



Optimizacija postopka hidrotermične razgradnje odpadnih olupkov ananasa

Optimisation of the hydrothermal decomposition of pineapple peel waste

► Ana Marija Črešnar, Mojca Škerget, Maja Čolnik
Univerza v Mariboru, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo

Izvleček

Ananas (*Ananas comosus*) je priljubljen tropski sadež. Zaradi njegove široke uporabe in obsežne predelave nastajajo velike količine odpadkov, ki predstavljajo od 25 do 35 odstotkov celotne mase sadeža in lahko povzročajo veliko obremenitev za okolje. Eno izmed obetavnih in učinkovitih metod za procesiranje odpadne biomase predstavljajo hidrotermični procesi (pod- in nadkritična voda). Pri teh postopkih sočasno potekajo številne reakcije, ki povzročijo predelavo odpadne biomase v koristne izdelke.

Cilja raziskave sta bila načrtovanje in optimizacija postopka izolacije vrednih spojin iz odpadnih olupkov ananasa s hidrotermičnimi procesi z uporabo metode odzivnih površin (RSM) po zasnovi Box-Behnkenovega eksperimentalnega načrtovanja. Hidrotermično razgradnjo olupkov ananasa smo izvajali pri različnih reakcijskih pogojih, kjer smo spreminjali tri parametre: temperaturo (180, 200 in 220 °C), čas (15, 30 in 45 min) in razmerje topilo – material (10:1, 20:1 in 30:1 mL/g).

Ugotovili smo, da imata reakcijska parametra temperatura in čas največji vpliv na razgradnjo in pridobivanje vrednih proizvodov iz odpadkov ananasa, saj se z višanjem temperature in časa iz materiala ekstrahira večja količina vrednih spojin. V razgradnih izdelkih smo zaznali visoke vrednosti totalnih fenolov (od 90,50 do 156,90 mg/g ekstrakta) in visoke antioksidativne dejavnosti (od 54,5 do 78 %). Na podlagi eksperimentalnih podatkov, ki smo jih obdelali v programu Design Expert, smo pridobili optimalne pogoje (temperatura 205,4 °C, čas 32,34 min in razmerje topilo – material 21,346:1 mL/g) za ekstrakcijo totalnih fenolov (164,1 mgGA/g ekstrakta), derivatov sladkorjev (5-HMF (33,43 mg/g ekstrakta), furfurala (27,96 mg/g ekstrakta), 5-MF (1,46 mg/g ekstrakta)) in antioksidativne aktivnosti (71,14 %). S tem smo potrdili, da ima podkritična voda velik potencial kot medij za pridobitev vrednih spojin iz odpadkov ananasa.

Ključne besede: ekstrakcija s podkritično vodo, odpadna biomasa, odpadki ananasa (*Ananas comosus*), celokupni fenoli, antioksidativnost, derivati sladkorja

Abstract

Pineapple is a perennial plant from the Bromeliaceae family. The processing of pineapples generates large amounts of waste, accounting for between 25 and 35% of the fruit's weight, which can have a major impact on the environment.

Conventional and non-conventional extraction methods have proven to be effective for processing pineapple waste. Among the non-conventional extraction techniques, hydrothermal processes (sub- and supercritical water) for processing biomass have attracted the most interest, as in these processes, the decomposition reactions of the waste biomass with subcritical water and the separation of the decomposition products take place simultaneously.

The main objective of the research was to develop and optimise the process for isolating valuable compounds from pineapple peels using the response surface method with Box-Behnken design. The hydrothermal decomposition of pineapple peel waste was carried out under different conditions, in which three parameters were changed, i.e. temperature (180, 200, and 220 °C), time (15, 30, and 45 min) and solvent-to-material ratio (10:1, 20:1, and 30:1 mL/g).

Temperature and time have the greatest influence on the extraction of valuable compounds with subcritical water, as a larger amount of valuable compounds is extracted with increasing temperature. High antioxidant activity (from 54.5 to 78%) of the extracts and the content of total phenols (from 90.50 to 156.90 mg/g extract) were found in the decomposition product.

Based on the experimental data processed with the Design Expert programme, optimal conditions (temperature 205.4 °C, time 32.34 min, and solvent-to-material ratio 21.346:1 mL/g) for the extraction of total phenols (164.1 mgGA/g extract), sugar derivatives (5-HMF (33.43 mg/g extract), furfural (27.96 mg/g extract), 5-MF (1.46 mg/g extract)) and antioxidant activity (71.14%) were determined. This confirms that subcritical water has great potential as a medium for the extraction of valuable compounds from pineapple waste.

Keywords: extraction with subcritical water, biomass waste, pineapple waste (*Ananas comosus*), total phenols, antioxidant activity, sugar derivatives

1 Uvod

Ananas je trajnica družine Bromeliaceae, ki jo ljudje jedo po vsem svetu. [1] Proizvodnja ananasa se je v zadnjem desetletju precej povečala. Ocenjeno je bilo, da je v letu 2023 svetovna proizvodnja ananasa znašala približno 27,08 milijarde USD in na podlagi analize trga in trendov rasti, napovedi za prihodnost kažejo, da naj bi se velikost trga ananasa povečala kar na 36,80 milijarde USD do leta 2028. [2]

Ananas se lahko uživa svež ali pa se uporablja za pripravo sokov, marmelad in vložene sadja. Vendar pa se s predelavo sadeža pridela tudi velike količine odpadkov (med 25 in 35 odstotkov), ki se lahko uporabijo za krmo živali, v večji meri pa se odlagajo na odlagališča ali celo sežigajo, kar pa obremenjuje okolje. Hkrati s takšnim ravnanjem dragocene bioaktivne sestavine in druge vredne komponente iz odpadne biomase (sladkorji, beljakovine, vitamini, minerali, fenolne spojine in furfurali) ostanejo neizkoriščene. [3] Bioaktivne snovi

predstavljajo heterogeno skupino spojin, ki imajo pomembno fiziološko in farmakološko vlogo v prehrani, prehranskih dopolnilih, farmacevtskih izdelkih in kozmetičnih pripravkih. Makrohranila, kot so ogljikovi hidrati in beljakovine, zagotavljajo energijo ter gradbene komponente za delovanje in obnovo telesnih tkiv. Vitamini in minerali delujejo kot esencialni sodejavniki v številnih encimskih procesih, uravnavajo presnovo, podpirajo imunski sistem ter prispevajo k ohranjanju normalnih funkcij organov. Fenolne spojine kot predstavnice sekundarnih rastlinskih metabolitov izkazujejo izrazite antioksidativne in protivnetne učinke, s čimer prispevajo k zaščiti celic pred oksidativnim stresom in vnetnimi poškodbami tkiv. [4] Olupki ananasa vsebujejo hemiceluloze in pentoze, zaradi česar predstavljajo naravni substrat za tvorbo furfurala prek ustrezne kisle ali katalitične hidrolize pod optimalnimi pogoji. [5] Pravilno očiščen in obdelan furfural se uporablja kot reagent pri sintezi furan derivatov, smol in topil, v nizkih koncentracijah pa tudi kot dodatek v hrani in zdravilih.

tracijah pa lahko deluje tudi kot naravna aroma ter služi kot medprodukt pri sintezi drugih bioaktivnih spojin. [6]

Konvencionalne in nekonvencionalne ekstrakcijske tehnike so se izkazale kot učinkovite metode za predelavo odpadkov ananasa. [1] Med nekonvencionalnimi pristopi največ zanimanja kažejo hidrotermični postopki, ki omogočajo hkratno razgradnjo biomase s podkritično vodo in separacijo nastalih izdelkov. Podkritično vodo imenujemo vodo pod tlakom pri temperaturi nad njenim vreliščem pri standardnem tlaku in pod kritično točko ($T_k = 374,15^\circ\text{C}$, $P_k = 22,1\text{ MPa}$). Tlak podkritične vode mora biti višji od parnega tlaka pri določeni temperaturi, da voda ostane v tekočem stanju. S povišanjem temperature se fizikalno-kemijske lastnosti podkritične vode močno spremenijo in voda lahko hkrati deluje kot topilo, reaktant in katalizator. Podkritična voda je netoksična in okolju prijazno topilo, primerno za predelavo odpadne biomase v vredne izdelke. V primerjavi z organskimi topili (npr. metanol, etanol) ponuja prednosti z vidika varnosti in okoljske sprejemljivosti. [7], [8]

2 Eksperimentalni del

V raziskovalnem delu smo preučevali učinkovitost hidrotermičnega postopka s podkritično vodo za izolacijo vrednih spojin iz odpadnih olupkov ananasa. Za določitev začetnih pogojev razgradnje smo izvedli nekaj testnih eksperimentov, s katerimi smo določili tri ravni pogojev, in sicer za temperaturo, čas in razmerje topilo – material. Parametre smo nato vnesli v program Design – Expert 7.0, ki nam je predlagal 17 eksperimentov.

2.1 Hidrotermična razgradnja s podkritično vodo

Hidrotermično razgradnjo s podkritično vodo smo izvedli v visokotlačnem in visokotemperaturnem šaržnem reaktorju iz nerjavečega jekla ($V=60\text{ mL}$). Količina vzorca in volumen vode v reaktorju sta bila odvisna od predlaganega razmerja topilo – material (10:1, 20:1 in 30:1).

V reaktor smo najprej prenesli določeno količino zmletih posušenih olupkov ananasa in destilirano vodo. Zatesnjen reaktor smo postavili na magnetno mešalo, ga ovili z grelno kačo, reaktor prepihali z dušikom in nastavili začetni tlak v reaktorju na 40 bar. Reaktor smo segreli do želene temperature (180°C , 200°C in 220°C) in nato izvedli reakcije razgradnje pri stalni temperaturi. Po določenem reakcijskem času (15, 30 in 45 min) smo reaktor hitro ohladili, da smo zaustavili proces razgradnje. Nastalo reakcijsko zmes smo prefiltrirali in s pomočjo rotacijskega uparjalnika odstranili vodo iz vodne faze ter določili količino izoliranega ekstrakta.

2.2 Določanje antioksidativne dejavnosti z radikalsko metodo

Antioksidativno dejavnost ekstraktov smo določili z uporabo stabilnega 2, 2 – difenil – 1- pikrihidrazil (DPPH) prostega radikala. Vzorce smo pripravili tako, da smo v stekleničke odpipetirali 3 mL DPPH raztopine (koncentracija DPPH je znašala 0,2 mg/mL) in 77 μL raztopine ekstrakta ter tako pripravljene vzorce termostatirali 15 minut pri sobni temperaturi v temnem prostoru, medtem ko smo referenčno raztopino pripravili z metanolom in jo takoj pomerili. Absorbanco vzorcev smo izmerili na UV-Vis spektrofotometru pri valovni dolžini 515 nm. [9] Antioksidativna dejavnost je izražena v odstotkih.

2.3 Določanje totalnih fenolov

Vsebnost totalnih fenolov smo določili na osnovi oksidacijske reakcije fenolnih spojin s Folin-Ciocateu reagentom (FC). Vzorec smo pripravili tako, da smo zmešali 0,5 mL raztopine ekstrakta, 2,5 mL FC reagenta (razredčeno 1:10 v vodi) in 2 mL raztopine Na_2CO_3 (75 mg/mL). Pripravljene raztopine smo termostatirali 5 minut v vodni kopeli pri 50°C . [10] Ohlajenim raztopinam smo izmerili absorbanco na UV-Vis spektrofotometru pri 760 nm. Koncentracijo totalnih fenolov v ekstraktih smo izračunali s pomočjo umeritvene krivulje z galno kislino po enačbi:

$$Y_{GA} = \frac{\text{Abs}-0,0374}{9,4655}$$

kjer Abs predstavlja absorbanco raztopine vzorca, izmerjene pri 760 nm in Y_{GA} koncentracijo GA v raztopini ekstrakta [mg/mL]. Rezultate smo predstavili v mg galne kisline (GA) na g ekstrakta.

2.4 HPLC-analiza sladkorjev in furfuralov

Koncentracijo različnih furfuralov (5–HMF, furfural, 5-MF) v nastalih vodnih fazah po hidrotermični razgradnji smo določili s pomočjo sistema HPLC in kolone Agilent ZORBAX, katere temperatura je znašala 25°C . Mobilna faza je bila sestavljena iz topila A, ki je predstavljal metanol, in topila B, ki je bila mešanica Milli Q vode in 0,1 % trifluoroocetne kisline. Uporabljeni so bili gradienti: 0 min 90 % B, 18 min 65 % B in 20 min 90 % B. Pretok skozi kolono je bil 1 mL/min, medtem ko je volumen injiciranega vzorca ekstrakta znašal 10 μL . Detekcija furfuralov je potekala pri valovni dolžini 280 nm.

Za določanje vsebnosti sladkorjev v ekstraktih pa smo uporabili sistem HPLC Shimadzu Nexera s RI-detektorjem. Ločitev komponent smo izvedli z izokratsko metodo na kromatografski koloni pri 60°C in pretoku mobilne faze 0,6 mL/min. Za mobilno fazo smo uporabili 5 mM raztopino H_2SO_4 . Vsebnosti sladkorjev in njihovih derivatov smo preračunali s pomočjo umeritvenih krivulj standardnih raztopin in rezultate predstavili v mg komponente na g ekstrakta.

2.5 Optimizacija procesnih parametrov

Z namenom zmanjšanja števila izvedenih eksperimentov in optimizacije procesa izolacije vrednih spojin iz olupkov ananasa smo izvedli eksperimentalni načrt in uporabili metodo odzivnih površin z zasnovo Box-Behnkenovega načrtovanja. V statistiki je BBD eksperimentalni načrt z metodo odzivnih površin, ki potrebuje podatke o neodvisnih spremenljivkah in najmanj tri eksperimentalne ravni, da lahko predlaga eksperimentalni načrt. V našem primeru smo optimizirali tri neodvisne spremenljivke: A – temperaturo ($^\circ\text{C}$), B – čas (min) in C – razmerje topilo – material (mL/g) v treh eksperimentalnih ravneh. Eksperimentalni načrt je vključeval 17 kombinacij izbranih parametrov, pri čemer je bilo pet ponovitev centralne točke namenjenih oceni čiste napake vsote kvadratov.

Na podlagi eksperimentalnega načrta smo izvedli eksperimente pri predlaganih pogojih ter ekstrakte analizirali na vsebnost totalnih fenolov in antioksidativno dejavnost ter vsebnost sladkorjev in furfuralov. Pridobljene rezultate smo vpisali v program Design – Expert 7.0 in izvedli statistično analizo variance (ANOVA). Za vsak posamezen parameter smo razvili funkcijsko odvisnost v obliki večstopenjskega polinoma, da je zadostil vsem pogojem. Za tem smo določili tudi optimalne pogoje.

3 Rezultati in diskusija

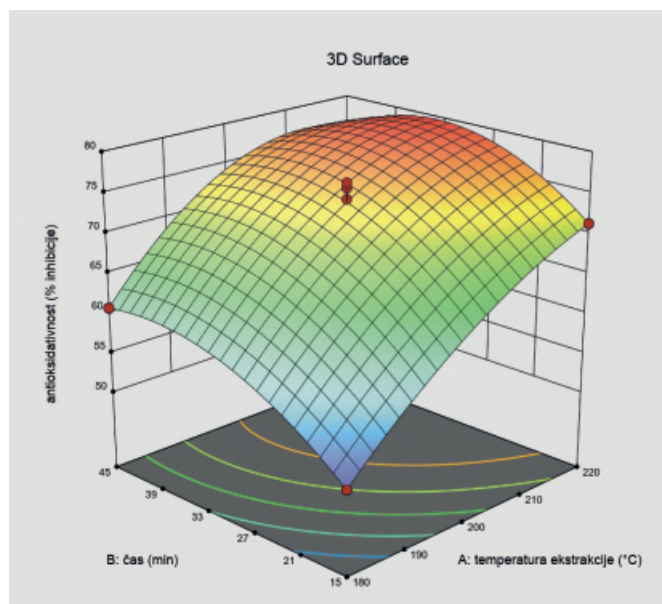
Postopek hidrotermične razgradnje odpadkov iz ananasa v vredne izdelke smo optimizirali z uporabo metode odzivnih površin (RSM). Najprej smo izvedli eksperimente s predlaganimi kombinacijami treh ključnih spremenljivk, nato pa smo z uporabo večfaktorske regresijske analize eksperimentalnih rezultatov za posamezne izolirane spojine izpeljali ustrezne modele v obliki večstopenjskih polinomov. S tem smo pridobili tudi optimalne pogoje ekstrakcije s čim višjo antioksidativno aktivnostjo, vsebnostjo totalnih fenolov ter visoko vsebnostjo 5-HMF.

3.1 Antioksidativna dejavnost

Na podlagi eksperimentov smo ugotovili, da antioksidativna dejavnost v ekstraktih s temperaturo narašča, in sicer s 50 % pri 180°C na 78 % pri 220°C , kjer smo pri razmerju topilo – material 30 mL/g dosegli tudi maksimalno vrednost. Kot smo ugotovili iz rezultatov, reakcijski čas in razmerje topilo – material bistveno ne vplivata na antioksidativno dejavnost ekstraktov, medtem ko ima temperatura velik vpliv. Kot rezultat regresijske analize eksperimentalnih podatkov smo dobili model v obliki polinoma druge stopnje za napoved antioksidativne dejavnosti ekstraktov (Y_1) v odvisnosti od procesnih parametrov (enačba 3.1).

$$Y_1 = 74,26 + 9,85A + 2,63B + 2,18AC - 3,12BC - 8,01A^2 + 9,52B^2 \quad (3.1)$$

Eksperimentalni in izračunani rezultati po metodi BBD so skladni, saj so odstopanja le med 0 in 3 odstotki. Slika 3-1 prikazuje antioksidativno dejavnost ekstraktov pri razmerju topilo – material 20 mL/g v tridimenzionalnem diagramu, izračunano z zgornjim modelom (enačba 3.1).

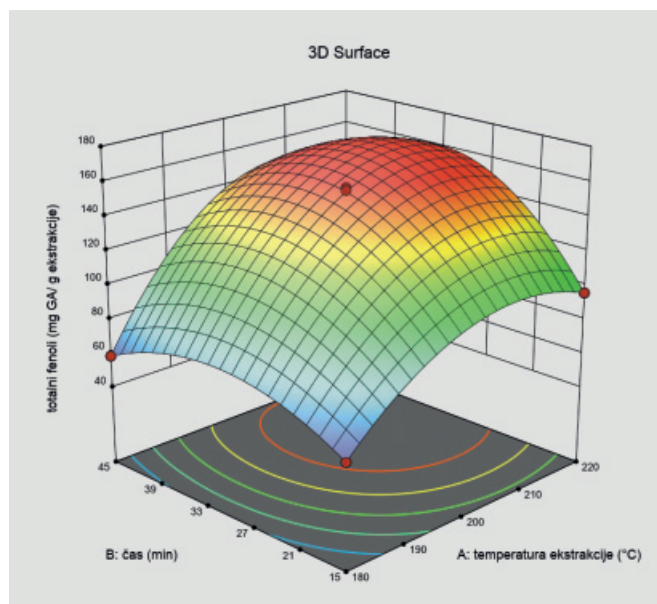


Slika 3-1: Odvisnost antioksidativne dejavnosti ekstraktov iz olupkov ananasa od temperature in časa pri razmerju topilo/material (20 mL/g) / Figure 3-1: Effect of temperature and extraction time on the antioxidant activity of pineapple peel extracts at a solvent-to-material ratio of 20 mL/g.

3.2 Vsebnost totalnih fenolov

Podobno kot antioksidativna dejavnost tudi vsebnost totalnih fenolov v ekstraktu s temperaturo narašča. Pri 180 °C so vsebnosti totalnih fenolov v ekstraktih zelo nizke, in sicer se gibljejo od 53,10 do 69,90 mg/g ekstrakta. Ta temperatura je najverjetneje prenizka, da bi se iz olupkov ananasa ekstrahirala večja količina fenolov. Z nadaljnjim naraščanjem temperature koncentracija totalnih fenolov v ekstraktih narašča in doseže najvišje vrednosti (od 90,50 do 156,90 mg/g ekstrakta) pri 200 °C in 220 °C (Slika 3-2). Rezultat regresijske analize eksperimentalnih podatkov je polinom druge stopnje (enačba 3.2), ki daje ustrezne rezultate za napoved vsebnosti totalnih fenolov v ekstraktih (Y_2), saj so odstopanja med teoretičnimi in eksperimentalnimi podatki pod 7 %.

$$Y_1 = 154,40 + 32,90A + 9,08B + 8,93C + 4,75AB - 39,23A^2 - 28,17B^2 - 16,67C^2 \quad (3.2)$$



Slika 3-2: Tridimenzionalna odzivna površina modela za določitev vsebnosti totalnih fenolov pri razmerju topilo – material 20 mL/g. / Figure 3-2: Three-dimensional response surface model for determining the total phenolic content at a solvent-to-material ratio of 20 mL/g.

3.3 Sladkorji in njihovi derivati

V času razgradnje ananasovih olupkov so nastajali različni sladkorji (glukoza, fruktoza), ki pa so z višanjem temperature razpadali in se pretvorili v njihove derivate (furfurale). V Tabeli 3-1 so predstavljeni eksperimentalni in teoretični rezultati najpogostejše zastopanega sladkorja (glukoza) in derivata sladkorjev (5-HMF). Koncentracija glukoze v ekstraktih se pri 180 °C giblje od 3,90 do 11,60 mg/g ekstrakta. Z višanjem temperature koncentracija glukoze v ekstraktih narašča ter pri 200 °C znaša od 0,60 do 18,31 mg/g ekstrakta, nato pa pri temperaturi 220 °C upade in znaša le še od 0,0 do 1,28 mg/g ekstrakta. Visoke temperature in daljši reakcijski časi najverjetneje povzročijo, da se glukoza z reakcijo dehidracije ali izomerizacije začne pretvarjati v 5-HMF in ostale razgradne izdelke. [11] Regresija eksperimentalnih podatkov nam da polinomom druge stopnje (enačba 3.3) za izračun koncentracije glukoze v ekstraktih (Y_3).

$$Y_3 = 16,07 - 3,80A + 1,60C + 1,35AB - 2,25AB - 5,56A^2 - 5,96B^2 + 6,32C^2 \quad (3.3)$$

Run	T [°C]	t [min]	R(topilo - material) [mL/g]	glukoza [mg/g ekstrakta]		5-HMF [mg/g ekstrakta]	
				EKSPERIMENTALNO	IZRAČUNANO	EKSPERIMENTALNO	IZRAČUNANO
1	220	30	30	0	-0,25	13,23	12,77
2	200	30	20	15,32	16,07	35,15	34,9
3	200	30	20	18,31	16,07	33,18	34,9
4	220	30	10	1,28	1,04	11,7	11
5	220	45	20	1	1,3	12,3	12,92
6	200	45	10	0,6	0,54	17,21	17,29
7	200	45	30	5,5	5,45	22,24	22,09
8	200	15	30	5,27	5,33	18,79	18,7
9	220	15	20	0	0,19	11,07	11,61
10	200	30	20	16,22	16,07	35,67	34,9
11	200	30	20	14,4	16,07	34,41	34,9
12	200	30	20	16,12	16,07	36,1	34,9
13	180	45	20	6,4	6,21	6,28	5,74
14	180	30	10	3,9	4,15	3,87	4,33
15	200	15	10	3,8	3,85	19,36	19,52
16	180	30	30	11,6	11,84	5,86	6,55
17	180	15	20	10,8	10,5	6,51	5,9

Tabela 3-1: Eksperimentalne in izračunane vsebnosti glukoze in 5-HMF v ekstraktih dobljenih s hidrotermično razgradnjo olupkov ananasa / Table 3-1: Experimental and calculated contents of glucose and 5-HMF in extracts obtained by hydrothermal degradation of pineapple peels.

Najnižjo koncentracijo 5-HMF smo zaznali pri 180 °C, kjer se vrednosti gibljejo od 3,87 do 6,51 mg/g ekstrakta. Koncentracija 5-HMF v ekstraktih s temperaturo narašča in pri 200 °C, 30 min in razmerju topilo – material 20 mL/g doseže najvišjo vsebnost (36,10 mg/g). Z nadaljnjim višanjem temperature do 220 °C pa začne koncentracija 5-HMF upadati (od 11,07 do 9,36 mg/g ekstrakta) zaradi nadaljnje razgradnje v druge izdelke (plinske komponente, bio-ogljje). Izračunane vsebnosti 5-HMF v ekstraktih (Y_4) smo določili na podlagi polinoma druge stopnje (enačba 3.4), ki ga je predlagal program:

$$Y_4 = 2189,17 + 83,02A + 7,95C + 7,87BC + 1409,72A^2 + 240,89B^2 + 265,43C^2 \quad (3.4)$$

3.4 Optimizacija hidrotermične razgradnje olupkov ananasa po metodi BBD

Glavni cilj raziskave je bil določiti optimalne pogoje postopka izolacije vrednih spojin iz olupkov ananasa s hidrotermično razgradnjo. Želeli smo pridobiti ekstrakt s čim višjo koncentracijo totalnih fenolov, 5-HMF in antioksidativno aktivnostjo (Tabela 3-2) in z zadovoljivimi vsebnostmi ostalih spojin.

Računalniški program je predlagal naslednjo kombinacijo procesnih parametrov:

$$T = 205,4 \text{ } ^\circ\text{C}, t = 32,34 \text{ min in } R_{\text{topilo/material}} = 21,346 \text{ mL/g.}$$

Pri teh pogojih bi naj vsebnost totalnih fenolov znašala 162,29 mg GA/g ekstrakta, antioksidativna dejavnost 76,76 % ter vsebnost 5-HMF 34,37 mg/g ekstrakta. Pri teh pogojih smo vnovič izvedli hidrotermično razgradnjo ananasovih olupkov ter pridobili naslednje eksperimentalne rezultate: vsebnost totalnih fenolov je znašala 164,10 mg GA/g ekstrakta, antioksidativna dejavnost 71 % ter vsebnost 5-HMF 33,43 mg/g ekstrakta. Na podlagi pridobljenih rezultatov lahko vidimo, da se eksperimentalni in teoretični podatki zelo dobro ujemajo. S tem smo potrdili ustreznost izbranih modelov.

	IZRAČUNANE VREDNOSTI	EKSPERIMENTALNE VREDNOSTI
izkoristek ekstrakcije [%]	24,76	25,98
antioksidativna aktivnost [%]	76,76	71,14
totalni fenoli [mg/g ekstrakta]	162,29	164,1
5 – HMF [mg/g ekstrakta]	34,37	33,43
furfural [mg/g ekstrakta]	27,74	27,96
5 – MF [mg/g ekstrakta]	0,14	1,46

Tabela 3-2: Izračunane vrednosti po metodi BBD in eksperimentalno določene vrednosti hidrotermične razgradnje olupkov ananasa s podkritično vodo pri optimalnih pogojih / Table 3-2: Calculated values obtained using the BBD method and experimentally determined values of the hydrothermal degradation of pineapple peels in subcritical water under optimal conditions.

4 Zaključek

Cilj raziskovalnega dela je bil načrtovati in optimizirati postopek pridobivanja vrednih spojin (fenolne spojine, sladkorji, furfurali) iz olupkov ananasa s pomočjo hidrotermične razgradnje s podkritično vodo. S pomočjo metode odzivnih površin smo določili optimalne pogoje za doseg čim višjih vsebnosti fenolnih komponent, antioksidativne dejavnosti in vsebnosti 5-HMF v ekstraktih ob zadovoljivi vsebnosti ostalih vrednih spojin.

Na podlagi rezultatov smo ugotovili, da imata temperatura in čas najizrazitejši vpliv na učinkovitost pridobivanja bioaktivnih spojin iz odpadnih olupkov ananasa. Nizke temperature so povzročile nizke koncentracije vrednih komponent v ekstraktih iz ananasovih olupkov, medtem ko so se z zvišanjem temperature na 200 °C v ekstraktih bistveno povečale koncentracije skupnih fenolnih spojin, topnih sladkorjev in furfuralov, prav tako pa se je v ekstraktih zvišala tudi antioksidativna dejavnost. Nadaljnjo zvišanje temperature na 220 °C pa je povzročilo razgradnjo nastalih izdelkov v sekundarne razgradne izdelke, kot so plini in trdne snovi. Časovno trajanje hidrotermične razgradnje 30 min je optimalno za pridobivanje vrednih spojin, kar pa ne velja za krajši čas 15 min, kjer se ne ekstrahira dovolj spojin, in daljši čas (45 min), kjer se vredne spojine že začnejo razgrajevati. Optimalni pogoji za pridobitev čim višjih vsebnosti totalnih fenolnih komponent, antioksidativne dejavnosti in ekstraktov, bogatih s 5-HMF, so bili: $T = 205,4 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t = 32,34 \text{ min}$ in razmerje topilo material 21,346 mL/g. Pri teh pogojih smo nato še eksperimentalno določili vsebnosti posameznih komponent in ugotovili dobro ujemanje teoretičnih in eksperimentalnih rezultatov. Ugotovili smo, da je voda dober medij za izolacijo vrednih komponent iz odpadne biomase in da lahko z optimizacijo parametrov pomembno vplivamo na zelene razgradne izdelke.

Literatura

- [1] Salve, R. R., in Ray, S. Comprehensive study of different extraction methods of extracting bioactive compounds from pineapple waste – A review. The Pharma Innovation Journal, 2020, vol. 9, št. 6, str. 327–340.
- [2] Research and Markets, Pineapple Market Analysis, Growth Trends & Forecasts 2023–2028 - Rising Demand for Fresh Pineapples Adds Impetus to Market Expansion, Dostopno na spletu: <https://www.globenewswire.com/news-release/2024/01/24/2815659/28124/en/Pineapple-%20Market-Analysis-Growth-Trends-Forecasts-2023-2028-Rising-Demand-for-Fresh-Pineapples-Adds-%20Impetus-to-Market-Expansion.html>.
- [3] Sepúlveda, L., Romani, A., Aguilar, C. N., in Teixeira, J. Valorization of pineapple waste for the extraction of bioactive compounds and glycosides using autohydrolysis. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, vol. 47, str. 38–45.
- [4] Sorrenti, V., Burò, I., Consoli, V., in Vanella, L. Recent advances in health benefits of bioactive compounds from food wastes and by-products: Biochemical aspects. International Journal of Molecular Sciences, 2023, vol. 24, št. 3, str. 2019.
- [5] Meena, L., Sengar, A. S., Neog, R. in Sunil, C. K., Pineapple processing waste (PPW): Bioactive compounds, their extraction, and utilisation: A review. Journal of Food Science and Technology, 2021, vol. 59, št. 11, str. 4152–4164.
- [6] Eseyin, A. E., in Steele, P. H. An overview of the applications of furfural and its derivatives. International Journal of Advanced Chemistry, 2015, vol. 3, št. 2, str. 42–47.
- [7] Cheng, Y., Xue, F., Yu, S., Du, S. in Yang, Y. Subcritical Water Extraction of Natural Products. Molecules, 2021, vol. 26, št. 13, str. 4004.
- [8] Ferreira, C., Moreira, M. M., Delerue – Matos C. in Sarraguça M. Subcritical Water Extraction to Valorize Grape Biomass – A Step Closer to Circular. Molecules, 2023, vol. 28, št. 22, str. 7538.
- [9] Marinova, G. in Batchvarov, V. Evaluation of the methods for determination of the free radical scavenging activity by DPPH. Bulgarian Journal of Agricultural Science, 2011, vol. 17, str. 11–24.
- [10] Čolnik, M., Irgolič, M., Perva, A. in Škerget, M. The Conversion of Pistachio and Walnut Shell Waste into Valuable Components with Subcritical Water. Processes, 2024, vol. 12, št. 1, str. 195.
- [11] Čolnik M., Irgolič M., Perva A. in Škerget M. Hydrolytic Decomposition of Corn cobs to Sugars and Derivatives Using Subcritical Water. Processes, 2025, vol. 13, št. 1, str. 267.