosfery pomiędzy powłokami tunelu

Głównym zadaniem systemu do zadymiania atmosfery pomiędzy powłokami tunelu jest ograniczenie dostępu promieni UV do jego wnętrza i w konsekwencji obniżenie temperatury. Badania nad systemem zadymiania przeprowadzono na modelowym układzie odwzorowującym warunki operacyjne, dla Polski wynoszące 1000W/m^2 nasłonecznienia [8].



Rysunek 16. Schemat stanowiska pomiarowego

Przetestowano zadymianie roztworem gliceryną – typowego środka do tworzenia dymu.

Typowe ściany tuneli w których znajduje się powietrze charakteryzują się przepuszczalnością świetlną na poziomie rzędu 90%.

W eksperymencie uzyskano znaczne obniżenie przepuszczalności świetlnej – przepuszczalność wahała się od 50 do 70%. Nie było możliwe uzyskanie stabilnych warunków. Dodatkowo, skutkiem pobocznym wprowadzenia dymu było bardzo znaczące zabrudzenie powierzchni wewnętrznych – wprowadzany dym był tłusty i oblepił powierzchnie czyniąc je bezużytecznymi.

Ostatecznie, ze względu na brak możliwości ustabilizowania parametrów pracy oraz zabrudzenie powierzchni, rozwiązanie uznano za nie aplikowalne.

Dodatkowo, w toku badań nad ograniczeniem dostępu promieni słonecznych do wnętrza tunelu uprawowego, przeanalizowano doniesienia literaturowe w zakresie aktualnie stosowanych rozwiązań. Zamglawianie jest metodą wykazującą wysoki potencjał zastosowania w proponowanym układzie. Krople o średnicy $2\text{-}60\mu\text{m}$ są rozprowadzane przez dysze, a następnie wznoszone przez strumień powietrza w szklarni. Krople wody odparowują absorbując ciepło jawne, co skutkuje obniżeniem temperatury i zwiększeniem wilgotności powietrza [9]. Jak wykazano powyżej, skuteczność odzysku

wody transpirowanej przez rośliny jest zależna w dużym stopniu od wilgotności. Kontrola wilgotności za pomocą zamgławiania może zmaksymalizować odzysk wody i w ten sposób zoptymalizować proces.

11. Odprowadzanie ciepła z tunelu, a odzysk wody

Działanie systemu odzysku wody wymaga ograniczenia wymiany powietrza pomiędzy wnętrzem tunelu, a otoczeniem. Pozwala to zatrzymać transpirującą wodę wewnątrz, ale skutkuje również akumulacją ciepła.

Przeprowadzono obliczenia oparte o bilans masy i bilans termiczny uprawy tunelowej (tabela 9.). Obliczenia przeprowadzono dla tunelu o szerokości 10 m długości 12 m i wysokości 4 m. W tunelu posadzone jest 336 papryk, a ilość zużytej wody wynosi 500 l/d (około 1.5 l/d roślinę).

Tabela 9. Strumienie powietrza potrzebne do odzysku wilgoci i odprowadzenia ciepła

Ciepło transpiracji wody z roślin Q_R	8.1	kW
Masa wody transpirującej $M_{H_2O,T}$	11.6	kg/h
Strumień wody wykropłonej	11.6	kg/h
Zmiana wilgotności bezwzględnej	5	g/m ³
Współczynnik proporcji strumieni	1	
Strumień powietrza po stronie tunelu	2322	m³/h
Strumień powietrza w układzie sorpcji-desorpcji	2322	m³/h
Ciepło parowania wody c_{H_2O}	2501	kJ/kg
Strumień ciepła od promieniowania słonecznego	32.2	kW
Współczynnik rozproszenia światła na ścianach	0.8	
Współczynnik przepuszczalności folii	0.419	
Natężenie promieniowania słonecznego	800	W/m ²
Strumień ciepła przekazywany przez ściany zew.	12.4	kW
Pole powierzchni ścian	433.4	m ²
Współczynnik przenikania ciepła dla ściany	5.7	W/m ² K
Różnica temperatur	5	K
Strumień ciepła do wywiania z tunelu ze względu na zyski ciepła	12	kW
Strumień powietrza do wywiania z tunelu ze względu na zyski ciepła	7021	m³/h

Dla przedstawionego przykładu, wymagany strumień powietrza przepływającego przez układ odzysku wody wynosi przynajmniej 7000 m³/h, przy czym wartość ta jest podyktowana bilansem cieplnym tunelu. Dla uzyskania zakładanego odzysku wody wystarczający jest strumień 3 krotnie mniejszy – 2322 m³/h.

Ponieważ wielkość układu jest wprost proporcjonalna do jego przepustowości w m³/h, ograniczenie ilości ciepła dostającego się do tunelu jest kluczowe.

12. Bezglebowa uprawa warzyw w różnych podłożach

1. Obiekt uprawowy i technologia uprawy

Doświadczenia wegetacyjne z uprawą wybranych gatunków warzyw prowadzono w nowoczesnym bloku foliowym o podwójnej warstwie folii pomiędzy którymi utrzymywana jest poduszka powietrzna. Takie rozwiązanie zapewnia lepsze nagrzewanie powietrza i gleby w tunelu wczesną wiosną oraz zapobiega przegrzewaniu atmosfery w obiekcie latem po pokryciu folii specjalnym preparatem cieniującym. Tego typu obiekt uprawowy zapewnia lepsze warunki do wzrostu i rozwoju roślin w porównaniu do klasycznych tuneli z jedną warstwą folii. Tunele dwuwarstwowe są wykonane z wietrzeniem w kalenicy, część dachu można otwierać co umożliwi lepszą kontrolę wilgotności i temperatury w obiekcie. W konsekwencji rośliny rosną lepiej i wydają większe plony.

Warzywa w nieogrzewanych tunelach foliowych zazwyczaj uprawia się z gleby znajdującej się pod obiektem. Przez pierwsze kilka cykli uprawowych zazwyczaj zapewnia to dobre efekty uprawowe. Niestety po pewnym czasie pojawia się presja chorób odglebowych które rozwijają się i przetrwalnikują na resztkach poźniwnych. Stanowi to ogromne zagrożenie dla kolejnych upraw ponieważ obecnie mamy ograniczoną liczbę środków do odkażania gleby. Skuteczne preparaty zostały wycofane z powodu ryzyka jakie stwarzają dla środowiska lub konsumentów. Z tego powodu odizolowanie systemu korzeniowego od gleby rodzimej poprzez uprawę w różnych podłożach jest skutecznym rozwiązaniem tego problemu. Dodatkowo właściwości fizyczne gleby ulegają stopniowej degradacji w trakcie uprawy. Po jej przygotowaniu przed sadzeniem są na najwyższym poziomie. W trakcie uprawy wskutek chodzenia i naturalnych procesów gleba powoli osiada i pogarsza się jej porowatość, zmniejsza pojemność powietrzna a wzrasta pojemność wodna, czasami do nadmiernego poziomu, zwłaszcza na glebach cięższych. Odmiennie wygląda sytuacja w przypadku podłoży, które charakteryzują się wysoką porowatością i bardzo dobrymi właściwościami powietrznowodnymi. Ponadto te właściwości są bardzo stabilne i ulegają powolnym zmianom w trakcie uprawy zapewniając tym samym roślinom lepsze warunki do wzrostu i rozwoju. Dobrze obrazuje to porównanie objętości podłoża/gleby przypadającej na jedną roślinę. W uprawie w glebie w warstwie 20 cm grubości pod 1 metrem kwadratowym mieści się 200 litrów gleby. Na jeden metr kwadratowy sadzimy średnio 2,5-3 rośliny papryki co odpowiada około 70-80 litrami gleby na roślinę przy głębokości 20 cm. W uprawie w podłożach mata uprawowa ma objętość około 20 litrów i sadzimy zazwyczaj 3-4 rośliny do takiej maty. Oznacza to że na jedną roślinę przypada 5-7 litrów podłoża co jest objętością około dziesięć razy mniejszą w porównaniu do uprawy tradycyjnej w glebie. Pomimo tak małej objętości dzięki dostępności wody, powietrza i składników pokarmowych w technologii bezglebowej uzyskujemy plony większe niż w uprawie w glebie. Ponadto podłoża są wolne od chorób i szkodników co zapewnia lepszą kondycję roślin w nich uprawianych.

Do badań wytypowano dla popularne i sprawdzone podłoża tj. wełnę mineralną i włókno kokosowe. Dodatkowo włączono węgiel brunatny, który jest podłożem perspektywnym dla ogrodnictwa, ale wymagającym badań i dopracowania technologii uprawy z powodu jego specyficznych właściwości.

Zabiegi pielęgnacyjne nawożenie, nawadnianie i inne czynności uprawowe prowadzono zgodnie z metodykami Integrowanej Uprawy opracowanymi przez Instytut Ogrodnictwa w Skierniewicach. Zabiegi ochrony roślin były robione zgodnie z aktualnym Programem Ochrony Warzyw. Wszystkie doświadczenia i analizy wykonywano w 4 powtórzeniach umożliwiających wykonane analizy statystycznej na poziomie istotności $\alpha=0,05$ zgodnie z metodologią badań rolniczych.

1.1. Wełna mineralna

Jest jednym z najbardziej popularnych podłoży ogrodniczych. Po raz pierwszy do uprawy roślin została zastosowana w Danii w roku 1969. W tym kraju już po 10 latach ponad 80% ogórków szklarniowych uprawiano w tym podłożu. Również w Polsce gdzie została wprowadzona do produkcji na początku lat 90-ych XX wieku szybko zdobyła szerokie grono zwolenników. Wełna jest podłożem inertnym, sterylnym o doskonałych parametrach fizycznych które są trwałe. Obecnie większość szklarniowych upraw warzyw jest prowadzona w tym podłożu. Umożliwia ona np. kontynuowanie uprawy pomidora w cyklu tzw. przedłużonym bez konieczności wymiany roślin latem. Jest to możliwe dzięki temu, że system korzeniowy w sterylnej na początku uprawy wełnie, nie jest porażony przez patogeny. Jeżeli dojdzie do infekcji to zakażeniu ulegają zazwyczaj tylko rośliny rosnące w jednej macie, i rozprzestrzenianie się choroby jest utrudnione. Również założenie uprawy w nowym sezonie jest bardzo ułatwione ponieważ maty (zwane czasami płytami) rozkłada się na wyznaczonych miejscach. Maty są lekkie i pokryte folią, układa się je na płytach ze styropianu które izolują termicznie system korzeniowy od gruntu szklarni. Ostatnio upowszechnia się model uprawy w którym maty z podłożem są układane na stalowych rynnach zawieszonych 30-50 cm nad gruntem szklarni. Ułatwia to znacząco odprowadzanie wód drenażowych, pielęgnację roślin i poprawia ich zdrowotność dzięki lepszemu cyrkulacji powietrza w obiekcie.

Proces produkcji wełny polega na stopieniu skał bazaltowych lub diabazytowych z wapieniem lub dolomitem w stosunku objętościowym 80:20 v/v, z dodatkiem koksu (20%). Temperatura topnienia wynosi 1500-2000°C. Płynną surówkę wylewa się na obrotowe walce uzyskując nitki o średnicy 3-6 µm zbudowane z bezpostaciowych krzemianów. Podczas chłodzenia gdy temperatura obniży się do 200°C dodaje się żywice polifenolowe które nadają włóknom charakter hydrofilny. Tak uzyskany materiał prasuje się i wycina z niego w kostki, maty lub granulacje. Grubość maty wynosi najczęściej 7,5-10 cm, a standardowa długość 100 cm. Szerokość mat dla większości gatunków roślin ozdobnych i warzyw 15cm, a dla ogórka 20 cm. Granulatem z wełny napełnia się różne pojemniki uprawowe i zagony stosowane do uprawy roślin ozdobnych. Można go również mieszać z innymi podłożami np. torfami niskimi. Dodatek wełny będzie czynnikiem poprawiającym właściwości powietrznowodne takiej mieszanki.

Ze względu na obecność tlenków odczyn wełny jest odczyn przed rozpoczęciem uprawy jest alkaliczny, pH 7,0-8,5. Z tego powodu do zalewania mat należy stosować pożywkę o niższym pH niż do późniejszej fertygacji. Zazwyczaj do pierwszego nawilżenia mat pH pożywki powinno wynosić 4,8-5,0. Wełna mineralna ma niewielkie właściwości buforowe i dalsza regulacja odczynu rizosfery odbywa się wyłącznie poprzez utrzymywanie odpowiedniego pH pożywki. Dla większości upraw powinno ono wynosić 5,5-5,7. Wełna mineralna jest podłożem wybitnie porowatym, jej porowatość ogólna jest bardzo wysoka 96-97 % (v/v). Nowa mata charakteryzuje się bardzo dobrym stosunkiem woda/powietrze, bowiem jej pojemność wodna 52 %, powietrzna 45 (v/v) a faza stała 3 %.

Należy także podkreślić, że przy tak dużej pojemności wodnej, woda jest słabo związana siłami ssącymi z fazą stałą maty. Wykazano, że około 70 % wody w wełnie jest związane siłą $pF=1$. Przy wilgotności 64% pojemność wodna wynosiła 1026 g wody na 100 g s.m. podłoża. Wełna jest podłożem lekkim ponieważ jej gęstość objętościowa jest niska i wynosi 70-90 kg·m⁻³, dzięki temu przygotowanie szklarni do nowego cyklu uprawowego jest szybkie. Nowa wełna z powodu produkcji w wysokiej temperaturze jest całkowicie sterylna. Zalicza się ją do podłoży ciepłych ponieważ szybko się nagrzewa, dzięki czemu można skrócić okres przygotowania szklarni do uprawy. Ma to duże znaczenie ekonomiczne dla najwcześniejszych upraw zakładanych zimą.

Największą zaletą wełny mineralnej są wysokie, a przede wszystkim wczesne plonowanie roślin w niej uprawianych. Można być stosowana kilka sezonów, po wcześniejszej dezynfekcji. Uprawa w wełnie jest stosunkowo prosta z punktu widzenia organizacji pracy i 'sterowalności' parametrami wzrostu roślin w tym podłożu. Z tego powodu jest chętnie wybierana przez ogrodników.

Wełnę mineralną stosuje się jako standardowe podłoże do szklarniowej uprawy pomidora, ogórka, sałaty i papryki. Sadzi się w niej również rośliny ozdobne na kwiat cięty różę, gerberę, goździki czy chryzantemę. W formie granulatu jest stosowana jako podłoże jednorodne w uprawie anturium i storczyków. W postaci granulatu może być również dodatkiem do podłoża dla upraw w pojemnikach.

1.2. Włókno kokosowe

Termin włókno kokosowe obejmuje podłoża produkowane z okryw nasiennych orzechów palm kokosowych. Z najdłuższych włókien produkuje się różnego rodzaju materiały takie jak maty, materace, dywany, liny, a ze skorup naczyń i elementy ozdobne. Krótsze włókna oraz pył powstający w wyniku ich pokruszenia będące materiałem odpadowym są wartościowym materiałem do sporządzania podłoży ogrodniczych.

W obrocie znajdują się różne frakcje włókna, najdrobniejsze cząstki o długości 0-2 mm będące w zasadzie pokruszonymi włóknami określa się czasami z angielskiego jako 'torf' kokosowy (*coco peat*) lub pył kokosowy (*coir dust*). Włókna o długości 2-5 mm oraz dłuższe są stosowane jako dodatek stabilizujący strukturę podłoża. Z łupin (łuski) orzecha można po rozdrobnieniu uzyskać zrębki (chipsy) które po wymieszaniu z pyłem kokosowym mogą być wartościowym podłożem. W zależności od frakcji włókna odmienna jest jego właściwości fizyczne, tj. porowatość oraz pojemność wodna i powietrzna. Pył kokosowy ma zdecydowanie większą pojemność wodną niż powietrzną, a w przypadku dłuższych włókien dominuje powietrze. Najlepsze parametry ma rozdrobniona łuska kokosowa. Odpowiednio mieszając poszczególne frakcje włókna można uzyskać wartościowe podłoże o pożądanych parametrach powietrzno-wodnych.

Gotowe podłoże wyprodukowane z włókien kokosowych ma bardzo dobre parametry fizyczne. Charakteryzuje się wysoką porowatością, powyżej 85 do 95%. Po pełnym nasyceniu wodą około 60-70% porów jest nią wypełnionych, a pojemność powietrzna wynosi 15-30%. Są to bardzo dobre parametry spełniające wymagania większości roślin ogrodniczych. Woda jest wiązana słabymi siłami i jej nadmiar łatwo odcieka z podłoża dzięki czemu nie dochodzi do zlewania roślin i wytworzenia warunków z deficytem tlenu. Jeżeli kokosem wypełniona jest doniczka to powierzchnia podłoża nie jest wilgotna pomimo odpowiedniego uwilgotnienia poniżej. Jest to korzystne zjawisko zwłaszcza w uprawach roślin szkółkarskich gdzie na powierzchni podłoża na bazie torfu rozwijają się mchy i wątrobowce. Kolejną korzystną cechą włókna kokosowego jest równomierne rozprzestrzenianie się wody w całej objętości podłoża co jest szczególnie istotne w uprawach gdzie stosuje się nawadnianie kroplowe lub podsiąkowe. Bardzo korzystną cechą kokosu jest jego nasiąkliwość, nawet po silnym przesuszeniu materiał ten nie nabiera właściwości hydrofobowych i łatwo go ponownie nawilżyć. Zjawisko to wykorzystuje się praktycznie ponieważ włókno kokosowe jest transportowane w postaci silnie sprasowanych 'cegiełek' lub 'błoczków' i dopiero w zakładzie produkującym podłoża lub w gospodarstwie ogrodniczym po dodaniu wody zwiększa swoją objętość 6-8 razy i przybiera właściwy kształt. Jeden gram suchego włókna zatrzymuje do 8 gramów wody czyli całkowita pojemność wodna wynosi 800% w stosunku do suchej masy. Kolejną bardzo ważną cechą podłoża kokosowych jest ich trwałość. Dzięki wysokiej zawartości lignin ulegają one bardzo powolnemu rozkładowi i przez długi okres zachowują dobre parametry fizyczne. Włókno kokosowe jest wolne od patogenów dzięki czemu nie wymaga odkażania i występują w nim grzyby z rodzaju *Trichoderma*. W kokosie nie ma nasion chwastów spotykanych w niektórych podłożach organicznych. Jest to podłoże o dobrych właściwościach cieplnych.

Ogromną zaletą podłoża na bazie włókien kokosowych jest fakt, że są to produkty które można uznać za ekologiczne. Pozyskuje się je z naturalnych produktów odpadowych nie niszcząc środowiska naturalnego, a po zakończeniu uprawy zużyte podłoże może zostać zastosowane do uprawy innych roślin ogrodniczych po uprzednim odkażeniu lub przekompostowaniu. Można je stosować jako nawóz

organiczny w celu poprawy właściwości gleb mineralnych. W ten sposób bez dodatkowych kosztów rozwiązuje się problem zagospodarowania odpadów po zakończeniu produkcji.

Planując uprawę we włóknie kokosowym należy zwrócić szczególną uwagę na kwestie nawożenia. Naturalnie zawiera ono pewną ilość potasu co trzeba uwzględnić w programie nawożenia. W początkowym okresie uprawy niezależnie od gatunku nawożenie potasem (podstawowe do podłoża lub w pożywce) powinno być obniżone o 10-20% w stosunku do ogólnie przyjętych zaleceń. Z drugiej strony w tym samym czasie należy zwiększyć nawożenie wapniem i magnezem o około 10%. Kationy wapnia i magnezu są wiązane w kompleksie sorpcyjnym, a potas i sód z niego wyparte przemieszczają się do roztworu korzeniowego. W uprawie roślin o dużych wymaganiach w stosunku do żelaza np. gerbery należy na początku uprawy stosować zwiększone stężenie Fe w pożywce z powodu podwyższonej sorpcji.

Tytułem podsumowania można stwierdzić, że podłoża oparte na odpadach z przerobu orzechów kokosowych będą zyskiwały na znaczeniu dzięki swoim bardzo dobrym właściwościom oraz temu, że są produktami naturalnymi na dodatek odpadowymi.

1.3. Węgiel brunatny

Na węgiel brunatny jako podłoże zwrócono uwagę w latach 70-ych ubiegłego wieku. Najdrobniejsze frakcje uzyskiwane podczas pozyskiwania paliwa były traktowane jako materiał odpadowy. Jako podłoże można stosować frakcję klasyfikowaną jako miał o średnicy cząstek 0-20 mm. Jest on materiałem powtarzalnym pod względem parametrów jakościowych i co bardzo ważne pozbawionym nasion chwastów i patogenów dzięki czemu nie wymaga odkażania. Przeciętnie zawiera 10-20% popiołu, substancja organiczna stanowi 80-90% masy, w tym substancje humusowe 30-40%, reszta to lignina, woski i inne substancje organiczne. Jest podłożem trwałym i odpornym na rozkład mikrobiologiczny.

Porowatość a tym samym pojemność wodna i powietrzna są uzależnione od rozdrobnienia cząstek węgla i ich średnicy, generalnie powinna dominować frakcja do 5mm. Udział kawałków o większej średnicy 5-20 nie powinien przekraczać 20%. Wykazano, że pojemność wodna podłoża o przewadze cząstek powyżej 2 mm wynosi $200 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$, a poniżej 2 mm $400 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$. Zwiększając udział cząstek ziemistych można ją zwiększyć nawet do 80% co jest spowodowane pęcznieniem części koloidalnych. Porowatość takiego podłoża wynosi 50%. Węgiel brunatny jest zasobny w niektóre składniki pokarmowe np. magnez i wapń oraz większość mikroelementów.

Podłoże to wymaga uzupełnienia poziomu azotu, potasu i miedzi. Ilość dostępnych składników wzrasta wraz ze stopniem rozdrobnienia materiału ale właściwości fizyczne, pojemność powietrzna ulegają istotnemu pogorszeniu. Na podkreślenie zasługuje duża pojemność sorpcyjna tego podłoża, największa spośród podłoży co pozwala na stosowanie większych dawek ($3-5 \text{ kg na } 1\text{m}^3$) nawozów mineralnych bez ryzyka stresu solnego u roślin. Dla roślin o wyższych wymaganiach pokarmowych (pomidor, ogórek) stosuje się 0,5-1,0 kg saletry amonowej, 1,5-2,5 superfosfatu potrójnego i 1-2 kg siarczanu potasu na 1m^3 . Odczyn węgla jest lekko kwaśny lub obojętny, pH może się zawierać w bardzo szerokim zakresie. Ze względu na wysoką naturalną zawartość magnezu można w początkowym okresie uprawy zrezygnować z nawożenia nim.

Przydatność węgla brunatnego jako podłoża jednorodnego jest ograniczona ponieważ jest on za bardzo przepuszczalny. Nawet zastosowanie nawodnienia kropłowego powoduje pod koniec uprawy pogorszenie warunków powietrznych. Z tego powodu powinien on być mieszany z innymi komponentami w celu uzyskania pożądanych właściwości. Pozytywne rezultaty uzyskano stosując go w mieszaniu z torfem wysokim w stosunku objętościowym 2:1. Takie podłoże mogło być stosowane w uprawach hydroponicznych np. w metodzie kontenerowo-tacowej. Bardzo mocno rozdrobniona frakcja węgla może być mieszana trocinami lub korą w celu poprawy właściwości wodnych, a frakcja grubsza 5-

20mm będzie składnikiem poprawiającym właściwości powietrze podłoża na bazie silnie rozłożonych torfów niskich.

2. Doświadczenie z uprawą papryki

Na podstawie przeprowadzonych w 2022r. badań wykazano, że technologia uprawy miała istotny wpływ na plonowanie papryki słodkiej. Największy plon ogólny papryki wynoszący 16,62 kg/m² uzyskano z roślin rosnących w wełnie mineralnej. Na podobnym poziomie był plon z uprawy we włóknie kokosowym. Papryka uprawiana w glebie plonowała słabiej. Najniższy plon ogólny uzyskano z uprawy papryki w podłożu węgla brunatnego. Tendencje odnotowane dla plonu ogólnego potwierdziły się generalnie w odniesieniu do plonu handlowego. Największe plony handlowe zebrano z wełny mineralnej i włókna kokosowego.

Odmienne tendencje odnotowano w przypadku plonu niehandlowego. Największą ilość tego rodzaju owoców zebrano z roślin uprawianych na węglu brunatnym. Istotnie mniej ich było w przypadku pozostałych podłoży a średnie nie różniły się istotnie między sobą.

Średnia masa owocu papryki była istotnie uzależniona od rodzaju podłoża. Najcięższe owoce zebrano z roślin rosnących w wełnie mineralnej i włóknie kokosowym a najmniejsze z węgla brunatnego. Średnia masa owocu zawierała się w przedziale od 355 do 398 g.

Tabela 1. Wpływ technologii uprawy na plonowanie papryki

Objekt badawczy	Plon [kg/m ²]			Masa owocu [g]
	ogólny	handlowy	niehandlowy	
GLEBA - KONTROLA	14,25b	13,62b	0,63a	375b
WEŁNA MINERALNA	15,62c	14,82c	0,80a	394c
WĘGIEL BRUNATNY	12,42a	10,24a	2,18c	355a
WŁÓKNO KOKOSOWE	15,38c	14,70c	0,68a	398c
ŚREDNIO	14,47	13,25	1,22	382

Papryka jest wartościowym źródłem witaminy C. Średnia jej zawartość dla wszystkich obiektów badawczych wynosiła 164,8 /100 g św.m. Największą jej zawartość stwierdzono w jagodach zebranych z roślin uprawianych w wełnie mineralnej i włóknie kokosowym. Nieznacznie mniejsze, ale statystycznie istotne zawartości były dla gleby i węgla brunatnego. Zawartość witaminy C w owocach zawierała się w przedziale od 145,6 do 176,5 /100 g św.m.

Cukry decydują o smaku owoców papryki. Średnia zawartość cukrów ogółem wynosiła 6,04 % św.m. Najmniejszą ich zawartością charakteryzowały się owoce z roślin zebranych z węgla brunatnego. W przypadku pozostałych podłoży zawartości nie różniły się istotnie między sobą i zawierały w przedziale od 6,02 do 6,12 św.m. W przypadku cukrów prostych tendencje były podobne, aczkolwiek różnice nieco większe. Najwyższą zawartość tych związków stwierdzono w owocach z wełny mineralnej.

Karotenoidy są ważnymi związkami zaliczanymi do antyoksydantów a papryka jest ich bogatym źródłem. Średnia ich zawartość wynosiła 108,4 mg/kg św.m. Najniższą zawartością tych związków charakteryzowały się owoce z uprawy w węglu brunatnym. Istotnie więcej było ich w owocach z uprawy w glebie. Najwyższe zawartości odnotowano dla wełny mineralnej i włókna kokosowego.

Tabela 2. Wpływ technologii uprawy na wybrane cechy jakościowe owoców papryki

Objekt badawczy	Witamina C [mg/100 g św.m.]	Cukry [% św.m.]		Karetonoidy [mg/kg św.m.]
		ogólne	proste	
GLEBA - KONTROLA	162,5b	6,02b	5,84b	108,6b
WEŁNA MINERALNA	176,5c	6,21b	6,01c	112,5c
WĘGIEL BRUNATNY	145,6a	5,74a	5,51a	96,3a
WŁÓKNO KOKOSOWE	172,3bc	6,18b	5,98bc	116,3c
ŚREDNIO	164,8	6,04	5,83	108,4

Owoce papryki są bogatym źródłem składników mineralnych. Średnia zawartość azotu wynosiła 2,78 %. Największą zawartość tego składnika odnotowano dla owoców zebranych z uprawy w wełnie mineralnej a najmniejsza w węglu brunatnym. Zawartości dla włókna kokosowego i gleby były pośrednie i nie różniły się istotnie między sobą.

Fosfor jest pierwiastkiem występującym w małych ilościach w owocach papryki. Jego średnia zawartość wynosiła 26,3 P mg/100 g s.m. Odnotowane różnice pomiędzy badanymi obiektami, wszystkie średnie różniły się istotnie między sobą.

Papryka jest bogatym źródłem potasu, którego średnia zawartość wynosiła 2,61%. Najbardziej zasobne w ten składnik były jagody zebrane z włókna kokosowego, gdzie zawartość wynosiła 3,05 % K. Istotnie mniejsze zawartości odnotowano dla wełny mineralnej i gleby ale różnice między nimi były niewielkie. Najmniejsze zawartości potasu odnotowano w owocach z roślin uprawianych w węglu brunatnym.

Owoce papryki są zaliczane do bogatych źródeł wapnia z powodu jego wysokiej biodostępności. Średnia zawartość tego składnika wynosiła 26,6 mg Ca/100 g s.m. Była najmniejsza w owocach zebranych z roślin uprawianych w węglu brunatnym. Istotnie więcej wapnia zawierały owoce z uprawy w glebie 25,3 mg Ca/100 g s.m. największe zawartości stwierdzono w owocach z wełny mineralnej i włókna kokosowego.

Odmienne kształtowała się zawartość siarki, której było średnio 2,67 mg S/100 g s.m. Najbardziej zasobne w ten składnik były owoce zebrane z węgla brunatnego 4,65 mg S/100 g s.m. a najmniej zasobne z uprawy w glebie. Średnie dla pozostałych podłoży nie różniły się statystycznie między sobą.

Tabela 3. Wpływ technologii uprawy na zawartość makroskładników mineralnych w owocach papryki [mg/100 g s.m.]

Obiekt badawczy	N [%]	P	K [%]	Ca	Mg	S
GLEBA - KONTROLA	2,85b	21,2b	2,52b	25,3b	11,6d	2,28a
WEŁNA MINERALNA	3,02c	34,2d	2,65b	32,6c	16,5d	3,25b
WĘGIEL BRUNATNY	2,45a	16,3a	2,12a	15,6a	8,6a	4,65c
WŁÓKNO KOKOSOWE	2,88b	28,3c	3,05c	31,6c	14,6c	3,11b
ŚREDNIO	2,78b	26,3	2,61	26,6	13,3	2,67

Owoce papryki są bardzo bogatym źródłem mikroskładników. Średnia zawartość żelaza w owocach papryki wynosiła 68,9 mg Fe/kg s.m. Najwyższą zawartością tego składnika charakteryzowały się owoce z roślin z wełny mineralnej i włókna kokosowego. Najmniejszą zawartość odnotowano w przypadku węgla brunatnego. Zawartości w przypadku gleby były na pośrednim poziomie.

Zawartości manganu kształtowały się odmiennie. Największą jego zawartością charakteryzowały się owoce z uprawy w węglu brunatnym – 132,5 mg Mn/kg s.m. Z kolei najmniejsze zawartości odnotowano dla uprawy w glebie i włóknie kokosowym. Te wartości nie różniły się istotnie między sobą. Koncentracja dla wełny mineralnej plasowała się na pośrednim poziomie.

Średnia zawartość cynku w owocach papryki wynosiła 11,3 mg Zn/kg s.m. i zawierała się w przedziale 8,5-12,1 mg Zn/kg s.m. Najmniejszą zawartość cynku odnotowano dla uprawy w glebie, natomiast największe w węglu brunatnym i włóknie kokosowym. Średnie dla tych obiektów nie różniły się istotnie między sobą.

Zawartość miedzi w owocach papryki zawierała się w przedziale od 6,4 do 8,5 mg Cu/kg s.m. Największa była w owocach z węgla brunatnego a najmniejsza z uprawy w glebie. Średnie dla wełny mineralnej i włókna kokosowego nie różniły się istotnie między sobą.

Odmiennie kształtowała się zawartość boru w owocach papryki, która wynosiła średnio 1,73 mg B/kg s.m. Wartości dla owoców z poszczególnych kombinacji doświadczalnych zawierały się w przedziale od 1,25 do 2,55 mg B/kg s.m. Największą zawartość tego składnika odnotowano w owocach z węgla brunatnego a najmniejsze z wełny mineralnej i włókna kokosowego.

Zawartość molibdenu w owocach papryki była niewielka i wynosiła średnio 0,12 mg Mo/kg s.m. Najmniej tego składnika zawierały owoce pochodzące z uprawy w węglu brunatnym a największe z wełny mineralnej i gleby.

Tabela 4. Wpływ technologii uprawy na zawartość mikrośladników w owocach papryki [mg/kg s.m.]

Obiekt badawczy	Fe	Mn	Zn	Cu	B	Mo
GLEBA - KONTROLA	65,2b	121,1a	8,5a	6,4a	1,62b	0,16c
WEŁNA MINERALNA	72,6c	125,3b	10,2b	7,6b	1,25a	0,15c
WĘGIEL BRUNATNY	55,6a	132,5c	12,1c	8,5c	2,55c	0,08a
WŁÓKNO KOKOSOWE	78,6c	118,6a	11,5c	7,5b	1,38a	0,12b
ŚREDNIO	68,9	125,5	11,3	7,87	1,73	0,12

3. Doświadczenie z uprawą sałaty

Technologia uprawy miała istotny wpływ na plonowanie sałaty masłowej w 2022r.. Średni plon ogólny wyniósł 4160 g/m². Największy plon ogólny zebrano z roślin uprawianych w wełnie mineralnej. Na podobnym poziomie plonowała sałata rosnąca we włóknie kokosowym. Na nieco mniejszy poziom był plon z uprawy w glebie. Najmniejszy plon ogólny zebrano z roślin uprawianych w węglu brunatnym.

Tendencje, które wystąpiły w przypadku plonu ogólnego zostały potwierdzone w wysokości plonu handlowego. Wynosił on średnio 3848 g/m². Najwyższy plon handlowy zebrano z roślin uprawianych w wełnie mineralnej i we włóknie kokosowym. Średnie dla tych podłoży nie różniły się istotnie między sobą. Na niższym poziomie plonowała sałata uprawiana w glebie. Najniższy plon handlowy zebrano z roślin uprawianych w węglu brunatnym

Odmienne kształtowała się wysokość plonu niehandlowego który wnosił średnio 312 g/m² a wszystkie średnie różniły się istotnie między sobą. Największy plon niehandlowy odnotowano w przypadku węgla brunatnego – 425 g/m² co stanowiło ponad 10% plonu ogólnego. Z kolei najmniejszy plon niehandlowy zebrano z roślin uprawianych we włóknie kokosowym.

Plonowanie wynikało z masy główek sałaty, która wynosiła średnio 260,0 g. Najniższą średnią masą charakteryzowały się główki roślin z uprawy w węglu brunatnym. Średnie dla pozostałych obiektów badawczych były istotnie większe i nie różniły się istotnie między sobą.

Tabela 5. Wpływ technologii uprawy na plonowanie sałaty

Obiekt badawczy	Plon [g/m ²]			Masa główki [g]
	ogólny	handlowy	niehandlowy	
GLEBA - KONTROLA	4249b	3884b	365c	265,6b
WEŁNA MINERALNA	4457c	4212c	245b	278,6b

WĘGIEL BRUNATNY	3540a	3115a	425d	221,3a
WŁÓKNO KOKOSOWE	4393c	4182c	211a	274,6b
ŚREDNIO	4160	3848	312	260,0

Średnia zawartość witaminy C wynosiła 50,5 mg/100 g św.m. a zawartości zawierały się w przedziale od 48,6 do 52,1 mg/100 g św.m. Najmniej witaminy C zawierała sałata z uprawy w glebie. W przypadku pozostałych podłoży zawartości były istotnie większe od kontroli i nie różniły się istotnie między sobą.

Liście sałaty masłowej zawierają znaczne ilości cukrów. Średnia koncentracja cukrów ogółem wynosiła 5,57% św.m. i była mało zróżnicowana pomiędzy badanymi obiektami ponieważ wartości nie różniły się istotnie między sobą i zawierały w przedziale 4,43 % dla węgla brunatnego do 4,53 dla gleby.

Zawartość cukrów prostych była bardziej zróżnicowana i wynosiła średnio 4,44 % św.m. Najmniej cukrów prostych zawierały liście sałaty uprawianej w węglu brunatnym. Z kolei największe zawartości odnotowano dla główek pozyskanych z uprawy w glebie i włóknie kokosowym. Średnie dla tych podłoży nie różniły się istotnie między sobą. Zawartość dla wełny mineralnej kształtowała się na pośrednim poziomie.

Azotany są bardzo ważnym związkiem chemicznym, którego zawartość jest niepożądana w liściach sałaty. Wynosiła ona średnio 453 mg NO₃⁻/kg św.m. i w każdym przypadku była mniejsza od dopuszczalnej normy. Najmniej tych związków zawierały liście sałaty uprawianych we włóknie kokosowym w w wełnie mineralnej. Sałata uprawiana w glebie charakteryzowała się pośrednią zawartością azotanów w porównaniu do pozostałych podłoży.

Najwięcej azotanów zawierały liście sałaty rosnącej w węglu brunatnym. Mogło to być spowodowane bardzo niską zawartością molibdenu w tym podłożu, co skutkuje obniżeniem aktywności reduktazy azotanowej biorącej udział w redukcji azotanów w roślinach.

Tabela 6. Wpływ technologii uprawy na wybrane cechy jakościowe sałaty

Obiekt badawczy	Witamina C [mg/100 g św.m.]	Cukry [% św.m.]		Azotany [mg NO ₃ ⁻ /kg św.m.]
		ogólne	proste	
GLEBA - KONTROLA	48,6a	4,65a	4,53c	425b
WEŁNA MINERALNA	51,2b	4,55a	4,41b	387a
WĘGIEL BRUNATNY	50,2b	4,43a	4,32a	642c
WŁÓKNO KOKOSOWE	52,1b	4,65a	4,48c	361a
ŚREDNIO	50,5	5,57	4,44	453

Sałata jest zaliczana do bogatych źródeł składników pokarmowych ponieważ charakteryzują się one wysoką biodostępnością. Średnia zawartość azotu w liściach sałaty wynosiła 2,73 % s.m. i była najmniejsza w liściach roślin z węgla brunatnego. Największą ogólną zawartością azotu charakteryzowały się liście sałaty uprawianej w wełnie mineralnej i włóknie kokosowym. Nieznacznie mniejszą zawartość odnotowano dla uprawy w glebie 2,68 % N.

Koncentracja fosforu w liściach sałaty była znacznie mniejsza i wynosiła średnio 0,30 % P co jest typowe dla tego składnika. Liście roślin rosnących w węglu brunatnym zawierały bardzo mało fosforu - 0,18 % P co jest na granicy standardowego odżywienia. W przypadku pozostałych podłoży zawartości fosforu była znacznie większe i nie różniły się istotnie między sobą.

Zawartości potasu w liściach sałaty były bardziej zróżnicowane. Średnia jego zawartość wynosiła 2,96% K a wartości zawierały się w przedziale od 2,82 do 3,11 % K. Największą zawartością tego składnika charakteryzowały się liście sałaty uprawianej w glebie. Mniejsze wartości odnotowano dla wełny mineralnej i włókna kokosowego, gdzie wartości nie różniły się między sobą. Najmniej zasobne w potas były liście sałaty uprawianej w węglu brunatnym.

Sałata masłowa jest bogatym źródłem wapnia, którego średnia zawartość wynosiła 1,43 % Ca. Podobnie jak w przypadku potasu najmniejsze jego zawartości odnotowano z uprawy w węglu brunatnym. Istotnie więcej zawierały go liście z uprawy w glebie, Największe zawartości odnotowano z uprawy w wełnie mineralnej i włóknie kokosowym.

Magnez jest bardzo ważnym składnikiem odżywczym. Jego średnia zawartość wynosiła 0,17 % a zawartości zawierały się w przedziale 0,12-0,21 % Mg. Najmniejszą zawartością magnezu charakteryzowały się liście roślin uprawianych w węglu brunatnym a największą w wełnie mineralnej. Dla pozostałych podłoży zawartości były na pośrednim poziomie.

Sałata jest bogatym źródłem siarki, której średnia zawartość wynosiła 1,15% S. Jego zawartość kształtowała się odmiennie w porównaniu do innych makroskładników. Największa zawartość siarki odnotowano dla węgla brunatnego – 1,35% S. W przypadku pozostałych podłoży i gleby zawartości były istotnie mniejsze, zawierały się w przedziale 1,05-1,11 % S, i nie różniły istotnie między sobą.

Tabela 7. Wpływ technologii uprawy na zawartość makroskładników mineralnych w liściach sałaty [% s.m.]

Obiekt badawczy	N	P	K	Ca	Mg	S
GLEBA - KONTROLA	2,68b	0,29b	3,11c	1,25b	0,16b	1,05a
WEŁNA MINERALNA	2,94c	0,36b	2,96b	1,89c	0,21c	1,11a
WĘGIEL BRUNATNY	2,41a	0,18a	2,82a	0,85a	0,12a	1,35b
WŁÓKNO KOKOSOWE	2,85c	0,35b	2,95b	1,74c	0,19bc	1,08a
ŚREDNIO	2,73	0,30	2,96	1,43	0,17	1,15

Liście sałaty są dość bogatym źródłem mikroskładników. Średnia zawartość żelaza w główkach sałaty wynosiła 126,0 mg Fe/kg s.m. Najwyższą zawartością tego składnika charakteryzowały się liście z roślin

uprawianych w węglu brunatnym. Najmniejszą zawartość odnotowano w przypadku uprawy w glebie. Zawartości z uprawy w wełnie mineralnej i włókna kokosowego były na pośrednim poziomie.

Zawartości manganu kształtowały się odmiennie. Najmniejszą jego zawartością charakteryzowały się owoce z uprawy w glebie – 104,3 mg Mn/kg s.m. W przypadku pozostałych podłoży zawartości zawierały się w przedziale 115,6-118,3 mg Mn/kg s.m. Te wartości nie różniły się istotnie między sobą.

Średnia zawartość cynku w liściach sałaty wynosiła 55,6 mg Zn/kg s.m. i zawierała się w przedziale 48,6-66,2 mg Zn/kg s.m. Najmniejszą zawartość cynku odnotowano dla uprawy w węglu brunatnym, natomiast największe w wełnie mineralnej i włóknie kokosowym. Średnie dla tych obiektów nie różniły się istotnie między sobą. Zawartość w glebie była na pośrednim poziomie.

Zawartość miedzi w liściach sałaty zawierała się w przedziale od 6,12 do 9,11 mg Cu/kg s.m. Największa była w liściach z wełny mineralnej i włókna kokosowego a istotnie najmniejsze z uprawy w glebie i węglu brunatnym. Średnie dla wełny mineralnej i włókna kokosowego nie różniły się istotnie między sobą.

Odmiennie kształtowała się zawartość boru w liściach, która wynosiła średnio 46,6 mg B/kg s.m. Wartości dla główek z poszczególnych kombinacji doświadczalnych zawierały się w przedziale od 46,2 do 72,1 mg B/kg s.m. Największą zawartość tego składnika odnotowano w liściach z węgla brunatnego. Dla pozostałych podłoży średnie były istotnie mniejsze i nie różniące się statystycznie między sobą.

Zawartość molibdenu w liściach sałaty była niewielka i wynosiła średnio 4,24 mg Mo/kg s.m. Najmniej tego składnika zawierały liście pochodzące z uprawy w węglu brunatnym a największe z wełny mineralnej i włókna kokosowego. W przypadku uprawy w glebie była to zawartość na pośrednim poziomie.

Tabela 8. Wpływ technologii uprawy na zawartość mikroskładników w liściach sałaty [mg/kg s.m.]

Obiekt badawczy	Fe	Mn	Zn	Cu	B	Mo
GLEBA - KONTROLA	112,6a	104,3a	55,6b	6,87a	46,2a	4,12b
WEŁNA MINERALNA	126,4b	115,6b	62,1c	8,65b	52,3a	5,11c
WĘGIEL BRUNATNY	136,2c	118,3b	48,6a	6,12a	72,1b	2,67a
WŁÓKNO KOKOSOWE	128,9b	117,4b	66,2c	9,11b	55,6a	5,04c
ŚREDNIO	126,0	88,9	58,1	7,67	46,6	4,24

4 . Doświadczenie z uprawą cykorii warzywnej

Technologia uprawy miała istotny wpływ na plonowanie cykorii warzywnej typu radicchio. Średni plon ogólny główek wyniósł 6,32 kg/m². Największy plon ogólny cykorii zebrano z roślin uprawianych w wełnie mineralnej – 7,24 kg/m². Na podobnym poziomie plonowała cykoria rosnąca we włóknie kokosowym – 7,15 kg/m². Na nieco mniejszy poziomie był plon z uprawy w glebie. Najmniejszy plon ogólny cykorii zebrano z roślin uprawianych w węglu brunatnym 5,21 kg/m².

Tendencje, odnotowane dla plonu ogólnego zostały potwierdzone w wysokości plonu handlowego. Wynosił on średnio 6,06 kg/m² g/m². Największy plon handlowy zebrano z roślin uprawianych w wełnie mineralnej i we włóknie kokosowym, było to odpowiednio 7,06 i 6,94 kg/m². Średnie dla tych podłoży nie różniły się istotnie między sobą. Na niższym poziomie – 5,34 kg/m² plonowała cykorja uprawiana w glebie. Najniższy statystycznie plon handlowy zebrano z roślin uprawianych w węglu brunatnym – 4,89 kg/m².

Odmienne kształtowała się wysokość plonu niehandlowego który wnosił 0,26 kg/m². Najmniejszy plon niehandlowy odnotowano dla wełny mineralnej i włókna kokosowego a średnie dla tych podłoży różniły się istotnie między sobą. Istotnie większ plon niehandlowy odnotowano w przypadku uprawy w glebie i węglu brunatnym co stanowiło ponad 5% plonu ogólnego. Średnie dla tych podłoży różniły się istotnie między sobą Plonowanie wynikało z masy główek cykorii, która wynosiła średnio 421 g. Najniższą średnią masą charakteryzowały się główki roślin z uprawy w węglu brunatnym – 347 g. Istotnie cięższe były główki roślin rosnących w glebie – 378 g. Najcięższe główki wykształciły rośliny rosnące we włóknie kokosowym 477 g i wełnie mineralnej 483 g. Średnie dla tych obiektów badawczych były istotnie większe i nie różniły się istotnie między sobą.

Tabela 9. Wpływ technologii uprawy na plonowanie cykorii warzywnej

Obiekt badawczy	Plon [kg/m ²]			Masa główki [g]
	ogólny	handlowy	niehandlowy	
GLEBA - KONTROLA	5,67b	5,34b	0,33b	378b
WEŁNA MINERALNA	7,24c	7,06c	0,18a	483c
WĘGIEL BRUNATNY	5,21a	4,89a	0,32b	347a
WŁÓKNO KOKOSOWE	7,15c	6,94c	0,21a	477c
ŚREDNIO	6,32	6,06	0,26	421

Średnia zawartość witaminy C w liściach cykorii była niewielka i wynosiła średnio 9,5 mg/100 g św.m. a zawartości zawierały się w przedziale od 8,2 do 10,2 mg/100 g św.m. Najmniej witaminy C zawierała cykorja z uprawy w wełnie mineralnej. W przypadku pozostałych podłoży zawartości były mniejsze i nie różniły się istotnie między sobą.

Liście cykorii warzywnej nie zawierają dużej ilości cukrów. Średnia koncentracja cukrów ogółem wynosiła 2,51% św.m. Najwięcej zawierały ich liście roślin uprawianych w glebie. W przypadku pozostałych podłoży była ona mało zróżnicowana pomiędzy badanymi obiektami ponieważ wartości nie różniły się istotnie między sobą i zawierały w przedziale 2,44 % dla włókna kokosowego do 2,49 dla węgla brunatnego.

Zawartość cukrów prostych była jeszcze mniej zróżnicowana i wynosiła średnio 2,22 % św.m. Najmniej cukrów prostych zawierały liście cykorii uprawianej w wełnie mineralnej. Średnie dla podłoży i gleby nie różniły się istotnie między sobą. Zawartości zawierały się w przedziale od 2,18 % dla wełny do 2,26% św.m. dla włókna kokosowego.

Azotany są związkami chemicznymi, których zawartość jest niepożądana w liściach cykorii radicchio. Wynosiła ona średnio 719 mg NO₃⁻/kg św.m. i w każdym przypadku była mniejsza od dopuszczalnej normy. Najmniej tych związków zawierały liście cykorii uprawianych w wełnie mineralnej – 656 mg NO₃⁻/kg św.m. i we włóknie kokosowym – 612 mg NO₃⁻/kg św.m. Cykoria uprawiana w glebie charakteryzowała się pośrednią zawartością azotanów w porównaniu do pozostałych podłoży.

Najwięcej azotanów zawierały liście cykorii rosnącej w węglu brunatnym – 863 mg NO₃⁻/kg św.m. Mogło to być spowodowane bardzo niskim pH i zawartością molibdenu w tym podłożu, co skutkuje obniżeniem aktywności reduktazy azotanowej biorącej udział w redukcji azotanów w roślinach.

Tabela 10. Wpływ technologii uprawy na wybrane cechy jakościowe cykorii warzywnej

Obiekt badawczy	Witamina C [mg/100 g św.m.]	Cukry [% św.m.]		Azotany [mg NO ₃ ⁻ /kg św.m.]
		ogólne	proste	
GLEBA - KONTROLA	9,8	2,65b	2,21a	745b
WEŁNA MINERALNA	10,2	2,45a	2,18a	656a
WĘGIEL BRUNATNY	9,6	2,49a	2,24a	863c
WŁÓKNO KOKOSOWE	8,2	2,44a	2,26a	612a
ŚREDNIO	9,5	2,51	2,22	719

Cykoria warzywna radicchio jest zaliczana do dość bogatych źródeł składników pokarmowych ponieważ charakteryzują się one wysoką biodostępnością, podobnie jak w przypadku innych warzyw liściowych. Średnia zawartość azotu w liściach cykorii wynosiła 2,86 % N s.m. i była najmniejsza w liściach roślin z węgla brunatnego – 2,51% N. Największą ogólną zawartością azotu charakteryzowały się liście cykorii uprawianej w wełnie mineralnej i glebie. Nieznacznie mniejszą zawartość odnotowano dla uprawy we włóknie kokosowym 2,92 % N. Te trzy średnie nie różniły się istotnie między sobą.

Koncentracja fosforu w liściach cykorii była znacznie mniejsza i wynosiła średnio 0,31 % P co jest typowe dla tego składnika. Liście roślin rosnących w węglu brunatnym zawierały bardzo mało fosforu - 0,21 % P co jest na granicy standardowego odżywienia. W przypadku pozostałych podłoży zawartości fosforu była znacznie większe i nie różniły się istotnie między sobą. Wartości zawierały się w przedziale 0,32-0,35 % P w s.m.

Zawartości potasu w liściach cykorii były bardziej zróżnicowane. Średnia jego zawartość wynosiła 5,43 % K a wartości zawierały się w przedziale od 5,10 do 6,02 % K. Największą zawartością tego składnika charakteryzowały się liście cykorii uprawianej we włóknie kokosowym. Mniejsze wartości odnotowano dla wełny mineralnej i gleby, gdzie wartości nie różniły się między sobą. Najmniej zasobne w potas były liście cykorii uprawianej w węglu brunatnym.

Cykoria warzywna jest dość bogatym źródłem wapnia, którego średnia zawartość wynosiła 0,66 % Ca. Podobnie jak w przypadku potasu najmniejsze jego zawartości odnotowano z uprawy w węglu brunatnym. Istotnie więcej zawierały go liście z uprawy w glebie. Największe zawartości odnotowano z uprawy w wełnie mineralnej i włóknie kokosowym. Te średnie nie różniły się istotnie między sobą.

Magnez jest bardzo ważnym składnikiem odżywczym. Jego średnia koncentracja wynosiła 0,21 % Mg, a zawartości zawierały się w przedziale 0,14-0,29 % Mg. Najmniejszą zawartością magnezu charakteryzowały się liście roślin uprawianych w węglu brunatnym a największą we włóknie kokosowym. Dla pozostałych podłoży zawartości były na pośrednim poziomie. Zawartości dla gleby i węgla drzewnego nie różniły się statystycznie między sobą.

Cykoria jest bogatym źródłem siarki, której średnia zawartość wynosiła 0,76 % S. Jego zawartość kształtowała się odmiennie w porównaniu do innych makroskładników. Największa zawartość siarki odnotowano dla węgla brunatnego – 0,97 % S. W przypadku pozostałych podłoży i gleby zawartości były istotnie mniejsze, zawierały się w przedziale 0,68-0,72 % S, i nie różniły istotnie między sobą.

Tabela 11. Wpływ technologii uprawy na zawartość makroskładników mineralnych w cykorii warzywnej [% s.m.]

Obiekt badawczy	N	P	K	Ca	Mg	S
GLEBA - KONTROLA	3,01b	0,33b	5,10a	0,65b	0,18a	0,65a
WEŁNA MINERALNA	2,98b	0,32b	5,45b	0,75b	0,24b	0,72a
WĘGIEL BRUNATNY	2,51a	0,21a	5,14a	0,52a	0,14a	0,97b
WŁÓKNO KOKOSOWE	2,92b	0,35b	6,02c	0,72b	0,29c	0,68a
ŚREDNIO	2,86	0,31	5,43	0,66	0,21	0,76

Liście cykorii są dość bogatym źródłem mikroskładników. Średnia zawartość żelaza w główkach cykorii wynosiła 83,9 mg Fe/kg s.m. Najwyższą zawartością tego składnika charakteryzowały się liście z roślin uprawianych w węglu brunatnym. Najmniejszą zawartość odnotowano w przypadku uprawy w glebie. Zawartości z uprawy w wełnie mineralnej i włókna kokosowego były na pośrednim poziomie i nie różniły się statystycznie między sobą.

Zawartości manganu kształtowały się odmiennie. Najmniejszą jego zawartością charakteryzowały się owoce z uprawy we włóknie kokosowym i glebie – 96,5 i 96,8 mg Mn/kg s.m. Istotnie więcej manganu zawierały rośliny rosnące w wełnie mineralnej. Najwięcej tego składnika było w liściach cykorii rosnącej na węglu brunatnym.

Średnia zawartość cynku w liściach cykorii wynosiła 52,7 mg Zn/kg s.m. i zawierała się w przedziale 45,6-61,3 mg Zn/kg s.m. Największą zawartość cynku odnotowano dla uprawy w węglu brunatnym – 61,3 mg Zn/kg s.m., natomiast najmniejszą w glebie – 45,6 mg Zn/kg s.m. Zawartości w wełnie mineralnej i włóknie kokosowym były na pośrednim poziomie i nie różniły się istotnie między sobą.

Zawartość miedzi w liściach cykorii zawierała się w przedziale od 5,24 do 7,11 mg Cu/kg s.m. Największa była w liściach roślin rosnących na węglu brunatnym – 7,11 mg Cu/kg s.m.. Średnie dla wełny mineralnej i gleby nie różniły się istotnie między sobą.

Odmiennie kształtowała się zawartość boru w liściach cykorii, która wynosiła średnio 47,8 g B/kg s.m. Wartości dla główek z poszczególnych kombinacji doświadczalnych zawierały się w przedziale od 36,8 do 60,2 mg B/kg s.m. Największą zawartość tego składnika odnotowano w liściach z węgla brunatnego.

Z kolei najmniejszą dla uprawy w glebie. Dla pozostałych podłoży średnie były na pośrednim poziomie i nie różniły się statystycznie między sobą.

Zawartość molibdenu w liściach cykorii była niewielka i wynosiła średnio 3,69 mg Mo/kg s.m. Wszystkie średnie różniły się istotnie między sobą. Najmniej tego składnika zawierały liście pochodzące z uprawy w węglu brunatnym – 2,21 mg Mo/kg s.m. a największe z włókna kokosowego – 4,86 mg Mo/kg s.m. W przypadku uprawy w wełnie mineralnej i glebie były to zawartości na pośrednim poziomie.

Tabela 12. Wpływ technologii uprawy na zawartość mikrośladników w liściach cykorii warzywnej [mg/kg s.m.]

Obiekt badawczy	Fe	Mn	Zn	Cu	B	Mo
GLEBA - KONTROLA	75,6a	96,8a	45,6a	5,24a	36,8a	3,56b
WEŁNA MINERALNA	82,4b	102,3b	52,6b	5,68a	45,6b	4,12c
WĘGIEL BRUNATNY	96,4c	125,6c	61,3c	7,11c	60,2c	2,21a
WŁÓKNO KOKOSOWE	81,2b	96,5a	51,3b	6,04b	48,6b	4,86d
ŚREDNIO	83,9	105,3	52,7	6,02	47,8	3,69

5. Doświadczenie z uprawą sałaty

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że technologia uprawy miała istotny wpływ na plonowanie papryki słodkiej. Największy plon ogólny papryki wynoszący 13,82 kg/m² uzyskano z roślin rosnących w wełnie mineralnej. Na podobnym poziomie był plon z uprawy we włóknie kokosowym 13,56 kg/m². Średnie dla tych podłoży nie różniły się istotnie między sobą. Papryka uprawiana w glebie plonowała na nieco niższym poziomie 12,94 kg/m². Najniższy plon ogólny uzyskano z uprawy papryki w podłożu z węgla brunatnego. Tendencje odnotowane dla plonu ogólnego potwierdziły się generalnie w odniesieniu do plonu handlowego. Średni plon handlowy wyniósł 12,34 kg/m². Największe plony handlowe zebrano z wełny mineralnej i włókna kokosowego.

Odmienne tendencje odnotowano w przypadku plonu niehandlowego. Największą ilość tego rodzaju owoców zebrano z roślin uprawianych na węglu brunatnym. Istotnie mniej ich było w przypadku pozostałych podłoży. Najmniejsze plony niehandlowe zebrano z uprawy we włóknie kokosowym i glebie a średnie nie różniły się istotnie między sobą.

Średnia masa owocu papryki była istotnie uzależniona od rodzaju podłoża i wynosiła średnio dla wszystkich obiektów 365 gramów. Najcięższe owoce zebrano z roślin rosnących w wełnie mineralnej i włóknie kokosowym a o najmniejszej masie z węgla brunatnego. Średnia masa owocu zawierała się w przedziale od 355 do 398 g.

Tabela 13. Wpływ technologii uprawy na plonowanie papryki

Obiekt badawczy	Plon [kg/m ²]			Masa owocu [g]
	ogólny	handlowy	niehandlowy	
GLEBA - KONTROLA	12,94b	12,43b	0,51a	362b
WEŁNA MINERALNA	13,82c	13,22c	0,60b	378c
WĘGIEL BRUNATNY	11,57a	11,11a	0,77c	338a
WŁÓKNO KOKOSOWE	13,56c	12,79b	0,46a	380c
ŚREDNIO	12,97	12,34	0,59	365

Papryka jest wartościowym źródłem witaminy C. Średnia jej zawartość dla wszystkich obiektów badawczych wynosiła 161,1 /100 g św.m. Największą jej zawartość stwierdzono w jagodach zebranych z roślin uprawianych we włóknie kokosowym. Nieznacznie mniejsze, ale statystycznie istotne zawartości były dla gleby, wełny mineralnej i węgla brunatnego. Zawartość witaminy C w owocach zawierała się w przedziale od 154,2 do 175,3 /100 g św.m.

Cukry decydują o smaku owoców papryki. Średnia zawartość cukrów ogółem wynosiła 5,90 % św.m. Średnie zawartości cukrów ogółem dla wszystkich podłoży nie różniły się istotnie między sobą a średnie zawierały w przedziale od 5,84 do 5,92% św.m. W przypadku cukrów prostych tendencje były podobne, aczkolwiek różnice nieco większe. Najwyższą zawartość tych związków stwierdzono w owocach z włókna kokosowego. Średnia zawartość cukrów prostych wynosiła 5,90 % a zawartości zawierały się w przedziale 5,69 do 5,81 %b św.m.

Karotenoidy są ważnymi związkami zaliczanymi do antyoksydantów a papryka jest ich bogatym źródłem. Średnia ich zawartość wynosiła 126,6 mg/kg św.m. Najniższą zawartością tych związków charakteryzowały się owoce z uprawy we włóknie kokosowym i wełnie mineralnej. Istotnie więcej było ich w owocach z uprawy w glebie i węglu brunatnym. Średnie zawartości dla wszystkich podłoży zawierały się w przedziale od 118,6 do 132,4 mg/kg św.m.

Tabela 14. Wpływ technologii uprawy na wybrane cechy jakościowe owoców papryki

Obiekt badawczy	Witamina C [mg/100 g św.m.]	Cukry [% św.m.]		Karetonoidy [mg/kg św.m.]
		ogólne	proste	
GLEBA - KONTROLA	152,6a	5,88a	5,74a	132,4b
WEŁNA MINERALNA	162,4a	5,92a	5,78a	118,6a

WĘGIEL BRUNATNY	154,2a	5,84a	5,69a	132,2b
WŁÓKNO KOKOSOWE	175,3b	5,96a	5,81a	121,6a
ŚREDNIO	161,1	5,90	5,76	126,2

Owoce papryki są bogatym źródłem składników mineralnych. Średnia zawartość azotu wynosiła 2,92 %. Największą zawartość tego składnika odnotowano dla owoców zebranych z uprawy w glebie a najmniejsza w wełnie mineralnej. Zawartości dla włókna kokosowego i włókna kokosowego były pośrednie i nie różniły się istotnie między sobą. Zawartości azotu w owocach papryki zawierały się w przedziale od 2,64 do 3,21 % N.

Fosfor jest pierwiastkiem występującym w małych ilościach w owocach papryki. Jego średnia zawartość wynosiła 32,9 P mg/100 g s.m. Odnotowane różnice pomiędzy badanymi obiektami, a zawartości zawierały się w przedziale 20,1 do 42,1 mg/100 g s.m. Największą zawartością fosforu charakteryzowały się owoce roślin rosnących w glebie i wełnie mineralnej. Z kolei najmniejsza zawartość była w przypadku węgla brunatnego.

Papryka jest bogatym źródłem potasu, którego średnia zawartość wynosiła 3,02 %. Najbardziej zasobne w ten składnik były jagody zebrane z włókna kokosowego, gdzie zawartość wynosiła 3,34 % K. Istotnie mniejsze zawartości odnotowano dla wełny mineralnej i gleby ale różnice między nimi były niewielkie. Najmniejsze zawartości potasu odnotowano w owocach z roślin uprawianych w węglu brunatnym. Zawartości potasu w owocach papryki zawierały się w przedziale od 2,75 do 3,34 % K w s.m.

Owoce papryki są zaliczane do bogatych źródeł wapnia z powodu jego wysokiej biodostępności. Średnia zawartość tego składnika wynosiła 32,4 mg Ca/100 g s.m. Najwięcej wapnia zawierały owoce z uprawy w glebie 43,1 mg Ca/100 g s.m. Z kolei najmniejszą zawartość odnotowano dla wełna brunatnego. W przypadku wełny mineralnej i włókna kokosowego zawartość wapnia była na pośrednim poziomie a średnie nie różniły się istotnie między sobą.

Odmienne kształtowała się zawartość siarki, której było średnio 3,68 mg S/100 g s.m. Najbardziej zasobne w ten składnik były owoce zebrane z węgla brunatnego 4,12 mg S/100 g s.m. a najmniej zasobne z uprawy we włóknie kokosowym. Średnie dla pozostałych podłoży nie różniły się statystycznie między sobą. Zawartości siarki zawierały się w przedziale od 3,14 do 4,12 % S.

Tabela 15. Wpływ technologii uprawy na zawartość makroskładników mineralnych w owocach papryki [mg/100 g s.m.]

Obiekt badawczy	N [%]	P	K [%]	Ca	Mg	S
GLEBA - KONTROLA	3,21c	36,8c	3,02b	43,1c	18,4b	3,63b
WEŁNA MINERALNA	2,64a	42,1c	2,96b	35,6b	17,8b	3,84b
WĘGIEL BRUNATNY	2,96b	20,1a	2,75a	18,4a	10,8a	4,12c
WŁÓKNO KOKOSOWE	2,88b	32,6b	3,34c	32,5b	15,8b	3,14a

ŚREDNIO	2,92	32,9	3,02	32,4	15,7	3,68
---------	------	------	------	------	------	------

Owoce papryki są bardzo bogatym źródłem mikrośladników. Średnia zawartość żelaza w owocach papryki wynosiła 62,0 mg Fe/kg s.m. Najwyższą zawartością tego składnika charakteryzowały się owoce z roślin z wełny mineralnej. Istotnie mniejsze zawartości odnotowano dla gleby i włókna kokosowego. Te średnie nie różniły się statystycznie między sobą. Najmniejszą zawartość odnotowano w przypadku węgla brunatnego. Zawartości żelaza dla wszystkich podłoży zawierały się w przedziale 45,8 do 75,6 mg Fe/kg s.m.

Zawartości manganu kształtowały się podobnie jak żelaza ale były większe. Największą jego zawartością charakteryzowały się owoce z uprawy w węglu brunatnym – 152,4 mg Mn/kg s.m. Z kolei najmniejszą zawartość odnotowano dla uprawy wełnie 122,6 mg/kg s.m. W przypadku uprawy w glebie i włóknie kokosowym zawartości były na pośrednim poziomie. Te wartości nie różniły się istotnie między sobą.

Średnia zawartość cynku w owocach papryki wynosiła 11,5 mg Zn/kg s.m. i zawierała się w przedziale 9,8-12,8 mg Zn/kg s.m. Najmniejsze zawartości cynku odnotowano dla uprawy w glebie i włóknie kokosowym, natomiast istotnie większe w węglu brunatnym i wełnie mineralnej. Średnie dla tych obiektów nie różniły się istotnie między sobą.

Zawartość miedzi w owocach papryki zawierała się w przedziale od 7,3 do 9,5 mg Cu/kg s.m. Największa była w owocach z węgla brunatnego a najmniejsza z uprawy w glebie. Średnie dla wełny mineralnej i włókna kokosowego nie różniły się istotnie między sobą. Średnia dla wszystkich obiektów wynosiła 8,28 mg Cu/kg s.m.

Odmienne kształtowała się zawartość boru w owocach papryki, która wynosiła średnio 2,02 mg B/kg s.m. Wartości dla owoców z poszczególnych kombinacji doświadczalnych zawierały się w przedziale od 1,76 do 2,84 mg B/kg s.m. Największą zawartość tego składnika odnotowano w owocach z węgla brunatnego a koncentracje w owocach z wełny mineralnej, włókna kokosowego i gleby były na istotnie mniejszym poziomie i nie różniły się istotnie między sobą.

Zawartość molibdenu w owocach papryki była niewielka i wynosiła średnio 0,14 mg Mo/kg s.m. Najmniej tego składnika zawierały owoce pochodzące z uprawy w węglu brunatnym a największe z wełny mineralnej i gleby.

Tabela 16. Wpływ technologii uprawy na zawartość mikrośladników w owocach papryki [mg/kg s.m.]

Obiekt badawczy	Fe	Mn	Zn	Cu	B	Mo
GLEBA - KONTROLA	62,1b	142,5b	9,8a	7,3a	1,69a	0,17c
WEŁNA MINERALNA	75,6c	122,6a	12,4b	8,2b	1,76a	0,16c
WĘGIEL BRUNATNY	45,8a	152,4c	12,8b	9,5c	2,84b	0,09a
WŁÓKNO KOKOSOWE	64,5b	138,9b	10,9a	8,1b	1,78a	0,14b
ŚREDNIO	62,0	139,1	11,5	8,28	2,02	0,14

Technologia uprawy miała istotny wpływ na plonowanie sałaty masłowej. Średni plon ogólny wyniósł 3775 g/m². Największy plon ogólny zebrano z roślin uprawianych w wełnie mineralnej. Na nieco niższym poziomie plonowała sałata rosnąca we włóknie kokosowym i glebie. Średnie dla tych podłoży nie różniły się istotnie między sobą. Najmniejszy plon ogólny zebrano z roślin uprawianych w węglu brunatnym.

Tendencje, które wystąpiły w przypadku plonu ogólnego zostały potwierdzone w wysokości plonu handlowego. Wynosił on średnio 3542 g/m². Najwyższy plon handlowy zebrano z roślin uprawianych w wełnie mineralnej. Na nieco niższym poziomie plonowała sałata uprawiana w glebie i włóknie kokosowym. Średnie dla tych podłoży nie różniły się istotnie między sobą. Najniższy plon handlowy zebrano z roślin uprawianych w węglu brunatnym.

Odmienne kształtowała się wysokość plonu niehandlowego który wnosił średnio 232 g/m². Największy plon niehandlowy odnotowano w przypadku węgla brunatnego – 293 g/m² co stanowiło ponad 10% plonu ogólnego. Z kolei istotnie mniejszy plon niehandlowy zebrano z roślin uprawianych w glebie we włóknie kokosowym i wełnie mineralnej a wszystkie średnie nie różniły się istotnie między sobą.

Plonowanie wynikało z masy główek sałaty, która wynosiła średnio 235,9 g. Najniższą średnią masą charakteryzowały się główki roślin z uprawy w węglu brunatnym. Średnie dla pozostałych obiektów badawczych były istotnie większe. Masy główki dla uprawy w glebie i włóknie kokosowym nie różniły się istotnie między sobą. Największą masą charakteryzowały się główki z uprawy w wełnie mineralnej.

Tabela 17. Wpływ technologii uprawy na plonowanie sałaty

Obiekt badawczy	Plon [g/m ²]			Masa główki [g]
	ogólny	handlowy	niehandlowy	
GLEBA - KONTROLA	3856b	3654b	202a	241,0b
WEŁNA MINERALNA	4186c	3962c	224a	261,6c
WĘGIEL BRUNATNY	3105a	2812a	293b	194,0a
WŁÓKNO KOKOSOWE	3954b	3742b	212a	247,1b
ŚREDNIO	3775	3542	233	235,9

Średnia zawartość witaminy C wynosiła 53,5 mg/100 g św.m. a zawartości zawierały się w przedziale od 43,3 do 58,6 mg/100 g św.m. Najmniej witaminy C zawierała sałata z uprawy w węglu brunatnym. W przypadku pozostałych podłoży zawartości były istotnie większe i nie różniły się istotnie między sobą.

Liście sałaty masłowej zawierają znaczne ilości cukrów. Średnia koncentracja cukrów ogółem wynosiła 4,67 % św.m. i była mało zróżnicowana pomiędzy badanymi obiektami ponieważ wartości nie różniły się istotnie między sobą i zawierały w przedziale 4,51 % dla węgla brunatnego do 4,74 % dla gleby.

Zawartość cukrów prostych również była mało zróżnicowana i wynosiła średnio 4,46 % św.m. Najmniej cukrów prostych zawierały liście sałaty uprawianej w węglu brunatnym 4,32 % św.m. Z kolei większe zawartości odnotowano dla główek pozyskanych z uprawy w glebie we włóknie kokosowym i wełnie mineralnej. Średnie dla tych podłoży nie różniły się istotnie między sobą. Zawartości cukrów prostych zawierały się w przedziale 4,32-4,53 % św.m.

Azotany są bardzo ważnym związkem chemicznym, którego zawartość jest niepożądana w liściach sałaty. Wynosiła ona średnio 606 mg NO₃⁻/kg św.m. i w każdym przypadku była mniejsza od dopuszczalnej normy. Zawartości azotanów mieściły się w przedziale 453-851 NO₃⁻/kg św.m., a wszystkie średnie różniły się istotnie między sobą. Najmniej tych związków zawierały liście sałaty uprawianych w wełnie mineralnej. Kolejnym podłożem pod kątem zawartości azotanów było włókno kokosowe. Sałata uprawiana w glebie charakteryzowała się wyższą zawartością azotanów w porównaniu do powyższych podłoży.

Najwięcej azotanów zawierały liście sałaty rosnącej w węglu brunatnym. Mogło to być spowodowane bardzo niską zawartością molibdenu w tym podłożu, co skutkuje obniżeniem aktywności reduktazy azotanowej biorącej udział w redukcji azotanów w roślinach.

Tabela 18 Wpływ technologii uprawy na wybrane cechy jakościowe sałaty

Obiekt badawczy	Witamina C [mg/100 g św.m.]	Cukry [% św.m.]		Azotany [mg NO ₃ ⁻ /kg św.m.]
		ogólne	proste	
GLEBA - KONTROLA	58,6b	4,74a	4,48b	598c
WEŁNA MINERALNA	54,3b	4,72a	4,53b	453a
WĘGIEL BRUNATNY	43,3a	4,51a	4,32a	851d
WŁÓKNO KOKOSOWE	56,4b	4,69a	4,51b	523b
ŚREDNIO	53,2	4,67	4,46	606

Sałata jest zaliczana do bogatych źródeł składników pokarmowych ponieważ charakteryzują się one wysoką biodostępnością. Średnia zawartość azotu w liściach sałaty wynosiła 2,75 % N s.m. i była najmniejsza w liściach roślin z węgla brunatnego. Największą ogólną zawartością azotu charakteryzowały się liście sałaty uprawianej w wełnie mineralnej i glebie. Nieznacznie mniejszą zawartość odnotowano dla uprawy we włóknie kokosowym 2,78 % N. Średnie dla tych podłoży nie różniły się istotnie między sobą.

Koncentracja fosforu w liściach sałaty była znacznie mniejsza i wynosiła średnio 0,31 % P co jest typowe dla tego składnika. Liście roślin rosnących w węglu brunatnym zawierały bardzo mało fosforu -0,19 % P co jest na granicy standardowego odżywienia. W przypadku pozostałych podłoży zawartości fosforu była znacznie większe i nie różniły się istotnie między sobą. Zawartości tego składnika zawierały się w przedziale od 0,31 % P dla gleby do 0,38% P w wełnie mineralnej.

Zawartości potasu w liściach sałaty były bardziej zróżnicowane. Średnia jego zawartość wynosiła 3,00 % K a wartości zawierały się w przedziale od 2,84 do 3,22 % K. Największą zawartością tego składnika charakteryzowały się liście sałaty uprawianej w glebie. Mniejsze wartości odnotowano dla wełny mineralnej i włókna kokosowego, gdzie wartości nie różniły się między sobą. Najmniej zasobne w potas były liście sałaty uprawianej w węglu brunatnym.

Sałata masłowa jest bogatym źródłem wapnia, którego średnia zawartość wynosiła 1,50 % Ca. Podobnie jak w przypadku potasu najmniejsze jego zawartości odnotowano z uprawy w węglu brunatnym 0,93 %

Ca. Istotnie więcej zawierały go liście z uprawy w glebie 1,31 % Ca. Największe zawartości odnotowano z uprawy w wełnie mineralnej i włóknie kokosowym dla których wartości nie różniły się istotnie między sobą.

Magnez jest bardzo ważnym składnikiem odżywczym. Jego średnia zawartość wynosiła 0,22 % a zawartości zawierały się w przedziale 0,14-0,26 % Mg. Najmniejszą zawartością magnezu charakteryzowały się liście roślin uprawianych w węglu brunatnym a największą w glebie. Dla pozostałych podłoży zawartości były na pośrednim poziomie. Średnie dla podłoży z wyjątkiem węgla brunatnego nie różniły się istotnie między sobą.

Sałata jest dość bogatym źródłem siarki, której średnia zawartość wynosiła 1,19% S. Jego zawartość kształtowała się odmiennie w porównaniu do innych makroskładników. Największa zawartość siarki odnotowano dla węgla brunatnego – 1,45% S. W przypadku pozostałych podłoży i gleby zawartości były istotnie mniejsze, zawierały się w przedziale 1,06-1,14 % S, i nie różniły istotnie między sobą.

Tabela 19. Wpływ technologii uprawy na zawartość makroskładników mineralnych w liściach sałaty [% s.m.]

Obiekt badawczy	N	P	K	Ca	Mg	S
GLEBA - KONTROLA	2,84b	0,31b	3,22b	1,31b	0,26b	1,12a
WEŁNA MINERALNA	2,96b	0,38b	2,98a	1,92c	0,24b	1,14a
WĘGIEL BRUNATNY	2,43a	0,19a	2,84a	0,95a	0,14a	1,45b
WŁÓKNO KOKOSOWE	2,78b	0,36b	2,97a	1,82c	0,22b	1,06a
ŚREDNIO	2,75	0,31	3,00	1,50	0,22	1,19

Liście sałaty są dość bogatym źródłem mikrośkładników. Średnia zawartość żelaza w główkach sałaty wynosiła 131,6 mg Fe/kg s.m. Najwyższą zawartością tego składnika charakteryzowały się liście z roślin uprawianych w węglu brunatnym – 142,3 mg Fe/kg s.m.. Najmniejszą zawartość odnotowano w przypadku uprawy w glebie – 116,3 mg Fe/kg s.m.. Zawartości z uprawy w wełnie mineralnej i włókna kokosowego były na pośrednim poziomie i nie różniły się istotnie między sobą.

Zawartości manganu kształtowały się podobnie jak żelaza. Najmniejszą jego zawartością charakteryzowały się owoce z uprawy w glebie – 102,3 mg Mn/kg s.m. W przypadku pozostałych podłoży tj. włókna kokosowego i wełny mineralnej zawartości zawierały się w przedziale 116,5-117,6 mg Mn/kg s.m. Te wartości nie różniły się istotnie między sobą.

Średnia zawartość cynku w liściach sałaty wynosiła 67,1 mg Zn/kg s.m. i zawierała się w przedziale 53,2-76,3 mg Zn/kg s.m. Najmniejszą zawartość cynku odnotowano dla uprawy w węglu brunatnym, natomiast największe w wełnie mineralnej i włóknie kokosowym. Średnie dla tych dwóch obiektów nie różniły się istotnie między sobą. Zawartość w glebie była na pośrednim poziomie i wynosiła 64,2 mg Zn/kg s.m.

Zawartość miedzi w owocach papryki zawierała się w przedziale od 7,54 do 10,06 mg Cu/kg s.m. Największa była w liściach z wełny mineralnej i włókna kokosowego dla których średnie nie różniły się

istotnie między sobą. Statystycznie mniejsze zawartości odnotowano dla uprawy w glebie i węgla brunatnym. Średnie dla gleby i wełny mineralnej nie różniły się istotnie między sobą.

Odmienne kształtowała się zawartość boru w liściach sałaty, która wynosiła średnio 60,3 mg B/kg s.m. Wartości dla główek z poszczególnych kombinacji doświadczalnych zawierały się w przedziale od 54,2 do 68,9 mg B/kg s.m. Największą zawartość tego składnika odnotowano w liściach z węgla brunatnego. Dla pozostałych podłoży średnie były istotnie mniejsze i nie różniły się statystycznie między sobą.

Zawartość molibdenu w liściach sałaty była niewielka i wynosiła średnio 5,17 mg Mo/kg s.m. Najmniej tego składnika zawierały liście pochodzące z uprawy w węglu brunatnym – 3,42 mg Mo/kg s.m. a największe z wełny mineralnej i włókna kokosowego. W przypadku uprawy w glebie była to zawartość na pośrednim poziomie. Średnie dla tych podłoży nie różniły się istotnie między sobą.

Tabela 20. Wpływ technologii uprawy na zawartość mikroskładników w liściach sałaty [mg/kg s.m.]

Obiekt badawczy	Fe	Mn	Zn	Cu	B	Mo
GLEBA - KONTROLA	116,3a	102,3a	64,2b	8,25a	55,6a	5,21b
WEŁNA MINERALNA	135,2b	117,6b	74,6c	9,56b	54,2a	6,04b
WĘGIEL BRUNATNY	142,3c	121,3c	53,2a	7,54a	68,9b	3,42a
WŁÓKNO KOKOSOWE	132,5b	116,5b	76,3c	10,06b	62,4ab	6,02b
ŚREDNIO	131,6	114,4	67,1	8,85	60,3	5,17

6. Zużycie wody w uprawie warzyw w tunelu foliowym

Woda jest kluczowym czynnikiem uprawy roślin. Jej zużycie przez rośliny zależy od wielu czynników, głównie przebiegu pogody oraz technologii uprawy. Większość wody zużywana jest do transpiracji czyli parowania z tkanek roślinnych. Część wody jest tracona wskutek infiltracji do głębszych warstw gleby poza zasięg systemu korzeniowego. W przypadku upraw pod osłonami ponieważ dach obiektu nie pozwala na dostęp wody do uprawy a podlewanie jest realizowane w takich dawkach żeby utrzymać wilgotność gleby/podłoża na właściwym dla danego gatunku poziomie. Jest to zazwyczaj 60-85% PPW (Polowej Pojemności Wodnej). Jedynie w uprawach bezglebowych zazwyczaj stosuje się tzw. przelew czyli przepłukiwanie podłoża w ilości odpowiadającej 10-25% objętości podawanej pożywki. W uprawach bezglebowych rośliny podlewa się pożywkami, czyli wodnymi roztworami nawozów o niskim stężeniu składników pokarmowych. Z kolei w uprawie glebie procesem powodującym straty wody jest ewaporacja czyli jej parowanie z powierzchni gleby.

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że średnie zużycie wody w uprawie papryki w roku 2022 wynosiło średnio 586 l/m². Największe ilości wody zużyły rośliny uprawiane w glebie, średnio 640 l/m². Kolejne pod względem zużycia wody było podłoże z węgla brunatnego., następnie w wełnie mineralnej i włóknie kokosowym. Podobnie kształtowało się zużycie wody kalkulowane w przeliczeniu na roślinę. Wynosiło ono średnio 234 l/rośl. i było największe w uprawie w glebie 256 l/rośl.

Odmienne kształtowało się zużycie wody jeżeli zostanie skalkulowane na jednostkę plonu czyli w tym wypadku kg owoców papryki. Średnio wynosiło ono 35,8 l/kg. Największe było w przypadku węgla brunatnego co wynikało z faktu, że z tego podłoża uzyskano najmniejszy plon. Następnie pod względem

zużycia wody na jednostkę plonu była uprawa tradycyjna w glebie 44,9 l/kg. Znacznie efektywniej wykorzystywały wodę rośliny uprawiane w wełnie mineralnej i włóknie kokosowym, gdzie zużycie wody wynosiło odpowiednio 36,0 i 35,8 l/kg owoców.

Jako podsumowanie efektywności nawadniania może posłużyć parametr obrazujący w ujęciu procentowym jakie było zużycie wody w stosunku do obiektu kontrolnego, czyli uprawy w glebie. W przypadku wełny mineralnej stanowiło ono 87,8 %, węgla drzewnego 92,2 % a włókna kokosowego 85,9 %. Średnio uprawa papryki w systemie bezglebowym zużywała 88,6 % ilości wody stosowanej do podlewania w uprawie w glebie.

Tabela 21. Wpływ technologii uprawy na zużycie wody w uprawie papryki [2022 r.]

Obiekt badawczy	Zużycie wody			Zużycie w stosunku do kontroli [%]
	[l/m ²]	[l/rośl.]	[l/kg]	
GLEBA - KONTROLA	640	256	44,9	100
WEŁNA MINERALNA	562	225	36,0	87,8
WĘGIEL BRUNATNY	590	236	47,5	92,2
WŁÓKNO KOKOSOWE	550	220	35,8	85,9
ŚREDNIO	586	234	41,0	88,6

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że średnie zużycie wody w uprawie papryki w roku 2023 wynosiło średnio 556 l/m². Największe ilości wody zużyły rośliny uprawiane w glebie, średnio 613 l/m². Kolejne pod względem zużycia wody było podłoże z węgla brunatnego – 558 l/m², następnie w wełnie mineralnej – 540 l/m² i włóknie kokosowym – 513 l/m². Podobnie kształtowało się zużycie wody kalkulowane w przeliczeniu na roślinę. Wynosiło ono średnio 222 l/rośl. i było największe w uprawie w glebie 245 l/rośl.

Odmienne kształtowało się zużycie wody jeżeli zostanie skalkulowane na jednostkę plonu czyli w tym wypadku kg owoców papryki. Średnio wynosiło ono 43,1 l/kg. Największe było w przypadku węgla brunatnego – 48,2 l/kg, co wynikało z faktu, że z tego podłoża uzyskano najmniejszy plon. Następnie pod względem zużycia wody na jednostkę plonu była uprawa tradycyjna w glebie 47,3 l/kg. Znacznie efektywniej wykorzystywały wodę rośliny uprawiane w wełnie mineralnej i włóknie kokosowym, gdzie zużycie wody było podobne i wynosiło odpowiednio 39,1 i 37,8 l/kg owoców.

Jako podsumowanie efektywności nawadniania może posłużyć parametr obrazujący w ujęciu procentowym jakie było zużycie wody w stosunku do obiektu kontrolnego, czyli uprawy w glebie. W przypadku wełny mineralnej stanowiło ono 88,1 %, węgla drzewnego 91,0 % a włókna kokosowego 87,3 %. Średnio uprawa papryki w systemie bezglebowym zużywała 87,6 % ilości wody stosowanej do podlewania w uprawie w glebie co oznacza prawie dwunastoprocentową redukcję.

Tabela 22. Wpływ technologii uprawy na zużycie wody w uprawie papryki [2023 r.]

Obiekt badawczy	Zużycie wody			Zużycie w stosunku do kontroli [%]
	[l/m ²]	[l/rośl.]	[l/kg]	
GLEBA - KONTROLA	613	245	47,3	100
WEŁNA MINERALNA	540	216	39,1	88,1
WĘGIEL BRUNATNY	558	223	48,2	91,0
WŁÓKNO KOKOSOWE	513	205	37,8	83,7
ŚREDNIO	556	222	43,1	87,6

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że średnie zużycie wody w uprawie sałaty w roku 2022 wynosiło średnio 104,4 l/m². Największe ilości wody zużyły rośliny uprawiane w glebie, średnio 115,2 l/m². Kolejne pod względem zużycia wody było podłoże z węgla brunatnego – 97,6 l/m², następnie w włóknie kokosowym – 100,8 l/m² i wełnie mineralnej – 97,6 l/m². Podobnie kształtowało się zużycie wody kalkulowane w przeliczeniu na główkę sałaty. Wynosiło ono średnio 6,5 l/rośl. i było największe w uprawie w glebie 7,2 l/rośl.

Odmienne kształtowało się zużycie wody jeżeli zostanie skalkulowane na jednostkę plonu czyli w tym wypadku kilogram główek sałaty. Średnio wynosiło ono 25,1 l/kg. Największe było w przypadku węgla brunatnego – 29,4 l/kg, co wynikało z faktu, że z tego podłoża uzyskano najmniejszy plon. Następnie pod względem zużycia wody na jednostkę plonu była uprawa tradycyjna w glebie 27,1 l/kg. Znacznie efektywniej wykorzystywały wodę rośliny uprawiane w wełnie mineralnej i włóknie kokosowym, gdzie zużycie wody było podobne i wynosiło odpowiednio 21,9 i 23,0 l/kg owoców.

Jako podsumowanie efektywności wykorzystania wody może posłużyć parametr obrazujący w ujęciu procentowym jakie było zużycie wody w stosunku do obiektu kontrolnego, czyli uprawy w glebie. W przypadku wełny mineralnej stanowiło ono 84,7 %, węgla drzewnego 91,3 % a włókna kokosowego 87,5 %. Średnio uprawa sałaty w systemie bezglebowym zużywała 87,5 % ilości wody stosowanej do podlewania w uprawie w glebie co oznacza ponad dwunastoprocentową redukcję w stosunku do kontroli.

Tabela 23. Wpływ technologii uprawy na zużycie wody w uprawie sałaty masłowej [2022 r.]

Obiekt badawczy	Zużycie wody			Zużycie w stosunku do kontroli [%]
	[l/m ²]	[l/rośl.]	[l/kg]	
GLEBA - KONTROLA	115,2	7,2	27,1	100
WEŁNA MINERALNA	97,6	6,1	21,9	84,7
WĘGIEL BRUNATNY	104,0	6,5	29,4	90,3

WŁÓKNO KOKOSOWE	100,8	6,3	23,0	87,5
ŚREDNIO	104,4	6,5	25,1	87,5

Na podstawie przeprowadzonych badań w kolejnym roku wykazano, że średnie zużycie wody w uprawie sałaty w roku 2023 wynosiło średnio 99,2 l/m². Największe ilości wody zużyły rośliny uprawiane w glebie, średnio 108,8 l/m². Kolejne pod względem zużycia wody było podłoże z węgla brunatnego – 100,9 l/m², następnie w włóknie kokosowym – 92,8 l/m² i wełnie mineralnej – 94,4 l/m². Podobnie kształtowało się zużycie wody kalkulowane w przeliczeniu na roślinę sałaty. Wynosiło ono średnio 6,2 l/rośl. i było największe w uprawie w glebie 6,8 l/rośl. a najmniejsze we włóknie kokosowym 5,8 l/rośl. Na podobnym poziomie 5,9 l/rośl. było w przypadku wełny mineralnej.

Odmienne kształtowało się zużycie wody jeżeli zostanie skalkulowane na jednostkę plonu czyli w tym wypadku kilogram główek sałaty. Średnio wynosiło ono 26,7 l/kg. Największe było w przypadku węgla brunatnego – 32,4 l/kg, co wynikało z faktu, że z tego podłoża uzyskano najmniejszy plon. Następnie pod względem zużycia wody na jednostkę plonu była uprawa tradycyjna w glebie 28,2 l/kg. Znacznie efektywniej wykorzystywały wodę rośliny uprawiane w wełnie mineralnej i włóknie kokosowym, gdzie zużycie wody było podobne i wynosiło odpowiednio 22,5 i 23,5 l/kg sałaty.

Jako podsumowanie efektywności wykorzystania wody może posłużyć parametr obrazujący w ujęciu procentowym jakie było zużycie wody w stosunku do obiektu kontrolnego, czyli uprawy w glebie. W przypadku wełny mineralnej stanowiło ono 86,8 %, węgla drzewnego 92,6 % a włókna kokosowego 85,3 %. Średnio uprawa sałaty w systemie bezglebowym zużywała 88,2 % ilości wody stosowanej do podlewania w uprawie w glebie co oznacza prawie dwunastoprocentową redukcję w stosunku do kontroli.

Tabela 24. Wpływ technologii uprawy na zużycie wody w uprawie sałaty masłowej [2023 r.]

Obiekt badawczy	Zużycie wody			Zużycie w stosunku do kontroli [%]
	[l/m ²]	[l/rośl.]	[l/kg]	
GLEBA - KONTROLA	108,8	6,8	28,2	100
WEŁNA MINERALNA	94,4	5,9	22,5	86,8
WĘGIEL BRUNATNY	100,9	6,3	32,4	92,6
WŁÓKNO KOKOSOWE	92,8	5,8	23,5	85,3
ŚREDNIO	99,2	6,2	26,7	88,2

Na podstawie przeprowadzonych badań w kolejnym roku wykazano, że średnie zużycie wody w uprawie cykorii w roku 2023 wynosiło średnio 119,4 l/m². Największe ilości wody zużyły rośliny uprawiane w glebie, średnio 132,5 l/m². Kolejne pod względem zużycia wody było podłoże z węgla brunatnego – 118,6 l/m², następnie w włóknie kokosowym – 114,2 l/m² i wełnie mineralnej – 112,4 l/m². Podobnie

kształtowało się zużycie wody kalkulowane w przeliczeniu na roślinę cykorii. Wynosiło ono średnio 7,5 l/rośl. i było największe w uprawie w glebie 8,3 l/rośl. a najmniejsze w wełny mineralnej 7,0 l/rośl. Na podobnym poziomie 7,1 l/rośl. było w przypadku uprawy na włóknie kokosowym.

Odmienne kształtowało się zużycie wody jeżeli zostanie skalkulowane na jednostkę plonu czyli w tym wypadku kilogram główek cykorii. Średnio wynosiło ono 19,4 l/kg. Największe było w przypadku uprawy w gruncie – 23,4 l/kg. Na nieznacznie mniejszym poziomie było w przypadku węgla brunatnego – 22,8 l/kg, co wynikało z faktu, że z tego podłoża uzyskano najmniejszy plon. Znacznie efektywniejsze zużycie wody było w uprawie w wełnie mineralnej 15,5 l/kg i włóknie kokosowym 16,0 l/kg główek cykorii.

Jako podsumowanie efektywności wykorzystania wody może posłużyć parametr obrazujący w ujęciu procentowym jakie było zużycie wody w stosunku do obiektu kontrolnego, czyli uprawy w glebie. W przypadku wełny mineralnej stanowiło ono 84,8 %, węgla drzewnego 89,5 % a włókna kokosowego 86,2 %. Średnio uprawa sałaty w systemie bezglebowym zużywała 88,2 % ilości wody stosowanej do podlewania w uprawie w glebie co oznacza prawie dwunastoprocentową redukcję w stosunku do kontroli.

Tabela 25. Wpływ technologii uprawy na zużycie wody w uprawie cykorii warzywnej [2023 r.]

Obiekt badawczy	Zużycie wody			Zużycie w stosunku do kontroli [%]
	[l/m ²]	[l/rośl.]	[l/kg]	
GLEBA - KONTROLA	132,5	8,3	23,4	100
WEŁNA MINERALNA	112,4	7,0	15,5	84,8
WĘGIEL BRUNATNY	118,6	7,4	22,8	89,5
WŁÓKNO KOKOSOWE	114,2	7,1	16,0	86,2
ŚREDNIO	119,4	7,5	19,4	86,8

13. Napotkane problemy

W toku badań napotkano na następujące problemy:

1. Dostępne na rynku sorbenty mają nieoptymalną charakterystykę z punktu widzenia warunków pracy kolumn sorpcyjnych – wymagane było mielenie ziaren sorbentów by uzyskać zadaną ich wielkość.
2. Komercyjne wymienniki ciepła nie są przystosowane do realizacji skutecznego odzysku wody. Wykrapająca się woda nie ma zagwarantowanego swobodnego spływu, może zalegać w przestrzeniach wymiennika, a dodatkowo jest wtórnie odparowywana przez przepływające powietrze.
3. W budowanych w warunkach laboratoryjnych prototypach występowały problemy ze szczelnością, skutkujące utratą wykroplonej wody.
4. Podczas procesu skraplania wody w wymienniku wydziela się duża ilość ciepła utajonego, ciepło to rozprasza się i częściowo podgrzewa chłodzony strumień, z którego wykrapana jest woda. Zjawisko to obniża skuteczność wykrapiania. Ograniczenie tego zjawiska wymagać będzie

zaprojektowania wymiennika ciepła w oparciu o symulacje komputerowe – komercyjne rozwiązania wymienników ciepła nie pozwalają na badanie, ani ograniczanie tego zjawiska.

5. Modyfikowanie konstrukcji wymiennika napotkało szereg trudności – występowały nieszczelności, które obniżały ilość zbieranej wody.

14. Wnioski

1. W eksperymentach uzyskano odzysk nie przekraczający 40% odzysku teoretycznego – przyczyną było uwalnianie się ciepła utajonego oraz nieszczelności i błędna konstrukcja wymiennika.
2. Kluczowym czynnikiem warunkującym wielkość instalacji jest przepływ powietrza wymagany do odprowadzenia ciepła z układu.
3. Aktualny poziom gotowości technologicznej rozwiązania TLR wynosi 6 i wymagane są dalsze prace rozwojowe.
4. Kluczowymi zagadnieniami jest opracowanie nowych sorbentów wilgoci oraz budowa dedykowanego wymiennika ciepła przeznaczonego specjalnie do odzysku wody.
5. Uprawa w systemie bezglebowym pozwala na uzyskanie plonów większych od tradycyjnej produkcji w glebie. Na podstawie wykonanych badań wykazano, że plon ogólny i handlowy papryki, sałat i cykorii z uprawy w wełnie mineralnej i włóknie kokosowym był istotnie większy od tradycyjnej uprawy w glebie. Jedynie uprawa w węglu brunatnym skutkowała mniejszym plonowaniem w porównaniu do kontroli i innych podłoży testowanych w badaniach. Prawdopodobnie wynika to ze specyficznych właściwości wodnych tego podłoża, jest ono bardzo przepuszczalne. Drugim problemem są właściwości chemiczne tj. bardzo wysoka zawartość boru na poziomie zbliżonym do fitotoksyczności oraz niskim pH oraz utrudnioną dostępnością molibdenu odpowiedzialnego za przemiany azotu w roślinach.
6. Jakość warzyw uprawianych w systemie bezglebowym charakteryzowała się wysokim poziomem zawartości substancji biologicznie czynnych oraz składników mineralnych. Stan podżywienia warzyw był prawidłowy z wyjątkiem fosforu, boru i molibdenu u roślin uprawianych w węglu brunatnym.
7. Uprawa papryki, sałat i cykorii warzywnej w systemie bezglebowym pozwala uzyskać oszczędności wody do fertygacji papryki, sałaty i cykorii o 10-15% w zależności od gatunku i sezonu wegetacyjnego. Uprawa sałaty i papryki na węglu brunatnym pozwala na mniejsze oszczędności wody w ilości 8-10% w zależności od gatunku i sezonu wegetacyjnego. Mniejsza efektywność w przypadku tego podłoża wynika prawdopodobnie z gorszych jego parametrów oraz problemów z żywieniem roślin co skutkowało istotnie mniejszymi plonami uzyskiwanymi z tego

15. Bibliografia

- [1] K. Kubiak, S. Machula, Influence of Climate Changes on the State of Water Resources in Poland and Their Usage, *Geosciences*. (2020).
- [2] M. Szwed, G. Karg, I. Pińskwar, M. Radziejewski, D. Graczyk, A. Kędziora, Z.W. Kundzewicz, Climate change and its effect on agriculture, water resources and human health sectors in Poland, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* (2010) 1725–1737. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1725-2010>.
- [3] P. Bikram, D. Bandita, Soilless farming – the next generation green revolution, *Curr. Sci. Assoc.* 116 (2019) 728–732.
- [4] K. Rajiv, *Modern Plant Physiology*, CRC Press, n.d.

-
- [5] J.B. Campen, G.P.A. Bot, H.F. De Zwart, Dehumidification of Greenhouses at Northern Latitudes, 86 (2003) 487–493. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.08.008>.
- [6] J.G. Pieters, Condensation and Static Heat Transfer Through Greenhouse Covers During CONDENSATION AND STATIC HEAT TRANSFER THROUGH GREENHOUSE COVERS DURING NIGHT, (2016). <https://doi.org/10.13031/2013.28289>.
- [7] D. Piscià, J.I. Montero, E. Baeza, B.J. Bailey, A CFD greenhouse night-time condensation model, Biosyst. Eng. 111 (2011) 141–154. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.11.006>.
- [8] J. Górczyński, Pozyskiwanie i przetwarzanie energii odnawialnej, Napędy i Sterow. (2020) 70–77.
- [9] M. Soussi, M.T. Chaibi, M. Buchholz, Comprehensive Review on Climate Control and Cooling Systems in Greenhouses under Hot and Arid Conditions, (2022).