

Praćenje pojave "hop creep" u pivu podvrgnutom suhom hmeljenju

Šuker, Zvonimir

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, FACULTY OF FOOD TECHNOLOGY / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:109:900757>

Rights / Prava: [Attribution-ShareAlike 4.0 International / Imenovanje-Dijeli pod istim uvjetima 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-30**

REPOZITORIJ

PTF OS

PREHRAMBENO-TEHNOLOŠKI FAKULTET OSIJEK

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Food Technology Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
PREHRAMBENO-TEHNOLOŠKI FAKULTET OSIJEK

Zvonimir Šuker

**PRAĆENJE POJAVE „*HOP CREEP*“ U PIVU
PODVIRGNUTOM SUHOM HMELJENJU**

DIPLOMSKI RAD

Osijek, rujan, 2024.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

DIPLOMSKI RAD

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Prehrambeno-tehnološki fakultet

Zavod za procesno inženjerstvo

Katedra za bioproceno inženjerstvo

Franje Kuhača 18, 31 000 Osijek, Hrvatska

Diplomski sveučilišni studij Procesno inženjerstvo

Znanstveno područje: Biotehničke znanosti

Znanstveno polje: Prehrambena tehnologija

Nastavni predmet: Osnove bioprocenog inženjerstva

Tema rada: prihvaćena je na III. redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Prehrambeno tehnološkog fakulteta Osijek u održanoj 21. prosinca 2023.

Mentor: izv. prof. dr. sc. Kristina Mastanjević

PRAĆENJE POJAVE „HOP CREEP“ U PIVU PODVRGNUTOM SUHOM HMELJENJU Zvonimir Šuker, 0113151695

Sažetak: Da bi se naglasile aromatične komponente hmelja u pivu, suho hmeljenje je neizostavni dio u proizvodnji nekih pivskih stilova kao što su Indian Pale Ale (IPA), West Coast IPA, double IPA, American Pale Ale (APA) i sl. Posebno se često primjenjuje u proizvodnji zanatskog piva, ali i u uvjetima kućanske proizvodnje piva. Suho hmeljenje podrazumijeva dodatak hmelja u fermentor tijekom ili nakon fermentacije, pri čemu je vrijeme suhog hmeljenja ovisno o stilu koji se proizvodi. Ono što je problematično je pojava refermentacije, odnosno povišenje koncentracije etanola u pivu nakon suhog hmeljenja. Zadatak ovog rada je proizvesti pivo te tijekom proizvodnje i skladištenja pratiti promjene koje nastaju u količini ekstrakta i etanola nakon dodatka hmelja u fazi suhog hmeljenja. Cilj je detektirati koliko je potrebno da se dosegne najviše vrijednost etanola nakon suhog hmeljenja te ima li ovaj fenomen utjecaja na senzorska svojstva piva.

Ključne riječi: hop creep, suho hmeljenje, pivo, fermentacija, arome

Rad sadrži: 37 stranica
15 slika
7 tablica
0 priloga
35 literarnih referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

Sastav Povjerenstva za ocjenu i obranu diplomskog rada:

1.	izv. prof. dr. sc. Ante Lončarić	predsjednik
2.	izv. prof. dr. sc. Kristina Mastanjević	član-mentor
3.	dr. sc. Gordana Šimić, znan. Sav.	član
4.	prof. dr. sc. Marina Tišma	zamjena člana

Datum obrane: 26. rujna 2024.

Rad je u tiskanom i elektroničkom (pdf format) obliku pohranjen u Knjižnici Prehrambeno-tehnološkog fakulteta Osijek, Franje Kuhača 18, 31 000 Osijek.

BASIC DOCUMENTARY CARD

GRADUATE THESIS

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek
Faculty of Food Technology Osijek
Department of Process Engineering
Subdepartment of Bioprocess Engineering
Franje Kuhača 18, HR-31000 Osijek, Croatia

Graduate program Process Engineering Study

Scientific area: Biotechnical sciences
Scientific field: Food Technology
Course title: Basics of Bioprocess Engineering
Thesis subject: was approved by the Faculty of Food Technology Osijek Council at its session no. III. held on December 21, 2023
Mentor: Kristina Mastanjević, PhD, associate prof.

DETECTION OF HOP CREEP PHENOMENOM IN BEER SUBJECTED TO DRY HOPPING

Zvonimir Šuker, 0113151695

Summary: To emphasize the aromatic components of hops in beer, dry hopping is an essential part of producing certain beer styles, such as Indian Pale Ale (IPA), West Coast IPA, double IPA, American Pale Ale (APA), and others. It is particularly often used in the production of craft beer, but also in homebrewing conditions. Dry hopping involves the addition of hops to the fermenter during or after fermentation, with the duration of dry hopping depending on the style being produced. The problematic issue is the occurrence of refermentation, i. e., an increase in the ethanol concentration in the beer after dry hopping. The aim of this thesis is to produce beer and, during production and storage, monitor the changes, in the amount of extract and ethanol after the addition of hops during the dry hopping phase. The goal is to detect how long it takes to reach the highest ethanol value after dry hopping and whether this phenomenon affects the sensory properties of the beer.

Key words: hop creep, dry hopping, beer, fermentation, aromas

Thesis contains: 37 pages
15 figures
7 tables
0 supplementary materials
35 references

Original in: Croatian

Review and defence committee:

1.	Ante Lončarić, PhD, associate prof.	chair person
2.	Kristina Mastanjević, PhD, associate prof.	member-mentor
3.	Gordana Šimić, PhD, scientific adviser	member
4.	Marina Tišma, PhD, prof.	stand-in

Defense date: September 26, 2024

Printed and electronic (pdf format) version of thesis is deposited in Library of the Faculty of Food Technology Osijek, Franje Kuhača 18, HR-31 000 Osijek.

DIPLOMSKI RAD JAVNO JE OBRANJEN DANA

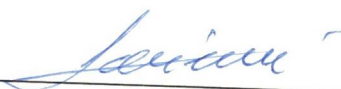
26. rujna 2024.

TE OCIJENJEN USPJEHOM


izvratom (5)

Pred Povjerenstvom za obranu diplomskog rada:


1. izv. prof. dr. sc. Ante Lončarić - predsjednik


(potpis)

2. izv. prof. dr. sc. Kristina Mastanjević - član


(potpis)

3. dr. sc. Gordana Šimić - član


(potpis)

Sadržaj

1. UVOD	1
2. TEORIJSKI DIO	3
2.1. SUHO HMELJENJE U PROIZVODNJI PIVA	4
2.1.1. Hmelj	4
2.1.2. Ekstrakcija komponenti hmelja tijekom procesa	8
2.2. „HOP CREEP“ FENOMEN	10
3. EKSPERIMENTALNI DIO	12
3.1. ZADATAK	13
3.2. MATERIJALI I METODE	13
3.2.1. Postupak proizvodnje piva u laboratoriju	13
3.2.2. Fizikalno-kemijske analize piva	17
3.2.3. Senzorska analiza	21
4. REZULTATI I RASPRAVA	23
5. ZAKLJUČCI	31
6. LITERATURA	33

Popis kratica, oznaka i simbola

IBU	međunarodna jedinica za gorčinu (eng. <i>international bitterness unit</i>)
% (v/v)	volumni udio
°P	Platov stupanj

1. UVOD

Suho hmeljenje jedna je od ključnih tehnika u modernoj proizvodnji piva, posebno u craft pivarstvu, koja za cilj ima postizanje izraženijih aromatičnih i okusnih nota hmelja u pivu, bez prekomjernog povećanja gorčine. Ova tehnika podrazumijeva dodavanje hmelja u pivo nakon glavne fermentacije, najčešće tijekom hladne faze procesa, što omogućuje očuvanje hlapljivih spojeva odgovornih za jedinstvene aromatične profile piva proizvedenih na takav način. Pored prednosti u poboljšanju piva, suho hmeljenje sa sobom nosi i niz tehnoloških izazova a jedna od njih je pojava „*hop creep*“ fenomena (Algazzali i Shellhammer, 2018).

Pojava „*hop creep*“ prvi put je dokumentirana još krajem 19. stoljeća, no tek je posljednjih godina dobila veću pažnju u industriji piva, posebno porastom popularnosti intenzivno suho hmeljenih piva poput Indian Pale Ale (IPA), American Pale Ale (APA) i drugih. „*Hop creep*“ podrazumijeva sekundarnu, neželjenu fermentaciju koja se događa nakon suhog hmeljenja (Maye, Smith i Brown, 2016). Ova sekundarna fermentacija može dovesti do nekoliko problema među kojima je i značajna promjena u senzorskim karakteristikama piva, poput prekomjernog povećanja gorčine ili pojave nepoželjnih aroma koje odstupaju od originalnog profila (Hanke, Wunderlich i Becker, 2019). Hmelj (*Humulus lupulus*) sadrži niz enzima, uključujući amilaze, koje mogu razgraditi polisaharide poput škroba i dekstrina u jednostavne šećere koji postaju dostupni preostalom kvascu što rezultira neželjenim povećanjem koncentracije alkohola i stvaranja dodatnog ugljikovog dioksida (Shellhammer, 2020).

Zbog nepoželjnih posljedica koje „*hop creep*“ može uzrokovati, bitno je uvođenje dodatnih kontrolnih točki u proizvodnim i skladišnim procesima suho hmeljenih piva, kao i raditi na optimizaciji parametara ključnih za provedbu takvog načina proizvodnje piva (Fritsch i Shellhammer, 2018).

2. TEORIJSKI DIO

2.1. SUHO HMELJENJE U PROIZVODNJI PIVA

U pivarstvu se koriste različite metode kako bi konačni proizvod bio željenih senzorskih karakteristika, a jedna od njih je i tehnika podvrgavanja piva suhom hmeljenju. Za razliku od klasične metode dodavanja hmelja tijekom kuhanja sladovine, primjenom suhog hmeljenja hmelj se dodaje pri kraju fermentacije kada je pivski kvasac već u terminalnom stadiju, ili nakon završene fermentacije tijekom odležavanja mladog piva. Ovakav način dodavanja hmelja provodi se u svrhu postizanja karakterističnih aroma u pivu koje potječu od hmelja, te u svrhu regulacije gorčine piva. (Klimczak, Cioch-Skoneczny i Duda-Chodak, 2023).

Dva su glavna načina provođenja suhog hmeljenja: statičko i dinamičko. Statička metoda se odnosi na dodavanje hmelja direktno u spremnik sa mladim pivom. Ovaj pristup je više prisutan u manjim pivovarama ili prilikom kućne izrade piva. U zadnje vrijeme je, radi velike učinkovitosti, među većim proizvođačima sve popularnija dinamička metoda kod koje se suho hmeljenje provodi prepumpavnjem piva iz fermentora kroz sloj hmelja čime se sastojci hmelja lakše suspendiraju u pivu. Ova metoda značajno skraćuje vrijeme trajanja procesa (Lafontain i Shellhammer, 2018).

2.1.1. Hmelj

Hmelj (*Humulus lupulus*) se danas smatra neizostavnim sastojkom za proizvodnju piva, upravo jer je sirovina zaslužna za specifičan okus i aromu piva. S tehnološkog gledišta, najbitniji sastojci hmelja su hmeljne smole od kojih pivo dobiva karakterističnu gorčinu i eterična ulja odgovorna za aromu (Schönberger i Kostelecky, 2011). U **Tablici 1** prikazane su skupine spojeva prisutnih u hmelju i njihov prosječan udio. Treba napomenuti kako sastav hmelja ovisi o brojnim čimbenicima poput sorte hmelja, uvjeta uzgoja i dr. U svijetu je dostupno više od 260 sorti koje se razlikuju po udjelu: hmeljnih smola (posebno u sadržaju α -kiselina), eteričnih ulja i polifenola (Kirkendall, Mitchell i Chadwick, 2018).

Lafontaine i sur. (2019.) su istraživali utjecaj datuma berbe na senzorske karakteristike i sadržaj eteričnih ulja hmelja, te se pokazalo kako je hmelj ubran u kasnijim stadijima tehnološke zrelosti prikladniji za suho hmeljenje. Korištenje kasnije ubranog hmelj je rezultiralo pivom s više citrusnih nota, što se pripisuje većem sadržaju hlapljivih frakcija eteričnih ulja.

Tablica 1 Prosječan kemijski sastav suhog hmelja (Klimczak, Cioch-Skoneczny i Duda-Chodak, 2023.)

Komponente u hmelju	Prosječni udio (%)
Smole	15-30
Eterična ulja	0.5-3
Proteini	15
Monosaharidi	2
Polifenoli	4.3-14
Pektini	2
Aminokiseline	0.1
Voskovi i steroidi	25
Pepeo	8
Voda	10
Celuloza i druge tvari	40-43

2.1.1.1. Hmeljne smole

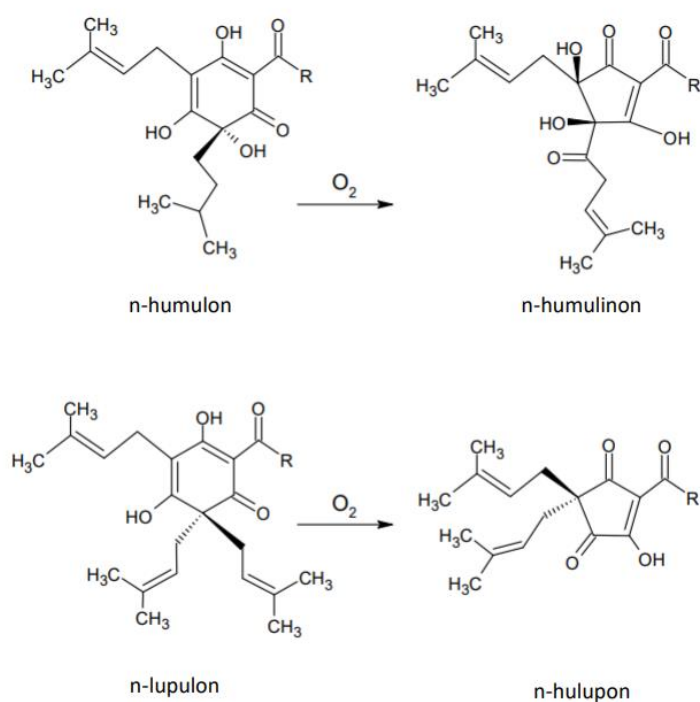
Hmeljne smole se može podijeliti na meke i tvrde smole. Meke smole uključuju α -kiseline (humulone) i β -kiseline (lupulone), dok tvrde smole sadrže δ -kiseline, ϵ -kiseline i frakciju sastavljenu od nepotpuno identificiranih supstanci. U sastav hmeljnih smola ulaze i međuprodukti oksidacije mekih smola (humulinoni i huluponi) (Almaguer i sur. 2014).

Baker i sur. (2008) su ispitivanjem različitih vrsta hmelja utvrdili kako se raspon udjela α -kiselina u suhom hmelju kreće od 1.3% do 12.6%. Danas se na tržištu lako može pronaći sorte hmelja kod kojih se udio ovih kiselina prelazi 15%, poput sorte Columbus koja sadrži 14-18% α -kiselina. Reakcijski uvjeti tijekom suhog hmeljenja ne pogoduju izomerizaciji α -kiselina pa

ostaju u obliku koji ne utječe značajno na okus pića, a pored toga su slabo topive u vodi. (Lafontaine i Shellhammer, 2018)).

Druga skupina spojeva su β -kiseline. Prema Bakeru i sur. (2008), ovi spojevi čine 1-6% mase suhog hmelja ovisno o sorti. Iako su slabo topive u vodi, dokazano je kako se ovi spojevi ipak prenose u pivo tijekom suhog hmeljenja, te zbog svog antimikrobnog djelovanja pridonose mikrobiološkoj stabilnosti piva. (Hauser, Lafontaine i Shellhammer, 2019).

Humulinoni i huluponi su produkti oksidacije α - i β - kiselina, kao što je prikazano na **Slici 1**. Humulinoni su glavni čimbenik odgovoran za povećanje gorčine u pivu nakon procesa suhog hmeljenja te su detektirani u značajnim udjelima kod takvih piva. (Algazzali i Shellhammer, 2016).

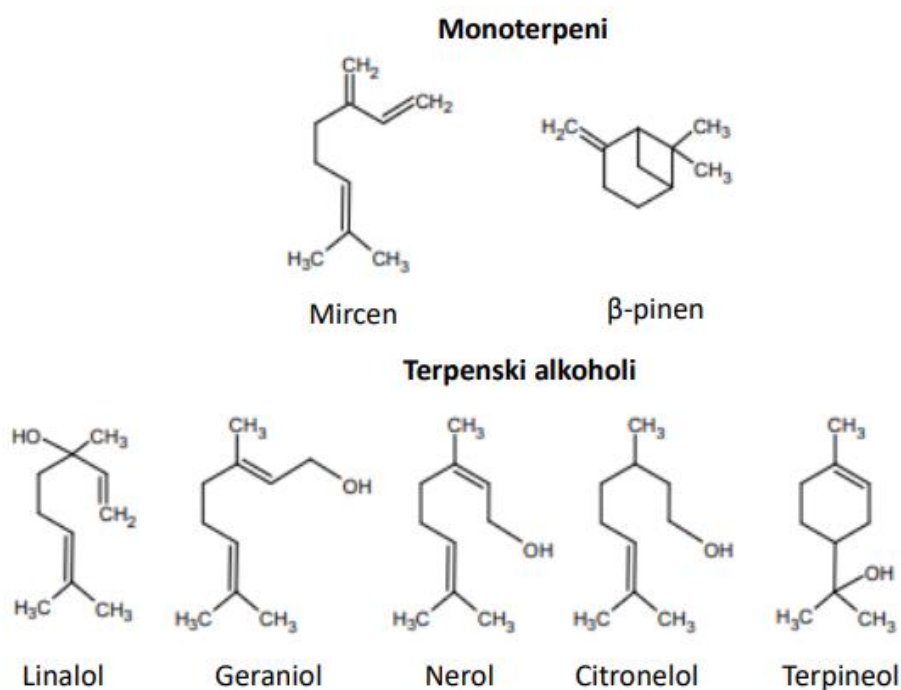


Slika 1 Oksidacija α - i β - kiselina u humulinone i hulupone (Klimczak, Cioch-Skoneczny i Duda-Chodak, 2023)

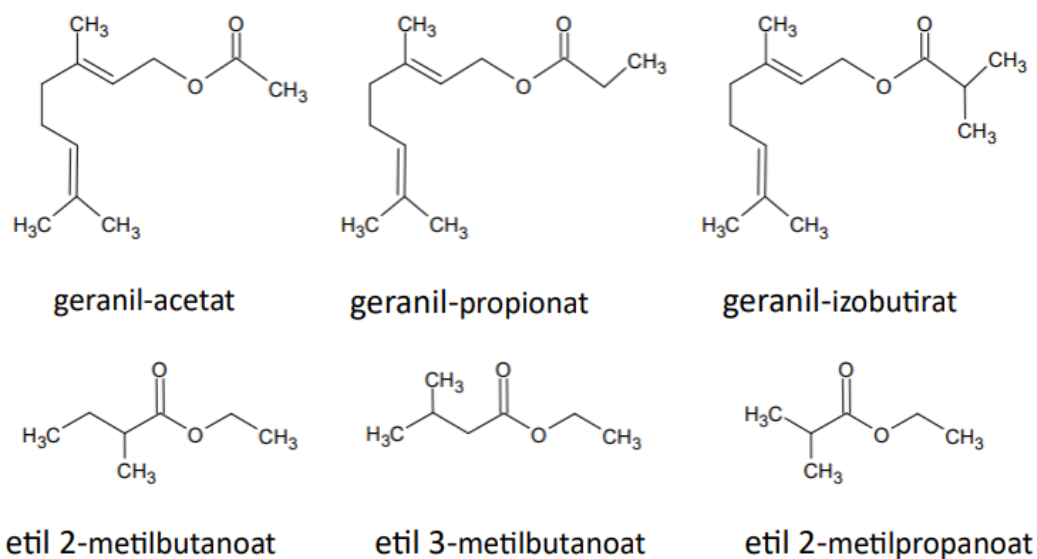
2.1.1.2. Eterična ulja

Eterična ulja su visoko koncentrirani biljni ekstrakti koji sadrže hlapljive spojeve, te su komponente odgovorne za karakteristične arome različitih sorti hmelja, kao i za okus koji daju pivu (Nance i Setzer, 2011).

Sastav eteričnih ulja može se podijeliti na: terpene, spojeve sa kisikom i spojeve sa sumporom (Sharpe i Laws, 1981). Terpeni su glavni prekursori ostalih spojeva. Spojevi sa kisikom su oksigenirane frakcije terpenskih ugljikovodika, uključujući terpenske alkohole, estere, aldehide i ketone) (Sun i sur., 2022). Značajan utjecaj na aromu hmelja, pa kasnije i na okus piva imaju alkoholi i esteri od kojih potječu prepoznatljive cvjetne i citrusne arome (Haslbeck i sur., 2018).



Slika 2 Kemijska struktura monoterpena i terpenskih alkohola pronađenih u hmelju (Cibaka i sur., 2016)



Slika 3 Kemijska struktura nekih od estera iz hmelja (Prilagođeno iz Anonymous 1)

Spojevi sa sumporom nađeni u slobodnom obliku ili vezani na prekursorima, a posebno polifunkcionalni tioli, imaju značajan utjecaj na aromu piva (Cibaka i sur., 2016). Iako se radi o lako hlapljivim i nestabilnim komponentama, ljudski olfaktorni sustav je poprilično osjetljiv na ove spojeve, što im daje visoku sposobnost utjecaja na aromu pa čak i pri niskim koncentracijama (Klimczak, Cioch-Skoneczny i Duda-Chodak, 2023.).

2.1.1.3. Polifenoli

Polifenolni spojevi iz hmelja radi svoje topljivosti u vodi ulaze u sastav suho hmeljenih piva. Njihova prisutnost direktno se odnosi na izraženiju gorčinu piva. Osim direktnog utjecaja na okus, pivu daju antioksidativna svojstva i bitan su čimbenik prilikom stvaranja zamućenja (Gribkova i sur., 2022).

2.1.2. Ekstrakcija komponenti hmelja tijekom procesa

Suho hmeljenje može značajno utjecati na sastav gorkih tvari u pivu. Prema literaturi, suho hmeljenje može povećati ukupni IBU za oko 4-6 jedinica, ovisno o količini korištenog hmelja i specifičnim uvjetima procesa. Međutim, percepcija gorčine može se razlikovati ovisno o prisutnosti drugih spojeva, poput polifenola i alkohola, koji percipiranu gorčinu piva mogu modulirati na različite načine (Hahn i sur., 2018). Istraživanja pokazuju kako se tijekom suhog

hmeljenja povećava sadržaj humulinona i α -kiselina, dok se sadržaj izo- α -kiselina smanjuje. Ti spojevi mogu značajno doprinijeti gorčini, a njihova koncentracija može varirati ovisno o dozi hmelja i uvjetima proizvodnje (Hauser, Lafontain i Shellhammer, 2019).

Ekstrakcija hlapljivih komponenti ponajprije ovisi o polarnosti tih spojeva, a suho hmeljenje je tehnika koja ekstrakciju ovih komponenti u tehnologiji piva dovodi do maksimalne iskoristivosti (Takoi i sur., 2016). Istraživanja pokazuju kako je učinak ekstrakcije terpenkih alkohola vrlo visok. Ukupna količina ovih spojeva nakon suhog hmeljenja je viša nego u hmelju, što se događa radi istovremene sinteze istih u kompleksnim i još uvijek neistraženim reakcijama biotransformacije koje se odvijaju tijekom provođenja suhog hmeljenja (Klimczak, Cioch-Skoneczny i Duda-Chodak, 2023).

Hmelj sadrži značajnu količinu polifenola koji se lako ekstrahiraju u pivo zbog svoje hidrofilne prirode. Studije su pokazale da suho hmeljenje može značajno povećati sadržaj polifenola u pivu, što također može povećati percipiranu gorčinu (Forster i Gahr, 2013).

Jedna od značajnih kemijskih promjena u pivu tijekom ovog procesa je zasigurno povećanje pH vrijednosti koja raste proporcionalno sa količinom dodanog hmelja (Maye, Smith i Leker, 2018). Osim toga dolazi i do biotransformacije spojeva iz hmelja poput terpenkih alkohola pri čemu nastaju spojevi koji daju aromatične karakteristike pivu, kao i promjene u sastavu estera gdje se metilni esteri transformiraju u etilne estere (Schnaiter i sur., 2016).

Klimczak, Cioch-Skoneczny i Duda-Chodak (2023) su opisali ključne parametre koji utječu na učinkovitost ekstrakcije prilikom primjene suhog hmeljenja, a to su:

- doza hmelja i sadržaj α -kiselina (povećanje doze hmelja smanjuje ekstrakciju terpenkih alkohola),
- vrijeme i temperatura (više temperature pogoduju ekstrakciji α -kiselina i polifenola, a ekstrakcija svih ključnih komponenti se odvija u prvih 24 sata procesa),
- sastav piva koje se podvrgava suhom hmeljenju (veći sadržaj alkohola pogoduje ekstrakciji α - i β -kiselina, a nema značajan utjecaj na ekstrakciju terpenkih alkohola i polifenola,
- način provođenja procesa (dinamičko provođenje suhog hmeljenja rezultira bržom i potpunijom ekstrakcijom, ali može i previše povisiti gorčinu piva.

2.2. „HOP CREEP“ FENOMEN

Fenomen koji se javlja kao posljedica podvrgavanja piva suhom hmeljenju je ponovno pokretanje fermentacije, poznatije kao „hop creep“. Ova pojava je prvi put zabilježena 1893. godine gdje je fenomen opisan kao nepoželjna posljedica čiji je produkt pivo sa višim konačnim sadržajem alkohola i nižim sadržajem ekstrakta. Posebno je opasno kod nepasteriziranih i nefiltriranih piva jer povećava rizik od prekarbonizacije, koja posebno utječe na senzorske karakteristike piva i stvara rizik od izlivanja posljedično povećanju tlaka u ambalaži radi oslobađanja ugljikovog dioksida (Klimczak, Cioch-Skoneczny i Duda-Chodak, 2023).

Poznato je kako su amilolitički enzimi prisutni u hmelju odgovorni za pojavu ovog fenomena jer svojim djelovanjem razgrađuju dekstrine iz pivskog ekstrakta na jednostavnije šećere koje kvasac može naknadno fermentirati (Werrie, Deckers i Fauconnier, 2022). Kirkpatrick, Mitchell i Chadwick (2018) su uočili povećanje razina glukoze, fruktoze, maltoze i maltotrioze tijekom dvodnevnog procesa suhog hmeljena. Ukupno povećanje ovih šećera u datom periodu iznosilo je 0,77 g/100 mL što je rezultiralo sa dodatnih 0,39 % (v/v) etanola i 1,9 % (v/v) CO₂. Kirkpatrick i Shellhammer (2018) su dodavali hmelj Cascade u potpuno fermentirano lager pivo u količini od 1000 g/hL pri 20°C, te su nakon 40 dana dobili rezultate povećanja udjela alkohola za dodatnih 1,3 % (v/v) i povećanje udjela ugljikova dioksida za 4,75 % (v/v), te su zaključili da sadržaj jednostavnih šećera u hmelju (**Tablica 1**) nije imao utjecaj na ukupnu razinu fermentabilnih šećera u pivu. Također su istraživali aktivnost α -amilaze, β -amilaze i amiloglukozidaze kod 30 različitih sorti hmelja i svaka od sorti je pokazala značajnu varijaciju u enzimatskoj aktivnosti, što dovodi do zaključka kako različite sorte hmelja imaju različit potencijal za izazivanje „hop creep“ fenomena.

Mikroorganizmi i štetnici koji mogu biti prisutni u hmelju su još jedan od potencijalnih istraživanih uzročnika fenomena. Cotrell (2022) je iz hmelja izolirao mikroorganizme koji imaju sposobnost razgradnje škroba (*Klebsiella spp.*, *Penicilium sp.* i *Alternaria sp.*). Navedeni mikroorganizmi su iz piva izolirani nakon 7 dana još uvijek bili aktivni, no zaključeno je kako ipak nisu bili izravni uzročnici pojave „hop creep“. Patogeni *Pseudoperonospora humuli* i *Podosphaera macularis*, poznatije kao plamenjača i pepelnica, također pridonose povećanju amilolitičke aktivnosti pri suhom hmeljenju radi svoje sposobnosti sintetiziranja glikozid hidrolaza kojima razgrađuju složene šećere (Klimczak, Cioch-Skoneczny i Duda-Chodak, 2023).

Cottrell (2022) je umjesto hmelja koristio kanabis (*Cannabis sativa*) u procesu suhog hmeljenja i amilolitička aktivnost je bila jako slična kao i kod hmelja, što se pripisuje tome jer se radi o biljkama iz iste porodice (*Cannabaceae*) koje samim tim imaju slične genske sekvence za kodiranje i sintezu amilaza.

Smanjenje potencijala za pojavu „*hop creep*“ fenomena može se postići odgovarajućim temperaturnim rasponima temperatura sušenja hmelja. Smanjenje amilolitičke aktivnosti je proporcionalno s porastom temperature sušenja u temperaturnom rasponu od 49 °C do 82 °C. Temperature sušenja hmelja koje ne prelaze 65 °C nemaju signifikantan učinak na aromu i kemijski sastav hmelja, a ishodišni učinak viših temperatura sušenja ovisi i o početnoj razini enzimatske aktivnosti hmelja. Kod hmelja sa visokom početnom enzimatskom aktivnošću, do pojave „*hop creep*“ dolazi bez obzira na primjenjivane temperature sušenja. S druge strane kod hmelja sa niskom početnom enzimskom aktivnošću, više temperature sušenja mogu biti učinkovita metoda za smanjenje potencijala za pojavu „*hop creep*“ fenomena. Također, učinkovita metoda izbjegavanja ili smanjenja potencijala za pojavu ovog fenomena su niske temperature tijekom vrenja što isto rezultira smanjenom enzimatskom aktivnošću (Rubottom i sur., 2022).

Bruner, Marcus i Fox (2021) su u istraživanju ispitivali 31 soj pivskih kvasaca i nisu pronašli nikakve značajne razlike kod pojave „*hop creep*“, što sugerira da odabir radnog mikroorganizma ne igra bitnu ulogu niti se može koristiti u prevenciji ovog fenomena.

Još uvijek ne postoji poznata metoda koja bi u potpunosti spriječila pojavu „*hop creep*“ kod piva podvrgavanih suhom hmeljenju. Također je jako teško i problematično odrediti točan stupanj u kojem je pivo pogođeno ovom pojavom, a da se prethodno ne provedu temeljita tehnološka ispitivanja. Jedno od rješenja je hmeljenje piva nakon što je kvasac uklonjen putem pasterizacije ili filtracije. Ali dosadašnja istraživanja ukazuju na to da bez kvasca ne dolazi do biotransformacije spojeva iz hmelja, pa se onda uklanjanjem kvasca prije suhog hmeljenja ne bi ni postigao željeni efekt koji suho hmeljenje ima na organoleptička svojstva piva. Najbolje što proizvođači mogu napraviti je dizajnirati suho hmeljena piva uzimajući u obzir mogućnost pojave „*hop creep*“ uz osiguravanje da zdravstveno ispravan proizvod dolazi do potrošača (Klimczak, Cioch-Skoneczny i Duda-Chodak, 2023).

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. ZADATAK

Zadatak ovog rada je određivanje povećanja količine alkohola u pivu nakon suhog hmeljenja. Uobičajeno je da se stil piva Indian Pale Ale suho hmelji, pa je zato i rađena analiza na ovom stilu piva.

3.2. MATERIJALI I METODE

Uzorci piva korišteni u ovom istraživanju izuzeti su tijekom i nakon kuhanja piva koje je proizvedeno u laboratorijskim uvjetima na Prehrambeno-tehnološkom fakultetu Osijek. Za svaki uzorak provedene su paralelne analize, a bili su određivani fizikalno-kemijski parametri: udio ekstrakta, udio alkohola, gorčina, pH.

3.2.1. Postupak proizvodnje piva u laboratoriju

Proizvodnje piva započinje ulijevanjem 23 L destilirane vode u Speidel Braumeister uređaj (Slika 3.). U svrhu postizanja pH vrijednosti specifične za proizvodnju piva Indian Pale Ale, vodi za ukomljavanje su dodane navedene količine sol: 1,5 g CaSO_4 , 6 g CaCl_2 , 10 g MgSO_4 , 2,8 g NaHCO_3 , te 2,8 g CaCO_3 . Voda je potom kuhana do postizanja temperature od 68 °C u uređaju Braumeister oko 60 minuta.



Slika 4 Speidel Braumeister uređaj za kuhanje piva (Vlastita arhiva)



Slika 6 Hmelj Hallertau Mittelfrüh (Vlastita arhiva)

Nakon hmeljenja, u posudu sa sladovinom je stavljeno spiralno hladilo, koje se spaja na dovod vodovodne vode pri čemu voda struji kroz izmjenjivač kao rashladni medij, kako bi se provelo hlađenje do temperature inokulacije (20-25 °C). Kada je sladovina ohlađena, pretočena je u fermentacijsku posudu, te je uzet uzorak kako bi se odredila ukupna količina fermentabilnih šećera u sladovini na uređaju EasyDens (Anton Paar, Austrija). Ovaj podatak govori kolika je očekivana količina alkohola u pivu nakon fermentacije. Kada je sladovina prelivena u fermentacijsku posudu, inokulirana je se s 11,5 g kvasca Safale US-05 (**Slika 7.**), te započinje fermentacija. Fermentacija je provodena na 21 °C u rashladnoj komori kroz 7 dana. Nakon završetka fermentacije, ponovno je uzet uzorak za određivanje ukupne količine fermentabilnih šećera na uređaju EasyDens, te se je započelo suho hmeljenje. U fermentor je ubačena vrećica za hmelj, sa 100 g cryo hmelja Amarilla te je fermentor zatvoren. Vrećica je prije toga iskuhavana na 100°C. Suho hmeljenje trajalo je tri dana na temperaturi fermentacije.



Slika 7 Kvasac Safale US-05 (Vlastita arhiva)

Nakon suhog hmeljenja, pivo je stavljeno na hlađenje tijekom 3 dana na 2-4 °C, kako bi se istaložili proteini, hmelj i kvasac. Zatim, nakon što se pivo ohladilo, prebačeno je u keg (**Slika 8.**) u kojem je gazirano uz pomoć CO₂ pod tlakom od 2,5 bara. Odmah po prebacivanju u keg određena je količina šećera pomoću Easy Dens uređaja.



Slika 8 Keg (Vlastita arhiva)

Kontrolno pivo proizvedeno je na isti način, s istim sastojcima, ali bez dodavanja hmelja za suho hmeljenje.

Da bi se odradila fizikalno-kemijska analiza pivo je prije svake analize pretočeno u staklene boce, pomoću nastavka na točioniku kako bi se smanjio utjecaj kisika te gubitak CO₂.

3.2.2 Fizikalno-kemijske analize piva

Fizikalno-kemijske karakteristike proizvedenog piva obrađene su u laboratoriju Osječke pivovare. Određivane su vrijednosti za gorčinu, pH vrijednost, udio alkohola i boja. Prije određivanja navedenih vrijednosti, provedena je filtracija pomoću filter papira i dijatomejske zemlje kako je prikazano na **Slici 9**.



Slika 9 Filtracija piva uz filter papir i dijatomejskom zemljom (Vlastita arhiva)

3.2.2.1. Određivanje udjela alkohola, ekstrakta i ekstrakta u osnovnoj sladovini

Ekstrakt u sladovini je pokazatelj jačine piva, odnosno s kolikim postotkom ekstrakta je započela fermentacija. Nakon što je provedena filtracija, profiltrirani uzorci su zatim stavljeni

u uređaj za analizu piva DMA 4500 M (**Slika 10**). Uzorci se stavljaju jedan po jedan, u prostor za bocu na analizatoru koji potom preko igle za uzorkovanje uzima uzorak i mjeri zadane parametre. U **Tablicama 3 i 4**, mogu se vidjeti vrijednosti analiziranog piva.



Slika 10 Uređaj za analizu piva DMA 4500 M proizvođača Anton Paar (Vlastita arhiva)

3.2.2.2. Određivanje pH

Pomoću pH-metra FiveEasy (**Slika 11**) mjeri se pH vrijednost na način da se u uzorak, koji se prethodno ulije u čašice, uroni elektroda, te se na uređaju pritisne tipka „Read“. Nakon nekoliko minuta, na zaslonu uređaja se prikaže pH vrijednost analiziranog piva. Nakon korištenja, elektroda se ispiru destiliranom vodom.



Slika 11 Easy Dens uređaj proizvođača Anton Paar (Vlastita arhiva)

3.2.2.3. Određivanje gorčine

Gorčina piva je pokazatelj kvalitete piva, te uvelike utječe na okus konačnog piva. Određuje se na spektrofotometru mjerenjem udjela α -gorkih kiselina i β -gorkih kiselina, te najvažnijih gorkih sastojaka sladovine i piva izo- α kiselina. Gorčina nam je pokazatelj kvalitete dodanog hmelja (Gagula 2017).

Uzorak je najprije centrifugiran 15 minuta na 3000 okretaja/minuti, nakon čega je 10 mL uzorka otpipetirano u kivete. Dodano je 0,5 mL 6M HCL-a (klorovodične kiseline), 20 mL izooktana te 3 staklene kuglice u uzorak. Kivete su zatim stavljene 15 minuta u tresilicu (Slika 12) kako bi gorke tvari prešle u gornji izooktanski sloj. Zatim se, nakon trešnje, provelo centrifugiranje (Slika 13) na 3000 okretaja/minuti u trajanju od 3 minute. Na Slici 14 prikazano je formiranje 2 sloja u uzorku. Gornji izooktanski sloj je otpipetiran u kvarcnu kivetu, koja je zatim postavljena u spektrofotometar zajedno s kvarcnom kivetom u kojoj je samo izooktan za slijepu probu. Spektrofotometar je postavljen na 275 nm, nakon čega je pokrenuta analiza pritiskom tipke „START“.



Slika 12 Tresilica proizvođača Turbula (Vlastita arhiva)



Slika 13 Centrifuga PLC-322 proizvođača Tehnica Zelezniki (Vlastita arhiva)



Slika 14 Pripremljeni uzorak za određivanje gorčine podijeljen u 2 sloja (Vlastita arhiva)

3.2.3. Senzorska analiza

Senzorska analiza proizvedenog piva provedena je među studentima Prehrambeno-tehnološkog fakulteta Osijek. Ocjenjivanje senzorske karakteristike provedeno je između 20 ispitanika, a one su miris, okus, reskost (sadržaj CO₂), punoća okusa, gorčina, trpkost i kvaliteta pjene. **Slika 15** prikazuje ocjenjivački listić koji je bio ponuđen panelistima pri ocjenjivanju senzorskih karakteristika. Ocjenjivačima je ponuđeno pivo u prozirnim staklenim čašama, veličina uzorka je bila 100 mL. Pivo je bilo ohlađeno na 10 °C. Kao neutralizatori okusa posluženi su kruh, sir i voda.

Potpis ocjenjivača:				
Stil piva:				
Uzorak:				
Karakteristika:	Opis	Bodovi	Negativni bodovi	Ukupno
Prekomjerno pjenjenje (gushing)		Diskvalifikacija		
Prekiselo		Diskvalifikacija		
Miris	Svojtven	5		
	Manje svojstven	4		
	Blage greške mirisa	3		
	Zamjetne greške mirisa (užeglost, zagorenost, staro pivo, sumporni spojevi)	2	-1	
	Jake greške mirisa (otapala, autoliza kvasca, diacetil, dimetilsulfid)	1	-2	
Okus	Svojtven	5		
	Manje svojstven	4		
	Blage greške okusa	3		
	Zamjetne greške okusa (po kvascu, slatko, na žitarice)	2	-1	
	Jake greške okusa (metalni okus, kiselkasto)	1	-2	
Reskost (sadržaj CO ₂):	Ugodno resko	5		
	Resko	4		
	Manje resko	3		
	Bljutavo	2		
	Vrlo bljutavo	1		
Punoća okusa:	Svojtvena, vrlo punog okusa	4		
	Manje svojstvena, punog okusa	3		
	Vodenasto	2		
	Nesvojtvena, praznog okusa	1		
Gorčina	Vrlo ugodna	5		
	Ugodna	4		
	Malo zaostaje u ustima	3		
	Zastaje u ustima	2		
	Jako zaostaje u ustima	1		
Trpkost	Malo zaostaje u ustima	3		
	Zastaje u ustima	2		
	Jako zaostaje u ustima	1		
Kvaliteta pjene:	Postojana	3		
	Slabije postojana	2		
	Ne postojana	1		
Ukupno bodova:				

Slika 15 Ocjenjivački listić za senzorsku analizu piva (Vlastita arhiva)

4. REZULTATI I RASPRAVA

Tradicionalno se za hmeljenje piva koriste razne vrste hmelja. Dodatak hmelja osigurava određenu razine gorčine, ali i pridonosi aromatskom profilu piva (Moritz i Morris, 1891; Schöberger i Kostelecky, 2011; Kunze, 2019). Suho hmeljenje ima za cilj omogućiti još prodorniju aromu piva odnosno izvući iz hmelja samo aromatične tvari (Lafontaine i Shellhammer, 2019). Iako standardna piva kao što su lageri i pilsneri ne zahtijevaju ovakav tip postupka tijekom proizvodnje, Ale piva, pogotovo ona čiji je stil definiran težim i zahmeljenim notama, zahtijevaju i ovaj korak u proizvodnji. Sa povećanjem potražnje craft piva, odnosno sa povećanjem proizvodnje Ale piva, sve se više piva podgvrjava suhom hmeljenju pri čemu ga primjenjuju i tradicionalno veliki proizvođači piva kao što su Budweiser i Guinness (Dykstra, 2020). Ipak, najviše se suho hmeljenje primjenjuje u craft pivovarama i tijekom kućne proizvodnje piva.

Ovo istraživanje bilo je usredotočeno na primjenu suhog hmeljenja u laboratorijskim uvjetima, koji zapravo predstavljaju imitaciju onoga što se zove kućno pivarstvo (eng. *homebrewing*). Iako su znanstvena istraživanja koja su se bavila fenomenom suhog hmeljenja, odnosno pojavama koje se događaju nakon suhog hmeljenja u pivu, zabilježila širok dijapazon promjena, ovo istraživanje se bavilo samo utjecajem suhog hmeljenja na količinu etanola nakon završetka istog.

U ohmeljenim sladovinama koje su se proizvele na Prehrambeno-tehnološkom fakultetu Osijek izmjerene su početne količine ekstrakta prije inokulacije, nakon fermentacije u trajanju od 7 dana, te u uzorku piva koji je bio podvrgnut suhom hmeljenju i to odmah nakon vađenja vrećice sa hmeljem i nakon tjedan dana. Rezultati početnih parametara sladovine su prikazani u **Tablici 2**.

Iz **Tablice 2** se vidi da su osnovni početni parametri kakvoće u oba piva gotovo jednaki. Važan parametar je udio ekstrakta pri čemu se vidi da je on zadovoljavajući, i očekuje se gotovo jednaka količina etanola u oba piva nakon fermentacije.

Tablica 2 Rezultati mjerenja osnovnih fizikalno-kemijskih pokazatelja proizvedenih sladovina prije inokulacije

Indikator kvalitete	Jedinica	Suho hmeljenje	Kontrola
Ekstrakt u osnovnoj sladovini	°P	10,9	11,0

Alkohol	%	0,0	0,0
pH vrijednost	/	4,3	4,4
Gorčina	IBU	38	38

Tablica 3 prikazuje rezultate mjerenja istih pokazatelja kvalitete na oba piva nakon fermentacije. Iz rezultata se vidi da nije bilo posebno velikih promjena, pogotovo kod gorčine. U uzorku koji je bio predviđen za suho hmeljenje nastala je nešto manja količina etanola, ali to je u skladu i sa očitanim nešto većim ekstraktom u odnosu na kontrolu. pH vrijednosti se nisu značajno mijenjale, ali ipak je došlo do male promjene pH u oba uzorka, vjerojatno zbog nastanka etanola i CO₂ koji i inače snižavaju pH gaziranih alkoholnih pića kao što je pivo.

Tablica 3 Rezultati mjerenja osnovnih fizikalno-kemijskih pokazatelja proizvedenih piva nakon fermentacije

Indikator kvalitete	Jedinica	Suho hmeljenje	Kontrola
Ekstrakt	°P	2,1	2,0
Alkohol	%	5,0	5,1
pH vrijednost	/	4,2	4,3
Gorčina	IBU	38	38

Tablica 4 Rezultati mjerenja osnovnih fizikalno-kemijskih pokazatelja proizvedenih piva nakon suhog hmeljenja

Indikator kvalitete	Jedinica	Suho hmeljenje	Kontrola
Ekstrakt	°P	2,2	2,0
Alkohol	%	5,2	5,1
pH vrijednost	/	4,2	4,3
Gorčina	IBU	53	38

Iz **Tablice 4** se može zaključiti da je količina nastalog etanola gotovo jednaka u oba uzorka, naime nešto je veća u uzorku piva podvrgnutom suhom hmeljenju, što je u skladu sa rezultatima koje su objavili Stokholm i Shellhammer (2020). Naime, u tom istraživanju je zabilježena količina etanola u kontrolnom pivu iznosila 6,42% v/v, dok je u pivu koje je bilo podvrgnuto suhom hmeljenju (u ovom slučaju tijekom 9 dana) količina etanola iznosila 6,92% v/v. Količina ekstrakta u pivu koje je bilo podvrgnuto suhom hmeljenju se povećala, što je u skladu sa promjenom količine etanola, odnosno rastom količine etanola u istom uzorku. U kontrolnom pivu nema promjena. Velika razlika utvrđena je kod parametra gorčine, pri čemu je gorčina piva koje je podvrgnuto suhom hmeljenju dosegla 53 IBU, a u kontrolnom pivu nije zabilježena promjena gorčine. To je razumljivo jer se kontrolno pivo nije podvrgavalo postupku suhog hmeljenja tako da se nije ni očekivala promjena gorčine. pH vrijednosti se nisu mijenjale.

Tablica 5 Rezultati mjerenja osnovnih fizikalno-kemijskih pokazatelja proizvedenih piva tjedan dana nakon suhog hmeljenja

Indikator kvalitete	Jedinica	Suho hmeljenje	Kontrola
Ekstrakt	°P	2,5	2,0
Alkohol	%	5,4	5,1
pH vrijednost	/	4,1	4,3
Gorčina	IBU	53	38

Rezultati prikazani u **Tablici 5** daju uvid u intenzivne promjene koje se događaju nakon prestanka suhog hmeljenja. Dakle, tjedan dana nakon prestanka suhog hmeljenja i skladištenja piva na temperaturi 4 °C, u uzorku koji je suho hmeljen dolazi do značajnih promjena koje se najviše odražavaju na količini ekstrakta i etanola. Količina ekstrakta se povećala sa 2,2 na 2,5 °P, dok je sukladno tome i količina etanola porasla za oko 4 %. Gorčina i pH se nisu mijenjale.

Što se tiče promjena u senzoricu piva, obrađene su analize čiji rezultati odražavaju promjene vezane uz „*hop creep*“. Naime, prema literaturi, nakon suhog hmeljenja može doći do pojave diacetila u pivu (Bruner, Marcus i Fox, 2021). Iako su u nekim pivima veće količine diacetila poželjne, ova komponenta je većinom nepoželjna jer ostavlja neugodan okus, podsjećajući na maslac. Senzorska analiza provela se na oba uzorka proizvedenih piva i to nakon fermentacije

(NF), nakon suhog hmeljenja (NSH) i nakon tjedan dana od suhog hmeljenja(7NSH). Prosječni rezultati su prikazani u **Tablicama 6 i 7**.

Tablica 6 Senzorska ocjena piva koje je podvrgnuto suhom hmeljenju

KARAKTERISTIKA	OPIS I BODOVANJE		OCJENA		
			NF	NSH	7NSH
Miris	Svojtven	5	4	5	5
	Manje svojtven	4			
	Blage greške mirisa	3			
	Zamjetne greške mirisa (užeglost, zagorenost, staro pivo, sumporni spojevi)	2			
	Jake greške mirisa (otapala, autoliza kvasca, diacetil, dimetilsulfid)	1			
Okus	Svojtven	5	5	5	5
	Manje svojtven	4			
	Blage greške okusa	3			
	Zamjetne greške okusa (po kvascu, slatko, na žitarice)	2			
	Jake greške okusa (metalni okus, kiselkasto)	1			
Reskost (sadržaj CO ₂)	Ugodno resko	5	5	5	5
	Resko	4			
	Manje resko	3			
	Bljutavo	2			
	Vrlo bljutavo	1			
Punoća okusa	Svojtvena, vrlo punog okusa	4	4	4	5

	Manje svojstvena, punog okusa	3			
	Vodenasto	2			
	Nesvojstvena, praznog okusa	1			
Gorčina	Vrlo ugodna	5	4	5	5
	Ugodna	4			
	Malo zaostaje u ustima	3			
	Zaostaje u ustima	2			
	Jako zaostaje u ustima	1			
Trpkost	Malo zaostaje u ustima	3	3	5	4
	Zaostaje u ustima	2			
	Jako zaostaje u ustima	1			
Kvaliteta pjene	Postojana	3	3	3	3
	Slabije postojana	2			
	Nepostojana	1			
UKUPNO			28	32	32

Iz **Tablice 6** je vidljivo da je uzorak piva koji je suho hmeljen dobio visoke ocjene od ocjenjivača. Ukupne ocjena nakon suhog hmeljenja i tjedan dana nakon suhog hmeljenja više su od one nakon same fermentacije. To pokazuje da se suho hmeljenje dobro prihvaća od strane ocjenjivača, odnosno da potrošače privlači aromatski profil koji se ostvaruje suhim hmeljenjem.

U **Tablici 7** prikazani su rezultati ocjenjivanja kontrolnog piva gdje se vidi da su ocjene ipak nešto niže. Naime, kontrolno pivo nije podvrgnuto suhom hmeljenju, ali se ocjenjivalo u isto vrijeme kao i uzorak koji je suho hmeljen, dakle nakon tri dana od završetka fermentacije (nakon suhog hmeljenja uzorka koji se suho hmeljio), te nakon 7 dana od završetka suhog hmeljenja uzorka koji se suho hmeljio. Rezultati pokazuju da su ocjene piva nakon fermentacije bile jednake što nije neobično jer je riječ o istom pivu. Međutim nakon suhog hmeljenja uzorak

koji je suho hmeljen dobiva veće ocjene i veću ukupnu ocjenu. Slično je i sa uzorcima testiranim 7 dana nakon hmeljenja.

Tablica 7 Senzorska ocjena kontrolnog piva

KARAKTERISTIKA	OPIS I BODOVANJE		OCJENA		
			NF	Kont	7Kont
Miris	Svojstven	5	4	4	4
	Manje svojstven	4			
	Blage greške mirisa	3			
	Zamjetne greške mirisa (užeglost, zagorenost, staro pivo, sumporni spojevi)	2			
	Jake greške mirisa (otapala, autoliza kvasca, diacetil, dimetilsulfid)	1			
Okus	Svojstven	5	5	4	4
	Manje svojstven	4			
	Blage greške okusa	3			
	Zamjetne greške okusa (po kvascu, slatko, na žitarice)	2			
	Jake greške okusa (metalni okus, kiselkasto)	1			
Reskost (sadržaj CO ₂)	Ugodno resko	5	5	5	4
	Resko	4			
	Manje resko	3			
	Bljutavo	2			
	Vrlo bljutavo	1			

Punoća okusa	Svojtvena, vrlo punog okusa	4	4	4	4
	Manje svojtvena, punog okusa	3			
	Vodenasto	2			
	Nesvojtvena, praznog okusa	1			
Gorčina	Vrlo ugodna	5	4	5	5
	Ugodna	4			
	Malo zaostaje u ustima	3			
	Zaostaje u ustima	2			
	Jako zaostaje u ustima	1			
Trpkost	Malo zaostaje u ustima	3	3	5	5
	Zaostaje u ustima	2			
	Jako zaostaje u ustima	1			
Kvaliteta pjene	Postojana	3	3	3	3
	Slabije postojana	2			
	Nepostojana	1			
UKUPNO			28	30	29

Obzirom da se senzorika ponajviše provela zbog mogućnosti pojave diacetila nakon suhog hmeljenja, u ovom istraživanju nije zabilježena pojava diacetila u uzorku koji je suho hmeljen. To je vjerojatno tako zbog kratkog vremena skladištenja piva nakon suhog hmeljenja.

5. ZAKLJUČCI

Na temelju rezultata ovog istraživanja mogu se iznijeti sljedeći zaključci:

Primjena suhog hmeljenja uzrokuje povećanje količine etanola u pivu tijekom vremena skladištenja

Primjenom suhog hmeljenja, djelovanjem enzima iz hmelja, povećava se količina ekstrakta u pivu tijekom vremena

Suho hmeljenje uzrokuje fenomen nazvan „*hop creep*“

Suho hmeljenje nije negativno utjecalo na rezultate senzorskog ocjenjivanja, upravo suprotno, povećalo je prihvatljivo među ocjenjivačima

6. LITERATURA

-
- Algazzali, V., Shellhammer, T. (2016) 'Bitterness intensity of oxidized hop acids: Humulinones and hulupones', *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 74(1), str. 36-43.
- Algazzali, V., Shellhammer, T. (2018) 'Dry hopping and hop creep: The effect of hop-derived enzymes on beer fermentation', *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 76(3), str. 229-238.
- Almaguer, C., Schönberger, C., Gastl, M., Arendt, E.K., Becker, T. (2014) 'Humulus lupulus — A story that begs to be told', *Journal of the Institute of Brewing*, 120(4), str. 289–314.
- Baker, G.A., Danenhowe, T.M., Force, L.J., Petersen, K.J., Betts, T.A. (2008) 'HPLC Analysis of α - and β -Acids in Hops', *Journal of Chemical Education*, 85(7), str. 954.
- Bruner, J., Marcus, A., Fox, G. (2021) 'Dry-hop creep potential of various *Saccharomyces* yeast species and strains', *Fermentation*, 7(2), str. 66.
- Cibaka, M.-L.K., Decourrière, L., Lorenzo-Alonso, C.-J., Bodart, E., Robiette, R., Collin, S. (2016) '3-Sulfanyl-4-methylpentan-1-ol in dry-hopped beers: First evidence of glutathione S-conjugates in hop (*Humulus lupulus* L.)', *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(45), str. 8572–8582.
- Cottrell, T.M. (2022) 'A search for diastatic enzymes endogenous to *Humulus lupulus* and produced by microbes associated with pellet hops driving “Hop Creep” of dry hopped beer', *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 81(3), str. 1–13.
- Dykstra, J. (2020) *The Beer Connoisseur*. Atlanta, GA, USA: Café Media, str. 18–29
- Forster, A., Gahr, A. (2013) 'On the fate of certain hop substances during dry hopping', *Brewing Science*, 66(7), str. 93–103.
- Fritsch, C., Shellhammer, T. (2018) 'Influence of dry hopping on beer bitterness and hop creep', *Journal of Brewing Science*, 72(3), str. 52-61
- Gribkova, I.N., Kharlamova, L.N., Lazareva, I.V., Zakharov, M.A., Zakharova, V.A., Kozlov, V.I. (2022) 'The influence of hop phenolic compounds on dry hopping beer quality', *Molecules*, 27(3), str. 740.
-

-
- Hahn, C.D., Lafontaine, S.R., Pereira, C.B., Shellhammer, T.H. (2018) 'Evaluation of nonvolatile chemistry affecting sensory bitterness intensity of highly hopped beers', *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(3), str. 3505–3513.
- Hanke, S., Wunderlich, S., Becker, T. (2019) 'Characterization of enzymatic activities in hops: Their role in hop creep', *Journal of Brewing Science*, 71(1), str. 14-22.
- Haslbeck, K., Bub, S., von Kamp, K., Michel, M., Zarnkow, M., Hutzler, M., Coelhan, M. (2018) 'The influence of brewing yeast strains on monoterpene alcohols and esters contributing to the citrus flavour of beer', *Journal of the Institute of Brewing*, 124, str. 403–415.
- Hauser, D.G., Lafontaine, S.R., Shellhammer, T.H. (2019) 'Extraction efficiency of dry hopping', *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 77(3), str. 188–198.
- Kirkpatrick, K.R., Shellhammer, T.H. (2018) 'Evidence of dextrin hydrolyzing enzymes in Cascade hops (*Humulus lupulus*)', *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(34), str. 9121–9126.
- Klimczak, K., Cioch-Skoneczny, M., Duda-Chodak, A. (2023) 'Effects of dry-hopping on beer chemistry and sensory properties', *Molecules*, 28(18), str. 6648.
- Kirkendall, A.J., Mitchell, A.C. Chadwick, R.L. (2018) 'The freshening power of Centennial hops', *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 76(2), str. 1-7.
- Kunze, W. (2019) *Technology Brewing & Malting*. 6th rev. ed., Hendel, O. (ed.) Berlin: Versuchs- und Lehranstalt für Brauerei in Berlin (VLB).
- Lafontaine, S.R., Shellhammer, T.H. (2018) 'Impact of static dry-hopping rate on the sensory and analytical profiles of beer', *Journal of the Institute of Brewing*, 124(4), str. 434-442.
- Lafontaine, S.R., Shellhammer, T.H. (2019) 'Investigating the Factors Impacting Aroma, Flavor, and Stability in Dry-Hopped Beers', *MBAA Technical Quarterly*, 56(1), str. 13-23.
- Lafontaine, S.R., Varnum, S., Roland, A., Delpech, S., Dagan, L., Vollmer, D., Kishimoto, T., Shellhammer, T. (2019) 'Impact of harvest maturity on the aroma characteristics and chemistry of Cascade hops used for dry-hopping', *Food Chemistry*, 278(1), str. 228-239.
-

-
- Maye, J.P., Smith, R., Brown, H. (2016) 'The impact of hop variety and dry hopping regime on hop creep and its effects on final beer', *Master Brewers Association Technical Quarterly*, 53(4), str. 27-35.
- Maye, J.P., Smith, R., Leker, J. (2018) 'Dry hopping and its effect on beer bitterness, the IBU test, and pH', *Brauwelt International*, str. 25–29.
- Moritz, E.R. & Morris, G.H. (1891) *A Text-Book of the Science of Brewing*. London: Spon
- Nance, M.R., Setzer, N.W. (2011) 'Volatile components of aroma hops (*Humulus lupulus* L.) commonly used in beer brewing', *Journal of Brewing and Distillation*, 2(2), str. 16–22.
- Rubottom, N.L., Lafontaine, R.S., Hauser, G.D., Pereira, C., Shellhammer, H.T. (2022) 'Hop kilning temperature sensitivity of dextrin-reducing enzymes in hops', *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 80(1), str. 1–13.
- Schnaitter, M., Kell, A., Kollmannsberger, H., Schüll, F., Gastl, M., Becker, T. (2016) 'Scale up of dry hopping trials: Importance of scale for aroma and taste perceptions', *Chemie Ingenieur Technik*, 82(12), str. 1955–1965.
- Shellhammer, T. (2020) 'Enzymes in hops and their effects on fermentation performance', *Journal of Brewing Chemistry*, 78(2), str. 56-65.
- Schönberger, C., Kostelecky, T. (2011) '125th Anniversary Review: The role of hops in brewing', *Journal of the Institute of Brewing*, 117(3), str. 259–267.
- Sharpe, F.R., Laws, D.R.J. (1981) 'The essential oil of hops', *Journal of the Institute of Brewing*, 87(2), str. 96–107.
- Stokholm, A., Shellhammer, T.H. (2020) 'Hop Creep-technical brief'. Dostupno na: <https://www.brewersassociation.org/educational-publications/hop-creep-technical-brief/> (Pristupljeno: 30. ožujak 2024.).
- Sun, S., Wang, X., Yuan, A., Liu, J., Li, Z., Xie, D., Zhang, H., Luo, W., Xu, H., Liu, J. (2022), 'Chemical constituents and bioactivities of hops (*Humulus lupulus* L.) and their effects on beer-related microorganisms', *Food Energy Security*, 11(11), str. 367-372.
- Takoi, K., Tokita, K., Sanekata, A., Usami, Y., Itoga, Y., Koie, K., Matsumoto, I., Nakayama, Y. (2016) 'Varietal difference of hop-derived flavour compounds in late-hopped/dry hopped beers', *Brewing Science*, 69(1), str. 1–7.
-

Werrie, P.-Y., Deckers, S., Fauconnier, M.-L. (2022) 'Brief insight into the underestimated role of hop amylases on beer aroma profiles', *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 80(1), str. 1–9.

