

# Utjecaj vlage na čvrstoću lijepljenog spoja

---

**Bakula, Adriana**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Graphic Arts / Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:216:458692>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-01**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Graphic Arts Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAFIČKI FAKULTET**

**ADRIANA BAKULA**

**UTJECAJ VLAGE NA ČVRSTOĆU  
LIJEPLJENOG SPOJA**

**DIPLOMSKI RAD**

Zagreb, 2017



Sveučilište u Zagrebu  
Grafički fakultet

**ADRIANA BAKULA**

**UTJECAJ VLAGE NA ČVRSTOĆU  
LIJEPLJENOG SPOJA**

**DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Doc.dr.sc. Suzana Pasanec Preprotić

Student:

Adriana Bakula

Zagreb, 2017

Rješenje o odobrenju teme diplomskog rada

## SAŽETAK

Grafički proizvodi današnjice moraju zadovoljiti visoke kriterije tehnoločnosti i osigurati isporuku proizvoda različitih naklada i kvalitete. Kako bi mogli predvidjeti kvalitetu i omogućiti korištenje novih inovativnih materijala, ispitivanje čvrstoće lijepljenih spojeva, adhezijski testovi i ispitivanje kompatibilnosti korištenih materijala postaje prijeko potrebno s obzirom na karakteristike materijala koji se koriste pri izradi grafičkih proizvoda. Jedan od glavnih faktora koji utječe na čvrstoću lijepljenog spoja proizvoda je vlaga, stoga je glavna tema rada upravo odrediti utjecaj vlažnosti zraka (35%, 45%, 65% i 92%) na čvrstoću lijepljenih spojeva za 3 različite vrste papira i kartona u odnosu na preporučene standardne uvjete. Prije izrade lijepljenih spojeva s PVAc ljepljivom, provest će se kondicioniranje svih materijala na standardne uvjete, a sam proces lijepljenja biti će prethodno definiran kako bi omogućili kontrolu prilikom izrade uzoraka za testove ljuštenja i osigurali ponovljivost ispitivanja. Nakon izrade uzoraka uz pomoć 4 različite zasićene otopine soli uzorci će biti kondicionirani na 35, 45, 65 i 92% RVZ te potom podvrgnuti ispitivanju čvrstoće. Analizom dobivenih rezultata izračunat će se promjena čvrstoće lijepljenog spoja u odnosu na standardne uvjete, ovisna o vrsti ispitivanog materijala i količini vlage u zraku.

Ključne riječi: čvrstoća adhezijskog spoja, polivinilacetatno ljepljivo, test ljuštenja, utjecaj vlage

## **ABSTRACT**

Today's graphic products must meet high technology standards and ensure the delivery of products of different trades and quality. In order to predict the quality and to enable the use of new innovative materials, the bond strength tests, adhesion tests, and the compatibility testing of the materials used are becoming more and more necessary given the characteristics of the materials used in the production of graphic products. One of the main factors influencing the strength of the bonded product is moisture, so the main topic of the thesis is to determine the influence of air humidity (35%, 45%, 65% and 92%) on the strength of glued compounds for 3 different types of paper and board compared to the recommended standard conditions. Prior to making the bonded bonds with PVAc adhesive, all materials will be conditioned to standard conditions, and the adhesion process will be pre-defined to allow control when making samples for peeling tests and to ensure repeatability of the test. After the preparation of the samples, with the aid of 4 different saturated salt solutions, the samples will be conditioned to 35, 45, 65 and 92% RH and subjected to strength testing. By analyzing the results obtained the bond strength of the bonded compound will be calculated in relation to the standard conditions, depending on the type of test material and the amount of moisture in the air.

Key words: adhesive bond strength, polyvinyl acetate adhesive, peeling test, moisture influence

# SADRŽAJ

|   |    |
|---|----|
| 1. UVOD.....  | 1  |
| 2. TEORIJSKI DIO .....                                      | 3  |
| 2.1. LJEPILO.....   | 3  |
| 2.1.1. Osnovni procesi ostvarivanja lijepljenog spoja ..... | 5  |
| 2.1.1.1 Mehanizam lijepljenja .....                         | 5  |
| 2.1.1.2 Adhezija.....                                       | 6  |
| 2.1.1.3 Kohezija.....                                       | 7  |
| 2.1.1.4 Površinska napetost.....                            | 7  |
| 2.1.1.5 Močenje površine .....                              | 7  |
| 2.2. LJEPILA U GRAFIČKOJ DORADI.....                        | 7  |
| 2.2.1. Škrobno ljepilo .....                                | 7  |
| 2.2.2. Glutaminska ljepila ili tutkala.....                 | 8  |
| 2.2.3. Karboksimetilcelulozno ljepilo.....                  | 8  |
| 2.2.4. Sulfitno ljepilo .....                               | 8  |
| 2.2.5. Hot-melt ljepila .....                               | 8  |
| 2.2.6. Kazeinsko ljepilo .....                              | 9  |
| 2.2.7. Vodeno staklo .....                                  | 9  |
| 2.2.8. Poliuretanska ljepila .....                          | 9  |
| 2.2.9. PVAc ljepilo .....                                   | 10 |
| 2.3. FAKTORI UTJECAJA NA ČVRSTOĆU LIJEPLJENOG SPOJA .....   | 11 |
| 2.3.1. Svojstva ljepila .....                               | 12 |
| 2.3.2. Slobodna (površinska) energija .....                 | 13 |
| 2.3.3. Močenje.....   | 13 |
| 2.3.4. Priprema površine za lijepljenje .....               | 13 |
| 2.3.5. Debljina dijelova koji se lijepe.....                | 14 |
| 2.3.6. Veličina površine lijepljenja.....                   | 14 |
| 2.3.7. Priprema, miješanje i nanošenje ljepila.....         | 14 |
| 2.3.8. Debljina sloja ljepila.....                          | 15 |
| 2.4. SVOJSTVA I GRAĐA PAPIRA.....                           | 16 |
| 2.4.1. Opća svojstva .....                                  | 16 |
| 2.4.1.1. Debljina papira .....                              | 16 |
| 2.4.1.2. Gramatura ili površinska masa.....                 | 16 |
| 2.4.1.3. Prostorna masa ili gustoća papira.....             | 16 |
| 2.4.1.4. Uzdužni i poprečni smjer.....                      | 16 |
| 2.4.1.5. Putena i sitena strana lista ili dvostranost.....  | 17 |
| 2.4.1.6. Vlaga u papiru.....                                | 17 |
| 2.4.2. Svojstva površine papira .....                       | 18 |
| 2.4.2.1. Glatkost .....                                     | 18 |
| 2.4.2.2. Prašenje papira .....                              | 18 |

|   |    |
|---|----|
| 2.4.2.3. Čupanje papira.....                                      | 18 |
| 2.4.3. Svojstva lista papira.....                                 | 18 |
| 2.4.3.1. Upojnost.....  | 18 |
| 2.4.3.2. Dimenzionalna stabilnost.....                            | 19 |
| 2.4.3.3. Keljenost i stupanj keljenja.....                        | 19 |
| 2.4.4. Mehanička svojstva.....                                    | 19 |
| 2.4.4.1. Otpornost prema cijepanju.....                           | 19 |
| 2.4.4.2. Otpornost prema rastezanju i kidanju.....                | 19 |
| 2.4.4.3. Otpornost prema tlaku (prskanju ili pucanju).....        | 20 |
| 2.4.4.4. Otpornost prema savijanju.....                           | 20 |
| 2.4.5. Optička svojstva papira.....                               | 21 |
| 2.5. ISPITIVANJE ČVRSTOĆE LIJEPLJENOG SPOJA.....                  | 21 |
| 2.5.1. Adhezijski testovi.....                                    | 22 |
| 2.5.1.1. Test kidanja ili istežanja (tensile test).....           | 24 |
| 2.5.1.2. Test smicanja (shear test).....                          | 25 |
| 2.5.1.3. Test ljuštenja (peel test).....                          | 26 |
| 2.5.1.4. Test kompresije.....                                     | 27 |
| 2.5.1.5. Test vezivanja.....                                      | 28 |
| 3. EKSPERIMENTALNI DIO.....                                       | 30 |
| 3.1. MATERIJALI I UREĐAJI.....                                    | 30 |
| 3.1.1. Kidalica.....  | 30 |
| 3.1.2. Ljepilo PVAc Signokol L.....                               | 31 |
| 3.1.3. Papiri.....  | 31 |
| 3.1.4. Kartoni.....   | 31 |
| 3.1.5. Zasićene otopine soli.....                                 | 32 |
| 3.2. POSTUPAK PRIPREME UZORAKA.....                               | 32 |
| 3.3. OPIS ISPITIVANJA.....  | 34 |
| 3.4. REZULTATI ISPITIVANJA.....                                   | 34 |
| 4. DISKUSIJA REZULTATA.....                                       | 39 |
| 4.1. REZULTATI MJERENJA ČVRSTOĆE LIJEPLJENIH SPOJEVA PAPIRA.....  | 39 |
| 4.2. REZULTATI MJERENJA ČVRSTOĆE LIJEPLJENIH SPOJEVA KARTONA..... | 43 |
| 5. ZAKLJUČAK.....   | 48 |
| 6. LITERATURA.....  | 50 |
| 7. POPIS TABLICA.....   | 52 |
| 8. POPIS SLIKA.....   | 53 |
| 9. POPIS GRAFIKONA.....   | 54 |



## 1. UVOD

Kako bi konkurirali na tržištu, grafički proizvodi moraju zadovoljiti visoke kriterije tehnološkičnosti proizvoda koji uključuju dizajn, projektiranje, proizvodnju, zaštitu, transport, skladištenje i dr., osigurati optimalni odnos između uloženi resursa, kvalitete i konačne cijene. Troškovi proizvodnje ovise o kreativnom rješenju službe grafičkog oblikovanja: načinu izvođenja radova (strojni ili ručni), korištenju materijala i vremenu izrade.

Svjetska ekonomska kriza, razvoj društvenih mreža i online marketinga doveli su do pojave neiskorištenosti postojećih kapaciteta, tj. smanjenja naklada grafičkih proizvoda. Statistike pokazuju da je gotovo 40% tiskanih proizvoda u 2000. godini tiskano u više od 10 000 primjeraka, a da će u 2020. godini taj udio pasti na 25% te naklade iznositi od 1 do 2000 primjeraka. Na hrvatskom tržištu, 95% aktivnih hrvatskih grafičkih tvrtki kvalificirane su kao male. Tiskani materijali se sve više personaliziraju i namjenjuju uskom tržišnom segmentu. [1] Zbog smanjenja naklada, kvaliteta dizajna, projektiranja i izrade malih naklada, ili čak pojedinačnih proizvoda na zahtjev kupaca, nikad nije bila bitnija, stoga je važno poznavati sva svojstva korištenih materijala jer nema prostora za greške. Iz tog razloga je nastala ideja za ispitivanjem svojstava hladnog polivnil acetatnog ljepljiva kojeg odlikuje dinamična viskoznost, suha tvar, pH vrijednost, radna temperatura i otvoreno vrijeme sušenja filma. U mogućnosti je lijepiti vodoupojne, paropropusne i porozne predmete i površine ili supstrate. Oni se osloje tankim filmom te za vrijeme otvorenog vremena sušenja pokrivaju drugim supstratom. U grafičkoj industriji se koristi najviše kod bešavne forme uveza u grafičkoj doradi. No, primjenu nalazi i kod ostalih materijala kao što su kartoni, ljepljive folije, drvo, staklo i metal.

Glavna hipoteza diplomskog rada je vezana uz bolje razumijevanje i kvantitativno definiranje utjecaja vlage na čvrstoću lijepljenog spoja (papir-papir ili karton-karton). Ovim istraživanjem želi se ispitati i utjecaj vlage s obzirom na različite vrste materijala. Cilj je pobliže definirati metode lijepljenja za provođenje adhezijskih testova i način ispitivanja čvrstoće tako nastalih spojeva pri provedbi testova ljuštenja (peel test). Time se želi omogućiti ponovljivost ovog tipa ispitivanja za veći broj različitih materijala te skrenuti pozornost na moguće nedostatke polivnil acetatnih ljepljiva.

Ispitivanje će se provoditi na uređaju tvrtke Enrico Toniolo, Dynamometer Tensomini Super za svaku od odabrane tri vrste papira i tri vrste kartona. Budući da će uzorci biti kondicionirani na različitim postotcima RVZ te podvrgnuti ispitivanju, utjecajni faktori se moraju držati na istoj razini tokom cijelog procesa kako bi testiranje dalo što optimalnije rezultate.

## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1. Ljepilo

Prema normi DIN 16920, ljepilo je nemetalni materijal koji površinskim pričvršćivanjem i unutrašnjom čvrstoćom povezuje iste ili različite materijale, a da se pritom bitno ne mijenja struktura spojenih dijelova. Odnosno, ljepilo je tvar koja na temelju kemijskog sastava i fizikalnog stanja u trenutku nanošenja na površine omogućava njihovo spajanje. Osnovni preduvjet je da ljepilo ima svojstvo adhezije prema materijalu koji se lijepi, dok materijal mora imati dostatnu koheziju i stabilnost da bi veza bila trajna i čvrsta. Nanosi se u obliku viskozne tekućine u tankom sloju, potiskujući sloj zraka koji okružuje površinu s kojom dolazi u neposredan dodir. Sušenjem se stvara adhezijska veza i postiže maksimalna čvrstoća slijepljenoga spoja hlapljenjem medija u kojem se ljepilo primjenjuje (voda ili organsko otapalo) ili kemijskom reakcijom tvari koje su sadržane u ljepilu. Konačna svojstva ljepila moraju odgovarati bitnim svojstvima materijala koji se lijepi (mehanička svojstva, elastičnost, otpornost prema vlazi, toplini, kemijskim utjecajima itd.). Primjena ljepila u posljednjih nekoliko godina sve je veća, a primjenjuje se od kućanstva pa sve do brojnih industrijskih grana poput automobilske, zrakoplovne, građevinske, elektroničke, papirne, tekstilne, obućarske industrije i dr.

Proces lijepljenja započinje dovođenjem ljepila u stanje u kojem ga možemo nanositi na površinu tvari koje želimo slijepiti, zatim slijedi pripremanje površine za lijepljenje i njegovo nanošenje te u konačnici spajanje tvari koje se lijepe preko površine na koje je ljepilo nanoseno.

Ljepila se mogu klasificirati na različite načine:

- prema materijalu koji se lijepi (papir, drvo, plastika, kovine),
- prema načinu primjene (hladno ili toplo lijepljenje, lijepljenje kistom, valjkom ili prskanjem),
- prema konačnim svojstvima (bitno je mjerilo otpornosti prema određenim vanjskim utjecajima),
- prema ponašanju pri skrućivanju (upijanje, hlapljenje),
- prema podrijetlu (mineralno, sintetičko, biljno ili životinjsko),
- prema otvorenom vremenu lijepljenja (kratko, srednje i dugo vrijeme hvatanja).

Ljepilo u grafičkoj doradi mora udovoljavati ovim grafičkim zahtjevima:

- da se četkom ili valjkom lako razmazuje i da se može nanositi u jednoličnom i tankom sloju,
- ne smije se pjeniti u stroju ili uređajima za topljenje i miješanje,
- u razrijeđenom obliku mora imati toliku ljepljivost da hvata savijeni, kruti materijal i nekoliko ga minuta drže zalijepljenim,
- da dijelovi ostaju čvrsto slijepljeni dok se materijal potpuno ne osuši,
- da je što svijetlije te da sadržaj i svojstva ne utječu na promjenu nijanse ili boje presvlačnog materijala,
- mora biti neutralnog ili slabog alkalnog djelovanja jer sadržaj kiseline ili jaka alkalnost utječu na boju materijala,
- ne smije imati neugodan miris i za zdravlje štetna isparivanja,
- tijekom skladištenja, prije uporabe i tijekom cijelog procesa lijepljenja mora biti postojano, zadržati kopaktnost, ne smije ga raslojavati voda ili drugo otapalo, ne smije prebrzo nastajati vrenje, tj. raspadanje ili kvarenje.

Također, ljepilo mora brzo navlažiti papir i dati mu potrebnu elastičnost i plastičnost. Mora biti bezbojno da ne bi ostavljalo tragove i mrlje na papiru te imati jaku ljepljivost i ne dopustiti odvajanje pregibima papira. [2]

Prednosti spajanja materijala lijepljenjem:

- jednolika raspodjela naprezanja u spoju,
- mogu se lijepiti jednaki i različiti materijali,
- mogućnost spajanja vrlo tankih komada i materijala bitno različitih debljina,
- nema unošenja topline na mjestu spoja,
- lakša ukupna masa konstrukcije u usporedbi s konstrukcijama dobivenim ostalim načinima,
- istodobno spajanje i brtvljenje,
- gotovo nepotrebna naknadna obrada mjesta spoja,
- ekonomičan način spajanja za pojedinačnu proizvodnju i male serije,
- površinski izgled i kvaliteta površine konačnih proizvoda izrađenih lijepljenjem bolji su u odnosu na druge postupke spajanja,
- mogućnost popravka.

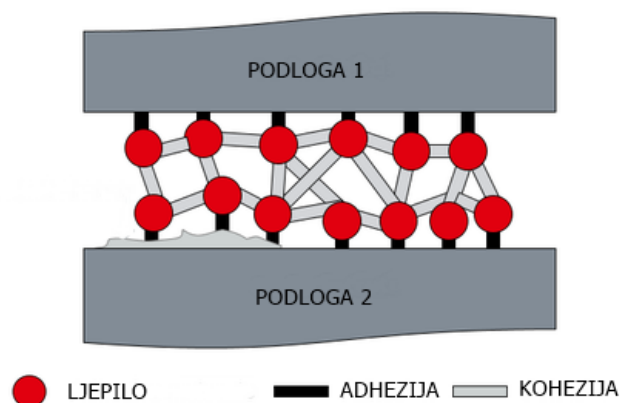
Nedostaci spajanja materijala lijepljenjem:

- mala čvrstoća u odnosu na druge postupke spajanja,
- ograničene temperature uporabe,
- relativno niska udarna žilavost i čvrstoća ljuštenja,
- moguće dugotrajno očvršćivanje (ovisno o tipu ljepila),
- nužna priprema površine lijepljenja,
- otežano ispitivanje spojeva metodama bez razaranja,
- potreba održavanja približno konstantne temperature tijekom očvršćivanja ljepila,
- opasnost od popuštanja spoja pri nejednolikom toplinskom rastezanju spojenih komada,
- ograničene mogućnosti popravaka,
- zahtijevani proračuni čvrstoće,
- vrijeme spoja može biti dugo, a potrebna priprema skupa. [3]

### 2.1.1. Osnovni procesi ostvarivanja lijepljenog spoja

#### 2.1.1.1 Mehanizam lijepljenja

Mehanizam lijepljenja je ovisan o dvjema privlačnim silama koje se javljaju u lijepljenom spoju, a to su adhezijske i kohezijske privlačne sile (slika 1.).



Slika 1. Privlačne sile u lijepljenom spoju

Adhezija je važna za stvaranje prijanjajućih sila za što je potrebno unaprijed dobro pripremanje površine. Stvaranjem energijskih povoljnih uvjeta povezivanja u sloju ljepila, mora se postići što veća kohezijska čvrstoća koja ovisi o temperaturi i materijalu. Procesom polireakcije i/ili umrežavanja i/ili hlađenja ljepila stvaraju se kohezijske sile. Najveću kohezijsku čvrstoću imaju metali, a najmanju tekućine i plinovi. Adhezivno-kohezivni mehanizam spajanja lijepljenjem se ostvaruje kod većine lijepljenih materijala kao što su

metali, termo-plastične mase, porozni materijali: drvo, koža, papir, tekstil, zatim neorganski materijali i keramika.

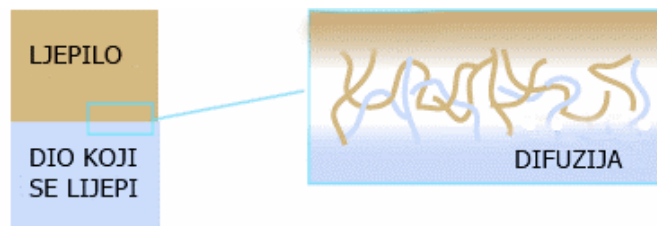
### 2.1.1.2. Adhezija

Adhezija je sila povezivanja između ljepila i površine materijala koji se lijepi te je kao takva bolja što je jači kontakt između dvaju površina. Uključuje njihovo kemijsko i fizikalno povezivanje. Kemijsko se povezivanje sastoji od izravnog povezivanja molekula dvaju materijala kovalentnim ili ionskim vezama, a fizikalno od mehaničkog sidrenja, fizikalne apsorpcije između molekula ljepila i površine koja se lijepi ili penetracije molekula ljepila u površinu zbog mehanizma difuzije. Mehaničko sidrenje je pojava koja nastaje ulaskom ljepila u pore, udubine i ostale nepravilnosti površine pri čemu se ostvaruje mehaničko povezivanje ljepila i površine tijela. Važno je postići da ljepilo dobro namoči površinu i da ima dovoljno nisku viskoznost da bi istisnulo zrak i popunilo šupljine. Ovaj mehanizam je specifičan za porozne materijale kao što su drvo, papir, tekstil i sl.



Slika 2. Prikaz mehaničkog sidrenja

Mehanizam difuzije zahtijeva gibanje polimernih lanaca ljepila, a mora biti osigurana kompatibilnost ljepila i materijala koji se lijepi. Na sam proces utječe: vrijeme dodira, temperatura, molekularna masa polimera (ljepila) i stanje polimera (ljepila).



Slika 3. Prikaz difuzije

Čvrstoći lijepljenog spoja doprinose elektrostatičke sile koje se stvaraju zbog razlike u elektronegativnosti između ljepila i materijala. Npr., pri spoju organskog polimera i metala dolazi do prijenosa elektrona iz metala u polimer i do stvaranja tzv. duplog električnog sloja – electrical double layer.

### 2.1.1.3. Kohezija

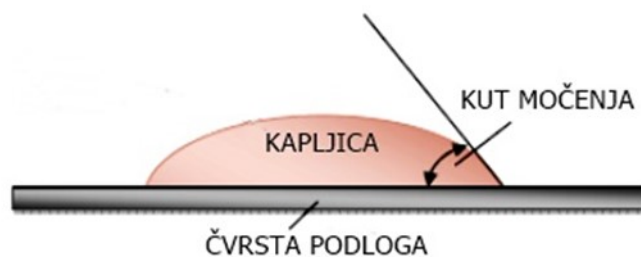
Međuatomsku ili međumolekularnu silu koja djeluje između susjednih čestica neke tvari, tj. silu povezivanja u samom sloju ljepljiva, nazivamo kohezijom te je ona bolja što je tanji i ravnomjerniji nanos ljepljiva.

### 2.1.1.4. Površinska napetost

Površinska napetost je nastojanje kapljevine ili čvrstog tijela da postigne što povoljnije energetske stanje smanjenjem slobodne površine. Molekule koje se nalaze u unutrašnjosti kapljevine ili čvrstog tijela privlače molekule s površine svojim privlačnim silama smanjujući tako broj onih molekula koje ostaju na površini. Oko molekula s površine se stvara dodatni prostor, pa tako postižu veću energiju koja ima glavnu ulogu u tome kolika će biti sposobnost nekog tijela za lijepljenje. Za uspješno lijepljenje, slobodna energija lijepljenog materijala mora biti veća ili jednaka slobodnoj energiji ljepljiva.

### 2.1.1.5. Močenje površine

Sposobnost močenja je potpuni dodir ljepljiva s površinama i prvi uvjet za dobro lijepljenje. Pritom se ostvaruje dodir među molekulama površina i ljepljiva prema maksimalno mogućem broju. Uspješnost se ocjenjuje na temelju kuta močenja prikazanog na slici 4.



Slika 4. Kut močenja

Kad je kut jednak nuli, kapljevina potpuno moči površinu. Ljepilo se nanosi u kapljevitom stanju da bi prodrlo u sve neravnine i pore i u konačnici ostvarilo potpuni dodir s površinama. Toplinske rastezljivosti materijala koji se lijepi i ljepljiva moraju biti približno jednake nuli, a samo ljepilo ne bi smjelo mijenjati svoja svojstva. [4,5]

## 2.2. Ljepila u grafičkoj doradi

### 2.2.1. Škrobno ljepilo

Škrob za proizvodnju ljepljiva se može dobiti od krumpira, pšenice, ječma, raži, kukuruza, pago-palme, riže i korijenja nekih tropskih biljaka. Svježi škrob je bijeli prašak bez mirisa i okusa. Nije prikladan za korištenje zbog velike higroskopnosti. U toploj vodi bubri u sluzavu

masu, a u hladnoj se rastvara. Djelovanjem topline, vode, lužine i kiseline se razgrađuje te se dobije proizvod koji služe kao ljepilo.

### ***2.2.2. Glutaminska ljepila ili tutkala***

Razlikujemo koštano, kožno, riblje i želatinsko ljepilo koje je osnovna ljepljiva tvar glutaminskih bjelančevina. Koštano se dobiva u obliku pločica ili granulata, a nastaje kuhanjem životinjskih kostiju. Kožno je slično koštanome, a izrađuje se od sloja koji se skida sa životinjskih koža tijekom pripreme kože za štavljenje. U usporedbi s ostalima, želatinsko je dosta kvalitetnije i čistije. Za proizvodnju se odabiru najbolji otpaci koža i ostalih dijelova te kosti krupne rogate stoke. Riblje se proizvodi od krupnih kostiju riba i osrednje je kakvoće. U životinjskih kožama, kostima i otpacima se nalazi bjelančevina kolagen, netopljiva u vodi. Dugim zagrijavanjem prelazi u bjelančevinu glutamin koja je topljiva u vrućoj vodi i ima ljepljiva svojstva.

### ***2.2.3. Karboksimetilcelulozno ljepilo***

Zamjenjuje tradicionalno škrobno ljepilo te se rabi za manje površine premaza radi pojačavanja araka, za lijepljenje priloga i kaširanje na stroju. Odlikuje izvrsnom ljepljivosti, elastičnosti, bezbojnosti, bezmirisnosti, postojanosti pri čuvanju i dostupnosti sirovine. Odmjerena količina natrij-karboksimetilceluloze pomiješana sa 1/3 vode se ostavi stajati 24 sata. Za postizanje viskoznosti se dodaje određena količina vode. Postupak se može ubrzati zagrijavanjem uz miješanje (50 - 60°C) i dodavanjem octene kiseline kojom se gubi suvišna alkalnost ljepila.

### ***2.2.4. Sulfitno ljepilo***

Nastaje kad se kemieluloza zbog utjecaja sulfatne kiseline pri kuhanju sulfitne seluloze hidrolizom razdvoji na nusprodukt, tzv. drveni šećer. Njega nalazimo u sulfatnom iscjjetku, prerađuje se vrenjem u etilni alkohol. Tvrdom koncentratu sulfitno-alkoholne patake se doda voda te se zagrijava miješajući nakon čega se masa ostavi preko noći. Sutradan se masi dodaje odmočeno koštano ljepilo kalcij-klorid te se kuha uz dodatak magnezijevih soli još sat i pol na temperaturi od 80°C. Koristi se za sastavljanje cjelopapirnih korica i za lijepljenje korica od različitih imitacija.

### ***2.2.5. Hot-melt ljepila***

Zagrijavaju se pri uporabi na temperaturu između 170 i 190°C (ovisno o proizvođaču i sastavu). Izrađena su od čvrstih tvari koje se zagrijavanjem pretvaraju u tekuće i nisu topiva u vodi. Hot-melt ljepila sadrže tri tvari: osnovni EVA polimer (daje snagu i izdržljivost),



ljepljivu smolu (poboljšava prijanjanje) i vosak (obično parafin koji smanjuje viskoznost). Dodaju se, također, antioksidansi za toplinsku stabilizaciju. Hot-melt ljepila se zagrijavaju neposredno prije primjene što ih čini rastezljivima. Ne sadrže vodu ili otapala i zbog toga ih se može smatrati 100%-tnim krutinama. Hot-melt ljepila su kruta i neelastična te pogodna za projekte koji nemaju teške stranice koje će padati daleko od linije veza nakon dugotrajnog korištenja. Brzo prijanjaju uz podlogu, relativno su jeftina i dovoljno univerzalna da ih se koristi na premazanim i nepremazanim papirima.

#### **2.2.6. Kazeinsko ljepilo**

Izrađuje se rastvaranjem bjelančevine kazeina koju sadrži mlijeko. Čisti je kazein bijeli prašak i u vodi se ne otapa, već samo bubri. Ovaj tip ljepila se izrađuje od kiselinskog kazeina, jer se on lakše otapa i stvara viskozne ljepljive otopine. Za kazeinske otopine je potrebno 25% boraksa, otopine amonijaka, soda, gašeno vapno ili vodeno staklo. Ljepilo je potrebno zaštititi od kvarenja dodacima za konzerviranje.

#### **2.2.7. Vodeno staklo**

Vodeno je staklo zapravo natrij-silikat, vrlo kvalitetno, postojano i jeftino ljepilo. Rabi se u proizvodnji valovitog kartona. Zbog štetnosti za zdravlje, valoviti karton, namijenjen proizvodnji kutija za prehrambene proizvode se ne smije lijepiti ovim ljepljom. [2]

#### **2.2.8. Poliuretanska ljepila**

Poznata su po svojoj izvrsnoj adheziji, fleksibilnosti, niskom temperaturnom učinku, visokoj kohezivnoj čvrstoći i brzinama stvrdnjavanja koja se lako prilagođavaju zahtjevima proizvođača. Glavni su predstavnik termoreaktivnih ljepila u grafičkoj industriji. Imaju svojstvo polimerizacije, tako da formiraju mnogo jače veze od tradicionalnih hot-melt taljivih ljepila od kojih su trenutačno puno skuplji (dva do četiri puta), ali primjena im je znatno niža. Nanošenje se vrši na temperaturi od 120°C do 130°C. Izvrstan su izbor prilikom lijepljenja teških podloga kada je potrebno neposredno prijanjanje, osobito kod vezivanja knjiga, a rezultat je snažna, dugotrajna veza. PUR ljepljive veze nastanu kada kemikalije u ljeplju privuku vlagu iz zraka. Ova kemijska reakcija povećava snagu povlačenja i savijanja knjige. Korištenjem PUR ljepila u uvezivanju povećava se trajnost knjige, stvara se manje bora u hrptu te se dobiva izvrsna kvaliteta ležaja. Prednosti PUR ljepila su otpornost na starenje, visoka elastičnost, izvanredna izdržljivost, čak i na ekstremno niskim temperaturama, mogućnost primjene kod premazanih papira. Nedostaci su osjetljivost na vlagu u zraku, zbog čega se koriste u specijalnim zatvorenim jedinicama za lijepljenje, te vrijeme potrebno za potpuno sušenje lijepljenog spoja. [6,7]

### 2.2.9. PVAc ljepilo

Polivinil acetat emulzije su disperzije hladnog ljepila koje sadrže čvrstu (40 – 80%) i tekuću komponentu. Polimer je vinil-acetata dobiven polimerizacijom monomera u vodi. PVAc emulzije su prilično jeftine i imaju dobru adheziju na mnoge porozne podloge kao što su drvo i papir. Iako se mogu razrijediti vodom, ne smije se zaboraviti kako bilo koja promjena u količini vode značajno mijenja njihovu viskoznost.

Tablica 1. Svojstva PVAc ljepila

| Svojstvo                               | Jedinica               |
|--|------------------------|
| Gustoća                                | 1100 kg/m <sup>3</sup> |
| Viskoznost pri 25°C                    | 10 – 15 Pa·s           |
| pH                                     | 4 – 6                  |
| Veličina čestica                       | od 0,5 do 3 μm         |
| Sadržaj suhe tvari                     | 48 – 51%               |
| Minimalna temperatura nastajanja filma | 2°C                    |
| Temperatura u radnom prostoru          | od 5 do 30°C           |

U grafičkoj industriji koristi se za bešavne uveze te spajanje knjiga s koricama. Nanosi se hladno pri temperaturi od 18 – 25°C, a sušenjem smola prodire duboko u strukturu papira i tako formira čvrstu vezu. Taj spoj može biti reverzibilan (ako se sloj ljepila otapa u vodi) ili ireverzibilan. Prodiranje ljepila ovisi o viskoznosti ljepila, veličini i trajanju pritiska.

Glavne prednosti PVAc ljepila su njegove pristupačne cijene, vrhunske performanse, svestranost, elastičnost filma, otpornost na starenje, povoljan viskozitet, dobra adhezija, mogućnost uporabe pri sobnim temperaturama itd.; a nedostaci su niska otpornost na vodu i dugo vrijeme sušenja. Danas su, ipak, takvi nedostaci eliminirani pomoću posebnih aditiva (plastifikatora, otapala, punila, sredstava za povećanje početne ljepljivosti, sredstava za ugušćivanje itd.).

Zahvaljujući plastifikatorima, sloj PVAc ljepila postaje savitljiviji i mekši, sile adhezije se povećavaju, a sile kohezije smanjuju. Radi se o otapalima visokog vrelišta čije se molekule ugrade u makromolekule, osnovne komponente ljepila (za prirodna ljepila to su često molekule vode, pa nju treba zadržati u sloju ljepila). Njihova uloga je stvaranje filma oko čestica disperzije pri čemu im se povećava udaljenost i smanjuje povezanost. Tako se povećava fleksibilnost filma ljepila i smanjuje minimalna temperatura potrebna za stvaranje filma.

Otapala se dodaju u količinama od 1% do 5% na suhu tvar PVAc ljepila. Djeluju slično kao plastifikatori, ali s privremenim efektom. Otapala koja imaju visoku kompatibilnost s PVAc snižavaju temperaturu potrebnu za stvrdnjavanje filma ljepila, što pospješuje stvaranje homogenog filma. Kako otapalo na kraju u potpunosti ishlapi, ono ne utječe na mehanička svojstva ljepila. Mogu biti organska (metil-acetat, aceton, metanol, benzen, toluen i dr., za ljepila temeljena na plastomerima i elastomerima) ili voda (ljepila za doradu papira). Organska otapala su manje ili više otrovna, često zapaljiva, ponekad i eksplozivna, pa zahtjevaju mnogobrojne mjere pri zaštiti na radu. Uporaba vode kao otapala je poželjna, jeftina i ekološki prihvatljiva. U tehnici lijepljenja razlikujemo homogenu disperziju, tj. koloidne otopine i heterogene disperzije, a to su emulzije i suspenzije za koje je karakterističan mliječni izgled.

Punila su krute neljepljive tvari koje pojeftinjuju ljepilo i poboljšavaju njegovu uporabnu vrijednost. Koriste se fine vlaknaste tvari (npr. drveno i kožno brašno, prašina od vune i dr.). Dodaju se PVAc ljepilu da bi mu se smanjila cijena, povećao sadržaj suhe tvari, viskoznost i gustoća, smanjila penetracija, povećala izdržljivost i poboljšala svojstva filma za popunjavanje pora i pukotina. Anorganska punila se dodaju do 50% na suhu tvar PVAc ljepila, a organska od 5% do 10% jer imaju mnogo veći utjecaj na smanjenje čvrstoće i povećanje viskoznosti ljepila. [8]

### **2.3. Faktori utjecaja na čvrstoću lijepljenog spoja**

Složenost sastavljanja lijepljenog spoja ovisi o vrsti ljepila i materijala dijelova koji se spajaju. Nakon što se ljepilo nanese na prethodno pripremljenu površinu elementi se moraju spojiti i fiksirati na određeno vrijeme.

Na kvalitetu lijepljenog spoja direktno utječu tri osnovna parametra:

- vrijeme,
- tlak (pritisak),
- temperatura.

Vrijeme od nanošenja ljepila do uspostavljanja kontakta među namazanim površinama mora trajati toliko dugo sve dok se njihove pore ili udubljenja ispune ljepilom, a vrijeme održavanja spoja pod tlakom toliko dugo dok ljepilo ne očvrсне. Za svaku vrstu ljepila proizvođač

propisuje vrijeme od nanošenja ljepila do postizanja konačne čvrstoće lijepljenog spoja u kojem se komadi koji se lijepe moraju spojiti. To vrijeme potrebno je kontrolirati jer i male razlike u otvorenom vremenu bitno utječu na čvrstoću lijepljenog spoja. Svaku vrstu ljepila karakterizira tlak pod kojim se postiže homogeni sloj ljepila s optimalnom debljinom. Izbor tlaka ovisi i o kvaliteti površine za lijepljenje. Za tekuća ljepila treba manji tlak.

Temperatura ima bitan utjecaj na kvalitetu lijepljenog spoja jer ljepila mogu očvrnuti na sobnoj temperaturi (hladna ljepila) i na 80 - 200°C (taljiva ili topla ljepila). Prednost taljivih ljepila u odnosu na hladna su veće čvrstoće lijepljenog spoja, ali njihova primjena zbog većih troškova povećava cijenu lijepljenog spoja. [9]

Ovisno o vrsti ljepila i vrsti materijala koji se sljepljuju, na učvršćivanje utječe:

- vrijeme očvršćivanja ljepila - vrijeme od trenutka miješanja komponenti do trenutka potpunog očvršćivanja,
- radno vrijeme - vrijeme tijekom kojeg su pomiješane komponente ljepila još uporabljive i nešto je kraće od vremena očvršćivanja,
- otvoreno vrijeme - vrijeme nanošenja ljepila do stavljanja spoja pod tlak.

Na čvrstoću posebno utječu sljedeći čimbenici: svojstva ljepila, slobodna (površinska) energija, močenje, priprema površine za lijepljenje, konstrukcijsko oblikovanje lijepljenih spojeva, debljina dijelova koji se lijepe, debljina sloja ljepila i veličina površine za lijepljenje. [10]

### ***2.3.1. Svojstva ljepila***

Osim tri osnovna svojstva samog ljepila (vrsta, tip i proizvođač ljepila), na čvrstoću lijepljenog spoja utječu svojstva sloja i odgovarajuće prijanjajuće sile između sloja ljepila i površine lijepljenja.

Optimalna svojstva slojeva ljepila mogu se definirati kao:

- povišena postojanost na puzanje,
- povišena postojanost na upijanje vlage i agresivne medije,
- stvaranje stabilnih i stalnih prijanjajućih sila na površini za lijepljenje,
- visoka kohezijska čvrstoća uz istodobno ograničavanje plastičnih deformacija kao pretpostavka za smanjenje napetosti sloja.

Kombinacijom sloja ljepila i površine lijepljenja stvaraju se odgovarajuće prijanjajuće sile i karakteristike sloja, odlučujuće za čvrstoću lijepljenog spoja. Na svojstva slojeva utječu: modul smičnosti, modul rastezljivosti, puzanje, kristalna struktura i homogenost sloja. Povećani udio kristalne strukture ljepila povisuje čvrstoću i modul rastezljivosti ljepila u očvrstnutom stanju, a smanjuju je nepravilnosti u strukturi kao što su ostaci otapala ili zrak koji dolazi miješanjem dvokomponentnih i višekomponentnih kemijski očvršćujućih ljepila. Na trajnost lijepljenog sloja uvelike ovisi osjetljivost na puzanje. To je vremenski ovisna deformacija viskoelastičnih tvari pri konstantnom opterećenju pri kojoj dolazi do popuštanja nekih veza među molekulama polimera. Značajna razlika u deformacijskim karakteristikama ljepila i podloge proizlazi iz njegovih različitih ovisnosti o temperaturi.

### ***2.3.2. Slobodna (površinska) energija***

Nastojanje tekućine ili čvrstog tijela da postigne što povoljnije energetske stanje kroz težnju za smanjenjem površine predstavlja slobodnu površinsku energiju. To je jedan od razloga zašto se neki materijali dobro, a neki materijali otežano lijepe ili pak nemoguće. Slobodna energija odabranog tipa ljepila mora biti niža ili jednaka slobodnoj energiji materijala koji se lijepe da bi uspješno protekao proces. Zbog visoke vrijednosti slobodne površinske energije, metali pokazuju najbolja svojstva, dok polimerni materijali lošija zbog niske vrijednosti. Površina niskoenergentnih materijala može se podvrgnuti raznim postupcima obrade kao što su kemijski, toplinski i električni postupci kojima se povećava njezina energetska razina.

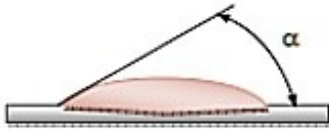
### ***2.3.3. Močenje***

Ljepilo mora u znatnoj mjeri biti sposobno apsorbirati nečistoće s površine kako ne bi došlo do stvaranja slabog graničnog sloja. Također, ne smije tijekom očvršćivanja znatno mijenjati svoj volumen, a toplinska rastezljivost materijala koji se lijepi i ljepila mora biti približno jednaka.

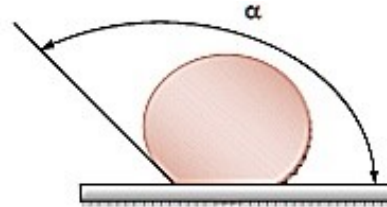
### ***2.3.4. Priprema površine za lijepljenje***

Priprema površine za lijepljenje se radi u svrhu povećanja prijanjajućih sila između površine zalijepljenih dijelova i sloja ljepila. Za to su potrebna aktivna središta na površini na kojima se dobro mogu odvijati fizikalne i kemijske reakcije koje su potrebne za stvaranje prijanjajućih sila. Različitim postupcima pripreme površine povećavaju se važne međumolekulne sile u graničnom sloju između ljepila i površine zalijepljenih dijelova te se površina sloja ljepila dovodi u željeno stanje. Pripremom se poboljšava otpornost lijepljenog spoja na atmosferske promjene, kemijska postojanost kao i otpornost prema različitim vrstama opterećenja. Temeljitim čišćenjem površine postizemo čvršći lijepljeni spoj.

Adhezijske sile se mogu značajno povećati skidanjem neodgovarajućeg površinskog sloja materijala mehaničkom obradom i odmašćivanjem, odnosno stvaranjem novog, aktivnog površinskog sloja kemijskim postupkom. Veći udio nečistoća znači postizanje manje čvrstoće lijepljenog spoja.



Slika 5. Dobro pripremljena površina



Slika 6. Slabo pripremljena površina

### **2.3.5. Debljina dijelova koji se lijepe**

Povećanjem debljine dijelova koji se lijepe povećava se krutost i savojni moment. Povećanje debljine dijelova pri konstantnim debljinama sloja ljepila utječe i na povećanje čvrstoće lijepljenih spojeva.

### **2.3.6. Veličina površine lijepljenja**

Što ima više adhezijskih veza, tim je veća čvrstoća lijepljenog spoja. Što je veća površina na koju se nanosi ljepilo, to ima više adhezijskih veza. Pritom zaključujemo da je za najveću čvrstoću spoja potrebna što veća površina prijanjanja ljepila koja se postiže pravilnim ohrapljivanjem površine. Međutim, prekomjerno povećanje može nepovoljno utjecati na čvrstoću zbog smanjenja ravnomjernosti sloja ljepila pri nanošenju, prilagođavanja dijelova zbog mogućih geometrijskih odstupanja i ravnomjernosti očvršćivanja ljepila zbog različite razdiobe temperature i neravnomjernog tlaka. Zbog tih utjecaja mora se kod većih lijepljenih površina računati s manjom čvrstoćom lijepljenja nego kod manjih lijepljenih površina.

### **2.3.7. Priprema, miješanje i nanošenje ljepila**

Prije uporabe, ljepila se moraju dobro pripremiti. Kod proizvodnje i ponašanja pri lijepljenju veliku ulogu imaju reološka svojstva pomoću kojih je moguće odrediti sposobnost ljepila da se u ovisnosti o vremenu ravnomjerno raspoređi po površini.

Nanošenje ljepila je ovisno o geometriji dijelova za lijepljenje, viskoznosti ljepila i stupnju automatizacije proizvodnog procesa. Načini nanošenja su: prskanje, umakanje, nanošenje valjkom, lijevanje, nanošenje kistom, nanošenje lopaticom, mazanje, pečačenje, topljenje, polaganje i umetanje. Viskoznost opisuje veličinu otpora prema tečnosti ljepila i najvažniji je kriterij za sposobnost kvašenja. Važna je radi postizanja ravnomjerne debljine ljepila i

kontinuiteta nanesenog sloja. Ukoliko je premala, dodaju se sredstva za zgušnjavanje, a ako je previsoka, dodaju se odgovarajuća otapala da bi se viskoznost smanjila. Prije samog nanošenja, ljepila se moraju miješati da bi se postigla promjena fizikalnih svojstava (dodavanjem punila i otapala) i kemijska reakcija očvršćivanja. [10]

Ručno nanošenje ljepila kistom ili četkom, jedan je od najstarijih načina nanošenja ljepila. Njegova prednost je u mogućnosti dobrog utrljavanja i dobrog prijanjanja ljepila, niski su troškovi investiranja i nije potrebna kvalificirana radna snaga. Nanošenje valjkom se rijetko primjenjuje zbog lošeg utrljavanja ljepila u podlogu. Nedostatak ove metode je nejednoličnost debljine nanesenog sloja. [3]

### **2.3.8. Debljina sloja ljepila**

Za veću čvrstoću spoja, bitno je nanijeti optimalnu količinu ljepila na površinu (0,1 - 0,3 mm). Ako debljina sloja naraste za 1 mm, čvrstoća će pasti za 40% prethodne vrijednosti.

Faktori koji utječu na čvrstoću lijepljenog spoja, a temelje se na debljini sloja ljepila, su:

- pojava nehomogenosti,
- utjecaj različitih debljina ljepila unutar lijepljenog spoja što se može pojaviti kod dijelova koji se lijepe, a nisu postavljeni međusobno paralelno ili kad se lijepe ravni i okrugli dijelovi,
- savojni moment koji se povećava sa sve debljim slojem ljepila kod jednostrukih preklopnih lijepljenih spojeva zbog povećane ekscentričnosti pri opterećenju,
- odnos među područjima u kojima djeluju adhezijske i kohezijske sile,
- kod tanjih slojeva ljepila sprječavaju se poprečne kontrakcije sloja ljepila. [10]

## 2.4. Svojstva i građa papira

Svojstva papira, s obzirom na namjenu, dijele se na: opća svojstva, svojstva površine, svojstva lista, mehanička svojstva, optička svojstva itd.

### 2.4.1. Opća svojstva

#### 2.4.1.1. Debljina papira

Debljina papira je udaljenost između dvaju paralelnih površina jednog lista papira. Izražava se u milimetrima s preciznošću od 0,001 mm (T 411). Njezinim povećanjem povećava se fizikalni kontakt površine vlakana s ljepilom što utječe i na povećanje čvrstoće lijepljenog spoja.

#### 2.4.1.2. Gramatura ili površinska masa

Gramatura je masa 1 m<sup>2</sup> papira, izražena u gramima. Papiri veće gramature imaju izravan utjecaj na povećanje čvrstoće adhezijske veze, dok papiri manje gramature pokazuju veća savijanja hrpta knjižnog bloka stvaranjem ureza nepravilnog oblika bez učestalosti njihova pojavljivanja po jedinici duljine.

#### 2.4.1.3. Prostorna masa ili gustoća papira

Odnos između debljine papira i gramature, odnosno volumen 1g papira izraženog u 1 cm<sup>3</sup> čini gustoću papira. Papiri mogu imati jednostruki, jedno i po struki ili dvostruki volumen. Istraživanja pokazuju da papir većeg volumena povećava rezultate čvrstoće slijepljenog spoja.

#### 2.4.1.4. Uzdužni i poprečni smjer

Smjerovi vlakana papira pokazuju različita svojstva koja se posebno očituju u mehaničkim svojstvima kao što su: otpornost prema kidanju papira, otpornost prema savijanju (veće u uzdužnom smjeru), otpornost prema različitoj promjeni dimenzija lista uslijed promjene vlažnosti i istežljivosti papira (veća u poprečnom smjeru). Uzdužni smjer je smjer puta kojim papirna traka teče na papir stroju, a njemu okomiti je poprečni smjer. Prilikom izrade knjiga, da bi uvez bio čvršći i stabilniji, važno je da smjer izrade papirne trake teče paralelno s hrptom knjige (s linijom uvezivanja knjige). Ako je tok vlakana okomit na hrbat knjige, listovi neće padati jedan preko drugog, nego će „stršati“ kad se knjiga otvori, a korice će se savinuti i odizati od vanjskog ruba knjige. Najjednostavnija metoda za određivanje smjera vlakana se izvodi tako da se izrežu dvije trake širine 1 do 2 centimetara, dužine oko 20 cm u oba smjera iz jednog arka. Nakon toga se trake sastave na donjem kraju, dok se gornji kraj pusti da se uslijed težine provjesi. Traka rezana u poprečnom smjeru se jače provjesi. Uslijed



jednostranog vlaženja papir će se sam uviti tako da je osa savijanja paralelna uzdužnoj osi. Razlog je različito bubrenje, tj. vlakna mnogo više bubre u poprečnom smjeru.

#### *2.4.1.5. Putena i sitena strana lista ili dvostranost*

Dvostranost dolazi do izražaja u glatkosti, bjelini i upojnosti papira. Sitena strana uslijed tkanja sita koje je utisnuto u list se označava kao hrapavo ravna, a gornja ili putena strana je glatko neravna. Ove razlike su vidljive gotovo u svakom strojno glatkom papiru. Djelomično se mogu smanjiti satiniranjem. Bolje otiske dobivamo na gornjoj strani koja se odlikuje glatkošću i jednolikošću površine. Sitena strana ima veću upojnost i manje naginje prašenju. U visoko satiniranim i premazanim papirima često je teško uočiti dvostranost, pa se papir podvrgava vlaženju ili kvašenju vrućom razrijeđenom otopinom NaOH ili toplom otopinom nekog sredstva za kvašenje pri čemu dolazi do snažnog bubrenja vlakana. Naravni papiri s velikim sadržajem punila ili papiri s optičnim bjelilima imaju veću stupanj bjeline na gornjoj strani, jer su pigmenti prilikom formiranja papirnog lista jače isprani na sitenoj strani.

#### *2.4.1.6. Vlaga u papiru*

Količina vlage u papiru je ovisna o načinu obrade vlakana, dodacima, naknadnoj obradi, oplemenjivanju i skladištenju papira. Papir je inače vrlo higroskopan materijal, kao i sve biljne vlaknaste sirovine, te izmjenjuje vodu sa zrakom koji ga okružuje. Previsok ili prenizak sadržaj vlage nepovoljno se odražava na: gramaturu, mehaničku otpornost, postojanost, dimenzionalnu stabilnost, električna svojstva, mašinsko glačanje, premazivanje, impregnaciju, tisak. Razlikujemo relativni i apsolutni sadržaj vlage. Apsolutni sadržaj vlage je važan za proizvođače i prerađivače papira. Vlažan se papir lakše žlijebi, savija i pregiba, a za proces tiska nije od velike važnosti jer ne postoji direktna veza između njega i relativne vlažnosti zraka u snopu listova papira. Za tiskara je važno znati informaciju jesu li isporučeni ili iz skladišta dopremljeni papiri u ravnoteži s ravnotežnom vlažnošću zraka u tiskari. Zato se u grafičkim poduzećima pretežito mjeri relativna vlažnost zraka u snopu papira, a rjeđe apsolutni sadržaj vlage u papiru. Relativna ili ravnotežna vlažnost je omjer količine vodene pare koja se nalazi u  $1\text{m}^3$  zraka i one maksimalne količine koju bi isti volumen zraka pri istoj temperaturi mogao primiti. Relativna vlažnost je usko vezana za promjene temperature i mjeri se u postocima. Raste s padom, a pada s porastom temperature.

Bitno je odabrati razinu RV koju treba održavati jer se gubitkom vode papir fizički steže i smanjuje, odnosno dolazi do sušenja i postaje krt. Taj gubitak vode je trajan. S druge strane, previsoka RV potiče i ubrzanje kemijske reakcije, uzrokuje neravnine, nabiranje i bubrenje

papira. Oscilirajuća RV uzrokuje stres materijala zbog stalnih stezanja i rastezanja. Srednja mjera treba biti između 40 - 50% RVZ. [11,12]

#### ***2.4.2. Svojstva površine papira***

##### *2.4.2.1. Glatkost*

Svojstvo približavanja površine papira idealnoj ravnini opisuje glatkost, dok je hrapavost devijacija od idealne ravnine. Glatkost za tisak se očituje pod određenim pritiskom do kojeg dolazi prilikom tiska. Za kvalitetnu reprodukciju je važna i mekoća. Za tisak je pogodniji papir manje gladak, ali mekan. Hrapavost površine ima izravan utjecaj na povećanje čvrstoće slijepljenog spoja. Njezinim se povećanjem povećava i dodirna površina s lijepilom te je slijepljeni spoj čvršći.

##### *2.4.2.2. Prašenje papira*

Prašenje papira nastaje oslobađanjem sitnih čestica s površine papira tijekom njihove prerade. Do prašenja dolazi zbog prekratkih i nedovoljno isprepletenih vlakana, čestica punila koje nisu dovoljno vezane za sam list, nestručnog rada na papir stroju ili nestručno obrezanog papir. Prašina se najviše nakuplja na rubovima lista i jako smeta u tisku, jer smanjuje kvalitetu otisaka, ali i kvalitetu slijepljenog spoja. Stoga se u bešavnom uvezu knjiga, prilikom obrade hrpta knjižnog bloka, posebnim četkama i usisavačima odvodi papirna prašina iz pukotina papira pri čemu se povećava hrapavost površine papira i dodirna površina s ljepilom što rezultira povećanjem čvrstoće slijepljenog spoja.

##### *2.4.2.3. Čupanje papira*

Oštećenje površine papira tijekom procesa tiska samim procesom tiska uzrokuje čupanje papira. Pojavljuje se na crti razdvajanja papira od tiskovne forme ili gumene navlake ofsetnog valjka i ploče. Nastaje kao posljedica djelovanja sila između tiskarske boje i površine papira. To međudjelovanje je izraženije porastom viskoznosti boje i brzine tiska. Postanu li djelujuće sile prevelike, doći će do oštećenja površine tiskarske podloge, odnosno čupanja papira. [11]

#### ***2.4.3. Svojstva lista papira***

##### *2.4.3.1. Upojnost*

Upojnost je svojstvo prodiranja tekućine u papir kroz šupljine. Povećavamo je dodatkom drvenjače, punila i posnim mljevenjem, a veća je što je veći broj šupljina. Izrađeni papiri ne smiju se satinirati. Radi smanjenja upojnosti, za izradu papira treba uzeti celulozna vlakna, što manje punila, masno mljevenje, a izrađeni papir u ovom slučaju treba satinirati. Razlikujemo površinsku upojnost ili upojnost okomitu na ravninu lista i kapilarnu ili upojnost

paralelnu s ravninom lista. Vezano za svojstvo lijepljenja, veća će upojnost omogućiti lakše prodiranje taljivog ljepila u strukturu papira čime se povećava čvrstoća slijepljenog spoja. Taljivo hot-melt ljepilo pridonosi brzom postizanju slijepljenog spoja određene jakosti, a što se ne može postići primjenom PVAc i PUR ljepila.

#### *2.4.3.2. Dimenzionalna stabilnost*

Papir je vrlo higroskopan materijal, stoga su vlakna sklona tome da na sebe navuku vlagu iz okoline. Pod utjecajem vlage, vlakna u papiru bubre povećavajući svoj promjer i do 30%, dok je izduženje vlakana znatno manje. To svojstvo ovisi o vrsti i obradi vlaknastih sirovina, proizvodnim dodacima, površinskoj obradi i oplemenjivanju papirnih tvorevina.

#### *2.4.3.3. Keljenost i stupanj keljenja*

Keljenost je svojstvo pod kojim se zatvaraju cjevčice vlakana u papiru i sama površina lista papira te papir poprima hidrofoban karakter čime se poboljšava kvaliteta otiskivanja. Upojnost papira se smanjuje pri povećanju stupnjeva keljenja. Budući da se keljenjem smanjuje površinska upojnost i poroznost papira, taljivo ljepilo (koje se koristi u bešavnom uvezu knjige) teže prodire u strukturu papira što ima za posljedicu smanjenje čvrstoće slijepljenog spoja. [11]

#### **2.4.4. Mehanička svojstva**

Na mehanička svojstva prvenstveno utječu korištene sirovine te mnogi postupci vezani za izradu lista. Ti su utjecaji uvjetovani vlaknastim materijalom i sastavom te tehnološkim procesom proizvodnje papira (vrsta i dužina vlakna, isprepletanje u listu, mehanička obrada mljevenjem, odnos dužine i promjera, gipkost, elastičnost, stlačenost lista, ravnomjernost različitih sirovinskih udjela, količine nevlaknastih dodataka, primjena proizvodne temperature u oblikovanju i obradi papirne trake na papir stroju itd.). Sva svojstva su ovisna o klimatskim uvjetima kao što su relativna vlažnost zraka i temperatura.

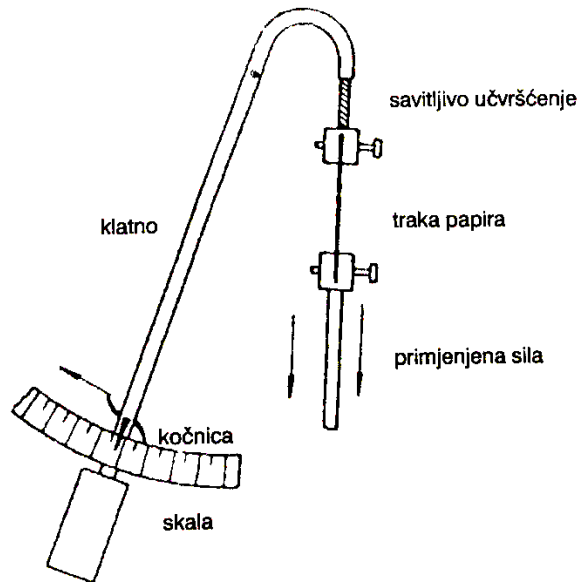
#### *2.4.4.1. Otpornost prema cijepanju*

Svojstvo koje najviše ovisi o dužini vlakana i elastičnosti papirne tvorevine. Jedna od najpoznatijih metoda je mjerenje po Elmendorfu koje se zasniva na primjeni potrebne sile za daljnje cijepanje već zarezanih uzoraka u kupu papira, najviše do 16 listova. Naročito je važno za premazane, transparentne, crtaće, toaletne i omotne papire.

#### *2.4.4.2. Otpornost prema rastezanju i kidanju*

Ovom svojstvu se pridružuje i pojam prekidne dužine odnosno dužine papirne trake, ravnomjerne širine i debljine, koja bi se zbog svoje težine prekinula u objesištu. Ispitivanja

se vrše na kidalici na klimatiziranim uzorcima u obliku traka dimenzija 15 x 180 mm, izrezanih s uzdužnim i poprečnim smjerom vlakana. Rastezanjem se papir izdužuje djelovanjem vučne sile sve do trenutka kidanja trake. Veću dužinu i manje izduživanje imaju uzorci s uzdužnim smjerom vlakana. Produženje se izražava u postotcima, a dužina kidanja u metrima.



Slika 7. Princip rada uređaja za određivanje otpornosti prema kidanju i prekidnom rastezanju [8]

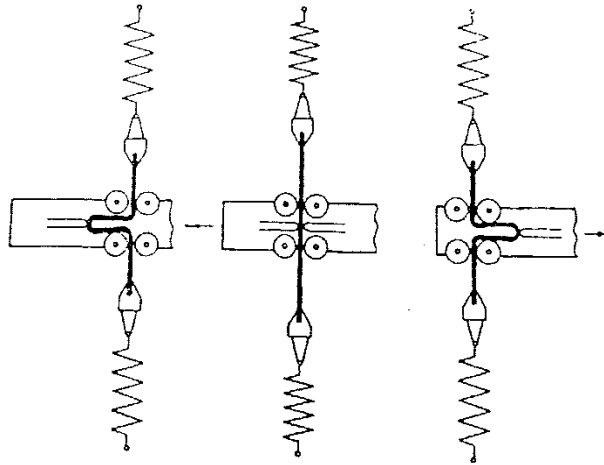
#### 2.4.4.3. Otpornost prema tlaku (prskanju ili pucanju)

Predstavlja otpor što ga papir pruža pritisku koji djeluje okomito na njegovu površinu i ovisan je o gramaturi uzorka. Ispitivanje se vrši na napetom papiru iznad definiranog kružnog otvora određivanjem pritiska kojim će se prouzročiti prskanje, odnosno pucanje na istom mjestu. Istovremeno se mjeri i visina ispuščenja uzorka u trenutku pucanja. Uređaji za mjerenje rade na principu pneumatskog, hidrauličkog ili mehaničkog djelovanja.

#### 2.4.4.4. Otpornost prema savijanju

Očituje se prilikom višekratnog savijanja papira na istom mjestu, a da se papir ne prelomi. Otporu pridonosi dužina vlakana, elastičnost i sile njihovog vezivanja u papiru. Otpornost raste povećanjem apsolutne vlage u papiru i relativne vlažnosti koja kod ovog ispitivanja ima mnogo veći utjecaj pri klimatiziranju nego kod ostalih mehaničkih ispitivanja. Mjerenja se vrše na napetim papirnim trakama. Ugrađeni brojač registrira učinjeni broj dvostrukih savijanja uzoraka poprečnog i uzdužnog smjera vlakana, pa se i rezultati izvode za prosječni

ili posebni za svaki smjer. Otpornost je veća u uzdužnom smjeru, kao i kod papira većih gramatura. [11]



Slika 8. Princip rada uređaja za određivanje otpornosti prema savijanju [8]

#### 2.4.5. Optička svojstva papira

Optička svojstva su bjelina, ton boje, opacitet ili neprozirnost, transparentnost ili prozirnost, sjaj, fluorescentnost i postojanost prema svjetlu. Navedena svojstva može jako dobro ocijeniti oko stručnjaka, no potreba za što većom preciznošću je razvila razne metode ispitivanja i odgovarajuće optičke instrumente. [11]

### 2.5. Ispitivanje čvrstoće lijepljenog spoja

Čvrstoća lijepljenih spojeva ovisi o brojnim čimbenicima koje smo ranije opisali; o svojstvima ljepila (adhezijska i kohezijska čvrstoća), svojstvima materijala koji se lijepe (slobodna površinska energija, površinska hrapavost, čistoća površina, mehanička svojstva), o postupku i tijeku lijepljenja (tlak, temperatura, vrijeme, vlaga itd.), oblikovanju lijepljenog spoja (debljini sloja ljepila, debljini podloge, vrsti i dimenzija spoja) i uvjetima opterećenja (vrsta opterećenja – statičko, dinamičko, način opterećenja, vrijeme opterećenja, temperatura, itd.), stoga je važno provesti određena ispitivanja kojima je moguće utvrditi mogućnost njihove primjene. [13] Neke su veze oblikovane tako da se ne koriste (npr. građevinski materijali), neki da omogućuju odvajanje u normalnoj upotrebi (npr. poklopac folije), a drugi su dizajnirani da se ponovno zatvaraju (npr. traka za vrećicu koja se može zatvoriti).

Mnogi standardizirani testovi su razvijeni za mjerenje svojstava učinkovitosti lijepljenog spoja. Ti testovi uključuju ispitivanje čvrstoće smicanja, ljuštenja, otpornosti na udar,

prijanjanje, toplinu i otpornost na vlagu te praktički bilo koji drugi skup uvjeta okoline ili vrsta stresa koji može djelovati na lijepljeni spoj dok je u uporabi. Ove metode ispitivanja dobro su dokumentirane i od strane različitih organizacija za ispitivanje. Ispitivanja lijepljivih spojeva korisni su samo ako se mogu reproducirati. Također je važno da se rezultati mogu reproducirati s vremenom i različitim ispitnim osobljem. Točnost i reproducibilnost rezultata ispitivanja ovisi o uvjetima pod kojima se provodi proces vezivanja. Ukoliko nije drukčije navedeno, standardni uvjeti se kontroliraju na  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  i  $50 \pm 4\%$  relativne vlage najmanje 24 sata prije i tijekom ispitivanja. Pojedinačni standard obično opisuje broj potrebnih uzoraka zajedno s ostalim pojedinostima u vezi postupka ispitivanja i načinom izvještavanja o rezultatima. [14]

### ***2.5.1. Adhezijski testovi***

Adhezijski testovi se provode iz razloga što se ne mogu pouzdano predvidjeti karakteristike lijepljenog spoja temeljene isključivo na parametrima ljepila, podloge i dizajna spoja. Izvedba adhezivne veze često je promjenjiva i ovisi o konzistenciji materijala i postupaka koji se koriste. Važno je da ispitivanje i rezultati ispitivanja predstavljaju sredstvo komunikacije između proizvođača ljepila i krajnjeg korisnika.

Postoje dvije kategorije općih testova:

- > ispitivanja temeljnih svojstava,
- > ispitivanja krajnje uporabe.

Testovi za završnu uporabu, kao što su ljuštenje i smicanje, relativno su jednostavni, ali potrebno je iskustvo da se utvrdi ispravnost postupaka ispitivanja i procijeni pouzdanost dobivenih podataka kako bi se interpretirali rezultati i primijenili na praktičnu primjenu. Određivanje temeljnih svojstva, kao što je viskoznost, tvrdoća ili brzina lijepljenja, obično je jednostavnije i reproducibilnije od ispitivanja krajnje uporabe. Međutim, međusobna povezanost tih dvaju kategorija često je teška. Testovi temeljnih svojstava obično se upotrebljavaju za procjenu dosljednosti ulaznog ljepila ili supstrata nakon potvrđivanja postupka vezanja kao prikladnog za određenu primjenu. Nažalost, postupak se često obavlja tek nakon neuspjeha ili neobjašnjivih pojava. Zato je važno testiranje radi utvrđivanja je li možda promjena dolaznog materijala mogući krivac. Vrlo je važno da se u bilo kojem programu testiranja postupci standardiziraju i široko primjenjuju na različite vrste dobavljača i krajnjih korisnika. Testovi koji se izvode na različitim mjestima i s različitim osobljem

trebaju biti identični. Postoji niz organizacija koje su razvile standardne metode ispitivanja ljepila, pa danas imamo oko 900 međunarodnih standarda (ASTM, ISO, FINAT, itd.). Neki od najpoznatijih su prikazani u tablici 2. Koriste se u svim sektorima industrije ljepila i brtvila.

Tablica 2. Međunarodne organizacije standarda uključene u ljepilo i brtvilo [14]

| Regija        | Izdavač                                 | Standard     |
|---------------|---|--------------|
| United States | American Institute of Testing Materials | ASTM D1002   |
| Australia     | Australian Standards                    | AS 2990      |
| UK            | British Standards Institute             | BS 3924      |
| Canada        | Canadian Standards Board                | CGSB 25.14   |
| Germany       | Deutsche Institut für Normung           | EN 60454     |
| Japan         | Japanese Industrial Standards           | JIS Z9900    |
| Switzerland   | International Standard Organization     | ISO 9653     |
| Netherlands   | Netherlands Normalisatie Instituut      | NEN 10244-7  |
| France        | Norme Française (AF-NOR)                | NF T76.103   |
| Norway        | Norges Standardiseringsforbund          | NS 4828      |
| Sweden        | Standariserings-Kommissionen i Sverige  | SEN 01 03 45 |

U Sjedinjenim Američkim Državama standardi ASTM (American Society of Testing Materials) najčešće se odnose na ispitne metode. Međutim, druge su standardne organizacije popularne u pojedinim dijelovima svijeta. Međunarodna Organizacija za Standarde (ISO) pokušava spojiti pojedine regionalne standarde u standarde koji se mogu koristiti globalno. Temeljni testovi se mogu koristiti za praćenje dosljednosti dolaznih proizvoda koji se koriste u postupku lijepljenja ili brtvljenja. Ovi testovi također određuju svojstva materijala u zasebnom obliku, a ne u spoju ljepila. Uobičajeno se primjenjuju testovi materijalnih svojstava kako bi se utvrdila konzistentnost proizvoda koji dolaze u kontakt s ljepilom. Tablica 3. navodi neke od odabranih ASTM testnih standarda koji se koriste u tu svrhu. Najčešće korišteni testovi temeljnih svojstava mjere viskoznost, točku omekšavanja, sadržaj krute tvari, sadržaj punila, specifičnu težinu i boju. Tablica, također identificira nekoliko radnih karakteristika standarda koje je razvio ASTM. Najčešće korišteni su rok trajanja, radni vijek i stopa sušenja. Ovi testovi su izravna mjerenja reaktivnosti ljepila ili brtvila u različitim fazama tijekom procesa vezivanja. Oni pružaju važne informacije krajnjem korisniku glede vremenskih ograničenja potrebnih za skladištenje, primjenu i sušenje ljepila ili brtvila.

Tablica 3. *Neki ASTM standardi za ljepilo* [14]

| ASTM oznaka | Metoda testiranja  | Opis  |
|-------------|--|---|
| ASTM D1337  | Skladištenje ljepila konzistentnošću i čvrstoćom vezivanja | Mjeri praktični rok trajanja viskoznosti ili čvrstoće veze.   |
| ASTM D1917  | Penetracija ljepila  | Ispitivanje penetracije tekućih ljepila u porozne podloge. Općenito se primjenjuje na papir.                        |
| ASTM D1084  | Viskoznost ljepila   | Mjerenje viskoznosti slobodnih ljepila raznim metodama (šalica i viskozimetar).                                     |
| ASTM D1489  | Nenasilan sadržaj vodenih ljepila                          | Određivanje neotpornog sadržaja na vodenim ljepilima. Uglavnom dekstrin, škrob, kazein i ljepila na bazi životinja. |
| ASTM D1002  | Smična čvrstoća lijepljenog spoja                          | Mjeri najvišu čvrstoću kada se lijepljivi spojevi ispituju u obliku vlačne smične konfiguracije.                    |
| ASTM D1876  | T-peel čvrstoća lijepljivog spoja                          | Mjeri čvrstoću ljuštenja ljepila dok se podloge odvajaju kako bi oblikovali geometriju "T".                         |

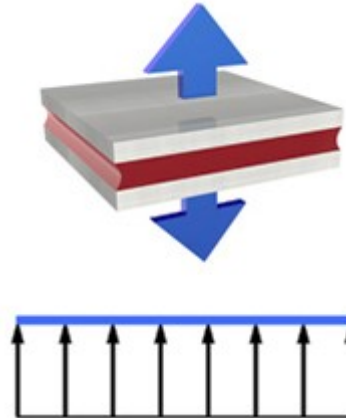
ASTM i ostale standardne metode ispitivanja su izvrsni testovi koji nude relativne usporedbe ljepila i/ili uvjeta vezivanja. Dobro su definirane i stoga se mogu dobro kontrolirati. Oni također nude vrijednu polaznu točku za procjenu ljepila. Međutim, nekad postoje i drugi načini za dobivanje informacija za predviđanje izvedbe stvarnog lijepljenog spoja u proizvodnji. Radi se o nestandardnim testovima koji naglašavaju dio u modusu koji je više indikativan za njegovu opterećenost ili stvaraju stvarne prototipne uzorke s ljepilima i uvjetima vezivanja koji se namjeravaju koristiti u proizvodnji. Ti prototipni primjerci su tada podvrgnuti simuliranim servisnim okruženjima. Ove "nestandardne" metode ispitivanja trebaju biti kontrolirane tako da su testovi ponovljivi i da je varijabilnost niska. Među očiglednim varijablama koje treba kontrolirati su površinska čišćenja i drugi postupci pripreme, metoda i opseg miješanja materijala, način primjene, stvrdnjavanje i dr. [14] Relativno velik broj ispitivanja je predložen i formaliziran za evoluiranje jačine ljepila. Iako postoji više kategorija, većina dugogodišnjih testova čvrstoće lijepljenih spojeva sadrži sljedeća tri: vlačna (tensile) ispitivanja, smična (shear) ispitivanja i ispitivanja ljuštenjem (peel). [15]

#### 2.5.1.1. Test kidanja ili istezanja (tensile test)

Test kidanja ili istezanja služi za određivanje otpornosti lijepljenog spoja prema kidanju (prekidna sila) i prekidnom rastezanju. Vrijednosti se očitavaju na uređaju kidalici. Ostale veličine, kao što su prekidna jakost papira i indeks kidanja, iz izmjerenih vrijednosti se određuju računski. Uzorci za ispitivanje se pričvršćuju na dvije hvataljke kidalice koje se uključivanjem uređaja počinju udaljavati jedna od druge sve do momenta kidanja ispitivanog uzorka. Kidalice registrira silu na vlak potrebnu da dođe do kidanja ili istezanja lijepljenog



spoja. Ta sila se naziva prekidna sila i izražava se u kp (kilopondima) ili N. Prekidna sila djeluje na uzorak jednodimenzionalno. [16]



Slika 9. Smjer djelovanja sila na uzorak podvrgnut testu istezanja

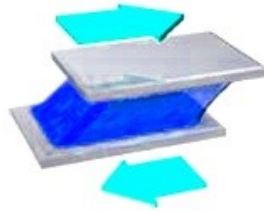
<http://www.energetika-net.com/specijali/izdvajamo/r-evolucija-spajanja-dijelova-13806>

ASTM D897 opisuje jednu od metoda ispitivanja koja određuje komparativna svojstva istezanja ljepljivih veza kada se ispituje na standardnim uvjetima uzoraka i pod definiranim uvjetima predobrade, temperature i brzine stroja. Najčešće je korišten standard za određivanje vlačne čvrstoće metal-metal ljepljivih veza. Rezultati ispitivanja čvrstoće lijepljenja vrlo su ovisni o načinu obavljanja vezivanja, kao i o uvjetima okoline ispitivanja. Za najbolje rezultate treba obratiti posebnu pozornost proizvođačevim preporukama za pripremu površine, miješanje ljepila, stvarni postupak lijepljenja, vrijeme stvrdnjavanja i kondicioniranje. [17]

#### 2.5.1.2. Test smicanja (*shear test*)

Testom smicanja se ispituje djelovanje smičnih sila na uzorak lijepljenog spoja, tako da dolazi do kliznog popuštanja duž ravnine koja je paralelna s primijenjenim silama. Svrha ispitivanja je određivanje čvrstoće smicanja koju materijal može izdržati prije samog popuštanja. Smične sile uzrokuju da se jedna površina materijala pomiče u jednom, a druga u suprotnom smjeru, tako da materijal bude podvrgnut klizanju. Primijenjene sile su paralelne s dvije kontaktne površine, za razliku od kidanja i kompresijskih ispitivanja gdje su su okomite. Tri su materijala obično testirana u smicanju: krute površine, ljepila i slojevite površine. Krute podloge mogu se sastojati od metala, plastike, keramike, kompozita ili drva, ali obično dolaze u čvrstom obliku i koriste se kao građevni materijali ili pričvršćivači. Ljepila se upotrebljavaju za spajanje dvaju materijala i doživljavaju smično naprezanje kada se materijali izvlače u suprotnim smjerovima u pokušaju da ih razmaknu. Slojeviti kompoziti

doživljavaju smično naprezanje na sličan način kao i ljepila, samo što su sile smicanja nanese na ljepilo ili laminat koji se koristi za držanje slojeva zajedno. [18]



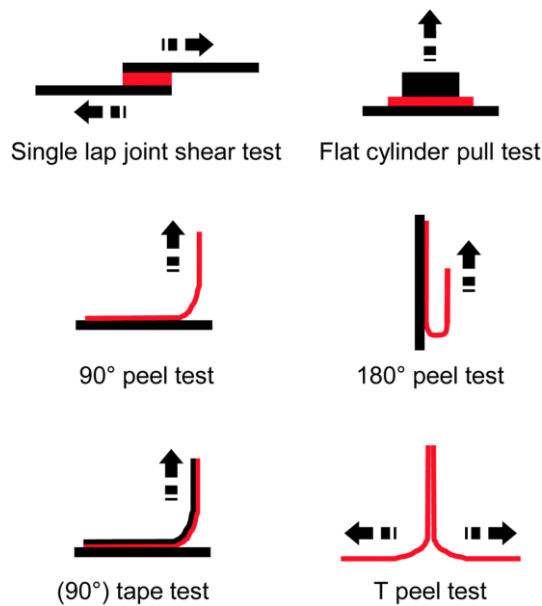
Slika 10. Smjer djelovanja sila na uzorak podvrgnut testu smicanja  
<http://www.testresources.net/applications/test-types/shear-test/>

Pripreme uzoraka i metoda ispitivanja opisane su u potpunosti u ASTM D1002 - 01. Shear testovi su vrlo česti jer su uzorci jednostavni za konstruiranje. Kao i kod ispitivanja vlačne čvrstoće, raspodjela naprezanja nije jednolična te maksimalno naprezanje na veznoj liniji može biti znatno veće od prosječnog. Stres u ljepilu se može također razlikovati od čistog smicanja. O čimbenicima, kao što su debljina ljepila i čvrstoća prijanjanja, ovisi neuspjeh ljepljivog "smičnog" spoja. [19]

#### 2.5.1.3. Test ljuštenja (*peel test*)

Testom ljuštenja ispitivamo adhezijsku čvrstoću materijala, odnosno čvrstoću veze između dvaju materijala spojenih ljepilom. Izmjerena vrijednost se može koristiti za procjenu je li adhezivna veza dovoljno jaka ili prejaka za primjenu i hoće li biti potreban drugi proces lijepljenja. Najčešći tipovi testova ljuštenja za mjerenje čvrstoće ljepila su T-peel, 90° peel i 180° peel.

T-peel test je vrsta vlačnog ispitivanja koje se provodi na dva fleksibilna supstrata vezana zajedno i smještena među hvataljke na kidalici. Dok se jedan spušta, drugi se drži, tako da se vezana površina spušta vodoravno, a uzorak oblikuje slovo "T". Za razliku od testiranja od 180° i 90°, postupak T-peel je najlakši test za postavljanje i ispitivanje. Uobičajeno se test ljuštenja koristi za mjerenje jačine lijepljenog spoja između dva fleksibilna supstrata ili fleksibilnog i krutog supstrata. Fleksibilni supstrat često se sastoji od trake, filma, tankih plastičnih materijala, gume ili drugih polimera, dok je kruta podloga obično metal, plastika i sl. Uvjeti pod kojima se ti materijali ispituju sastoje se od različitih kombinacija predobrade, temperature i brzine ispitivanja, ovisno o standardnoj metodi koja se koristi za vođenje postupka ispitivanja. [20]



Slika 11. Smjer djelovanja sila na uzorak podvrgnut testu ljuštenja  
<http://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2016/CS/C5CS00477B>

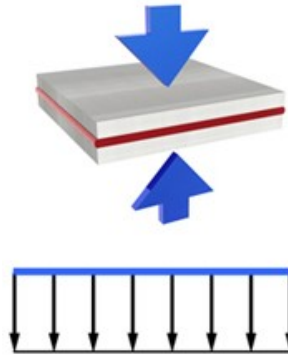
Najčešća metoda za mjerenje čvrstoće ljuštenja je ASTM D1876. Namjenjena je prvenstveno za određivanje relativne otpornosti na ljuštenje ljepljivih veza između fleksibilnih pričvršćenja T-tipa pomoću stroja za ispitivanje napetosti. [21]

#### 2.5.1.4. Test kompresije

Testom kompresije se ispituje ponašanje, odnosno čvrstoća materijala ili lijepljenog spoja pod velikim opterećenjem pri čemu se uzorak podvrgava povećanju tlačnih i smanjenju vlačnih sila sve dok ne dođe do popuštanja. Ovo ispitivanje je suprotno od ispitivanja istezanja s obzirom na smjer djelovanja sila. Ispitni uzorak se općenito smješta između dvije ploče koje raspoređuju opterećenje po cijeloj površini dvaju suprotnih lica ispitnog uzorka, a zatim se ploče guraju univerzalnim strojem za ispitivanje koji uzrokuje da se uzorak poravna. Komprimirani uzorak obično se skraćuje u smjeru primijenjenih sila i širi okomito na primjenjene sile.

Testovi kompresije rezultiraju mehaničkim svojstvima koja uključuju naprezanje, deformaciju i pritisak. Dobiveni izračuni se prikazuju kao dijagrami tlačnih naprezanja koji se koriste za određivanje elastične granice, proporcionalne granice, granične vrijednosti, otpornosti i, za neke materijale, tlačne čvrstoće. Kada se postigne granica tlačne čvrstoće, krhki materijali se lome. Ovisno o vrsti uzorka koji se testira, otkrivanje loma se može

odrediti kada se ispitivanje provede do prekida. Ako se ispitivanje provodi do određene granice, upotrebljava se ograničenje opterećenja ili ograničenje za odstupanje. [22]



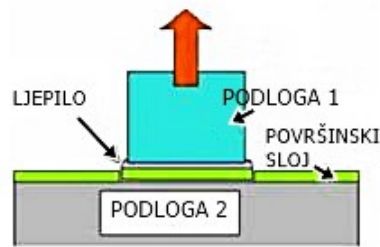
Slika 12. *Smjer djelovanja sila na uzorak podvrgnut testu kompresije*  
<http://www.energetika-net.com/specijali/izdvajamo/r-evolucija-spajanja-dijelova-13806>

Ljepila mogu propasti pod iznenadnim udarnim opterećenjem, a ne pod polaganim opterećenjem iste ili veće sile. Standard ASTM D950 objašnjava jednu od metoda ispitivanja koja se može koristiti upravo za usporedbu osjetljivosti različitih adheziva na iznenadna opterećenja. [21]

#### 2.5.1.5. *Test vezivanja*

Ova metoda je naširoko korištena za ispitivanje prijanjanja premaza na supstrate i također se koristi za procjenu ljepila. Test je atraktivan jer je brz i jednostavan za obavljanje, zahtijeva opremu s niskom cijenom i proizvodi kvantificiranu mjeru čvrstoće prijanjanja od maksimalne sile primijenjene na uzorak. Test daje dobru ponovljivost i može razlikovati dobre i loše površinske tretmane. Niske vrijednosti adhezije ukazuju na popuštanje premaza i često su posljedica neadekvatne površinske pripreme supstrata. Mjera prijanjanja premaza je sila pri kojoj sustav doživi neuspjeh. Ispitivanja su pokazala da mnogi aspekti metode ispitivanja, kao što su miješanje ljepila, priprema površine premaza i temperatura testa, utječu na rezultate. [22]

Za razliku od ostalih, ova metoda povećava napetost, stoga se rezultati ne mogu usporediti s ostalima. Ispitivanje se vrši pričvršćivanjem uzorka okomito na površinu premaza s ljepilom, zatim se aparat za ispitivanje pričvršćuje na uzorak te se poravnava kako bi se primijenila napetost okomito na ispitnu površinu. Sila koja se primjenjuje postepeno se povećava i prati sve dok ne dođe do odvajanja ili se dosegne prethodno navedena vrijednost. [24]



Slika 13. *Smjer djelovanja sile na uzorak podvrgnut testu vezivanja*  
<http://www.adhesivestoolkit.com/Docs/test/MECHANICAL%20TEST>

Standard ASTM D4541 pokriva postupak ispitivanja za procjenu otpornosti premaza na krutim podlogama kao što su metal, beton ili drvo. Ispitivanje određuje najveću okomitu silu (u napetosti) koju površina može podnijeti prije nego što se materijal odvoji ili ostane netaknut. Neuspjeh će se dogoditi uz najslabiju točku unutar sustava koja može biti uvjetovana ispitnim priborom, ljepilom, sustavom za premazivanje podloge i dr. Ova metoda za ispitivanje maksimizira napetost vlačnog napona u usporedbi sa stresom smicanja. Rezultati dobiveni svakom ispitnom metodom mogu dati različite rezultate. Rezultati se trebaju procjenjivati samo unutar zasebne metode ispitivanja i ne smiju se uspoređivati s rezultatima dobivenim na drugim uređajima. [24]

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

U ovoj cjelini diplomskog rada biti će detaljno opisani korišteni materijali i uređaji te pojašnjeni svi postupci izrade uzoraka i provedbe testova u svrhu ispitivanja i analize čvrstoće lijepljenih spojeva papira i kartona pod utjecajem vlage. Adhezijski testovi (u našem slučaju korišten je peel test), zbog niza parametara koji utječu na čvrstoću, rijetko kada daju rezultate koji su međusobno usporedivi među laboratorijima, već uglavnom služe za međusobnu usporedbu.

#### 3.1. Materijali i uređaji

##### 3.1.1. Kidalica

Ispitivanje čvrstoće se provodi na uređaju tvrtke Enrico Toniolo, Dynamometer Tesnomini Super, prikazanog na slici 14.. Namijenjen je ispitivanju otpornosti papira prema kidanju. Nakon izvršenog testa kidanja na uređaju je moguće očitati prekidnu silu (N) te prekidno istezanje (mm).

Standardi:     UNI EN ISO 1924 - 2: 1997  
                  UNI EN ISO 12625 - 4: 2005  
                  UNI EN ISO 12625 - 5: 2005

Uređaj ima raspon opterećenja do 25 kg (250 N) s korakom od 1g (0,01 N) te točnosti prekidnog istezanja 0,1 mm. Razmak između hvataljki je 50, 100, 150, 180 mm, a brzina kidanja 10 - 250 mm/min.



Slika 14. *Uređaj za ispitivanje čvrstoće papira prema kidanju*  
<http://www.hellotrade.com/enrico-toniolo>

### **3.1.2. Ljepilo PVAc Signokol L**

Za ispitivanje se koristi ljepilo PVAc Signokol L, napravljeno na bazi vodene disperzije polivinil acetata uz dodatak aditiva. Namijenjeno je za lijepljenje u sustavu papir-papir, papir-karton, karton-karton. Film ljepila je proziran i elastičan. Prije uporabe se treba promiješati. Viskozitet se može korigirati dodatkom vode do maksimalno 5% težine originalnog pakiranja. Pri temperaturi prostorije od 18 – 20°C te relativne vlažnosti zraka od 60 - 70%, postižu se optimalni uvjeti lijepljenja. Nakon rada, dok je film ljepila još mokar, alat i strojevi se lagano peru vodom i sapunicom. Ako se ljepilo ostavlja u otvorenoj ambalaži, potrebno ga je zaštititi tankim slojem vode da se izbjegne stvaranje kožice ljepila. Prije uporabe vodu treba odliti, a ljepilo dobro promiješati. Skladišti se na temperaturi od +5 do +35°C, a upotrebljivo je 12 mjeseci. Nije škodljivo za zdravlje i nisu potrebni posebni uvjeti u primjeni.

### **3.1.3. Papiri**

Za ispitivanje se koriste 3 različite vrste papira:

- Navigator Universal (100% primarna vlakna, 80 g/m<sup>2</sup>); u nastavku rada R0,
- Navigator Hibrid (30% reciklirana, 70% primarna vlakna, 80 g/m<sup>2</sup>): u nastavku rada R30,
- Recy Office Classic (100% reciklirana vlakna, 80 g/m<sup>2</sup>): u nastavku rada R100.

### **3.1.4. Kartoni**

Za ispitivanje se koriste 3 različite vrste kartona:

- Lux Pack GC1 je jednostrano premazani voluminozni bijelo-bijeli karton na bazi celuloze dizajniran za izradu visoko kvalitetne ambalaže. Karakteriziraju ga visoka bjelina, ušteda na gramaturi zbog voluminoznosti i izrazito bijela poledina s laganim premazom i s izvrsnim karakteristikama tiska. Koristi se za kozmetičku i konditorsku ambalažu, korice za meki uvez knjige, kutije, razglednice i dr. Primjenjuje se u ofsetnoj tehnici tiska. Gramatura je 350 g/m<sup>2</sup>.
- Pro Pack GT2 je bijelo-bijeli visoko kvalitetni kromo karton proizveden od recikliranog papira. Srednji sloj je izrađen od miješanog recikliranog, dok su gornji i donji sloj proizvedeni iz sortiranog bijelog recikliranog papira. Ima troslojni gornji te jednoslojni donji premaz, konstantnu kvalitetu i odlične tiskarske i proizvodne karakteristike. Koristi se za izradu kvalitetne kartonske ambalaže za kozmetičku, farmaceutsku, prehrambenu i kemijsku industriju. Metode tiska su ofsetni i fleksotisak. Gramatura je 350 g/m<sup>2</sup>.
- Umka Color GD2 je bijelo-sivi kromo karton proizveden od 100% recikliranog materijala. Srednji sloj je izrađen od miješanog, a gornji od sortiranog bijelog recikliranog papira. Odlikuje ga troslojni gornji i jednoslojni donji premaz, visoka kvaliteta, dobre

tiskarske i proizvodne karakteristike. Koristi se za izradu raznih vrsta kartonskih kutija u prehrambenoj i konditorskoj industriji. Koristi se za ofsetni tisak i fleksotisak. Gramatura je 350 g/m<sup>2</sup>.

### **3.1.5. Zasićene otopine soli**

Za pripremu zasićenih otopina soli korišteni su:

- kalijev karbonat (45% RVZ - za standardne uvjete),
- kalcijev klorid (35% RVZ),
- amonijev nitrat (65% RVZ),
- natrijev karbonat (92% RVZ).

## **3.2. Postupak pripreme uzoraka**

Iz materijala dimanzija A4 (210 x 297 mm) izrezani su listovi dimenzija 210 x 210 mm u uzdužnom i poprečnom smjeru toka vlakana (u nastavku teksta: MD - machine direction i CD - cross direction) koji su potom označeni. Od svake vrste papira/kartona su pripremljena po 2 lista za svaki smjer (4 komada). Nakon označavanja uzorci su žlijebljeni na uređaju za žlijebljenje (4 cm od ruba papira) kako bi znali gdje nanijeti ljepilo. Uzorci su se morali predkondicionirati prema TAPPI standardu T402 na radne uvjete; 10 - 35% RVZ, 22 - 40°C (naši uvjeti: 33% RVZ, 21,5°C), na minimalno 24h.



Slika 15. Priprema uzoraka; označavanje

Nakon predkondicioniranja slijedila je izrada uzoraka lijepljenih spojeva. Ljepilo je nanoseno kistom po točno definiranom procesu (nanosi se paralelno sa žlijebom, višak ljepila se skida okomito na žlijeb, veličina kista 18). Nakon što je jedna stranica namazana ljepilom, druga se samo priglomi kako bi se formirali uzorci za peel test (žlijeb za žlijeb). Postupak lijepljenja zahtijevao je cca 30 minuta. Zalijepljeni uzorci su stavljeni na prešanje pod težinu od 2kg (drvena ploča od 0,9 kg + uteg na sredinu od 1 kg) trajanja 5h. Nakon toga su ostavljeni 7



dana, bez prešanja, dok se nisu u potpunosti osušili na standardnim uvjetima od 45% RVZ i 23°C.



Slika 16. *Uzorci prije rezanja na završne dimenzije*

Nakon sušenja slijedilo je rezanje uzoraka na završne dimenzije. Prvo je izvršeno obrezivanje slijepljenih listova (po 0,75 cm s lijeve i desne strane, 1 cm na mjestu slijepljenog spoja te 6,5 cm s gornje strane). Dobiven je format slijepljenog uzorka 195 x 135 mm koji je potom rezan na trakice širine 15 mm za oba smjera toka vlakana. Za svaku vrstu papira/kartona dobiveno je cca 16 trakica dimenzija 15 x 135 mm za ispitivanje ljuštenja na kidalici (dimenzije slijepljenog spoja iznose 20 x 15 mm). Pripremljeni su uzorci, nakon označavanja, odloženi u plastičnu kutiju do nastavka ispitivanja.

Tako izrezani uzorci su se morali kondicionirati u različitim uvjetima vlažnosti što se postiglo odlaganjem u eksikator sa zasićenim otopinama soli. Eksikator (lat.) je staklena posuda s brušenim poklopcem koja se inače koristi za sušenje ili zaštitu tvari od vlage uz pomoć nekoga higroskopskog sredstva. Nakon tjedan dana izlaganja uzorci se vađeni i ostavljeni 4h da bi se kondicionirali na uvjete u kojima će se ispitivati čvrstoća spoja metodom ljuštenja prema standardu ASTM D1876 - 01. Postupak je ponovljen četiri puta za četiri različite otopine soli (kalijev karbonat, kalcijev klorid, amonijev nitrat, natrijev karbonat). Omjer vode i soli nije konstantan u svim uvjetima, jer ovisi o mnogim svojstvima kao što su: temperatura same destilirane vode, temperatura prostorije i sl. U našem slučaju je dodano 160 g soli u 400 ml vode za otopinu kalijevog karbonata, 60 g soli u 400 ml vode za kalcijev klorid, 200 g soli u 400 ml vode za amonijev nitrat te 70 g soli u 600 ml vode za natrijev karbonat.



Slika 17. Eksikator

<http://www.labochema.lt/wp-content/uploads/2014/12/eksikatorius.jpg?a826e1>

### 3.3. Opis ispitivanja

Za ispitivanje na kidalici odabrano je 16 uzoraka za svaki smjer vlakana (MD i CD). Rezultate ćemo u nastavku ispitivanja uspoređivati s obzirom na standardne uvjete (45% RVZ). Nakon što je uzorak postavljen među hvataljke pomakom ručice uređaja pokrenut je postupak mjerenja. Brzina kidanja je konstantna kod svih ispitnih uzoraka, iznosa 2/90. Vrijednost čvrstoće spojeva je očitana na 3 decimale, u Njutnima (N). Nakon ispitivanja i dobivenih rezultata za sva četiri uvjeta vlažnosti vršimo analizu i odabir vrijednosti koje ćemo uzeti u obzir. Računaju se srednje vrijednosti, standardne devijacije i varijance. Prikazujemo, također, promjenu u postocima s obzirom na originalne uvjete:

$R [\%] = [(y-x)/x] \times 100$  ; x je originalna čvrstoća za 45%, y je čvrstoća za neki drugi postotak vlage.

Paralelno s ovim ispitivanjem, ispitivana je i čvrstoća materijala pri standardnim uvjetima (bez lijepljenja) na FRANK kidalici s utegom od 30 kp radi usporedbe rezultata u svrhu ispitivanja ovisnosti čvrstoće materijala na čvrstoću lijepljenog spoja pri promjenama RVZ. Čvrstoću spojeva možemo procijeniti kvantitativnom, ali često i vizualnom metodom.

### 3.4. Rezultati ispitivanja

S obzirom na brojne čimbenike koji su utjecali na čvrstoću spoja (struktura i sastav papira koji nije jednoličan kroz cijeli uzorak papira, ručni nanos ljepila kistom i dr.), dobiveni koeficijent varijacije je prema očekivanjima dosta velik (20 - 30% za papire i kartone), stoga su se podaci morali reducirati pomoću medijana. Ukupni medijan rezultata je dobiven tako što je rezultatima 16 mjerenja, poredanih od većih prema manjima, određena sredina

distribucije, a nakon toga su odbačeni oni rezultati koji su najviše odstupali. Na taj način uzeto je u obzir za svako pojedinačno mjerenje 10 rezultata. Tako smo smanjili koeficijent varijacije te u konačnici dobili do 10% za papire i do 15% za kartone.

Tablica 4. Rezultati mjerenja čvrstoće lijepljenih spojeva papira (R0, R30, R100) izloženih 35% RVZ (jedinica N)

|                            | R0    |       | R30   |       | R100  |       |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                            | MD    | CD    | MD    | CD    | MD    | CD    |
| 1                          | 3,933 | 1,559 | 2,815 | 2,177 | 3,217 | 1,854 |
| 2                          | 3,727 | 1,491 | 2,629 | 2,04  | 3,198 | 1,834 |
| 3                          | 3,482 | 1,432 | 2,609 | 2,04  | 3,178 | 1,687 |
| 4                          | 3,394 | 1,412 | 2,519 | 2,02  | 3,031 | 1,687 |
| 5                          | 3,178 | 1,41  | 2,501 | 2,001 | 3,011 | 1,667 |
| 6                          | 3,158 | 1,363 | 2,462 | 1,981 | 2,992 | 1,599 |
| 7                          | 3,139 | 1,343 | 2,432 | 1,962 | 2,982 | 1,589 |
| 8                          | 3,099 | 1,314 | 2,305 | 1,961 | 2,884 | 1,549 |
| 9                          | 3,09  | 1,285 | 2,266 | 1,942 | 2,511 | 1,491 |
| 10                         | 2,886 | 1,272 | 2,246 | 1,795 | 2,501 | 1,481 |
| <b>M</b>                   | 3,286 | 1,461 | 2,51  | 1,991 | 3,021 | 1,677 |
| <b>V</b>                   | 9,272 | 6,24  | 6,833 | 4,573 | 8,277 | 7,412 |
| <b>X</b>                   | 3,309 | 1,388 | 2,478 | 1,992 | 2,951 | 1,644 |
| <b><math>\sigma</math></b> | 0,307 | 0,087 | 0,169 | 0,091 | 0,244 | 0,122 |

Tablica 5. Rezultati mjerenja čvrstoće lijepljenih spojeva papira (R0, R30, R100) izloženih 45% RVZ (jedinica N)

|                            | R0    |       | R30   |       | R100  |       |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                            | MD    | CD    | MD    | CD    | MD    | CD    |
| 1                          | 4,46  | 1,716 | 2,844 | 2,364 | 3,384 | 2,011 |
| 2                          | 4,385 | 1,599 | 2,786 | 2,295 | 3,364 | 1,912 |
| 3                          | 4,218 | 1,54  | 2,629 | 2,285 | 3,099 | 1,824 |
| 4                          | 4,192 | 1,53  | 2,609 | 2,197 | 3,09  | 1,805 |
| 5                          | 3,992 | 1,491 | 2,58  | 2,177 | 3,07  | 1,726 |
| 6                          | 3,845 | 1,451 | 2,56  | 2,138 | 3,05  | 1,687 |
| 7                          | 3,806 | 1,442 | 2,472 | 2,097 | 3,041 | 1,657 |
| 8                          | 3,796 | 1,402 | 2,423 | 2,001 | 3,031 | 1,648 |
| 9                          | 3,521 | 1,353 | 2,344 | 1,952 | 2,992 | 1,638 |
| 10                         | 3,168 | 1,343 | 2,305 | 1,873 | 2,913 | 1,618 |
| <b>M</b>                   | 3,918 | 1,51  | 2,423 | 2,187 | 3,05  | 1,765 |
| <b>V</b>                   | 9,606 | 7,334 | 6,516 | 7,057 | 4,654 | 7,135 |
| <b>X</b>                   | 3,938 | 1,487 | 2,555 | 2,138 | 3,103 | 1,753 |
| <b><math>\sigma</math></b> | 0,378 | 0,109 | 0,167 | 0,151 | 0,144 | 0,125 |

Tablica 6. Rezultati mjerenja čvrstoće lijepljenih spojeva papira (R0, R30, R100) izloženih 65% RVZ (jedinica N)

|          | R0    |        | R30   |       | R100  |       |
|----------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
|          | MD    | CD     | MD    | CD    | MD    | CD    |
| 1        | 3,894 | 1,998  | 2,743 | 2,56  | 3,364 | 1,942 |
| 2        | 3,855 | 1,854  | 2,693 | 2,266 | 3,247 | 1,932 |
| 3        | 3,835 | 1,805  | 2,674 | 2,217 | 3,247 | 1,893 |
| 4        | 3,57  | 1,618  | 2,586 | 2,187 | 3,001 | 1,814 |
| 5        | 3,541 | 1,579  | 2,576 | 2,168 | 2,962 | 1,814 |
| 6        | 3,433 | 1,54   | 2,536 | 2,089 | 2,952 | 1,795 |
| 7        | 3,375 | 1,54   | 2,497 | 2,011 | 2,864 | 1,775 |
| 8        | 3,364 | 1,54   | 2,23  | 1,987 | 2,854 | 1,765 |
| 9        | 3,35  | 1,461  | 2,174 | 1,981 | 2,844 | 1,736 |
| 10       | 3,325 | 1,46   | 2,136 | 1,981 | 2,746 | 1,687 |
| <b>M</b> | 3,487 | 1,579  | 2,674 | 1,984 | 2,908 | 1,814 |
| <b>V</b> | 6,05  | 10,561 | 9,404 | 7,997 | 6,533 | 4,373 |
| <b>X</b> | 3,554 | 1,640  | 2,485 | 2,145 | 3,008 | 1,815 |
| <b>σ</b> | 0,215 | 0,173  | 0,234 | 0,172 | 0,197 | 0,079 |

Tablica 7. Rezultati mjerenja čvrstoće lijepljenih spojeva papira (R0, R30, R100) izloženih 92% RVZ (jedinica N)

|          | R0    |        | R30   |       | R100  |       |
|----------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
|          | MD    | CD     | MD    | CD    | MD    | CD    |
| 1        | 3,296 | 1,682  | 2,324 | 2,285 | 3,276 | 1,736 |
| 2        | 3,276 | 1,677  | 2,217 | 2,148 | 3,247 | 1,706 |
| 3        | 3,129 | 1,667  | 2,207 | 2,128 | 3,119 | 1,706 |
| 4        | 3,06  | 1,648  | 2,099 | 2,109 | 3,011 | 1,706 |
| 5        | 3,011 | 1,373  | 2,06  | 2,089 | 2,992 | 1,667 |
| 6        | 2,923 | 1,353  | 2,05  | 2,03  | 2,844 | 1,657 |
| 7        | 2,903 | 1,346  | 2,001 | 2,001 | 2,727 | 1,648 |
| 8        | 2,727 | 1,335  | 1,981 | 1,971 | 2,727 | 1,648 |
| 9        | 2,697 | 1,333  | 1,952 | 1,883 | 2,56  | 1,579 |
| 10       | 2,599 | 1,329  | 1,873 | 1,824 | 2,462 | 1,54  |
| <b>M</b> | 2,967 | 1,363  | 2,055 | 2,015 | 2,992 | 1,652 |
| <b>V</b> | 7,641 | 10,798 | 6,302 | 6,253 | 7,785 | 7,348 |
| <b>X</b> | 2,962 | 1,474  | 2,076 | 2,047 | 2,897 | 1,659 |
| <b>σ</b> | 0,226 | 0,159  | 0,131 | 0,128 | 0,265 | 0,058 |

Tablica 8. Rezultati mjerenja čvrstoće lijepljenih spojeva kartona (GC1, GT2, GD2) izloženih 35% RVZ (jedinica N)

|          | GC1   |       | GT2    |        | GD2    |       |
|----------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|
|          | MD    | CD    | MD     | CD     | MD     | CD    |
| 1        | 10,54 | 6,307 | 6,513  | 3,943  | 1,143  | 1,824 |
| 2        | 9,653 | 6,298 | 5,66   | 3,717  | 1,065  | 1,805 |
| 3        | 9,182 | 6,052 | 5,581  | 3,699  | 1,047  | 1,795 |
| 4        | 8,887 | 6,052 | 5,317  | 3,374  | 0,951  | 1,795 |
| 5        | 8,409 | 5,935 | 4,973  | 3,337  | 0,892  | 1,785 |
| 6        | 8,348 | 5,836 | 4,806  | 3,207  | 0,884  | 1,618 |
| 7        | 8,326 | 5,709 | 4,542  | 3,041  | 0,845  | 1,579 |
| 8        | 8,26  | 5,67  | 4,453  | 2,943  | 0,767  | 1,54  |
| 9        | 7,779 | 5,65  | 4,366  | 2,668  | 0,759  | 1,52  |
| 10       | 7,542 | 5,591 | 3,825  | 2,344  | 0,729  | 1,52  |
| <b>M</b> | 8,019 | 5,935 | 4,889  | 3,272  | 0,951  | 1,79  |
| <b>V</b> | 9,823 | 4,219 | 14,812 | 14,589 | 14,771 | 7,506 |
| <b>X</b> | 8,693 | 5,910 | 5,004  | 3,227  | 0,908  | 1,678 |
| <b>σ</b> | 8,693 | 0,249 | 0,741  | 0,471  | 0,134  | 0,126 |

Tablica 9. Rezultati mjerenja čvrstoće lijepljenih spojeva kartona (GC1, GT2, GD2) izloženih 45% RVZ (jedinica N)

|          | GC1    |       | GT2    |       | GD2    |        |
|----------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|
|          | MD     | CD    | MD     | CD    | MD     | CD     |
| 1        | 10,182 | 7,661 | 6,464  | 4,022 | 2,638  | 2,687  |
| 2        | 9,182  | 7,19  | 6,278  | 3,978 | 2,187  | 2,354  |
| 3        | 9,152  | 6,935 | 6,248  | 3,8   | 2,168  | 2,354  |
| 4        | 8,858  | 6,68  | 5,817  | 3,741 | 2,109  | 2,275  |
| 5        | 8,642  | 6,592 | 5,523  | 3,629 | 2,099  | 2,246  |
| 6        | 8,613  | 6,572 | 5,513  | 2,952 | 1,922  | 2,177  |
| 7        | 8,612  | 6,494 | 5,111  | 2,95  | 1,814  | 2,158  |
| 8        | 8,338  | 6,386 | 4,806  | 2,874 | 1,787  | 2,148  |
| 9        | 8,26   | 6,18  | 4,62   | 2,786 | 1,634  | 2,148  |
| 10       | 7,818  | 5,944 | 4,463  | 2,746 | 1,598  | 1,51   |
| <b>M</b> | 8,612  | 6,807 | 5,518  | 2,912 | 1,922  | 2,148  |
| <b>V</b> | 6,972  | 7,066 | 12,467 | 9,237 | 14,808 | 12,627 |
| <b>X</b> | 8,766  | 6,663 | 5,484  | 3,348 | 1,996  | 2,206  |
| <b>σ</b> | 0,611  | 0,471 | 0,684  | 0,309 | 0,296  | 0,279  |

Tablica 10. Rezultati mjerenja čvrstoće lijepljenih spojeva kartona (GC1, GT2, GD2) izloženih 65% RVZ (jedinica N)

|          | GC1   |       | GT2    |        | GD2    |       |
|----------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|
|          | MD    | CD    | MD     | CD     | MD     | CD    |
| 1        | 9,201 | 7,141 | 6,003  | 4,179  | 0,871  | 2,275 |
| 2        | 8,976 | 6,857 | 5,13   | 3,857  | 0,824  | 2,128 |
| 3        | 8,946 | 6,837 | 4,679  | 3,717  | 0,765  | 2,089 |
| 4        | 8,829 | 6,67  | 4,64   | 3,68   | 0,757  | 2,06  |
| 5        | 8,622 | 6,651 | 4,591  | 2,962  | 0,698  | 2,04  |
| 6        | 8,309 | 6,464 | 4,228  | 2,884  | 0,678  | 1,922 |
| 7        | 8,289 | 6,435 | 3,943  | 2,835  | 0,639  | 1,903 |
| 8        | 8,22  | 5,846 | 3,802  | 2,795  | 0,57   | 1,785 |
| 9        | 7,622 | 5,778 | 3,713  | 2,786  | 0,57   | 1,765 |
| 10       | 6,543 | 5,601 | 3,698  | 2,785  | 0,553  | 1,697 |
| <b>M</b> | 8,613 | 6,807 | 4,659  | 2,923  | 0,761  | 1,912 |
| <b>V</b> | 6,973 | 7,066 | 15,622 | 15,885 | 15,224 | 8,846 |
| <b>X</b> | 8,356 | 6,428 | 4,443  | 3,248  | 0,693  | 1,966 |
| <b>σ</b> | 0,748 | 0,491 | 0,694  | 0,516  | 0,105  | 0,174 |

Tablica 11. Rezultati mjerenja čvrstoće lijepljenih spojeva kartona (GC1, GT2, GD2) izloženih 92% RVZ (jedinica N)

|          | GC1   |       | GT2   |        | GD2    |        |
|----------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
|          | MD    | CD    | MD    | CD     | MD     | CD     |
| 1        | 9,951 | 6,968 | 5,493 | 3,849  | 1,106  | 2,128  |
| 2        | 8,927 | 6,474 | 5,325 | 3,798  | 0,996  | 2,099  |
| 3        | 8,858 | 6,435 | 5,022 | 3,675  | 0,882  | 2,05   |
| 4        | 8,515 | 6,415 | 4,983 | 3,535  | 0,873  | 1,873  |
| 5        | 8,299 | 6,307 | 4,934 | 3,466  | 0,853  | 1,814  |
| 6        | 8,083 | 6,209 | 4,698 | 2,999  | 0,735  | 1,755  |
| 7        | 8,004 | 6,052 | 4,689 | 2,857  | 0,737  | 1,697  |
| 8        | 7,984 | 5,895 | 4,453 | 2,762  | 0,799  | 1,608  |
| 9        | 7,741 | 5,787 | 4,296 | 2,742  | 0,729  | 1,432  |
| 10       | 7,692 | 5,199 | 4,267 | 2,654  | 0,71   | 1,393  |
| <b>M</b> | 8,043 | 6,209 | 4,698 | 3,605  | 0,853  | 1,784  |
| <b>V</b> | 7,785 | 7,348 | 8,136 | 14,624 | 14,575 | 13,874 |
| <b>X</b> | 8,405 | 6,174 | 4,816 | 3,234  | 0,842  | 1,785  |
| <b>σ</b> | 0,654 | 0,454 | 0,392 | 0,473  | 0,123  | 0,248  |

## 4. DISKUSIJA REZULTATA

### 4.1. Rezultati mjerenja čvrstoće lijepljenih spojeva papira

Tablica 12. Izdvojene aritmetičke sredine mjerenja čvrstoće lijepljenih spojeva papira ovisne o RVZ

|             | 35%   |       | 45%   |       | 65%   |       | 92%   |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | MD    | CD    | MD    | CD    | MD    | CD    | MD    | CD    |
| <b>R0</b>   | 3,309 | 1,388 | 3,938 | 1,487 | 3,554 | 1,64  | 2,962 | 1,474 |
| <b>R30</b>  | 2,478 | 1,992 | 2,555 | 2,138 | 2,485 | 2,145 | 2,076 | 2,047 |
| <b>R100</b> | 2,951 | 1,644 | 3,103 | 1,753 | 3,008 | 1,815 | 2,897 | 1,659 |

Tablica 13. Povećanje/smanjenje čvrstoće lijepljenih spojeva papira u odnosu na standardne uvjete 45% RVZ

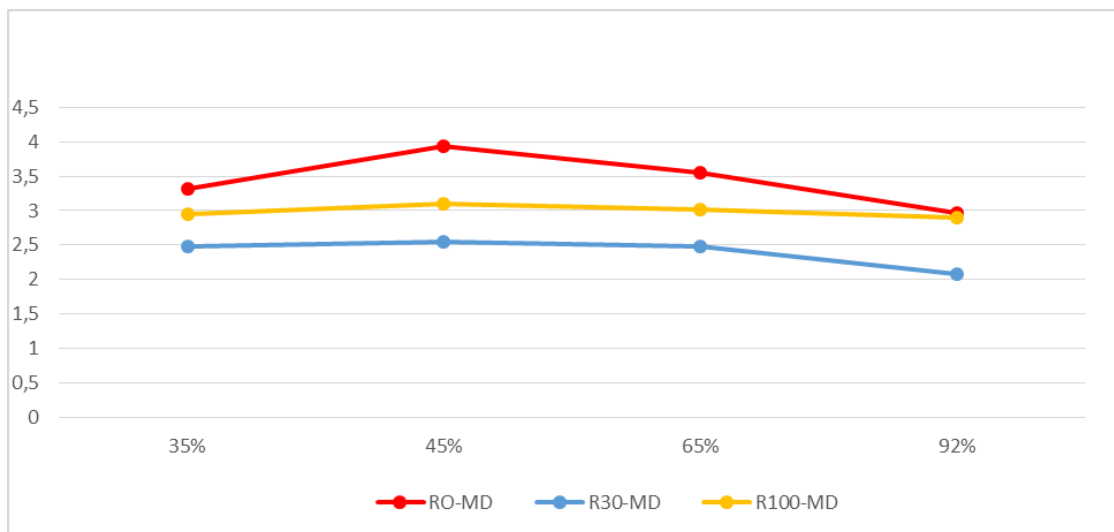
|             | 35-45 |    | 45  |     | 45-65/35-65 |     | 65-92/45-92/35-92 |       |
|-------------|-------|----|-----|-----|-------------|-----|-------------------|-------|
|             | MD    | CD | MD  | CD  | MD          | CD  | MD                | CD    |
| <b>R0</b>   | s     | s  | ref | ref | s/p         | p/p | s/s/s             | s/s/p |
| <b>R30</b>  | s     | s  | ref | ref | s/p         | p/p | s/s/s             | s/s/p |
| <b>R100</b> | s     | s  | ref | ref | s/p         | p/p | s/s/s             | s/s/p |

|                   |  |                           |
|-------------------|--|---------------------------|
| <b>LEGENDA</b>    | ref                                    | referentna vrijednost     |
|                   | p                                      | povećanje                 |
|                   | s                                      | smanjenje                 |
|                   | 35                                     | 35%                       |
|                   | 35 45                                  | s 35% na 45%              |
|                   | 45-65/35-65                            | s 45% na 65%/s 35% na 65% |
| 65-92/45-92/35-92 | s 65% na 92%/s 45% na 92%/s 35% na 92% |                           |

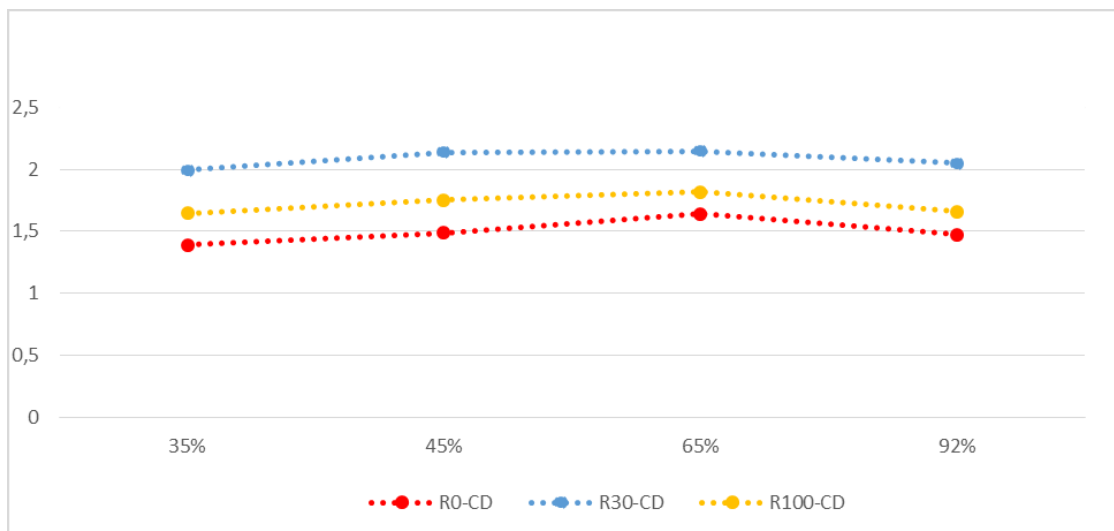
Tablica 14. Izdvojene aritmetičke sredine mjerenja čvrstoće papira (bez lijepljenja) pri standardnim uvjetima; ispitivanje izvršeno na FRANK kidalici

|          | R0    |       | R30   |       | R100  |       |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          | MD    | CD    | MD    | CD    | MD    | CD    |
| <b>x</b> | 8,040 | 3,160 | 6,470 | 5,120 | 5,410 | 2,080 |

Grafikon 1. Prikaz promjena čvrstoće lijepljenih spojeva papira u MD smjeru ovisne o RVZ



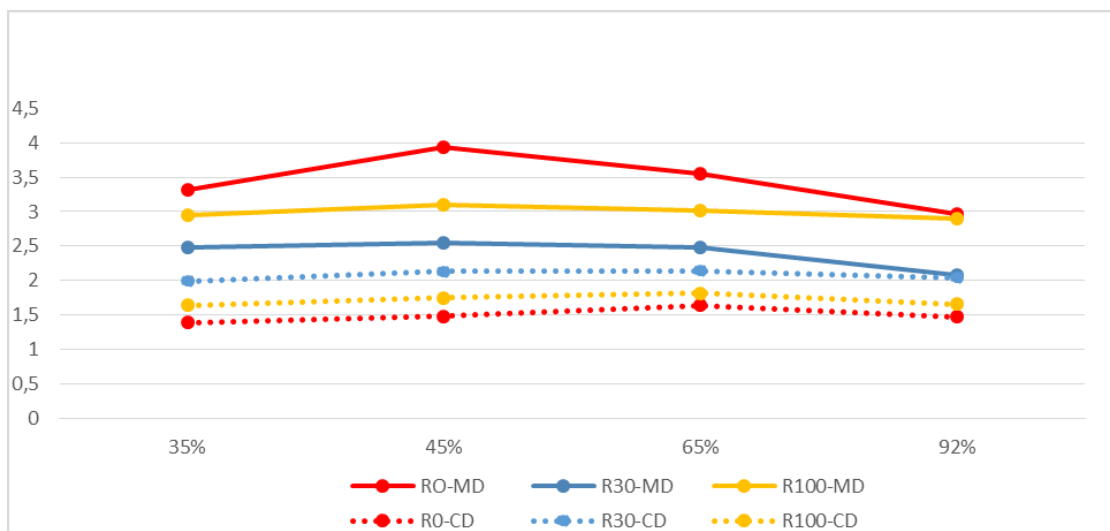
Grafikon 2. Prikaz promjena čvrstoće lijepljenih spojeva papira u CD smjeru ovisne o RVZ



Pregledom svih dobivenih rezultata za sve RVZ iz tablice 12. te grafikona 1. i 2., poredak čvrstoće lijepljenih spojeva papira od veće prema manjoj izgleda ovako: MD - R0, R100, R30 i papiri CD - R30, R100, R0. Poredak čvrstoće samog papira (bez lijepljenja) pri standardnim uvjetima prema podacima iz tablice 14. izgleda ovako: MD - R0, R30, R100 i papiri CD - R30, R0, R100. Na osnovu dobivenih rezultata ispitivanja pri 45% RVZ, vidimo da čvrstoća samih materijala utječe na čvrstoću lijepljenih spojeva budući da je RO nositelj najboljih rezultata za uzdužni, a R30 za poprečni smjer u oba tipa ispitivanja. No, ostali uzorci nisu pokazali jednak poredak na osnovu čega zaključujemo da nije jedini uvjet.



Grafikon 3. Zajednički prikaz promjena čvrstoće lijepljenih spojeva papira u MD i CD smjeru ovisne o RVZ



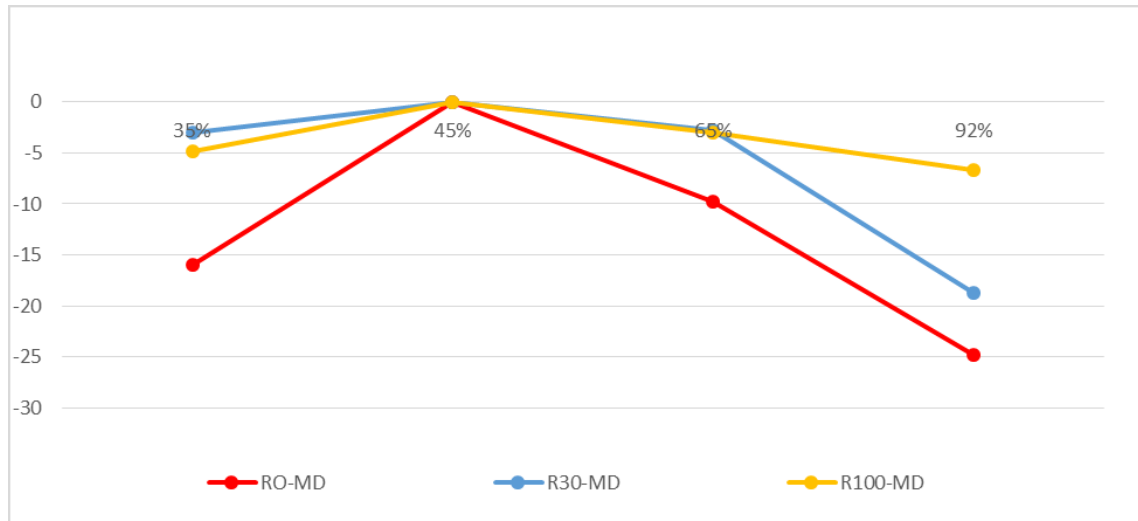
Grafikon 3. pokazuje da isti uzorci papira daju bolje rezultate čvrstoće u MD nego u CD smjeru. Razlog tome leži u dvosmjernosti lista koja je neizbježna u proizvodnji. Zbog brzine kojom se sito kreće u smjeru proizvodnje papira inercijom, dolazi do orijentacije većeg dijela vlakana u tom istom smjeru. Zbog toga, smjer proizvodnje papirne trake predstavlja uzdužni smjer toka vlakana u gotovom papiru, a smjer okomit na njega te paralelan sa širinom proizvodne trake, poprečni. Ovo negativno svojstvo industrijski proizvedenog papira je neizbježno, a ublažava se samo donekle poprečnim potresivanjem sita za vrijeme natoka. Stoga papir ima različita svojstva u pojedinom smjeru toka vlakana. Te se razlike znatno očituju u mehaničkim svojstvima. Uzdužni smjer MD pruža veću otpornost prema kidanju i savijanju, dok je otpornost prema različitoj promjeni dimenzija lista uslijed promjene vlažnosti i istežljivosti papira veća u poprečnom smjeru CD.

Kao što smo malo ranije zaključili, iako čvrstoća materijala nije ključan parametar pri evaluaciji čvrstoće lijepljenog spoja, svakako je bitan faktor. Isto to vrijedi i za tok vlakana koji utječe, ne samo na mehaničku čvrstoću, već i na prihvaćanje samog adheziva.

Iz grafikona 3. možemo jasno vidjeti kako reciklažom papir gubi na čvrstoći u uzdužnom, a dobiva u poprečnom smjeru. Količinski dio recikliranih, odnosno primarnih vlakana u sastavu, ne igra ključnu ulogu te je tako papir R100 (100% recikliranih vlakana) pokazao veću čvrstoću spoja od papira R30 (30% recikliranih vlakana) za uzdužni, a R30 za poprečni

smjer. R0 sa 100% primarnih vlakana daje ujedno i najbolje za MD i najgore rezultate za CD smjer.

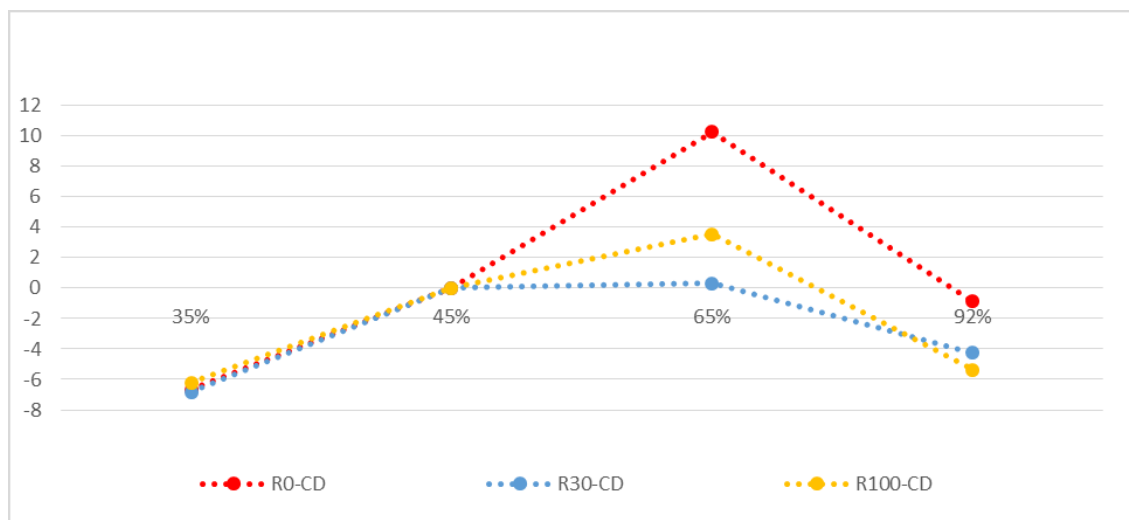
Grafikon 4. Prikaz promjena čvrstoće lijepljenih spojeva papira u MD smjeru u postocima u odnosu na standardne uvjete 45% RVZ



Iako se pri temperaturi prostorije od 18 - 20°C i relativne vlažnosti zraka od 60 - 70% postižu optimalni uvjeti lijepljenja PVAc Signokol L ljepila, čvrstoće lijepljenih spojeva MD smjera papira pokazale su se najvećima pri standardnim uvjetima od 45% RVZ (grafikon 4.), a svaka promjena vlažnosti (smanjenje i povećanje) uzrokovala je pad. Poznato je da se vlakna papira gubitkom vlage smanjuju i stežu, odnosno papir se suši i postaje krt, a porastom vlage bubre i povećavaju promjer. To je dovelo do promjene dimenzionalne stabilnosti papira koja je uzrokovala smanjenje čvrstoće adhezijskog spoja.

RO je pokazatelj najboljih rezultata, ali i najvećeg odstupanja pri promjenama vlažnosti. R100 je nositelj najstabilnijih rezultata budući da R30 naglo opada pri 92% RVZ. Hladna ljepila u procesu lijepljenja prelaze iz tekućeg stanja u želatinsko i potom otvrdnjavaju pa nastaje čvrsti spoj. Međutim, zbog svojstva reverzibilnosti taj spoj slabi ako se sloj ljepila otapa u vodi što je u našem slučaju uzrokovano povećanjem vlažnosti.

Grafikon 5. Prikaz promjena čvrstoće lijepljenih spojeva papira u CD smjeru u postotcima u odnosu na standardne uvjete 45% RVZ



Papiri CD, iako se radi o neznatnim razlikama, najveću čvrstoću ne pokazuju pri standardnim uvjetima već pri 65% RVZ (grafikon 5.). Ranije smo spomenuli kako poprečni CD smjer papira ima veću otpornost prema promjeni dimenzija uslijed povećanja vlažnosti i istezljivosti papira, stoga mu nije značajno promijenjena dimenzionalna stabilnost za razliku od papira MD smjera. Glavnu ulogu je u ovom slučaju odigralo PVAc ljepilo kojemu su ostvareni optimalni uvjeti za postizanje maksimalne čvrstoće lijepljenog spoja. Sva tri tipa papira u CD smjeru pokazuju iznimno velike stabilnosti u čvrstoći bez značajnih odstupanja.

#### 4.2. Rezultati mjerenja čvrstoće lijepljenih spojeva kartona

Tablica 15. Izdvojene aritmetičke sredine mjerenja čvrstoće lijepljenih spojeva kartona ovisne o RVZ

|            | 35%   |       | 45%   |       | 65%   |       | 92%    |       |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
|            | MD    | CD    | MD    | CD    | MD    | CD    | MD     | CD    |
| <b>GC1</b> | 8,693 | 5,91  | 8,766 | 6,663 | 8,356 | 6,428 | 8,405  | 6,174 |
| <b>GT2</b> | 5,004 | 3,227 | 5,484 | 3,348 | 4,443 | 3,248 | 4,816  | 3,234 |
| <b>GD2</b> | 0,908 | 1,678 | 1,996 | 2,206 | 0,693 | 1,966 | 0,8942 | 1,785 |

Tablica 16. Povećanje/smanjenje čvrstoće lijepljenih spojeva kartona u odnosu na standardne uvjete 45% RVZ

|            | 35-45 |    | 45  |     | 45-65/35-65 |     | 65-92/45-92/35-92 |       |
|------------|-------|----|-----|-----|-------------|-----|-------------------|-------|
|            | MD    | CD | MD  | CD  | MD          | CD  | MD                | CD    |
| <b>GC1</b> | s     | s  | ref | ref | s/s         | s/p | p/s/s             | s/s/p |
| <b>GT2</b> | s     | s  | ref | ref | s/s         | s/p | p/s/s             | s/s/p |
| <b>GD2</b> | s     | s  | ref | ref | s/s         | s/p | p/s/s             | s/s/p |

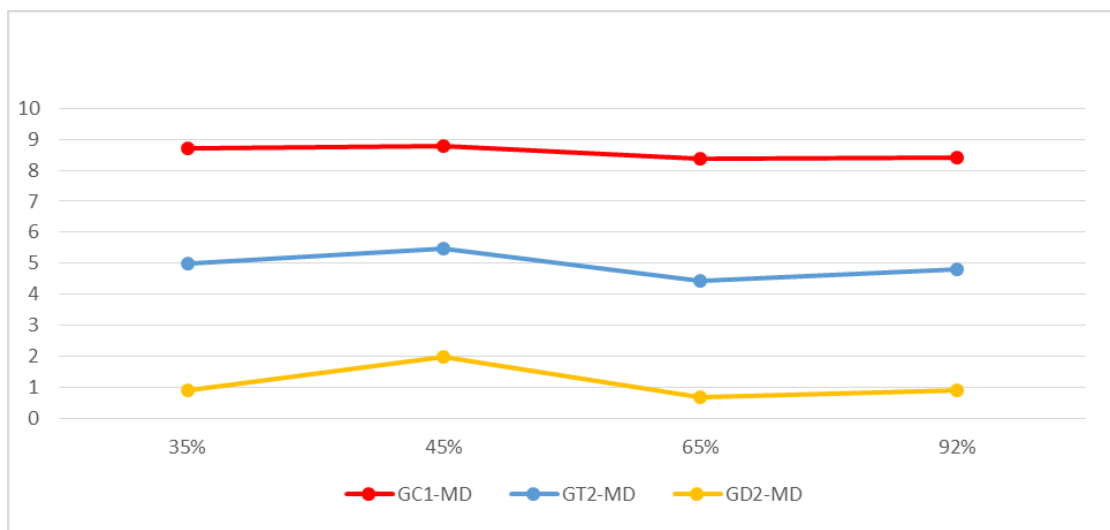
  

|                   |             |  |
|-------------------|-------------|--|
| <b>LEGENDA</b>    | ref         | <b>referentna vrijednost</b><br><b>povećanje</b><br><b>smanjenje</b><br><b>35%</b><br><b>s 35% na 45%</b><br><b>s 45% na 65%/s 35% na 65%</b><br><b>s 65% na 92%/s 45% na 92%/s 35% na 92%</b> |
|                   | p           |  |
|                   | s           |  |
|                   | 35          |  |
|                   | 35 45       |  |
|                   | 45-65/35-65 |  |
| 65-92/45-92/35-92 |             |  |

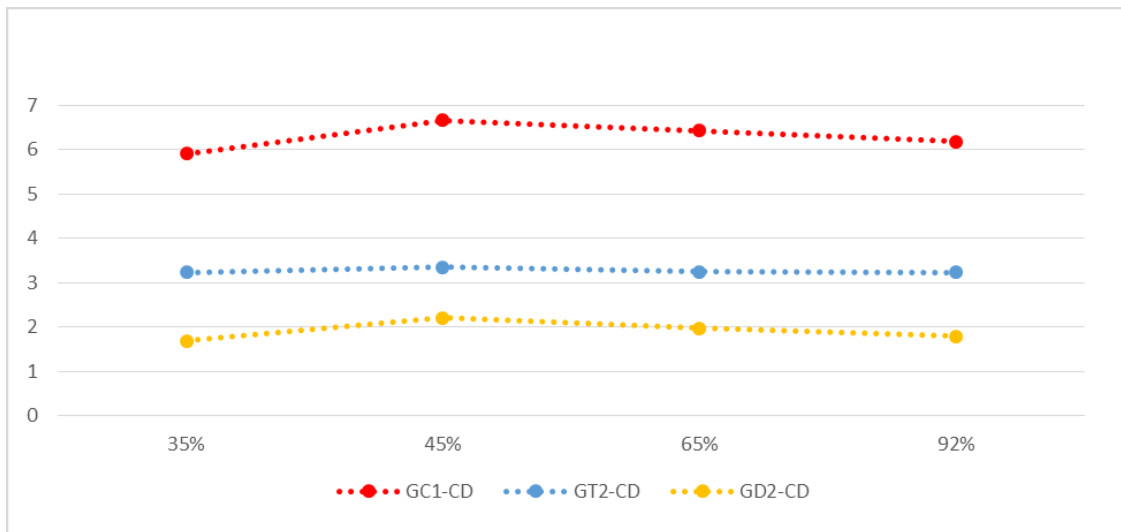
Tablica 17. Izdvojene aritmetičke sredine mjerenja čvrstoće materijala kartona (bez lijepljenja) pri standardnim uvjetima; ispitivanje izvršeno na FRANK kidalici

|          | GC1    |        | GT2    |       | GD2    |        |
|----------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
|          | MD     | CD     | MD     | CD    | MD     | CD     |
| <b>x</b> | 26,000 | 14,520 | 21,980 | 6,210 | 25,080 | 10,280 |

Grafikon 6. Prikaz promjena čvrstoće lijepljenih spojeva kartona u MD smjeru ovisne o RVZ

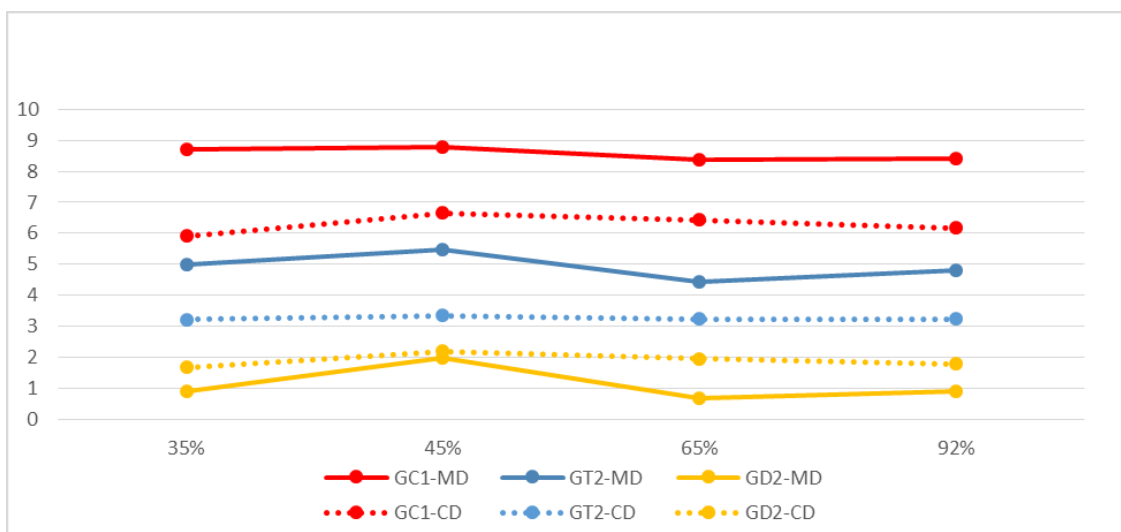


Grafikon 7. Prikaz promjena čvrstoće lijepljenih spojeva kartona u CD smjeru ovisne o RVZ



Pregledom svih dobivenih rezultata za sve RVZ iz tablice 15. te grafikona 6. i 7., poredak čvrstoće lijepljenih spojeva kartona od veće prema manjoj izgleda ovako: MD i CD - GC1, GT2 i GD2. Poredak čvrstoće samih kartona (bez lijepljenja) pri standardnim uvjetima prema podacima iz tablice 17. izgleda ovako: kartoni MD i CD - GC1, GD2 i GD2. Na osnovu dobivenih rezultata ispitivanja pri 45% RVZ, vidimo da čvrstoća samih materijala utječe na čvrstoću lijepljenih spojeva budući da je GC1 nositelj najboljih rezultata i za uzdužni i poprečni smjer u oba tipa ispitivanja. No, ostali uzorci nisu pokazali jednak poredak na temelju čega zaključujemo da nije jedini uvjet.

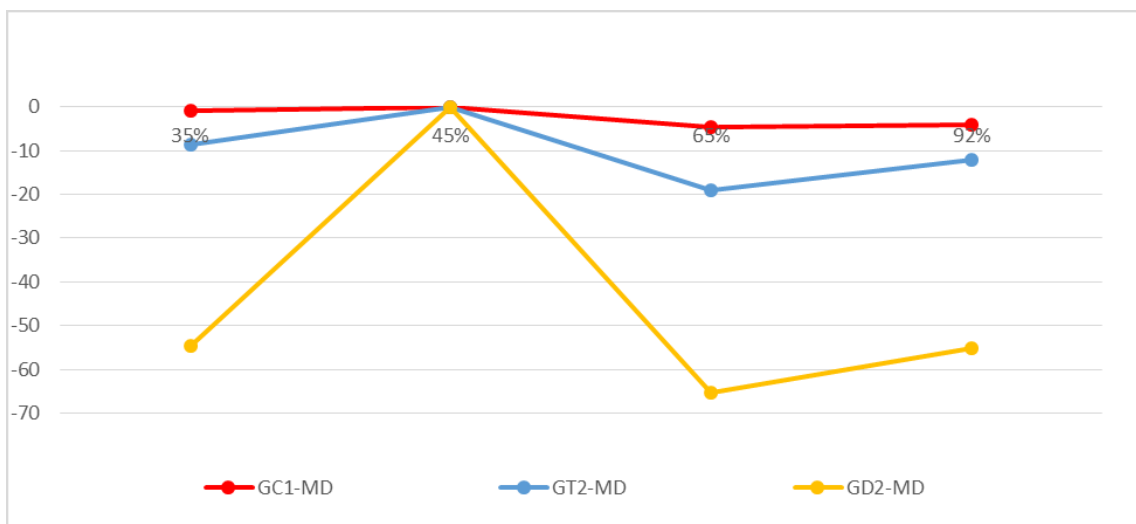
Grafikon 8. Zajednički prikaz promjena čvrstoće lijepljenih spojeva kartona u MD i CD smjeru ovisne o RVZ



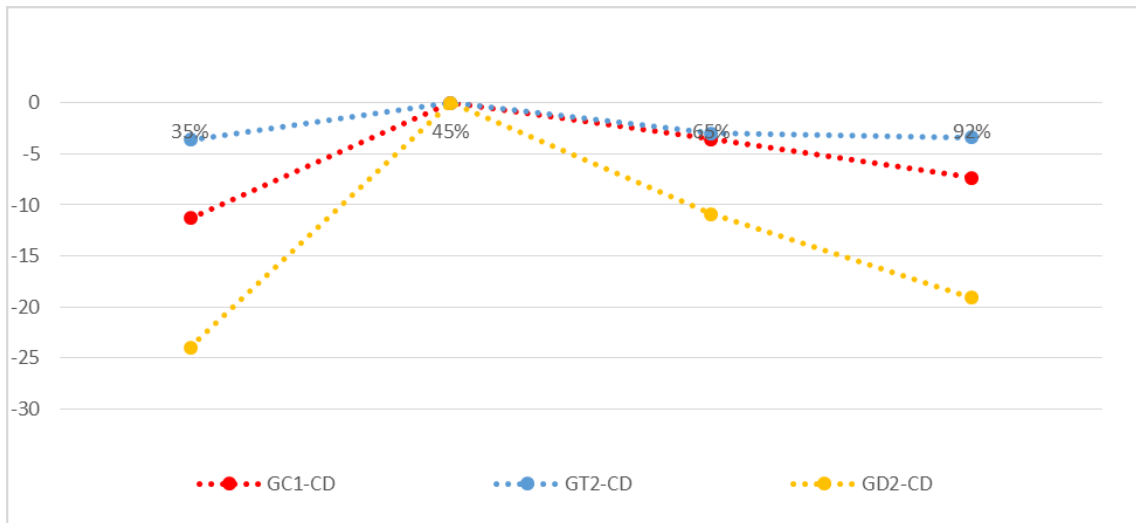
Iz grafikona 8. možemo primjetiti da kartoni naizgled nemaju toliko „šarolik“ prikaz kao papiri, jer se boje grafova prate u stopu, odnosno čvrstoće lijepljenih spojeva MD i CD smjerova se približavaju po iznosu. Stoga GC1 nedvojbeno daje najbolje rezultate, a prate ga GT2 i GD2. Veća debljina materijala, gramatura, kao i volumen, imaju izravan utjecaj na povećanje čvrstoće veze. Iz podataka o svojstvima materijala, saznajemo da GC1 ima lagani jednostrani premaz i 100% primarna vlakna u sastavu, dok preostali uzorci troslojni gornji i jednoslojni donji premaz. Oni smanjuju svojstvo upojnosti ili prodiranja ljepila u strukturu materijala, a reciklacijom se skraćuju vlakna pa se sve više smanjuje stabilnost mreže koja ih povezuje. To je još jedan razlog zbog čega je GC1 uzorak ostvario najveću čvrstoću adhezijske veze.

Kartoni GC1 i GT2 daju bolje rezultate čvrstoće u MD nego u CD smjeru. Razlog tome je što uzdužni smjer MD pruža veću otpornost prema kidanju i savijanju što je detaljnije objašnjeno kod lijepljenih spojeva papira koji su dali jednake rezultate. Za razliku od GC1 i GT2, čvrstoća kartona GD2 je veća u poprečnom nego u udužnom smjeru, ali se radi o malim vrijednostima. To možemo objasniti nehomogenošću lijepljenog spoja koja se javlja u strukturi ljepila u očvrnutom stanju. Do te nepravilnosti dolazi zbog nejednolikog nanosa ljepila kistom prilikom izrade uzoraka za ispitivanje, zaostalih nakupina zraka ili ostataka otapala.

Grafikon 9. Prikaz promjena čvrstoće lijepljenih spojeva kartona u MD smjeru u postocima u odnosu na standardne uvjete 45% RVZ



Grafikon 10. Prikaz promjena čvrstoće lijepljenih spojeva kartona u CD smjeru u postotcima u odnosu na standardne uvjete 45% RVZ



Svi ispitni uzorci imaju najveću čvrstoću pri 45% RVZ što je vidljivo iz grafikona 9. i 10., a najbolje rezultate daje karton GC1 smjera MD (8.766 N) pri standardnim uvjetima vlažnosti. Zaključujemo da je došlo do smanjenja čvrstoće materijala pri promjeni RVZ budući da nisu ostvareni optimalni uvjeti lijepljenja PVAc Signokol L ljepila na 65% RVZ. Pri uvjetima od 35% te 65% zabilježen je postepeni pad svih triju vrsta kartona MD, no čvrstoća im je neznatno porasla pri povećanju vlažnosti sa 65% na 92%. Tu je, najvjerojatnije, ključnu ulogu odigrala nehomogenost ljepila prilikom izrade uzoraka za ispitivanje. Iz grafikona 8. vidimo da kartoni CD postepeno bilježe pad s promjenama vlage. Najstabilniji lijepljeni spojevi s neznatnim promjenama u čvrstoći su kartoni GT2 za CD smjer te GC1 za MD smjer.

## 5. ZAKLJUČAK

Adhezijski testovi se provode iz razloga da možemo pouzdano predvidjeti karakteristike i procijeniti pouzdanost lijepljenog spoja kako bi se interpretirali rezultati i primijenili na praktičnu primjenu.

Ispitivanje je provedeno na 3 vrste papira i kartona koji u svom sastavu imaju 100% prirodna (RO i GC1), djelomično reciklirana (R30 i GT2), ili pak 100% reciklirana vlakna (R100 i GD2). Uzorci su najprije predkondicionirani na radne uvjete, zatim podvrgnuti postupku lijepljenja PVAc Signokol L ljepilom, prešanja i sušenja na tjedan dana. Iza toga slijedilo je izrezivanje na trakice zadanih dimenzija i kondicioniranje na različite uvjete vlažnosti (35%, 45%, 65% i 92%). Prije samog ispitivanja, uzorci su ostavljeni 4h na uvjetima u kojima se vršilo ispitivanje.

Na temelju dobivenih rezultata papira, ustanovili smo da sveukupno najveću čvrstoću lijepljenih spojeva ima papir RO u MD smjeru, ali i najmanju za suprotan smjer, dok R30 ima najveću čvrstoću u CD smjeru i, također, najmanju za suprotan smjer. Možemo zaključiti da se poboljšanjem kvalitete svojstava jednog, gubi na svojstvima drugog smjera. Zlatnoj sredini su se najviše približili uzorci R30 s najstabilnijim rezultatima. Stoga RO možemo najviše preporučiti kod uveza knjige jer je čvrstoća uzdužnog smjera vlakana koji teče paralelno s hrptom najvažnije svojstvo za postizanje čvrstoće i stabilnosti uveza.

Na temelju dobivenih rezultata kartona, ustanovili smo da sveukupno najveću čvrstoću lijepljenih spojeva ima karton GC1 za oba smjera vlakana. Ključnu ulogu u sačuvanju čvrstoće oba smjera odigrala je debljina dijelova koji se lijepe, volumen i gramatura čijim se povećanjem ujedno povećava adhezijska i kohezijska veza lijepljenog spoja. Budući da GC1 daleko prednjači datim rezultatima, možemo ga i najviše preporučiti za bilo koju svrhu u grafičkoj proizvodnji, bilo za uvez ili amabalažu.

Rezultati ispitivanja su pokazali da ispitnim materijalima najviše pogoduju standardni uvjeti pri kojima su pokazali najveće čvrstoće spojeva, uz izuzetak papira CD smjera koji su to isto svojstvo postigli pri 65% RVZ. No, radi se u iznimno malim vrijednostima, gotovo zanemarivima. Svukupnim pregledom grafova lako smo uočili već dokazano svojstvo da vlaga ima veći utjecaj na MD nego li na CD smjer. Grafovi MD imaju veće zakrivljenosti



pravaca, dok CD grafovi odražavaju čvrstoću gotovo konstantnom na različitim uvjetima vlažnosti.

Budući da često nemamo mogućnost izbora, već smo primorani koristiti isključivo ponuđene materijale, primijenjenim adhezijskim testom smo pokazali da je moguće predvidjeti ponašanje lijepljenih spojeva u realnim uvjetima te tako unaprijed spriječiti određene degradacije.

## 6. LITERATURA

- [1] Hadžija, Ž., Petković, G., Pasanec Preprotić, S.: *Utjecaj korištene tehnike lijepljenja na čvrstoću uveza knjige*, dostupno na: <https://bib.irb.hr/prikazi-rad?&rad=865717> (15.07.2017.)
- [2] Potisk, V.: *Grafička dorada*, Školska knjiga, Zagreb, 1997.
- [3] Gojić, M.: *Tehnike spajanja i razdvajanja materijala*, Metalurški fakultet, Sisak, 2008.
- [4] Žolo, I.: *Lijepljenje polimernih materijala*, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Slavanskom Brodu, 2008.
- [5] Bujanić B., Magdalenić Bujanić J.; *Mehanizmi stvaranja lijepljenog spoja*; dostupno na: [hrcak.srce.hr/file/124722](http://hrcak.srce.hr/file/124722) (01.07.2017.)
- [6] <https://www.iddavis.com/glue-products/hot-melt-glue-distributor/pur-glue/> (15.07.2017.)
- [7] Hadžija, Ž.: *Ispitivanje čvrstoće knjižnog bloka bešavne forme uveza ovisno o tehnici lijepljenja*, Diplomski rad, Grafički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2016.
- [8] Petrović, M.: *Čvrstoća knjige u ovisnosti odnosa papira i ljepila*, Diplomski rad, Grafički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2011.
- [9] Fakultet strojarstva i brodogradnje, Katedra za elemente strojeva i konstrukcija: *Lijepljeni spojevi*, dostupno na: <http://www.fsb.unizg.hr/elemstroj/skripte-os.htm> (01.07.2017.)
- [10] Lukačević, Z. s grupom autora: *Nove tehnologije*, Grafik Color, Slavonski Brod, 1998.
- [11] Golubović, A.: *Svojstva i ispitivanje papira*, Hrvatska tiskara, Zagreb, 1993.
- [12] Laszlo Ž., Dragojević A.: *Priručnik preventivne zaštite umjetnina na papiru*, Crescat, Zagreb, 2010.
- [13] Domitran, Z., Pilipović, A., Stojšić, J.: *Lijepljenje polimernih kompozitnih tvorevina*, dostupno na: [file:///C:/Users/Adriana/Downloads/tv\\_16\\_2009\\_2\\_059\\_066%20\(4\).pdf](file:///C:/Users/Adriana/Downloads/tv_16_2009_2_059_066%20(4).pdf) (01.07.2017.)
- [14] [https://www.techsil.co.uk/media/wysiwyg/pdf/Adhesive\\_Testing.pdf](https://www.techsil.co.uk/media/wysiwyg/pdf/Adhesive_Testing.pdf) (15.07.2017.)
- [15] Mittal K. L., Pizzi A.: *Handbook of Adhesive Technology, Revised and Expanded*, CRC Press, 2003.
- [16] Lozo, B.: *Doprinos optimiranju kvalitete novinskog papira*, Magistarski rad, Grafički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2004.
- [17] <http://files.instrument.com.cn/bbs/upfile/2007121814614.pdf> (16.07.2017.)
- [18] <http://www.testresources.net/applications/test-types/shear-test/> (16.07.2017.)

- [19] Ebnesajjad, S.: *Adhesives Technology Handbook*, William Andrew, Norwich, New York, USA, 2008.
- [20] <http://www.testresources.net/applications/test-types/peel-test/> (16.07.2017.)
- [21] [www.dtic.mil/get-tr-doc/pdf?AD=ADA312617](http://www.dtic.mil/get-tr-doc/pdf?AD=ADA312617) (19.07.2017.)
- [22] [http://www.elcometer.com/images/stories/PDFs/Pull-Off\\_Adhesion\\_Testing\\_of\\_Coatings\\_Improve\\_Your\\_Technique.pdf](http://www.elcometer.com/images/stories/PDFs/Pull-Off_Adhesion_Testing_of_Coatings_Improve_Your_Technique.pdf) (19.07.2017.)
- [23] <https://www.astm.org/Standards/D4541.htm> (20.07.2017.)
- [24] <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D4541-02.htm> (20.07.2017.)

## 7. POPIS TABLICA

|   |    |
|---|----|
| Tablica 1. Svojstva PVAc ljepila.....   | 10 |
| Tablica 2. Međunarodne organizacije standarda uključene u ljepilo i brtvilo.....  | 23 |
| Tablica 3. Neki ASTM standardi za ljepilo .....   | 24 |
| Tablica 4. Rezultati mjerenja čvrstoće lijepljenih spojeva papira (R0, R30, R100) izloženih 35% RVZ (jedinica N).....   | 35 |
| Tablica 5. Rezultati mjerenja čvrstoće lijepljenih spojeva papira (R0, R30, R100) izloženih 45% RVZ (jedinica N).....   | 35 |
| Tablica 6. Rezultati mjerenja čvrstoće lijepljenih spojeva papira (R0, R30, R100) izloženih 65% RVZ (jedinica N).....   | 36 |
| Tablica 7. Rezultati mjerenja čvrstoće lijepljenih spojeva papira (R0, R30, R100) izloženih 92% RVZ (jedinica N).....   | 36 |
| Tablica 8. Rezultati mjerenja čvrstoće lijepljenih spojeva kartona (GC1, GT2, GD2) izloženih 35% RVZ (jedinica N) .....   | 37 |
| Tablica 9. Rezultati mjerenja čvrstoće lijepljenih spojeva kartona (GC1, GT2, GD2) izloženih 45% RVZ (jedinica N) .....   | 37 |
| Tablica 10. Rezultati mjerenja čvrstoće lijepljenih spojeva kartona (GC1, GT2, GD2) izloženih 65% RVZ (jedinica N) .....  | 38 |
| Tablica 11. Rezultati mjerenja čvrstoće lijepljenih spojeva kartona (GC1, GT2, GD2) izloženih 92% RVZ (jedinica N) .....  | 38 |
| Tablica 12. Izdvojene aritmetičke sredine mjerenja čvrstoće lijepljenih spojeva papira ovisne o RVZ.....  | 39 |
| Tablica 13. Povećanje/smanjenje čvrstoće lijepljenih spojeva papira u odnosu na standardne uvjete 45% RVZ.....  | 39 |
| Tablica 14. Izdvojene aritmetičke sredine mjerenja čvrstoće papira (bez lijepljenja) pri standardnim uvjetima; ispitivanje izvršeno na FRANK kidalici .....             | 39 |
| Tablica 15. Izdvojene aritmetičke sredine mjerenja čvrstoće lijepljenih spojeva kartona ovisne o RVZ.....   | 43 |
| Tablica 16. Povećanje/smanjenje čvrstoće lijepljenih spojeva kartona u odnosu na standardne uvjete 45% RVZ.....   | 44 |
| Tablica 17. Izdvojene aritmetičke sredine mjerenja čvrstoće materijala kartona (bez lijepljenja) pri standardnim uvjetima; ispitivanje izvršeno na FRANK kidalici ..... | 44 |

## 8. POPIS SLIKA

|  |    |
|--|----|
| Slika 1. Privlačne sile u lijepljenom spoju .....  | 5  |
| Slika 2. Prikaz mehaničkog sidrenja.....   | 6  |
| Slika 3. Prikaz difuzije .....   | 6  |
| Slika 4. Kut močenja .....   | 7  |
| Slika 5. Dobro pripremljena površina .....   | 14 |
| Slika 6. Slabo pripremljena površina.....  | 14 |
| Slika 7. Princip rada uređaja za određivanje otpornosti prema kidanju i prekidnom<br>rastezanju..... | 20 |
| Slika 8. Princip rada uređaja za određivanje otpornosti prema savijanju.....                         | 21 |
| Slika 9. Smjer djelovanja sila na uzorak podvrgnut testu istezanja.....                              | 25 |
| Slika 10. Smjer djelovanja sila na uzorak podvrgnut testu smicanja .....                             | 26 |
| Slika 11. Smjer djelovanja sila na uzorak podvrgnut testu ljuštenja .....                            | 27 |
| Slika 12. Smjer djelovanja sila na uzorak podvrgnut testu kompresije.....                            | 28 |
| Slika 13. Smjer djelovanja sila na uzorak podvrgnut testu vezivanja .....                            | 29 |
| Slika 14. Uređaj za ispitivanje čvrstoće papira prema kidanju.....                                   | 30 |
| Slika 15. Priprema uzoraka; označavanje.....   | 32 |
| Slika 16. Uzorci prije rezanja na završne dimenzije .....  | 33 |
| Slika 17. Eksikator.....   | 34 |

## 9. POPIS GRAFIKONA

|   |    |
|---|----|
| Grafikon 1. Prikaz promjena čvrstoće lijepljenih spojeva papira u MD smjeru ovisne o RVZ .....  | 40 |
| Grafikon 2. Prikaz promjena čvrstoće lijepljenih spojeva papira u CD smjeru ovisne o RVZ .....  | 40 |
| Grafikon 3. Zajednički prikaz promjena čvrstoće lijepljenih spojeva papira u MD i CD smjeru ovisne o RVZ.....                         | 41 |
| Grafikon 4. Prikaz promjena čvrstoće lijepljenih spojeva papira u MD smjeru u postotcima u odnosu na standardne uvjete 45% RVZ .....  | 42 |
| Grafikon 5. Prikaz promjena čvrstoće lijepljenih spojeva papira u CD smjeru u postotcima u odnosu na standardne uvjete 45% RVZ .....  | 43 |
| Grafikon 6. Prikaz promjena čvrstoće lijepljenih spojeva kartona u MD smjeru ovisne o RVZ.....  | 44 |
| Grafikon 7. Prikaz promjena čvrstoće lijepljenih spojeva kartona u CD smjeru ovisne o RVZ.....  | 45 |
| Grafikon 8. Zajednički prikaz promjena čvrstoće lijepljenih spojeva kartona u MD i CD smjeru ovisne o RVZ.....                        | 45 |
| Grafikon 9. Prikaz promjena čvrstoće lijepljenih spojeva kartona u MD smjeru u postotcima u odnosu na standardne uvjete 45% RVZ ..... | 46 |
| Grafikon 10. Prikaz promjena čvrstoće lijepljenih spojeva kartona u CD smjeru u postotcima u odnosu na standardne uvjete 45% RVZ..... | 47 |