

UNIVERZITET SINGIDUNUM BEOGRAD
DEPARTMAN ZA POSLEDIPLOMSKE STUDIJE

**VIŠEKRITERIJUMSKO VREDNOVANJE FLEKSIBILNIH
AMBALAŽNIH MATERIJALA I UTICAJ PROCESA ŠTAMPANJA I
PAKOVANJA NA NJIHOVE KARAKTERISTIKE**

DOKTORSKA DISERTACIJA

MENTOR:

prof. dr Dragan Cvetković

KANDIDAT:

mr Petra Balaban

Beograd, 2021.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Veliko hvala mojoj ćerki Sofiji za razumevanje i strpljenje u dugom procesu nastajanja ove doktorske disertacije.

Zahvaljujem se mentoru, prof. dr Cvetković Draganu na ukazanim sugestijama i pomoć pri izradi disertacije, kao i članovima komisije prof. dr Živković Dejanu i prof. dr Popović Predragu.

Za mogućnost realizacije eksperimentalnog dela rada zahvaljujem se Ružič Stojanu - vlasniku firme Euroflex iz Sremskih Karlovaca i firmama - Spektar u Gornjem Milanovcu, posebno dipl. ing. Erović Marku kao i firmi Comex i dipl. ing. Đukanović Ivani.

Hvala roditeljima Vojinu i Karoli na podršci.

Hvala ostalim članovima porodice, prijateljima i svima drugima koji su na bilo koji način doprineli nastanku ove doktorske disertacije.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Sažetak: Disertacija obuhvata deo relativno neistražene teme uticaja procesa štampanja i pakovanja na karakteristike štampanih fleksibilnih ambalažnih materijala, kao i određivanja njihovih vrednosti primenom odgovarajućih višekriterijumskih metoda vrednovanja. Na primeru ispitivanja i analize eksperimentalnih uzoraka fleksibilnih ambalažnih materijala, vrednovane su i poređene njihove veličine promena. Kod istraživanja i vrednovanja postavljena su ograničenja koja se pre svega odnose na odabrane vrste ambalažnih materijala i vrstu pakovanog sadržaja. Rezultat ovakvog vrednovanja su transparentne sume vrednosti pojedinih varijanti štampanih fleksibilnih ambalažnih materijala, gde se za svaki materijal može izračunati kvalitet ispunjenja zahteva za pojedine prehrambene proizvode.

Ključne reči: Višekriterijumsko vrednovanje, fleksibilni ambalažni materijali, štampa, pakovanje

MULTICRITERIA EVALUATION OF FLEXIBLE PACKAGING MATERIALS AND THE INFLUENCE OF PRINTING AND PACKAGING PROCESS ON THEIR CHARACTERISTICS

Abstract: The dissertation covers a part of relatively unexplored subject of the influence of printing and packaging process on the characteristics of printed flexible packaging materials, as well as the determination of their values by applying appropriate multicriteria evaluation methods. Based on the experimental analysis of flexible packaging materials, their magnitudes of changes have been evaluated and compared. In the research and evaluation limitations have been set that primarily relate to the selected types of packaging materials and the type of packaged contents. The result of this evaluation is a transparent sum of the values of individual variants of printed flexible packaging materials, where for each material the fulfilment of the requirements for individual food products can be calculated.

Key words: multicriteria evaluation, flexible packaging materials, printing, packing

SADRŽAJ

SPISAK SLIKA	7
SPISAK TABELA	10
SPISAK SKRAĆENICA.....	12
1. UVOD.....	13
1.1 Predmet istraživanja	13
1.2 Cilj istraživanja	14
1.3 Primenjene metode istraživanja	16
1.4 Struktura doktorske disertacije.....	16
2. FLEKSIBILNI AMBALAŽNI MATERIJALI.....	18
2.1 Vrste i osobine fleksibilnih ambalažnih materijala za pakovanje hrane	18
2.2 Postupci proizvodnje fleksibilnih ambalažnih materijala.....	24
3. PROCES ŠTAMPANJA I PAKOVANJA FLEKSIBILNIH AMBALAŽNIH MATERIJALA	28
3.1 Opšte o procesu flekso štampe.....	28
3.2 Faze u procesu štampanja ispitivanih ambalažnih materijala	31
3.2.1 Vođenje štamparskog materijala kroz mašinu	31
3.2.2 Nanošenje boje na štamparski materijal	34
3.2.3 Sušenje štamparskih materijala	35
3.3 Proces pakovanja.....	35
4. ANALIZA ZAHTEVA ZA FLEKSIBILNE AMBALAŽNE MATERIJALE	38
5. FORMULISANJE KRITERIJUMA ZA OCENU VREDNOSTI FLEKSIBILNIH AMBALAŽNIH MATERIJALA.....	46
5.1 Mehaničke osobine ambalažnih folija	46
5.1.1 Zatezna čvrstoća i izduženje	46
5.1.2 Klizavost	48
5.2 Barijerne osobine fleksibilnih ambalažnih materijala	50

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

5.3 Kvalitet otiska	54
5.3.1 Značaj površinskog napona	54
6. ISPITIVANJE KRITERIJUMA ZA ODABRANE VARIJANTE ŠTAMPANE FLEKSIBILNE AMBALAŽE	57
6.1 Ispitivani ambalažni materijali i uslovi ispitivanja	57
6.2 Ispitivanje zatezne jačine i izduženja pri kidanju.....	61
6.3 Ispitivanje klizavosti.....	66
6.4 Ispitivanje propustljivosti ambalažnih folija.....	70
6.5 Ispitivanje kvaliteta otiska	75
6.5.1 Ispitivanje površinskog napona odabranih fleksibilnih ambalažnih folija	75
6.5.2 Mikroskopsko ispitivanje.....	85
7. IZBOR ODGOVARAJUĆE METODE ZA VREDNOVANJE.....	89
7.1 Primena metoda vrednovanja za ambalažu.....	89
7.2 Izbor metode vrednovanja	92
7.2.1 Određivanje faktora značaja kriterijuma.....	100
7.2.1.1 Određivanje faktora značaja metodom poređenja parova.....	100
7.2.1.2 Analitičko-hijerarhijski proces (AHP).....	100
8. VREDNOVANJE ODABRANIH ŠTAMPANIH FLEKSIBILNIH AMBALAŽNIH MATERIJALA	103
8.1 Opšti postupak vrednovanja.....	103
8.1.1 Određivanje podataka u vezi ambalaže.....	104
8.1.2 Prikaz zahteva i kriterijuma.....	105
8.1.3 Određivanje faktora značaja kriterijuma.....	105
8.1.4 Vrednovanje odabranih štampanih fleksibilnih ambalažnih materijala.....	107
9. DISKUSIJA REZULTATA I ZAKLJUČAK.....	115

SPISAK SLIKA

Slika br.	Naziv	Strana
1	Svetsko tržište ambalaže	20
2	Funkcije fleksibilne ambalaže	20
3	Različiti slojevi višeslojne ambalaže	25
4	Prikaz kaširanog spoja PET i PE	26
5	Postupak suvog kaširanja lepilom sa rastvaračem	27
6	Radni organi i tok promene materijala	29
7	Radni postupci kod flekso štampe sa bojama na bazi rastvarača	31
8	Mogućnosti štampe višeslojnih filmova	32
9	Zatezne sile na valjku za vođenje	33
10	Tok zateznih sila F i istezanja trake ϵ na valjcima za vođenje unutar jednog sistema za vođenje traka	34
11	Zatezne sile u traci folije kod vučnog valjka	34
12	Šema uređaja za bojenje sa rakelom	35
13	Vertikalna mašina za oblikovanje i pakovanje	37
14	Horizontalna mašina za pakovanje	37
15	Različite vrste kesica dobijene zavarivanjem ravnih ambalažnih materijala	38
16	Životni ciklus štampane fleksibilne ambalaže za životne namirnice	40
17	Zahtevi za fleksibilnu ambalažu	41
18	Kriterijumi za ocenu vrednosti fleksibilnih ambalažnih materijala	47
19	Prve tri faze deformacije tokom ispitivanja čvrstoće polimernih folija	48
20	Određivanje modula sekante	49
21	Kretanje foije pomoću vučnog remena	50
22	Proces permeacije kroz foliju	52
23	Prolaz gasa i razlika pritiska kroz troslojnu višeslojnu foliju	54
24	Različiti vidovi kvašenja boje na štamparsku površinu	57
25	Kontaktni ugao kapi na površinu	57
26	Ispitivani materijali - a) BOPP, b) PET/PE, c) PETmet/PE	59
27	Prikaz mikroskopske strukture materijala PET/PE	60
28	Prikaz mikroskopske strukture materijala PETmet/PE	60
29	Flekso štampaska mašina	62
30	Mašina za formiranje kesica	63
31	Zatezna čvrstoća BOPP folije pre procesa i	63

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

	nakon formiranja ambalaže	
32	Izduženje BOPP folije pre procesa i nakon formiranja ambalaže	64
33	Zatezna jačina PET/PE folije nakon procesa štampanja i formiranja ambalaže	65
34	Izduženje PET/PE folije nakon procesa štampanja i formiranja ambalaže	65
35	Zatezna jačina PETmet/PE folije nakon procesa štampanja i formiranja ambalaže	66
36	Izduženje PETmet/PE folije nakon procesa štampanja i formiranja ambalaže	66
37	Koeficijent trenja BOPP folije (pre štampe, nakon štampe i procesa formiranja ambalaže)	68
38	Koeficijent trenja PET folije (pre) i nakon štampe i procesa formiranja ambalaže (PET/PE)	68
39	Koeficijent trenja PETmet folije (pre) i nakon štampe i procesa formiranja ambalaže (PETmet/PE)	69
40	Propustljivost štampane PET/PE folije i PET/PE kesice	73
41	Propustljivost štampane PETmet/PE folije i PETmet/PE kesice	73
42	Propustljivost na kiseonik PETmet/PE folije u funkciji broja ciklusa savijanja	74
43	Uticaj istežanja na propustljivost kod PETmet folije	75
44	Uticaj istežanja na propustljivost kod PETmet/PE folija	75
45	Uređaj Krüss DSA 25 za merenje kontaktnog ugla sa pripadajućim softverom	76
46	Primer testiranja površinskog napona folije sa različitim tečnostima	77
47	Trougao napona (prema Young-Dupre-u)	78
48	Šema ispitivanja preklopnog flekso otiska	87
49	Mikroskop "Motic"	87
50	Primer preklopnog otiska M/C na OPP foliji sa selektovanim nepokrivenim (belim) površinama i površinama pokrivenim samo jednom bojom (M ili C)	88
51	Primer preklopnog otiska C/Y na OPP foliji sa selektovanim nepokrivenim (belim) površinama i površinama pokrivenim samo jednom bojom (Y ili C)	89
52	Primer preklopnog otiska M/Y na OPP foliji sa selektovanom površinom nepokrivenom bojom	89
53	Model vrednovanja prema Zangemeisteru	99
54	Postupak vrednovanja fleksibilnih ambalažnih materijala	105

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

55	Pretvaranje kvantitativnih kriterijuma u kvalitativne ocene (kriterijum zatezne čvrstoće u uzdužnom pravcu)	109
56	Pretvaranje kvantitativnih kriterijuma u kvalitativne ocene (kriterijum zatezne čvrstoće u poprečnom pravcu)	110
57	Pretvaranje kvantitativnih kriterijuma u kvalitativne ocene (kriterijum izduženja u uzdužnom pravcu)	110
58	Pretvaranje kvantitativnih kriterijuma u kvalitativne ocene (kriterijum izduženja u poprečnom pravcu)	111
59	Pretvaranje kvantitativnih kriterijuma u kvalitativne ocene (kriterijum trenja)	111
60	Pretvaranje kvantitativnih kriterijuma u kvalitativne ocene (kriterijum propustljivosti na kiseonik)	112
61	Pretvaranje kvantitativnih kriterijuma u kvalitativne ocene (kriterijum površinskog napona)	112
62	Grafički prikaz vrednosti kriterijuma	114
63	Ukupna vrednost odabranih fleksibilnih ambalažnih materijala	115

SPISAK TABELA

Tabela br.	Naziv	Strana
1	Najvažnije karakteristike najčešće korišćenih polimera za izradu ambalaže	22
2	Primena najvažnijih polimera u industriji ambalaže za hranu	22
3	Primeri nekih višeslojnih i kombinovanih materijala i njihova primena za pakovanje	24
4	Najvažniji postupci proizvodnje fleksibilnih ambalažnih materijala	25
5	Parametri aniloks valjka u zavisnosti od vrste štampe	35
6	Primer mogućih kombinacija fleksibilnih ambalažnih materijala za pojedine životne namirnice	43
7	Podobnost fleksibilne ambalaže za pakovanje pojedinih namirnica	44
8	Podobnost plastičnih materijala za reciklažu	46
9	Vrednosti površinskog napona nekih folija	56
10	Tehničke specifikacije BOPP	59
11	Tehničke specifikacije PET	59
12	Tehničke specifikacije PETmet	61
13	Tehničke specifikacije PE	61
14	Karakteristike korišćenog lepila bez rastvarača	62
15	Koeficijenti trenja klizanja nekih mono i kombinovanih folija	70
16	Poređenja barijernih karakteristika	71
17	Dosadašnja ispitivanja i rezultati uticaja štampanja na propustljivost za BOPP folije	72
18	Rezultati ispitivanja OTR za PET/PE foliju nakon štampanja	72
19	Rezultati ispitivanja OTR za PET/PE foliju nakon pakovanja	72
20	Rezultati ispitivanja OTR za PETmet/PE foliju nakon štampanja	72
21	Rezultati ispitivanja OTR za PETmet/PE nakon pakovanja	73
22	Površinski naponi tečnosti za ispitivanje	80
23	Izmereni kontakti uglovi pre i nakon	81

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

	štampanja za BOPP foliju	
24	Izračunate veličine a i b za BOPP foliju pre i nakon štampanja	82
25	Izmereni kontakti uglovi pre i nakon štampanja za PET/PE foliju	82
26	Izračunate veličine a i b za PET (pre) i PET/PE foliju nakon štampanja	83
27	Izmereni kontakti uglovi pre i nakon štampanja za PETmet/PE foliju	83
28	Izračunate veličine a i b za PETmet (pre) i PETmet/PE foliju nakon štampanja	84
29	Primer ček-liste sa zahtevima za vrednovanje	93
30	Rangiranje različitih folija s obzirom na različite osobine	94
31	Uobičajene opšte vrednosne skale	96
32	Analogija vrednovanja fleksibilnih ambalažnih materijala sa teorijom analize korisne vrednosti	98
33	Unakrsna tabela za određivanje faktora značaja kriterijuma	102
34	Satijeva skala	102
35	Slučajni indeksi	103
36	Podaci za odabrane fleksibilne ambalažne materijale	105
37	Zahtevi (kriterijumi) za fleksibilne ambalažne materijale	106
38	Određivanje faktora značaja metodom poređenja parova	107
39	Određivanje faktora značaja metodom analitičko-hijerarhijskog procesa	108
40	Poređenje faktora značaja određenih pomoću metode poređenja parova i AHP metode	108
41	Vrednosti kriterijuma	113
42	Vrednosti kriterijuma uzimajući u obzir faktore značaja	113

SPISAK SKRAĆENICA

- ASTM - American Society for Testing and Materials
- DIN - Deutsches Institut für Normung (Nemački institut za normiranje)
- ISO - International Organization for Standardization
- PP - polipropilen
- BOPP - biaksijalno orijentisani polipropilen
- PET - polietilentereftalat
- BOPET - biaksijalno orijentisani polietilentereftalat
- PA - poliamid
- PC - polikarbonat
- BOPA - biaksijalno orijentisani poliamid
- PETmet - metalizovani polietilentereftalat
- PE - polietilen
- LDPE - polietilen niske gustine (Low Density Polyethylene)
- HDPE - polietilen visoke gustine (High Density Polyethylene)
- LLDPE - linearni polietilen niske gustine (Linear Low Density Polyethylene)
- PVC - polivinilhlorid
- PS - polistiren
- PAP - papir
- VOC - volatile organic compounds- isparljiva organska jedinjenja
- MAP - Modified Atmosphere Packaging - pakovanje u modifikovanoj atmosferi
- AHP - analitičko-hijerarhijski proces
- MCDM- Multiple Criteria Decision Making
- NWA- Nutzwertanalyse

1. UVOD

1.1 Predmet istraživanja

Prvobitni zadatak ambalaže je bio držanje i zaštita sadržaja. Sa razvojem industrijske proizvodnje, došli su još i troškovi transporta i skladištenja (logističke funkcije). Samoposluživanje, povećana potrošnja i konkurencija prouzrokovali su, da je površina ambalaže sve više postajala nosilac informacija i reklame. Današnje društvo uslužnih delatnosti očekuje od ambalaže ispunjenje dodatnih zahteva, kao što je, na primer, prilagođenost korisniku, a zahtevi za zaštitu okoline doveli su i do nove ekološke funkcije ambalaže. Prema tome, postala je značajna integrativna funkcija ambalaže, čiji nabrojani kriterijumi, a posebno tehničko-tehnološki, određuju njenu vrednost. Važnu grupu tih materijala čini fleksibilni ambalažni materijali koji se ispituju u ovom radu.

Proizvodnja fleksibilne ambalaže je najbrže rastući segment u industriji ambalaže (Selke, 2016). Na globalnom tržištu fleksibilne ambalaže prehrambena industrija zauzima 70 % udela (Flexible Packaging Market, 2021). Globalno tržište fleksibilne ambalaže procenjuje se na 31,5 miliona tona 2021. godine, sa godišnjim prosečnim rastom od 3,3 % (Smithers, 2021).

Štampana fleksibilna ambalaža se koristi za pakovanje raznih vrsta prehrambenih proizvoda sa najrazličitijim prerađevinama na bazi žitarica, voća, povrća, šećernih, mlečnih, mesnatih i drugih proizvoda. Za izradu štampane fleksibilne ambalaže najčešće se koriste polimerne i kombinovane folije, od kojih su predmet ispitivanja u ovom radu BOPP, PET/PE i PETmet/PE. Zbog njihovih dobrih osobina, kao što su niska cena, mala masa, podnošljivost sa sadržajem (naročito životnim namirnicama), odgovarajućih barijernih, mehaničkih, optičkih osobina, kao i podobnosti za obradu na brzohodnim mašinama, ove folije imaju široku primenu. Posebno su značajne metalizovane folije, koje kombinuju prednosti metala i plastike i time poboljšavaju pre svega barijerne karakteristike ambalažnog materijala.

Fleksibilni ambalažni materijali su tokom proizvodnje, štampanja i konficioniranja/pakovanja, a kasnije tokom rukovanja i distribucije, izloženi različitim uticajima mehaničke, termičke ili elektrostatičke prirode. To može da dovede do promena karakteristika folija. Metalizovane ambalažne folije su naročito osetljive, jer kod njih u toku procesa može doći do eventualnih oštećenja metalizovanog sloja, što može dovesti do gubitka funkcije ambalaže, na primer barijernih osobina (Ge i dr., 2020; Gosh, 2015; Hertlein, 1998; Marangoni Junior L. i dr., 2020).

Glavne karakteristike neštampanih fleksibilnih ambalažnih materijala su manje ili više poznate. Mnoge podatke o tim karakteristikama daje proizvođač tih materijala potencijalnim kupcima. Međutim, u praksi se zanemaruje pitanje da li i u kojoj meri dolazi do promene tih

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

karakteristika, uslovljenih postupkom štampanja i pakovanja, koje se razlikuju od deklariranih podataka.

Odgovor na veličinu pretpostavljenih promena nakon procesa štampanja i pakovanja, najvažnijih tehničko-tehnoloških, kao i sveukupnih višekriterijumskih ocena vrednosti fleksibilnih ambalažnih materijala, predstavlja predmet istraživanja.

1.2 Cilj istraživanja

U našoj zemlji postoji veći broj relativno malih i srednjih preduzeća za štampu i izradu fleksibilne ambalaže koja se, pri odabiru i vrednovanju fleksibilnog ambalažnog materijala, često oslanjaju samo na ulazne podatke za materijale koje koriste, koji mogu biti promenjivi u toku procesa, a takođe i na manji broj kriterijuma za ocenu njihove upotrebne vrednosti. Pri odabiru i vrednovanju fleksibilnog ambalažnog materijala pažnja se poklanja malom broju kriterijuma, a posebno ekonomskom (izražen cenom). Kohlert (1997) navodi da je u siromašnijim zemljama često ekonomski aspekt prenaplašen zbog čega trpi kvalitet. Pored ekonomskih, velik uticaj na vrednovanje imaju i estetski kriterijumi (izraženi slikom i bojom). Navedeni kriterijumi ne samo što nisu dovoljni za ocenu vrednosti štampane fleksibilne ambalaže, već takav odabir predstavlja i određen rizik.

Cilj svih faza u životnom ciklusu ambalaže je njena izvrsnost, koju, između ostalog, karakteriše veći broj uticajnih faktora, sadržanih u karakteristikama materijala, procesu štampe i pakovanja. S obzirom na kompleksnost ambalaže kao sistema i složenost problema, nije moguća paušalna ocena, niti relativno jednostavna ocena kroz posmatranje samo jednog ili dva kriterijuma (tehnička realizacija i/ili ekonomičnost).

To upućuje na potrebu da se, uz neka ograničenja, istraže uticajni kriterijumi i ispita njihov značaj i veličine, te pomoću odgovarajuće metode odrede vrednosti pojedinih fleksibilnih ambalažnih materijala. Rezultat takvog istraživanja će biti kvantitativne vrednosti pojedinih štampanih fleksibilnih ambalažnih materijala koje će ukazivati na stepen ispunjenja njihovih zahteva.

Ograničenja se, pre svega, odnose na usmeravanje pažnje na:

- vrstu pakovanog sadržaja,
- odabrane vrste materijala,
- odabir kriterijuma za ocenu vrednosti fleksibilnih ambalažnih materijala,
- tehničku funkciju i uticaj procesa štampanja i pakovanja na odabrane ambalažne materijale i
- obim eksperimentalnog istraživanja odnosno merenja.

Ova ograničenja sadrže opasnost od izostavljanja nekih možda važnih kriterijuma, te je stoga, u slučajevima kod kojih nije bilo moguće dobiti podatke na bazi vlastitih istraživanja, oslonac tražen iz pouzdanijih literaturnih izvora.

U cilju pouzdanije ocene vrednosti štampane fleksibilne ambalaže, biće istraženo i ocenjeno u kojoj meri pojedini kriterijumi utiču na njihovu vrednost.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

S obzirom da postoji velik broj pogona za izradu grafičke ambalaže sa različitim tehnološkim procesima, kako u fazi pripreme, tako i u fazi štampanja i pakovanja, ne može se govoriti o apsolutno reprezentativnom tipu pogona za izradu štampane fleksibilne ambalaže. U ovom radu je razmatrana fleksibilna ambalaža koja se proizvodi u pogonima sa flekso štampom i konvencionalnim proizvodnim fazama pripreme, štampe i dorade, koji su najčešći u domaćim štamparijama.

Područje istraživanja je ograničeno na vrednovanje i ocenu fleksibilnih ambalažnih materijala nakon štampanja i formiranja ambalaže na mašini za pakovanje.

Specifični ciljevi istraživanja su:

- da se sa šireg aspekta sistemski istraži i oceni vrednost štampanih fleksibilnih ambalažnih materijala kao rezultat međudejstva pojedinih materijala i procesa izrade,
- razvije jedan naučno zasnovan, transparentan i praktičan postupak vrednovanja, koji bi proizvođačima tih proizvoda, projektantima, kao i drugim subjektima koje dotiče navedena problematika, pomogao da lakše donose pouzdanije odluke o izboru varijantnih rešenja štampane fleksibilne ambalaže,
- utvrdi u kojoj meri pojedini kriterijumi, s obzirom na njihove veličine i značaj, utiču na vrednost pojedinih varijantnih rešenja štampane fleksibilne ambalaže,
- dobiju osnove za uočavanje i otklanjanje slabih tačaka u vrednosnom lancu procesa štampe i pakovanja.

U istraživanju se polazi od sledećih hipoteza:

- U toku procesa flekso štampe i izrade ambalaže na mašinama za pakovanje može doći do promena karakteristika štampanih fleksibilnih ambalažnih materijala (zatezne čvrstoće i izduženja, klizavosti, barijernih osobina i kvaliteta otiska.
- Te promene bi mogle nastati u štamparskoj mašini, kao i u toku dalje obrade (npr. pri konfekcioniranju i pakovanju) usled direktnog dejstva radnih elemenata mašine (pre svega, uređaja za štampanje i transport) i rastvarača u boji, ili indirektnog dejstva energije preko medijuma (kod uređaja za sušenje odštampanih folija) ili energetskog polja (npr. kod korona postupka). U ovom radu je ispitivana
- Uobičajene ocene i izbor varijantnih rešenja proizvodnje štampane fleksibilne ambalaže, koje se temelje pretežno na finansijskoj dobiti i vrednovanju na osnovu malog broja kriterijuma, ne odražavaju pravu sliku njihove vrednosti.
- Na osnovu predloženih istraživanja, pomoću odgovarajuće metode, moguće je odrediti realne vrednosti i izbor štampane fleksibilne ambalaže istraživanjem većeg broja uticajnih kriterijuma i njihovog značaja, sa posebnim akcentom na karakteristike ambalažnih materijala pre i nakon štampanja i procesa formiranja ambalaže.

Odabrani primeri vrednovanja odgovarajućim metodama, treba da za praktične potrebe konkretnije dopune inače složen problem višekriterijumskog vrednovanja štampane fleksibilne ambalaže. Za očekivati je da će ovaj rad biti od koristi štamparijama, proizvođačima štamparskog materijala i fleksibilne ambalaže.

1.3 Primenjene metode istraživanja

Za ispitivanje karakteristika ambalažnih folija biće korištene standardizovane metode prema aktuelnim standardima i sa odgovarajućim instrumentima (ispitivanje zatezne čvrstoće i izduženja prema ISO 527-3; ispitivanje klizavosti prema ASTM D 1894; ispitivanje debljine filmova prema DIN 53370, ispitivanje propustljivosti kiseonika prema ASTM D 3985 i ASTM F 1927, ispitivanje površinskog napona pomoću uređaja Krüss DSA 25 i mikroskopsko ispitivanje pomoću mikroskopa Motic).

Problemu vrednovanja štampane fleksibilne ambalaže može se pristupiti pomoću poznatih postupaka vrednovanja koje se koriste za tehničke proizvode. Naime, ambalažu možemo posmatrati kao svaki drugi tehnički proizvod, sa tom razlikom što ona ima relativno kratki vek korišćenja.

Pregledom literature konstatovano je da se metode vrednovanja primenjuju najčešće za ekološko vrednovanje ambalaže (Allione, Petruccelli, 2012; Rezaei i dr.; 2018; Wang i White, 2014; VDI 4409), ali se primenjuju i za druge segmente ambalaže (Senygit i Demirel (2017; Chen i Song 2018; Olsmats i Dominic 2003; Tsigonisas i dr. 2012; Balaban 2012).

U nekim slučajevima se preporučuje i u praksi koriste jednostavnije parcijalne analize, vrednovanja i optimiranja pojedinih faza u životnom ciklusu proizvoda, npr. materijala, izrade, ekološkog kvaliteta, minimiranja troškova, dok se u nekim slučajevima pristupa kompleksnim postupcima, po kojima se istovremeno i međuzavisno razmatraju sve faze životnog ciklusa ambalaže.

Za vrednovanje u ovom radu, biće vrednovana štampana fleksibilna ambalaža sa kriterijumima koji su različitih dimenzija, sa kvantitativnim i kvalitativnim opisom. Uz odgovarajuće prilagođavanje, za rešavanje postavljenog cilja u ovom radu čini se prikladna opšta metoda analize korisne vrednosti (vrednosne, multiatributivne ili multidimenzionalne analize), npr. prema Zangemeister (2014). U cilju pouzdanijeg vrednovanja, određiće se i faktori značaja kriterijuma i to primenom dve metode-metode poređenja parova i metoda analitičko-hijerarhijskog procesa (AHP).

S obzirom da kompleksne metode, razvijene i primenjivane od strane velikih firmi, naučnih i drugih institucija, iziskuju velik utrošak vremena i sredstava u toku obrade problema, ovim radom će se pokušati predloženu metodu razviti u postupak koji odgovara domaćoj praksi i mogućnostima.

Zbog različitih mašina, odnosno procesa flekso štampe i širokog spektra fleksibilne ambalaže za različite sadržaje, nije moguće definisati opšte važeću metodu vrednovanja. Svako vrednovanje je manje ili više vezano za izradu štampane fleksibilne ambalaže za određeni sadržaj i određeni tehničko-tehnološki proces.

1.4 Struktura doktorske disertacije

U uvodnom delu obrazloženi su predmet, cilj i primenjene metode istraživanja, kao i struktura rada.

U drugom poglavlju rada, globalno su razmatrane najčešće korištene vrste fleksibilnih ambalažnih materijala za pakovanje prehrambenih proizvoda, koje se u velikoj meri izrađuju i štampanju flekso postupkom kao i postupci njihove proizvodnje.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

S obzirom da je akcenat u radu dat na ispitivanje promena karakteristika nakon postupka štampanja i pakovanja, u trećem poglavlju rada se ukratko navode naznačajnije faze u procesima štampe i pakovanja koje bi mogle imati uticaj na promene karakteristika.

U četvrtom poglavlju istraživani su zahtevi koji se postavljaju na fleksibilnu ambalažu za pakovanje hrane.

Nakon analize opštih zahteva, u petom poglavlju su formulisani kriterijumi za vrednovanje, koji proizlaze iz pojedinih faza toka materijala u procesu štampanja i pakovanja fleksibilnih ambalažnih materijala.

U šestom poglavlju su ispitane karakteristike odabranih kriterijuma za vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala (zatezne jačine i izduženja pri kidanju, klizavosti, barijernih karakteristika (propustljivost na kiseonik), kvalitet otiska (površinski napon i mikroskopsko ispitivanje). Kriterijumi se ispituju nakon procesa fleksio štampe i nakon procesa formiranja ambalaže.

U sedmom poglavlju analizirane su metode vrednovanja, sa posebnim osvrtom na problematiku višekriterijumskog vrednovanja ambalaže.

U osmom poglavlju određivane su ukupne vrednosti odabranih fleksibilnih ambalažnih materijala primenom metode analize korisne vrednosti kao i metoda za određivanje faktora značaja (metoda poređenja parova i metoda analitičko-hijerarhijskog procesa).

Deveto poglavlje obuhvata diskusiju rezultata i zaključna razmatranja.

Pregled literature je naveden u desetom poglavlju.

2. FLEKSIBILNI AMBALAŽNI MATERIJALI

2.1 Vrste i osobine fleksibilnih ambalažnih materijala za pakovanje hrane

Rezaei i dr., (2019) razlikuju tri "nivoa" ambalaže. Prvi predstavlja primarni nivo i tu spada prodajna ambalaža sa ciljem zaštite proizvoda. Drugi nivo je sekundarni, u koji spada transportna ambalaža koja sadrži više jedinica primarne ambalaže. Treći nivo je tercijarna ambalaža koja sadrži više primarnih i sekundarnih ambalaža zajedno, npr. na nekoj paleti.

U ovom radu se razmatra i vrednuje primarna ambalaža.

Na globalnom tržištu ambalaže udeo fleksibilne ambalaže je 39 % (slika 1). U fleksibilnu ambalažu se ubrajaju torbe, kese i vrećice različitog oblika, kao i omotači izrađeni od folija koji, kada se pune i zatvaraju, dobijaju savitljiv oblik (Ebnesajjad, 2012). Fleksibilni ambalažni materijali se odnose na proizvodnju, isporuku i obradu plastičnih i celuloznih filmova, aluminijumskih folija i papira koji se mogu koristiti pojedinačno ili u kombinaciji za primarnu prodajnu ambalažu za hranu (Morris, 2016).

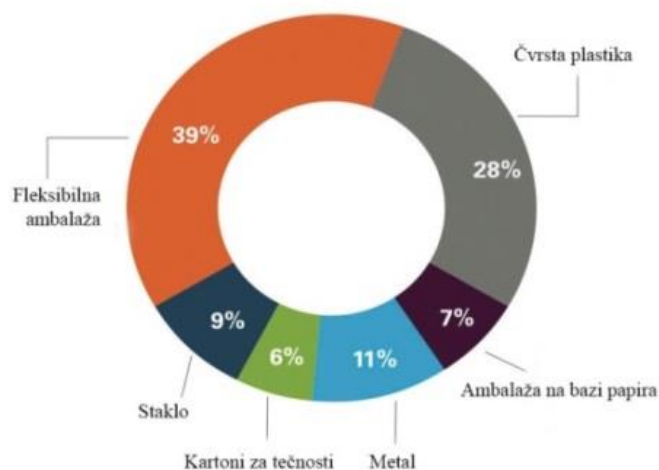
Fleksibilna ambalaža treba da ispuni više funkcija (slika 2). Zaštitna funkcija se postiže dobrim barijernim osobinama prema gasovima (vodena para, kiseonik, i dr.), kao i dobrom zavarljivošću. Visok sjaj, transparentnost, sjajna ili mat površina, kao i odlična mogućnost štampanja utiče na privlačan izgled ambalaže (Balaban-Đurđev i Maletić, 2011). Ekonomična ambalaža se postiže dobrom iskorišćenošću materijala i ispunjenjem zahteva za mašine za pakovanje sa velikim brzinama. Sve više traženi ekološki aspekti mogu biti zadovoljeni korišćenjem ekološki prihvatljivih materijala.

Od prve proizvodnje polietilena tridesetih godina prošlog veka, polimerni materijali, koji se obično nazivaju plastikom, korišćeni su kao odlični ambalažni materijali. Polimerni ambalažni materijali ispunjavaju zakonske regulative širom sveta, a koji se tiču direktnog kontakta sa proizvodom, posebno sa hranom.

Prema (Eur-lex.europa.eu), "plastične mase se proizvode od monomera i ostalih ulaznih sirovina koje se hemijskom reakcijom spajaju u makromolekularnu strukturu - polimer, koji je glavna strukturna komponenta plastične mase".

Sintetički polimeri se dobijaju postupkom polimerizacije od sirove nafte, prirodnog gasa, uglja, itd., čijom preradom se dobijaju monomeri.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike



Source: P&G Business Intelligence, "Global Packaging Market Assessment 2019"

Slika 1: Svetsko tržište ambalaže (Packaging World, 2019)



Slika 2: Funkcije fleksibilne ambalaže (Ebnesajjad, 2012)

Polimerna ambalaža se u najvećoj meri izrađuje od plastomera (termoplasta), tj. polimernih materijala linearne i/ili razgranate strukture, koji su topivi na povišenim temperaturama (Vujković i dr. 2007). Zagrevanjem im se smanjuje čvrstoća, omekšavaju, prelaze u plastično stanje, što omogućava njihovo lako oblikovanje. Hlađenjem očvrstnu i zadržavaju oblik koji im je dat u plastičnom stanju. Reverzibilan prelazak iz čvrstog u plastično stanje je moguć gotovo neograničeni broj puta.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Fleksibilni ambalažni materijali se široko koriste u industriji ambalaže zbog svojih dobrih svojstava, kao što su niska cena, mala masa, podnošljivost sa sadržajem (posebno životnim namirnicama), odgovarajućih barijernih, mehaničkih i optičkih svojstava, dobre podnošljivosti u velikom temperaturnom opsegu i pogodnosti za obradu mašinama za štampanje i pakovanje (Morris, 2016; Ebnesajjad, 2012).

Glavni polimeri koji se najčešće koriste u proizvodnji filmova su polietileni (LDPE, LLDPE, HDPE), polipropilen (PP), poli(vinil-hlorid) (PVC), poli(viniliden-hlorid) (PVDC), polistiren (PS), stiren/akrilonitril (SAN), akrilonitril/butadien/stiren (ABS), poliamidi (PA), poli(etilen-tereftalat) (PET) i celofan.

Najvažnije karakteristike najčešće korišćenih polimera date su u tabeli 1.

Od ovih polimera najvažniji su polietilen, polipropilen, polistiren, polietilentereftalat i polivinilhlorid, koji čine preko 90 % materijala koji se koriste u industriji ambalaže. Područja primene za pakovanje hrane prikazuje tabela 2. Za štampu se naročito koriste PE i PP.

Plastični filmovi se mogu kombinovati sa drugom plastikom i materijalima postupcima koekstruzije, kaširanja ili ekstruzionog oslojavanja. Osobine fleksibilnih ambalažnih materijala se često poboljšavaju orijentisanjem uzdužno i/ili poprečno, lakiranjem, kaširanjem, oslojavanjem, metaliziranjem.

Primenom polimerne i kombinovane ambalaže proizvodi se mogu pakovati u atmosferi vazduha, pod vakuumom i u atmosferi zaštitnih gasova, kao i u aseptičnim uslovima (Vujković i dr., 2007). Upakovani proizvodi mogu se konzervirati pasterizacijom, sterilizacijom, a mogu se i zamrzavati. Moguće je proizvesti ambalažu prilikom samog procesa pakovanja sadržaja, ili prvo proizvesti ambalažu pa onda pakovati sadržaj.

U sledećem tekstu se navode osobine najčešće korišćenih fleksibilnih ambalažnih monomaterijala.

Polietilen (PE)

Polietilen je najčešće korišćen termoplastični polimer za izradu ambalaže (Ebnesajjad, 2012). Nepolaran je i delimično kristaliničan. Kristaliničnost zavisi od grananja. U zavisnosti od gustine i molekularne strukture, koristi se nekoliko vrsta polietilena. Retko se koristi kao monomaterijal, jer za većinu prehrambenih proizvoda nema zadovoljavajuće zaštitne osobine, pa se najčešće kombinuje sa ostalim materijalima (papirom, kartonom ili aluminijumskom folijom). Ne upija vodu. Spada u jedan od najjeftinijih materijala za pakovanje.

Polietilen niske gustine (LDPE)

LDPE se dobija polimerizacijom gasovitog monomera etilena pod visokim pritiskom. Molekularna struktura je jako razgranata. Molekularna zapremina je relativno visoka, a gustina je niska, uglavnom između 0,910 i 0,940 g/cm³. Njegova tačka topljenja je oko 100 °C. Zbog niske tačke topljenja koristi se kao polimer za varenje. Neutralan je u odnosu na različitu hranu, kozmetiku i hemikalije. Ima dobru barijeru na vlagu, ali manje na kiseonik. LDPE se obično koristi kao sloj za zavarivanje (zatvaranje ambalažnih kesica).

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Polietilen visoke gustine (HDPE)

Makromolekuli ove vrste polietilena su linearne strukture sa vrlo malo kratkih bočnih grana. Gustina mu je od obično veća od 0,950 g/cm³. HDPE ima mnogo veću zateznu čvrstoću i krutost nego LDPE. Njegova tačka topljenja je 130 °C. HDPE ima visoku barijeru za vlagu i obično se koristi za čepove, boce, torbe za nošenje i dr.

Tabela 1: Najvažnije karakteristike najčešće korišćenih polimera za izradu ambalaže (Gosh, 2015; Vujković i dr., 2007)

Polimer	Najvažnije karakteristike
LDPE	Transparentnost, termo zavarivost, niska propustljivost na vodenu paru, dobro podnošenje niskih temperatura, moguća metalizacija
LLDPE	Dobra otpornost na pukotine i probijanje
HDPE	Velika čvrstoća i žilavost
BOPP	Dobra transparentnost i sjaj, niska propustljivost na vodenu paru, dobra mehanička čvrstoća
Metalizovani OPP	Poboljšane barijerne osobine na gasove, vlagu, UV deo spektra
PET	Transparentnost, sjaj, velika tvrdoća, čvrstoća i krutost, dobra barijera na vodenu paru, dobro podnošenje niskih temperatura, moguća metalizacija

Tabela 2: Primena najvažnijih polimera u industriji ambalaže za hranu (Izdebska & Thomas, 2016)

Vrsta polimera	Potražnja u Evropi (2013), %	Upotreba za ambalažu
LDPE, HDPE, LLDPE)	29.6	Filmovi i trake, termoskupljajuće folije za zamrznute, sveže, pekarske, mesne, mlečne proizvode, delovi laminata
PP	18.9	Delovi laminata, za snek, zrnaste, praškaste, mlečne i pekarske proizvode, sladoled, maslac, margarin, slatkiše
PVC	10.4	Termoskupljajući filmovi
PS	7.1	Za pakovanje mesa, ribe, brze hrane, mlečnih proizvoda
PET	6.9	Filmovi, deo laminata, za poslastice i zamrznute proizvode, ambalaža sa visoko barijernim osobinama

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Linearni polietilen niske gustine (LLDPE)

LLDPE je obično kopolimer etilena i butena, heksena ili oktena. Etilen proizvodi glavni lanac; ostali monomeri prave bočne lance poput češlja. LLDPE ima višu tačku topljenja od LDPE (približno 120 °C). Ima bolju čvrstoću vara nego LDPE. Koristi se kao zavarivi sloj.

Polipropilen (PP)

Polipropilen se dobija polimerizacijom propilena. Ovo je polukristalni polimer sa tačkom topljenja na 160 °C (homo-polipropilen), gustine 0,89 do 0,915 g/cm³. Na osnovu položaja CH₃ bočne grupe postoje tri različite vrste PP: izotaktan, sindiotakan i ataktan. Kristalni sadržaj se razlikuje kod različitih vrsta. Čvršći je od PE i može se koristiti u uslovima sterilizacije u vodi ili vodenoj pari zbog veće tačke topljenja. Biaksijalnim istezanjem poboljšavaju mu se osobine (oznaka BOPP). Orijentisane poliproilenske folije (OPP) imaju dobru barijeru na kiseonik i vodenu paru i za suve sadržaje pružaju jako dobru zaštitu od arome i svetlosti.

Transparentan je u orijentisanoj formi, inače je malo transparentan ili neproziran. Nije naročito prikladan za zavarivanje, ali se to po potrebi poboljšava dodatnim zavarivim slojem.

Oznaka CPP (kast PP) se koristi za liveni polipropilen (Grundlagen des Flexodrucks, 2015). Ovaj materijal se koristi kao sloj za toplo zavarivanje. CPP filmovi imaju veći sjaj i transparentnost, veću jačinu, superiorne barijerne karakteristike i odličnu jačinu vara.

Prema iskustvima iz prakse¹ za pakovanje prehrambenih proizvoda koriste se razne vrste polipropilena (PP, OPP i BOPP) i to pre svega za pakovanje u kesice gramature od 100 g do 500 g. Ovi materijali se ne koriste za pakovanje praškastih materijala zbog problema kod varenja kesica (zbog prašine od praškastih materijala). Najčešću primenu imaju za pakovanje testenina, bombona, čokolada, keksa, konditora, podloga za pizze, smrznuta testa, gotovih sendviča, tost hlebova, kifli, sečenog hleba, galeta, pečenih i smrznutih konditorskih proizvoda i drugih proizvoda koji su osetljivi na vlagu. Štampa se sa spoljašnje strane.

Polietilenterftalat (PET)

Polietilentereftalat (PET) spada u grupu poliestra i proizvodi se kondenzacijom. Posедуje visok sjaj i dobru transparentnost i u poređenju sa PE i PP bolje barijerne osobine, kao i bolju otpornost na hladnoću i toplotu. To je folija sa vrlo dobrim mehaničkim osobinama. Kod višeslojnih folija se koristi pretežno kao osnovna/nosiva folija. Može da se oslojava, kašira, metalizuje i štampa. Ima malu propustljivost za O₂, CO₂ i mast i srednje barijerne osobine za vodenu paru. Poseduje dobre klizne osobine i otpornost na abraziju. PET debljine 12 µm je važan osnovni materijal za kombinovane folije koje su nepropusne za gas i aromu, a ima i vrlo dobre osobine za štampanje.

BOPET je biaksijalno orijentisana varijanta PET-a koja je dobra polimerna podloga za štampu i koristi se za visokokvalitetnu ambalažu.

Višeslojni i kombinovani fleksibilni ambalažni materijali

¹ Usmena komunikacija sa vlasnikom štamparije u kojoj su štampani uzorci

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Monomaterijali se mogu kombinovati pri čemu se dobijaju ambalažni materijali slojevite strukture (tzv. laminati). Ovakvom kombinacijom se dobijaju ambalažni materijali željenih karakteristika za čuvanje određenih proizvoda (tabela 3). Na slici 3 su prikazani različiti slojevi višeslojne ambalaže.

Te različite osobine se ogledaju u karakteristikama za zavarivanje, mehaničkim osobinama, krutosti, nepropustljivosti na gasove ili vodenu paru, otpornosti prema uljima ili mastima, optici, ekonomičnosti, itd. Ovi materijali bi trebali imati što je moguće manju debljinu, pri kojoj još uvek zadržavaju dobre fizičko-hemijske osobine.

Kod životnih namirnica i druge osetljive pakovane robe naročito je potrebno naneti dodatne slojeve, kako bi se u kombinaciji folija postigao optimum za poboljšanje barijernih osobina za gasove ili paru. Pre svega, ovde se radi o zaštiti od upijanja vlage, ulaza kiseonika i gubitka arome. Na primer, kod kombinacije polietilena (PE) sa polietilentereftalatom (PET) ili poliamidom (PA) je moguće postići optimalne barijerne osobine za kiseonik i vodenu paru.

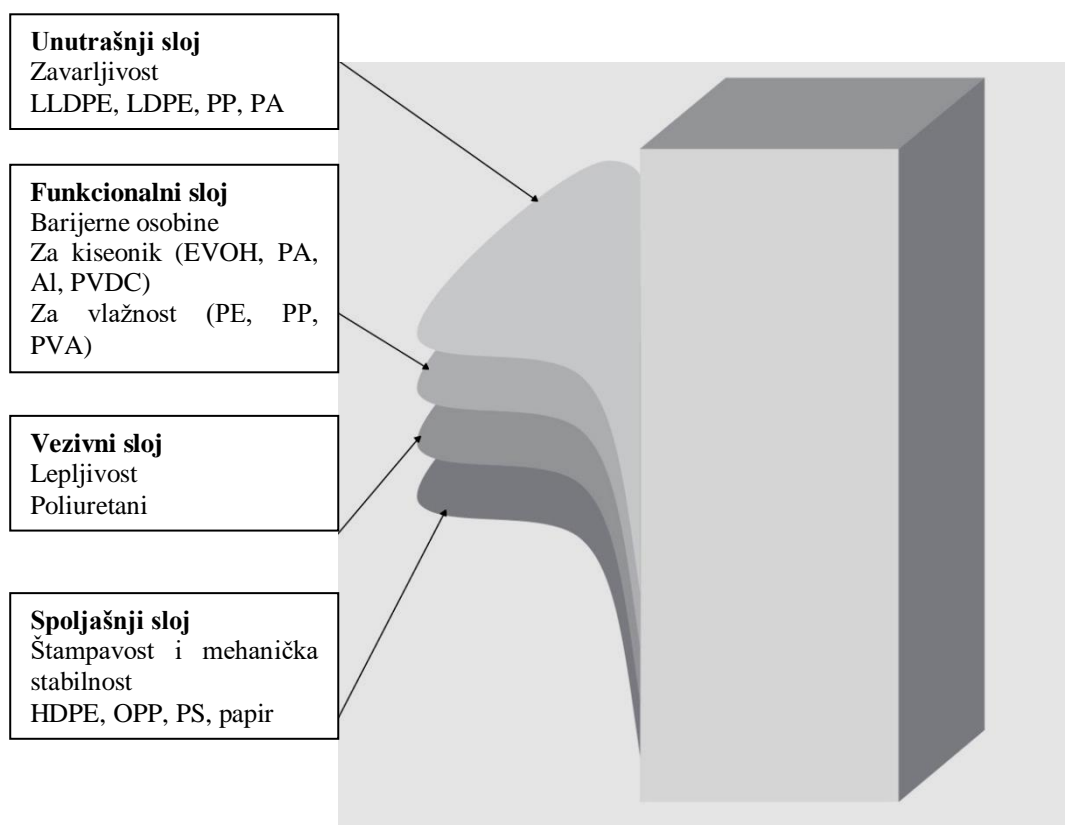
Materijali se međusobno mogu spojiti postupcima kaširanja, ekstruzionog oslojavanja i koekstruzije. Višeslojne, odnosno kombinovane folije se danas uglavnom izrađuju postupkom koekstruzije.

Tabela 3: Primeri nekih višeslojnih i kombinovanih materijala i njihova primena za pakovanje (Vujković i dr., 2007)

LAMINAT	PRIMENA
Poliester/PE	Sir, smrznuta hrana, konditorski proizvodi
Metalizovani poliester/PE	Snek proizvodi, kafa, praškasti proizvodi, vakum pakovanje
OPP/PE	Konditorski proizvodi, suvo voće, smrznuta hrana
Poliester/Al-folija/PE	Orasi, snek hrana, tečnosti,
PE/PE-HD/PE-LD	Konditorski proizvodi, žitarice

Višeslojne folije su u pravilu građene na sledeći način: osnovni-nosivi sloj/barijerni sloj (po potrebi)/zavarivi sloj. Međusobna povezanost pojedinih slojeva zavisi od korištenog postupka (kaširanje i koekstrudiranje). Osnovna folija je prvenstveno predviđena za mehanička opterećenja, a zavariva folija za poboljšanje zavarivosti pojedinih folija.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike



Slika 3: Različiti slojevi višeslojne ambalaže (Anukiruthika i dr., 2020)

2.2 Postupci proizvodnje fleksibilnih ambalažnih materijala

U tabeli 4 prikazani su najvažniji postupci proizvodnje fleksibilnih ambalažnih materijala.

Tabela 4: Najvažniji postupci proizvodnje fleksibilnih ambalažnih materijala (Morris, 2016)

Postupak	Proces	Sirovi materijal	Završni proizvod
Proizvodnja filma (homogene strukture)	Ekstrudiranje (duvani ili liveni film)	Polimerni peleti	Monofilm ili višeslojni film
Proizvodnja višeslojnih filmova (koekstruzija, ekstruziono oslojavanje, kaširanje) Proizvodnja kombinovanih folija (ekstruziono oslojavanje, kaširanje, metalizacija)	Koekstruzija Ekstruziono oslojavanje Kaširanje	Film, papir ili folija polimer ili adheziv	Višeslojni film
Orijentacija filma	Uzdužno istezanje Poprečno istezanje	Polimer ili traka	Orijentisani film

Ekstrudiranje

Ekstrudiranje je najzastupljeniji postupak izrade polimernih štamparskih materijala beskonačne dužine. Ovim postupkom se izrađuju filmovi/folije i trake.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Koekstruzija

Postupkom koekstruzije se najčešće izrađuju višeslojni polimerni materijali tako što je više ekstrudera povezano s jednom mlaznicom iz koje izlazi ravna traka.

Ekstruziono oslojavanje

Ekstruzionim oslojavanjem istih ili različitih materijala nanosi se polimerni sloj na prethodno proizvedenu podlogu. Ovaj postupak se najčešće koristi za oslojavanje papira, ali se koristi i za oslojavanje polimernih materijala. Primenom odgovarajućih polimernih materijala, u znatnoj meri se poboljšavaju karakteristike papira koji se koriste za pakovanje. Tako, na primer, oslojavanjem sa PE dobija se plastificirani papir boljeg kvaliteta (ne kvasi se i ne masti, ima bolje barijerne karakteristike za gasove i vodenu paru, nepropustan je za mikroorganizme i omogućeno je oblikovanje i zatvaranje ambalaže zavarivanjem).

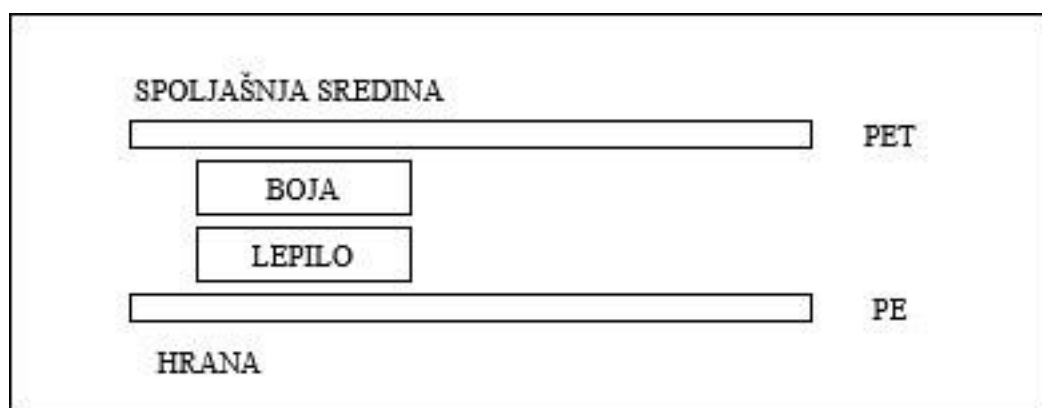
Kaširanje

Spajanje više materijala kaširanjem (laminiranjem) postiže se nanosom lepila ili otopine plastične mase na jedan materijal koji se onda spaja sa drugim materijalom. Razlikuju se sledeće tehnologije:

- kaširanje sa sredstvom sa rastvaračem (suvo kaširanje),
- kaširanje sa sredstvom bez rastvarača,
- ekstruziono kaširanje.

Zbog velike koncentracije štetnih isparenja kod lepkova sa organskim rastvaračima, danas se sve više primenjuju lepkovi na bazi 100% suve komponente ili lepkovi na bazi vode kao razređivača.

Prednost materijala koji su proizvedeni kaširanjem je da se štampana boja može nalaziti u međusloju, pa se tako mogu koristiti jeftinije boje koje su zaštićene od skidanja prilikom upotrebe spoljašnjim slojem polimernog materijala (slika 4). Postupak suvog kaširanja lepilom sa rastvaračem prikazan je na slici 5.



Slika 4: Prikaz kaširanog spoja PET i PE (Balaban, 2013)

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Proizvodnja orijentisanih filmova

Orijentacija monomaterijala u polimernoj tehnologiji podrazumeva raspored polimernih makromolekula u određenom pravcu - uzdužnom ili u oba pravca - uzdužnom i poprečnom.

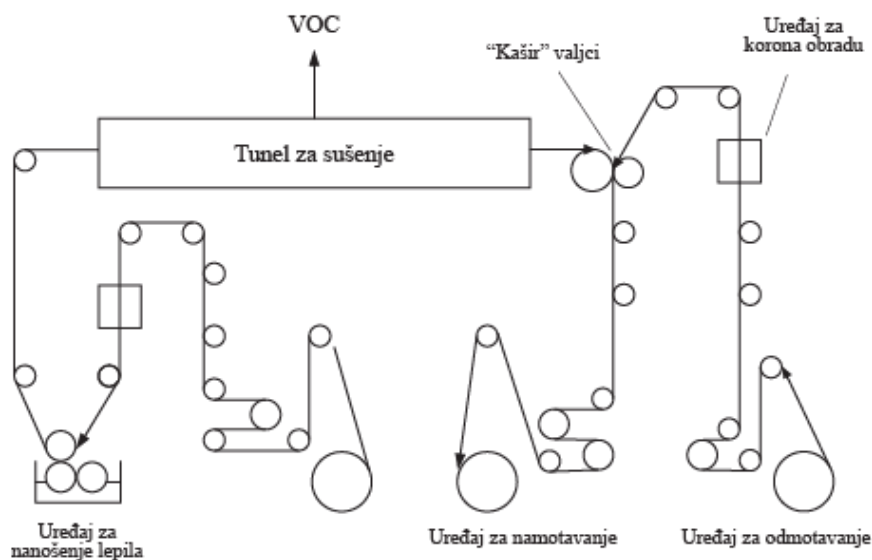
Makromolekuli su u polimeru distribuirani na slučajan način i u opuštenom su stanju. Ako se, međutim, film razvuče na povišenoj temperaturi u određenom smeru, tada makromolekuli teže da slede taj pravac baš kao elastični materijal. Ako se tada film ohladi na sobnu temperaturu, unutrašnja napetost, kao i položaj makromolekula se smrzavaju (Dunn, 2015).

Ovim postupkom se poboljšavaju karakteristike materijala (povećava se zatezna čvrstoća, smanjuje se izduženje pri kidanju u pravcu istezanja, povećava se transparentnost i glatkost, kao i barijerne karakteristike za gasove i vodenu paru).

Tri vrste polimera koji se koriste za izradu orijentisanih filmova su PET, najlon (PA) i PP, koji nakon orijentacije dobijaju nazive BOPET, BON (BOPA) i BOPP. Takvi materijali imaju ujednačenu i sjajnu površinu. Pogodni su za štampu, premazivanje ili nanošenje vakuumom sa aluminijumom ili silicijum oksidom. Za najveću mehaničku čvrstoću bira se PET.

Metalizacija

Postupkom metalizacije na polimerne materijale se može naneti tanak sloj aluminijuma ili nekog drugog metala, čime se poboljšavaju barijerne karakteristike metalizovanih materijala na gasove i vodenu paru (čak i preko 90%) (Vujković i dr., 2007). Pored toga, povećava se krutost, stabilnost i jačina folija, a takođe pokazuju i veću otpornost prema deformaciji (Gupta i dr., 2009). Sloj metala je reda veličine od 30-100 nm (Hertlein, 1998).



Slika 5: Postupak suvog kaširanja lepilom sa rastvaračem (Balaban, 2013)

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

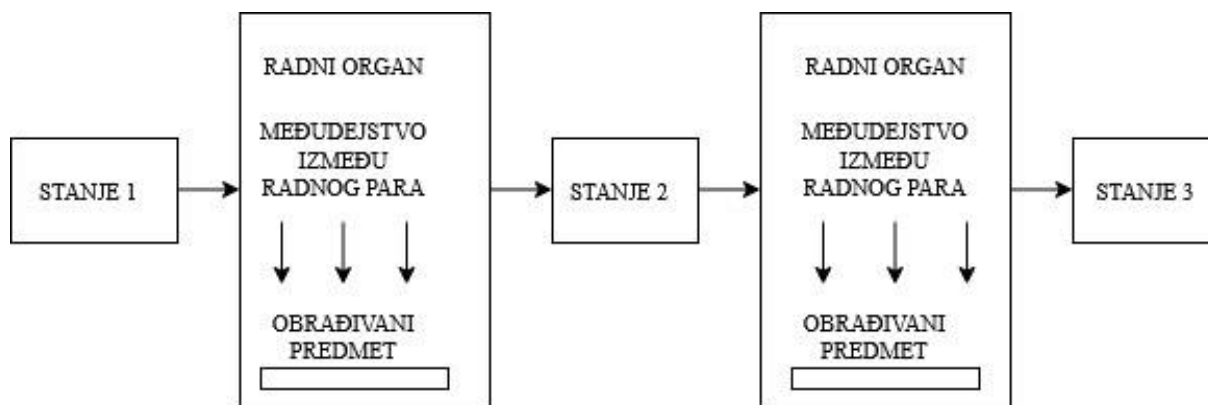
Od postupaka za izradu ambalažnih materijala najviše se koristi vakuum metalizacija. Princip rada se zasniva na tome da kada se postigne vakum, pare aluminijuma se kondenzuju na materijal.

Pored poboljšanih barijernih osobina, primenom ovih folija izbegavaju se višeslojne folije, štedi aluminijum i poboljšava reciklaža. Kao noseće folije su se izuzetno dobro pokazale PET folije i biaksijalno orijentisani BOPP.

3. PROCES ŠTAMPANJA I PAKOVANJA FLEKSIBILNIH AMBALAŽNIH MATERIJALA

Za ovaj rad su posebno značajne faze, odnosno radni postupci, kod kojih u toku procesa štampanja i pakovanja, dolazi do direktnog međudejstva radnog procesa i štamparskog materijala. To su u prvom redu uređaji za štampanje, transport i sušenje odštampanih folija, kao i pojedini elementi kod mašine za pakovanje, odnosno oblikovanje kese (npr. kragna).

U tim sklopovima se nalaze radni organi, koji sa folijama čine neku vrstu radnog para kao najmanjeg elementa sistema toka materijala. U ovom radu je neštampana folija stanje 1, štampana folija stanje 2 i poluformirana ambalaža stanje 3. Bitni uticajni faktori u sistemu su materijali, radni organi i energija (slika 6).



Slika 6: Radni organi i tok promene materijala

Na obrađivani materijal može delovati jedan ili više radnih organa (npr. delovanje čitavog niza valjaka između uređaja za odmotavanje i uređaja za namotavanje folije, uz pojavu trenja, napona i istezanja folije) (Balaban-Đurđev, Novaković, 2006).

U sledećem tekstu će detaljnije biti razmotreni sklopovi i radni organi, kod kojih može doći do uticaja na karakteristike štampanih ambalažnih folija, a to su prvenstveno uređaji za štampanje i sušenje odštampanih folija, kao i transport u štamparskoj mašini i mašini za pakovanje.

3.1 Opšte o procesu flekso štampe

Ambalažni materijali mogu biti štampani postupkom visoke (flekso), duboke, ravne, propusne i digitalne štampe. Osnovna razlika je u primenjenoj štamparskoj formi.

U ovom delu rada razmatran je proces flekso štampe fleksibilnih ambalažnih materijala, sa bojama na bazi rastvarača i konvencionalnim proizvodnim fazama pripreme, štampe i dorade,

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

koji su najčešći u domaćim štamparijama. S obzirom da se izrada grafičke ambalaže odvija različitim tehnološkim procesima, kako u fazi pripreme, tako i u fazi obrade i štampanja, ne može se govoriti o apsolutno reprezentativnom tipu pogona za izradu štampane fleksibilne ambalaže.

Flekso štampa, kao oblik direktne visoke štampe na rotacionim mašinama, je najviše korišteni postupak u ambalažnoj štampi i nastavlja da bude jedan od najbrže rastućih štamparskih procesa (Mordor Intelligence, 2021). Ona se koristi, pre svega, kod izrade fleksibilne ambalaže za pakovanje životnih namirnica u obliku raznih folija, kesa i vreća. Flekso štampa je pogodna za štampu na premazanim i nepremazanim papirima i kartonima, neporoznim supstratima (metalizovanim i plastičnim filmovima), koji se naročito koriste u ambalažnoj industriji (Rentzhog, 2006). U odnosu na ostale postupke štampe, prednosti flekso štampe su jednostavna izrada i promena štamparske forme na cilindru i manji pogonski troškovi, kao i manji troškovi nabavke (Borbély i Szentgyörgyvölgyi, 2011); Balaban-Đurđev, 2006).

U svojim osnovnim fazama, tok materijala sa radnim postupcima u procesu flekso štampe, vezanim za temu ovog rada, a sa bojama na bazi rastvarača, prikazan je na slici 7.

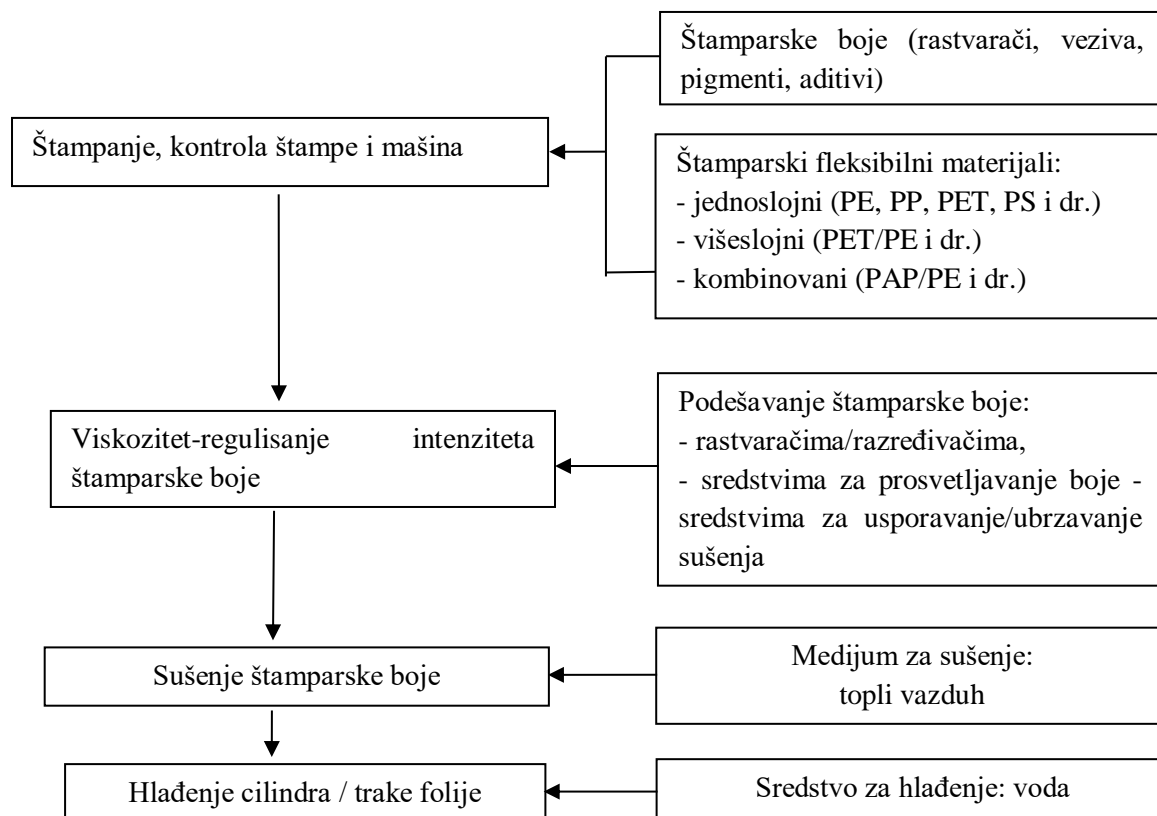
Štamparska forma kod flekso štampe je izdignuta fleksibilna ploča ili beskonačna štamparska forma, na bazi elastomera ili fotopolimera (Flexography: Principles & Practices (1999). Takva fleksibilna štamparska forma se dobro prilagođava hrapavim i neravnim površinama. Za izradu štamparske forme su potrebni specijalni negativ filmovi, koji se u direktnom kontaktu sa fotopolimernom pločom osvetljavaju UV-zracima određenih talasnih dužina, pri čemu dolazi do reakcije polimerizacije i umrežavanja reljefa. Pri tome, osvetljena mesta ploče otvrdnjavaju, a neosvetljena ostaju mekana. Ploče se potom ispiraju, da bi bili uklonjeni mekani nepolimerizovani delovi. Montaža na cilindar štamparske forme se vrši različitim tehnikama.

Pored tehnike sa štamparskim pločama, primenjuju se i cilindrični oblici štamparske forme, čiji reljef se izrađuje laserskom tehnologijom-oslikavanjem na cilindru (sleeve tehnologija). Nedostaci fleksibilne štamparske forme su posledica potrebnog pritiska pri štampanju.

Pritisci kod štampe zavise od motiva i štamparskog materijala. Kvalitet štampe se umanjuje zbog neophodnog pritiska štampe, koji dovodi do deformacije štamparskog reljefa, odnosno štampanja elemenata. Ova deformacija se može izbeći izborom tipa štamparske ploče sa više ili manje velikom Shore-tvrdoćom i postavljanjem višeslojne fotopolimerne ploče koja sadrži kompresibilni sloj.

Boje za flekso štampu predstavljaju sistem koji se sastoji od velikog broja komponenti, koja svaka za sebe ima specijalnu funkciju. Tu spadaju, pre svega, sredstva koja daju obojenost, kao i vezivna sredstva koja služe za fiksiranje boje na foliji. Aditivi daju specifične osobine boji koji, zajedno sa glavnim vezivnim sredstvom, određuju osobine i profil primene štamparske boje.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike



Slika 7: Radni postupci kod flekso štampe sa bojama na bazi rastvarača (Balaban-Đurđev, 2006)

Štamarske boje za flekso štampu su niskoviskozne boje na bazi rastvarača ili vode ili viskoviskozne UV boje. Sušenje se dešava isparavanjem rastvarača ili umrežavanjem (delovanjem UV-zraka). Za štamarske boje se postavljaju mnogi zahtevi (npr. postojanost pri zavarivanju, kaširanju, sterilizaciji, grebanju, itd.), a takođe moraju biti postojane na vodu, baze, kiseline, svetlost, na životne namirnice, itd.

Viskozitet boje se podešava u zavisnosti od vrste podloge i brzine štampanja. Lako isparljive komponente izlaze iz odštampanog filma u kojem ostaju samo aditivi i pigmenti boje. Proces sušenja zavisi od stepena isparljivosti rastvarača.

Štampanje višeslojnih filmova se može vršiti na površini ili u međusloju (slika 8). Štampanje u međusloju može biti na površini prvog ili drugog filma. U oba slučaja, laminat je napravljen nakon što je film odštampan. Glavne prednosti ove vrste štampe su zaštita od mehaničkih oštećenja, više sjaja i eliminisanje direktnog kontakta sa bojom.

Boja se na štamarski reljef nanosi pomoću rasterskog valjka, koji prenosi tečnu štamarsku boju na različite štamarske materijale.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike



Slika 8: Mogućnosti štampe višeslojnih filmova

Kvalitet štampane ambalažne folije ocenjuje se po kvalitetu reprodukovanog predloška, prikladnosti štampanog proizvoda za dalju obradu i ispunjenju zahtevanih karakteristika odštampane folije pri upotrebi ambalaže. Pored toga, za dobijanje kvalitetnog flekso otiska, neophodna je zajednička optimizacija elemenata u procesu kao što su priprema za štampu, izrada štamparske forme, štampe i štampajuće podloge. (Valdec i dr., 2017; Bould i dr., 2011). Svaki proces flekso štampe je specifičan, jer zavisi od određene kombinacije boje, aniloks valjka, štamparskih ploča, podloga i mašine (Valdec i dr., 2017).

3.2 Faze u procesu štampanja ispitivanih ambalažnih materijala

3.2.1 Vođenje štamparskog materijala kroz mašinu

U toku vođenja štamparske trake kroz štamparsku mašinu dolazi do pojava naprezanja i istežanja štamparskog materijala, što je predmet istraživanja u ovom radu. Koliko je istežanje trake za vreme štampanja, zavisi od podešenog napona trake i dotičnog štamparskog materijala.

Vučna sila za kretanje folije je definisana kao suma svih sila koje su potrebne za odvijanje folije sa rolne i transport kroz štamparsku mašinu, ili kroz mašine za konfekcioniranje ambalaže, koje mogu biti horizontalne ili vertikalne izvedbe. Pritom se moraju savladati otpori koji su uslovljeni osobinama folije (koeficijent trenja, krutost na savijanje) i osnovnim operacijama na mašini.

Osnovni elementi transporta štamparske trake su valjci za vođenje i vučni valjci. Osim toga, kao posebni elementi tu su još i slobodni valjci.

Vođenje trake folije i kvalitet štampe, tzv. paser koji se odnosi na podešenost pojedinih otisaka boja kod višebojne rasterske flekso štampe, su u uskoj vezi.

Vođenje folije kroz flekso mašinu podeljeno je na sledeća područja:

- od uređaja za odmotavanje do prvog vučnog valjka,
- od prvog vučnog valjka do drugog vučnog valjka na ulazu u uređaj za štampanje kod višecilindrične stubne mašine, odnosno do zajedničkog pritiskog cilindra kod mašine sa centralnim cilindrom,
- treće područje naprezanja je ograničeno u smeru kretanja trake sa trećim vučnim valjkom (iza tunela za sušenje) izvedenim sa hlađenjem,
- četvrto područje se proteže od zadnjeg (trećeg) vučnog valjka do uređaja za namotavanje.

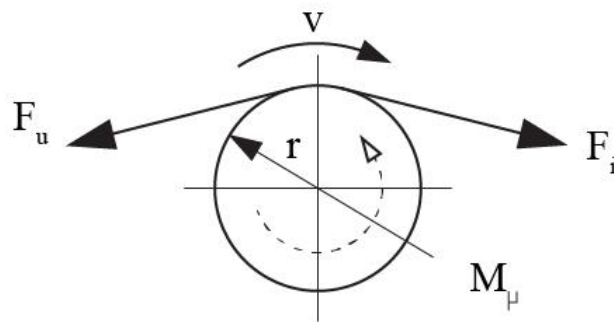
Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Uređaji za odmotavanje i namotavanje predstavljaju krajnje pogonske elemente (sa posebnim pogonom).

Naprezanje štamparskog materijala nastaje između najmanje dva vučna pogona. Kod zadržavajućeg pogona odmotavanja rolne, izlazno naprezanje je veće od ulaznog, a kod vučnog pogona koji deluje u smeru kretanja trake materijala, naprezanje na ulazu je veće od izlaznog.

Najveće naprezanje folije unutar štamparske mašine se javlja neposredno ispred vučnog pogona.

Valjci za vođenje trake folije (slika 9) su pogonjeni od same trake, pa time imaju i uticaja na njeno naprezanje.



Slika 9: Zatezne sile na valjku za vođenje

Kod stacionarnog kretanja je:

$$(F_i - F_u) r - M_\mu = 0$$

Pošto je $M_\mu > 0$, to je $F_u < F_i$

F_u, F_i ...sile u traci na ulazu odnosno izlazu

v ... brzina kretanja trake

r ... poluprečnik vučnog valjka

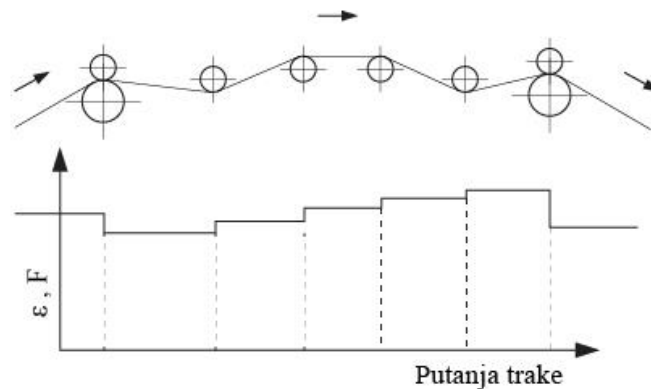
M_μ ...moment trenja ležaja

Zbog trenja u ležaju valjka sila, odnosno napon u izlaznom delu trake je veći nego u ulaznom delu.

Na svakom valjku za vođenje nastaje skok veličine naprezanja u traci, naprezanje, odnosno zatezne sile rastu od valjka do valjka na čitavoj trasi u smeru kretanja trake (slika 10).

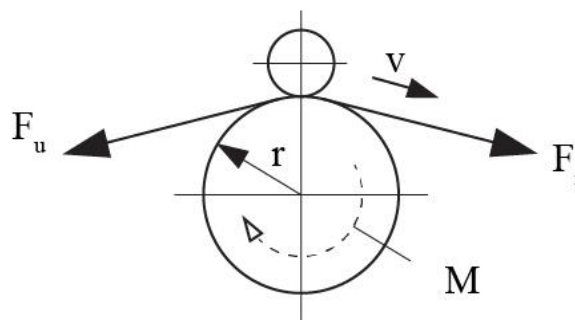
Svakom porastu naprezanja materijala odgovara porast istežanja. Shodno tome, kod mekšeg i tanjeg materijala, skok istežanja je veći nego kod debljeg i čvršćeg materijala. Podešavanje pasera kod višecilindričnih flekso mašina zavisi od čvrstoće i istežanja materijala.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike



Slika 10: Tok zateznih sila F i istezanja trake ε na valjcima za vođenje unutar jednog sistema za vođenje traka

Aktivni elementi transporta štampane trake su vučni valjci sa pogonskim momentom M i iz njega proizašlom razlikom zateznih sila F_u i F_i u traci sa jedne i druge strane valjka (slika 11).



Slika 11: Zatezne sile u traci folije kod vučnog valjka

Kod stacionarnog kretanja je:

$$M + (F_i - F_u) r = 0$$

Pošto je $M > 0$, to je $F_u > F_i$

v ... brzina kretanja trake

r ... poluprečnik vučnog valjka

Vođenje folija kroz štamparsku mašinu ima veliki značaj za kvalitet štampe, zato će isto poblizje biti istraženo u onim elementima koji su značajni za ispitivane karakteristike folije i mašine na kojima su one štampane.

Istezanje štamparskog materijala kao posledica vučnih sila može dovesti do izduženja slike, a to opet do odstupanja dužine ponavljanja (raporta) i pasera, zbog čega se mogu javiti greške u štampi. Tolerancije mera za raporte flekso štampe trebaju, zavisno od debljine folije, biti od $\pm 0,7\%$ za folije do $60\ \mu\text{m}$ i $\pm 0,5\%$ za folije preko $60\ \mu\text{m}$.

Istezanje nastaje prvenstveno u smeru kretanja trake. Ali, kao posledica te uzdužne deformacije, istovremeno se javlja i poprečna deformacija u vidu stezanja ili skupljanja u

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

smeru širine i debljine folije. Deformacija u smeru debljine se može zanemariti, ali deformacija u smeru širine može biti od velikog značaja, jer može imati za posledicu ne samo greške u paseru i dužini ponavljanja u tom smeru, nego i pojavu nabora (falti). Zadovoljavajuća ravan folije (bez nabora) postiže se ukoliko ni u jednom delu trake ne postoji beznaponsko stanje. Zbog toga, odnosno zbog sprečavanja greške u dužini, potreban je određeni minimalni napon po čitavoj dužini trake folije. Budući da zategnutost trake ne može biti konstantna unutar štamparske mašine, to se na tačkama na kojima je to moguće mora podestiti odgovarajuća veća zatezna sila.

3.2.2 Nanošenje boje na štamparski materijal

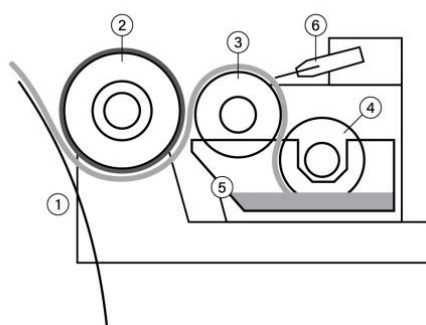
Bojenje, tj. prenošenje boje kod flekso štampe se vrši pomoću raster (aniloks) valjka (slika 12). Aniloks valjak ima metalnu površinu (od hroma ili keramike) sa fino izgraviranim ćelijama, jednako raspoređenim po celoj površini valjka. Osnovna karakteristika aniloks valjka je količina boje koja može da se smesti u ćelije po jedinici površine ili zapremina ćelija po jedinici površine (cm^3/m^2). Svaka mašina za flekso štampu ima više aniloks valjaka sa različitim zapreminama ćelija. Koji valjak će biti korišćen zavisi od debljine nanosa boje na štamparsku formu, odnosno od vrste i kvaliteta otiska (tabela 5). Upravljanje, to jest regulisanje potrebnih količina boje u procesu štampanja nije moguće zato što svaki raster valjak prenosi konstantno određenu količinu boje. Ukoliko su potrebne različite količine boje, onda se raster valjci moraju izmeniti.

Količina prenešene boje zavisi od parametara aniloks valjka i reoloških osobina štamparske boje. Najvažnije karakteristike aniloks valjka su linijatura ($1/\text{cm}$), koja označava broj ćelija za boju na površini cilindra, kapacitet boje cm^3/m^2 , oblik i dubina ćelija za boju, itd.

U komori se sve ćelije aniloks valjka pune bojom u tačnom iznosu. Pomoću rakela koji naleže na cilindar se skida višak boje i u ćelijama ostavlja tačno definisana količina boje.

Tabela 5: Parametri aniloks valjka u zavisnosti od vrste štampe

Vrsta štampe	Preporučeni opseg rastera ($1/\text{cm}$)
Pun ton	50-120
Linije i tekst	80-160
Poluton	200-500



- 1-pritiski cilindar sa štamparskim materijalom
- 2-cilindar sa štamparskom formom
- 3-rasterski valjak
- 4-uronjivi valjak
- 5-kada sa bojom
- 6-rakel (brisač)

Slika 12: Šema uređaja za bojenje sa rakelom

3.2.3 Sušenje štamparskih materijala

Sušenje odštampanih folija ima značajan uticaj na kvalitet štampe, odnosno osobine ispitivanih fleksibilnih materijala u ovom radu.

U flekso štampi se koriste, pre svega, boje na bazi rastvarača, a osnovni proces sušenja je isparavanje. Područje isparavanja je na temperaturi ispod 100 °C. Sušenje se obavlja u sušaču koji se sastoji od duvaljki koje suše štampanu površinu toplim ili hladnim vazduhom i na taj način ubrzavaju isparavanje rastvarača. Kod mašina sa linijskim i vertikalnim rasporedom štamparskih jedinica sušači mogu da budu postavljeni iza svake štamparske jedinice.

Vreme sušenja boje bitno zavisi od temperature isparavanja rastvarača, kao i od brzine kretanja folije, dovedene toplote i turbulencije vazduha. Kod povišene temperature sušenja (ca. 100 - 115 °C) može nastupiti prekomerno istezanje štampanog materijala i time prouzrokovati pogrešan napon zatezanja trake. Različito zagrevanje na pojedinim uređajima za štampanje (međusušenje), može takođe dovesti do odstupanja u paseru. Prebrzo sušenje štamparske boje može isto tako prouzrokovati teškoće sa paserom, jer štamparska forma od sledećeg agregata može zbog toga zadržati traku folije, a u ekstremnom slučaju traka se može namotati na cilindar štamparske forme ili puknuti.

Ako se štampa samo sa jednom bojom ili se pojedine boje ne dodiruju ili ne leže jedna na drugoj, tada je dovoljno da se sušenje štampane folije završi do nailaska na uređaj za namotavanje. Kod štampanja velikih površina sa bojom na boju ili kod štampanja polutonova, boja se odmah nakon štampanja suši što je moguće više. Mora se sprečiti da boja koja sledi omekša prethodno štampanu boju ili se pod određenim okolnostima sa njom pomeša. Ona se ne sme ni odvojiti od folije.

Konačnim sušenjem, obično u kanalima za sušenje sa toplotom i vazduhom, sprečava se da se folije međusobno slepe, da na poledini dela folije koji sledi ne zaostane boja ili rastvarač, čiji miris onda može ostati u materijalu folije.

Posebno značajnu ulogu i mogući uticaj na ispitivane karakteristike folija ima međusušenje koje je nužno kod štampanja na neupojnim materijalima kao što su ispitivane folije.

Proces sušenja se sastoji od tri faze. Prva faza se sastoji iz zagrevanja štamparskog proizvoda, druga faza sadrži konstantno isparavanje, a u trećoj fazi dolazi do pada stepena isparavanja. Štamparska boja mora nakon tih faza biti takva da se u sledećem stadijumu štamparskog procesa može ostvariti kvalitetno primanje nove boje.

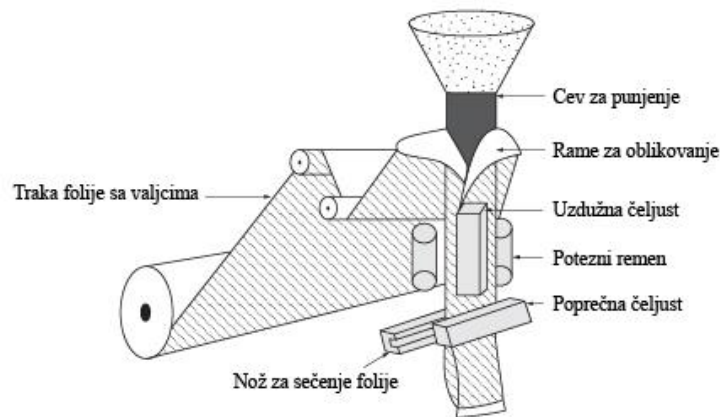
3.3 Proces pakovanja

Za pakovanje hrane u fleksibilnu ambalažu koriste se mašine za pakovanje koje rade na principu "oblikuj-napuni-zavari". Razlikuju se vertikalne i horizontalne pakerice. Izbor mašine zavisi od vrste ambalažnog materijala i karakteristika proizvoda. Na primer, ako je proizvod suv i slobodno padajući, najbolji izbor je vertikalna mašina. Na vertikalnim pakericama se mogu oblikovati različite vrste kesa, pri čemu se razlikuju ravne kese, kese sa dnom i kese sa naboranim stranama.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

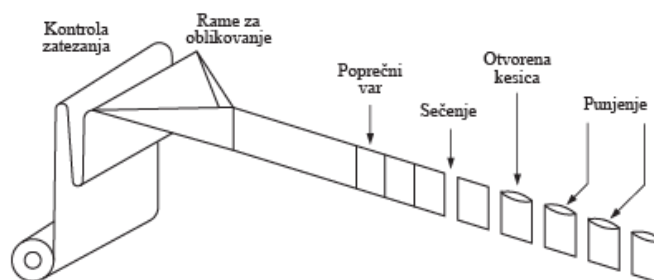
Osnovne operacije kod mašine za pakovanje su transport materijala za pakovanje, formiranje, zatvaranje i razdvajanje ambalaže. Na slici 13 prikazana je vertikalna mašina za pakovanje. Princip rada ovih mašina je sledeći:

1. Folijski namotak na rolnu se vodi preko preusmerenih valjaka do tzv. ramena
2. Na ramenu se folija oblikuje u crevo
3. Alat za zavarivanje u uzdužnom smeru zatvara crevo
4. Vučni kaiš (potezni remen) povlači foliju sa ramena na dole
5. Roba/sadržaj pada preko odgovarajuće cevi u crevo
6. Crevo dobija poprečne zavare pomoću alata za zavarivanje i dobija oblik kese. Prvi poprečni var se izrađuje pre, a drugi nakon punjenja sadržaja. Nož za odsecanje razdvaja napunjenu kesu koja zatim pada dole i dalje se transportuje.



Slika 13. Vertikalna mašina za oblikovanje i pakovanje

Proces formiranja kesica u horizontalnoj mašini za pakovanje počinje kada se ravna traka odmotava sa rolne (slika 14). Folijski materijal se provlači kroz niz valjaka, vođica i zateznih uređaja. Ujednačeno zatezanje materijala je važno za nesmetan rad mašine. Ambalažni materijal iz odštampane rolne je preklopljen na pola. Zatim se materijal vari sa bočne i donje strane. Uređaj za odsecanje odvaja pojedinačne kesice koje se dalje transportuju. Neposredno ispred mesta punjenja sadržaja, stezaljke se približavaju, uzrokujući otvaranje vrhova kesice. Punjenje se može izvršiti u jednom ili dva koraka.

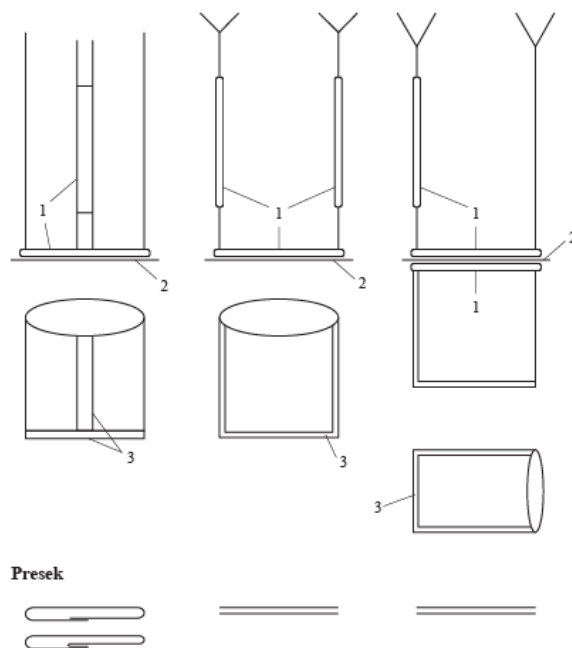


Slika 14: Horizontalna mašina za pakovanje

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Zatvaranje ambalaže

Kod fleksibilnih ambalažnih materijala najčešći tip zatvaranja je formiranjem vara, spajanjem dva sloja primenom toplote uz blagi pritisak grejača na varilici, pri čemu se nosivi slojevi ambalaže ne smeju plastično deformisati. Zavar mora biti optimalno izveden zbog potrebne čvrstoće, obezbeđenja nepropusnosti, izgleda, uticaja na sadržaj ambalaže i prohodnosti na mašini za pakovanje. Na slici 15 prikazane su različite vrste kesica dobijene zavarivanjem.



1-alat za zavarivanje, 2-nož, 3-formirani var

Slika 15: Različite vrste kesica dobijene zavarivanjem ravnih ambalažnih materijala

4. ANALIZA ZAHTEVA ZA FLEKSIBILNE AMBALAŽNE MATERIJALE

Za ambalažu se u toku njenog životnog ciklusa postavljaju različiti zahtevi (slika 16). Krajnji cilj je proizvodnja ambalaže koja će zadovoljiti navedene zahteve, uz minimalne proizvodne troškove (Kim, 2019).

Životni ciklus počinje kod proizvođača ambalažnog materijala koji, zavisno od stepena gotovosti, isporučuje sirovinu, odnosno poluproizvod (npr. papir, folija), proizvođaču ambalaže. Proizvođač ambalaže obrađuje taj poluproizvod dalje u gotov štampani i konfekcionirani proizvod.

Nakon pakovanja, životne namirnice se skladište i otpremaju različitim putevima prodaje za potrošače.

Iskorišćena ambalaža dolazi od potrošača indirektno preko različitih sistema sakupljanja do sistema za zbrinjavanje.

Pri iskorištenju otpadne ambalaže važi načelo da prednost ima ambalaža koja je podnošljivija za okolinu (u smislu ponovne upotrebe, prerade materijala ili energetskog iskorišćenja).

U životnom ciklusu fleksibilne ambalaže mogu se definisati određene interesne grupe. Svaka grupa ima svoje vlastite interese i ciljne predstave u vezi sa tim kakav učinak treba, odnosno može imati neka ambalaža. Iz toga se izvode različiti profili zahteva, koji mogu biti međuzavisni i konfliktni, ili se teško mogu međusobno kombinovati (slika 17).

Pri kupovini nekog proizvoda, posebno je značajan dizajn, tj. vizuelno dejstvo ambalaže, kao i mogućnost lake identifikacije proizvoda.

Postavljanje i zadovoljenje zahteva je složenog karaktera, pri čemu izbor ambalaže uvek predstavlja kompromisno rešenje. Optimalna ambalaža je ona koja najbolje objedinjuje kompleksne zahteve (Ahlhaus, 1997).

Ne pretendujući na sveobuhvatnost, u sledećem se daje pregled zahteva pakovane robe i štampane fleksibilne ambalaže (Coles, R. & McDowell, 2003):

1. Zahtevi sa aspekta proizvođača pakovane robe u cilju osiguranja kvaliteta robe, ekonomičnosti i dizajna

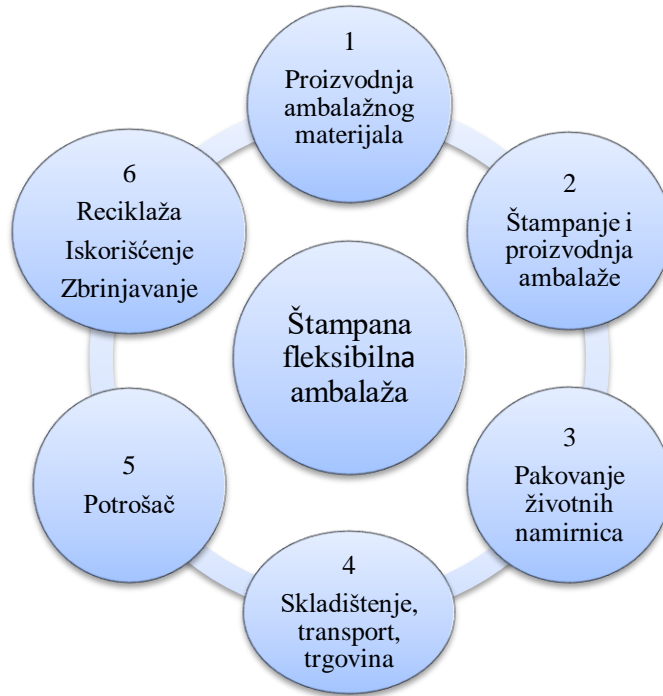
1.1. Kvalitet pakovane robe

- zahtevi s obzirom na spoljne uticaje (uslovi transporta, skladištenja, klimatski uslovi)
- zahtevi za izbor odgovarajućeg ambalažnog materijala s obzirom na mehaničke i optičke osobine, propustljivost i štetne ili neugodne uticaje na okolinu u vidu isparljivih jedinjenja (VOC-volatile organic compounds)

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

1.2. Ekonomičnost/troškovi fleksibilne ambalaže

- prihvatljiva cena ambalaže, uzimajući u obzir i naknadne troškove, npr. za zbrinjavanje otpada
- troškovi s obzirom na prikladnost za mašinsko pakovanje



Slika 16: Životni ciklus štampane fleksibilne ambalaže za životne namirnice (BÖLW, 2011)

1.3. Dizajn fleksibilne ambalaže s obzirom na:

- vizuelno dejstvo ambalaže (materijal, oblik, otisak tj. kolorne karakteristike)
- rukovanje - otvaranje/zatvaranje, manipulativnost

2. Zahtevi sa aspekta proizvođača štampane fleksibilne ambalaže u cilju osiguranja kvaliteta robe, ekonomičnosti i funkcije dizajna

2.1. Fizičke i hemijske osobine fleksibilne ambalaže

Fizičke osobine (debljina i površinska masa, čvrstoća na istezanje i probojnost, istezljivost, krutost, propustljivost za vodenu paru, gasove, svetlo, klimatska postojanost, zatvaranje lepljenjem, zavarivanjem, podobnost za štampanje).

Hemijske/fiziološke osobine (sadržaj rastvarača, neutralan miris i ukus, fiziološka ispravnost prema odgovarajućim propisima).

2.2. Ekonomičnost/troškovi fleksibilne ambalaže

- prihvatljiva cena izrade fleksibilne ambalaže, optimalno prikladne za pakovanu robu
- prihvatljiva cena izrade mašinabilne ambalaže (na mašinama za štampanje i pakovanje), s obzirom na čvrstoću, krutost, klizavost, zavarivost, slepljivanje
- troškovi zbrinjavanja i reciklaže ambalaže

2.3. Dizajn fleksibilne ambalaže s obzirom na:

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

- površinske karakteristike (prijanjanje boje, kolorne karakteristike, sjaj, glatkoću, podobnost za štampanje)



Slika 17: Zahtevi na fleksibilnu ambalažu

Zahtevi vezani za sadržaj u fleksibilnoj ambalaži

Fleksibilna ambalaža se koristi za pakovanje raznih vrsta prehrambenih proizvoda sa najrazličitijim prerađevinama na bazi žitarica, voća, povrća, šećernih, mlečnih, mesnih i drugih proizvoda. S obzirom da hranu čine različiti sastojci, kao što su voda, ugljeni hidrati, belančevine, lipidi, vitamini i drugo, jasno je da se za ambalažu postavljaju različiti zahtevi (Buchner, 1999). Pravilan izbor ambalažnog materijala ključan je za zdravstvenu i nutritivnu ispravnost pakovanog sadržaja.

U ovom delu rada biće dat osvrt na neke od zahteva životnih namirnica, kako bi se dobile prve naznake za izbor ambalaže. Jedna životna namirnica, zavisno od hemijskog i fizičkog sastava, reaguje različito sa sobom i sa okolinom. Ta međuzavisnost se mora uzeti u obzir pri izboru ambalaže. Uopšteno, postoji nekoliko grupa proizvoda čije su karakteristike značajne za izbor folija:

- Higroskopski proizvodi, koji menjaju svoj ili njihov sadržaj vode pri promeni relativne vlažnosti vazduha (npr. začini i dekstroza).
- Proizvodi kod kojih se može računati sa delaminacijom (npr. začini sa visokim sadržajem eteričnih ulja se rastvaraju u polietilenskom sloju za zavarivanje). Difundirane supstance mogu prouzrokovati delaminaciju (npr. muskat, ruža, limunovo ulje). Agresivni začini, kod kojih se može računati sa delaminacijom.
- Jako aromatični proizvodi, od čijih aromatskih supstanci treba biti zaštićena okolina (npr. suvi ekstrakti supe, beli luk),

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

- Proizvodi osetljivi na svetlost, koji menjaju svoju boju pri delovanju svetlosti (npr. paprika, askorbinska kiselina).

Primarni zahtev štampane fleksibilne ambalaže u vezi sa trajnošću životnih namirnica jeste nepropustljivost, naročito zbog vode, vodene pare, ali i gasova, kao što su kiseonik, ugljen dioksid i azot (Galić i dr., 2001).

Dejstvo vodene pare

Dejstvo vodene pare je značajno s obzirom na moguće fizičko, mehaničko, hemijsko i mikrobiološko stanje životne namirnice.

Vodena para potpomaže procesima kvarenja, pre svega kod higroskopskih životnih namirnica. S druge strane, minimalna propustljivost vodene pare sprečava sušenje nekih proizvoda (npr. kornfleksa, biskvita).

Postoje suve životne namirnice koje mogu da upijaju vlagu. Posledica toga bi bilo stvaranje grudvi kod praškastih materijala, gubitak hrskavosti proizvoda (npr. pomfrit, čips) i promena izgleda, mirisa i ukusa.

Sa druge strane, vlažni proizvodi treba da očuvaju sadržaj vlažnosti. To se može postići dodacima životnim namirnicama, a ako to nije dovoljno moguće, tada ambalaža mora da spreči gubitak vlage. Ukoliko se to ne postigne, vlaga se može izgubiti i proizvod osušiti. Rezultat toga je gubitak vrednosti, pa čak i neupotrebljivost proizvoda (npr. sasušen hleb).

Osetljivost na kiseonik

Između kiseonika i životne namirnice dolazi do reakcije, što prouzrokuje ireverzibilnu promenu sadržaja. U osnovi se radi o tome da li je količina i parcijalni pritisak kiseonika u ambalaži uopšte dovoljan da prouzrokuje nedozvoljeno smanjenje kvaliteta. Drugo, da li će se brzina sa kojom se odvija oksidativna promena, kod očekivane temperature, kvalitativno odraziti unutar vremena. Ukoliko nastupi oksidacija sa životnom namirnicom, proizvod se, s obzirom na hranljivost, može fizički, hemijski i fiziološki promeniti.

Osetljivost na svetlo

Na svetlo su osetljivi, pre svega, ulja i masti, ali i sve životne namirnice koje sadrže mlečne masti. Neželjena reakcija može nastupiti ukoliko se životne namirnice (mleko, majonez, maslac itd.) izlože svetlosti. Energija svetlosti može biti dovoljna da životnoj namirnici promeni ukus i boju. Tako, na primer, vitamin C (askorbinska kiselina) zahteva zaštitu od svetla, jer se taj spoj može rastvoriti usled dejstva svetlosne energije. Ako je dodatno prisutan i kiseonik, taj efekat se još više pojačava.

Osetljivost na miris

Arome i mirisi su lebdeća organska jedinjenja, koja se u vidu gasa rasprostiru kroz vazduh i dolaze u spoj sa drugim proizvodom. Kod nekog proizvoda je potrebno, po mogućnosti, konzervirati vlastiti miris i sprečiti da dobije strani miris. Zato je nužna barijera za aromu, ukoliko proizvod ima jak miris (npr. sir, začini itd.), ili može brzo primiti neki drugi miris (npr. čokolada).

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Na tržištu postoje različite kombinacije fleksibilnih ambalažnih materijala za različite sadržaje. U tabeli 6 navedeni su neki primeri moguće fleksibilne ambalaže za pojedine životne namirnice. Podaci u toj tabeli ne pretenduju na potpunost.

Tabela 6: Primer mogućih kombinacija fleksibilnih ambalažnih materijala za pojedine životne namirnice

Životna namirnica	Ambalažni materijal						
	PET/PE, kaširan	PET/PP, PET filmovi, mono i koekstrudirani (sa termolakom)	OPP monofolije	PE monofolije	PET/Al/PE, kaširan	metalizovane folije	Papir/PE, oslojen
	1	2	3	4	5	6	7
Prašak za puding, šlag i pecivo					+	+	+
Smeše za kolače					+	+	+
Kornfleks, musli		+		+	+	+	+
Tost hleb, baget	+		+				
Kolači	+		+		+	+	
Keks, vafli i drugo dugotrajno pecivo			+			+	+
Orasi, pečeni i slani	+	+			+	+	
Praline, čokolada, marcipan	+		+		+	+	
Snek čokoladice	+	+	+			+	
Gotova jela (smrznuta, ohlađena i sterilisana)	+			+			

Od ostalih zahteva za fleksibilne ambalažne materijale mogu se izdvojiti sledeći:

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Zahtevi izrade/obrade

Za prohodnost odnosno mašinabilnost od velikog značaja su klizna svojstva i sa tim u vezi elektrostatička svojstva, kao i krutost odnosno deformabilnost materijala ambalaže.

Dok se za mašinsko pakovanje traži mali koeficijent trenja između ambalaže i podloge, kod nekih procesa taj koeficijent trenja treba biti veći, na primer, kod slaganja pojedinačne ambalaže.

Spajanje ambalažnih folija određenog oblika vrši se pod pritiskom uz određenu toplotu, pri čemu se nosivi slojevi ambalaže ne smeju plastično deformisati. To spajanje je veoma važno i var mora biti optimalno izveden zbog potrebne čvrstoće, obezbeđenja nepropusnosti, izgleda, uticaja na sadržaj ambalaže i prohodnosti na mašini za pakovanje.

Za reklamne svrhe, od velikog značaja je i podobnost materijala ambalaže za štampanje. Dok kod papira i kartona, zbog njihove porozne površine, postoje manji problemi za prijanjanje boje, kod plastičnih materijala su veće teškoće pri štampanju zbog osobina površine. Pored navedenih osobina izrade, odnosno obrade, moraju se uzeti u obzir i drugi parametri, kao npr. krutost savijanja, deformabilnost, skupljanje i dr.

Vrednost (jeftino/skupo)

Za jeftine proizvode bi bio logičan izbor jeftine ambalaže, ali uvek u skladu sa zahtevima koji rezultiraju iz osobina životnih namirnica i kvaliteta ambalaže.

Trajnost

Zavisno od osobina, životne namirnice se mogu vremenski kraće ili duže koristiti. Ambalažne folije moraju ispuniti zadatak za čitavo vreme trajnosti proizvoda. Ambalaža treba da pokazuje iste optičke, kao i fizičke vrednosti na kraju roka korišćenja, kao i prilikom pakovanja. U zavisnosti od dužine životnog ciklusa proizvoda, ambalaža mora biti izrađena za čitav taj ciklus. Tabela 7 pokazuje podobnost fleksibilne ambalaže za pakovanje nekih namirnica u zavisnosti od vrste materijala, sadržaja i načina pakovanja (Coles, R. & McDowell, 2003).

Tabela 7: Podobnost fleksibilne ambalaže za pakovanje pojedinih namirnica

Proizvod	LDPE	OPP	OPP (premazan)
Sveži hleb	***	***	0
Hleb produžene održivosti	0	0	* (MAP)
Snek/krisp (čips)	0	*	***
Biskvit	0	0	***
Orasi	0	0	* (MAP)
Kuvano meso	0	0	**
Zamrznuta hrana	**	*	0

0 - nije podobno

* - kratkotrajno

** - srednje trajno

*** - dugotrajno

MAP - Modified Atmosphere

Packaging (pakovanje u modifikovanoj atmosferi)

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Ekološki zahtevi

U današnje vreme se ti zahtevi moraju neizostavno uzeti u obzir. Za ocenu opterećenja okoline postoje tzv. eko bilanse, koje kvalitativno i/ili kvantitativno određuju uticaj proizvoda (ambalaže) na okolinu tokom čitavog životnog ciklusa proizvoda ili do jednog određenog trenutka prerade (Kohlert, 2017). Kriterijumi za ocenu mogu biti: potrošnja sirovina, energije i vode, opterećenje štetnim materijama i čvrsti otpadi (Balaban, 2014).

Problemi se plastičnom ambalažom se danas često dovode u kontekst sa problematikom plastičnog ambalažnog otpada, a poseban problem predstavlja otpad u okeanima i tzv. mikroplastika čiji efekti na vazduh, vodu i hranu još uvek nisu poznati. Od ukupne količine otpada, samo 30% se reciklira (Ellen MacArthur Foundation, 2016). Takođe, problem je i veliki obim proizvodnje plastične ambalaže sa tendencijom rasta i kratak period korišćenja (najčešće jednokratna upotreba).

Ovi problemi se pokušavaju rešiti uvođenjem cirkularne ekonomije, čiji glavni koncept se bazira na kontinuiranoj ponovnoj upotrebi materijala na ekonomski održiv način, kao i korišćenju obnovljivih izvora, gde god je to moguće.

Evropska unija je 2018. godine usvojila Evropsku strategiju za plastiku u cirkularnoj ekonomiji. Strategija je deo šireg plana razvoja cirkularne ekonomije, a proizilazi iz Akcionog plana za cirkularnu ekonomiju iz 2015. koji je identifikovao plastiku kao prioritarno područje (Plastics in a circular economy, 2021).

Glavna vizija nove ekonomije Evrope za plastiku je pametna, inovativna i održiva industrija plastike, u kojoj dizajn i proizvodnja u potpunosti uvažavaju potrebe ponovne upotrebe, dorade, prerade i recikliranja. Navedene aktivnosti donose i rast novih radnih mesta, smanjuju emisije gasova staklene bašte uz smanjenje zavisnosti za uvoznim fosilnim gorivima (Balaban, 2021).

U cilju poboljšanja ekološkog kvaliteta proizvoda (ekološke izvrsnosti), neophodno je sveobuhvatno pristupiti razvoju proizvoda u toku njegovog čitavog životnog ciklusa. Taj razvoj počinje sa prvim planiranjem odnosno postavljanjem zadatka, a završava se povlačenjem proizvoda ili njegovom reciklažom. Cilj svih faza razvoja proizvoda je njegova izvrsnost u toku čitavog životnog veka. Mogućnost za uticaj na ekološki kvalitet nekog proizvoda su u prve dve faze projektovanja (planiranje, koncipiranje) najveće (Brinkmann i dr., 1994).

I ekološko oblikovanje proizvoda se mora sveobuhvatno razmatrati i to kroz karakteristične faze životnog ciklusa kao što su planiranje, razvoj, nabavka, distribucija, korišćenje i reciklaža proizvoda. U tim fazama se mogu javiti razni ekološki zahtevi o kojima se mora voditi računa:

- u fazi planiranja proizvoda (oblikovanje proizvoda sa što manje otpada, ponovna upotreba delova i materijala, čim manje štetna reciklaža, ispunjenje EKO-normi, obezbeđenje sistema za povrat proizvoda),
- u fazi konstrukcije proizvoda (izbor i označavanje materijala, minimiranje utroška materijala, eliminacija opasnih materijala),

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

- u fazi nabavke proizvoda (minimalni utrošak energije i materijala, minimalna količina opasnih materijala, minimalna emisija u vazduh, vodu, zemljište, minimalna količina proizvodnog otpada i njegova ponovna upotreba),
- u fazi distribucije proizvoda (sigurna manipulacija i transport opasnih materijala, omogućavanje servisiranja složenih proizvoda),
- u fazi korištenja proizvoda (dugotrajnost proizvoda, minimalni utrošak energije i pogonskih sredstava, minimalna emisija materija, zračenja, itd.),
- u fazi reciklaže proizvoda (svesti troškove reciklaže i ekološkog zbrinjavanja na minimum kroz izvrsnost demontaže, sortiranje čistih frakcija, dobijanja ponovo upotrebljivih delova (rezervnih) i minimalnog udela otpada za spaljivanje i deponovanje).

Poseban problem predstavljaju materijali za pakovanje hrane visokih zaštitnih osobina koji se obično sastoje od složenih slojeva različitih polimernih materijala, što čini recikliranje složenim. Smanjivanjem ove složenosti ili dizajniranjem na način koji omogućava lako odvajanje različitih materijala, može se u velikoj meri poboljšati mogućnost recikliranja materijala.

Za poboljšanje podobnosti ambalažnog materijala za ponovnu preradu i korišćenje, pri izboru materijala projektant/dizajner trebaju naročito voditi računa o izboru i oznakama materijala kao i o konstrukcijskoj izvedbi ambalaže.

Osnov za pravilan izbor adekvatnih materijala podobnih za reciklažu, jeste tehničko-tehnološko znanje o polimernim materijala koji se koriste za izradu ambalaže. Prilikom izbora materijala, mora se voditi računa o (Balaban, 2020):

- mogućnostima redukcije vrsta materijala,
- podnošljivosti pojedinih materijala,
- mogućnosti povećanja čvrstoće i
- homogenoj građi ambalaže.

Lako raslojavanje i razdvajanje pojedinih vrsta ambalažnog materijala kao i njihova redukcija, pozitivno se odražavaju na proces sortiranja i podobnost materijala za reciklažu.

Za ocenu podobnosti materijala za reciklažu koriste se definisani podaci od strane proizvođača ambalažnih plastičnih materijala (tabela 8) (Wolters i dr., 1997).

Tabela 8: Podobnost plastičnih materijala za reciklažu (Balaban, 2020)

	PE	PP	PS	PVC	PET	PC	PA
PE	1	3-4	4	4	4	4	2-4
PP	2-4	1	4	4	4	4	2-4
PS	4	4	1	4	3	2-4	3-4
PVC	4	4	2-4	1	4	3-4	4
PET	4	4	4	4	1	1	3-4
PC	4	4	2-4	4	1	1	3-4
PA	4	4	3-4	4	3	4	1
PBT	4	4	2-4	4	3-4	1	3-4

1-kompatibilni; 2-mogu se mešati do 20%; 3-mogu se mešati do 5%;

4-nisu kompatibilni

5. FORMULISANJE KRITERIJUMA ZA OCENU VREDNOSTI FLEKSIBILNIH AMBALAŽNIH MATERIJALA

Da bi se pristupilo vrednovanju i oceni vrednosti fleksibilnog ambalažnog materijala, nakon analize zahteva, neophodno je formulirati kriterijume za vrednovanje. S obzirom na odabrane ambalažne materijale za ispitivanje u ovom radu, pakovani sadržaj, proces štampanja i pakovanja, kao i mogućnost njihovih ispitivanja, detaljnije će biti objašnjeni odabrani kriterijumi za vrednovanje (slika 18).



Slika 18: Kriterijumi za ocenu vrednosti fleksibilnih ambalažnih materijala

5.1 Mehaničke osobine ambalažnih folija

5.1.1 Zatezna čvrstoća i izduženje

Tokom obrade folije su opterećene na istezanje, pri čemu čvrstoća i izduženje folija predstavljaju važne parametre u okviru njihovih mehaničkih osobina. Ti parametri pokazuju pogodnost materijala za prohodnost (mašinabilnost) u toku čitavog tehnološkog procesa (štampanje, kaširanje, pakovanje), kao i za otpornost pri transportu, manipulaciji i skladištenju (Balaban-Đurđev, 2006).

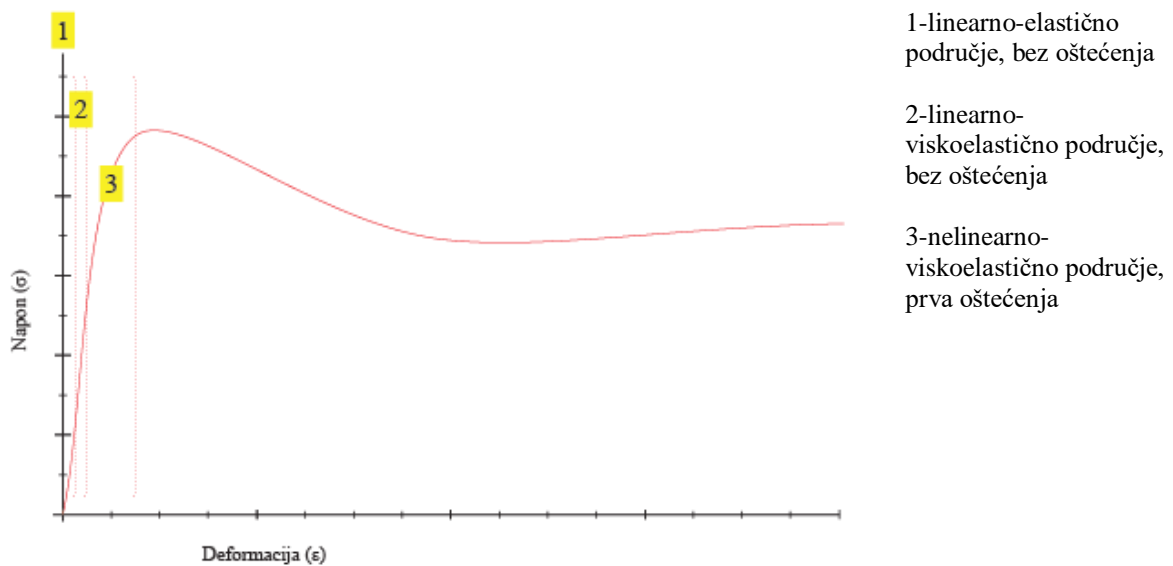
Da bi se obezbedila prohodnost folija, one moraju imati najmanje takvu čvrstoću da izdrže maksimalnu zateznu silu. Kao minimalna sila kidanja materijala za ambalažu, i to kako na bazi polimera tako i na bazi papira, prema literaturnim podacima se uzima petostruka (u mnogim slučajevima i mnogo veća) vrednost očekivane maksimalne zatezne sile (Hertlein, 1998).

Folije su naročito na mašinama za pakovanje izložene zateznim silama koje moraju sigurno podneti, kako bi ostale stabilne po dimenzijama i kako ne bi došlo do smetnji u toku rada. Budući da se radi o diskontinuiranom transportu, usled ubrzanja javljaju se i dodatne zatezne sile u poprečnom smeru.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Deformacija polimernih materijala pod delovanjem vanjske sile može biti različita i uslovljena je vrstom polimernog materijala, odnosno polimerne strukture i temperaturom (Vujković, 1997).

Važne informacije o osobinama fleksibilnih materijala mogu se dobiti iz odnosa naprezanje/deformacija (eng. stress/strain), što je značajno sa aspekta poznavanja materijala pri krajnjoj upotrebi. Polimeri su viskoelastični materijali, što znači da se tokom mehaničkih opterećenja ponašaju kao viskozne tečnosti i elastična čvrsta tela. Kod delimično kristalnih termoplastičnih polimera kriva zatezanja je prikazana na slici 19 (Praktikum - Werkstoffe des Maschinenbaus).



Slika 19: Prve tri faze deformacije prilikom ispitivanja čvrstoće polimernih folija

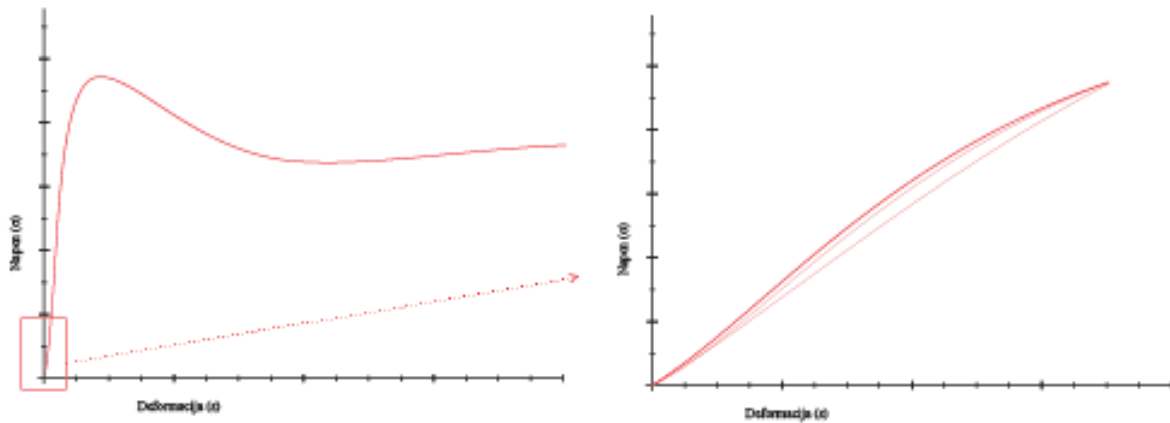
U skoro svim primenama ambalažnih folija, linearno elastično i linearno viskoelastično područje igraju ulogu. Prema Schröderu (2011) do opterećenja folija dolazi u blagim područjima deformacije (npr. 1 – 2 %), koje se može pojaviti kod mašina za štampanje i pakovanje. Iz tog razloga je naročito potrebno analizirati i donji deo krive naprezanja, gde se zatezna čvrstoća materijala određuje sa tzv. 1 % ili 2 % modulom sekante (slika 20). Modul sekante odgovara nagibu sekante, što znači ukoliko je veći modul sekante, to je kriva strmija.

Deformacija plastomera pri istezanju manjem od 1 % ima osobinu deformacije pod delovanjem spoljašnje sile (elastična deformacija). Prestankom delovanja sile, elastična deformacija trenutno nestaje. Povećanjem naprezanja dolazi do ireverzibilnih promena (plastična deformacija) (Vujković i dr., 2007).

U cilju detaljnog opisa karakteristika folija s obzirom na čvrstoću se, inače, ispituje čvrstoća i istezanje pri maksimalnoj sili, čvrstoća i istezanje pri kidanju, naprezanje i istezanje na granici plastičnosti.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Međutim, detaljno ispitivanje svih navedenih karakteristika nije ovde bilo moguće. Ovde je izvršeno samo ispitivanje čvrstoće i istežanje pri kidanju, koje je dovoljno da pokaže uticaj procesa štampanja na promenu čvrstoće i istežanja folija.



Slika 20: Određivanje modula sekante

5.1.2 Klizavost

Fleksibilna ambalažna folija, u svojim različitim primenama, mora lako da klizi preko folije i metalnih površina. Klizavost (trenje) ima veliki značaj za prohodnost tj. mašinabilnost kod kretanja folije kroz mašinu za štampanje kao i za ponašanje folije prilikom daljnje obrade, naročito kod mašina za pakovanje. Ako je površina folije veoma glatka, može doći do teškoća kod ambalaže koja se slaže jedna na drugu zbog mogućeg iskliznuća. Sa druge strane, prevelik koeficijent trenja, odnosno prevelika adhezija između samih folija, može pogoršati mašinabilnost i čak dovesti do kidanja.

Neki polimeri koji se koriste za izradu ambalaže, kao što je npr. PE, imaju velike vrednosti koeficijenta frikcije. Zato je uobičajena praksa u industriji da se dodaju klizna sredstva za njegovu redukciju i kontrolu. Ovi niskomolekularni aditivi dolaze do površine gde formiraju podmazujući sloj, tako da se dodatkom kliznih sredstava može postići optimalna klizavost. Prevelika količina ovih aditiva može prouzrokovati probleme prilikom štampanja, kaširanja i termozavarivanja (Morris, 2017).

Lakoća klizanja se karakteriše koeficijentom trenja. Koeficijent trenja (μ) predstavlja odnos sile koja je potrebna za klizanje filma preko površine (F_{μ}) i ukupne sile normalne na tu površinu (F_N).

$$\mu = F_{\mu} / F_N \quad (1)$$

Kao granična vrednost se kod mašina za pakovanje uzima $\mu \geq 1$, a smatra se da je daljnja obrada u procesu štampanja i pakovanja moguća bez problema za koeficijente trenja između

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

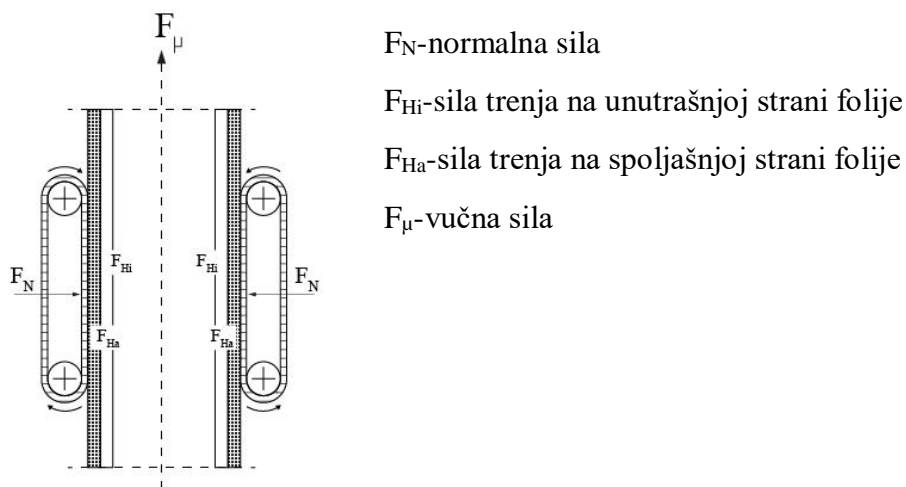
folije i čelika: $0,1 \leq \mu \leq 0,2$ za monofolije i $0,3 \leq \mu \leq 0,4$ za kombinovane folije (Hertlein, 1998).

Da bi se sprečilo proklizavanje folije kod mašine za pakovanje, koeficijent trenja mirovanja između njene spoljne/štampane strane i vučnog remena za kretanje folije mora biti 10 puta veći nego između njene unutrašnje strane i metalnih delova preko kojih se kreće (razni koturovi, delovi za oblikovanje, usmeravanje i savijanje, valjci).

Trenje klizanja između folije i ramena pakerice treba po mogućnosti da bude nisko, pošto se folija oblikuje preko ramena. Međutim, to trenje ne sme biti prenisko, pošto bi se folija u tom slučaju nekontrolisano ponašala pri oblikovanju.

Transport folije se vrši na bazi povlačenja folije trenjem između folije i vučnog kaiša uređaja (slika 21), koje mora biti dovoljno veliko, kako bi se ostvarilo sigurno povlačenje folije.

Ispitivanje koeficijenta trenja služi u prvom redu za kontrolu kvaliteta. Ponašanje folije s obzirom na trenje u odnosu na mašinske delove je karakteristični parametar za opis prohodnosti/mašinabilnosti. Međutim, kod polimernih folija trenje nije baš prikladno za karakterisanje njihove prohodnosti, jer na isto (prema iskustvima iz prakse) utiču i drugi faktori, kao što je elektrostatski naboj lokalne promene temperature, trošenje/abrazija materijala.



Slika 21: Kretanje folije pomoću vučnog remena (Hertlein, 1998)

Kod procesa štampanja i dalje obrade, na samom početku kretanja folije radi se o trenju mirovanja. Nakon toga, sledi kretanje folije preko kliznog para, koji može biti od različitog materijala (čelik, aluminijum), pri čemu se radi o trenju klizanja. Prema (Hertlein, 1998) nije još konačno razjašnjeno pitanje koje od navedenih trenja, odnosno koeficijenata trenja, predstavlja kritičnu veličinu za prohodnost (mašinabilnost).

Optimalno podešavanje veličina koeficijenata trenja i sposobnosti klizanja u praksi, predstavlja kompromis između različitih zahteva u pogledu mašinabilnosti pri izradi štampanih folija i pakovanja.

5.2 Barijerne osobine fleksibilnih ambalažnih materijala

Svi polimerni materijali su manje ili više propustljivi za molekule gasa i vodene pare, pa ova karakteristika uslovljava njihovu primenu za pakovanje određenih prehrambenih proizvoda. Kontakt između atmosferskih gasova i prehrambenih proizvoda može dovesti do biohemijskih ili fizičkih promena koje mogu uticati na kvalitet hrane. Zato propustljivost ima naročito veliki značaj kod ambalaže za životne namirnice. Visoko vredni proizvodi se moraju zaštititi od dejstva iz okoline i od izlaza važnih materija iz samog sadržaja u ambalaži. Velika ili mala propustljivost folija za određene materije može, zavisno od područja primene, biti poželjna ili nepoželjna. Tako se kod najvećeg broja primene zahteva mala propustljivost za kiseonik, kako bi se sprečilo kvarenje sadržaja u ambalaži zbog oksidacije.

Permeacija, tj. prolaz molekula gasa kroz ambalažne materijale, može nastati između štampanih folija i njihovog sadržaja. Ona može polaziti od sadržaja ambalaže i uticati na dodatno obojenje štamparske boje od strane sastavnih materija samog sadržaja ambalaže (npr. kod određenih začina) i obrnuto, od ostatka rastvarača u štamparskoj boji ka sadržaju ambalaže.

Postoje dva modela transporta materije kroz ambalažu. Jedan je prolaz kroz pore i kapilare, a drugi je prolaz čiji uzrok je difuzija. Prvi model ima značaj kod folija sa fabričkim greškama, pukotinama i naborima. Mnogo značajniji je difuzioni model koji opisuje prolaz gasa kroz netaknute polimerne folije.

Difuzioni model se može primeniti kod folija debljine između 10 μm i 1 μm (Hertlein, 1998). Prolaz kroz polimernu membranu zavisi od oblika, veličine molekula i hemijskog sastava gasa, od fizičkih i hemijskih osobina polimera, kao i od interakcije između polimera i permeanta.

Poznati zakoni vezani za propustljivost su:

- Grahamov zakon (1833), koji navodi da je brzina difuzije gasa obrnuto proporcionalna kvadratnom korenu gustine.
- Fikov zakon (1855), koji navodi da je količina difundujućeg gasa proporcionalna koncentraciji i vremenu i obrnuto proporcionalna debljini podloge kroz koju prolazi.
- Henrijev zakon (1803), koji navodi da je količina gasa apsorbovana od date količine tečnosti na datoj temperaturi direktno proporcionalna parcijalnom pritisku gasa.

Permeacija kroz foliju je proces koji se odvija u fazama (slika 22).

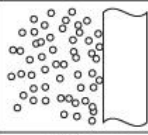

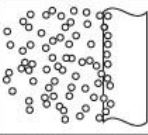

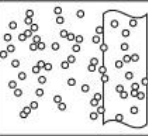

Gas se prvo adsorbuje na stenki folije i rastvara u foliji (apsorpcija) na strani većeg parcijalnog pritiska, pri čemu je koncentracija toga gasa (c) prema Henry-jevom zakonu za adsorpciju:

$$c = S \cdot p \quad (2)$$

S ...koeficijent rastvorljivosti gasa

p ...parcijalni pritisak gasa

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Unutrašnjost	Stenka	Spoljašnjost	Proces
			Adsorpcija
			Difuzija
			Desorpcija

Slika 22: Proces permeacije kroz foliju

U sledećoj fazi, gas prolazi kroz foliju u rastvorenom stanju u smeru manjeg parcijalnog pritiska, odnosno pada koncentracije.

Difuzija je uvek posledica razlike koncentracije u materijalima, koja se nastoji izravnati. Kod te tzv. molekularne difuzije, odvija se toplotno kretanje molekula gasa kroz prostore između molekula čvrstog tela.

Za određivanje količine gasa koja prođe u jedinici vremena kroz jedinicu površine folije A , koristi se Fick-ov zakon, prema kojem je ta količina gasa proporcionalna gradijentu koncentracije gasa rastvorenog u foliji:

$$q = -D \cdot \frac{dc}{dx} \quad (3)$$

Ukupna količina difundirajućeg gasa je:

$$Q = -D \cdot A \cdot t \cdot \frac{dc}{x} \quad (4)$$

q ... jedinična količina gasa

dc ... razlika koncentracija gasa na površinama folije

D ... koeficijent ili konstanta difuzije

A ... površina izložena difuziji

t ... vreme

x ... debljina folije

Koeficijent rastvorljivosti gasa (S) u foliji:

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

$$S = A \cdot \frac{dc}{x} \quad (5)$$

Koeficijent propustljivosti (P):

$$P = D \cdot S \quad (6)$$

Koeficijent propustljivosti P je specifična karakteristika koja zavisi od materijala i temperature. On je brojčano jednak zapremini gasa odnosno jediničnoj propustljivosti gasa u cm^3 odnosno ml kroz foliju površine 1 m^2 i debljine $1 \mu\text{m}$, u jednom danu pri $23 \text{ }^\circ\text{C}$ i razlici parcijalnih pritisaka od 1 bara ($1 \cdot 10^5$) Pa

$$\text{Merna jedinica: } \frac{\text{ml ili cm}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{bar}}$$

Desorpcijom i izlazom rastvorenog gasa na drugu stranu, završava se proces permeacije.

Sređivanjem prethodnih jednačina dobije se i drugi oblik jednačine:

$$P = \frac{Q \cdot x}{A \cdot t \cdot dp} \quad (7)$$

Q ... izmerena količina propuštenog gasa

dp ... pad pritiska

Prethodne jednačine pokazuju da je za propustljivost odgovorna s jedne strane rastvorljivost, prema Henrijevom zakonu, a s druge strane difuzija prema Fikovom zakonu molekula gasa u foliju. Iz prethodne jednačine proizlazi da se radi o količini gasa koja u stacionarnom stanju u vremenu t [dan] prođe kroz spoljnu površinu ambalaže A [m^2], pri razlici parcijalnih pritisaka dp [bar] i određenoj temperaturi.

Propustljivost na gasove je zavisna od vrste polimernog ambalažnog materijala, njegovog polariteta i uzajamnog dejstva sa gasom. Omekšivači, punioci i pigmenti, kao i proces štampanja utiču na propustljivost folija i prema Alhausu (Ahlhaus, 1997), u najviše slučajeva povećavaju propustljivost. To je, naročito, slučaj kada se radi o lošoj konjugaciji (vezivanju punioca ili pigmenata u matrici polimernih materijala).

Na promenu karakteristika folija s obzirom na propustljivost, u procesu štampanja i obrade ambalažnih folija, može uticati i temperatura u procesu sušenja, kao i mehaničko opterećenje u toku transporta ambalažnih folija.

Uticaj temperature na propustljivost istraživan je u radu Mrkić i dr. (2007). Do $40 \text{ }^\circ\text{C}$ propustljivost je skoro ista, dok je na 50°C , a zatim na 60°C registrovan porast propustljivosti, uglavnom zbog pojačanog kretanja polimernih segmenata i povećanog nivoa prodirućih molekula.

Prema Gosh (2015), gubitak barijere i pojava rupa kod polimernih ambalažnih materijala može biti uzrokovana procesom pakovanja (naročito kod vertikalne mašine za pakovanje).

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

U slučaju propustljivosti na gasove kroz višeslojne folije, u ravnotežnim uslovima prolaz gasa je jednak prolazu gasa kroz svaki pojedinačni sloj višeslojne folije (slika 23).

Prolaz gasa u stacionarnom stanju može se opisati (Hertlein, 1998):

$$\dot{V} = P \cdot A \frac{\Delta p}{l} = p_n \cdot A \frac{\Delta p_n}{l_n} = \dot{V}_n \quad (8)$$

P -koeficijent permeacije višeslojne folije,

P_n -koeficijent permeacije n -tog sloja,

Δp -razlika pritiska višeslojne folije,

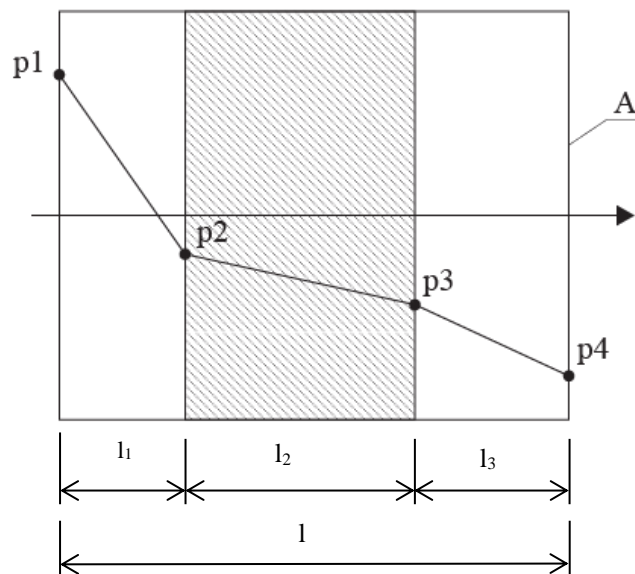
Δp_n -razlika pritiska n -tog sloja,

l -debljina višeslojne folije,

l_n -debljina n -tog sloja,

A -površina permeacije,

\dot{V}_n -prolaz gasa kroz n -ti sloj.



Slika 23: Prolaz gasa kroz višeslojnu foliju i razlika pritiska kroz troslojnu višeslojnu foliju

5.3 Kvalitet otiska

5.3.1 Značaj površinskog napona

Površinske karakteristike polimernih ambalažnih materijala za pakovanje hrane, kao što su mogućnost štampanja, kvašenje, zavarivanje, upijanje boje, prijanjanje na površinu hrane ili na druge polimere su od velikog značaja za dizajnere i inženjere ambalaže za hranu (Kim i dr., 2014).

Kvalitet štampe je pojam kojeg je teško definisati, jer on, pored ostalog, zavisi od vrste odštampanog proizvoda. Na primer, ukoliko se radi o štampi samo neke informacije, visok kvalitet je postignut sa dobrom čitljivošću. Kod višebojne štampe značajno je predstaviti boje, gradijente itd., a kod višebojne luksuzne štampe, kod koje se radi o reklami proizvoda, zahtevi na kvalitet su mnogo veći.

Kada se govori o kvalitetu štampe, odnosno pojedinim kriterijumima koji ga određuju, može se reći da nije lako utvrditi koji od pojedinih kriterijuma ga jasnije karakteriše. Naime, u proizvodnom procesu štampe, otisak se proglašava dobrim i prihvatljivim kada ga klijent, odnosno poručilac štampanog materijala, overi. Sa te strane, može se reći da je subjektivna ocena klijenta merilo kvaliteta. Objektivno vrednovanje kvaliteta štampe se postiže merenjem odgovarajućih parametara pomoću uređaja i standardizacijom procesa štampe.

Na kvalitet štampe u procesu štampanja utiču različiti faktori, kao što su konstrukcija i stanje štamparske mašine, brzina i pritisak štampe, vrsta sistema za štampanje i štamparske forme, vrsta supstrata i boje. Jedan od značajnih faktora je kvašenje boje na štamparsku podlogu (Rentzhog i Fogden, 2006; Brandt, 2015).

U procesu štampe, štamparska boja (tečnost) mora dobro okvasiti sistem valjaka štamparske mašine, štamparsku formu i štamparski materijal (čvrsta tela), kako bi se ostvario ravnomeran prenos boje od kade za boju do materijala za štampanje kao i besprekoran otisak na materijalu.

Štamparska boja se prenosi od valjka do valjka i u svakom procepu između valjaka dolazi do razdvajanja filma boje u sredini i transporta do sledećeg valjka, dok se druga polovina filma zadržava na predajnom valjku (Balaban-Đurđev i dr., 2008). Kada na prvi valjak nailazi drugi valjak sa nižim površinskim naponom, onda se film boje u procepu valjaka tako razdvaja, da se na drugi valjak predaje daleko manja količina boje. To može uticati nepovoljno na kvalitet štampe, tj. na jačinu boje. Posebna pažnja se pritom mora obratiti na poslednji element navedenog niza - štamparski materijal, odnosno foliju. Naime, ako je razlika površinskog napona između štamparskog materijala i boje premala ili je napon materijala čak ispod napona boje, onda nastupa nedovoljno kvašenje, boja se loše prenosi, oštrina otiska je slaba, boja se skuplja. To su sve uzroci tzv. Pinhole pojava, nepoželjnih promena kolornih koordinata otiska i uopšte problema prijanjanja boje (Balaban, 2012).

U radu Izdebska i dr. (2015) je dokazano da površinska energija ima uticaj na debljinu sloja boje, odnosno na vrednost optičke gustine. Kao rezultat obrade površine korona postupkom, vrednost slobodne površinske energije, kao i njena polarna komponenta, su se znatno

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

povećale, dok se disperzna komponenta neznatno povećala. Ove promene su imale povoljan uticaj na vrednosti optičkih gustina otisaka.

Prema Morsy i dr., 2006, površinski napon boje bi trebao biti manji od površinske energije supstrata, a u cilju dobijanja dobrog otiska, razlika između ovih vrednosti bi trebala biti najmanje 10. Prema iskustvu iz prakse i literaturnim podacima, za dobro prijanjanje boje na pojedinim polimernim materijalima, površinski napon treba da leži u području od cca. 38 – 42 mN/m (Vujković i dr., 2007). Tipične vrednosti površinskog napona nekih karakterističnih folija prikazane su u tabeli 9.

Tabela 9: Vrednosti površinskog napona nekih folija

Folije	PP	PE	PET	PVC	PS
Površinski napon (mJ/m ²)	29-30	31-36	43-47	36-39	43-44

Tokom štampe je ključna interakcija između boje i podloge koja je određena udelima polarnog i nepolarnog (disperznog) u polimernim folijama i bojama. Što je veća sličnost između polarnih i nepolarnih komponenata u boji, premazima i štamparskim podlogama, to je i bolje kvašenje i prijanjanje na površinu štamparske podloge. Problem može nastati ukoliko npr. boje, lakovi ili lepkovi sadrže velik udeo vode koja je polarne prirode. Polarne tečnosti karakteriše visok površinski napon, a nepolarne mali. Iz tog razloga će boje koje koriste vodu kao rastvarač (73 mN/m) imati veće vrednosti napona, a one koje sadrže etil alkohol (24 mN/m) ili drugi nepolaran rastvarač će imati manje. Na primer, površinski napon flekso boja na bazi vode kreću se od 34 do 38 mN/m, a na bazi rastvarača od 28 do 32 mN/m (Aydemir, 2021).

Poliolefini kao što su npr. polipropilen ili polietilen su većinom nepolarne prirode, što znači da postoji mogućnost da se na foliju ne primaju boje za štampanje, kao ni rastvarači, lakovi i lepila koji su polarne prirode. Zato se nepolarne folije prethodno obrađuju, sa ciljem povećanja polarnosti površine (Brehmer, 2017). Obrada površine se vrši oksidacijom površine, odnosno površinskom obradom folija (korona ili plazma postupkom, kao i postupkom plamena), pri čemu se postiže efekt oksidacije površine i postojeća nepolarna struktura se pretvara u polarne grupe. Iako većina folija dolazi u štamparije već predobrađena korona postupkom, efekat površinske obrade nakon izvesnog vremena slabi, pa se nekada javlja potreba za naknadnom delimičnom obradom.

Osim toga, plastični materijali su neporozni ili blago mikroporozni, što znači da imaju malu sposobnost apsorpcije boje, lakova ili drugih tečnih ili pastoznih supstanci, za razliku od papira kod koga je ovaj proces funkcija različitih faktora u strukturi podloge, kao što su pore i vrste vlakana.

Boja se na površini može razliti ili ostati u obliku kapljice (slika 24). Razlivanje boje je znak potpune okvašenosti podloge. Ukoliko je boja u obliku kapi, stepen kvašenja je određen kontaktnim uglom, odnosno uglom između kapljice i supstrata. Ukoliko je ugao manji od 90°, kvašenje je dobro (slika 25). Veći ugao znači i slabije kvašenje.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike



Slika 24: Različiti vidovi kvašenja boje na štamparsku površinu



Slika 25: Kontaktni ugao kapi na površinu

U ovom radu će, u okviru ocene kvaliteta otiska, biti ispitan površinski napon ambalažnih folija, odnosno ukupni i polarni udeo površinskog napona kao i vizuelna, tj. mikroskopska ocena otiska.

5.4 Ekološke karakteristike

O ekološkim zahtevima koji se postavljaju na neki proizvod je pisano u poglavlju 4.

Kod grafičke ambalaže, opterećenja životne sredine mogu nastupiti kod dobijanja i pripreme sirovina, izrade ambalažnog materijala, izrade ambalaže, procesa pakovanja, transporta i skladištenja, korišćenja i zbrinjavanja.

Iz navedenog procesnog lanca u životnom ciklusu ambalažnog materijala, u ovom radu se analizira i vrednuje faza vezana za reciklabilnost ispitivanih fleksibilnih ambalažnih materijala nakon štampanja i pakovanja životnih namirnica.

6. ISPITIVANJE KRITERIJUMA ZA ODABRANE VARIJANTE ŠTAMPANE FLEKSIBILNE AMBALAŽE

6.1 Ispitivani ambalažni materijali i uslovi ispitivanja

Za ispitivanje karakteristika ambalažnih materijala odabrani su materijali koji su najčešće zastupljeni u proizvodnim pogonima domaćih štamparija. Od čitavog niza različitih materijala, u uže razmatranje i vrednovanje su uzeta tri alternativna materijala za pakovanje proizvoda u obliku pahuljica i drugih geometrijskih oblika, uključno i praškastih proizvoda.

Za ispitivanje u ovom radu odabrani su sledeći materijali:

1. BOPP 40 μm (biaksijalno orijentisani polipropilen) korišten za pakovanje kukuruza u zrnju –"Kukuruz kokičar"- slika 26 a. Karakteristike ovog materijala date su u tabeli 10.
2. PET/PE (višeslojni polimerni ambalažni materijal sastavljen od polietilenterftalata (PET) i polietilena (PE), dobijen postupkom kaširanja, korišten za pakovanje kokosovog brašna – "Kokosovo brašno" - slika 26 b. Karakteristike PET materijala date su u tabeli 11. Kod ove kombinacije folija nosivi materijal je PET koji daje čvrstoću, mehaničke i optičke osobine, dok polietilenski sloj služi kao termozavarivi spoj.
3. PETmet/PE (višeslojni kombinovani ambalažni materijal sastavljen od metalizovanog polietilentereftalata i polietilena, dobijen postupkom metalizacije, a zatim kaširanja), korišten za pakovanje mlevenog bibera –"Biber mleveni" – slika 26 c. Karakteristike PETmet materijala date su u tabeli 12. Polietilenski sloj ima istu funkciju kao i kod materijala PET/PE.
4. Polietilen (PE), korišten za kaširanje PET i PETmet. Karakteristike ovog materijala date su u tabeli 13.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike



Slika 26: Ispitivani materijali: a) BOPP 40 μm , b) PET/PE, c) PETmet/PE

Tabela 10: Tehničke specifikacije BOPP

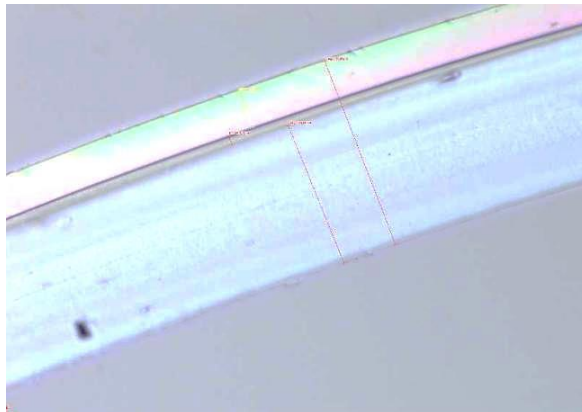
Broj	Karakteristika	Vrednost (prema standardu)
1	Debljina, μm	40
2	Gramatura, g/m^2	36,4
3	Gustina, g/cm^3	0,91
4	Zatezna čvrstoća (uzdužno), N/mm^2	140
5	Zatezna čvrstoća (poprečno), N/mm^2	250
6	Izduženje pri kidanju (poprečno), %	70
7	Izduženje pri kidanju (uzdužno), %	200
8	Koeficijent trenja	0,3
11	Površinski napon, mN/m	38

Tabela 11: Tehničke specifikacije PET

Karakteristika	Vrednost
Debljina, μm	12
Gramatura, m^2/kg	59.5
Zatezna čvrstoća (uzdužno), N/mm^2	196
Zatezna čvrstoća (poprečno), N/mm^2	206
Izduženje pri kidanju (uzdužno), %	100
Izduženje pri kidanju (poprečno), %	90
Koeficijent trenja	0,40
Površinski napon, mN/m	54
OTR ($\text{cc}/\text{m}^2/24\text{h}$)	40

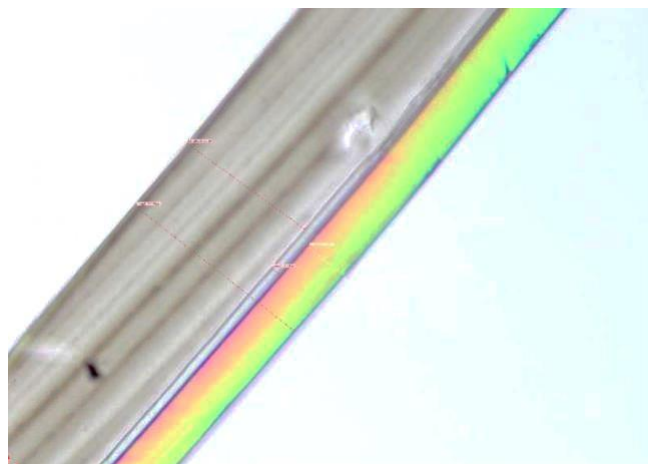
Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Struktura neštampanog materijala PET/PE urađena mikroskopskom analizom² prikazana je na slici 27. Prvi sloj je sloj PET debljine 12,39 μm , nakon kojeg se nalazi sloj lepka debljine 3,14 μm i sloj PE debljine 46,94 μm , što zajedno daje ukupnu debljinu od 62,47 μm . Istom analizom na odštampanom materijalu PET/PE utvrđen je sloj štampe debljine 2,10 μm .



Slika 27: Prikaz mikroskopske strukture materijala PET/PE

Na slici 28 je prikazana mikroskopska struktura PETmet/PE folije. Struktura se sastoji od sloja PET 12,22 μm , zatim od metalizovanog sloja, lepka debljine 3,20 μm i sloja PE od 39,80 μm , što daje ukupnu debljinu laminata od 55,22 μm .



Slika 28: Prikaz mikroskopske strukture materijala PETmet/PE

² Analiza je urađena prema internom standardu firme Spektar

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Tabela 12: Tehničke specifikacije PETmet

Karakteristika	Vrednost	
Debljina, μm	12	
Gramatura, m^2/kg	59.5	
Zatezna čvrstoća (uzdužno), N/mm^2	196	
Zatezna čvrstoća (poprečno), N/mm^2	206	
Izduženje pri kidanju (uzdužno), %	100	
Izduženje pri kidanju (poprečno), %	90	
Koeficijent trenja	0,60	
Površinski napon (mN/m)	Površina tretirana koronom	54
	Metalizovana površina	56
OTR ($\text{cc}/\text{m}^2/24\text{h}$)	1	

Tabela 13: Tehničke specifikacije PE

Karakteristika	Vrednost
Debljina, μm	58
Širina, mm	383
Gustina, g/cm^3	0,925
Površinski napon (mN/m)	≥ 38

Procesni parametri

Uzorci su štampani na stubnoj štamparskoj mašini (slika 29), tip ZBS 450 sa 6 štamparskih agregata, štamparske širine 460 mm, štamparske dužine 210 mm - 460 mm. Maksimalna brzina trake je 50 m/min, temperatura sušenja od 60 °C - 75 °C. Koriste se rasterski valjci od 800 l/in i 300 l/in. Fotopolimerna štamparska forma debljine 1,14 mm, tipa Cyrel Fast, 58 l/cm. Korišćene štamparske boje su "Termoflex" boje firme Colorprint na bazi rastvarača. Podešavanje pritiska je ručno. Viskozitet, koji se meri pomoću specijalnog levka određene zapremine sa otvorom na dnu prečnika 4 mm kroz koji boja ističe, je bio 20 sekundi.

Zategnutost trake se kretala oko 26 N (automatsko podešavanje). Zategnutost trake je bila oko 32 N. Temperatura sušenja se kretala oko 70 °C.

Da bi dobili ambalažne materijale strukture PET/PE i PETmet/PE, nakon štampe se PET i PETmet materijali kaširaju. Za kaširanje su korišćeni lepkovi bez rastvarača Novacote SF-724-A i Novacote CA-324 koji se mešaju u odnosu 2:1 (tabela 14).

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike



Slika 29: Flekso štamparska mašina ZBS 450

Tabela 14: Karakteristike korišćenog lepila bez rastvarača

Poliuretansko jednokomponentno lepilo bez rastvarača Novacote SF-724-A sa koreaktantom CA-324		
Tip/hem. karakteristike	SF-724-A	CA-324
		NCO
Čvrsti sadržaj %	100	100
Viskozitet na 25 °C (mPas)	3.500 +/- 1.000	1.400 +/- 400
Standardni odnos mešanja (maseni %)	100	60
	(volumni %)	100

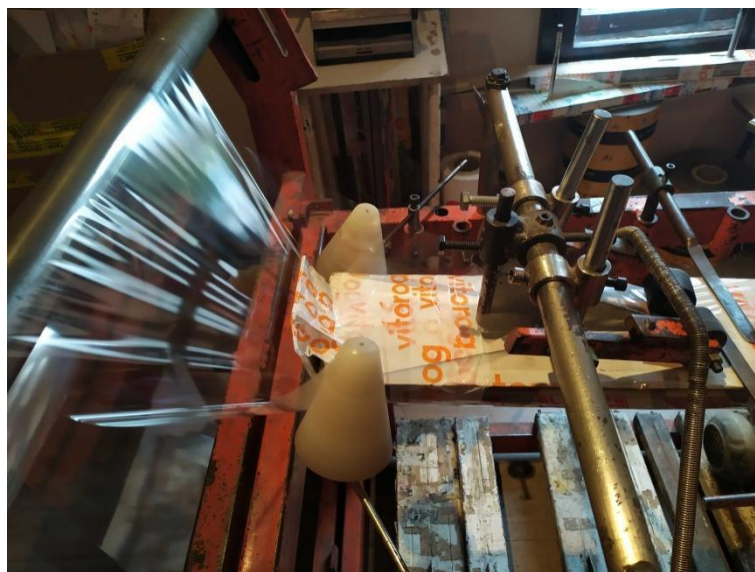
Od odštampanih materijala se formiraju kesice. Kesice su formirane na mašini za konfekcioniranje (slika 30) sa jednim uzdužnim i jednim poprečim varom.

Pošto se radi o starijim mašinama za formiranje kesica/pakovanje, kod kojih ne postoji tehnička dokumentacija, mora se poći od nekih opštih pretpostavki u vezi stanja mašina.

6.2 Ispitivanje zatezne jačine i izduženja pri kidanju

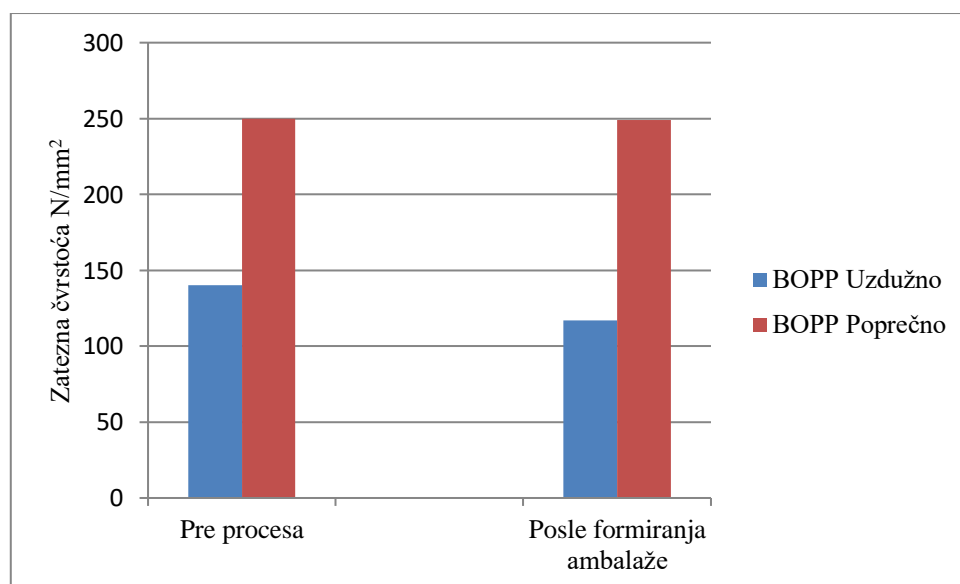
Zatezna jačina i izduženje pri kidanju određeno je na uređaju Shimadzu EZ-LX mernog opsega 200 N, metodom ISO 527-3. Zatezna čvrstoća, odnosno sila i izduženje pri kidanju ispitivanih uzoraka izražena je kao srednja vrednost pojedinačnih merenja i to uzdužno i poprečno na pravac namotavanja folije.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike



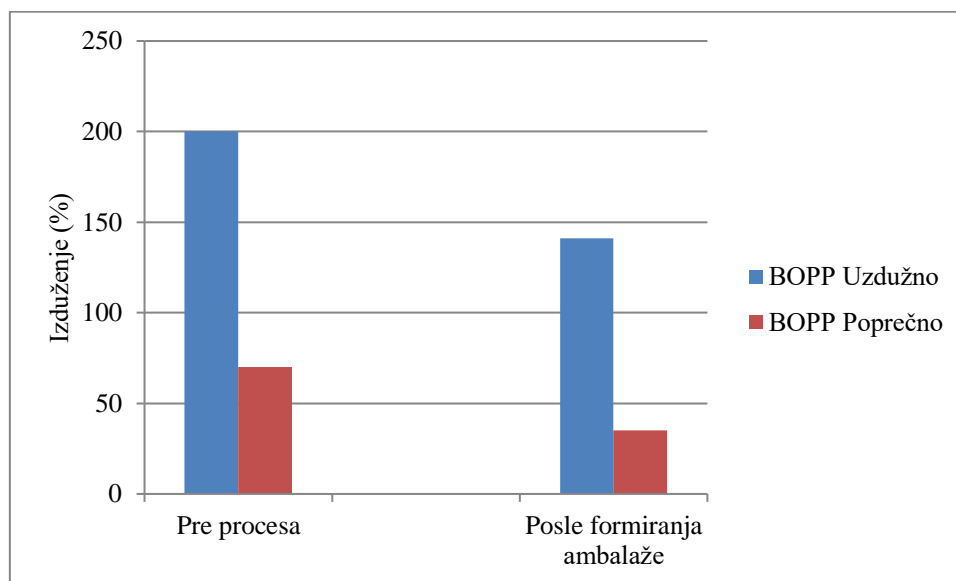
Slika 30: Mašina za formiranje kesica

Rezultati ispitivanja zatezne čvrstoće i izduženja pri kidanju pre štampe i posle formiranja ambalaže za BOPP uzorak prikazani su na slici 31 i 32.



Slika 31: Zatezna čvrstoća BOPP folije pre procesa i nakon formiranja ambalaže

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike



Slika 32: Izduženje BOPP folije pre procesa i nakon formiranja ambalaže

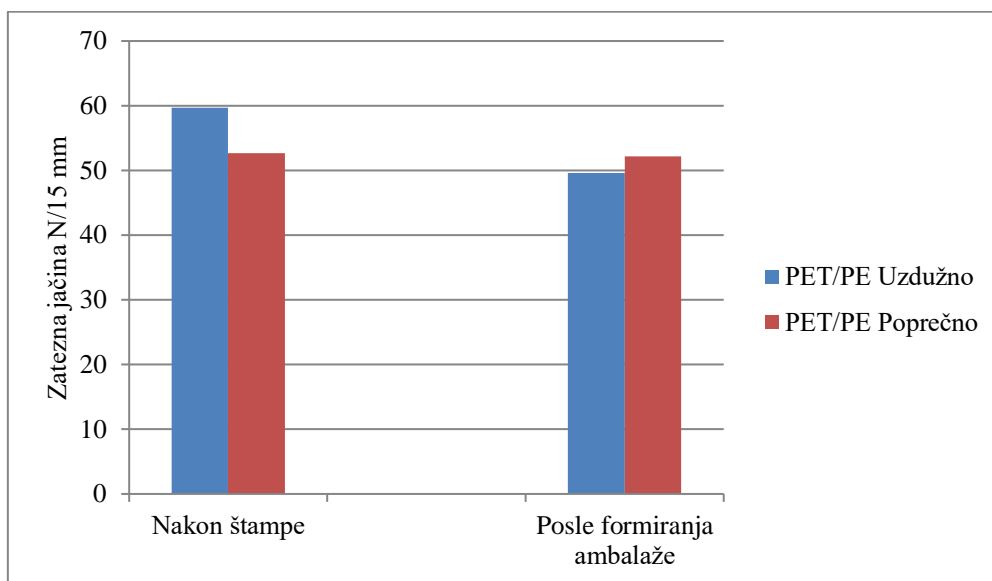
Vrednosti zatezne čvrstoće kod BOPP folije u uzdužnom pravcu su se nakon procesa formiranja ambalaže smanjile za 16 %, dok u poprečnom pravcu je vrednost ostala nepromenjena.

Iz slike 33 se može videti da su vrednosti izduženja znatno veća u uzdužnom pravcu nego u poprečnom pravcu jer su u pitanju anizotropni materijali. Vrednosti za izduženje su se u oba pravca nakon procesa formiranja kesica smanjile. Ta promena iznosi 29 % u uzdužnom pravcu i 50 % u poprečnom pravcu. Ovi podaci bi mogli ukazivati na to da je u toku procesa formiranja ambalaže na mašini za pakovanje došlo do opterećenja materijala, npr. usled povećane sile zatezanja koja može biti, između ostalog, posledica povećane proizvodnje kesica u nekom vremenskom periodu (Hertlein, 1998).

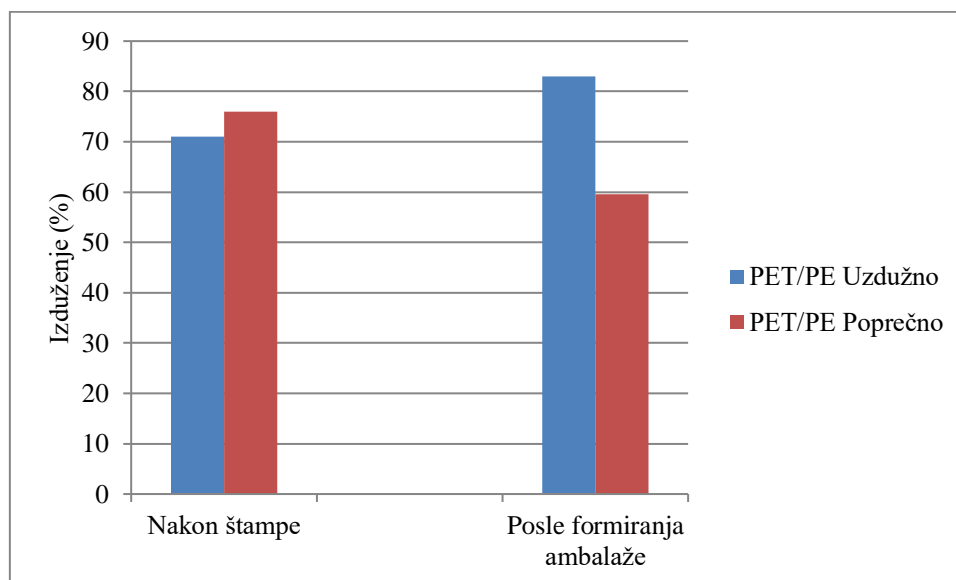
Merenje zatezne čvrstoće za polipropilensku foliju nakon procesa flekso štampe je rađena u radu Balaban i dr. 2021. Istraživanjima u tom radu nije potvrđena pretpostavka da bi proces štampanja, razređivač u boji i temperatura sušenja folija mogli uzrokovati smanjenje čvrstoće ispitivanog ambalažnog materijala jer su rezultati pokazali neznatno povećanje čvrstoće. Razlog za to može biti što kod flekso štampe jedan deo veziva koji je prethodno rastvoren u rastvaraču, prodire u strukturu štamparskog materijala i učvršćuje se u njemu, a jedan deo ostaje na površini folije, doprinoseći tako povećanju čvrstoće.

Rezultati merenja zatezne jačine i izduženja PET/PE folije nakon procesa štampe i formiranja u kesice su prikazani na slici 33 i 34.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike



Slika 33: Zatezna jačina PET/PE folije posle procesa štampanja i formiranja ambalaže

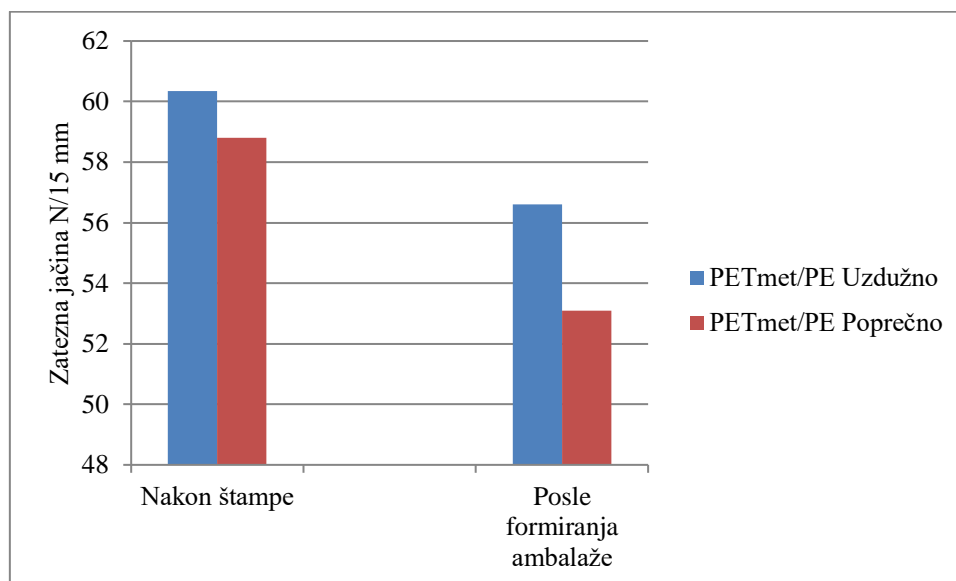


Slika 34: Izduženje PET/PE folije posle procesa štampe i formiranja ambalaže

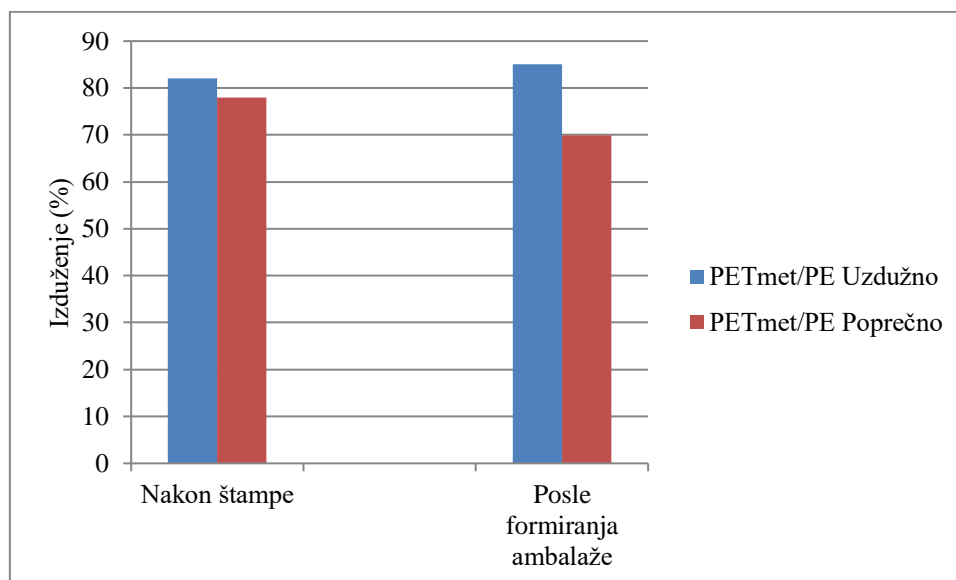
Kao što se može videti iz grafikona 34 zatezne čvrstoće PET/PE materijala su ujednačene u oba pravca. Vrednosti zatezne čvrstoće su se u uzdužnom pravcu nakon procesa pakovanja smanjile za 16,9 %, a u poprečnom ostale iste. Što se tiče izduženja, ono se nakon procesa pakovanja u uzdužnom pravcu povećalo za 16,9 %, a u poprečnom smanjilo za 21,57 %.

Za metalizovanu PET/PE foliju su rezultati merenja zatezne čvrstoće i izduženja prikazani na slici 35 i 36.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike



Slika 35: Zatezna jačina PETmet/PE folije posle procesa štampe i formiranja ambalaže



Slika 36: Izduženje PETmet/PE folije posle procesa štampe i formiranja ambalaže

Zatezna jačina PETmet/PE folije se nakon formiranja ambalaže u uzdužnom pravcu smanjila za 3 %, a u poprečnom se smanjila za 9,7 %. Izduženje se u uzdužnom pravcu povećalo nakon procesa formiranja ambalaže za 3 %, a smanjilo za 10 % u poprečnom pravcu.

Treba napomenuti da u ispitivanim višeslojnim materijalima PET/PE i PETmet/PE, PET i PETmet monomaterijali imaju dominantne mehaničke karakteristike. S obzirom da je konstatovano povećanje zatezne jačine laminata u odnosu na monomaterijal, pretpostavka je da materijal i dalje zadržava pozitivne mehaničke osobine.

Iz rezultata merenja zatezne čvrstoće i izduženja odabranih fleksibilnih ambalažnih materijala može se zaključiti da je njihovo ponašanje različito. Kod svih ispitivanih materijala zatezna čvrstoća i izduženje se nakon procesa pakovanja smanjilo u većoj ili manjoj meri. Jedan od razloga mogu biti povećane zatezne sile u procesu pakovanja, kao i povećana proizvodnja

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

ambalaže, sa povećanom udarnom brzinom kretanja ambalažnog materijala (Hertlein, 1998). Međutim, za potvrdu ovih rezultata, trebalo bi uraditi ispitivanja i sa drugim ambalažnim materijalima i na drugim paketicama.

Specifičnost štamparskih materijala je da su to viskoelastični materijali sa veoma kompleksnim ponašanjem (detaljnije objašnjeno u poglavlju 5.1.1). Kod štamparskih materijala kod nepromenjenog istežanja naprezanje folije stalno pada. Kada se tako opterećen materijal nakon nekog vremena rastereti, on se ne vraća na svoju prvobitnu dužinu koju je imao u neopterećenom stanju, nego ostaje izdužen. Pošto se načelno štampa na istegnutoj foliji, to je dužina ponavljanja, bar u području štamparskih uređaja, manja od dužine štampanja tj. dužine štampanog formata.

Ako se štampana folija nakon prolaza kroz uređaj za štampanje trajno istegne zbog prevelikog naprezanja - npr. u uređaju za namotavanje - i/ili zbog prejakog zagrevanja u uređaju za sušenje, onda na kraju dužina ponavljanja može biti i veća od dužine formata.

Pretpostavka za konstantnu dužinu ponavljanja je, da folija prolazi kroz uređaje za štampanje sa nepromenljivim istežanjem, a to znači nepromenljivim naprezanjem.

Ukoliko se na jednoj traci i pored nepromenljivih vučnih sila, pojavljuju različite dužine ponavljanja, onda se uzrok odstupanja tih dužina mora tražiti u nejednakim parametrima čvrstoće u samom materijalu trake. Razlike debljine folije i lokalne čvrstoće u poprečnom preseku su tome uzrok.

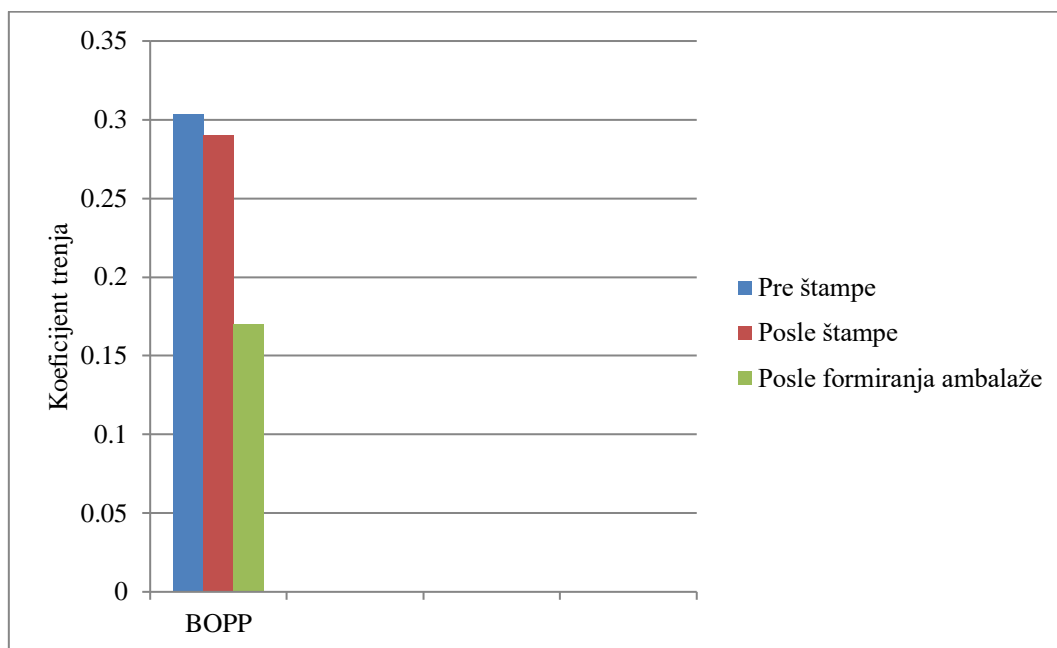
U cilju tačnijeg određivanja vrednosti zatezne čvrstoće i izduženja značajnih za procese štampanja i pakovanja, bilo bi neophodno meriti zateznu čvrstoću i istežanje materijala u predelu istežanja do 2 %, što u ovom radu nije bilo moguće. Međutim, Schröder (2011) navodi da je folija u procesu štampe i pakovanja opterećena u linearno-elastičnom i linearno-viskoelastičnom području i to manje od 1 %, a orijentisane folije još i manje.

6.3 Ispitivanje klizavosti

Ispitivanje trenja folija za ovaj rad je izvršeno na uređaju *Slipping Tester Type RK 2 E*, prema standardu ASTM D 1894.

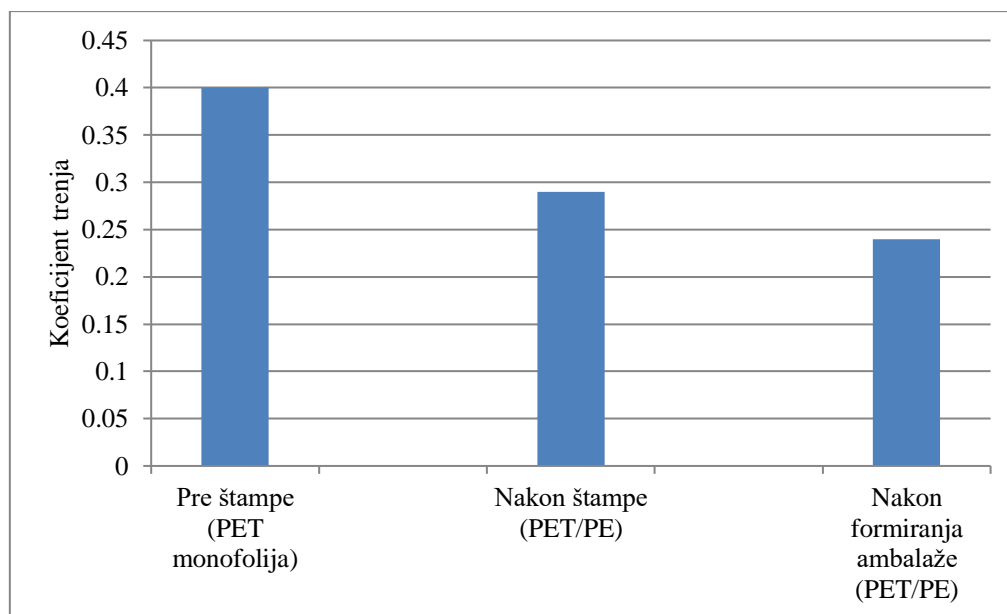
Ispitivanje je obavljeno na isečenim uzorcima folija veličine 100 x 200 mm, normalnim opterećenjem kliznog para tegom od 200 g, površinom metalnog tega (po ASTM D 1894) 40 cm² i brzinom klizanja od 100 mm/min. Rezultati dobijeni ovim ispitivanjima su prikazani na slikama 37-39.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike



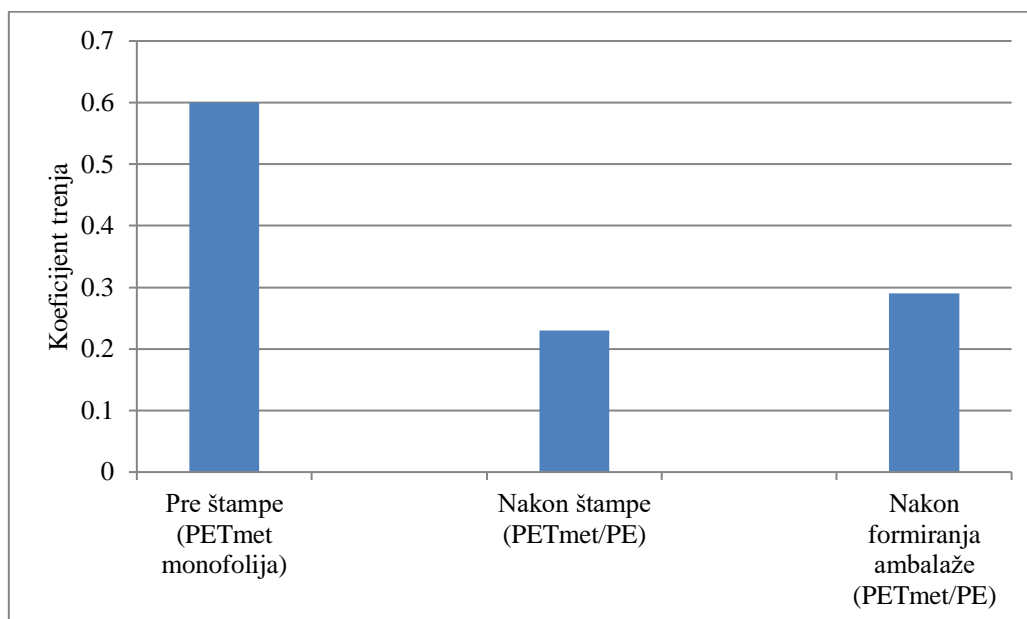
Slika 37: Koeficijent trenja BOPP (pre štampe, nakon štampe i procesa formiranja ambalaže)

Koeficijent trenja BOPP folije se nakon procesa štampanja i formiranja ambalaže smanjio. Rezultati su u dozvoljenim granicama, pa je za pretpostaviti da neće biti problema u toku daljnje manipulacije materijalom (Hertlein, 1998; Morris, 2017).



Slika 38: Koeficijenti trenja PET folije (pre) i nakon štampe i formiranja ambalaže (PET/PE)

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike



Slika 39: Koeficijenti trenja PETmet folije (pre) i nakon štampe i formiranja ambalaže (PETmet/PE)

Kod PET monofolija koeficijent trenja je visok, ali nakon kaširanja on se smanjuje (slika 39). Koeficijent trenja PET/PE folije se nakon procesa formiranja u kesice povećao u odnosu na štampanu foliju, ali vrednosti leže u preporučenim vrednostima (Hertlein, 1998). Isti trend se može primetiti i kod PETmet/PE folije (slika 40). Sve folije za zavarivanje se baziraju na PE, pa je moguće dodavanjem kliznih sredstava kod ekstrudiranja folije, podesiti trenje klizanja shodno zahtevima. Vrednost trenja mora biti u preporučenom području za unutrašnju stranu između 0,2 i 0,3.

Razlog promene koeficijenta trenja kod višeslojnih folija može biti upravo zbog procesa kaširanja, što je ispitivano u radu Ljevak i dr. (2018). Monomaterijali pokazuju određenu vrednost koeficijenta trenja, ali kada se materijali spoje u laminat on se menja. Rezultati su pokazali da zbog uticaja kaširanja i migracije kliznih aditiva dolazi do razlike u vrednosti veličine trenja, a razlog u ovim rezultatima je promena karakteristika materijala.

Koeficijent trenja u višeslojnim folijama koje sadrže aditive za klizanje koji migriraju može biti problematičan. Naime, aditivi mogu migrirati i preneti se na zadnju stranu folija namotane u rolnu i na taj način nije moguće smanjiti koeficijent trenja (Morris, 2017). Na migraciju slojeva utiče rastvorljivost aditiva u slojevima, npr. aditivi za klizanje amidnih masnih kiselina su topljiviji u polarnim polimerima. Temperatura je takođe jedan od faktora koji utiče na rastvorljivost amida. Iz svega proizlazi da aditivi za klizanje u jednom sloju verovatno neće ostati u tom sloju. Ovo treba uzeti u obzir prilikom donošenja odluke koliko aditiva treba dodati i u koje slojeve.

Sveukupno gledano, kod sva tri materijala je ustanovljeno da proces proizvodnje, štampanja i pakovanja ima uticaja na klizavost odnosno na koeficijent trenja folija/metal. Međutim, pored trenja, važni faktori kod oblikovanja materijala su osobine samog materijala, otisak, geometrija organa za oblikovanje kao i gornja površina materijala i u cilju postizanja

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

pouzdanog rezultata i utvrđivanja razloga nepromenjenog ili promenjenog koeficijenta trenja, bilo bi potrebno izvršiti dodatna ispitivanja.

Ispitivanja u ovom radu su vršena u laboratorijskim uslovima, sa brzinom klizanja od 0,1 m/min. Pod takvim uslovima su određivani koeficijenti trenja i drugih neštampanih monofolija i kombinovanih folija, čiji su rezultati prikazani u tabeli 15. U ovoj tabeli prikazane su veličine koeficijenta trenja klizanja folija u paru sa različitim drugim materijalima, određenih u laboratorijskim uslovima i relativnom brzinom od ca. 3 m/min.

Za mašinabilnost bi i podaci za koeficijent trenja mirovanja bili važni, ali se oni u literaturi i ne spominju (navodno zbog teškoća pri merenju).

Iz prethodne tabele proizlazi da nema jasne razlike veličina koeficijenata trenja između čelika i aluminijuma kao i između različitih folija. Kod monofolija te veličine leže između 0,17 i 0,33 na čeliku te 0,15 i 0,41 na aluminijumu. Veličina koeficijenta trenja kod LDPE folije prelazi spomenutu vrednost $\mu \leq 0,2$ koja se zahteva pri obradi fleksibilnih ambalažnih folija (Morris, 2017).

*Tabela 15: Koeficijenti trenja klizanja nekih mono i kombinovanih folija (Hertlein, 1998)
(kod kombinovanih folija su boldiranim štampanim slovima označeni kontakti materijali kliznog para)*

Vrste folija	Čelik	Aluminijum	Guma
HDPE	-	0.21	-
LDPE	0.33	0.41	2.19
OPP	0.20	0.15-0.18; 0.24	2.50
PET/LDPE	0.20	0.10-0.21	2.31
PET/ LDPE	0.20	0.15-0.19	-
PP/LDPE	-	0.26	-
PP/ LDPE	-	0.29	-

Dobijeni rezultati ispitivanja trenja nisu direktno primenjivi za praktične uslove rada mašina, za što su u prvom redu odgovorne brzine sa kojim se ambalažni materijali vode kroz mašine, a koji se ne mogu laboratorijski simulirati, kao i sile sa kojima se folije pritišću na mašinske delove.

Prema DIN 53375 koeficijenti trenja su zavisni od brzine i kod većih brzina se pokazuje mirniji i ravnomerniji tok koeficijenta trenja. Pored toga, taj koeficijent zavisi i od temperature.

Nesigurnost kod ispitivanja koeficijenata trenja je prema Hertlein (1998) veća od 10 % i može čak dostići veličinu merene vrednosti. U cilju pouzdanije ocene promene trenja, bilo bi neophodno odrediti i hrapavost polimerne površine.

Na osnovu rezultata ispitivanja i izložene ocene, promene klizavosti koje nastaju nakon štampanja mogu biti značajne. Međutim pitanje je, u kojoj meri one mogu uticati na prohodnost, odnosno mašinabilnost u procesu štampanja i završne obrade kod različitih

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

kliznih parova, jer se u navedenim granicama nesigurnosti merenih rezultata i promene koeficijenta trenja nakon štampanja i procesa formiranja kesica, veličina koeficijenta trenja može regulisati dodavanjem sredstava za povećanje ili smanjenje klizavosti ili pak povećanjem normalne sile.

Prohodnost se može pouzdano utvrditi na osnovu testiranja na konkretnom uređaju. Međutim, moguće je koristiti i iskustva i minimalne zahteve pojedinih proizvođača mašina za pakovanje koji u svojim uputstvima navode pojedine minimalne zahteve.

6.4 Ispitivanje propustljivosti ambalažnih folija

Pod propustljivošću kiseonika se podrazumeva mogućnost njegovog prolaska kroz ambalažni materijal u određenom vremenu. Propustljivost kiseonika može varirati u zavisnosti od temperature, vlažnosti, pritiska i debljine uzorka.

Brzina prenosa kiseonika, koja se takođe naziva i "OTR" ili Oxygen Transmission Rate se izražava kao zapremina kiseonika koja prodire u određeno područje u jednodnevnom periodu; $\text{cc/m}^2/24\text{h}$, mereno na standardnoj temperaturi od 23°C i 0 % relativne vlažnosti (RH).

Poređenja barijernih karakteristika materijala prema kiseoniku su prikazana u tabeli 16.

Tabela 16: Poređenja barijernih karakteristika

Barijera prema O_2	$\text{cc/m}^2/24\text{h}$
Visoka barijera	~ 1-10
Umerena barijera	~ 1000
Mala barijera	~ 10,000

Uticaj štampanja na BOPP folije ispitana je u radovima Rubino i dr. (2001), Balaban i dr. (2021) i Khalifa (2016). U tabeli 17 je dato poređenje rezultata.

Propustljivost plastičnih folija na gasove kao što su kiseonik, ugljen dioksid i azot meri se standardizovanim metodama ispitivanja. Za merenje propustljivosti ambalažnih materijala postoji više metoda, kod kojih se koristi komora sa dve različite sredine koje su međusobno razdvojene određenom površinom ispitivanog materijala.

Propustljivost na kiseonik ambalažnih folija u ovom radu merena je na uređaju MOCON OX-TRAN 2/21 prema standardima ASTM D 3985 i ASTM F 1927. Uslovi za analizu su temperatura od 20°C i relativna vlažnost od 65 % sa 100 % O_2 . Na ovom uređaju mogu se meriti dve folije. Zato se svaki materijal merio dva puta, kako bi se ograničile greške pri merenju. Pre svakog merenja su kondicionirane komore 24 sata. Od svake komore vršeno je 10 merenja u razmaku od 30 minuta iz kojih je izračunata srednja vrednost.

Rezultati ispitivanja propustljivosti na kiseonik PET/PE folije nakon štampanja su prikazani u tabeli 18, a rezultati za propustljivost nakon pakovanja u tabeli 19. U tabeli 20 su prikazani

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

rezultati ispitivanja propustljivosti na kiseonik za PETmet/PE foliju nakon štampanja, a u tabeli 21 nakon pakovanja. Na slikama 40 i 41 dat je grafički prikaz dobijenih rezultata.

Tabela 17: Dosadašnja ispitivanja i rezultati uticaja štampanja na propustljivost za BOPP folije

Autori	Materijal	Nanošenje boje	Tehnika merenja	Rezultati
Rubino <i>et al.</i> (2001)	1. OPP folija, 25 μm 2. OPP folija, 22 μm obostrano premazana	Laboratorijski uslovi, dve različite boje	Oxygen Transmission Rate (OTR), sa Ox-Tran 2/20 uređajem	Na OPP foliji bez premaza, koja je odštampana sa jednom vrstom boje, OTR se smanjio. Na premazanoj OPP foliji poboljšana je barijera za kiseonik.
Khalifa (2016)	BOPP folija, 20 μm	Industrijski uslovi, duboka štampa	Oxygen transmission (OTR) prema ASTM D3985	OTR se smanjio
Balaban-Đurđev (2006)	OPP folija, 20 μm i 40 μm	Industrijski uslovi, flekso štampa	Lussy metoda prema DIN 53380	Propustljivost na kiseonik se smanjila

Tabela 18: Rezultati ispitivanja OTR za PET/PE foliju nakon štampanja

PET/PE folija	Temp. °C	Relativna vlažnost %	OTR cc/m ² , d
Uzorak 1	20	65	82,06967
Uzorak 2	20	65	79,46984
Srednja vrednost			80,76976

Tabela 19: Rezultati ispitivanja OTR za PET/PE nakon pakovanja

PET/PE kesica	Temp. °C	Relativna vlažnost %	OTR cc/m ² , d
Uzorak 1	20	65	88,31808
Uzorak 2	20	65	79,25556
Srednja vrednost			83,78682

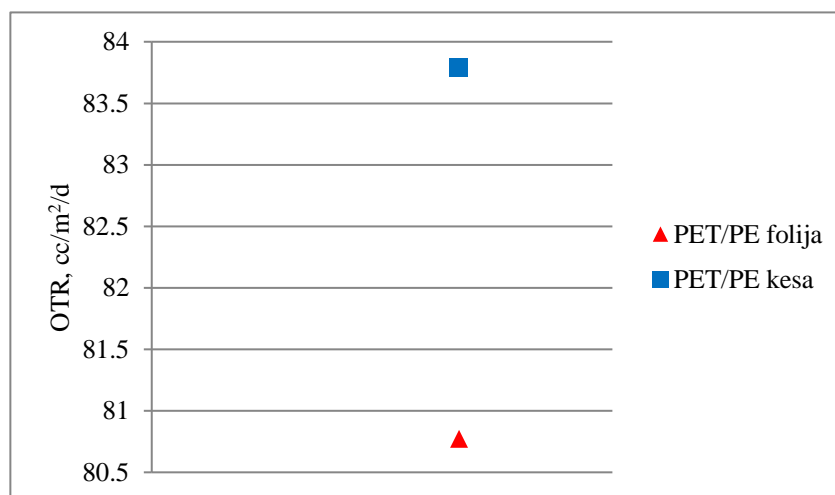
Tabela 20: Rezultati ispitivanja OTR za PETmet/PE foliju nakon štampanja

PETmet/PE folija	Temp. °C	Relativna vlažnost %	OTR cc/m ² , d
Uzorak 1	20	65	0,72698
Uzorak 2	20	65	0,66981
Srednja vrednost			0,69840

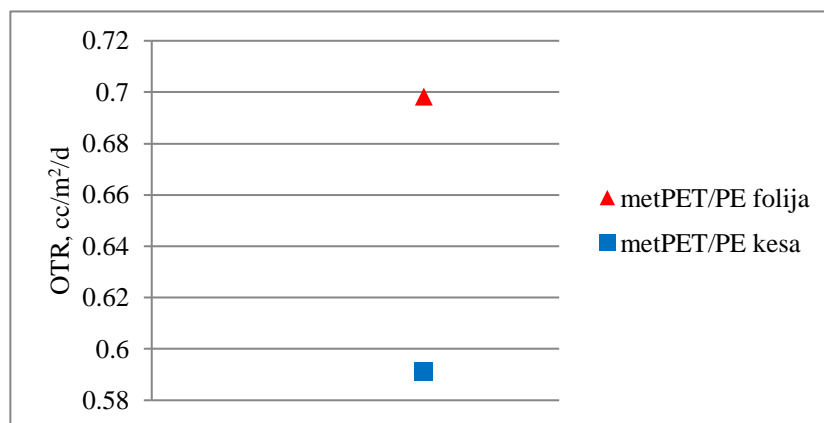
Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Tabela 21: Rezultati ispitivanja OTR za PETmet/PE foliju nakon pakovanja

PETmet/PE kesica	Temp. °C	Relativna vlažnost %	OTR cc/m ² , d
Uzorak 1	20	65	0,54678
Uzorak 2	20	65	0,63564
Srednja vrednost			0,59121



Slika 40: Propustljivost štampane PET/PE folije i PET/PE kesice



Slika 41: Propustljivost štampane PETmet/PE folije i mePET/PE kesice

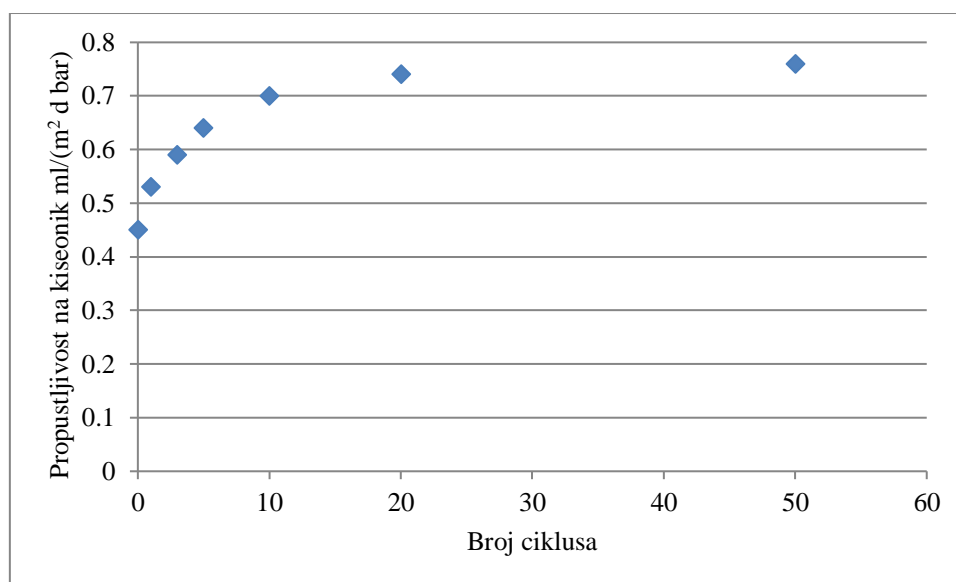
Rezultati pokazuju da se propustljivost kod uzorka PET/PE, u odnosu na štampanu foliju, neznatno povećala nakon prolaska kroz mašinu za formiranje kesica. Da li uzrok ovoj promeni može biti pretpostavljeni uticaj zateznih sila na mašini za pakovanje kod koje dolazi do istezanja folija, trebalo bi ispitati sa većim brojem uzoraka i na drugim mašinama za pakovanje.

Kod uzorka PETmet/PE se propustljivost smanjila nakon prolaska kroz mašinu za formiranje kesica. Ovo je u suprotnosti sa nekim dostupnim literaturnim izvorima u kojima je rađeno ispitivanje metalizovanih ambalažnih materijala. Prema Hanika (2004), kod obrade

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

metalizovanih folija kao što je npr. kod kaširanja, štampe ili kod proizvodnje kesa često dolazi do mehaničkog naprežanja u obliku zatezanja i krivljenja folija. U radu Parkar (2005) rezultati su pokazali porast brzine prenosa kiseonika i vodene pare uzoraka metalizovanih folija koji su izloženi raznim uticajima. Merena je propustljivost folija koje nisu izložene nikakvom uticaju, folija koje su izložene stvarnom opterećenju tokom proizvodnje i folija koje su podvrgnute savijanju pomoću tzv. Gelbo uređaja koji simulira opterećenje na savijanje. Ispitani su neštampani uzorci PETmet/PE folija debljina 12 μm i 50 μm i isti uzorci štampani postupkom duboke štampe. Propustljivost se povećala što ukazuje na to da savijanje smanjuje barijerna svojstva metalizovanih folija sa obrazloženjem da savijanje dovodi do nastajanja rupa koje vode ka gubitku svojstava barijere.

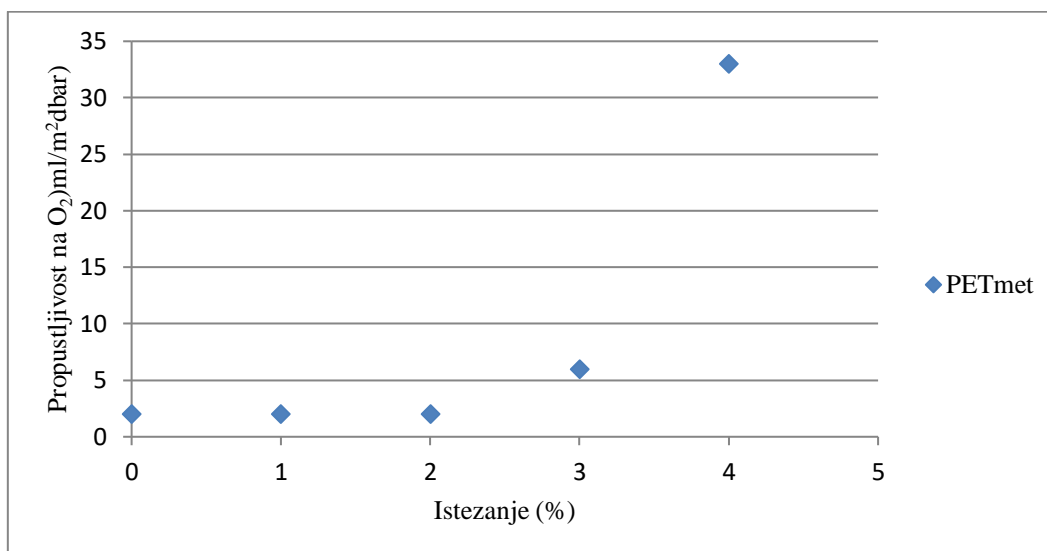
U radu Hertlein (1998) su ispitani uzorci PETmet/PE ukupne debljine 87 μm (12 $\mu\text{m}/75 \mu\text{m}$) i metBOPP 15 μm , na propustljivost na kiseonik u zavisnosti od opterećenja. Folije su podvrgnute savijanju koje spada u najveće opterećenje. Iz slike 42 se može videti da propustljivost raste ukoliko se folije optereće na savijanje (na apscisi je broj ciklusa savijanja). Uzrok povećanju propustljivosti je ovaj autor našao u oštećenjima aluminijskog sloja.



Slika 42: Propustljivost na kiseonik PETmet/PE folije u funkciji broja ciklusa savijanja

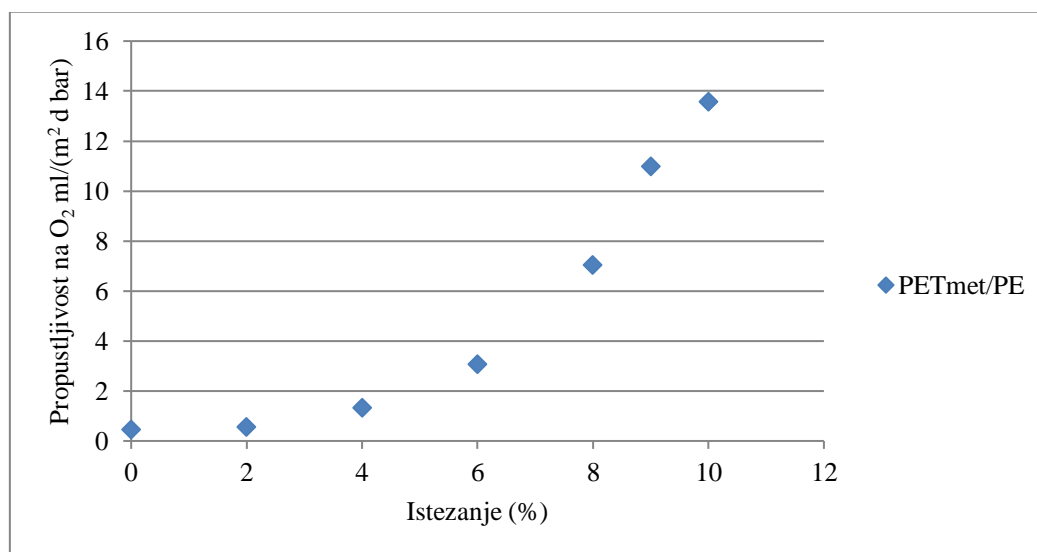
Na slici 43 je prikazan uticaj istezanja na propustljivost kiseonika kod PETmet folije. Iz grafika je vidljivo da je propustljivost u elastičnom području istezanja skoro nepromenjena, ali u plastičnom području naglo raste. Prelazno područje deformacije od elastičnog ka plastičnom kod skoro svih polimernih folija je u području istezanja od 2 i 3 % (Hertlein, 1998).

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike



Slika 43: Uticaj istezanja na propustljivost kod PETmet folije

Na slici 44 prikazan je uticaj istezanja na propustljivost kiseonika kod PETmet/PE folija. Kod istezanja između 3 % i 4 % primećuje se porast propustljivosti. Kod istezanja od 8 % do 9 % je najveći porast propustljivosti.



Slika 44: Uticaj istezanja na propustljivost kod PETmet/PE folije

Prema Hanika (2004), folija koja nije metalizovana pokazuje slab prirast propustljivosti u zavisnosti od istezanja. Međutim, ukoliko je istezanje u području manjem od 2%, a to znači u elastičnom području, i kod metalizovanih folija je taj prirast propustljivosti neznatan.

Takođe je i u radu Mrkić i dr. (2007) proučavan uticaj temperature i mehaničkog napreznja na barijerna svojstva polimera na bazi PE, BOPP i PA, koristeći ugljendioksid, kiseonik, azot i vazduh kao test gasove. Istraživanje je pokazalo da mehaničko napreznje uzrokuje promene barijere. Najveća promena propustljivosti gasa usled povećanog napreznja je primećena kod folije sa metalizovanim slojem u strukturi. Iako su barijerna svojstva metalizovanih polimera poboljšana, oni su podložni su habanju površine pri čemu dolazi do pojave praznina i rupa. Uticaj mehaničkog napreznja na propustljivost gasa je najniži za PE.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

U radu (Muhamedbegović i dr., 2013) je ispitan uticaj vrste štampe i postupka kaširanja na kvalitet kaširanih polipropilenskih folija. Ispitivani uzorci su pokazali dobre mehaničke karakteristike jer su se defekti pokazali tek kod velikog broja savijanja folija, s tom razlikom što je uzorak štampan flekso postupkom pokazao bolje osobine, odnosno veću otpornost prema savijanju, što je pripisano mekanoj fotopolimernoj štamparskoj formi. Takođe je utvrđeno da je propustljivost kaširanih folija veća ukoliko se kaširaju lepilom rastvorenim u organskom rastvaraču jer upotreba rastvarača ili aditiva povećavaju propustljivost, a neki čak dovode i do pojave oštećenja materijala u vidu rupica.

Rezultate u ovom radu treba uzeti sa određenom rezervom kako zbog ograničenog broja merenja, tako i zbog fizičkog stanja konkretnih uzoraka folija/kesa.

Isto tako moguće je da, u zavisnosti od procesa, pojedine kese ne trpe očigledne promene i slabljenje svojih karakteristika. U konkretnom slučaju, nije bilo moguće dokazati negativan uticaj prerade folije u kese.

6.5 Ispitivanje kvaliteta otiska

Kao što je u poglavlju 6 opisano, jedan od kriterijuma kvaliteta otiska je površinski napon folije na kojoj se štampa i koji se može odrediti merenjem kontaktnog ugla. U ovom radu će se merenje kontaktnog ugla izvršiti pomoću uređaja Krüss DSA 25 (Krüss, 2012)-slika 45. Pored toga, izmeriće se i površinski napon štamparske boje. Metoda koja će se koristiti za određivanje kontaktnog ugla je tzv. metoda ležeće kapi (sessile drop) postupkom statičkog merenja kontaktnog ugla.



Slika 45: Uređaj Krüss DSA 25 za merenje kontaktnog ugla sa pripadajućim softverom

6.5.1 Ispitivanje površinskog napona odabranih fleksibilnih ambalažnih folija

Površinski napon, odnosno površinska energija se može izmeriti na dva načina:

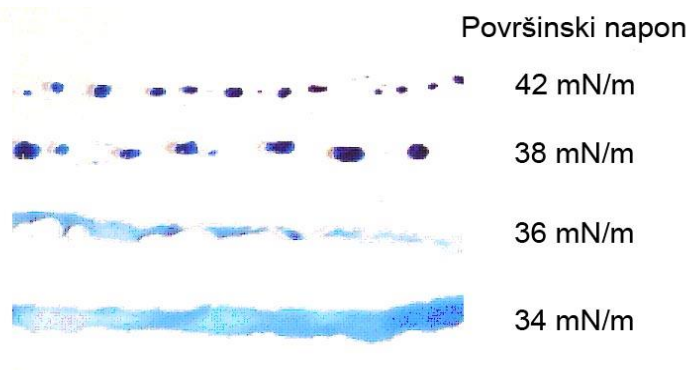
- pomoću specijalnih (test) tečnosti ili specijalnim flomasterom,
- merenjem kontaktnog ugla.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Grubo određivanje površinskog napona se može odrediti pomoću serija tečnosti za koje je poznat površinski napon (slika 46). Te tečnosti su mešavine rastvora, npr. dietilenglikola i 2-metil-2,4-pentadiola, pri čemu se različiti površinski naponi mogu podestiti varijacijom različitih udela u mešavini. Prvo se nanose tečnosti sa većim površinskim naponom. Posmatra se kako se tečnost ponaša, ako se skupi, onda se primenuje tečnost sa nižim površinskim naponom. Testiranje se nastavlja toliko dugo, dok tečnost za testiranje dobro ne pokrije površinu folije, odnosno dok film tečnosti ne ostane postojan u trajanju od 2 sekunde i potom se polako počne skupljati. U tom slučaju, površinski napon folije odgovara površinskom naponu tečnosti sa kojom se testira.

Za merenje površinskog napona u pogonu se koriste mnogo praktičniji flomasteri sa mernim tečnostima. Test se koristi slično kao i sa tečnostima.

Pomoću navedene metode, moguće je samo određivanje intervala u kojem se kreće površinski napon folije. Taj interval zavisi od intervala površinskih napona samih tečnosti, koji obično iznose 2 mN/m. Međutim, ovom metodom nije moguće odrediti disperzioni i polarni udeo napona, kao što je to slučaj po metodi merenja kontaktnog ugla tečnosti.



Slika 46: Primer testiranja površinskog napona folije sa različitim tečnostima

Takođe, pomoću jednostavne metode sa lepljivom trakom, ispituje se i prijanjanje boje nakon prvog odštampanog otiska i nakon svake izmene rolne folija. Ukoliko boja ostaje na traci, onda prethodna obrada nije zadovoljavajuća.

Površinski napon se može odrediti i merenjem statičkog ugla kvašenja kapljice na podlozi na mestu dodira tri faze, pomoću uređaja za merenje površinskog napona.

Princip merenja se zasniva na tome da se kap sa definisanom zapreminom stavlja na podlogu, a zatim snima (fotoaparatom na uređaju) i meri se ugao između tangente na kap i podloge. Ugao se meri uz upotrebu odgovarajućeg softvera.

Kod ovih merenja je značajno vreme merenja ugla, jer se vremenom kap može raširiti ili isušiti, kao u slučaju boja na bazi isparljivih rastvarača. Vrednosti merenja zavise, takođe, od temperature tečnosti i temperature okoline.

Određene vrednosti kontaktnog ugla se mogu direktno pretvoriti u vrednosti slobodne površinske energije, uz upotrebu softvera uključenog u opremu uređaja.

Određivanje površinskog napona čvrstih tela zasniva se na činjenici da oblik kapi neke tečnosti na čvrstom telu zavisi od površinskog napona materijala koji su u kontaktu.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Pomoću poznatih veličina kontaktnih uglova između kapi tečnosti i površine folije i odgovarajućeg proračuna, može se dobiti veličina površinskog napona štamparskih folija.

Proračun površinskog napona se zasniva na jednačini Young-Duprea:

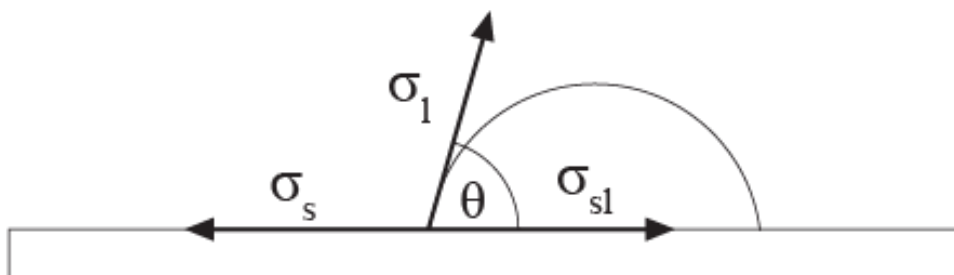
$$\sigma_l \cdot \cos\theta = \sigma_s - \sigma_{sl} \quad (9)$$

σ_lpovršinski napon tečnosti

σ_s ... površinski napon čvrstog tela (folije)

σ_{sl}površinski napon između čvrstog tela i tečnosti

θkontaktni ugao



Slika 47: Trougao napona (prema Young-Dupre-u)

Prethodna jednačina je izvedena sabiranjem vektora prema slici 47.

Kontaktni ugao θ i površinski napon tečnosti σ_l su merljive veličine. Veličine σ_s i σ_{sl} se ne mogu eksperimentalno odrediti, iz čega sledi da σ_s nije neka jasno definisana fizička veličina. Površina čvrstog tela se, ipak, indirektno može karakterisati merenjem, tj. proračunom veličine kontaktnog ugla.

Problem se rešava uz pomoć teoretske postavke Fowkes-a, koji površinski napon čvrstog tela i tečnosti definiše kao sumu disperzionog (nepolarnog) i polarnog dela (Krüss, 2012):

$$\sigma_{uk} = \sigma^d + \sigma^p \quad (10)$$

U fazi dodira, međusobna dejstva su ograničena na istoimene udele. Međusobno dejstvo na osnovu disperzionih sila dovodi do smanjenja napona u graničnom području, što se izražava geometrijskom sredinom σ^d – udela oba člana para $\sqrt{\sigma_s^d \cdot \sigma_l^d}$.

Dalja međusobna dejstva se ne moraju uzimati u obzir ukoliko je jedan član para nepolarni materijal (npr. tečnost).

Usled dodira tečnosti, redukuje se površinski napon polarnog materijala (čvrstog tela) na

$$\sigma_s - \sqrt{\sigma_s^d \cdot \sigma_l^d},$$

a nepolarnog materijala (tečnosti) na

$$\sigma_l - \sqrt{\sigma_s^d \cdot \sigma_l^d}.$$

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Ukupni površinski napon je sastavljen iz sume svih napona prema jednačini:

$$\sigma_{sl} = \sigma_s + \sigma_l - 2\sqrt{\sigma_s^d \cdot \sigma_l^d}$$

Prema Fowkes-u ta formula važi samo za disperzione sisteme. Ako se pretpostavi da se dešavaju i polarna međusobna dejstva, ta formula prema Owens-u i Wendt-u³ dobija oblik:

$$\sigma_{sl} = \sigma_s \cdot \sigma_l - 2\left(\sqrt{\sigma_s^d \sigma_l^d} + \sqrt{\sigma_s^p \cdot \sigma_l^p}\right) \quad (11)$$

Ako je poznat polarni i disperzioni udeo jednog člana (najčešće tečnosti), onda se, pomoću prethodne jednačine, može odrediti polarni i disperzioni udeo drugog člana para merenjem kontaktnog ugla.

$$\begin{aligned} \sigma_l &= \sigma_l^d + \sigma_l^p \\ \sigma_s &= \sigma_s^d + \sigma_s^p \end{aligned} \quad (12)$$

Kombinacijom, tj. uređenjem jednačina Younga, Owensa, Wendta i Rabela dobije se jednačina :

$$\frac{1 + \cos \theta}{2} \cdot \frac{\sigma_l}{\sqrt{\sigma_l^d}} = \sqrt{\sigma_s^p} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_l^p}{\sigma_l^d}} + \sqrt{\sigma_s^d} \quad (13)$$

Taj izraz predstavlja jednačinu prave

$y = ax + b$, kod koje je

$$x = \sqrt{\frac{\sigma_l - \sigma_l^d}{\sigma_l^d}} = \sqrt{\frac{\sigma_l^p}{\sigma_l^d}} \quad (14)$$

$$y = \frac{1 + \cos \theta}{2} \cdot \frac{\sigma_l}{\sqrt{\sigma_l^d}} \quad (15)$$

$$a = \sqrt{\sigma_s^p} \quad (16)$$

$$b = \sqrt{\sigma_s^d} \quad (17)$$

Ako su za različite tečnosti kojima se vrši ispitivanje (u konkretnom slučaju p.a voda, etilenglikol i 1,4-dioksan), poznate vrednosti ukupnog površinskog napona σ_l , polarnog i disperzionog udela (σ_l^p i σ_l^d), kao i odgovarajući kontaktni uglovi kontura kapi u odnosu na ravan folije, onda se pomoću navedenih izraza može odrediti prava (linearnom regresijom) na kojoj se vrednosti mogu direktno očitavati.

Koeficijent prave a i odsečak b se može izračunati prema sledećim jednačinama:

³ Najčešća korištena metoda za određivanje površinskog napona za ravnu plastiku (Izdebska & Thomas, 2016)

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

$$a = \frac{\sum x_i \cdot y_i - \frac{\sum x_i \cdot \sum y_i}{n}}{\sum (x_i)^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}} \quad (18)$$

$$b = \frac{\sum x_i \cdot (\sum x_i \cdot y_i) - (\sum y_i) \cdot (\sum x_i^2)}{(\sum x_i)^2 - n \cdot (\sum x_i^2)} \quad (19)$$

x_i, y_i ...koordinate tačaka koje se izračunaju za pojedine tečnosti za ispitivanje prema navedenim jednačinama.

Prema navedenim jednačinama (Owens, Wendt, Rabel, Kaelble) je:

- polarni udeo $\sigma_s^p = a^2$
- disperzni udeo $\sigma_s^d = b^2$
- ukupni površinski napon $\sigma_s = \sigma_s^p + \sigma_s^d$

Određivani su kontaktni uglovi referentnih tečnosti u odnosu na ravan folija. Vrednosti x, y, a i b su izračunate u programu Excel.

Poznate vrednosti površinskih napona tečnosti su date u tabeli 22.

Tabela 22: Površinski naponi tečnosti za ispitivanje

Tečnost za ispitivanje	σ_l	σ_l^d	σ_l^p
voda	73,0	26,0	46,8
etilen glikol	47,7	26,4	21,3
1,4 – dioksan	33,0	33,0	0,0

Na osnovu srednjih vrednosti kontaktnih uglova i poznatih površinskih napona tečnosti za ispitivanje, izračunaće se prvo veličine x i y za pojedine tečnosti i zatim parametri a i b, a iz njih veličine polarnog, disperzionog i ukupnog površinskog napona folija.

Za proračun kontaktnih uglova kapi uzete su srednje vrednosti očitanih kontaktnih uglova.

Određivanje površinskog napona BOPP folije pre i nakon štampanja

Dobijene srednje vrednosti kontaktnih uglova izmereni sa vodom, etilenglikolom i 1,4-dioksanom pre i nakon štampanja pokazuje tabela 23.

visok kontaktni ugao hidrofobna struktura

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Tabela 23: Izmereni kontakti uglovi pre i nakon štampanja za BOPP foliju

Kontaktni ugao	θ (voda) [°]	θ (etilenglikol) [°]	θ (dioksan) [°]
Folije pre štampanja	76,1	53,2	18,1
Folije nakon štampanja	74,3	49,1	16,8

Prema jednačinama 14 i 15 izračunate su vrednosti x i y.

$$x_v = \sqrt{\frac{46,8}{26,0}} = 1,342$$

$$x_e = \sqrt{\frac{21,3}{26,4}} = 0,898$$

$$x_d = \sqrt{\frac{0,0}{33,0}} = 0,0$$

$$y_v = \frac{1 + \cos 76,1}{2} \cdot \frac{73}{\sqrt{26}} = 8,89$$

$$y_e = \frac{1 + \cos 53,2}{2} \cdot \frac{47,7}{\sqrt{26,4}} = 7,39$$

$$y_d = \frac{1 + \cos 18,1}{2} \cdot \frac{33}{\sqrt{33}} = 5,60$$

b) Proračun veličina x i y za BOPP folije nakon štampanja

$$x_v = \sqrt{\frac{46,8}{26,0}} = 1,342$$

$$x_e = \sqrt{\frac{21,3}{26,4}} = 0,898$$

$$x_d = \sqrt{\frac{0,0}{33,0}} = 0,0$$

$$y_v = \frac{1 + \cos 74,3}{2} \cdot \frac{73}{\sqrt{26}} = 9,1$$

$$y_e = \frac{1 + \cos 49,1}{2} \cdot \frac{47,7}{\sqrt{26,4}} = 7,67$$

$$y_d = \frac{1 + \cos 16,8}{2} \cdot \frac{33}{\sqrt{33}} = 5,60$$

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Zbog jednostavnosti proračuna, jednačine 18 i 19 su transformisane u sledeći oblik:

$$\begin{aligned} a &= 3 + 4,54 \cdot \cos \theta_v + 0,755 \cos \theta_e - 2,29 \cos \theta_d \\ b &= 2,634 - \cos \theta_v + 0,98 \cos \theta_e + 2,665 \cos \theta_d \end{aligned} \quad (20)$$

Uvrštavanjem dobijenih vrednosti kontaktnih uglova, izračunate su sledeće veličine a i b (tabela 24):

Tabela 24: Izračunate veličine a i b za BOPP foliju pre i nakon štampanja

	a	b
Folije pre štampanja	2,18	5,50
Folije nakon štampanja	2,52	5,55

Površinski naponi folija

a) Površinski naponi folija pre štampanja

- Polarni deo $\sigma_s^p = a^2 = 4,75$ mN/m
- Disperzni deo $\sigma_s^d = b^2 = 30,25$ mN/m
- Ukupni površ. napon $\sigma_s = \sigma_s^p + \sigma_s^d = 4,75 + 30,25 = 35$ mN/m

b) Površinski naponi folija nakon štampanja

- Polarni deo $\sigma_s^p = a^2 = 6,35$ mN/m
- Disperzni deo $\sigma_s^d = b^2 = 30,80$ mN/m
- Ukupni površ. napon $\sigma_s = \sigma_s^p + \sigma_s^d = 6,35 + 30,80 = 37,15$ mN/m

Iz rezultata se može primetiti da se površinski napon BOPP folija nakon štampanja povećao. Kontaktni ugao sa vodom se kod štampanih uzoraka smanjio. Polarni i u nešto manjem obimu disperzn udeo se nako štampanja povećao što ukazuje na povećanje polarnosti površine i pozitivan uticaj na štampanost.

Određivanje površinskog napona PET/PE folije pre i nakon štampanja

U tabeli 25 prikazani su izmereni kontaktni uglovi za PET foliju (pre štampe) i PET/PE foliju (nakon štampe).

Tabela 25: Izmereni kontaktni uglovi pre i nakon štampanja za PET/PE foliju

Kontaktni ugao	θ (voda) [°]	θ (etilenglikol) [°]	θ (dioksan) [°]
Folije pre štampanja (PET)	78,9	33,6	7,3
Folije nakon štampanja (PET/PE)	73,4	50,9	27

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Izračunate vrednosti a i b prema transformisanoj jednačini 20 su prikazane u tabeli 26.

Tabela 26: Izračunate vrednosti a i b za folije PET (pre) i PET/PE nakon štampanja

	a	b
Folije pre štampanja	2,23	5,89
Folije nakon štampanja	2,733	5,0

a) Površinski naponi folija pre štampanja

Polarni deo napona $\sigma_s^p = a^2 = 4,97$ mN/m

Disperzni deo napona $\sigma_s^d = b^2 = 34,755$ mN/m

Ukupni površinski napon $\sigma_s = \sigma_s^p + \sigma_s^d = 4,97 + 34,755 = 39,69$ mN/m

b) Površinski naponi folija nakon štampanja

Polarni deo naona $\sigma_s^p = a^2 = 7,46$ mN/m

Disperzni deo napona $\sigma_s^d = b^2 = 25$ mN/m

Ukupni površinski napon $\sigma_s = \sigma_s^p + \sigma_s^d = 7,890 + 31,573 = 7,46 + 25 = 32,46$ mN/m

Iako je izmereni površinski napon monofolije manji u odnosu na deklarisanu vrednost, on je dovoljan za proces štampe. Nakon štampanja, površinski napon folije se smanjio uz povećanje polarnog, a smanjenje disperznog udela, što se može videti i iz izmerenih kontaktnih uglova sa različitim tečnostima.

Određivanje površinskog napona PETmet/PE folije pre i nakon štampanja

U tabeli 27 prikazani su izmereni kontaktni uglovi za PET foliju (pre štampe) i PET/PE foliju (nakon štampe).

Tabela 27: Izmereni kontaktni uglovi PETmet (pre) i nakon štampanja za PETmet/PE foliju

Kontaktni ugao	θ (voda) [°]	θ (etilenglikol) [°]	θ (dioksan) [°]
Folije pre štampanja (PETmet)	80,3	41,2	5,1
Folije nakon štampanja (PETmet/PE)	76,1	38,6	28,7

Izračunate vrednosti a i b prema transformisanoj jednačini 20 su prikazane u tabeli 28.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Tabela 28: Izračunate vrednosti a i b za folije PET i PETmet/PE nakon štampanja

	a	b
Folije pre štampanja	2,062	5,469
Folije nakon štampanja	2,67	5,489

a) Površinski naponi folija pre štampanja

Polarni deo napona $\sigma_s^p = a^2 = 4,25$ mN/m

Disperzni deo napona $\sigma_s^d = b^2 = 29,90$ mN/m

Ukupni površinski napon $\sigma_s = \sigma_s^p + \sigma_s^d = 4,25 + 29,90 = 34,1$ mN/m

b) Površinski naponi folija nakon štampanja

Polarni deo napona $\sigma_s^p = a^2 = 7,132$ mN/m

Disperzni deo napona $\sigma_s^d = b^2 = 30,129$ mN/m

Ukupni površinski napon $\sigma_s = \sigma_s^p + \sigma_s^d = 7,132 + 30,129 = 37,261$ mN/m

Na osnovu merenja kontaktnog ugla sa tri tečnosti na odabranim fleksibilnim ambalažnim materijalima, može se karakterisati njihovo kvašenje. Može se konstatovati da površina materijala reaguje različito u zavisnosti od primenjene tečnosti. Najveći ugao kod sva tri materijala formira površina materijala sa vodom, što se i moglo očekivati s obzirom na karakteristike površine (voda-polarna, materijal-nepolaran).

Postojanje polarnih i nepolarnih grupa na površini direktno utiče na kvašenje, pa se može istaći da ako tečnost kvasi površinu materijala pod uglovima između $0^\circ < \theta < 90^\circ$, kaže se da je hidrofilna, a hidrofobna ako je ugao između $90^\circ < \theta < 180^\circ$. Kada kap vode dođe u kontakt sa hidrofilnom površinom, ima tendenciju da se širi, uzrokujući nizak θ ili jednak nuli. Suprotno tome, kap će se odbiti, jer će doći do minimalnog kontakta sa površinom, što će rezultirati visokim kontaktnim uglom.

Kod svih materijala, udeo polarne komponente je manji, a udeo disperzivne (nepolarne) komponente veći, što je i očekivano ponašanje ovih materijala.

Rezultati pokazuju da se površinski napon folija nakon štampanja, u odnosu na površinski napon pre štampanja povećao (kod BOPP folije), a kod materijala PET/PE i PETmet/PE smanjio u odnosu na monomaterijal (u ovom slučaju PET).

Merenje površinskog napona boje

U radu je izvršeno i merenje površinskog napona štamparske boje. Korištena je tzv. metoda kapi i uređaj stalagomometar. Princip merenja se zasniva na merenju koeficijenta površinskog napona tečnosti iz mase kapljice. Kap se odvaja od ostale mase tečnosti u trenutku kada je težina kapi (Q) u ravnoteži sa silom površinskog napona (F).

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

$$Q = mg \quad (21)$$

$$F = \gamma 2r\pi \quad (22)$$

Kombinacijom izraza 21 i 22 dobija se:

$$\gamma = \frac{mg}{2r\pi} \quad (23)$$

γ -koeficijent površinskog napona

Masa m kapi se određuje pomoću analitičke vage, a poluprečnik kapilare r pomoću mikroskopa sa mikrometrom ili nekom drugom metodom. Međutim, u cilju pojednostavljenja eksperimenta i izbegavanja merenja prečnika kapilare, merenja se mogu izvoditi relativno u odnosu na neku tečnost čiji je koeficijent površinskog napona poznat (najčešće voda).

Konačni oblik jednačine dobija oblik:

$$\gamma = \frac{m}{m_0} \gamma_0 \quad (24)$$

gde su m i m_0 mase jedne kapi.

Princip merenja se sastoji u tome da se izmeri masa čiste i suve staklene posude, zatim se izbroji n kapi tečnosti (najčešće 50 kapi) i izmeri masa suda sa kapima.

Merenje površinskog napona žute boje

Izmerena je masa prazne čaše koja iznosi 111,15 g. Izmeren broj kapi vode je 50, a masa čaše sa kapima vode iznosi 113,67 g. Oduzimanjem mase čaše sa kapima (113,67) od mase prazne čaše (111,15) dobija se masa vode koja iznosi 2,52 g. Zatim je izmerena masa čaše sa 50 kapi žute boje koja iznosi 112,09 g. Oduzimanjem mase čaše sa kapima žute boje (112,09) od mase prazne čaše (111,15) dobija se vrednost mase žute boje od 0,94 g. Delenjem mase vode (2,52 g) sa brojem kapi (50) dobija se masa jedne kapi $m_0=0,0504$ g. Delenjem mase žute boje (0,94) sa brojem kapi (50) dobija se masa jedne kapi $m=0,0188$ g. Ako je poznata vrednost površinskog napona vode $\gamma=72$ mN/m, uvrštavanjem dobijenih vrednosti u izraz 24 dobija se sledeća vrednost:

$$\gamma = 72 \frac{0,0188}{0,0504} = 26,85 \text{ mN/m}$$

Princip merenja za crvenu i žutu boju je isti.

Merenje površinskog napona crvene boje

Izmerene mase jedne kapi crvene boje iznose $m=0,0133$ g, a masa jedne kapi vode $m_0=0,0328$ g. Uvrštavanjem ovih vrednosti u izraz 24 dobija se vrednost:

$$\gamma = 72 \frac{0,0133}{0,0328} = 29,19 \frac{\text{mN}}{\text{m}}$$

Merenje površinskog napona plave boje

Izmerene mase jedne kapi plave boje iznose $m=0,0121$ g, a masa jedne kapi vode $m_0=0,036$ g. Uvrštavanjem ovih vrednosti u izraz 24 dobija se vrednosti:

$$\gamma = 72 \frac{0,0121}{0,036} = 24,18 \frac{\text{mN}}{\text{m}}$$

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Rezultati merenja površinskog napona boja na bazi rastvarača korištenih za štampanje ispitivanih uzoraka pokazuju očekivane vrednosti od 20 do 30 mN (Aydemir et al., 2021). Prema istom izvoru, površinski napon polimernih materijala trebao bi biti za 10 mN/m veći od površinskog napona boje, iako prema nekim studijama to nije odlučujuće. Neki izvori (Brandt, 2015; Morsi et al., 2006) navode da, ukoliko se želi postići odgovarajuće prihvatanje boje, potrebna površinska energija plastičnih materijala za štampu treba da bude veća od 42 mN/m.

Površinski napon ispitivanih folija je veći od površinskog napona boje, što ukazuje na dobru mogućnost prihvatanja boje.

6.5.2 Mikroskopsko ispitivanje

S obzirom da je kupac (potrošač) u današnje vreme u prodavnici okružen sa nekoliko hiljada proizvoda u uslovima velike konkurencije, estetski privlačna i kvalitetno odštampana ambalaža u više boja može da utiče na privlačenje pažnje i samim tim na prodaju proizvoda.

Jedan od faktora kvaliteta otiska je preklapanje boja (Aydemir i dr., 2019). Pod preklapanjem boja (eng. trapping) podrazumeva se mogućnost ili nemogućnost da odštampana boja prihvati sledeću boju (Leach i dr., 2007). Ukoliko je preklapanje boja iz nekog razloga poremećeno može doći do pomeranja željenog tona boje. Prihvatanje boje na boju zavisi pored ostalog od debljine nanosa i od redosleda boja pri štampanju.

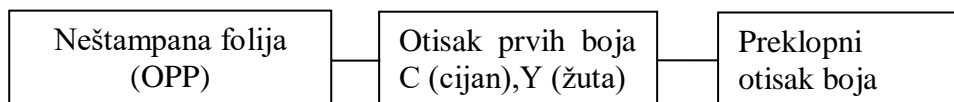
Ocena kvaliteta preklopnog otiska u štamparskom procesu ambalažnih folija se može vršiti s obzirom na razne kriterijume, pri čemu je teško utvrditi koji od pojedinih kriterijuma ga jasnije karakterišu i u kojoj meri su ocene saglasne. Za određivanje prihvatanja preklopne boje postoje uobičajene metode merenja (npr. prema jednačinama Preucila, Ritza, Brunnera) čije merenje se bazira na osnovu merenja optičkih gustina prve i druge odštampane boje kao i merenja gustina dve boje. Pored denzitometrijskog merenja postoji i vizuelni način određivanja kvaliteta preklopnog otiska pomoću mikroskopa što će se pokušati i uraditi u ovom radu.

Udeo sa kojim se druga odštampana boja prenosi na prethodno odštampanu boju izražava se u %. Prihvatanje boje od 100 % znači da drugo odštampana boja leži na prvo odštampanoj boji na isti način kao i na neodštampanoj foliji, što bi značilo da drugo odštampana boja u oba slučaja poseduje istu gustinu odnosno pokrivenost površine.

U ovom radu ispitan je kvalitet punog tona preklopnog flekso otiska (magenta na cijan - M/C, cijana na žutu - C/Y i magenta na žutu - M/Y) na OPP folijama debljine 50 μ m. Štamparska folija je uzeta kao gotov proizvod jednog određenog standardnog štamparskog procesa, uz jednaku brzinu i ostale parametre procesa štampanja. Ispitivanje na drugim folija nije bilo moguće uraditi, ali prikazani princip merenja bi se mogao primeniti i na svim ostalim folijama.

Princip ispitivanja preklopnog flekso otiska je vršen po sledećoj šemi (slika 48).

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike



Slika 48: Princip ispitivanja preklopnog fleksio otiska

M/C-magenta na cijan

C/Y-cijan na žutu

M/Y-magenta na žutu

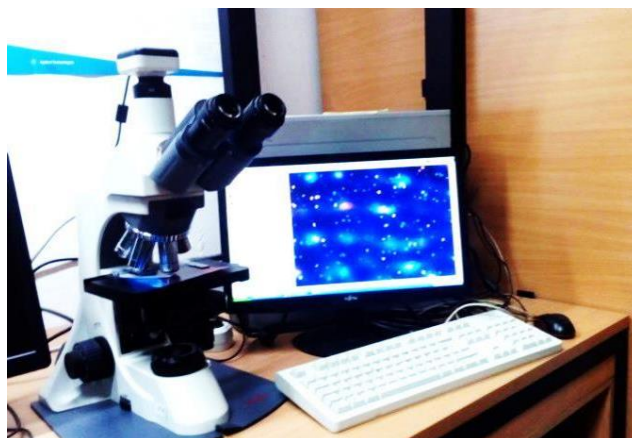
Za analizu pokrivenosti odnosno nepokrivenosti površine drugom bojom korišćen je svetlosni mikroskop firme Motic sa pripadajućim softverom za analizu slike Motic Images Plus 2.0 uz uvećanje od 200 x (slika 49). Merenje je izvršeno na površini folije 30 x 30 mm² na pet nasumično izabranih vidnih polja.

Prvo što je na svim otiscima uočeno su manje bele ponavljajuće površine (prstenovi) koje nisu pokrivene bojom. Selektovanjem i određivanjem njihovih površina uočena je približno ista površina (od cca. 21.6 μm² -35.2 μm²). S obzirom na njihovu tendenciju ponavljanja i malu površinu, one se u daljnjim proračunima se ne uzimaju u obzir, zbog čega se za proračun uzimaju nepokrivene površine od minimum 300 μm². Uzrok ponavljajućih nepokrivenih površina mogu biti nečistoće na štamparskoj formi (Mesic i dr, 2003).

Takođe su uočena mesta (prstenovi) pokrivena samo prvom bojom kao i mesta pokrivena samo drugom bojom različitih geometrijskih oblika (od jasno do nejasno ograničenih). Vidljive su bile i mešane površine (npr. magente i cijana) - slika 50.

Uzroci navedenih nepokrivenih područja mogu biti različita udubljenja, uzvišenja ili neke vrste nesavršenosti na štamparskom materijalu kao i loše kvašenje odnosno neodgovarajući površinski napon (Mesic i dr, 2006).

Odgovarajućom selekcijom nepokrivenih (belih) površina kao i površina pokrivenih samo prvom bojom određena je površina istih, a rezultat iskazan kao procenat pokrivenosti površine (zbir nepokrivenih površina u odnosu na površinu vidnog polja).



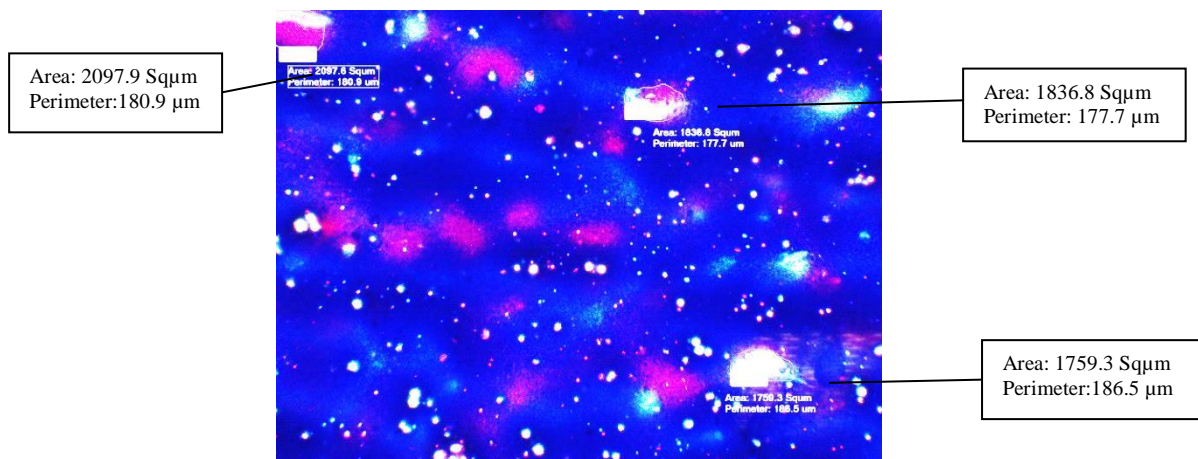
Slika 49: Mikroskop "Motic"

Kod preklopnog otiska M/C ukupan zbir selektovanih površina, (uzeta je srednja vrednost na dve folije sa po pet vidnih polja), iznosi 4070 μm². Kada se ta površina podeli sa ukupnom

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

površinom vidnog polja na uvećanju od 200 x i pretvori u procenete, dobija se iznos pokrivenosti od 99,59 %.

Slika 51 prikazuje preklapni otisak C/Y na OPP foliji. Ukupan zbir selektovanih površina (uzeta je srednja vrednost na dve folije sa po pet mernih mesta) iznosi 2200 μm^2 . Kada se ta površina podeli sa ukupnom površinom vidnog polja na uvećanju od 200 x i pretvori u procenete, dobija se iznos pokrivenosti od 99,78 %.



Slika 50: Primer preklapnog otiska M/C na OPP foliji sa selektovanim nepokrivenim (belim) površinama i površinama pokrivenim samo jednom bojom (M ili C)

Na slici 52 prikazan je primer preklapnog otiska M/Y na OPP foliji sa selektovanom površinom nepokrivenom bojom. Ukupan zbir selektovanih površina (uzeta je srednja vrednost na dve folije sa po pet mernih mesta) iznosi 1500 μm^2 . Kada se ta površina podeli sa ukupnom površinom vidnog polja na uvećanju od 200 x i pretvori u procenete, dobija se iznos pokrivenosti od 99,85 %.

Iz analize tri preklapna otiska (M/C, C/Y i M/Y) pomoću svetlosnog mikroskopa proizlazi da je vrednost preklapanja iznosi 99,59 %, 99, 78 % i 99,85 % respektivno, što u sva tri slučaja predstavlja izuzetno dobru pokrivenost druge odštampane boje.

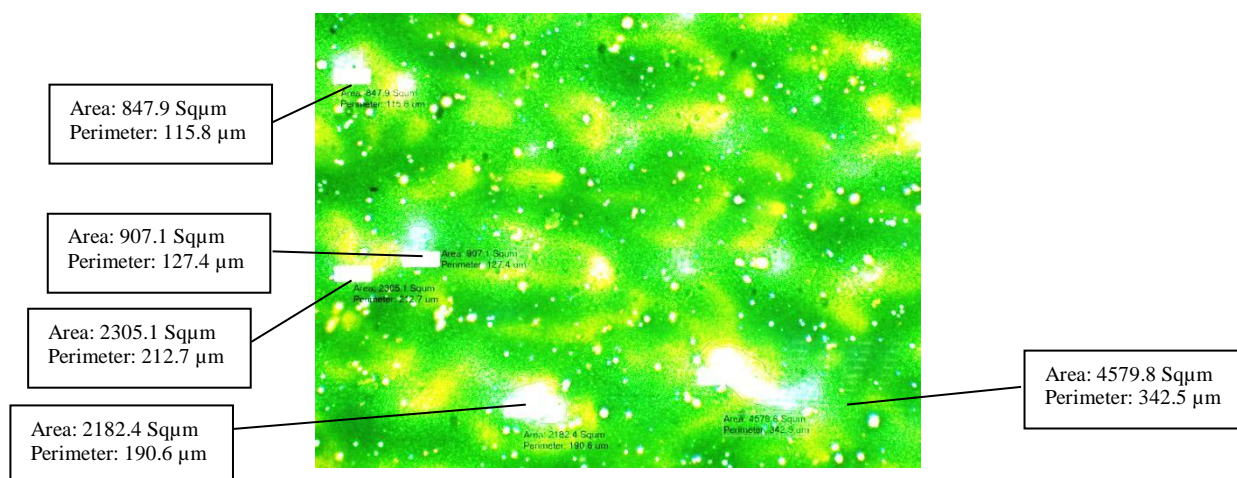
Iako su nepokrivene površine jasno vidljive pod optičkim mikroskopom, one ne utiču na ukupan vizuelni utisak.

Za detaljnija istraživanja bilo bi potrebno uraditi denzitometrijska merenja (u cilju određivanja optičkih gustina boja, a zatim i vrednosti preklapanja), kao i merenja hrapavosti štamparskog materijala.

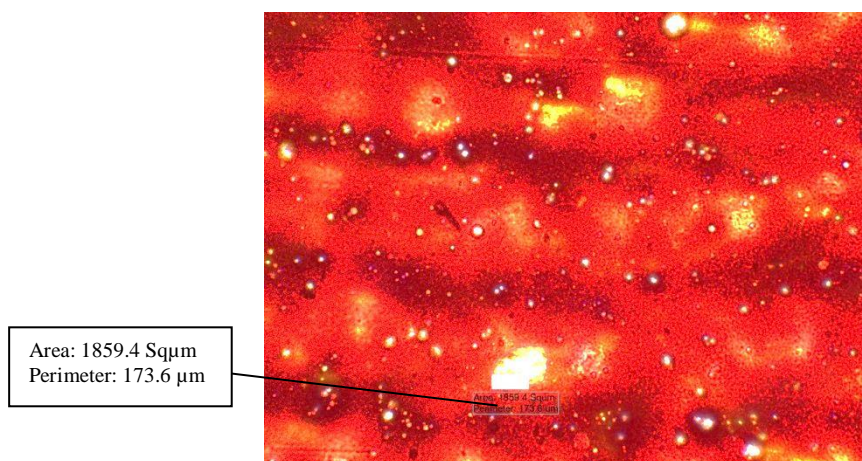
Navedeni rezultati se moraju posmatrati sa rezervom zbog mogućeg različitog pritiska štampanja, oscilacije temperature kod para boja/folija i posebno samog postupka merenja i analize slike. Naime, udeo nepokrivenih mesta sa bojom određuje se detekcijom, pri čemu je moguće podešavanje selektovanih i neselektovanih vrednosti (npr. pomoću Motic Images Advanced 3.2). Za ispitivanje u ovom radu korišten je program Motic Images Plus 2.0 koji to ne omogućava. Iz navedenih razloga se ne može govoriti o pouzdanom međusobnom

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

poređenju dobijenih veličina pokrivenosti površine. Ali s obzirom na cilj ovog rada ti rezultati pomažu pri vizuelnoj oceni otiska.



Slika 51: Primer preklopnog otiska C/Y na OPP foliji sa selektovanim nepokrivenim (belim) površinama i površinama pokrivenim samo jednom bojom (Y ili C)



Slika 52: Primer preklopnog otiska M/Y na OPP foliji sa selektovanom površinom nepokrivenom bojom

7. IZBOR ODGOVARAJUĆE METODE ZA VREDNOVANJE

7.1 Primena metoda vrednovanja za ambalažu

Čovek se svakodnevno susreće sa problemom donošenja odluka. Do 90-ih godina teorije odlučivanja u raznim disciplinama uglavnom su bile zasnovane na "teoriji racionalnog izbora" odnosno pretpostavci da su odluke racionalno donešene. Ovde se pod racionalno podrazumeva da postoji samo jedan tačan odgovor koji se podudara sa sklonostima i uverenjima donosioca odluke kao i da se odlučujući i (neovlašteni) posmatrači slažu oko karakteristika tačnog odgovora (Müller-Herbers, 2007). Međutim, psihologija je pokazala da je pretpostavka o racionalnom ponašanju nerealna. Na donošenje racionalnih odluka kod ljudi utiče i formulacija zadatka, verovatnoća očekivanih efekata, percepcija rizika, okolina, osećanja. U radu (Ishizaka i Siraj, 2018) potvrđena je korisnost primene višekriterijumskih metoda odlučivanja u odnosu na intuitivno odlučivanje.

Za rešavanje kompleksnih problema odlučivanja razvijene su različite metode višekriterijumskog odlučivanja - (MCDM⁴) metode. Ove metode treba da pruže pomoć donosiocima odluka koji se suočavaju sa brojnim i konfliktnim alternativama u cilju donošenja optimalne odluke (Tzeng, Huang, 2011). Uopšteno, pri odabiru metode vrednovanja je potrebno postaviti najmanje sledeće zahteve (Steinschaden, 1999):

- razmotriti kvantitativne i kvalitativne osobine,
- mali troškovi,
- transparentnost,
- reproduktivnost.

Pri procesu odlučivanja do teškoća može doći, pre svega, zbog broja alternativa i kriterijuma, konflikta kod postavljanja prioriteta, nesigurnosti, kvantitativnih i kvalitativnih kriterijuma, odlučivanja od strane više osoba (grupnog odlučivanja) (Müller-Herbers, 2007).

Metode za vrednovanje se mogu kretati od jednostavnih gde se samo ispituje npr. principijelna podobnost i isključuju nepodobne varijante. Kod postupka jednostavne metode za donošenje odluka odabira između nekoliko varijanti, prvo je potrebno odrediti kriterijume za izbor, nakon čega se varijante vrednuju s obzirom na ispunjenje kriterijuma jednostavnim vrednovanjem (Meier, 2002). Rezultat izbora je odluka o suženom izboru najpovoljnijih varijanti. Ovakvo ocenjivanje ima za rizik da otpadnu i povoljne varijante zbog pogrešnog vrednovanja usled nedovoljnih informacija.

Kod složenijeg vrednovanja podobna rešenja se ispituju s obzirom na kvalitet ispunjenja zahteva. Međutim, kompleksne i precizno razrađene metode vrednovanja, razvijene i

⁴ MCDM - Multiple Criteria Decision Making

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

primenjivane od strane velikih firmi, naučnih i drugih institucija iziskuju veliki utrošak vremena i sredstava u toku obrade problema. S druge strane postoje praktične i praksi bliske metode, koje zahtevaju relativno malo utrošenog vremena. One se doduše baziraju na relativno grubim približenjima, ali one ipak sprečavaju grube greške kod razvoja proizvoda.

Pouzdanost rezultata vrednovanja zavisi od pouzdanosti raspoloživih podataka (kvantitativnih odnosno merljivih) ili kvalitativnih.

Pregledom literature iz oblasti višekriterijumskog vrednovanja ambalaže se može uočiti da su korištene različite metode za vrednovanje u zavisnosti od postavljenog cilja.

Tako npr. je u radu Stanujkić i dr. (2015), korišćena SWARA - (Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis) metoda u svrhu odabira odgovarajućeg dizajna ambalaže za vino.

U radu Chen i Song (2018), korišćena je AHP metoda za ocenu dizajna ambalaže za prehrambene proizvode s obzirom na funkcionalne, estetske, psihološke i sociološke kriterijume.

U radu Senyigit i Demirel (2017) su korištene tri metode za vrednovanje i to AHP, TOPSIS⁵ i SAW⁶ u cilju određivanja najboljeg materijala za ambalažu za piće. Kriterijumi koji su ispitani su propustljivost na CO₂, zatezna čvrstoća, modul elastičnosti, gustina, cena i optičke karakteristike.

U radu Olsmats i Dominic (2003), predložena je metoda u cilju procene performansi pakovanja u čitavom lancu snabdevanja proizvodima. Primenom pve metode dobijene su brožčane vrednosti ambalaže, pomoću koje se mogu sistemski identifikovati njene prednosti i nedostaci.

U radu Tsigonias i dr. (2012), korišten je višekriterijumski pristup sa ciljem određivanja najboljeg dizajna ambalaže s obzirom na više kriterijuma (dizajn, marketing, materijali, logistika, ekologija, troškovi).

Repeta i Kukura (2016) su za vrednovanje kvaliteta flekso otiska na polimernim filmovima koristili fazi logiku. Kao kriterijumi su izabrani kolor razlika, reprodukcija minimalne rasterske tačke, adhezija boje na supstrat i pozicija slike.

U radu Balaban (2012), dat je predlog određivanja značaja boje u ukupnoj vrednosti fleksibilne ambalaže primenom analize vrednosti kao metode vrednovanja. Faktori značaja glavnih kriterijuma su određeni na osnovu rangiranja odnosno međusobnog poređenja dodelom bodova pojedinim kriterijumima.

Pregledom literature moglo se ustanoviti da su najčešći radovi iz teme ekološkog vrednovanja ambalaže. Tako u Allione, Petruccelli (2012) je korišćena višekriterijumska metoda za ocenu eko performansi ambalaže za hranu. U radu Rezaei i dr. (2018) primenjen je višekriterijumski pristup u cilju donošenja odluke o optimalnoj ekološkoj ambalaži za hranu. Wang i White, (2014), su razvili alat za podršku odlučivanju i vrednovanju različitih ekoloških alternativa

⁵Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

⁶Simple Additive Weighting

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

ambalaže koja se zasniva na primeni ocene životnog ciklusa - LCA (Life Cycle Assessment) i hibridne višekriterijumske metode.

U VDI 4409 (1996-04), opisan je postupak ekološkog vrednovanja ambalaže u kojem se se uzimaju sve faze u životnom ciklusu ambalaže (proizvodnja, korišćenje i zbrinjavanje) i njihov uticaj na životnu sredinu. Polazi se od ekološki orijentisanih zahteva za ambalažu, opisa kriterijuma, određivanja značaja, određivanja ekoloških vrednosti pojedinih kriterijuma do konačno ocene i izbora najbolje ekološke ambalaže.

Kao što se može zaključiti iz pregleda literature, specifičnost vrednovanja bilo kog aspekta ambalaže jeste postojanje kombinacije multidimenzionalnih kriterijuma sa različitim obeležijma. Korišćene metode za vrednovanje ambalaže kreću od jednostavnih i grubih (npr. optimizacije samo pojedinih faza u životnom ciklusu proizvoda heng- materijala, izrade, ekološkog kvaliteta, minimizacije troškova, itd.), pa do kompleksnih i iznijansiranih postupaka vrednovanja i ocene, po kojima se istovremeno i međuzavisno razmatraju sve faze životnog ciklusa ambalaže.

Kao podrška vrednovanju i izboru ambalaže za životne namirnice, a u cilju sagledavanja relevantnih podataka u vezi njenog odabira, može poslužiti i ček-lista. Ček lista može znatno olakšati rešavanje problema vrednovanja i izbora ambalaže. U tabeli 29 dat je primer ček-liste sa zahtevima koji mogu biti značajni za vrednovanje ambalaže za životne namirnice (Balaban, Stanojković, 2019). Ček-lista obuhvata pitanja u vezi s propisima, sigurnosnim, tehnološkim, ekološkim, ekonomskim i logističkim aspektima, kao i sa kvalitetom životnih namirnica i marketingom. Za ocenu ispunjenosti zahteva kod pojedinih kriterijuma koriste se različite skale, a ukupna vrednost pojedinih alternativa ambalaže se dobija sabiranjem vrednosti pojedinih kriterijuma. Međutim, za pouzdanije vrednovanje pored ocenjenih vrednosti kriterijuma potrebno je uzeti u obzir i faktore značaja pojedinih kriterijuma.

U tabeli 30 dati su primeri rangiranja nekih polimera s obzirom na njihove karakteristike kao što su propustljivost vodene pare i gasove, optiku, mašinabilnost i zavarivanje (Coles, R. & McDowell, 2003).

Za postavljeni cilj u ovom radu treba pronaći jednu opštevažeću metodu vrednovanja sa kojom će se dobiti odgovor, koja ambalaža dolazi u obzir za određeni sadržaj, s obzirom na odabrane kriterijume (pre svega tehničko-tehnološke), a sa posebnim akcentom na karakteristike materijala nakon postupka štampanja i pakovanja. Ovo je značajno zbog toga što se preduzeća za štampanje i izradu fleksibilne ambalaže često oslanjaju samo na ulazne podatke za fleksibilne materijale, koji mogu biti promenjivi u toku procesa, a takođe i na manji broj kriterijuma za ocenu upotrebne vrednosti, kao što je npr. ekonomski ili estetski.

Zbog različitih mašina odnosno procesa flekso štampe i širokog spektra fleksibilne ambalaže za različite sadržaje, nije moguće definisati opšte važeću metodu vrednovanja. Svako vrednovanje je manje ili više vezano za izradu štampane fleksibilne ambalaže za određeni sadržaj i određeni tehničko-tehnološki proces.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Tabela 29: Primer ček-liste sa zahtevima za vrednovanje

Zahtevi	
1.	Pravna ograničenja
1.1	Poznata su sva pravna ograničenja za određeni ambalažni materijal.
1.2	Ambalaža odgovara aktuelnim zakonskim odredbama.
1.3	Za sve upotrebljene amb. mat. postoje dokazi o podobnosti upotrebe (deklaracije, analize).
2.	Sigurnosni zahtevi
2.1	Mogući rizici od migracije između ambalaže i živ. namirnice su određeni, poznati i kontrolisani.
2.2	Osigurano je takvo rukovanje amb. materijala izvan proizv. pogona da su minimizirane moguće kontaminacije (npr. stranim materijama, mikroorganizmima).
2.3	Obezbeđena je sigurnost potrošača prilikom rukovanja sa ambalažom.
3.	Kriterijumi kvaliteta životnih namirnica
3.1	Poznati su zahtevi koje mora da ispuni ambalaža s obzirom na karakteristike proizvoda (npr. masno, tečno, sterilizacija).
3.2	Ambalaža održava kvalitet proizvoda do kraja datuma upotrebe i urađena je i provera.
4.	Zahtevi marketinga
4.1	Označavanje u pravnom smislu je ispravno.
4.2	Ambalaža pruža dobre mogućnosti za dizajn i on se može optimalno koristiti za pružanje informacija.
5.	Tehnološki zahtevi
5.1	Za sve upotrebljene ambalažne materijale postoje detaljne specifikacije (podaci u vezi mašina i pakovanja).
5.2	Specifikacije odgovaraju zahtevima mašina.
6.	Ekološki kriterijumi
6.1	Poznate su pojedine faze životnog ciklusa ambalaže (sirovine, proizvodnja, primena, zbrinjavanje) i uzete su u obzir kod vrednovanja.
6.2	Obezbeđena je minimalna potrošnja resursa i energije kao i minimalna emisija tokom životnog ciklusa ambalaže.
6.3	U što većoj meri se sprovode procesi ponovne upotrebe/reciklaže u životnom ciklusu ambalaže.
7.	Ekonomski aspekti
7.1	Ukupni troškovi ambalaže (troškovi alata, dizajn, troškovi proizvodnje, ponovna upotreba) mogu se smatrati povoljnim.
7.2	Količina je isplativa.
8.	Logistički zahtevi
8.1	Ambalaža odgovara trenutnim logističkim zahtevima (slaganje, oblik s obzirom na transport i dr.).

7.2 Izbor metode vrednovanja

S obzirom da se ambalaža, odnosno ambalažni materijali mogu posmatrati kao svaki drugi tehnički proizvod (iako sa tom razlikom što ona ima relativno kratki vek korišćenja), problemu vrednovanja štampane fleksibilne ambalaže može se pristupiti pomoću poznatih postupaka vrednovanja koji se koriste za tehničke proizvode.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Tabela 30: Rangiranje različitih folija s obzirom na različite osobine

Polimer	Propustljivost vodene pare	Propustljivost na gasove	Optika	Mašinabilnost	Zavarivanje
LDPE	3	4	4	4	1
cast PP	3	4	2	4	2
OPP	2	2	2	2	2
OPP premazan	1	1	1	2	4
PET	2	2	1	1	4

1-odličan 2-jako dobar 3-dobar 4-slab

Na osnovu analize postupaka vrednovanja u tehnici može se konstatovati da postoje sledeći oblici vrednovanja (Zangemeister, 2014):

1. Vrednovanje na osnovu opisa kriterijuma i varijantnih rešenja. Ovo vrednovanje je univerzalno primenjivo, ali nedovoljno pouzdano i neprikladno.
2. Vrednovanje na osnovu minimalnih zahteva. Kod ovog vrednovanja se za svaki kriterijum formulišu minimalni zahtevi i onda se vrši vrednovanje. Ovde se može vršiti izbor, ali u osnovi bez stvarnog postupka vrednovanja. Ukoliko više varijanti ispunjava minimalne zahteve, nije moguće upoređivati varijante po rangju.
3. Ocena bez međusobnog vrednovanja pojedinih zahteva. Način ispunjenja zahteva ocenjuje se sa bodovima (od 1 do 10, procentnom skalom, itd.) Varijanta sa najvećom sumom bodova predstavlja najprikladniju varijantu. Ovaj postupak omogućava samo grubi izbor ambalaže, jer ne uzima u obzir različite značaje pojedinih kriterijuma. Ovakvo vrednovanje, uz pomoć ček-lista je prikazano u radu (Balaban, Stanojković; 2019).
4. Ocena sa međusobnim vrednovanjem zahteva. Kriterijumi se vrednuju prema njihovom značaju i označavaju različitim faktorima značaja. To omogućava diferenciranje približno jednakih rešenja i rangiranje varijanti.
5. Ordinalno skaliranje. Jedan kriterijum se posmatra kod svih raspoloživih alternativa i taj kriterijum se označi rangom (brojem) kojeg zauzima. Vrednost jedne alternative dobije se zbrajanjem tih brojeva, a alternative se poređaju po njihovoj sumi. Postupak je jednostavan i brz, ali može biti problematično pretvaranje rang mesta u bodove. Ovaj način vrednovanja korišćen je u ovom radu.

Iz prethodne kratke analize postupaka za vrednovanje i izbor u tehnici, proizlaze analogne mogućnosti vrednovanja ambalaže uz određene pretpostavke i ograničenja.

Kod razvoja proizvoda i projektovanja (pretežno u mašinstvu) se koriste metode kao što su tehničko-ekonomsko vrednovanje prema VDI 2225, binarno vrednovanje, metoda analize korisne vrednosti i AHP metoda-metoda analitičko-hijerarhijskog procesa (Steinschaden, 1999). U tekstu koji sledi ukratko će se objasniti pojedine metode vrednovanja kako bi se ukazale na prednosti i nedostatke istih, te odabrala odgovarajuća za problem vrednovanja u ovom radu.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Vrednovanje prema VDI 2225

Vrednovanje prema VDI 2225 se može koristiti za upoređivanje varijanti prema tehničkom i ekonomskom kriterijumu (VDI 2205, 1998-11). U prvom koraku, moraju se postaviti zahtevi koji su grupisani u imperativne i minimalne zahteve i želje. Imperativni zahtevi moraju biti ispunjeni u svim varijantnim rešenjima, tako da se u vrednovanju uzimaju samo minimalni zahtevi i želje. U sledećem koraku zahtevi se ocenjuju bodovima, pri čemu se može koristiti skala od 0-5 bodova. Sa 0 bodova nisu ispunjeni elementi, a sa 5 bodova ocenjuju se vrlo dobri i idealno ispunjeni elementi. Merilo za vrednovanje treba da bude idealno rešenje, odnosno varijanta rešenja koja najbolje ispunjava sve kriterijume ocenjivanja. Što je veća ocena, odgovarajuća varijanta je bliža idealnoj. Osim tehničkih kriterijuma, mogu postojati i drugi ciljevi (npr. ergonomski).

Vrednovanje na osnovu bodovanja prema VDI 2225 se u osnovi se sastoji od 5 faza (Meier, 2002):

1. Postavljanje cilja i izvođenje kriterijuma za vrednovanje.
Cilj predstavlja opis zahtevanih osobina nekog fiktivnog dobrog rešenja, s obzirom na zahteve. Pri postavljanju cilja treba težiti potpunosti ciljeva (sveobuhvatno vrednovanje) i čim manjoj međuzavisnosti pojedinih ciljeva (ne opisivati više puta jedan isti cilj u različitim formulacijama). Iz ciljeva koji imaju karakter osobina, mogu se onda izvoditi kriterijumi za vrednovanje, čija područja vrednosti se određuju prema određenim skalama. Ciljevi se formulišu iz zahteva za rešenje kao i dodatnih opštih zahteva. U tim ciljevima moraju biti potpuno sadržani svi relevantni zahtevi i opšti uslovi.
2. Određivanje značaja kriterijuma, što se može postići na osnovu anketa kupaca, timskom ocenom ili poređenjem parova (npr. trodelnom skalom, 2-važnije, 1-jedanko važno, 0-manje važno).
3. Sastavljanje osobina pojedinih alternativa koje moraju korelirati sa kriterijumima za vrednovanje.
4. Izbor skale koje normiraju konkretne osobine alternativa, čija vrednost se određuje davanjem poena.
Opšte vrednosne skale predstavljaju standarde za davanje ocena ili simbola kojima se opisuje značaj osobina u svrhu transformacije konkretnih osobina u vrednosti sa kojima se mogu računski porediti. Čim su rešenja konkretnija i diferenciranija, tim detaljnija može biti i vrednosna skala. Pre svega ona mora biti jednoznačna i praktična. Ne preporučuje se skala sa širokim rasponom, a takođe se ne preporučuje ni skala kao što je, na primer, trobodovna skala (ispunjava/neutralno/ne ispunjava), jer ne omogućava diferenciranje (Kühnapfel, 2019). Tabela 31 prikazuje uobičajene opšte skale.
5. Određivanje ukupne vrednosti za svaku alternativu, na osnovu parcijalnih vrednosti pojedinih kriterijuma.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Tabela 31: Uobičajene opšte vrednosne skale

Opšte vrednosne skale							
Vrednovanje konkurencije		Procena robe		VDI 2225		Analiza korisne vrednosti	
Bodovi	Značenje	Simb.	Značenje	Bodovi	Značenje	Bodovi	Značenje
0	Loše	--	Ne zadovoljava	0	Ne zadovoljava	0	Neupotrebljivo rešenje
						1	Rešenje sa znatnim nedostacima
		-	Još prihvatljivo	1	Još podnošljivo	2	Slabo rešenje
						3	Još prihvatljivo rešenje
		0	Zadovoljavajuće	2	Zadovoljavajuće	4	Prihvatljivo rešenje
						5	Zadovoljavajuće rešenje
1	Dobro	+	Dobro	3	Dobro	6	Dobro rešenje sa sitnim nedostacima
						7	Dobro rešenje
		++	Vrlo dobro	4	Vrlo dobro (idealno)	8	Vrlo dobro rešenje
						9	Rešenje koje prevazilazi cilja
						10	Idealno rešenje

Kod postupka vrednovanja metodom VDI 2225 nema hijerarhijskog uređenja, a kriterijumi za vrednovanje izvode se iz minimalnih zahteva i želja, kao i iz opštih tehničkih osobina na bazi određene liste. Značaj kriterijuma se određuje samo kod velikih razlika značaja.

Binarno vrednovanje

Predstavlja veoma jednostavnu i brzu mogućnost grubog poređenja pojedinih varijanti. Sve varijante se za određeni kriterijum porede u paru i binarno odlučuje. To znači bolje ocenjena varijanta sa 1 i lošija varijanta sa 0. Praktično se može veoma jednostavno izvršiti vrednovanje na bazi kvadratne matrice po svakom kriterijumu. U matrici su unete pojedine varijante u redovima kao i u kolonama, a glavna dijagonala ostaje prazna. Sume kolona daju redosled vrednosti. Najveća suma kolone ima za razmatrani kriterijum najveću vrednost varijante. Sveukupna vrednost se vrši obuhvatanjem svih kriterijuma u jednoj sveukupnoj

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

matrici u kojoj su navedeni kriterijumi u redovima, a varijante u kolonama. Suma kolona daje rang varijante s obzirom na sve kriterijume. Prednost ove metode je, pre svega, u malom trošku i brzom izradi, a nedostatak u nedovoljnoj pouzdanosti.

Metoda analize korisne vrednosti

Ambalaža predstavlja kompleksno područje zadataka, što naročito vredi za preduzeća koja proizvode životne namirnice, a koja su istovremeno odgovorna za pojedina pitanja ambalaže. Tu se sakupljaju svi zahtevi pojedinih interesnih grupa. Sveobuhvatno razmatranje ambalaže je vezano sa uskom i interdisciplinarnom kooperacijom određenog tima orijentisanog rešavanju problema, a koji se sastoji od odgovarajućih učesnika iz raznih područja. U takvom timu mogu biti na primer: projektanti ambalaže, poslovni partneri, proizvođači i korisnici grafičke ambalaže, pakeri, itd.

S obzirom na kompleksnost ambalaže kao sistema i složenosti problema, a i zbog toga što će se kod vrednovanja u ovom radu obuhvatiti različite karakteristike štampane fleksibilne ambalaže, kao i kriterijumi različitih dimenzija sa kvantitativnim i kvalitativnim opisom njihovih veličina, za rešavanje postavljenog cilja u ovom radu čini se prikladnom opšta metoda višekriterijumske analize vrednosti (po nekim izvorima multiatributivne ili multidimenzionalne), razvijena za upotrebu u tehnici (Zangemeister, 2014). Ovde će se ukratko navesti samo osnovni koncept analize vrednosti koji je značajan za vrednovanje fleksibilne ambalaže. Pored toga, cilj je i da se navedena metoda za obradu predložene teme pokušati razviti u postupak koji odgovara domaćoj praksi i mogućnostima.

Osnovu ocene pojedinih fleksibilnih ambalažnih materijala predstavlja pritom određivanje njihove korisne vrednosti (Balaban i Stanojković, 2020).

Pri analizi osobina i određivanja odgovarajućeg fleksibilnog ambalažnog materijala, najbolje je početi od zahteva koji proizlaze iz konkretnog sadržaja. Vrednost fleksibilnog ambalažnog materijala se može okarakterisati prema stepenu ispunjenja njegovog zadatka. Za svaki kriterijum se daju obeležja kojima se karakteriše stepen ispunjenja tih kriterijuma.

Prema Zangemeister (2014), analiza korisne vrednosti - nemački NWA (Nutzwertanalyse), predstavlja analizu skupa kompleksnih alternativa sa ciljem uređenja elemenata tog skupa u zavisnosti od donosioca odluke, s obzirom na cilj izražen nekim multidimenzionalnim sistemom kriterijuma za vrednovanje. To uređenje prikazuje se navođenjem ukupnih vrednosti alternativa. Analiza korisne vrednosti polazi od toga da je sveukupna vrednost tim veća, čim veće su pojedine vrednosti.

Postupak metode analize korisne vrednosti sastoji se od sledećih koraka - slika 53 (Zangemeister, 2014).

Kod analize vrednosti postoji sistematizovani sistem ciljeva gde su u vertikalnom nivou više ciljeva sa opadajućom kompleksnošću, a u horizontalnom hijerarhijski rasčlanjeni glavni i sporedni ciljevi (Čekeravac, Maletić, 2018).

Kod ovog postupka vrednovanja nije ograničen broj i vrsta uticajnih faktora na osnovu kojih se vrši izbor. Mogu se uzeti u obzir tehnički, ekonomski i drugi uticaji pa je taj postupak moguće prilagoditi specifičnostima sistema koji se vrednuje.

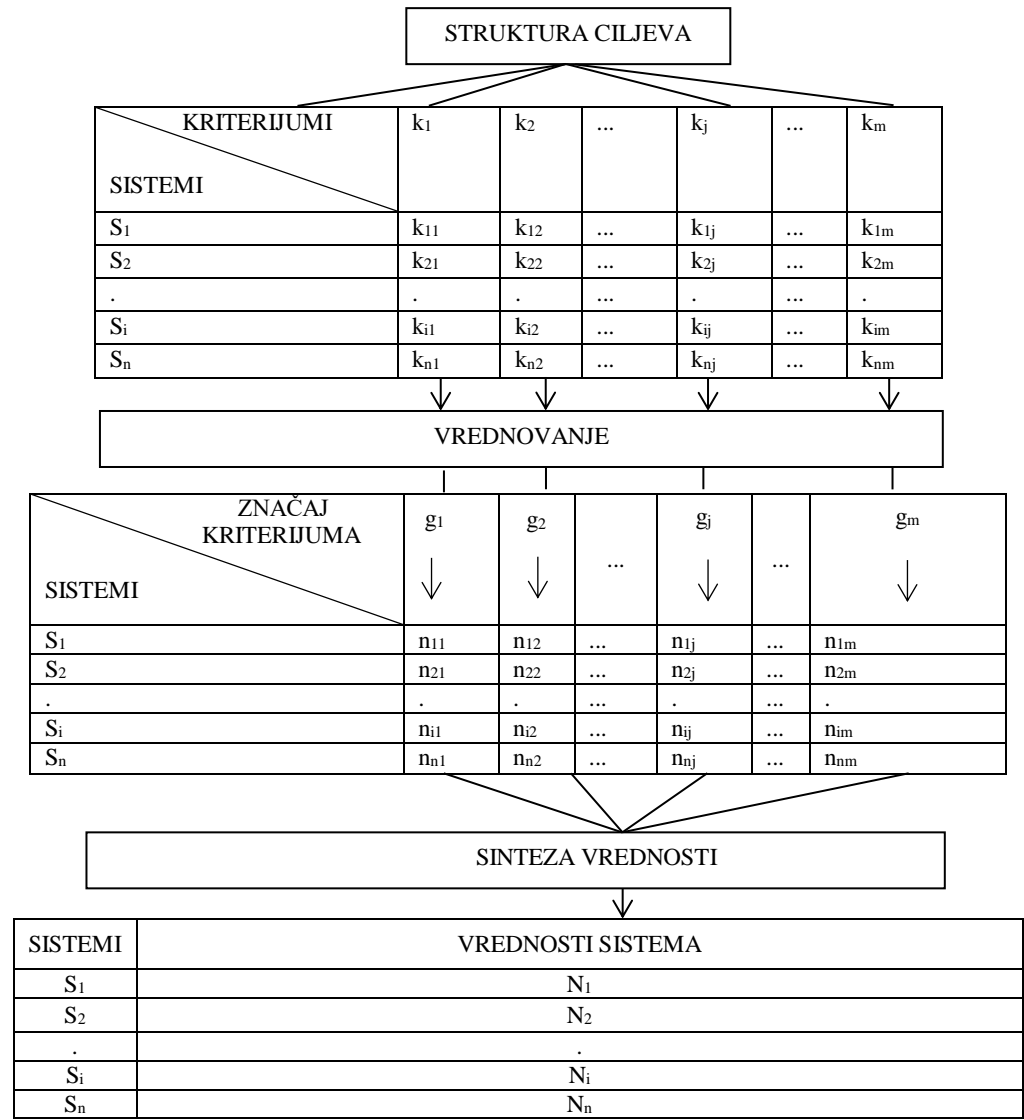
Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Prilagođavanje metode analize korisne vrednosti u svrhu vrednovanja fleksibilnih ambalažnih materijala prikazano je u tabeli 32 (Zangemeister, 2014).

Tabela 32: Analogija vrednovanja fleksibilnih ambalažnih materijala sa teorijom analize korisne vrednosti

	Analiza korisne vrednosti	Vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala
Predmet vrednovanja	Alternativa A_i	Fleksibilni ambalažni materijal (FAM)
Osobina koja se vrednuje	Uticaj na cilj	Mogućnosti fleksibilnog ambalažnog materijala s obzirom na zahtev K_{ij}
Sa čime se izražava ta osobina?	Veličinom osobine kriterijuma "k" s obzirom na cilj	Veličinom osobine fleksibilnog ambalažnog materijala s obzirom na zahtev
Subjektivna ocena osobine	Vrednost veličine osobine " n_{ij} " s obzirom na cilj	Vrednost osobine fleksibilnog ambalažnog materijala s obzirom na zahtev K_{ij}

Preduslov za primenu kriterijuma je da se obezbedi međusobna uporedivost njihovih vrednosti što se postiže normalizacijom podataka, odnosno vrednosti svakog atributa preslikavamo na jedinstvenu skalu. U literaturi je predloženo nekoliko postupaka normalizacije od kojih u okviru metode analize vrednosti koristimo prostu ili linearnu normalizaciju (Pavličić, 2002). Nakon izvršene normalizacije alternative prikazujemo vektorima normalizovanih vrednosti, zatim atributima pridružujemo težinske koeficijente i za svaku alternativu izračunavamo zbir ponderisanih normalizovanih vrednosti. Na kraju se odabira alternativa sa maksimalnom vrednošću ponderisanog zbira.



Slika 53: Model vrednovanja prema Zangemeisteru

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Vrednosti alternativa, ne uzimajući u obzir faktore značaja, izračunavaju se prema jednačini:

$$N = \frac{\sum_{j=1}^z n_{ij}}{z}$$

N-vrednost alternative

n-vrednost kriterijuma

i-indeks alternative

j-indeks kriterijuma

z-broj kriterijuma

U slučaju sa faktorom značaja, vrednosti alternativa su

$$N = \sum_{j=1}^z g_j \cdot n_{ij}$$

g_j -faktor značaja kriterijuma

Metoda analize korisne vrednosti je, u odnosu na metodu prema VDI 2225 koja nije tako diferencirana i metodu binarnog poređenja koja je brza, iziskuje male troškove, ali je i nepouzdana, diferencirana, sa jednoznačnim rezultatima, a određivanje faktora značaja je obavezno.

Analiza osetljivosti

Pomoću analize stabilnosti (senzitiviteta) se uočava u kojoj meri rešenje ostaje stabilno u slučaju kada se procentualne vrednosti kriterijuma naknadno proizvoljno izmene u odnosu na prvobitno egzaktno određene veličine poređenjem parova.

Analizom osetljivosti se proverava eventualna promena ukupne vrednosti kao i redosleda preferencija ukoliko se, na primer, promeni neka od veličina (npr. faktor značaja ili vrednovanje kriterijuma).

Procena nesigurnosti vrednovanja

Načelno se mora razlikovati procena nesigurnosti, odnosno grešaka od strane ocenjivača i od postupka. Kod grešaka od strane ocenjivača se, pre svega, radi o subjektivnosti. Da bi se dobilo objektivno vrednovanje, preporučuje se neutralno označavanje varijanti. Daljnji problem predstavljaju kriterijumi za vrednovanje koji ne odgovaraju za sve varijante. Često postoji međusobna zavisnost kriterijuma, koja se ne može uočiti ili se pretpostavlja neprikladne vrednosti funkcija. Takođe, treba paziti da su kriterijumi za vrednovanje potpuni. Kod greške postupka problem je što veličine osobina nisu uvek jednoznačno utanačene. One bi se trebale kvantitativno dati ukoliko su vrednosti sigurne, inače je bolje izvršiti vrednovanje sa kvalitativnim/verbalnim opisom.

7.2.1 Određivanje faktora značaja kriterijuma

U opštem slučaju kriterijumi imaju različit značaj za vrednost alternativa i zavise od raznih faktora:

- konkretnog zadatka,
- ciljne grupe i njihovih potreba, sklonosti, iskustva itd.,
- promenljivih uticaja kao što su trend, moda i sl.

Uobičajena područja veličine faktora značaja su 0 do 1, odnosno 0 % do 100 %.

S obzirom na iskustvo, vrednovanje pomoću faktora značaja u odnosu na vrednovanje bez faktora značaja, najčešće pokazuje da se samo u ekstremnim slučajevima razlikuje rang alternativa. Vrednovanje sa faktorom značaja samo pokazuje jače razlike ukupnih vrednosti alternativa.

Kako bi se umanjio rizik subjektivnog uticaja pri vrednovanju, određivanje faktora značaja treba uvek sprovesti pre stvarnog vrednovanja. Kod jednakog ili približno jednakog značaja kriterijuma, postupak vrednovanja nije relevantan i može otpasti.

U ovom radu će se koristiti subjektivni pristup u određivanju faktora značaja koji se bazira na informacijama koje su dobijene od donosioca odluke ili od eksperata uključenih u proces odlučivanja što znači da donosilac odluke utiče na rezultat procesa vrednovanja jer on svoje mišljenje daje na osnovu svog sistema preferentnosti i intuicije (Milićević i Župac, 2012).

7.2.1.1 Određivanje faktora značaja metodom poređenja parova

Princip ove metode je fragmentacija zadatka u pojedinačne odluke. Na početku se navode svi kriterijumi koji se vrednuju u unakrsnoj tabeli (tabela 33). Potom učesnici u postupku odlučuju o važnosti svakog kriterijuma, da li je kriterijum A manje važan, jednako važan ili važniji od kriterijuma B. Za svaku odluku daju se bodovi:

0 - kriterijum sa leve strane (u redu) je manje važan kao i kriterijum sa desne strane (u koloni)

1 - kriterijum sa leve strane je jednako važan kao i kriterijuma sa desne strane

2 - kriterijum sa leve strane je važniji od kriterijuma sa desne strane

Nako dodeljivanja bodova, bodovi se sumiraju prema redovima, na osnovu čega se dobijaju rangovi. Deljenjem sume iz reda sa ukupnom sumom iz kolone mogu se izračunati faktori značaja.

7.2.1.2 Analitičko-hijerarhijski proces (AHP)

Metoda AHP je razvijena od Saaty-ija 1977. godine i od onda se kontinuirano unapređuje. Donosiocu odluke nudi jedan sistematski postupak koji ga u toku njegovih odluka vodi u strukturiranom obliku. Cilj AHP je da se kod teških odluka nađe optimalno rešenje sa što manjim utroškom vremena, sa ponovljivim kvalitetom i prihvatljivošću. Kod ove metode kriterijumi koji su uzeti u obzir za rešenje nekog problema su hijerarhijski strukturirani.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Tabela 33: Unakrsna tabela za određivanje faktora značaja kriterijuma

Kriterijum	A	B	C	D	E	F	G
A							
B							
C							
D							
E							
F							
G							

AHP metoda je metoda parnih poređenja u kojoj donosilac odluke poredi svaki kriterijum sa ostalim, korišćenjem ordinalne skale (kao što je npr. Saatijeva skala) - tabela 34 (Srđević i Jandrić, 2000). Na osnovu parnih poređenja kriterijuma formira se matrica parnih poređenja iz koje je potrebno odrediti vektor prioriteta (Milićević i Župac, 2012).

Praktični tok AHP se može podeliti u tri faze (Analytischer Hierarchieprozess (AHP), 2017)):

1. Faza: sakupljanje podataka
2. Faza: poređenje u parovima
3. Faza: provera konzistentnosti

Za ovaj rad značajna je druga i treća faza (poređenje u parovima i provera konzistentnosti).

Tabela 34: Skala odnosa u AHP metodi (Tzeng i Huang, 2011)

Intenzitet	1	3	5	7	9	2,4,6,8
Definicija	Istog značaja	Slaba dominantnost	Jaka dominantnost	Demonstrirana dominantnost	Apsolutna dominantnost	Međuvrednosti

Prednost ove metode je i mogućnost određivanja stepena nekonzistentnosti pomoću kojeg se određuje logika vrednovanja odnosno kvalitet donetih odluka. Postupak se sastoji u određivanju indeksa konzistentnosti (CI) prema izrazu:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

λ_{max} -maksimalna sopstvena vrednost matrice poređenja

Stepen konzistentnosti se računa prema izrazu:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

CR - stepen konzistentnosti

CI - indeks konzistentnosti

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

RI - slučajni indeks (zavisi od reda matrice) - tabela 35

Tabela 35: Slučajni indeksi (Tzeng i Huang, 2011)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0.0	0.0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Što je niži stepen nekonzistentnosti, to su manje odluke protivrečne. Da bi se protivrečnost uopšte mogla prikazati, po definiciji su potrebna najmanje tri različita vrednovanja. Za orijentaciju se navode sledeće iskustvene vrednosti:

- do 0,00 bez protivrečnosti, teoretski idealan slučaj
- do 0,10 – jedva uočljiva protivrečnost
- do 0,20 – još prihvatljiva protivrečnost
- do 0,80 – proveriti bezuslovno izvršena vrednovanja
- iznad 0,80 – slučajna vrednovanja.

Prednosti AHP metode:

- kompleksni problemi se mogu rasčlaniti u manje probleme,
- poređenje u parovima se može lako sprovesti,
- moguće je sprovesti precizne proračune težinskih faktora i kvaliteta vrednovanja,
- proračunava se i nekonzistentnost.

Nedostaci AHP metode:

- za poređenje u parovima je potrebno mnogo vremena,
- potrebna je podrška računara,
- zbog složenih proračuna, ponekad se dešava da poređenje parova dolazi "iz stomaka" (intuitivno), odnosno prema subjektivnim procenama.

8. VREDNOVANJE ODABRANIH ŠTAMPANIH FLEKSIBILNIH AMBALAŽNIH MATERIJALA

Cilj vrednovanja u ovom radu je da se dobiju transparentne sume vrednosti pojedinih varijanti štampanih fleksibilnih ambalažnih materijala, odnosno određivanje stepena kvaliteta ispunjenja zahteva za pojedine pakovane prehrambene proizvode. Materijali se vrednuju s obzirom na odabrane kriterijume zatezne čvrstoće i izduženja, trenja, propustljivosti, kvaliteta otiska, cene i podobnosti za reciklažu. U cilju pouzdanijeg vrednovanja, određiće se i faktori značaja svakog kriterijuma.

Sveobuhvatno istraživanje odabira odgovarajuće vrste štampane fleksibilne ambalaže za određene vrste sadržaja prešlo bi okvire cilja ovog rada. Stoga se istraživanje odnosno ispitivanje i vrednovanje ograničava na određene ambalažne materijale kao i određenu grupu prehrambenih proizvoda. Ti pakovani prehrambeni proizvodi spadaju u grupu proizvoda raznih geometrijskih oblika od zrnastih, pahuljičastih pa do praškastih. Detaljne karakteristike ispitivanih materijala su navedene u eksperimentalnom delu (poglavlje 6).

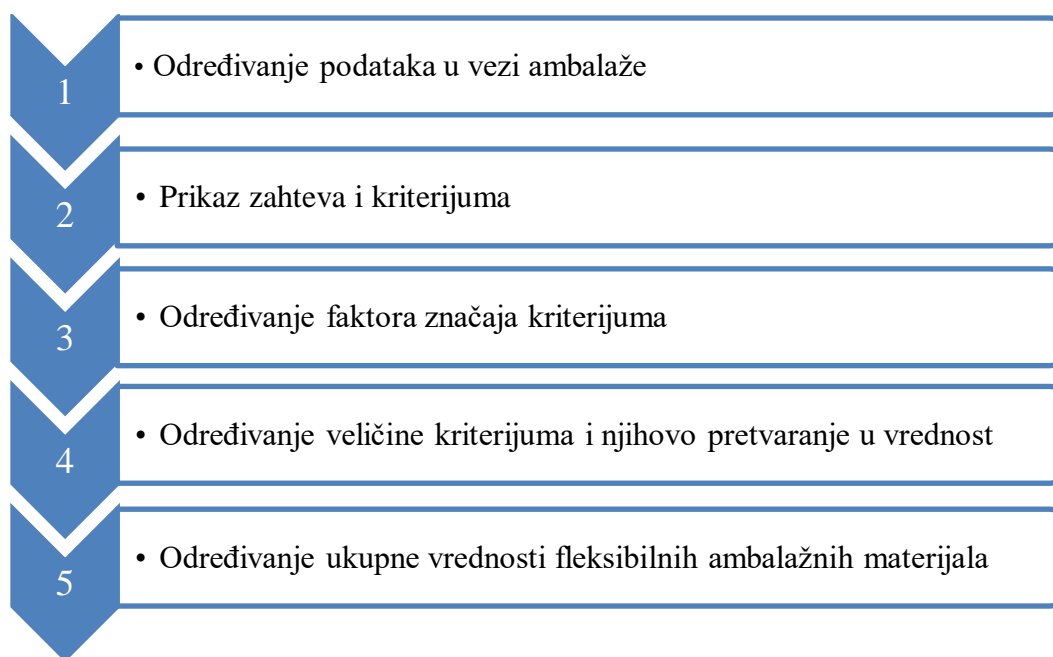
U prvom delu rada je eksperimentalno ispitivana promena karakteristika zatezne čvrstoće i izduženja, trenja, propustljivosti, kvaliteta otiska, cene i podobnosti za reciklažu nakon procesa štampanja i pakovanja. Ispitivanjem je utvrđeno da do promena dolazi, međutim, ne može se sigurnošću tvrditi da li bi one mogle uticati na funkcionalnost ambalaže, za čiju potvrdu bi bila potrebna dodatna i dugotrajnija ispitivanja. Izuzetak predstavlja materijal sastava PET/PE kod kojeg je, nakon postupka formiranja ambalaže, došlo do neznatnog povećanja propustljivosti. Vrednovanje uočenih promena materijala je iskazano brojčanom vrednošću u procentima, ali bez uzimanja u obzir i drugih kriterijuma koji takođe utiču na sveukupnu odnosnu realnu vrednost materijala. U sledećem poglavlju se daje jedan predlog postupka višekriterijumskog vrednovanja materijala.

8.1 Opšti postupak vrednovanja

S obzirom na analizu metoda vrednovanja datu u poglavlju 7, za vrednovanje odnosno ocenu vrednosti karakteristika odabranih fleksibilnih ambalažnih materijala u ovom radu je odabrana multiatributivna metoda, koja se bazira na analizi sveukupne korisne vrednosti prema Zangemeister (2014). Po analogiji na tu metodu, na slici 54 je prikazan predlog postupka vrednovanja fleksibilnih ambalažnih materijala. Uz izvesna pojednostavljenja, u daljnem tekstu će se prikazati postupak vrednovanja fleksibilnih ambalažnih materijala i oceniti njihove vrednosti.

8.1.1 Određivanje podataka u vezi ambalaže

Ambalažni materijali koji se vrednuju u ovom radu su biaksijalno orijentisan polipropilen (BOPP), polietilentereftalat (PET), metalizovani polietilentereftalat (PETmet) i polietilen niske gustine LDPE. Opšte karakteristike ovih materijala kao i način izrade su detaljnije obrađene u poglavlju 2.1, a tehničke karakteristike u poglavlju 6. Podaci za vrednovanje su uzeti iz tehničkih specifikacija materijala, dostupnih literaturnih izvora kao i rezultata u ovom radu.



Slika 54: Postupak vrednovanja fleksibilnih ambalažnih materijala

U tabeli 36 prikazani su podaci potrebni za vrednovanje odabranih materijala. Dati su podaci o zateznoj čvrstoći u uzdužnom i poprečnom pravcu, izduženju u uzdužnom i poprečnom pravcu, koeficijentu trenja, površinskom naponu i propustljivosti na kiseonik.

Tabela 36: Podaci za odabrane fleksibilne materijale

Broj	Karakteristika	Fleksibilni ambalažni materijal			
		BOPP	PET	PETmet	PE
1	Zatezna čvrstoća (uzdužno), N/mm ²	140	196	196	26
2	Zatezna čvrstoća (poprečno), N/mm ²	250	206	206	24
3	Izduženje pri kidanju (poprečno), %	70	90	90	540
4	Izduženje pri kidanju (uzdužno), %	200	100	100	130
5	Koeficijent trenja	0,3	0,4	0,6	0,35
6	Površinski napon, mN/m	38	54	54	38
7	OTR (cc/m ² /24h)	2000	120	0,06	8000

8.1.2 Prikaz zahteva i kriterijuma

U ovom radu izrađena lista zahteva treba da omogući jedinstven okvir procesa odlučivanja, koji sadrži najvažnije zahteve odnosno kriterijume. Kako bi te liste bile primenjive na što je moguće više zadataka vezanih za ambalažu, one su formulisane što je moguće uopštenije. Međutim, u pojedinim slučajevima je te liste moguće dodatno prilagoditi konkretnoj problematici ambalaže. U tabeli 37 prikazani su odabrani zahtevi za fleksibilne ambalažne materijale.

Tabela 37: Zahtevi (kriterijumi) za fleksibilne ambalažne materijale

Oznaka zahteva	Vrsta zahteva
Z _{1u}	Zatezna čvrstoća u uzdužnom smeru (N/mm ²)
Z _{1p}	Zatezna čvrstoća u poprečnom smeru (N/mm ²)
Z _{2u}	Izduženje u uzdužnom smeru (%)
Z _{2p}	Izduženje u poprečnom smeru (%)
Z ₃	Trenje
B ₁	Propustljivost na kiseonik (cc/m ² /24h)
K ₁	Površinski napon (mN/m)
T ₁	Cena (€/kg)
E ₁	Ekološka podobnost/mogućnost reciklaže

8.1.3 Određivanje faktora značaja kriterijuma

Veličina faktora značaja pojedinih zahteva štampane fleksibilne ambalaže zavisi od vrste sadržaja/robe. Ti zahtevi se međusobno porede i ocenjuju na razne načine, počev od jednostavnog poređenja na osnovu bodova pa do složenijih ispitivanja i vrednovanja na osnovu objektivnih (merenih) veličina, koje je dugotrajnije i vezano za veće troškove.

Načini određivanja faktora značaja su detaljnije objašnjeni u poglavlju 7. U tabeli 38 je prikazano određivanje faktora značaja metodom poređenja parova korišćenjem trodelne skale. Iz tabele je vidljivo da je najznačajniji kriterijum propustljivost (faktor značaja 21 %), zatim zatezna čvrstoća i izduženje u uzdužnom i poprečnom smeru (faktor značaja 13 %), pa troškovi (faktor značaja 10 %). Manju značajnost su dobili kriterijum trenja, ekološke podobnosti i kvaliteta otiska (7 %, 5 % i 4 % respektivno). Vrednovanje je urađeno od strane autora ovog rada i stručnjaka u firmama za izradu i štampanje fleksibilne ambalaže.

U tabeli 39 su prikazani faktori značaja dobijeni metodom analitičko-hijerarhijskog procesa. Proračun je rađen u programu Excel. Nakon vrednovanja, proverena je i konzistentnost vrednovanja. Proračunom je dobijena vrednost CI=0,03, odnosno CR=0,02 što prema tabeli 35 pokazuje da je u pitanju jedva uočljiva protivrečnost.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Poređenje faktora značaja određene pomoću dve metode prikazano je u tabeli 40.

Obe metode su pokazale da najveći faktor značaja ima kriterijum propustljivosti, a zatim kriterijumi zatezne čvrstoće i izduženja. Razlike su se pokazale kod kriterijuma troškova i ekološkičnosti koji su dobili veće faktore značaja kod metode određivanja faktora značaja poređenjem parova.

Tabela 38: Određivanje faktora značaja metodom poređenja parova

Kriterijum	Z _{1u}	Z _{1p}	Z _{2u}	Z _{2p}	Z ₃	B ₁	K ₁	T ₁	E ₁	Suma	Faktor značaja (gk)
Z _{1u}	1	1	1	1	2	0	2	1	2	11	0,13 %
Z _{1p}	1	1	1	1	2	0	2	1	2	11	0,13 %
Z _{2u}	1	1	1	1	2	0	2	1	2	11	0,13 %
Z _{2p}	1	1	1	1	2	0	2	1	2	11	0,13 %
Z ₃	0	0	1	0	1	0	2	1	1	6	0,07 %
B ₁	2	2	2	2	2	1	2	2	2	17	0,21 %
K ₁	0	0	0	0	0	0	1	1	1	3	0,04 %
T ₁	1	1	1	1	1	0	1	1	1	8	0,10 %
E ₁	0	0	0	0	1	0	1	1	1	4	0,05 %
										Σ=82	

2-važnije

1-jednako važno

0-manje važno

Tabela 39: Određivanje faktora značaja metodom analitičko-hijerarhijskog procesa

Kriterijum	Z _{1u}	Z _{1p}	Z _{2u}	Z _{2p}	Z ₃	B ₁	K ₁	T ₁	E ₁
Z _{1u}	1.00	1.00	1.00	1.00	3.00	0.20	5.00	3	5
Z _{1p}	1.00	1.00	1.00	1.00	3.00	0.20	5.00	3	5
Z _{2u}	1.00	1.00	1.00	1.00	3.00	0.20	5.00	3	5
Z _{2p}	1.00	1.00	1.00	1.00	3.00	0.20	5.00	3	5
Z ₃	0.33	0.33	0.33	0.33	1.00	0.14	3.00	3	5
B ₁	5.00	5.00	5.00	5.00	7.00	1.00	7.00	7	7
K ₁	0.20	0.20	0.20	0.20	0.33	0.14	1.00	3	3
T ₁	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.14	0.33	1	5
E ₁	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.14	0.33	0.2	1

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Tabela 40: Poređenje faktora značaja određenih pomoću metode poređenjem parova i AHP metode

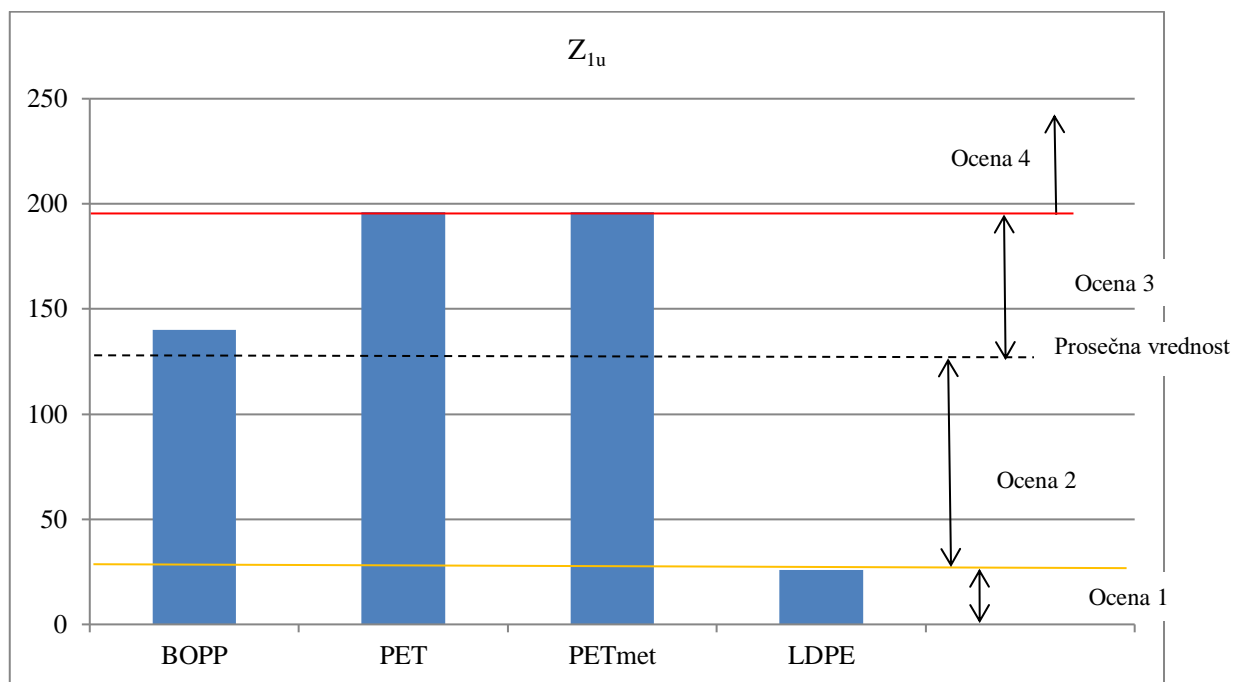
Određeni faktori značaja (%)		
Kriterijum	Metoda poređenja parova	AHP metoda
Z _{1u}	0,13	0,11
Z _{1p}	0,13	0,11
Z _{2u}	0,13	0,11
Z _{2p}	0,13	0,12
Z ₃	0,07	0,06
B ₁	0,21	0,38
K ₁	0,04	0,04
T ₁	0,10	0,04
E ₁	0,05	0,02

8.1.4 Vrednovanje odabranih štampanih fleksibilnih ambalažnih materijala

U cilju dobijanja ukupne vrednosti nekog fleksibilnog ambalažnog materijala, prvo je potrebno kvantitativne podatke pretvoriti u kvalitativne, čime se dobijaju bezdimenzionalne vrednosti pomoću kojih je moguće vršiti poređenje različitih kriterijuma. Za normalizaciju je korištena skala sa vrednostima od 1 - 4, a vrednosti su date na sledeći način - slika 55:

- prvo je određena prosečna vrednost veličina kriterijuma
- iznad prosečne vrednosti svim vrednostima se daje ocena 3
- ispod te srednje vrednosti svim vrednostima se daje ocena 2
- vrednosti ispod minimuma dobijaju ocenu 1
- vrednosti iznad maksimuma dobijaju ocenu 4.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike



Slika 55: Pretvaranje kvantitativnih kriterijuma u kvalitativne ocene (kriterijum zatezne čvrstoće u uzdužnom pravcu)

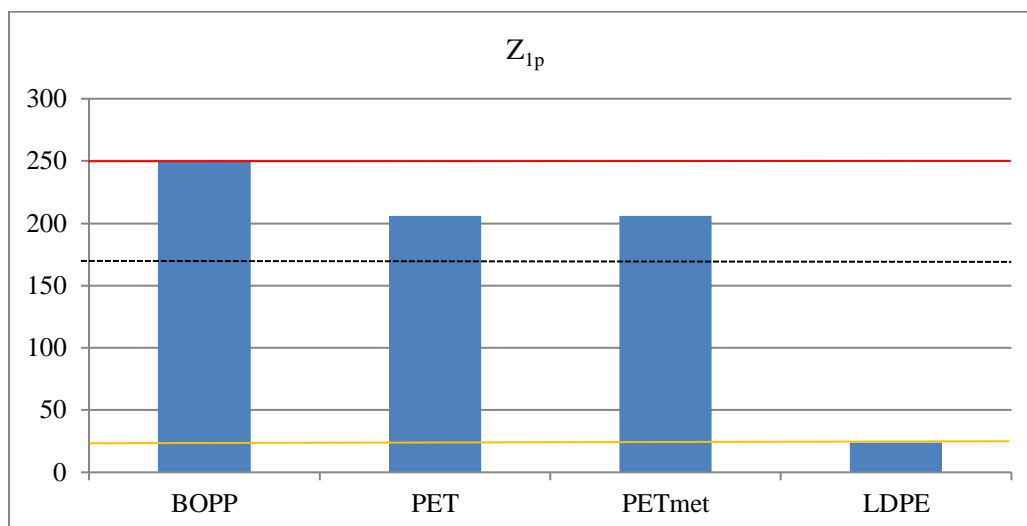
Iz slike je vidljivo da materijali PET i PETmet poseduju bolju zateznu čvrstoću u uzdužnom smeru od ostala dva materijala, stoga i dobijaju veće ocene (u ovom slučaju ocena 4). BOPP materijal dobija ocenu 3 jer je njegova vrednost iznad prosečne. Materijal LDPE ima najmanju zateznu čvrstoću u uzdužnom smeru, njegova vrednost je minimalna i on dobija ocenu 1.

Na istom principu je urađeno vrednovanje za odabrane materijale za kriterijum zatezne čvrstoće u poprečom pravcu (slika 56), izduženja u uzdužnom i poprečnom pravcu (slika 57 i 58), trenja (slika 59), propustljivosti (slika 60) i površinskog napona (slika 61).

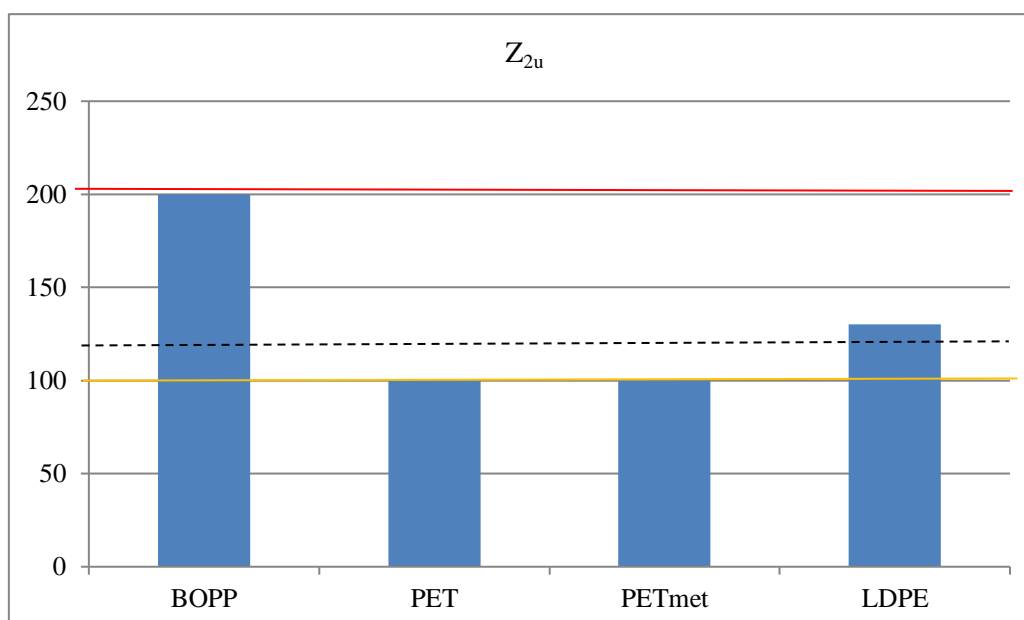
Za vrednovanje kriterijuma trenja korištene su smernice preporučene u Hertlein (1998), a detaljnije je objašnjeno u poglavlju 5.

Ekološki kriterijum će se vrednovati sa aspekta pogodnosti za reciklažu. Sa aspekta reciklaže poželjni su proizvodi iz jedne vrste materijala (oni dobijaju visoku ocenu), a nepoželjni su kombinovani ili mešani materijali jer je tada reciklaža otežana i takvi materijali dobijaju nižu ocenu (Balaban, 2014).

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

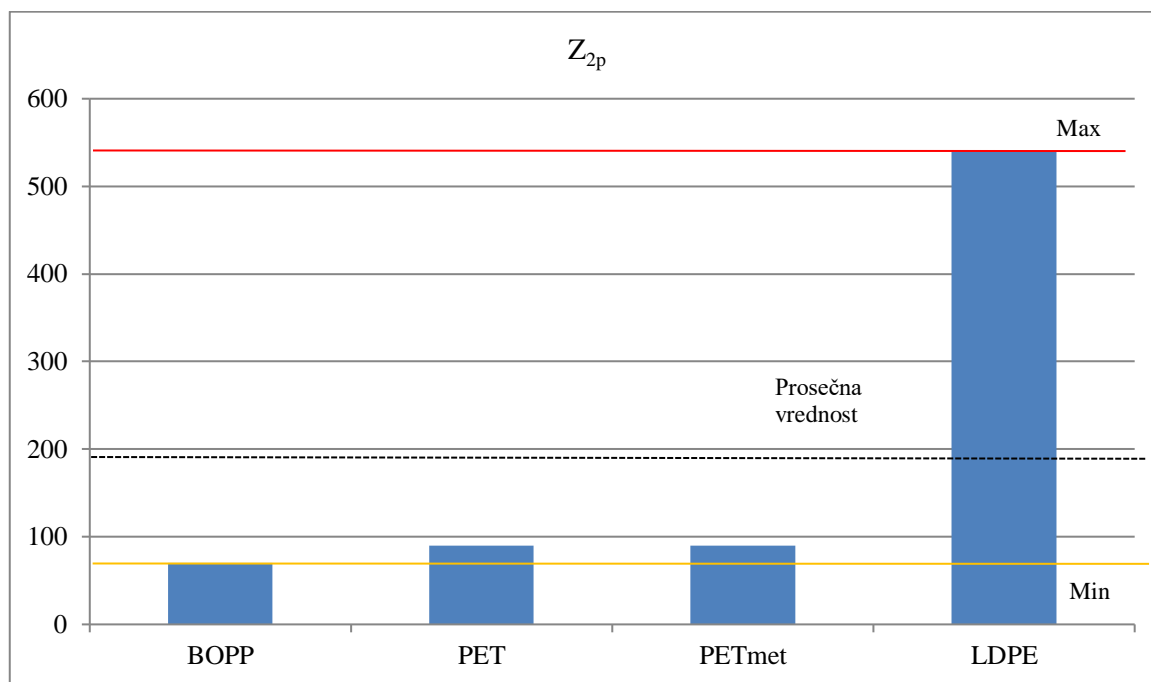


Slika 56: Pretvaranje kvantitativnih kriterijuma u kvalitativne ocene (kriterijum zatezne čvrstoće u poprečnom pravcu)

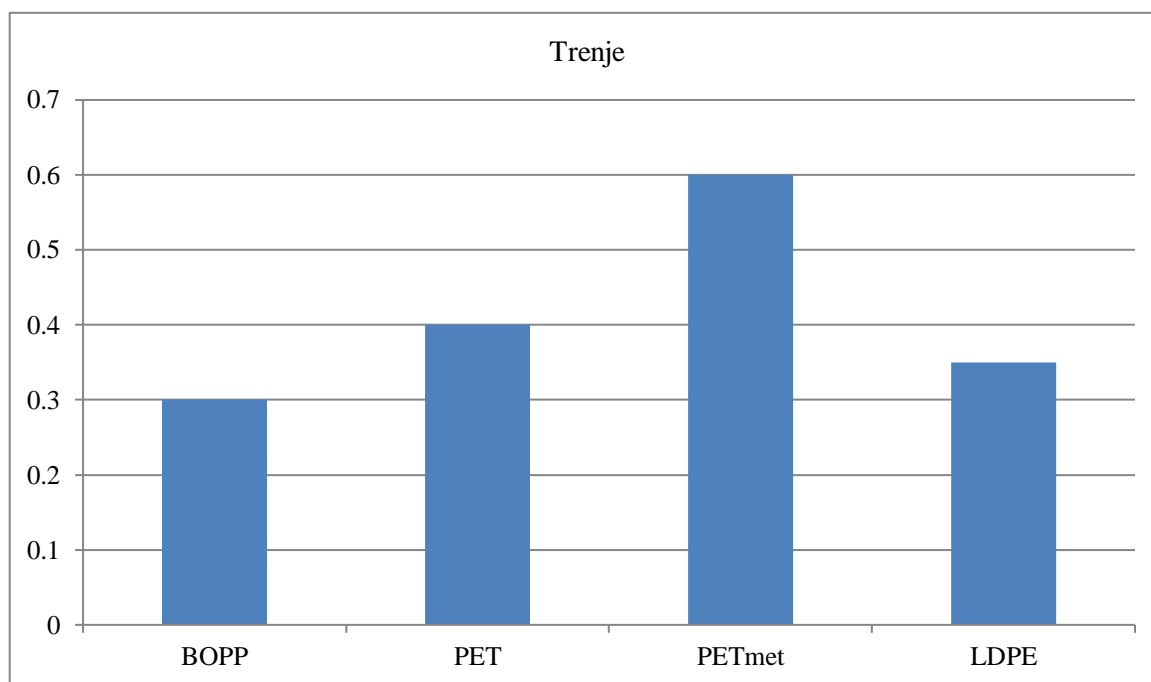


Slika 57: Pretvaranje kvantitativnih kriterijuma u kvalitativne ocene (kriterijum izduženja u uzdužnom pravcu)

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

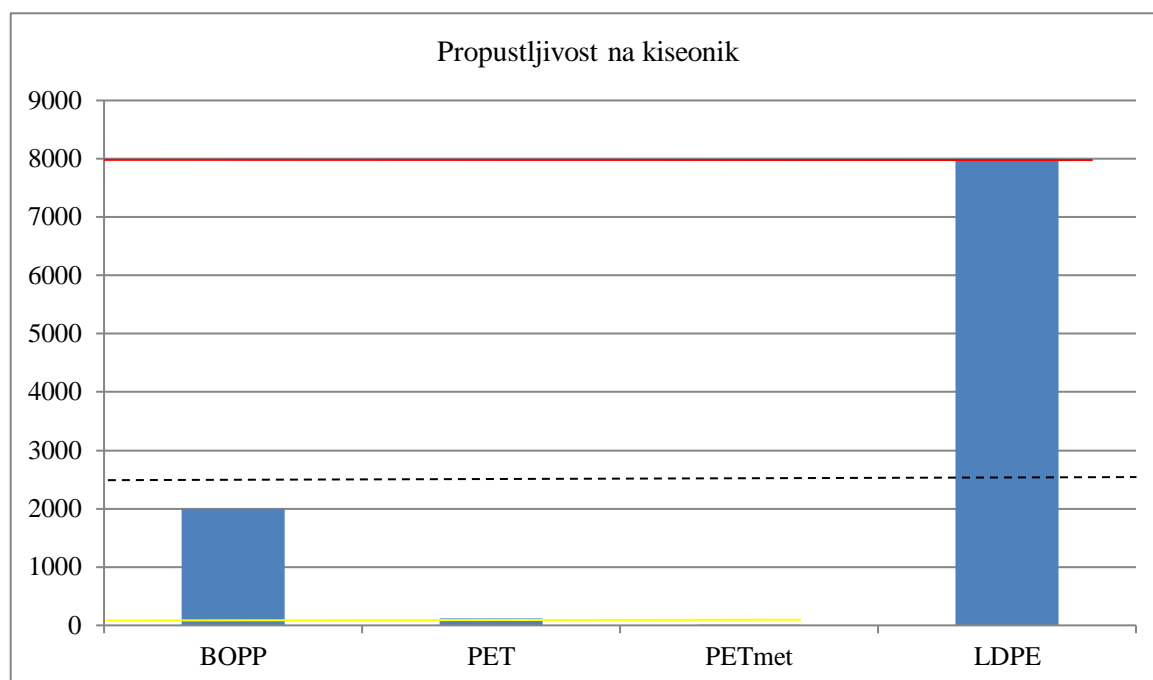


Slika 58: Pretvaranje kvantitativnih kriterijuma u kvalitativne ocene (kriterijum izduženja u poprečnom pravcu)

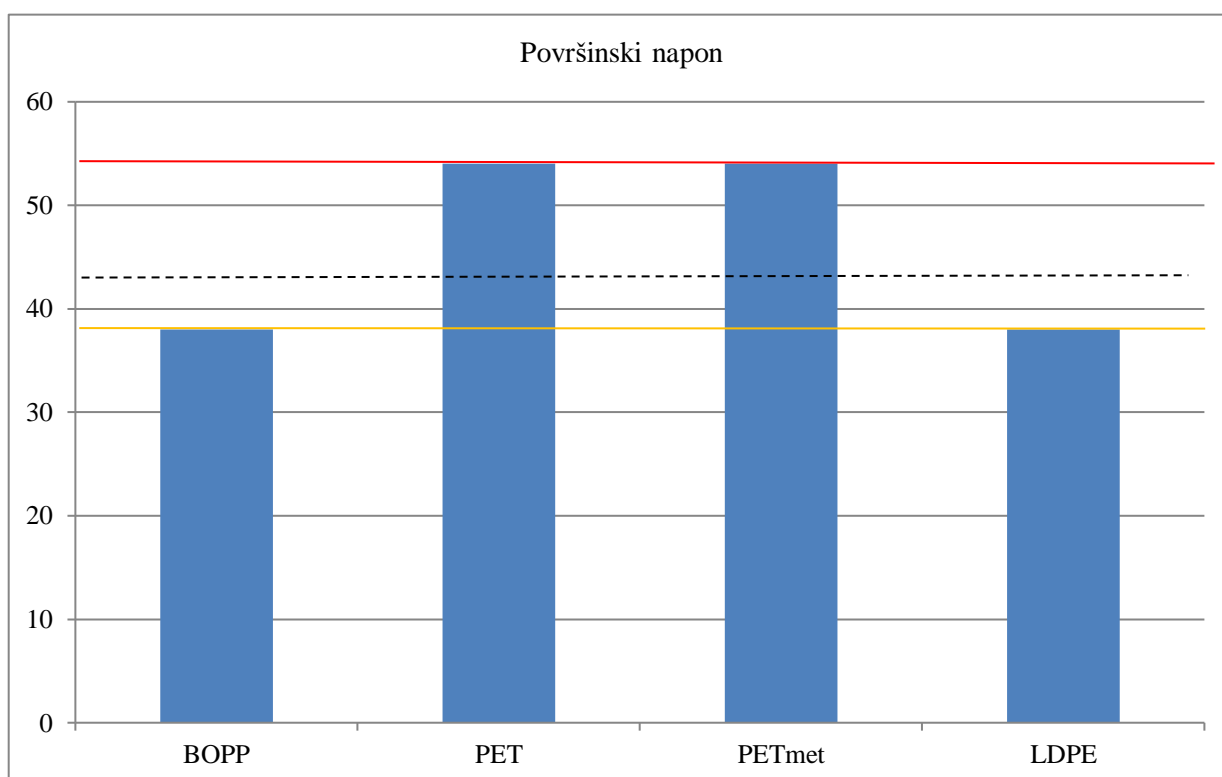


Slika 59: Pretvaranje kvantitativnih kriterijuma u kvalitativne ocene (kriterijum trenja)

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike



Slika 60: Pretvaranje kvantitativnih kriterijuma u kvalitativne ocene (kriterijum propustljivosti na kiseonik)



Slika 61: Pretvaranje kvantitativnih kriterijuma u kvalitativne ocene (kriterijum površinskog napona)

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Na osnovu prethodno određenog sistema vrednovanja osobina, izvršeno je pretvaranje kriterijuma pojedinih fleksibilnih ambalažnih materijala u vrednosti kriterijuma n_{ij} prema tabeli 41.

Tabela 41: Vrednosti kriterijuma

	k_1 (Z_{1u})	k_2 (Z_{1p})	k_3 (Z_{2u})	k_4 (Z_{2p})	k_5 (Z_3)	k_6 (B_1)	k_7 (K_1)	k_8 (T_1)	k_9 (E_1)
(FAM ₁)	3	4	4	1	3	2	1	2	4
(FAM ₂)	4	3	1	2	1	4	4	3	1
(FAM ₃)	4	3	1	2	1	4	4	1	1
(FAM ₄)	1	1	3	4	3	1	1	4	4

$k_1 - k_9$ – kriterijumi za vrednovanje

FAM₁ – fleksibilni ambalažni materijal BOPP

FAM₂ – fleksibilni ambalažni materijal PET

FAM₃ – fleksibilni ambalažni materijal PETmet

FAM₄ – fleksibilni ambalažni materijal LDPE

Vrednosti pojedinih fleksibilnih ambalažnih materijala, ne uzimajući u obzir faktore značaja, izračunate su prema izrazu:

$$N_i = \frac{\sum_{j=1}^9 n_{ij}}{9}$$

$N_1=2,66$ za ambalažni materijal FAM₁

$N_2=2,55$ za ambalažni materijal FAM₂

$N_3=2,33$ za ambalažni materijal FAM₃

$N_4=2,44$ za ambalažni materijal FAM₄

Nakon određenih faktora značaja prema AHP metodi (tabela 40), i ocena vrednosti kriterijuma, mogu se odrediti konačne vrednosti, koje se za svaki ambalažni materijal izračunavaju jednostavnim množenjem dodeljenih ocena sa odgovarajućim težinama kriterijuma (tabela 42).

Tabela 42: Vrednosti kriterijuma uzimajući u obzir faktore značaja

	k_1 (Z_{1u})	k_2 (Z_{1p})	k_3 (Z_{2u})	k_4 (Z_{2p})	k_5 (Z_3)	k_6 (B_1)	k_7 (K_1)	k_8 (T_1)	k_9 (E_1)
(FAM ₁)	0,33	0,44	0,44	0,12	0,18	0,76	0,04	0,08	0,08
(FAM ₂)	0,44	0,33	0,11	0,24	0,06	1,52	0,16	0,12	0,02
(FAM ₃)	0,44	0,33	0,11	0,24	0,06	1,52	0,16	0,04	0,02
(FAM ₄)	0,11	0,11	0,33	0,48	0,18	0,38	0,04	0,16	0,08

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Vrednosti fleksibilnih ambalažnih materijala uzimajući u obzir faktore značaja izračunate su prema jednačini:

$$N = \sum_{j=1}^9 g_j \cdot n_{ij}$$

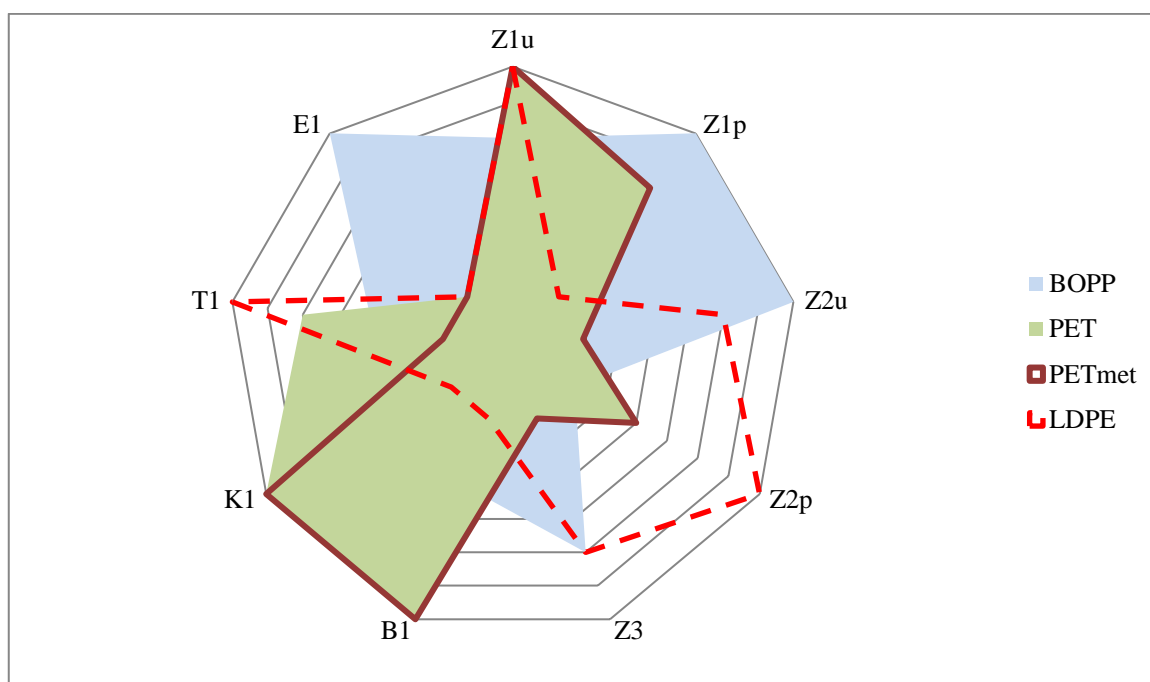
$N_1=2,47$ za ambalažni materijal FAM₁

$N_2=3,03$ za ambalažni materijal FAM₂

$N_3=2,92$ za ambalažni materijal FAM₃

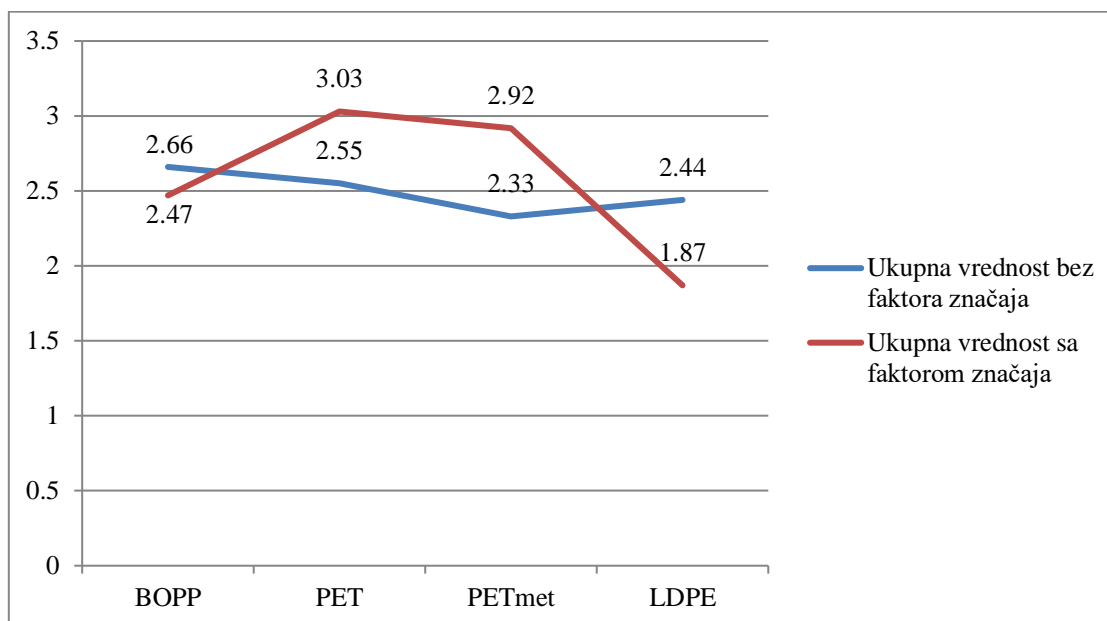
$N_4=1,87$ za ambalažni materijal FAM₄

Na slici 62 grafički su prikazane vrednosti kriterijuma, a na slici 63 ukupne vrednosti fleksibilnih ambalažnih materijala.



Slika 62: Grafički prikaz vrednosti kriterijuma

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike



Slika 63: Ukupna vrednost odabranih fleksibilnih ambalažnih materijala

Značaj vrednovanja fleksibilnih ambalažnih materijala za pakovanje hrane, koji je prikazan u ovom radu, je u određivanju njihovih vrednosti posmatrajući ga kao višekriterijumski problem i uzimajući u obzir i njihove faktore značaja. Pored toga, vizuelnim predstavljanjem (slika 62), mogu se lakše uočiti prednosti i nedostaci pojedinih fleksibilnih ambalažnih materijala i tako olakšati njihova područja primene.

Odabrani primeri vrednovanja odgovarajućim metodama u ovom radu mogu da za praktične potrebe konkretnije dopune inače složen problem uticaja procesa flekso štampe i pakovanja na karakteristike fleksibilnih ambalnih materijala i višekriterijumskog vrednovanja štampanih fleksibilnih materijala.

9. DISKUSIJA REZULTATA I ZAKLJUČAK

Cilj ove doktorske disertacije je bio da se sa šireg aspekta sistemski istraži i sa višekriterijumskog aspekta oceni vrednost štampanih fleksibilnih ambalažnih materijala za pakovanje hrane, sa posebnim akcentom na promene njihovih karakteristika nakon procesa štampe i pakovanja.

Karakteristike fleksibilnih ambalažnih folija, kao što su zatezna čvrstoća i izduženje, klizavost, propustljivost na gasove i kvalitet otiska, značajne su za ispunjenje funkcija ambalaže kao i za sam proces njenog štampanja i izrade. Iako su većina karakteristika date u tehničkim specifikacijama materijala, moguće je da u toku procesa štampanja i pakovanja dođe do njihovih promena usled delovanja različitih uticaja, kao što su npr. temperatura, rastvarači, različite sile, i dr. U cilju odgovora na prvu hipotezu postavljenu u radu, a koja glasi da "u toku procesa flekso štampe i izrade ambalaže na mašinama za pakovanje može doći do promena karakteristika štampanih fleksibilnih ambalažnih materijala", izvršena su eksperimentalna merenja navedenih karakteristika i to pre i nakon procesa štampanja i pakovanja. Uzorci su uzeti iz realnog procesa štampe i proizvodnje jedne domaće štamparije.

Vrednost zatezne čvrstoće i izduženja kod BOPP folije, u odnosu na deklarisanu vrednost, se smanjila i ta promena iznosi 16 % u uzdužnom pravcu, a u poprečnom pravcu je ostala nepromenjena. Izduženje u uzdužnom pravcu se smanjilo za 29 %, a u poprečnom za 50 %. Razlozi ovakvog ponašanja materijala mogu biti različiti, ali činjenica je da su folije tokom procesa štampe i pakovanja izložene povećanim silama istezanja, koje mogu biti posledica povećane brzine u procesu kretanja folije, uticaja diskontinuiranog rada mašine i temperature.

Kod folije PET/PE vrednosti zatezne jačine su se u uzdužnom pravcu nakon procesa pakovanja smanjile za 16,9 %, a u poprečnom ostale iste. Izduženje se nakon procesa pakovanja u uzdužnom pravcu povećalo za 16,9 %, a u poprečnom smanjile za 21,57 %. Najmanje promene zatezne jačine su se pokazale kod materijala PETmet/PE (smanjenje zatezne čvrstoće u uzdužnom pravcu je 3 %, a u poprečnom 9,7 %). Izduženje se u uzdužnom pravcu povećalo nakon procesa formiranja ambalaže za 3 %, a smanjilo za 10 % u poprečnom pravcu. Ova karakteristika, pored ostalih pozitivnih osobina, izdvaja ovaj materijal u odnosu na ostale ambalažne materijale. Međutim, u odnosu na monomaterijal (PET i PETmet), zatezna jačina višeslojnog odnosno kombinovanog materijala se povećala.

Treba napomenuti da bi, u cilju tačnijeg određivanja vrednosti zatezne čvrstoće i izduženja značajnih za procese štampanja i pakovanja, bilo neophodno meriti zateznu čvrstoću i istezanje materijala u predelu istezanja do 2 %, što u ovom radu nije bilo moguće usled tehničkih nedostataka.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Iako rezultati ispitivanja zatezne čvrstoće i izduženja fleksibilnih ambalažnih folija nakon procesa štampanja i pakovanja kod nekih folija pokazuju da dolazi do promena, ne može se sa sigurnošću tvrditi da li utvrđeno smanjenje može uticati na funkcionalne karakteristike ambalaže. Međutim, s obzirom da su štamparski materijali viskoelastični materijali sa veoma kompleksnim ponašanjem, promene karakteristika folija za vreme samog procesa štampanja (naprezanje i istežanje folije), pre svega delovanjem temperature i vučnih sila na foliju, mogu uticati na kvalitet štampanja, pojavu odstupanja u paseru, dužini ponavljanja, kao i stvaranju nabora u štamparskoj foliji.

Koeficijent trenja je nakon procesa štampanja i pakovanja kod sva tri materijala smanjen. Naročito materijali PET/PE i PETmet/PE pokazuju znatno smanjenje u odnosu na deklarisanu vrednost, čiji uzrok može biti proces kaširanja, kao i migracija kliznih aditiva i posledične promene samih karakteristika materijala. Međutim, s obzirom da su rezultati u dozvoljenim granicama, pitanje je u kojoj meri one mogu uticati na prohodnost, odnosno mašinabilnost u procesu štampanja i završne obrade, naročito i zbog toga što se veličina koeficijenta trenja može regulisati dodavanjem sredstava za povećanje ili smanjenje klizavosti, ili pak povećanjem normalne sile.

Merenje propustljivosti na kiseonik je pokazalo različite rezultate. U radu Balaban i dr. (2021) rezultati su pokazali pozitivan uticaj procesa štampanja, tj. smanjenje propustljivosti kod BOPP folije, čiji uzrok može biti nanošenje sloja boje i mogućeg popunjavanja mikropora, što doprinosi poboljšanju karakteristika. Međutim, kod PET/PE folija je nakon procesa pakovanja došlo do povećanja propustljivosti na kiseonik. Jedan od uzroka ove promene može biti upravo pretpostavljeni uticaj zateznih sila na mašini za pakovanje, odnosno mehaničko opterećenje i istežanje folije. Za potvrdu ove pretpostavke bilo bi potrebno uraditi merenja i na drugim mašinama za pakovanje. Pretpostavljena najveća promena se očekivala kod PETmet/PE folija, zbog prisutnog metalizovanog sloja koji može biti podložan promenama usled opterećenja. Kod ovih folija nije došlo do povećavanja propustljivosti, naprotiv, čak je došlo i do neznatnog smanjenja propustljivosti. Za potvrdu ponašanja ovih ispitivanih materijala, bila bi neophodna dodatna ispitivanja, npr. u predelu istežanja od 3 % do 8 %. U ovom radu nije potvrđena pretpostavka negativnog uticaja obrade na karakteristike ambalaže.

Kolika su dozvoljena odstupanja barijernih karakteristika (ovde ispitivane propustljivosti na kiseonik), kao najvažnijeg faktora koji određuje funkcionalne osobine ambalaže, u zavisnosti od opterećenja u procesu, zavisi od sadržaja koji se pakuje.

Površinski napon folija nakon štampanja se, u odnosu na površinski napon pre štampanja, kod BOPP folije povećao. Takođe, povećao se i polarni udeo površinskog napona, a nešto manje i disperzni, što je pozitivno sa aspekta štampanja zbog pretpostavljenog poboljšanog primanja boje na prethodno štampanu boju. Kod PET/PE i PETmet/PE folija, površinski napon se smanjio u odnosu na površinski napon monofolije, čemu uzrok može biti kako proces, tako i slabljenje efekta površinske obrade nakon određenog vremena. Iako smanjen, on se ipak kreće u preporučenim vrednostima neophodnim za proces štampe i odgovarajućim polarnim i disperzionim udelima.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Obavljenim eksperimentalnim istraživanjima dokazano je da proces štampanja i pakovanja u manjoj ili većoj meri ima uticaja na promenu pojedinih karakteristika folija čime je potvrđena hipoteza rada. Međutim, da li utvrđene promene mogu da utiču na funkcionalnost ambalaže, ne može se ovde sa sigurnošću tvrditi. Za potvrdu ove tvrdnje bi, pored ostalog, bila potrebna opširnija istraživanja, sa većim brojem uzoraka, drugim materijalima, različitim sistemima boja i debljinama sloja boja i na različitim štamparskim mašinama i pakericama. Takođe treba uzeti u obzir i fizičko stanje konkretnih uzoraka i različita oštećenja folija (npr. lokalno odvajanje laminiranih filmova u obliku "tunela" kao i oštećenja metalizovanog filma).

Pošto pre navedenih ispitivanja nije vršena kontrola kvaliteta nekih parametara koji mogu uticati na rezultat ispitivanja, kao što je su hrapavost, ravnomernost i debljina sloja boje, nego su folije ispitivane onakve kakve se koriste u standardnoj proizvodnji i sa tolerancijama koje su posledica tačnosti izrade kod proizvođača, to se pouzdanost dobijenih rezultata promena karakteristika folija nakon štampanja i pakovanja treba posmatrati u okvirima tih tolerancija.

Eksperimentalnim ispitivanjima su dobijene samo kvantitativne vrednosti promene karakteristika čija promena je izražena u procentima. Da bi se odredila realna vrednost fleksibilnog ambalažnog materijala kod kojeg bi se uzeli u obzir i drugi kriterijumi, kao što su npr. ekološki i ekonomski, neophodno je sveobuhvatno vrednovati materijal i posmatrati ga kao višekriterijumski problem. Za tu svrhu, nakon analize metoda vrednovanja koje se koriste za druge tehničke proizvode, u radu je predložen jedan naučno zasnovan, transparentan i praktičan postupak koji se, po analogiji, zasniva na opštoj metodi analize korisne vrednosti sistema.

Za određivanje faktora značaja kriterijuma primenjene su dve metode, i to metoda analitičko-hijerarhijskog procesa (AHP) i metoda poređenja parova. Obe metode su pokazale slične vrednosti, pri čemu je najveći faktor značaja dat kriterijumu propustljivosti, zatim zatezne čvrstoće i izduženja dok su razlike uočene kod kriterijuma troškova, kvaliteta otiska i ekologije. Odstupanje od rezultata je i očekivano s obzirom da svaka metoda ima svoje prednosti i nedostatke, kao što je npr. subjektivnost, odnosno objektivnost vrednovanja. Višekriterijumskim vrednovanjem materijala primenom metode AHP, sa ciljem određivanja faktora značaja i metode analize korisne vrednosti, utvrđeno je da najveću vrednost, tj. najveći stepen ispunjenosti zahteva ima materijal PET, zatim PETmet, BOPP i na kraju LDPE. Ovim rezultatima je potvrđena druga i treća hipoteza rada.

Sveobuhvatnije istraživanje fleksibilnih ambalažnih materijala bi obuhvatalo dodatne kriterijume (npr. propustljivosti na svetlost i vodenu paru, jačina vara, itd), druge vrste materijala, tehnike štampe i pakovanja, kao i primenu drugih metoda višekriterijumskog vrednovanja.

Pored naučnog doprinosa disertacije u obradi uticaja procesa štampanja i pakovanja na karakteristike fleksibilnih ambalažnih materijala urađena u ovom radu, kao i primene metoda višekriterijumskog vrednovanja, naglašena je i praktična korist njenih rezultata (za proizvođače ambalažnih materijala za optimizaciju roka trajanja pakovanog sadržaja, za proizvođače mašina za štampanje i pakovanje, štamparije kao i za proizvođače životnih namirnica za odabir odgovarajućih fleksibilnih ambalažnih materijala za neki sadržaj).

10. LITERATURA

1. Ahlhaus, E. O. (1997). *Verpackung mit Kunststoffen*, Hanser.
2. Analytischer Hierarchieprozess (AHP), Methodik der multikriteriellen Bewertung (2017). Abteilung für Forstökonomie Göttingen.
3. Allione, C., Petruccelli, L. (2012). *A multicriteria method for assessing the eco-performances of food packaging*, 2nd Word Sustainability Forum.
4. Anukiruthika, T., Sethupathy, P., Wilson, A., Kashampur, K., Arthur Moses, J., Anandharamakrishnan, C. (2020). *Multilayer packaging: Advances in preparation techniques and emerging food applications, comprehensive reviews in food science and food safety*, DOI.ORG/10.1111/1541-4337.12556
5. Anyadike, N. (2003). *Introduction to Flexible Packaging*, Pira International.
6. Aydemir C., Altay B.N., Akyol M., (2021). *Surface analysis of polymer films for wettability and ink adhesion*. Color Res Appl. 2021;46:489–499. DOI: 10.1002/col.22579
7. Aydemir C., Karademir, A., Imamoglu S., Nazli Altay B., Fleming P., & Tutak D. (2019). *Investigation of the evolution of hydrophobicity and wettability of paper in multi-color printing process*. Cellulose Chem. Technolog., 53 (7-8), 787-794. DOI:10.35812/CelluloseChemTechnol.2019.53.77.
8. Ajitha, A. R., Aswathi, M. K., Maria, H. J., Izdebska, J., & Thomas, S. (2016). *Multilayer polymer films*. In Multicomponent polymeric materials (pp. 229–258). Dordrecht: Springer.
9. Balaban, P., Viduka Ristić, M., Maksin, V., Radić, Vladislavljević, R., Vulić, M., Josimović, M., Radivojević, N.Z. (2021). *Mechanical and barrier properties of flexible packaging materials after the flexo printing process*. Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka (rad prihvaćen za objavljivanje).
10. Balaban, P., Stanojković, S. (2020). *Primena metode analize korisnosti u procesu vrednovanja i izbora varijanti*, 6.Međunarodna konferencija Upravljanje znanjem i informatika, Kopaonik.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

11. Balaban-Đurđev, P., Novaković, D. (2006): *Ponašanje ambalažnih folija u procesu štampanja, izrade ambalaže i pakovanja*, Treći naučno-stručni simpozijum GRID 2006, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.
12. Balaban-Đurđev, P., Novaković, D., Čurčić, B. (2008): *Površinski napon polipropilenskih ambalažnih folija u procesu flekso štampe*, Četvrti naučno-stručni simpozijum GRID 2008, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.
13. Balaban, P. (2013). *Procesi kaširanja štampane fleksibilne ambalaže-bezbednosni i ekološki aspekti*, Rizik i bezbednosni inženjering, Kopaonik, 266-273, (ISBN 978-86-6211-057-2).
14. Balaban, P. (2014). *Ekološko vrednovanje grafičke ambalaže*, 4. Međunarodno savetovanje Bezbednosni inženjering, požar, životna sredina, radna okolina, integrisani rizici.
15. Balaban, P. (2012). *The significance of colour and its colour characteristics on printed flexible packaging*, 6. International Symposium on Graphic Engineering and Design, GRID, Novi Sad.
16. Balaban-Đurđev, P, Maletić, V. (2011). Visual Impact of Graphic Information in the Package. Informing Science and IT Education 2011 Joint Conference, Novi Sad.
17. Balaban-Đurđev, P. (2006). *Uticaj procesa flekso štampe na karakteristike polimernih ambalažnih folija*. Magistarski rad, Fakultet tehničkih nauka.
18. Balaban, P., Stanojković, S. (2019). *Ček-lista kao podrška vrednovanju i izboru ambalaže za životne namirnice*, Peti naučno-stručni skup Politehnika, Beograd.
19. Balaban, P., Stanojković, S. (2021). *Primena cirkularne ekonomije u industriji plastične ambalaže*, 7. Međunarodna naučna konferencija Bezbednosni inženjering i 17. Međunarodna konferencija Zaštita od požara i eksplozija, Kladovo, 13-15.9.2021.
20. Balaban, P. (2020): *Podobnost polimerne ambalaže za reciklažu*, Serbian Journal of Engineering Management, Vol. 5, No. 2.
21. Benutzerhandbuch Teil 1: Installation, Einführung, Arbeit im Standardmodus: Krüss GmbH, Hamburg 2004-2012.
22. Benutzerhandbuch Teil 2: Arbeit im Expertenmodus, DSA Mapping Editor, Theorie: Krüss GmbH, Hamburg 2004-2012.
23. Bolanča, S., Majnarić, I., Golubović, K. *Packaging Printing Today*. Acta Graphica 26, 27-33.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

24. Borbély, A., Szentgyörgyvölgyi, R. (2011). *The effect of flexographic process parameter on the properties of prints on nonabsorbing substrates*, 2nd International Joint Conference on Environmental and Light Industry Technologies, Budapest, Hungary Óbuda University.
25. Bould, D C, Hamblyn S M, Gethin D T, Claypole T C. (2011). *Effect of impression pressure and anilox specification on solid and halftone density*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, <https://doi.org/10.1177%2F2041297510394072>.
26. Brandt, N. (2015). *Geeignete Testmethoden zur Charakterisierung von Flexodrucksubstraten für eine verbesserte Druckfarbenhaftung und Bedruckbarkeit PTS-Forschungsbericht*.
27. Brinkmann, T.; Ehrenstein, G.-W. u. Steinhilper, R. (1994): *Umwelt-und recyclinggerechte Produktentwicklung; Augsburg: WEKA Fachverlag für technische Führungskräfte GmbH*.
28. BÖLW (Bund Ökologische Lebensmittelwirtschaft e.V.). (2011). *Nachhaltige Verpackung von Bio-Lebensmitteln, Ein Leitfaden für Unternehmen*.
29. Brehmer, F. (2017). *Vorbehandlungsverfahren für den Flexodruck...*
30. Buchner, N. (1999). *Verpacken von Lebensmitteln*; Springer Verlag; Heidelberg.
31. Chen, H., Song, W. (2018). A multi-level study of evaluation indices and weight comparison for food packaging designs, *Journal of Interdisciplinary Mathematics*, 21:2, 287-297, DOI: 10.1080/09720502.2017.1420558
32. Clark TA, Wagner Jr JR. *Film properties for good performance on vertical-form-fill-seal packaging machines*. *J Plast Film Sheet* 2002;18:145e56.
33. Coles, R., McDowell, D. (2003). *Food packaging technology*, Blackwell Publishing.
34. Čekerevac, Z., Maletić, J. (2018). *Vrednovanje i izbor varijanti logističkih projekata, FBIM Transactions*. DOI 10.12709/fbim.06.06.01.02.
35. Dunn T. (2015). *Manufacturing Flexible Packaging*. Elsevier. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-323-26436-5.00001-1>
36. Ebnesajjad, S. (2012). *Plastic Films in Food Packaging*, Elsevier.
37. Eur-lex.europa.eu. Preuzeto 15. septembra sa <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/?uri=CELEX:32011R0010>
38. *Flexible Packaging Market - Global Outlook and Forecast 2021-2026* (2021).

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Dostupno na: <https://www.arizton.com/market-reports/flexible-packaging-market-industry-report> (pristupljeno 1 April 2021).

39. *Flexography: Principles & Practices (1999)*. Foundation of Flexographic Technical Association, Inc.
40. Galić, K., Ščetar, M., Kurek, M. (2001). *The benefits of processing and packaging*, Trends in Food Science & Technology 22, 127-137.
41. Gasthuber, H. (2003): *Multifunktionalität der Verpackung – eine Herausforderung an die Verpackungsgestaltung*, Forum ware 31 (2003) nr. 1 – 4
42. Ge, C., Verma, S.S., Burruto, J., Ribalco, N., Ong, J., Sudhahar, K. (2020). *Effects of flexing, optical density, and lamination on barrier and mechanical properties of metallized films and aluminum foil centered laminates prepared with polyethylene terephthalate and linear low density polyethylene*, Journal of Plastic Film & Sheeting, 0(0) 1–21 DOI: 10.1177/8756087920963532
43. Grundlagen des Flexodrucks, Fachseminar an der DFTA Flexodruck Akademie 5. - 9. Oktober 2015.
44. Gosh, A. (2015). *Technology of Polymer Packaging*, Carl Hanser Verlag, Munich.
45. Gupta, S., Dixit, M., Sharma, K., N.S. Saxena (2009). *Mechanical study of metallized polyethylene terephthalate (PET) films*. Surface & Coatings Technology 204, 661–666. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.08.051
46. Gurgal, N., Repeta, V., Senkivsky, V., Shybanov, V. (2013). *Definition of Quality Criteria of the Technological Process of Narrow Web UV-Printing*, Journal of Graphic Engineering and Design, Volume 4 (2).
47. Hanika, M. (2004). *Zur Permeation durch aluminiumbedampfte Polypropylen- und Polyethylenterephthalatfolien*. Doktorska disertacija.
48. Hertlein, J. (1998). *Untersuchungen über Veränderungen der Barriereigenschaften metallisierter Kunststofffolien beim maschinellen verarbeiten*. Doktorska disertacija. München.
49. Ishizaka, A., Siraj, S. (2018): *Are multi-criteria decision-making tools useful? An experimental comparative study of three methods*, European Journal of Operational Research.
50. Izdebska, J., Thomas, S. (2016). *Printing on polymers*, Elsevier.
51. Izdebska, J., Żołek-Tryznowska, Z., Świątoński, A. (2015). *Correlation between plastic film properties and flexographic prints quality*, Journal of Graphic engineering and

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

Design, Volume 6, Number 2.

52. Jurečić, D. (2004). *Evaluacija elemenata vizualne informacije na grafičkoj opremi ambalaže*, Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet organizacije i informatike Varaždin.
53. Hornbogen, E., Bode, R., Donner, P. (1993). *Recycling: Materialwissenschaftliche Aspekte*, Springer, 1993.
54. Kanai, T., Cambell, G. (2014). *Film Processing Advances*, Hanser.
55. Khalifa Y.I.M. (2016). *Effect of the Printing Remedies and Lamination Techniques on Barrier Properties "WVTR and OTR Value" for Polypropylene Film*. EC Nutrition, 5(2): 1089-1099.
56. Kim Y.T., Min B., Kim K.W. (2014). *General Characteristics of Packaging Materials for Food System*. In: Han J. editor. 2nd edition. Innovations in Food Packaging, Ed. Elsevier Ltd., Oxford, UK: 13-35.navesti
57. Kim, J. (2019). *Designing quality on flexible packaging systems using QFD-AHP*. Thesis, Michigan State University.
58. Kohlert, C. (2017). *Nachhaltigkeit von Kunststoffverpackungen-von der Wiege bis zur Bahre*. Sitzungsberichte der Leibnitz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin 130, 89-98.
59. Kriwet, A. (1994). *Bewertungsmethodik für die recyclinggerechte Produktgestaltung*, Carl Hanser Verlag München.
60. Krüss: Application Report, Zilles, J.U. (2000). *Wettabilities and Surface Tensions of Different Paper Types*.
61. Krüss GmbH (2004-2012). *Software zur Tropfenkonturanalyse, Benutzerhandbuch Teil 1 u. 2*, Hamburg.
62. Krüss Application Report (2014). *Warum Testinten nicht die ganze Wahrheit über die freie Oberflächenenergie sagen*.
63. Kühnapfel, J. (2019). *Nutzwertanalyse in Marketing und Vertrieb*, Springer.
64. Lazić, V., Novaković, D. (2010). *Ambalaža i životna sredina*, Tehnološki fakultet, Novi Sad.
65. Ljevak, I., Zjakić, I., Banić, D. (2018). *The variability of dynamic coefficient of friction material in flexible packaging*. Acta Graphica Vol 29, No 1; 31-38.
66. Massey, L. (2002). *Permeability Properties of Plastics and Elastomers, A Guide to Packaging and Barrier Materials*, William Andrew.
67. Marangoni Junior L., De Oliveira L.M., Balardin H. D., F. Cristianini M., Padula M.,

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

- Rodrigues & Anjos A.C. (2020). *Influence of high-pressure processing on morphological, thermal and mechanical properties of retort and metallized flexible packaging*. Journal of Food Engineering, 273, 109812. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109812>
68. Marangoni Junior, L., Cristianini, M., Padula, M., & Anjos, C. A. R. (2019). *Effect of high-pressure processing on characteristics of flexible packaging for foods and beverages*. Food Research International, 119, 920–930. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.078>
69. Meier, M. (2002). *Auswählen und bewerten, the key to innovation Vorlesungsskript ZPE, Version 2002, 1. Semester*, ETH Zürich, Educational Material. Dostupno na: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-004323995>, pristupljeno, 25.3.2021.
70. Mesic, B., Lestelius, M., Engström, G. (2006): *Influence of Corona Treatment Decay on Print Quality in Water-borne Flexographic Printing od Low-density Polyethylene-coated Paperboard*, Packaging Technology and Science.
71. Mesic, B., Lestelius, M., Engstrom, G., Edholm, B. (2003). *Printability of PE-coated paperboard with water-borne flexography: Effects of corona treatment and surfactants addition*, Karlstad University, Sweden.
72. Mesic, B., Lestelius, M., and Engström, G. (2006). *Occurence and causes of uncovered areas in water-borne flexographic print on PE-extrusion-coated pacakging papers*, IPGAC.
73. Milićević, M., Župac, G. (2012). *Subjektivni pristup određivanju težina kriterijuma*. Vojnotehnički glasnik, Vol. LX, No.2.
74. Morris A.B. (2017). *The Science and Technology of flexible packaging*, Elsevier.
75. Mordor Intelligence (2021). Dostupno na: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/flexographic-printing-market>. Pristupljeno 25.03.2021.
76. Morris, A. B. (2016). *The science and technology of flexible packaging: Multilayer films from resin and process to end use*, Oxford, UK: William Andrew.
77. Morsy FA., Elsayad SY., Bakry A. & Eid MA. (2006). *Surface properties and printabilty of polypropylene film treated by an air dielectric barrier discharge plasma*. Surface Coatings International Part B: Coatings Transactions 89, B1, 49-55.
78. Mrkić S., Galić K. & Ivanković M. (2007). Effect of Temperature and Mechanical

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

- Stress on Barrier Properties of Polymeric Films Used for Food Packaging. *Journal of Plastic Film and Sheeting*, 23(3): 239-256. DOI: <https://doi.org/10.1177/8756087907086102>
79. Muhamedbegović, B., Plančić, I., Čatić, S. (2013). *Uticaj tehnike tiska i postupka kaširanja na savojnu otpornost polipropilenskih dupleks folija za pakiranje snack proizvoda*, 8. Naučno-stručni skup sa međunarodnim učešćem "Kvalitet 2013", Neum.
 80. Muhamedbegović, B., Juul, V. Nils, Jašić, M. (2015). *Ambalaža i pakiranje hrane*, OFF-SET d.o.o Tuzla, Tuzla i Trondheim.
 81. Müller-Herbers, S. (2007). *Methoden zur Beurteilungen von Varianten*, Fakultät Architektur und Stadtplanung Institut für Grundlagen der Planung, Universität Stuttgart.
 82. Nemat B. Razzaghi M. Bolton K. Rousta K (2019). *The role of food packaging design in consumer recycling behavior-a literature review*, Sustainability.
 83. Nickel, W. (1996). *Recycling-Handbuch, Strategien-Technologien-Produkte*. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf.
 84. Olsmats, C. & Dominic, C. (2003). *Packaging Scorecard – a Packaging Performance Evaluation Method*, *Packag. Technol. Sci.* 16: 9–14, DOI:10.1002/pts.604
 85. Olsson, R. (2007). *Some aspects on flexographic ink-paper and paperboard coating interaction*, Dissertation, Karlstad university studies.
 86. Parkar, A. (2005). *Effect of Flexing on the Barrier Properties of Metallized Films*, Thesis. Rochester Institute of Technology.
 87. Pavličić, D. (2002). *Konzistentnost izbora metoda višeatributivne analize*. Economic Annals, Volume 43.
 88. Petric Maretić, K., Bates, I., Modrić, D. (2014). *Comparison of Colorimetric Values of Prints Made with Cyan Ink on Different Polymer Materials*, *Procedia Engineering* 69, 1556 – 1561.
 89. Piringer, O., Baner, A. L. (2019). *Plastic Food Packaging Material*, Wiley.
 90. Plastemart. Food Packaging Accounts for Almost 35% of the Global Packaging Market. Preuzeto 9. jula 2020 sa: <http://www.plastemart.com/plastic-technical-articles/food-packaging-accounts-for-almost-35-of-the-global-packaging-market/2337>.
 91. *Plastics and the circular economy*. Preuzeto 18. jula 2021 sa https://www.ellenmacarthurfoundation.org/explore/plastics-and-the-circular-economy-and-innovation/research-area/environment/circular-economy/plastics-circular-economy_en

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

92. *Plastics in a circular economy*. Preuzeto 21. jula 2021 sa <https://ec.europa.eu/info/research>
93. *Praktikum-Werkstoffe des Maschinenbaus*. Institut für Werkstofftechnik. Universität Kassel. Pristupljeno maj, 2021.
94. Rentzhog, M. (2006). *Water-Based Flexographic Printing on Polymer-Coated Board*, Doctoral Thesis at the Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden.
95. Rentzhog, M., Fogden, A. (2006): *Print quality and resistance for water-based flexography on polymer-coat*, *Progress in Organic Coatings*, 183-194. DOI:10.1016/j.porgcoat.2006.08.003
96. Repeta V. et al. (2016). *Quantitative evaluation of quality of flexographic imprints by means of fuzzy logic*, *Acta Graphica* Vol 27, No 1, 47-50.
97. Rezaei, J., Papakonstantinou, A., Tavasszy, L., Pesch, U., Kana, A. (2019). *Sustainable product-package design in a food supply chain: A multi-criteria life cycle approach*, *Packaging Technology and Science*. DOI: 10.1002/pts.2418
98. Rubino M., Tung A.M., Yada, S. & Britt, I.J. (2001). *Permeation of Oxygen, Water Vapor, and Limonene through Printed and Unprinted Biaxially Oriented Polypropylene Films*, *J. Agric. Food Chem.* 49(6): 3041-3045. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf001427s>
99. Salwa et al. (2019): *Selection System for Natural Fiber*, *BioResources* 14(4), 10014-10036.
100. Schröder, K. (2011). *Spezifikationen für Folienverpackungen*, Innoform Testservice.
101. Selke E.M, S., Culter J. (2016). *Plastics Packaging*, 3rd Edition, Hanser Publishers, Munich.
102. Senyıldız, E., Demirel, B. (2017). *Determination of the Material for the Carbonated Soft Drink Packaging With Multi-Criteria Decision Making Methods*. *Sigma: Journal of Engineering & Natural Sciences/Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*.
103. Shagufta Ishteyaq A., Omm-e-h N & Syed, J.M. (2019). *Physical Properties and Biodegradable Study of Metalized and Non-Metalized polypropylene (PP) Films: A Comparative Research*. *Adv Biotech & Micro.* 12(3): 555838.
104. Siracusa, V. (2012). *Food Packaging Permeability Behaviour: A Report*. *International Journal of Polymer Science*, Volume 2012, 30202. DOI: <https://doi.org/10.1155/2012/302029>
105. Srđević, B., Jandrić, Z. (2000). *Analitički hijerarhijski proces u strateškom gazdovanju šumama*. u: Studija.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

106. Steinschaden, J. (1999). *Lehr- und Konstruktionsmethodik*. Dostupno na: https://homepages.fhv.at/hs/Konstruktionsmethodik/Kap_00/KMethod.htm,
Pristupljeno: maj 2021.
107. Szentgyörgyvölgyi, R., Novotny, E. (2010). *Investigation of flexographic printing on PE and BOPP foils*. The Fifth International Symposium, GRID.
108. Stanujkic, D., Karabasevic, D., Kazimieras Zavadskas, E. (2015). *A Framework for the Selection of a Packaging Design Based on the SWARA Method*, *Inzinerine Ekonomika-Engineering Economics*, 26(2), 181–187
109. Tehničke specifikacije za BOPP, PET, PETmet i PE (dobijene od firme Euroflex).
110. Tomerlin, R., Tomiša, M., Vusić, D. (2019). *The influence of printing, lamination and high pressure processing on spot color characterisation*, ISSN 1846-6168 (Print), ISSN 1848 5588 (Online), doi.org/10.31803/tg-20190226231838
111. Tomerlin, R., Tomiša, M., Vusić, D. (2019). *Deviations of Spot Colorimetric Values on Multi-layered Flexible Packaging during the Graphic Reproduction and Sterilisation Process*, ISSN 1330-3651 (Print), ISSN 1848-6339 (Online) <https://doi.org/10.17559/TV-20190119234822> Preliminary communication
112. Transparency. Food Packaging Market—Global Industry Analysis and Forecast 2015–2023. Preuzeto 15. maja 2021 sa <https://www.transparencymarketresearch.com/food-packaging-market.html>.
113. Tsigonias, M., Kakizis, N., Romanos, G., Tsigonias, A., Tsimis, D. & Politis, A., Dimitrios, Z. (2012). *On the definition of a multi-criteria model for the evaluation and adoption of packaging*. Conference: 39th International Research Conference of IARIGAI - 2012: Ljubljana, Slovenia, Volume: 39. DOI: 10.13140/2.1.3166.3684.
114. Tzeng, G-H., Huang, J-J. (2011). *Multiple Attribute Decision Making, methods and applications*. Taylor & Francis Group.
115. Valdec, D., Miljković, P., Auguštin, B.: *The influence of printing substrate properties on color characterization in flexography according to the ISO specifications*, *Tehnički glasnik* 11, 3 (2017), 73-77.
116. VDI 4409 (1996-04). *Vorgehensweise zur umweltorientierten Gestaltung und Auswahl von Verpackungen*.
117. VDI 2205, Blatt 3: 1998-11. *Verein Deutscher Ingenieure e.V., Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Technisch-wirtschaftliche Bewertung*. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Višekriterijumsko vrednovanje fleksibilnih ambalažnih materijala i uticaj procesa štampanja i pakovanja na njihove karakteristike

118. Vujković I. (1997). *Polimerna i kombinovana ambalaža*, Poli, Novi Sad.
119. Vujković, I., Galić, K., Vereš, M. (2007): *Ambalaža za pakiranje namirnica*, Tectus, Zagreb.
120. Zanakis, H., S., Solomon, A., Wishart, N., Dubish, S. (1998). *Multi-attribute decision making: A simulation comparison of select methods*. European Journal of Operational Research IO, 507-529.
121. Zhang, S., Gu, W. C., Cheng, Z. Y., Gu, W. J., & Li, Y. (2014). *Permeability of Packaging Materials*. *Advanced Materials Research*, 904, 192–194. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.904.192>
122. Zangemeister, C. (2014). *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik*. Wittmannsche Buchhandlung, München.
123. Wolters, L., Marwick, J.v., Regel, K., Lackner, V, Schäfer, B. (1997). *Kunststoff-Recycling Grundlagen, Verfahren, Praxisbeispiele*. Carl Hanser Verlag München Wien.
124. Wang, X., White, G. (2014): *Life cycle assessment for eco-packaging design: a hybrid multi-criteria decision analysis approach*, KES Transactions on Sustainable Design and Manufacturing, pp.350-361.
125. Yam, Kit L. (2009): *The Wiley Encyclopedia of Packaging Technology*, Wiley.