



ZOTKS

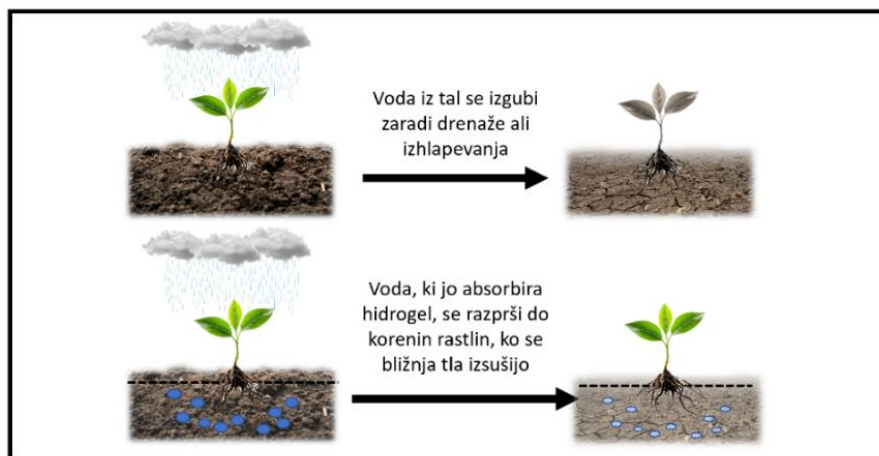
Zveza za tehnično kulturo Slovenije

59. SREČANJE MLADIH RAZISKOVALCEV SLOVENIJE

Naslov raziskovalne naloge:

**SINTEZA KOPOLIMERNEGA HIDROGELA ZA
ZADRŽEVANJE VODE V ZEMLJI**

Področje: **Ekologija z varstvom okolja**



Avtorji:

Gabrijela Krajnc, 9.r., Osnovna šola KUNGOTA

Rostyslav Sorokin, 9.r., Osnovna šola KUNGOTA

Kjara Urbancl, 9.r., Osnovna šola KUNGOTA

Mentorica:

Zdenka Keuc, prof., Osnovna šola KUNGOTA

Zg. Kungota, februar 2025

Kazalo vsebine

1 UVOD	6
1.1 Opis problema, ki ga rešuje raziskovalna naloga.....	6
1.2 Cilji naloge.....	7
1.3 Hipoteze	8
1.4 Tehnike dela.....	9
2 PREGLED LITERATURE	9
2.1 Spremljanje pojava suše v Evropi in v Sloveniji	9
2.2 Podnebno odporen razvoj.....	10
2.3 Zasnova sušnih kazalnikov v Sloveniji	12
2.3.4 Rešitve za premagovanje težav s sušo	12
2.4 Odkritje hidrogela	15
2.5 Klasifikacija hidrogelov in njihov razvoj.....	16
2.6 Kopolimer natrijevega alginata (NA) in polivinil alkohola (PVA).....	17
2.6.1 Zamreževalec - pentan-1,5-dial (glutaraldehid).....	18
2.7 Uporaba hidrogelov v kmetijstvu.....	18
2.8 Karakterizacija hidrogela	20
2.8.1 Infra rdeča spektroskopija (FT-IR)	20
2.8.2 Pregled površinske morfologije hidrogela.....	21
2.8.3 Vežava vode na hidrokele (absorbicija/desorbicija)	21
2.8.4 Nabrekanje hidrogela pri različnih vrednostih pH.....	21
2.8.5 Nabrekanje posušenih vzorcev hidrogela	21
2.8.6 Nabrekanje hidrogelov v 3% raztopinah soli.....	21
3 PRAKTIČNO DELO	22
3.1 Sinteza hidrogela in njegova karakterizacija.....	22
3.2 Poskus z zimsko solato	23
3.3 Pripomočki.....	23
3.4 Kemikalije.....	24
3.5 Sinteza hidrogela.....	24
3.5.1 Prva serija poskusov	24
3.5.2 Druga serija poskusov.....	25
3.5.3 Tretja serija poskusov	25
4 REZULTATI Z RAZPRAVO	26
4.1 Sinteza hidrogela.....	26
4.2 Karakterizacija hidrogela	26

4.2.1 FT-IR spektri	26
4.2.2 Površinska morfologija hidrogelov	28
4.2.3 Obnašanje hidrogela pri nabrekanju	29
4.2.4 Nabrekanje pri različnih vrednostih pH vode.	30
4.2.5 Nabrekanje v raztopini soli	32
4.3 Vpliv hidrogela na vsebnost vlage in pH v tleh	32
4.4 Spremljanje rasti rastlin	34
6 ZAKLJUČKI	36
7 LITERATURA	39
7.1 Internetni viri	42

Kazalo slik

Slika 1. Južna fasada šole (marec 2024), predno smo začeli postavljati šolski vrt (lastni vir).....	6
Slika 2. April 2024 zasaditev dreves in september 2024 pobiranje zadnjih pridelkov na šolskih gredah (lasten vir)	7
Slika 3. Naraščanje suše v Evropi (Oktober 2024, EU Science HUB)	10
Slika 4. Vrste suš (Krajnik s sod., 2015)	11
Slika 5. Sedem korakov načrta upravljanja s sušo v Sloveniji (Gregorič s sod., 2014)	12
Slika 6. Strukturna formula enote polihidroksietilmetakrilata (Sigma Aldrich, 2024)	15
Slika 7. Nastanek hidrogela (Besarab, 2021)	15
Slika 8. Dodatek hidrogela zadrži vodo v koreninskem sistemu in jo kontrolirano spušča v sušnih razmerah (povzeto po Kaur s sod., 2023).....	16
Slika 9. Strukturni izsek alginata (Aziz, 2021).....	17
Slika 10. Strukturna formula PVA (Muangsri s sod., 2022)	18
Slika 11. Shematski prikaz kemijske vezi med polivinil alkoholom/natrijevim alginatom (PVA/SA) (Muangsri s sod., 2022).....	18
Slika 12. Skeletna formula pentan-1,5-dial	18
Slika 13. FT-IR spektrometer uporabljen v raziskavi (lasten vir)	20
Slika 14. Primeri popolnoma posušenih vzorcev hidrogelov 1., 2. in 3. serije (lasten vir).....	26
Slika 15. Primer FT-IR spektra hidrogela vzorec 1 (lasten vir)	27
Slika 16. Primer FT-IR spektra hidrogela vzorec 2 (lasten vir)	28
Slika 17. Primer FT-IR spektra hidrogela vzorec 3 (lasten vir)	28
Slika 18. Pregled hidrogelov pod 100-kratno povečavo (lasten vir)	29
Slika 19. Izgled hidrogelov v različnih vrednostih pH (lasten vir) – levo in hidrogel pri pH 7 (lasten vir)	31

Slika 20. Sadilni načrt z NA-PVA hidrogelom (lasten vir).....	33
Slika 21. Levo sadike solate po 21. dneh – HZ in desno HBZ (lasten vir). Skrajno desno - Hidrogel v zemlji po 35. dneh	35

Kazalo preglednic

Preglednica 1. Vrste naravnih nesreč v zadnjih 21 letih (Slovenija, ARSO, 2024).	14
Preglednica 2. Značilnosti in učinki hidrogelov na rastlinsko kulturo in razmere v zemlji	19
Preglednica 3. FT-IR spektri produktov	27
Preglednica 4. Nabrekanje hidrogela v vodovodni vodi (pH 7,5)	29
Preglednica 5. Nabrekanje hidrogela v deionizirani vodi (pH 7,0)	29
Preglednica 6. Nabrekanje hidrogela v vodovodni vodi po 2. ciklu sušenja (pH 7,5)	30
Preglednica 7. Nabrekanje hidrogela v deionizirani vodi po 2. ciklu sušenja (pH 7,0)	30
Preglednica 8. Nabrekanje pri različnih vrednostih pH vodnih raztopin	31
Preglednica 9. Nabrekanje v 3 % raztopinah soli.....	32
Preglednica 10. Vsebnost vlage v negativni kontroli (brez zalivanja, brez hidrogela) - NK	33
Preglednica 11. Vsebnost vlage v testni skupini (hidrogel in zalivanje) - HZ	33
Preglednica 12. Vsebnost vlage v testni skupini (brez zalivanja in s hidrogelom) - BZH	33
Preglednica 13. Vsebnost vlage v kontroli (brez hidrogela, zalivanje) – PK.....	34
Preglednica 14. Spremljanje rasti rastlin v kontroli (brez hidrogela, zalivanje)- PK.....	34
Preglednica 15. Spremljanje rasti rastlin v testni skupini (zalivanje + hidrogel) -HZ	35
Preglednica 16. Spremljanje rasti rastlin v testni skupini (brez zalivanja + hidrogel) – BZH	35

Kazalo grafov

Graf 1. Število sušnih dni v Sloveniji (povzeto po ARSO, 2021).....	9
Graf 2. Povprečno najdaljše neprekinjeno zaporedno število dni s sušo v prsti (povzeto po ARSO, 2021).....	10
Graf 3. Odvisnost absorpcije vode od pH raztopine.....	31
Graf 4. Primerjava vsebnosti vlage v zemlji, ki ni bila zalivana 21 dni brez hidrogela (temno moder stolpič) in s hidrogelom (oranžen stolpič).....	34

Kazalo organigramov

Organigram 1. Prikaz 4-stopenjskega praktičnega dela	22
Organigram 2. Sinteza hidrogelov, ki se med seboj razlikujejo v dodatku sredstva za zamrzavanje ...	22
Organigram 3. Karakterizacija hidrogelov	22
Organigram 4. Uporaba hidrogelov v saditvenem načrtu.....	23

POVZETEK

V nalogi smo najprej iz natrijevega alginata, polivinil alkohola in glicerola oz. glutaraldehida kot zamreževalcev sintetizirali kopolimerni hidrogel. Za ojačenje polimerne mreže smo uporabili Ca^{2+} ione. Z FT-IR analizo smo potrdili sestavo polimera. Lastnosti pridobljenega hidrogela smo preučili z vidika absorpcije vode v različnih pogojih (raztopine soli in različne pH vrednosti) ter vpliva na rast zimske solate (tip *Guenola*). Ugotovili smo, da je hidrogel pozitivno vplival na rast zimske solate in ohranjal vlažnost tal, v zemlji pa razpadel šele po 35. dneh. Njegova masa se je pri hidraciji povečala v odvisnosti od topila in sicer: z deionizirano vodo za 284 %, z vodovodno vodo za 100 %, s fosfatnim pufrom (s pH 7) za 455 %, pri 3 % raztopini NaCl za 905 %, pri 3% raztopini $MgCl_2$ za 603 % in pri 3 % raztopini KCl za 475 %. Potrdili smo, da sintetiziran hidrogel lahko zadržuje vodo v prsti in zaustavlja točko trajnega venenja, ima vsaj dvojni cikel reverzibilnosti ter popolnoma razpade med 35. in 37. dnevom.

Ključne besede: natrijev alginat, polivinil alkohol, hidrogel, zadrževanje vode v zemlji

ABSTRACT

In this study, a copolymeric hydrogel was synthesized using sodium alginate, polyvinyl alcohol, and glycerol or glutaraldehyde as a crosslinking agent. To reinforce the polymer network, Ca^{2+} ions were incorporated. The composition of the polymer was confirmed using FT-IR analysis. The properties of the obtained hydrogel were examined in terms of water absorption under different conditions (salt solutions and varying pH levels) and its effect on the growth of winter lettuce (*Guenola*). It was found that the hydrogel positively influenced the growth of winter lettuce (type *Guenola*) and maintained soil moisture, while it degraded in the soil only after 35 days. Its mass increased upon hydration depending on the solvent composition: by 284% in deionized water, 100% in tap water, 455% in phosphate buffer (pH 7), 905% in a 3% NaCl solution, 603% in a 3% $MgCl_2$ solution, and 475% in a 3% KCl solution. It was confirmed that the synthesized hydrogel can retain water in the soil and delay the point of permanent wilting. Complete decomposition has been done between day 35 to 37.

Keywords: sodium alginate, polyvinyl alcohol, hydrogel, soil water retention

1 UVOD

Podnebne spremembe vplivajo na življenje vseh ljudi na Zemlji. Med najbolj resnimi posledicami so ekstremni vremenski pojavi (vročinski valovi, poplave, povečano število orkanskih vetrov), erozija obalnih območij in spremembe v kmetijstvu, ki se odraža v hudem pomanjkanju padavin (suši), širjenju rastlinskih in živalskih vrst, ki zmanjšujejo pridelke tradicionalnih kulturnih rastlin, izumiranju vrst ali migraciji številnih vrst (kot prilagoditev na spremembe), pomanjkanju vode (predvsem v južni in zahodni Evropi), izginjanju in tanjšanju ledenikov, spremembah v ekosistemi morjih in oceanov in številnih drugih spremembah.

1.1 Opis problema, ki ga rešuje raziskovalna naloga

V tej nalogi se bomo osredotočili na en problem klimatskih sprememb, to je zadrževanje vode v zemlji. V zadnjih dvajsetih letih se tudi v Sloveniji soočamo s pogostimi vročinski valovi (in posledično pomanjkanjem vode za rast rastlin) ter hudimi poplavami, kjer obilice dežja ne zmoremo zadržati za potrebe namakanja v obdobju, ko je vode premalo. Osredotočili se bomo na hidrogel, za katere strokovna literatura pravi, da lahko absorbirajo in zadržujejo deževnico in/ali namakalno vodo v prsti in obenem obogatijo izčrpana tla s hranili (Laxmi s sod., 2019). Hidrogel bi lahko bil praktična in okolju prijazna rešitev za doseganje cilja kmetijske/vrtiličarske produktivnosti v pogojih pomanjkanja vode ali obilnega dežja. Obenem s tem rešujemo tudi problem zalivanja našega šolskega vrta, ki se razteza na južni strani šole (slika 1 in slika 2), na površini 500 m². Tla šolskega vrta so revna s hranili, travna ruša je tanka in pokriva betonirano površino, kar pomeni, da tudi dež hitro odteče. V času poletnih počitnic je zato velika težava z zalivanjem, večina rastlin pa je v tem obdobju v svoji najbolj intenzivni vegetacijski dobi. Večina zaposlenih delavcev je v tem obdobju na letnem dopustu, zato je preživetje vrta, ki ga spreminjamo v svojo največjo učilnico v naravi, pod vprašajem.



Slika 1. Južna fasada šole (marec 2024), predno smo začeli postavljati šolski vrt (lastni vir).



Slika 2. April 2024 zasaditev dreves in september 2024 pobiranje zadnjih pridelkov na šolskih gredah
(lasten vir)

1.2 Cilji naloge

Z nalogo smo si zadali dva cilja:

1. Sinteza hidrogela na osnovi alginata in polivinil alkohola, ki predstavlja nadaljevanje raziskave iz leta 2023-24.
2. Testiranje uporabe hidrogela v sadilnem poskusu.

V pogojih šolskega laboratorija bomo sintetizirati hidrogel na osnovi natrijevega alginata (NA) in polivinil alkohola (PVA), z uporabo glutaraldehida in glicerola kot sredstva za zamreženje. Za dodatno ojačitev polimerne strukture bomo uporabili kalcijeve ione. Sinteza predstavlja nadaljevanje raziskav, ki sta jih v letu 2024 opravila Berlič in Žižek. V raziskavi sta uporabila natrijev alginat, ki je naravni anionski kopolimer, sestavljen iz dveh monomernih enot, povezanih z *1,4-β-D*-manuronsko kislino (oznaka M) in *α-L*-guluronsko kislino (oznaka G); pridobiva se iz rjavih alg. Kot zamreževalec sta uporabila glicerol. Ugotovila sta, da je optimalno masno razmerje med reaktanti naslednje: voda : alginat : glicerol = 200 : 5 : 6. Pridobila sta hidrogel, ki je pokazal zmožnost vsrkanja velike količine vode, vendar je v prsti zelo hitro razpadel, kar je njegovo uporabo za abosrbciijo in zadrževanje deževnice in/ali namakalne vode omejilo na zelo kratek čas, to je od 5 do 7 dni. Zato smo predpostavili, da mu moramo dodati dolgoverižni polimer, ki je vodi topen in ima dobre mehanske lastnosti, potrebne pri nabrekanju in krčenju, vendar je v zemlji kemično bolj stabilen. Izbrali smo polivinil alkohol (PVA), ki predstavlja dolgoverižni, v vodi topen polimer. V sebi združuje lastnosti gume in plastike, hkrati pa ima nizko toksičnost, veliko mehansko trdnost, odlično

biokompatibilnost (Elgharbawy s sod., 2024). Dodaten razlog je bila tudi cena, saj sodi med dostopne in stroškovno manj zahtevne materiale. Na ta način smo želeli združiti visoko hidrofilitnost alginata ter močne mehanske lastnosti PVA, ki so zelo priporočljive lastnosti pri nabrekanju in krčenju hidrogela (poplava/suša) v zemlji.

Pričakovani rezultat je hidrogel z veliko sposobnostjo vpijanja vode in dobrimi mehanskimi lastnostmi, ki bo v zemlji biorazgradljiv, vendar skozi daljše časovno obdobje, to je vsaj tri tedne.

Drugi cilj naloge je preučiti učinek hidrogela na značilnosti zadrževanja vode v tleh. Hidrogel bomo uporabili v sadilnem poskusu zimske solate (vrsta *Guenola*). Opazovali bomo rast solate (število in velikost listov). Rastni poskus smo zasnovali s pozitivno in negativno kontrolo ter preučevanjem biorazgradljivosti hidrogela.

1.3 Hipoteze

Postavili smo naslednje hipoteze:

Hipoteza 1: Hidrogel (NA-PVA) bo zmožen absorbirati 100 in več odstotkov vode v primerjavi z lastno maso ter ohraniti svojo strukturno celovitost tudi po dveh ciklih hidracije in sušenja.

Hipoteza 2: NA-PVA hidrogel se bo dobro odzival na povečano količino vodne raztopine soli in bo izkazoval reverzibilne lastnosti tudi po dveh ciklih hidracije in sušenja.

Hipoteza 3. NA-PVA hidrogel se bo dobro odzival na spremembe pH zemlje in bo svojo visoko sposobnost absorpcije izkazoval v območju pH od 4 – 8.

Hipoteza 4. NA-PVA hidrogel se v zemlji v prvih treh tednih ne bo razgradil.

Hipoteza 5: NA-PVA hidrogel bo v zemlji vsaj tri tedne deloval kot rezervoar vode.

Hipoteza 6: Primerjava rasti zimske solate z in brez hidrogela bo pokazala, da, ob rednem zalivanju, ni razlik v rasti rastlin (velikost in število listov).

1.4 Tehnike dela

V **teoretičnem delu** smo analizirali strokovne članke, ki opisujejo možne rešitve za premagovanje težav z vlago v zemlji ter hidrogelne, uporabne v kmetijstvu. Preučili smo sestavo hidrogela ter možnosti sinteze v laboratoriju.

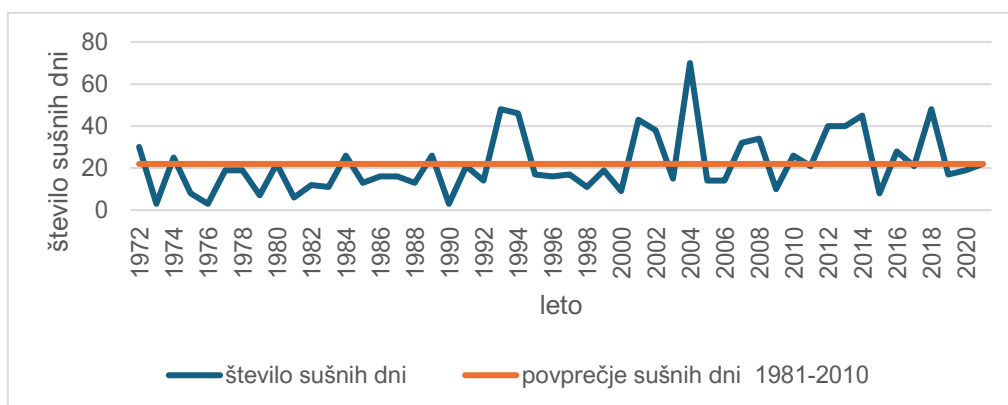
V **praktičnem delu** smo uporabili klasične laboratorijske tehnike (tehtanje, merjenje prostornin, segrevanje, sušenje, priprava raztopin), FT-IR spektroskopijo za določitev sestave sintetiziranih hidrogelov ter snemanje površine hidrogelov s kamero (100-kratna povečava). Izvedeli smo tudi sadilni poskus z zimsko solato.

2 PREGLED LITERATURE

2.1 Spremljanje pojava suše v Evropi in v Sloveniji

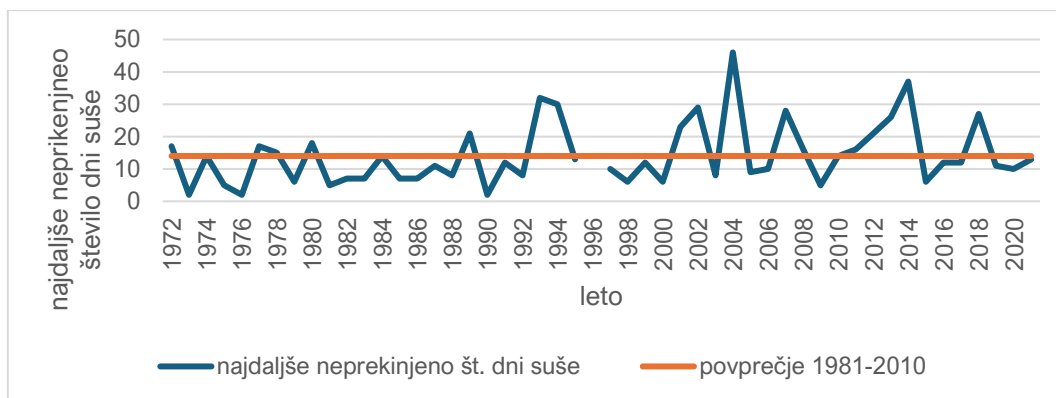
Ker se bomo v tej nalogi ukvarjali s sistemom za prilaganje na sušo, smo zbrali nekaj zadnjih podatkov spremljanja pojava suše v Evropi in v Sloveniji, ki so ključni za načrtovanje in uvajanje ukrepov na področju prilagajanja na podnebne spremembe.

Ukrepi evropske unije (EU, 2021) temeljijo ¹ na dokumentu imenovanem *Strategija prilagajanja na podnebne spremembe*. Osnovo zanj predstavljajo podatki o sušnih dneh in trajanja suše v posameznem letu. Omenjena kazalca sta na voljo tudi za Slovenijo. Izdelana sta za obdobje po letu 1971 ter za oceno podnebnih sprememb do leta 2100 (Frantar, 2021) (Graf 1 in graf 2).



Graf 1. Število sušnih dni v Sloveniji (povzeto po ARSO, 2021)

¹ Vir: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/adaptation-climate-change/eu-adaptation-strategy_en Povzeto 17. 11. 2024

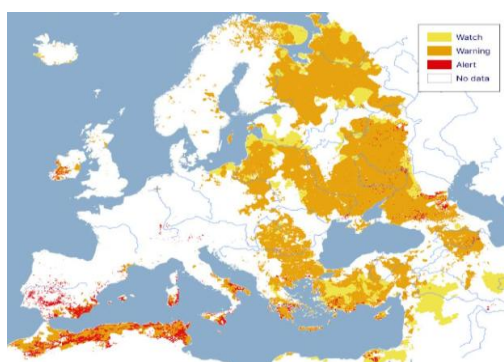


Graf 2. Povprečno najdaljše neprekinjeno zaporedno število dni s sušo v prsti (povzeto po ARSO, 2021).

Kazalca števila sušnih dni (graf 1) in trajanja sušnih obdobjev v posameznih letih (graf 2) kažeta naraščanje pojava suše v Sloveniji. Podobno kaže analiza vpliva podnebnih sprememb do leta 2100, kjer se nakazuje, da se bo primanjkljaj vode v tleh v prihodnje še povečal. Povečala se bosta tako število kot tudi trajanje sušnih dni (Frantar, 2021). To pomeni, da moramo tudi v Sloveniji iskati alternative za ohranjanje deževnice ali zadrževanje vode v tleh, saj napovedi, kljub obilnim (poletnim) poplavam v zadnjih dveh letih, niso dobre.

2.2 Podnebno odporen razvoj

Suša postaja ponavljajoča značilnost evropskega podnebja in ni več omejena le na mediteranske in aridne regije (slika 3). Primarni vzrok suše je pomanjkanje padavin, ki ga pogojuje prostorska in časovna porazdelitev padavin z obstoječo vodno zalogo in rabo vode.

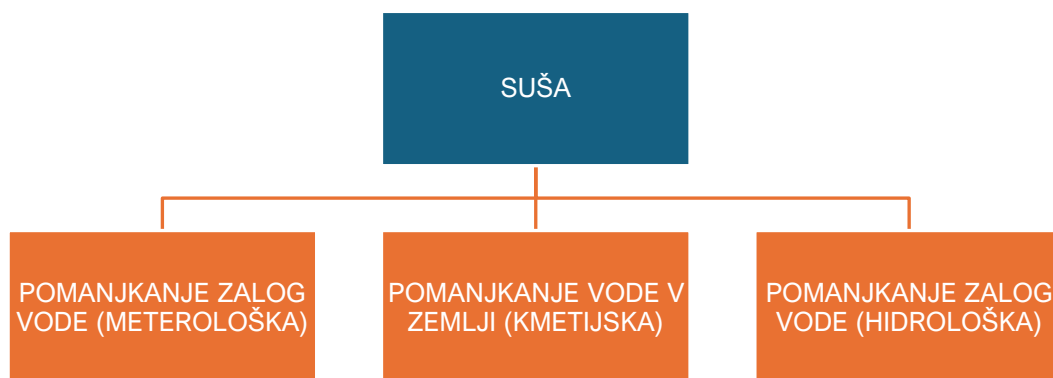


Slika 3. Naraščanje suše v Evropi (Oktober 2024, EU Science HUB)²

² Vir: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/european-and-global-drought-observatories/current-drought-situation-europe_en Dostopno: 17. 11. 2024

Medvladna skupina za podnebne spremembe (IPCC) ugotavlja, da se regije srednje in vzhodne Evrope zelo borijo s pomanjkanjem vode in sušami (označeno z rumeno sliko 3). Ne glede na to, da se oba procesa od države do države zelo razlikujeta, je občutljivost teh regij vedno večja³. Suša prihaja počasi, zato je izjemno težko določiti začetek in konec pojava sušnega obdobja. Ena od možnih klasifikacij suš je naslednja (Krajnik s sod., 2015) (Slika 4):

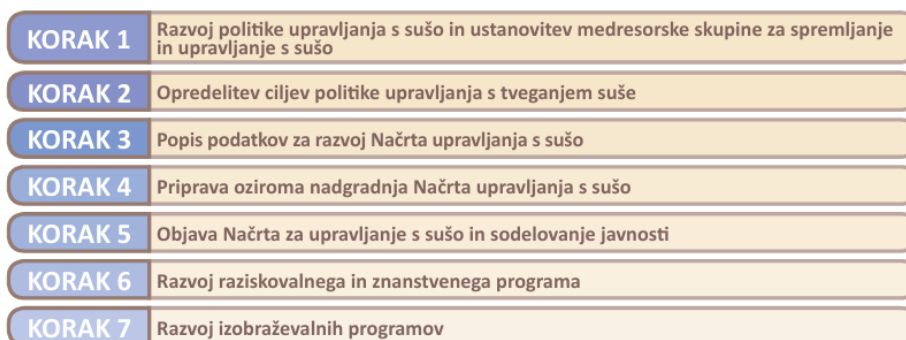
- meteorološka suša → pomanjkanje padavin,
- kmetijska suša → primanjkljaj vode v zemlji za rast rastlin,
- hidrološka suša v podzemnih in površinskih vodah → pomanjkanje zalog vode.



Slika 4. Vrste suš (Krajnik s sod., 2015)

Agencija RS za okolje (ARSO) je na osnovi smernic EU pripravila zapis trenutnega stanja politike upravljanja s sušo v Sloveniji in prilagodila *Navodila za pripravo načrtov upravljanja s sušo v Srednji in Vzhodni Evropi* na slovenske razmere. V sedmih korakih je predstavljena na sliki 5 (Gregorič s sod., 2014).

³ Vir: Special report on the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. 2012. Cambridge, Cambridge University Press, IPCC: 582 str. Dostopn na URL: <http://www.ipcc-wg2.gov/SREX/> P ovueto 17. 11. 2024



Slika 5. Sedem korakov načrta upravljanja s sušo v Sloveniji (Gregorič s sod., 2014)

2.3 Zasnova sušnih kazalnikov v Sloveniji

Sušni kazalniki se uporabljajo za določitev začetka sušnega stanja. Ko se vrednosti približajo ali prekoračijo sprožilni prag, sledi navodilo odgovornih na državni ali lokalni ravni, katerega od predvidenih ukrepov je potrebno uvesti. Pred ukrepanjem je odločitev potrebno prilagoditi glede na trenutne in napovedane vremenske razmere (Gregorčič s sod., 2014).

V preglednici 1 smo zbrali podatke za vrste naravnih nesreč v zadnjih 21. letih (GOV, 2024)⁴ v Sloveniji. Iz preglednice vidimo, da je stroškov zaradi suše (označeno oranžno) že zdaj veliko. ARSO je samo v letu 2022 izdal 14.811 pozitivnih odločb zaradi suše. Iz preglednice 1 tudi vidimo, da se pogostost pojavov povezanih s klimatskimi spremembi stopnjuje.

2.3.1 Rešitve za premagovanje težav s sušo

Rešitve za premagovanje težav s sušo so raznolike. Trenutni predlogi za premagovanje težav z vlago v zemlje navajajo:

- dodajanje organske snovi, kot so kompost, hlevski gnoj ali mikroorganizmov, kar izboljšuje zmožnost tal za zadrževanje vode in krepi strukturo zemlje (Vovk – Korže, 2019; Turner, 2019).

⁴ Vir podatkov: <https://www.gov.si teme/posledice-naravnih-nesrec-v-kmetijstvu/> Povzeto 17. 11. 2024.

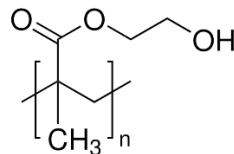
- prekrivanje tal s slamo, listjem, žagovino ali drugimi organskimi materiali, kar zmanjšuje izhlapevanje vode, ohranja vlago v tleh in zmanjšuje temperaturna nihanja v zemlji (Vovk – Korže, 2019; Turner, 2019).
- setev pokrivnih rastlin in trajno pokrivanje tal, kar zmanjšujejo izgubo vlage in izboljšujejo zadrževanje vode. Alternativa so lahko rastline, ki so prilagojene sušnim razmeram, kot so nekatere vrste žit, stročnic in grmovnic, kar vse zmanjša potrebo po intenzivnem namakanju (Turner, 2019).
- kapljično namakanje, ki omogoča usmerjeno dostavo vode k rastlinskim koreninam, vendar zahteva konstanten dovod vode.
- menjava kultur in zasaditev rastlin, ki dopolnjujejo potrebe po vodi, zmanjšujeta stres v zemlji in optimizira rabo razpoložljive vode (Vovk – Korže, 2019).
- gradnja teras, ki preprečujejo zbitosti tal (Vovk – Korže, 2019).
- letno shranjevanje deževnice z zajetjem odtokov s pomočjo izgradnje teras in jarkov (primerno za manjše namakalne sisteme) in površinsko rahljanje tal (Vovk-Korže, 2019).

Preglednica 1. Vrste naravnih nesreč v zadnjih 21 letih (Slovenija, ARSO, 2024).

Leto	Vrsta naravne nesreče	Velikost škode po naravni nesreči (EUR)	Odobrena državna pomoč upravičencem (EUR)	Izplačana državna pomoč (EUR)
2003	Suša, neurja s točo, pozeba, hrušev ožig	130609889	37485038	35581629
2004	Toča	34671476	8857274	8857274
2005	Pozeba, neurja s točo, poplave, vihar, majski hrošč	42028280	11641834	9611179
2006	Neurja, toča, suša	60570142	12335079	10214409
2007	Suša	16510695	4545160	4424054
2011	Toča	7067033		
2012	Suša, čebele	60066582	5764545	5670019
2013	Suša	106205331	5253129	5242852
2014	Čebele	6609600	476690	397245
2016	Pozeba	44280701	3500000	3487332
2017	Čebele	4070765	665000	536600
	Pozeba	46837601	7000000	5770247
	Suša	65262102	7000000	6895854
2019	Neugodne vremenske razmere	9367672	875000	874859,77
	Čebele		588103	441418
2021	Čebele		1283874	930351,5
	Pozeba	40064109,34	6989175,76	5762126,18
2022	Suša - Izpad krme	89855310,72	4500000	4383249,38
	Suša	148474650,2	24921486,58	24733664,4
2023	Poplave (stroji, oprema, zaloge in živali)	4189389,7	3999365	1199472,14
	Pozeba (100 % škoda, pridelki)	752715,51	225814,653	141877,43
	Neurja s točo (100 % škoda, pridelki, trajni nasadi)	4167991,03	1250397,3	936793,35
	Poplave (100 % škoda, pridelki, trajni nasadi, plemenske živali)	2749583,01	824874,903	620481,24
	Pozeba (80 % škoda, pridelki)	12993375,38	5300000	še ni podatka
	Neurja s točo (80 % škoda, pridelki)	19153483,43	7800000	še ni podatka
	Poplave (80 % škoda, pridelki)	6124643,06	2600000	še ni podatka
	SKUPAJ	962.683.120,4	16.568.1840,2	13.6712.987,4

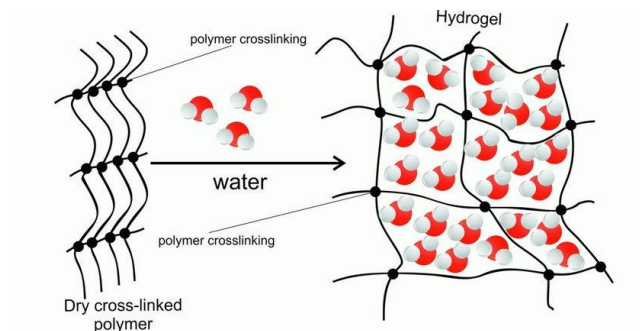
2.4 Odkritje hidrogela

Beseda "hidrogel" je bila po Wangu s sod. (1990) prvič uporabljena v članku, objavljenem leta 1894. Opisovali so jo kot koloidni gel, izdelan z anorganskimi solmi. Prvi material z mrežno strukturo, ki ima lastnosti hidrogela in visoko afiniteto do vode, je bil hidrogel iz polihidroksietilmetakrilata (pHEMA), razvit leta 1960, z namenom biokompatibilnosti s človeškimi tkivi (Buwalda s sod., 2014) (slika 6).



Slika 6. Strukturna formula enote polihidroksietilmetakrilata (Sigma Aldrich, 2024)⁵

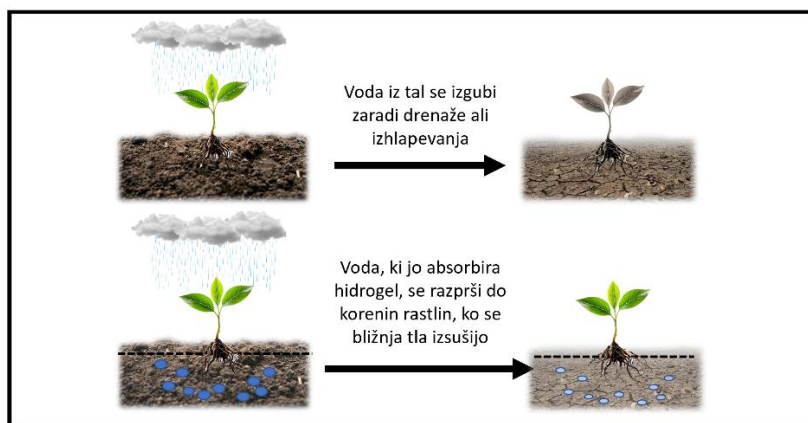
Hidrogel predstavlja neke vrste vmesno agregatno stanje med tekočino in trdnino. So **hidrofilni** materiali, ki imajo zmožnost absorpcije velike količine vode in se v vodi ne raztapljajo. Razlog je neurejena (amorfna) zamreženosti. Ves hidrogel je pravzaprav ena sama zelo dolga zamrežena polimerna molekula (slika 7).



Slika 7. Nastanek hidrogela (Besarab, 2021)

Ko suh hidrogel začne absorbirati vodo, prve molekule vode vstopijo v matriks. Najprej se bodo hidrirale polarne, hidrofilne skupine in kasneje še preostale. Hidrofilne funkcionalne skupine polimera privlačijo molekule vode, ki postopoma zapolnijo prostor v mreži, polimeri se poravnajo; prostornina mreže, ki vsebuje vodo, se poveča in hidrogel nabreka. Molekule vode znotraj hidrogela se lahko skoraj prosto gibajo (Buwalda s sod., 2014). Hidrogelni materiali zelo dobro delujejo tudi pri visokih temperaturah (ne gorijo), zaradi abosrbcije vode lahko izboljšajo stanje prsti (zmanjšajo zbitost prsti).

⁵ Vir slike: <https://www.sigmaaldrich.com/SI/en/product/aldrich/529265> (dostopno 14. 11. 2024)



Slika 8. Dodatek hidrogela zadrži vodo v koreninskem sistemu in jo kontrolirano spušča v sušnih razmerah (povzeto po Kaur s sod., 2023).

Z naraščajočim številom mrežnih povezav na enoto volumna se poveča zmožnost obremenitve in zmanjša absorpcija vode (Buwalda s sod., 2014).

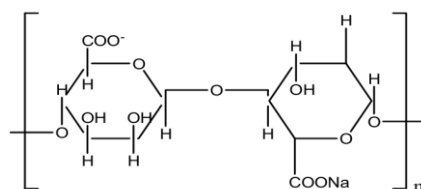
2.5 Klasifikacija hidrogelov in njihov razvoj

Hidrogele lahko razvrstimo po različnih kriterijih. Glede na izvor jih lahko delimo v dve skupini: naravne in sintetične. Primeri naravnih hidrogelov so kolagen, hialuronska kislina, derivati citozana, alginati ipd. Primeri sintetičnih hidrogelov so polietilen glikol, polivinil alkohol in poliakril amid (Chai, 2017). Zgodovinsko gledano bi lahko raziskovanje hidrogelov opisali s tremi vejami raziskovanja (Chirani s sod., 2015; Laxmi s sod, 2024):

- V prvi veji so se raziskovalci osredinili na razvoj materiala z visoko zmožnostjo absorpcije, dobrimi mehanskimi lastnostmi in dokaj enostavno sintezo.
- Druga veja sodi na začetek 70. let prejšnjega stoletja, ko se je raziskovalna pozornost premaknila s preprostih, z vodo nabreklih makromolekularnih mrež, na hidrogelske sisteme, ki so se sposobni odzvati na spremembe okoljskih pogojev, kot so pH, temperatura ali koncentracija biomolekul. Te okoljske sprožilce je bilo mogoče uporabiti za specifične dogodke, kot je sproščanje zdravil.
- Tretja veja raziskovanja se je nanašala na raziskovanje in razvoj kompleksnih materialov z napredno zgradbo. Omenjeno vodi do pametnih materialov, hidrogelov s širokim spektrom želenih lastnosti in sprožilnimi dražljaji.

2.6 Kopolimer natrijevega alginata (NA) in polivinil alkohola (PVA)

Natrijev alginat (NA) je anionski kopolimer⁶, sestavljen iz β -D-manurosnke kisline (*M-bloki*), povezane z 1,4- β – vezmi, in α -L-guronske kisline (*G-bloki*), ki se izmenjujejo (Berlič in Žižek, 2024). Nastanek gela in tridimenzionalne mrežne strukture se pojavi, ko se z *G-bloki* v polimerni verigi povežejo dvovalentni ioni (Ca^{2+} , Ba^{2+} , Fe^{2+} , Si^{2+} itd.) ali trivalentni ioni (Al^{3+} itd.). Takšna vezavna območja med *G-bloki* se pogosto imenujejo "škatla za jajca" (ang. *egg boxes*). Ti prečno povezani ioni stabilizirajo verige alginata, kar tvori gelno strukturo z bolj prosto gibljivimi verigami, ki vežejo in ujamejo velike količine vode ali bioloških tekočin (Aziz, 2021).

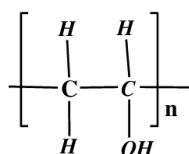


Slika 9. Strukturni izsek alginata (Aziz, 2021)

Proces tvorjenja gela je močno odvisen od difuzije ionov, ki tvorijo gel in hitrosti izrivanja vode. Visoka elastičnost in prepustnost alginatnih struktur sta odvisni od razmerja M/G.

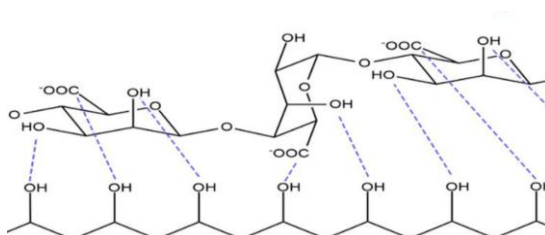
Polivinil alkohol (PVA) je hidrofilni polimer, kemijsko stabilen, z visoko stopnjo nabrekanja v vodi ali bioloških tekočinah. Je netoksičen za žive celice, nekancerogen in ima konsistenco, podobno mehkim tkivom. Oblikuje filme z visoko mehansko trdnostjo in dolgoročno temperaturno stabilnostjo. Njegova tridimenzionalna mreža omogoča difuzijsko izmenjavo hranil in odpadnih snovi z okoljem, zaradi česar se uporablja v različnih biomedicinskih, farmacevtskih, biotehnoških in drugih industrijskih področjih (Muangsri s sod., 2022), vendar zaradi svoje krhkosti vedno uporabljen v kombinaciji z drugimi polimeri.

⁶ Beseda kopolimer označuje polimer, ki je sestavljen iz dveh ali več različnih vrst monomerov, ki so kemično povezani v isti polimerni verigi. To pomeni, da so različne vrste osnovnih enot (monomerov) med sabo povezane in tvorijo bolj kompleksno strukturo v primerjavi s homopolimeri, ki so sestavljeni le iz ene vrste monomerov. - opomba avtorjev



Slika 10. Strukturna formula PVA (Muangsri s sod., 2022)

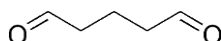
Na sliki 11 je predstavljen možen proces povezovanja dveh polimerov preko vodikovih vezi (označeno s prekinjeno črto).



Slika 11. Shematski prikaz kemijske vezi med polivinil alkoholom/natrijevim alginatom (PVA/SA) (Muangsri s sod., 2022)

2.6.1 Zamreževalec - pentan-1,5-dial (glutaraldehyd)

Glutaraldehyd (pentan-1,5-dial) je sredstvo za navzkrižno povezovanje polimerov, ki vsebujejo hidroksilne in/ali karboksilne skupine (Kozlovskaya s sod., 2017) zato je zelo primeren za zamrzovanje NA in PVA.



Slika 12. Skeletna formula pentan-1,5-dial

2.7 Uporaba hidrogelov v kmetijstvu

V preglednici 2 smo zbrali hidrogel, ki se že uporabljajo v kmetijstvu.

Preglednica 2. Značilnosti in učinki hidrogelov na rastlinsko kulturo in razmere v zemlji

Sestava hidrogelov	Izvor	Učinek	Leto uporabe
Natrijev alginat, lignosulfonat	Tobak	<ul style="list-style-type: none"> ✓ povečana vodna kapaciteta tal ✓ izboljšana fotosintezna in zmanjšanje mase sladkorja ✓ podaljšanje stopnje rasti. 	2020
Odpadni kolagen iz biomase	Agrobakterije	<ul style="list-style-type: none"> ✓ visoka sposobnost vpivanja vode ✓ visoka biorazgradljivost ✓ odlična adsorpcijska sposobnost za Cr (III). 	2021
Komercialni hidrogel, polimetakrilat	Koruza	<ul style="list-style-type: none"> ✓ povečanje dostopnosti za vodo v tleh ✓ izboljšanje rasti rastlin 	2022
Super vpojni hidrogel na osnovi cinka (nanodelci oksida in lubenice (odpadki lupine)	Rastlina popra	<ul style="list-style-type: none"> ✓ zmanjša potrebno vodo za zalivanje 	2021
Agaroz, polnjena z aktivnim ogljem hidrogel	Repično seme	<ul style="list-style-type: none"> ✓ izboljša zadrževanje vode ✓ zboljšani indeksi rasti oljne ogrščice 	2021
Polimetaakrilat in naravni kavčuk /polivinil alkohol	Rastlina čilija	<ul style="list-style-type: none"> ✓ kapaciteta gnojila s počasnim sproščanjem, ki olajša rast rastline čilija ✓ izboljšanje zadrževanje vode ✓ izboljšanje rasti rastlin 	2021
Hidrogeli na osnovi škroba z nanodelci naravnega oglja	Paradižnik	<ul style="list-style-type: none"> ✓ zmanjša negativne učinke stresa zaradi pomanjkanja vode ✓ ohranjanje vlažnost tal 	2021
Hidrogel na osnovi sirotke/polisaharida s polimlečno kislino (PLA)	Navadni fižol	<ul style="list-style-type: none"> ✓ boljše zadrževanje vode v tleh za 30 %. ✓ boljša rast rastlin 	2022
Karboksimetil celuloza in nanoceluloza/nanogline	Kumare	<ul style="list-style-type: none"> ✓ zmanjšanje izgube gnojila med aplikacijo ✓ izboljšanje rabe vode v kmetijstvu 	2021
Karboksimetil in natrijev akrilat	Rastline čičerike	<ul style="list-style-type: none"> ✓ uporaba kot sredstvo za izboljšanje tal ✓ boljša rast rastlin čičerike 	2019
Alginat-karboksimetil celuloza obogatena s hitozanom in Cu ²⁺	Kumare	<ul style="list-style-type: none"> ✓ hitosan je lahko dodaten vir dušika za rastline ✓ protimikrobno delovanje 	2021
Chitosan hidrogel zamrežen z Etilendiamin tetraocetno kislino (EDTA)	Rastline soje	<ul style="list-style-type: none"> ✓ boljša rast rastline soje 	2019
Hitozan, želatina in polivinilalkohol (PVA)	Rastline čilija	<ul style="list-style-type: none"> ✓ protimikrobna aktivnost 	2019
Hitin, NaOH/vodna raztopina sečnine, zamreženje z epiklorohidrinom	Oljna ogrščica	<ul style="list-style-type: none"> ✓ biorazgradljivo ✓ spodbujanje kalitve in rasti semen 	2014

2.8 Karakterizacija hidrogela

Za karakterizacijo snovi je na voljo širok nabor kemijskih metod, ki omogočajo analizo in določanje fizikalnih, kemičnih in strukturnih lastnosti snovi. V ospredju so spektroskopske metode, kamor sodi tudi Infra rdeča (IR) spektroskopija. Izbrali smo jo, ker omogoča identifikacijo funkcionalnih skupin na osnovi vibracijskih načinov molekul.

2.8.1 Infra rdeča spektroskopija (FT-IR)

Infrardeča spektroskopija je spektroskopska metoda, pri kateri opazujemo interakcijo infrardeče svetlobe s snovjo. Del spektra resonančno vzbudi nihanja atomov v molekuli, s čimer pride do absorpcije svetlobe. Osnovni IR spekter snovi je graf absorpcije infrardeče svetlobe (ali njene transmisivnosti) na navpični osi in valovno število (cm^{-1}) na vodoravni osi. Ker imajo molekule različne resonančne frekvence, pride do absorpcije v različnih delih infrardečega spektra. Molekule imajo različne resonančne frekvence zaradi različne strukture (Smith, 1998).

Pri svojem delu smo uporabljali Perkin Elmer Spectrum Two. Vzorec hidrogela smo preučevali v območju od 4000 to 400 cm^{-1} . Opazovali smo karakteristične vrhove in iz spektra sklepali o strukturi polimera⁷.



Slika 13. FT-IR spektrometer uporabljen v raziskavi (lasten vir)

⁷ Uporabili smo ATR (ang. *Attenuated total reflection*) tehniko. ATR (oslabljena popolna refleksija) uporablja lastnost popolnega notranjega odboja, kar povzroči nastanek vala na meji med dvema snovema z dvema različnima lomnima količnikoma (diamant in preiskovani vzorec). Infrardeči žarek prehaja skozi ATR kristal na način, da se vsaj enkrat odbije od notranje površine, ki je v stiku z vzorcem. Ta odboj tvori val, ki sega v vzorec. Globina prodiranja v vzorec je običajno med 0,5 in 2 mikrometra. Žarek nato ob izhodu iz kristala zajame detektor. Zaradi dostopnosti, hitrega analiziranja vzorcev in enostavne uporabe je ATR v kombinaciji s Fourierjevo transformacijsko infrardečo spektroskopijo (FTIR) močno razširjena metoda v znanstveni skupnosti.

2.8.2 Pregled površinske morfologije hidrogela

V ta namen se danes uporablja vrstična elektronska mikroskopija (ang. SEM), tehnika mikroskopiranja, ki uporablja elektronski žarek za skeniranje površine vzorca. Rezultat je visoka ločljivost površine. V šoli te aparature nimamo, zato smo uporabili kamero s 100-kratno povečavo in grob opis površine sintetiziranih hidrogelov.

2.8.3 Vezava vode na hidrokele (absorbpcija/desorbpcija)

Vezavo vode na hidrogel smo preučevale gravimetrično. Predhodno stehtan hidrogel smo za 24 ur potopili v vodovodno vodo in destilirano vodo, ki je imela 20°C. Potem smo hidrogel vzeli iz vode, ga obrisali s papirno brisačo in ponovno stehtali. Količino absorbirane vode smo zračunali s pomočjo formule:

$$\left(\frac{m_2 - m_1}{m_1}\right) \times 100 = AS (\%) \quad \text{enačba 1}$$

Legenda:

- ✓ AS ...stopnja abosrbcije, izražena v odstotkih.
- ✓ m_1 ...masa vzorca pred abosrbpcijo vode
- ✓ m_2 ...masa vzorca po abosrbpcijo vode

2.8.4 Nabrekanje hidrogela pri različnih vrednostih pH

Raztopino smo izpostavili kislemu, bazičnemu in nevtralnemu pH. Za nevtralni pH medij smo uporabili fosfatni pufer (pH 7). Preučevali smo obnašanje hidrogela pri pH 2,0; pH 3,2 ; pH 7,0 in pH 10,0. Meritve smo izvajali pri sobni temperaturi. pH vrednosti smo izmerili z Vernierjevim pH metrom. Zmožnost abosrbpcije vode smo izračunali po enačbi 1.

2.8.5 Nabrekanje posušenih vzorcev hidrogela

Vzorce hidrogela smo 24 ur sušili, na 40°C, v sušilniku. Potem smo njihovo sposobnost abosrbpcije vode preverili kot je opisano v poglavju 2.7.3.

2.8.6 Nabrekanje hidrogelov v 3% raztopinah soli

Sposobnost nabrekanja (vezave vode) posušenih hidrogelov je bila določena v različnih raztopinah soli (KCl, NaCl, CaCl₂ in MgCl₂). Vse so imele koncentracijo 3%. V čaše smo

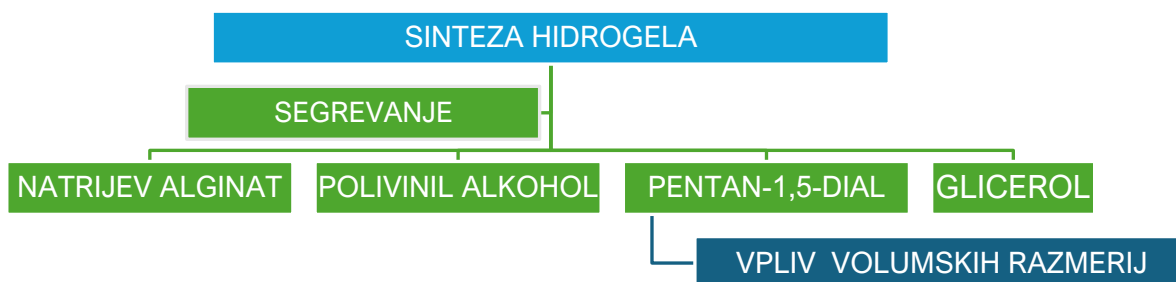
natehtali 3,00 g vsake soli ($\pm 0,01$ g) in do 100 g dodali deionizirano vodo iz šolskega laboratorija.

3 PRAKTIČNO DELO

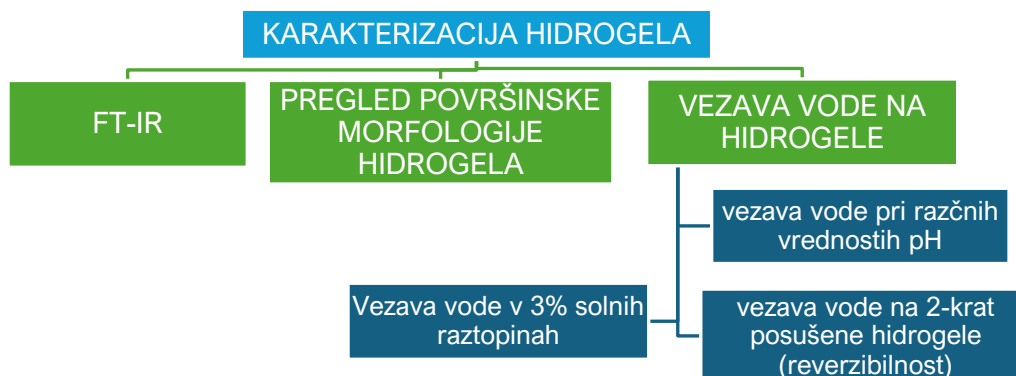
3.1 Sinteza hidrogela in njegova karakterizacija



Organigram 1. Prikaz 4-stopenjskega praktičnega dela



Organigram 2. Sinteza hidrogelov, ki se med seboj razlikujejo v dodatku sredstva za zamrzovanje

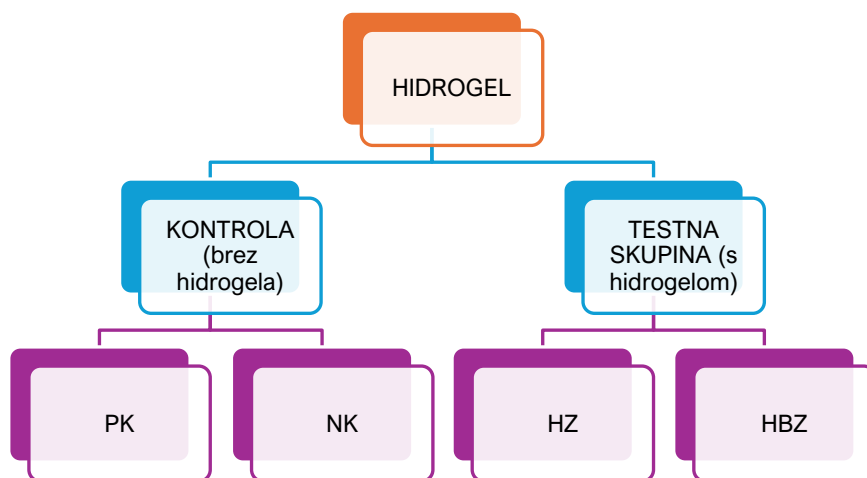


Organigram 3. Karakterizacija hidrogelov

3.2 Poskus z zimsko solato

Vpliv hidrogela na rast rastlin smo spremljali tako, da smo rastline razdelili po naslednjem ključu:

- **Pozitivna kontrola** – običajno zalivanje rastlin, brez hidrogela (oznaka **PK**)
- **Negativna kontrola** - brez dodatka hidrogela in brez zalivanja (oznaka **NK**)
- **Testne rastline 1** – dodatek hidrogela brez zalivanja (oznaka **HBZ**)
- **Testne rastline 2** – dodatek hidrogela in zalivanje (oznaka **HZ**)



Organigram 4. Uporaba hidrogelov v saditvenem načrtu

V vsaki skupini smo imeli 4 sadike zimske solate. V vsaki skupini smo na sedem dni, skozi časovno obdobje pet tednov, merili:

- vsebnost vlage,
- spremembo pH,
- število listov solate v rozeti,
- dolžino najdaljšega lista v sadih solate.

3.3 Pripomočki

Magnetno mešalo (IKA), pH meter Vernier, FT-IR spektrofotometer (Perkin Elmer Spectrum Two), kamera, higrometer s pH metrom (vlaga 10 % do 80%; pH od 3 do 8. ($\pm 0,2$), ki deluje v območju od 5 - 50 °C, 4 - krat 250 mL merilna bučka, 9 - krat 250 mL čaša, merilna pipeta,

10 mL; merilni valj, 100 mL; analitska tehtnica Kern ($\pm 0,001$ g), 10- krat laneno platno vpeto v leseni obroč, mikser, termometer (100 °C), steklene palčke, pH meter (Vernier ®)

3.4 Kemikalije

Humovit zemlja za sejanje (Merckur), natrijev alginat (IKA), PVA, molekulska masa 125.000 (Merck), glutaralhid (25%) (Sigma-Aldrich), HCl, (Merck), NaOH (Merck), CH₃COOH (Merck), CaCl₂ (Sigma-Aldrich), MgCl₂(Merck), NaCl (Merck). KCl (Merck), glicerol (Riedl-de-Haen), deionizirana voda (šolski laboratorij), prevodnost < 2 μ S/cm, sadike zimske solate (dobavitelj MOGA d.o.o).

3.5 Sinteza hidrogela

3.5.1 Prva serija poskusov

Prvo sintezo polimera smo načrtovali v masnem razmerju :



- 1) V tri 250 mL čaše smo natehtali 7,0 g natrijevega alginata, dodali 100 mL destilirane vode in magnet. Zmesi smo mešali pri sobni temperaturi, na magnetnem mešalu (100 obratov/min).
- 2) Ko so bile zmesi povsem gladke, smo dodali 9,0 g PVA in nato mešali še 3 ure pri 80 °C do 85 °C.
- 3) Nato smo dodali 8 mL pentan-1,5-diala (25 %) ter mešali še nadaljnje 3 ure.
- 4) Po 3 urah smo hidrokele sprali najprej z destilirano vodo in nato še z etanolom, da smo odstranili višek monomera oz. pentan-1,5-diala.
- 5) Po spiranju smo hidrogel sušili na platnu pri 40 °C.

Opomba: *poskus 1 smo ponovili še z 10 mL in 12 mL glutaraldehyda.*

Ker je imela zmes NA in vode v 1. seriji poskusov zelo visoko viskoznost, smo v 2. seriji poskusov povečali delež vode, ki smo jo predhodno segreli na 80 °C in zamenjali zamreževalec. Uporabili smo glicerol. Sintezo polimera smo načrtovali v masnem razmerju:



3.5.2 Druga serija poskusov

V tri 250 mL čaše smo natehtali 7,0 g natrijevega alginata, dodali 150 mL destilirane vode, ki smo jo predhodno segreli na 80°C. Vse skupaj smo dobro premešali in dodali še 9,0 g PVA ter pustili zmes na grelniki še 3 h. Nato smo dodali 8,0 g glicerola, dobro premešali in zmes pustili še 3 h na sobni temperaturi. Po 3 urah smo hidrogеле sprali najprej z destilirano vodo in nato še z etanolom, da smo odstranili višek reagentov. Ker je imela zmes NA in vode še vedno visoko gostoto, smo v 3. seriji poskusov povečali delež vode na 200 mL. Predhodno smo jo segreli na 60°C in kot zamreževalec ponovno uporabili glicerol. Sintezo polimera smo načrtovali v masnem razmerju:

$$\text{NA} : \text{H}_2\text{O} : \text{PVA} : \text{glicerol} = 7 : 200 : 9 : 8$$

3.5.3 Tretja serija poskusov

V tri 250 mL čaše smo natehtali 7,0 g natrijevega alginata, dodali 200 mL deionizirane vode, ki smo jo predhodno segreli na 60 °C. Zmes smo dobro premešali s paličnim mešalnikom. Na to smo pripravili vodno kopel (60 °C), vanjo položili čašo in počasi, ob stalnem mešanju dodali še 9,0 g PVA. Ko je bila zmes povsem gladka (brez mehurčkov) smo, po cca. 5 min, dodali še 8 g glicerola. Vse skupaj smo ponovno premešali in pustili stati 3 h. Zmes smo vlili na v naprej pripravljene kalupe, ki so jih predstavljali leseni obroči z vpetim platnom. Platno smo predhodno popršili z 10 % raztopino CaCl₂. Na kalupe smo zmes vlivali v tankem sloju. Z 10 % raztopino CaCl₂ smo polimerno zmes popršili tudi po površini, počakali slabo minuto, da je na površini potekla polimerizacija, odvečno tekočino popivnali in vse kalupe najprej 10 min sušili na zraku. Nato smo sušenje pospešili z uporabo zraka toplega fena (15 min). Hidrogele smo še 30 min sušili na sobni temperaturi. Po 72 urah zračnega sušenja smo jih odstranili iz kalupov.

Polimere smo nato zračno sušili do konstante mase. Ker so produkti predstavljali elastične in na pogled zelo homogene produkte, smo s poskusi sinteze na tej točki zaključili. Te hidrogеле smo nato uporabili v poskusih odziva na različne vrednosti pH in 3 % raztopine soli (KCl, NaCl, CaCl₂ in MgCl₂) ter v sadilnem poskusu.

4 REZULTATI Z RAZPRAVO

4.1 Sinteza hidrogela

Produkti prve in druge serije poskusov smo že opisali v predhodnem poglavju. V tretji seriji poskusov smo dobili hidrogel, ki so imeli bolj homogen izgled, bili so elastični, upogljivi, enostavno smo jih lahko rezali oz. oblikovali (Slika 14).



Slika 14. Primeri popolnoma posušenih vzorcev hidrogelov 1., 2. in 3. serije (lasten vir)

Vzorec 2 in 3 sta bila tudi po popolni izsušitvi gumasta/elastična. Če smo ju pustili v čaši, sta zavzela obliko čaše (primer vzorec 2). Vzorci so bili tanki (cca. 0,5 mm), prosojni in hrapavega videza, kar je posledica podlage v kalupu.

4.2 Karakterizacija hidrogela

4.2.1 FT-IR spektri

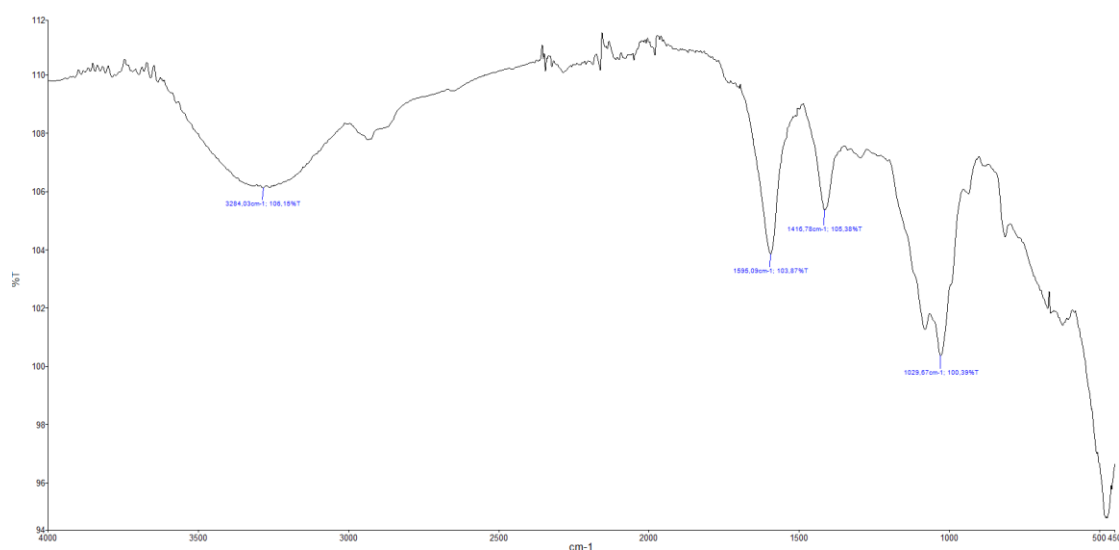
Za interpretacijo značilnih absorpcijskih vrhov smo uporabili preglednico *LibreTexts Chemistry* (dostopno na: *Infrared Spectroscopy Absorption Table - Chemistry LibreTexts*)

V preglednici 3 smo s krepkim tiskom označili vse vrhove, ki so značilni za vse tri produkte. Vrhovi potrjujejo, da je reakcija med natrijevim alginatom in polivinil alkoholom uspela z obema zamreževalcema, tako pentan -1,5 - dialom kot tudi glicerolom.

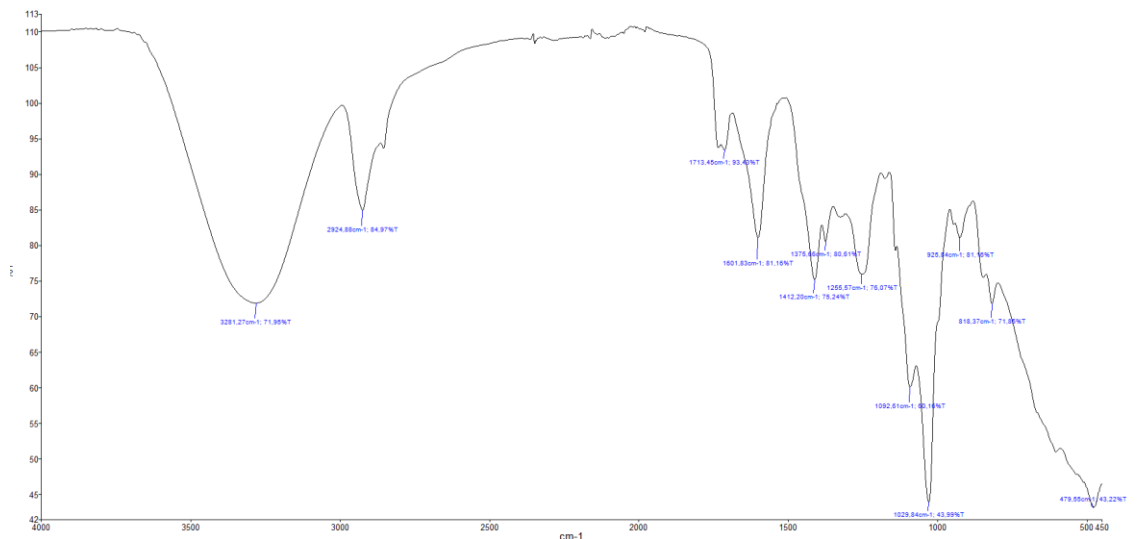
Valovna števila med 1603 do 1616 cm^{-1} smo pripisali prisotnosti raztezanja -CO (karbonilne skupine) in zamreževanja, ki je posledica tvorbe vodikovih vezi med PVA in natrijevim alginatom. Vodikove vezi lahko nastajajo tudi znotraj molekularne interakcije med verigama natrijevega alginata in polivinil alkohola (Chhatrija in sod., 2011), kar opazimo na vseh treh spektrih (Slika 15, 16 in 17).

Preglednica 3. FT-IR spektri produktov

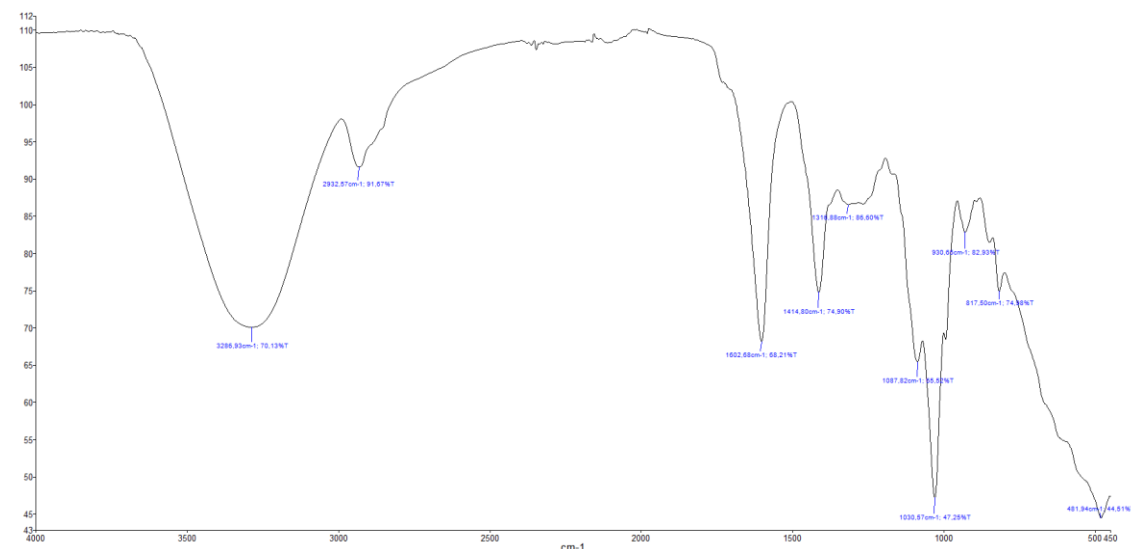
Oznaka hidrogela	Izraziti absorpcijski vrhovi (cm ⁻¹)	Vibracija vezi
1. Serija poskusov (slika 15)	3204	hidroksilne skupine (-OH)
	1595	karboksilne skupine (-COOH)
	1416,	karboksilne skupine (-COOH)
	1028	značilno za PVA
2. Serija poskusov (slika 16)	3281	hidroksilna (-OH) skupina
	2925	alkilna skupina (C-H)
	1713	karboksilne skupine (-COOH)
	1602	raztezanje -CH ₂ – skupine
	1412	karboksilne skupine (-COOH)
	1255	Vinil eter/alkil aril eter/ C-O
	1029	značilno za PVA
3. Serija poskusov (slika 17)	3286	hidroksilna (-OH) skupina
	2932	alkilna skupina (C-H)
	1603	Raztezanje C-O skupine
	1414	karboksilne skupine (-COOH)
	1087	značilno za PVA
	1030	značilno za PVA



Slika 15. Primer FT-IR spektra hidrogela vzorec 1 (lasten vir)



Slika 16. Primer FT-IR spektra hidrogela vzorec 2 (lasten vir)



Slika 17. Primer FT-IR spektra hidrogela vzorec 3 (lasten vir)

4.2.2 Površinska morfologija hidrogelov

Čeprav smo te slike posneli s kamero na telefonu, ki omogoča 100-kratno povečavo, na vseh slikah vidimo amorfno strukturo hidrogelov, zračne mehurčke in prostore, kjer se zadržuje voda. Temu pripisujemo dejstvo, da so bili hidrogeli, stari več kot dva meseca, popolno zračno »posušeni«, še vedno gibljivi in elastični. Delež vode je raznolik, največji v produktu 3, kar je pričakovano, glede na sintezne pogoje. Vse tri strukture kažejo visoko porozno strukturo, ki je sposobna zadržati 100 % ali več odstotkov vode (glej preglednico 4 in 5) svoje mase.

Predvidevali smo, da so je ta »mikro arhitektura« pomembna lastnost hidrogelov, saj vpliva na njihov delovanje.



Slika 18. Pregled hidrogelov pod 100-kratno povečavo (lasten vir)

4.2.3 Obnašanje hidrogela pri nabrekanju

Pri preučevanju nabrekanja hidrogelov smo uporabili produkte 3. serije poskusov.

Preglednica 4. Nabrekanje hidrogela v vodovodni vodi (pH 7,5)

Masa	Meritev
m_1 , masa pred nabrekanjem [$\pm 0,001$ g]	1,035
m_2 , masa po 24 v vodovodni vodi [$\pm 0,001$ g]	2,071
Δm , [$\pm 0,002$ g]	1,036
% AS	100

Preglednica 5. Nabrekanje hidrogela v deionizirani vodi (pH 7,0)

Masa	Meritev ⁸
m_1 , masa pred nabrekanjem ($\pm 0,001$ g)	1,756
m_2 , masa po 24 v destilirani vodi ($\pm 0,001$ g)	6,711
Δm , [$\pm 0,002$ g]	4,995
% AS	284

Primerjava rezultatov nabrekanja hidrogela v vodovodni in deionizirani vodi pokaže, da je absorpcija deionizirane vode za 184 % višja. To pripisujemo dejstvu, da so v vodovodni vodi

raztopljeni tudi kationi (npr. Mg^{2+} , Ca^{2+}), ki povzročijo dodatne zamrežitve in mnogo bolj rigidne (trdne) strukture. To bi lahko pomenilo, da bo delež absorpcije deževnice visok.

Nabrekle gele smo posušili. Nato smo jih ponovno za 24 ur potopili v vodo in masa gela se je ponovno povečala zelo blizu vrednosti, ki je bila izmerjena v predhodnem poskusu. Poskus smo ponovili 2-krat.

Preglednica 6. Nabrekanje hidrogela v vodovodni vodi po 2. ciklu sušenja (pH 7,5)

Masa	Meritev
m_1 , masa pred nabrekanjem [$\pm 0,001$ g]	1,040
m_2 , masa po 24 v vodovodni vodi [$\pm 0,001$ g]	2,050
Δm , [$\pm 0,002$ g]	1,010
% AS	97,1

Preglednica 7. Nabrekanje hidrogela v deionizirani vodi po 2. ciklu sušenja (pH 7,0)

Masa	Meritev⁹
m_1 , masa pred nabrekanjem ($\pm 0,001$ g)	1,770
m_2 , masa po 24 v destilirani vodi ($\pm 0,001$ g)	6,680
Δm , [$\pm 0,002$ g]	4,900
% AS	277,4

Če primerjamo rezultate med prvo izsušitvijo hidrogelov, ki ji je sledilo nabrekanje, sušenje, nabrekanje spet sušenje ter ponovno nabrekanje, vidimo, da so rezultati po dveh zaključenih ciklih od 3 % do 6 % slabši. Relativna napaka meritev je:

$$\text{napaka} = 0,002/4,995 \times 100 = 0,04\%$$

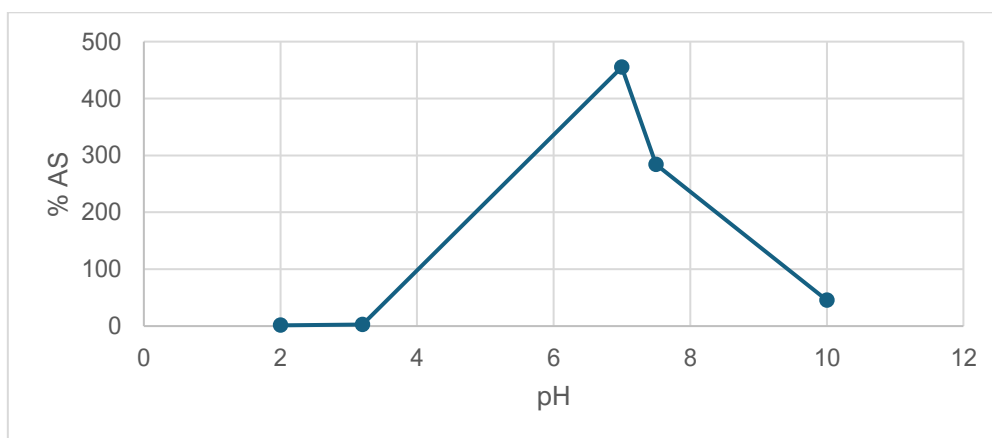
4.2.4 Nabrekanje pri različnih vrednostih pH vode.

Iz podatkov zbranih v preglednicah 8 vidimo, da hidrogel v zelo kislem okolju nase vežejo zelo malo vode, v deionizirani vodi se sposobnost absorpcije poveča skoraj na 300 %, v puferni raztopini (pH 7)¹⁰ pa je dosegla rekordnih 455 %. Uporabljen je bil fosfatni pufer (Graf 3).

¹⁰ Pufri so raztopine, ki vsebujejo šibke kisline in njihove konjugirane baze ali šibke baze in njihove konjugirane kisline. Ohranjajo stabilno pH-vrednost, tudi ko dodamo majhne količine močne kisline ali baze.

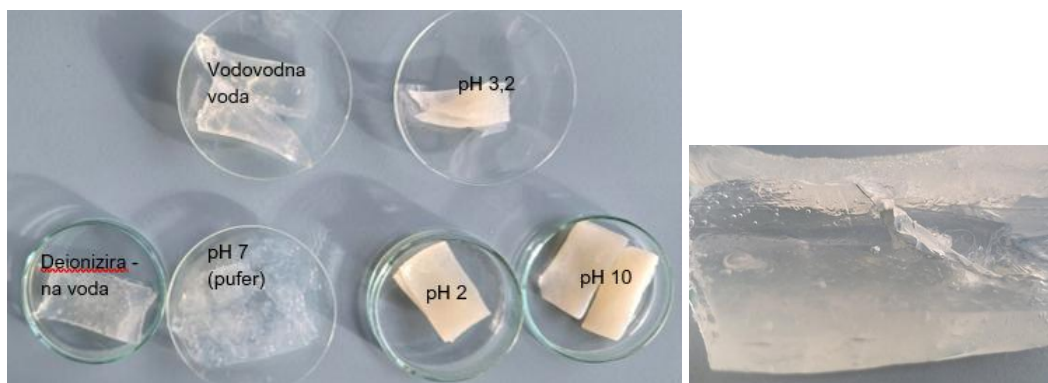
Preglednica 8. Nabrekanje pri različnih vrednostih pH vodnih raztopin

Meritev	pH			
	2,0	3,2	7,0	10,0
m_1 , masa pred nabrekanjem ($\pm 0,001$ g)	4,610	3,190	2,984	3,971
m_2 , masa po 24 v destilirani vodi ($\pm 0,001$ g)	4,670	3,277	16,566	5,778
Δm , [$\pm 0,002$ g]	0,06	0,087	13,582	1,807
% AS	1,3	2,7	455,2	45,5



Graf 3. Odvisnost absorpcije vode od pH raztopine

Zaključimo lahko da je pH, najbolj ugoden za uporabo sintetiziranega hidrogela, med 6,0 in 7,5. V bolj kislem okolju njegova sposobnost absorpcije vode hitro pade. Prav tako v bazičnem okolju. Iz slike 19 vidimo, da hidrogeli, kjer je prišlo do dodatne notranje zamrežitve, že na pogled izgledajo drugače. Njihova prosojnost izgine, vsi dobijo rumenkast »plastičen« videz (pH 2; 3,2; 10). Še vedno so elastični in upogljivi, vendar s tako nizko sposobnostjo absorpcije vode, da jih ne uvrščamo več med hidrogelne.



Slika 19. Izgled hidrogelov v različnih vrednostih pH (lasten vir) – levo in hidrogel pri pH 7 (lasten vir)

4.2.5 Nabrekanje v raztopini soli

Preglednica 9. Nabrekanje v 3 % raztopinah soli

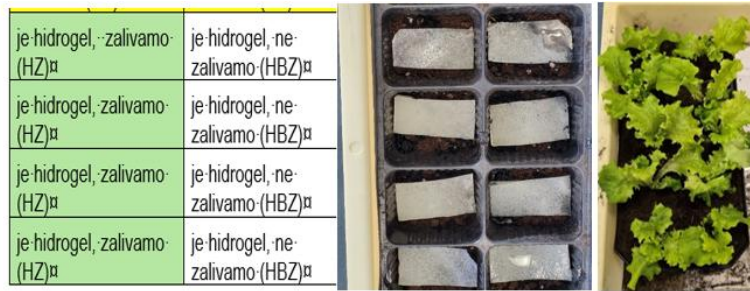
Meritev	Vrsta 3 % soli			
	NaCl	KCl	CaCl ₂	MgCl ₂
m_1 , masa pred nabrekanjem ($\pm 0,001$ g)	0,874	1,681	0,369	0,639
m_2 , masa, po nabrekanju ($\pm 0,001$ g)	8,784	9,670	1,047	4,497
Δm , [$\pm 0,002$ g]	7,910	7,989	0,678	3,858
% AS	905	475	183	603

Kot vidimo iz preglednice 9 je najvišje nabrekanje hidrogela v 3% raztopini NaCl (905 %) in najmanjše v 3% CaCl₂ (183 %). Predvidevamo, da so kalcijevi ioni povzročili dodatno zamrežitev gela in s tem zmanjšali možnost absorpcije vode. Preseneča rezultat pri 3% raztopini MgCl₂, ki je zelo visok, višji kot pri 3 % raztopini KCl. Razlog bi lahko bila velikost kationov, saj je magnezijev kation najmanjši, vendar ima naboj 2+, zato večji učinek kot Na⁺, ki je naslednji po velikosti. Če katione razvrstimo po velikosti njihovih radijev, potem velja: Mg²⁺ < Na⁺ < Ca²⁺ < K⁺

Tudi te hidrogelne smo pustili na zraku. V treh dneh so dehidrirali do začetne mase. Ponovna izpostavitve hidraciji je bila uspešna, vendar so bili rezultati v drugo za 5% do 10 % nižji.

4.3 Vpliv hidrogela na vsebnost vlage in pH v tleh

Najprej smo delno suhi hidrogel 3. serije poskusov razrezali na kose 7 cm x 3 cm in vsakega stehali. Poprečna masa hidrogela je bila ~7,0 gramov. Masa zemlje je bila ~ 200 g. Nato smo jih položili v sadilno jamico, zalili z 20-kratnikom njihove mase in dodali v vsako jamico po eno sadiko zimske solate ter prekrili z zemljo (slika 20). Vsakih sedem dni smo spremljali vlago v zemlji, pH zemlje ter opazovali rast rastlin. Posodo z rastlinami smo imeli v sobi, kjer je bila stalna temperatura ~20°C in dovolj dnevne svetlobe za normalno rast sadik solate. Sadike, ki smo jih zalivali, so vsak dan dobile 10 mL vodovodne vode.



Slika 20. Sadilni načrt z NA-PVA hidrogelom (lasten vir)

Pri dodajanju vode smo težili k temu, da je zemlja bila vlažna, vendar ne premočena, saj nismo želeli gnitja korenin. Izkazalo se je, da je 60% vlažnost optimalna. pH zemlje se pri tem ni spreminjal.

Preglednica 10. Vsebnost vlage v negativni kontroli (brez zalivanja, brez hidrogela) - NK

Meritev	1. dan	7. dan	14. dan	21. dan	28. dan
Vsebnost vlage [%]	45	20	12	-	-
pH zemlje	6,0	6,5	6,5	-	-

21. dan merilec vlage in pH ni več izmeril deleža vode v zemlji, kar pomeni, da se je zemlja izsušila pod 10%. Tudi pH meter je bil 21. dan neodziven. V negativni kontroli (brez hidrogela in zalivanja) je vsebnost vlage v zemlji hitro padala in z njo tudi uspešnost rasti sadik. Po 14 dneh so vse propadle.

Preglednica 11. Vsebnost vlage v testni skupini (hidrogel in zalivanje) - HZ

Meritev	1. dan	7. dan	14. dan	21. dan	28. dan
Vsebnost vlage, [%]	45	55	60	60	60
pH zemlje	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0

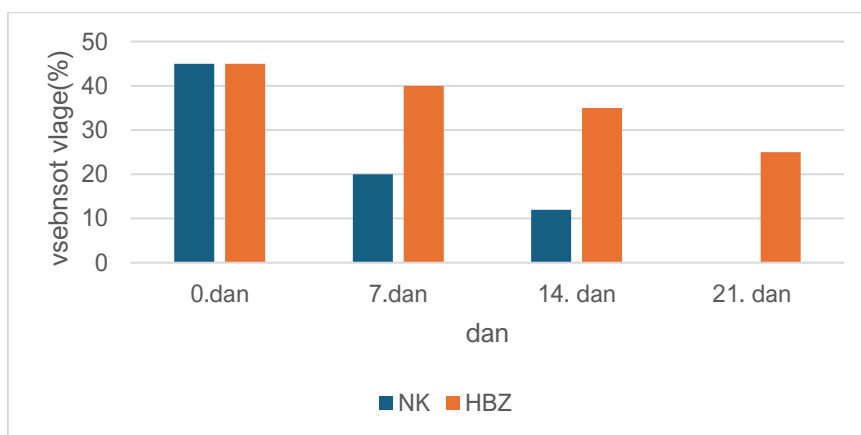
Preglednica 12. Vsebnost vlage v testni skupini (brez zalivanja in s hidrogelom) - BZH

Meritev	1. dan	7. dan	14. dan	21. dan	28. dan
Vsebnost vlage, [%]	45	40-45	35	25	-
pH zemlje	6,0	6,0	6,5	6,5	-

Iz meritev vsebnosti vode v prsti vidimo, da je hidrogel uspel počasi oddajati vodo pri čemer se pH zemlje ni bistveno spreminjal.

Preglednica 13. Vsebnost vlage v kontroli (brez hidrogela, zalivanje) – PK

Meritev	1. dan	7. dan	14. dan	21. dan	28. dan
Vsebnost vlage ,[%]	45	50	55	60	60
pH zemlje	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0



Graf 4. Primerjava vsebnosti vlage v zemlji, ki ni bila zalivana 21 dni brez hidrogela (temno moder stolpič) in s hidrogelom (oranžen stolpič)


pH zemlje se bistveno ni spreminjal. Ko je bila zemlja povsem izsušena, aparatura ni bila več sposobna meriti pH.

4.4 Spremljanje rasti rastlin


Primerjava med pozitivno kontrolo – zalivanje brez hidrogela (PK) in testno skupino (hidrogel in zalivanje) (HZ), pokaže, da ima hidrogel pozitivne učinke na rast zimske solate.

Iz preglednic od 14 do 16 vidimo, da je »zmagovalec« testna skupina (ZH: zalivanje+ hidrogel), sledi pozitivna kontrolna skupina (brez hidrogela – PK), nato sadike brez zalivanja, vendar s hidrogelom (HBZ) in pričakovano najslabše rastline brez zalivanja in brez hidrogela (NK).


Preglednica 14. Spremljanje rasti rastlin v kontroli (brez hidrogela, zalivanje)- PK

Meritev	1. dan	7. dan	14. dan	21. dan	21. dan
Dolžina najdaljšega lista [mm]	65	70	100	110	
Število listov	8	8	11	11	
Opazanja	Posadili 4 zdrave sadike	Od štirih sadik, so tri zdrave ena veni	Samo dve sadiki se razvijata nemoteno dalje	Ostali dve zdravi sadiki in ena v zaostanku rasti	

Preglednica 15. Spremljanje rasti rastlin v testni skupini (zalivanje + hidrogel) -HZ

Meritev	1. dan	7. dan	14. dan	21. dan	21. dan
Dolžina najdaljšega lista [mm]	65	75	100	130	
Število listov	8	8	11	13 – 14	
Opazanja	Posadili 4 sadike	Vse štiri sadike izgledajo zdravo (čvrsto, opazno temnejše od preostalih).	Vse štiri sadike izgledajo zdravo	Vse štiri sadike izgledajo zdravo	

Preglednica 16. Spremljanje rasti rastlin v testni skupini (brez zalivanja + hidrogel) – BZH

Meritev	1. dan	7. dan	14. dan	21. dan	
Dolžina najdaljšega lista [mm]	65	70	80	90	
Število listov	8	8	9	10	
Opazanja	Posadili 4 zdrave sadike	Dve sadiki v dobri kondiciji redu, dve kažeta znake venenja.	Dve sadiki v dobri kondiciji, preostali dva povsem oveneli	Ostali le dve zdravi sadiki	



Slika 21. Levo sadike solate po 21. dneih – HZ in desno HBZ (lasten vir). Skrajno desno - Hidrogel v zemlji po 35. dneih

Kot vidimo iz slike 21 je hidrogel po 35. dneih skoraj v celoti razpadel, koreninski lasiki so ga »prebadali«, v sebi pa je še vedno zadrževal nekaj vode. Če primerjamo ta rezultat z raziskavo, ki sta jo opravila Žižek in Berlič (2024), je hidrogel NA-PVA, imel 5 do 6-krat daljšo življenjsko dobo kot hidrogel pripravljen samo iz NA. Dodatek PVA je dejansko podaljšal življenjsko dobo hidrogela v zemlji. NA-PVA je še vedno biorazgradljiv v zemlji. Zadnji hidrogel je razpadel po 37. dnevu.

Najboljše so rastle sadike, ki smo jih redno zalivali, pri čemer so sadike s hidrogelom rastle hitreje. Tudi število novih listov je pri sadikah, ki so imele hidrogel in smo jih redno zalivali (HZ), bilo večje kot pri sadikah, ki smo jih samo zalivali (PK). Nobena sadika ni propadla. Pri

sadikah, ki so imele samo hidrogel (brez zalivanja- HBZ) je bila rast upočasnjena. Polovica sadik je trajno ovenela.

6 ZAKLJUČKI

V nalogi smo sintetizirali in preučevali smo NA-PVA hidrogel. Hidrogel je brez težav absorbiral odvečno vodo in zelo pozitivno vplival na rast sadik zimske solate, ohranjal konstantno vlažnost, vendar samo, če smo vodo redno dovajali. Ob odtegnitvi vode je uspel dovajati vodo do 21. dne (tri tedne), vendar samo pri dveh od štirih sadik. Poskus bi morali ponoviti s hidrogelom, ki je popolnoma napit z vodo (maksimalno kapaciteto absorbcije vode). Tega zdaj nismo naredili, ker smo se bali gnitja korenin.

Ker so rastline, kjer je bil prisoten hidrogel, rastle hitreje in se lepše razvijale, smo predvidevali, da je hidrogel izboljšal strukturo tal z vidika poroznosti, kar vodi do boljše prezračenosti in penetracije korenin. V večjih sistemih bi to lahko bil dober obet za zmanjšanje odtekanja vode in manjšo erozijo tal. Slednje predstavlja 2. fazo poskusa, kjer bomo hidrogel uporabili v eksperimentalni gredi šol. vrta.

Na osnovi do sedaj opravljenih poskusov lahko **hipotezo 1**, v kateri smo predvideli, da bo kopolimerni hidrogel (NA-PVA) ohranil svojo strukturno celovitost po 2-kratni hidraciji in sušenju, **potrdimo** za hidrogel na zraku. Če ga damo v zemljo, se reverzibilnosti izgubi in hidrogel med 35. in 37.dnem, pod vplivom mikroorganizmov, razpade.

Pri hidraciji hidrogela v vodnih raztopinah se je masa hidrogela z deionizirano vodo povečala za 284%, pri vodovodni vodi za 100%, pri uporabi fosfatnega puфра s pH 7 za 455% in v vodnih raztopinah soli za 905 % pri 3% vodni raztopini NaCl, 603% pri 3% vodni raztopini MgCl₂ in 475 % pri 3% vodni raztopini KCl. V **hipotezi 2** smo predvideli, da se bo hidrogel NA-PVA dobro odzival na povečano količino soli v vodni raztopini in izkazoval reverzibilne lastnosti. Ta hipoteza je **potrjena**. Ugotovili smo tudi, da na obseg zamrežitve vplivata tako naboj kot velikost kationov.

V **hipotezi 3**, smo predvideli, da se bo hidrogel odzival na spremembe pH zemlje in bo svojo visoko sposobnost absorpcije izkazoval v območju pH od 4 – 8. Tudi ta hipoteza je **potrjena**. Optimalno pH razpon za absorpcijo vode je med 6,0 in 7,5.

V **hipotezi 4** smo predvideli, da se NA-PVA hidrogel v zemlji v treh tednih ne bo povsem razgradil. To hipotezo **smo potrdili**, kar pomeni, da je PVA podaljšal življenjsko dobo hidrogela iz natrijevega alginata.

V **hipoteza 5** smo predvideli, da bo NA-PVA hidrogel v zemlji vsaj tri tedne deloval kot rezervoar vode. Ta hipoteza je **je potrjena**. Kot rezerva vode je deloval tri tedne.

Hipoteza 6 ni potrjena, saj smo predpostavili, da bo zimska solata ob rednem zalivanju z in brez hidrogela rastle enako uspešno. Solata s hidrogelom je rastle boljše.. To velja tako za test z zalivanjem kot za test brez zalivanja. Dolžina in število listov je bila v skupinah s hidrogelom večja.

Zagotovo je največja **pomanjkljivost raziskave** majhno število vzorcev zimske solate (4 na testno skupino). Zanesljivost rezultatov bi bila večja, če bi za vsako testno in kontrolno skupin imeli vsaj 30 – 50 sadik. Zato bi potrebovali rastlinjak. Tudi sadilne posode bi lahko bile večje: naše so imele volumen 3 dcl. Dobro je to, da so bile vse enakih oblik in velikosti ter napolnjene z isto zemljo. Kar se tiče osvetljenosti in temperature, so vse rastline imele enake pogoje.

Tokrat smo pri rastlinah merili le število listov v rozeti in dolžini najdaljšega lista solate. V koliko bi lahko spremljali še koreninski razvoj, bi bili zaključki zanesljivejši. V primeru večjega števila rastlin in več ponovitev, pa bi lahko naredili tudi bolj zanesljivo statistično analizo. Zdaj lahko govorimo le o študiji primera na solati vrste *Guenola*.

Kot možnosti nadgradnje raziskave vidimo naslednje:

1. Povečati število sadik v sadilnem poskusu, kar lahko naredimo spomladi na šolskem vrtu.
2. Možnosti nadaljnje optimizacije formulacije hidrogela NA-PVA, ki bi se v zemlji razgradil še kasneje (npr. 2 meseca) s povišanjem deleža PVA in zmožnostjo dodajanja hranil.
3. Spremljava kvalitete zemlje, v kateri je hidrogel, ne samo z vidika vsebnosti vlage in spremembe pH, ampak tudi razgradnje organskih snovi in dostopnosti hranil.

4. Zelo dobrodošlo bi bilo zalivanje z deževnico, oz. umestitev vzorcev hidrogela v zemljo pred dežjem in spremljanje vlage v zemlji, ko deževje preneha (koliko dežja hidrogeli dejansko zadržijo).
5. Oceniti je potreben strošek izdelave hidrogela, ki bi zadoščal z 500 m² šolskega vrta, kjer imamo trenutno 17 velikih dreves, 5 dvignjenih gred, skalnjak in nasad medonosnih rastlin ter izdelati načrt namestitve hidrogela v tla.
6. Preizkusiti rast rastlin ob prisotnosti hidrogela na drugih kulturnih rastlinah.

Hidrogeli so okolju prijazni, saj se sčasoma naravno razgradijo, ne da bi za seboj pustili toksične ostanke v tleh in rastlinah. Zato je uporaba hidrogela, kot sredstva za izboljšanje zemlje, lahko možnost za povečanje trajnostne kmetijske proizvodnje v razmerah pomanjkanja vlage. Raziskava je naš prispevek k eni od možnosti prilagajanja na podnebne spremembe.

7 LITERATURA

Al-Muhanna, M. K., Anwar, N. ; Hasnain, M. S.; Nayak, A. K. (2023). Chapter 1 - Synthesis of tailor-made polysaccharides: An overview." In: Nayak, A. K.; Hasnain, M. S. (eds.), *Tailor-Made Polysaccharides in Drug Delivery*, Academic Press, str. 1-27. doi:10.1016/b978-0-12-821286-8.00013-6, ISBN 978-0-12-821286-8.

Aziz, S., Salahuddin, B., Wang, S., Sangian, D., Gum Q. (2021). Hybrid Gelatin Hydrogels in Nanomedicine Applications. *ACS Appl Bio Mater.* 2021 Apr 19;4(4): str. 2886-2906. doi: 10.1021/acsabm.0c01630. Epub 2021 Mar 9. PMID: 35014383.

Bakass, M., Mokhlisse, A., Lallemand, M. (2002). Absorption and desorption of liquid water by a superabsorbent polymer: effect of polymer in the drying of the soil and the quality of certain plants. *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 83, no. 2, str. 234-243.

Besarab, S. (2021). Artificial Extracellular Hydrogel Matrix for Treatment Of Myocardial Infarction; DOI:10.13140/RG.2.2.35059.86569.

Berlič, N., Žižek, M. (2024). Algitekstil. Raziskovalna naloga na področju kemije in kemijske tehnologije. ZOTKS.

Buwalda, S. J., Boere, K. W., Dijkstra, P. J., Feijen, J., Vermonden, T., Hennink, W. (2014). Hydrogels in a historical perspective: From simple networks to smart materials. *Official journal of the Controlled Release Society*, vol. 190, str. 254-273.

Chai, Q., Jiao, Y., Yu, X. (2017). Hydrogels for biomedical applications: their characteristics and the mechanisms behind them." *Gels*, vol. 3, no. 6. str. 1.

Chhatri, A., Bajpai, J., Bajpai, A. K., Sandhu, S. S., Jain, N., Biswas, J. (2011). Cryogenic fabrication of savlon loaded macroporous blends of alginate and polyvinyl alcohol (PVA). *Carbohydrate Polymers*, vol. 83, No. 2, str. 876-882.

Chirani, N., Gritsch, L., Motta, F. L., Fare, S. (2015). History and applications of hydrogels. *Journal of Biomedical Sciences*, vol. 4, no. 2., str. 1

Dietz, K. J., Pfannschmidt, T. (2011). Novel regulators in photosynthetic redox control of plant metabolism and gene expression. *Plant Physiology*, vol. 155, str. 1477-1485.

Elgharbawy, A. S.; El Demerdash, A.-G. M.; Sadik, W. A., Kasaby, M. A.; Lotfy, A. H.; Osman, A. I. (2024). Enhancing the Biodegradability, Water Solubility, and Thermal Properties of Polyvinyl Alcohol through Natural Polymer Blending: An Approach toward Sustainable Polymer Applications. *Polymers*, vol. 16, str. 2141. <https://doi.org/10.3390/polym16152141>

El-Asmar, J., Jaafar, H., Bashour, I. (2017). Hydrogel banding improves plant survival and water use efficiency in two calcareous soils. *Clean Soil Air Water*, vol. 47, no. 7, str. 251.

Elkholy, R. A. (2020). Photocatalytic degradation of organic pollutants in wastewater using different nanomaterials immobilized on polymeric beads. *Desalination and Water Treatment*, vol. 139, str. 117-128. DOI:10.5004/dwt.2020.25680.

Elgharbawy, A. S., El Demerdash, A.-G. M., Sadik, W. A., Kasaby, M. A., Lotfy, A. H., Osman, A. I. (2024). Synthetic Degradable Polyvinyl Alcohol Polymer and Its Blends with Starch and Cellulose—A Comprehensive Overview. *Polymers*, 16(10), str. 1356. <https://doi.org/10.3390/polym16101356>

Frantar, P. (2021). Suša v tleh. Dostopno na: <https://kazalci.arso.gov.si/sl/content/susa-v-tleh>. Povzeto: 16. 11. 2024.

Gregorič, G., Sušnik, A., Tajnik, T. (2014). Pot k boljšemu upravljanju suše v Sloveniji. Gradivo za 2. nacionalni dialog, str. 11. Dostopno na: http://www.gwp.org/Global/GWP-CEE_Files/IDMP-CE/IDMP-NCD-brochure-Slovenia.pdf. Povzeto: 16. 11. 2024

GOV (2024). Posledice naravnih nesreč v kmetijstvu. Dostopno na: <https://www.gov.si teme/posledice-naravnih-nesrec-v-kmetijstvu/> Uporabljeno 11. 2. 2025

GOV (2021). Strategija prilagajanja podnebnim spremembam. Dostopno na: <https://www.gov.si/zbirke/projekti-in-programi/strategija-prilagajanja-podnebnim-spremembam/#:~:text=Strategija%20prilagajanja%20podnebnim%20spremembam%20je%20temeljni%20dokument%20za,pripravo%20politik%20in%20usmeritev%20za%20prilaganje%20podnebnim%20spremembam.> Uporabljeno 15. 12. 2024.

Hacker, M. C., Mikos, A. G. (2011). Synthetic polymers. *Principles of Regenerative Medicine*, 2nd ed., str. 587-622.

Huttermann, A., Zommodi, M., Reise, K. (1999). Addition of hydrogels to soil for prolonging the survival of *Pinus halepensis* seedlings subjected to drought. *Soil and Tillage Research*, vol. 50, no. 3-4, str. 295-304.

Kaur, P., Agrawal, R., Pfeffer, F.M. (2023). Hydrogels in Agriculture: Prospects and Challenges. *J Polym Environ* 31, str. 3701–3718. Dostopno na: <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02859-1> Povzeto: 16. 11. 2024

Kozlovskaya, V., Kharlampieva, E., Sukhishvili, S. A. (2017). *Comprehensive Biomaterials II*, Elsevier, str. 554-569, doi:10.1016/b978-0-08-100691-7.00177-4, ISBN 978-0-08-100692-4.

Krajnik, M., Sušnik, G., Gregorič, G., Boka, S. (2015). Suša in vodna direktiva: Upravljanje s sušo kot podlaga za implementacijo v sklopu vodne direktive. *Global Water Partnership Central and Eastern Europe*, Guidelines for the preparation of Drought Management Plans. Development and implementation in the context of the EU Water Framework Directive, Global Water Partnership Central and Eastern Europe, 48 pp. SBN: 978-80-972060-0-0 Dostopno na: http://www.gwp.org/Global/GWP-CEE_Files/IDMP-CEE/IDMP-Guidelines-final-pdf-small.pdf Povzeto: 17. 11. 2024

Laxmi, R., Rani, P., Rai, S. (2019). Effect of hydrogel on soil moisture stress. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 2019; SP5: str. 316-320 Dostopno na: <https://www.researchgate.net/publication/34160002> Povzeto 18. 11. 2024.

Muang Sri, R., Chuysinuan, P., Thanyachoen, T., Techasakul, S., Sukhavattanukul, P., Ummartyotin, S. (2022). Utilization of freeze-thaw process for polyvinyl alcohol/sodium alginate (PVA/SA) hydrogel composite. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, vol. 32, str. 34-41.

Okay, O. (2009). General properties of hydrogels. V: Gerlach, G. (ur.), in Arndt, K. F. (Ed.), *Hydrogel Sensors and actuators*, Berlin: Springer, str. 1–14.

Pakizeh, M., Karami, M., Kooshki, S., Rahminia, R. (2023). Advanced toluene/n-heptane separation by pervaporation: investigating the potential of graphene oxide (GO)/PVA mixed matrix membrane. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. Dostopno na: Journal homepage: www.journals.elsevier.com/journal-of-the-taiwan-institute-of-chemical-engineers Uporabljeno 12. 1. 2025

Shibayama M, Tanaka T. Phase transition and related phenomena of Takashi L, Hatsumi T, Makoto M, Takashi I, Takehiko G, Shuji S. (2007). Synthesis of porous poly (N-isopropylacrylamide) gel beads by sedimentation polymerization and their morphology. *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 104, no. 2, pp. 842. Tanaka, T. 1981 Gels. *Scientific American*. 1993, vol. 244, str. 110-123.

Smith, B. (1998). *Infrared Spectral Interpretation: A Systematic Approach*. CRC Press, str. 1-2. ISBN 9781466555396.

Sušnik, A. (2019). *Sledenje kmetijske suše*. GlobeEdit. ISBN-10 : 6138246950

Turner, N. C. (2019). Imposing and maintaining soil water deficits in drought studies in pots. *Plant and Soil*, vol. 439, no. 5, str. 1-11. DOI:10.1007/s11104-018-3893-1.

Vovk-Korže, A. (2019). Podnebne spremembe – tematika za tekmovanje iz znanja geografije. *Geografija v šoli*, vol. 27, no. 3, str. 12-24.

Turner, N. C. (2019). Imposing and maintaining soil water deficits in drought studies in pots. *Plant and Soil* vol. 439 no. 5, str. 1-11 DOI:10.1007/s11104-018-3893-1

Wang, Y.T., Gregg, L.L. (1990). Hydrophilic polymers-their response to amendments and effect on properties of a soilless potting mix. *Journal of the American Society for Horticultural Science*.

7.1 Internetni viri

- <http://www.businessworld.in/article/Water-Scarcity-In Agriculture-Predicting-Preventing-And-Protecting-/09 09-2018-159320/> Uporabljeno 18. 1. 2025
- <http://www.fao.org/3/a-i6459e.pdf> Uporabljeno 18. 1. 2025