

# Istraživanje čvrstoće ambalaže od valovitog kartona u kondicioniranim uvjetima

---

**Jurečić, Denis**

**Doctoral thesis / Doktorski rad**

**2015**

*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:216:173426>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-15**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Graphic Arts Repository](#)





Sveučilište u Zagrebu  
GRAFIČKI FAKULTET

mr. sc. Denis Jurečić, dipl. graf. ing.

**Istraživanje čvrstoće ambalaže od  
valovitog kartona u kondicioniranim  
uvjetima**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2015.



University of Zagreb

GRAPHIC FACULTY

mr. sc. Denis Jurečić, Bsc. graph. ing.

**The research strength of the  
packaging of corrugated cardboard  
in terms of conditioned**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2015.



Sveučilište u Zagrebu

GRAFIČKI FAKULTET

mr. sc. Denis Jurečić, dipl. graf. ing.

**Istraživanje čvrstoće ambalaže od  
valovitog kartona u kondicioniranim  
uvjetima**

DOKTORSKI RAD

**Mentor: dr. sc. Darko Babić, redoviti profesor  
Grafičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu**

Zagreb, 2015.

UDK:	621.798-035.4:620.17
Znanstveno područje:	tehničke znanosti
Znanstveno polje:	grafička tehnologija
Institucija u kojoj je izrađen rad:	Grafički fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Voditelj rada:	dr. sc. Darko Babić, prof.
Broj stranica:	105
Broj slika, dijagrama i grafova:	61
Broj tablica:	22
Broj literaturnih referenci:	47
Jezik teksta:	hrvatski
Jezik sažetaka:	hrvatski i engleski

Članovi povjerenstva za ocjenu doktorskog rada:

1. prof. dr. sc. Vilko Žiljak, Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet, predsjednik,
2. prof. dr. sc. Branka Lajić, Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet, član,
3. doc. dr. sc. Zvonimir Sabati, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet organizacije i informatike, vanjski član,

Rad je pohranjen u knjižnici Grafičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Getaldićeva 2, te u Nacionalnoj i sveučilišnoj biblioteci u Zagrebu, Hrvatske bratske zajednice bb.

*Zahvaljujem se svom mentoru dr. sc. Darku Babiću, redovitom profesoru na stručnim savjetima prilikom izrade ovog rada kao i ostalim članovima Komisije.*

# Sažetak

---

Kutije od valovitog kartona za pakiranje voća i povrća susreću se na svom distribucijskom putu od proizvođača do potrošača s vrlo promjenljivim vremenskim uvjetima. Distribucijski put podrazumjeva najčešće dulji boravak u različitim hladnjačama pri prijevozu i skladištenju te kratkotrajno izlaganje vanjskim atmosferskim uvjetima pri pretovaru. U hladnjačama, radi očuvanja kvalitete i kvantitete voća i povrća, vladaju definirani uvjeti temperature i vlažnosti dok u vanjskoj okolini oni variraju. Izloženost tim promjenama ima nepovoljan utjecaj na mehanička svojstva valovitog kartona a posljedica je značajno smanjenje vijeka trajanja kutije.

Cilj ovog istraživanja je razviti model ambalaže od valovitog kartona za predviđanje njene čvrstoće na tlačno opterećenje, bazirano na kondicioniranim uvjetima relativne vlažnosti i temperature okoline. Kako je agrokulturnoj industriji primarna briga težina i kvaliteta voća i povrća dok je ambalaža nužan izdatak koja mora opstati u datim uvjetima uz minimalan trošak. Cilj je otkriti informacije kojima ćemo odrediti donju granicu kvalitete kutije od valovitog kartona a kod koje postoji minimalna mogućnost njenog loma.

Ispitivano je šest kvaliteta peteroslojnog valovitog kartona sa različitim kompozicijama slojeva papira različitih gramatura. Ispitivani su papiri od kojih je izrađen valoviti karton te kutije izrađene od tog valovitog kartona. Ispitivana je gramatura, debljina, otpornost na prskanje po Mullenu, otpornost horizontalne površine valovitog kartona na tlačnu čvrstoću, otpornost vertikalne površine valovitog kartona na tlačnu čvrstoću, sadržaj vlage u valovitom kartonu, otpornost valovitog kartona na dinamičko probijanje, otpornost kutije od valovitog kartona na tlačnu čvrstoću, relativna vlažnost zraka u hladnjači, relativna vlažnost zraka u okolini, temperatura hladnjače i temperatura okoline. Brojna mjerenja su interpretirana regresijskom analizom.

Rezultati pokazuju velika odstupanja temperature i relativne vlažnosti zraka hladnjače i okoline. Prosječna razlika u temperaturi između hladnjače i vanjske okoline iznosi 23,88°C, dok je prosječna razlika relativne vlažnosti zraka u odnosu na okolinu 22,58%. Toplinska šokiranja kojima su bili izloženi uzorci kutija pokazuju velika odstupanja u tlačnoj čvrstoći. Uzorcima 2KŠ i 2KŠ-E tlačna čvrstoća pala je za 40% i nakon samo dva dana došlo je do

urušavanja kupova na paleti. Ostali uzorci izdržali su ove drastične promjene. Mjeranja pokazuju da pad tlačne čvrstoće kod svih uzraka prati istovremeno veliko povećanje sadržaja vlage.

**Zaključak.** Cikličke promjene relativne vlažnosti zraka uz zanemarivi utjecaj vremena trajanja opterećenja drastično smanjuju nominalnu tlačnu čvrstoću kutija od valovitog kartona. Skladištenje voća u hladnjači zahtjeva upotrebu visokokvalitetnih kartona proizvedenih od visokokvalitetne nericiklirane sirovine.

**Preporuke.** Predlaže se analiza mjerenja kontrole kvalitete papira za ravni i valoviti sloj u samom proizvodnom procesu njegove izrade. Ovi podaci mogli bi se iskoristiti za određivanje utjecaja na graničnu tlačnu izdržljivost svakog sloja valovitog kartona kao i graničnu tlačnu izdržljivost kutije. Predlaže se i postavljanje barijere za vlagu na površinu valovitog kartona ali ta odluka trebala bi se bazirati na studiji o veličini i stupnju kruženja vlage.



# Summary

---

Boxes made from the corrugated board for packing the fruit and vegetables meet very changeable weather conditions on their distribution way from the producer to the consumer.

Longer stay in different cold storage plants during the transport and storage as well as the short exposition to the outer atmospheric conditions during the reloading is understood under the distribution way. In the cold storage plants, for preserving the quality and the quantity of the fruit and vegetable, there are defined conditions of temperature and humidity while in the outer environment they vary. The exposition to these changes has an unfavourable influence on the mechanical properties of the corrugated board and the consequence is the considerably decrease of the boxes lifespan.

The aim of this investigation is to develop the model for prediction the box strength on the compression load, based on the conditioned state of relative humidity and the temperature in the environment. As the weight and the quality of fruit and vegetables is the primary care in the agricultural industry, the packaging is necessary expense which must survive in the given conditions with minimal costs. The aim is to find out the information which will determine the lower boundary of the corrugated box quality and the minimal possibility of its breakdown.

Six qualities of the double – wall corrugated board with different composition of paper layers of different grammage were investigated. The papers used for the production of the corrugated board and the boxes produced from that corrugated board were investigated. The grammage, the thickness, the burst resistance per Mullen, the resistance of the horizontal surface of the corrugated board to compression strength, the resistance of the vertical surface of the corrugated board to compression strength, the humidity content in the corrugated board, the resistance of the corrugated board to dynamic penetration, the resistance of the corrugated board to compression strength, relative humidity of the air in the cold storage plant, relative humidity of the air in the environment, temperature of the cold storage plant and the temperature of the environment were tested. Numerous measurements were interpreted by the regression analysis.

The results show great aberrations of temperature and relative humidity of the air in the cold storage plant and in the environment. The average difference in temperature between the cold storage plant and the outer surroundings was 23,88°C, while the average difference of the relative humidity of the air in regard to the environment was 22,58%. The thermal shock to which the box samples were exposed showed great aberrations in the compression strength. The compression strength of the samples 2KŠ and 2KŠ-E was decreased for 40%, and after only two days the stacks on the pallet imploded. The rest of the samples survived these drastic changes. Measurements show that the decrease of the compression strength of all the samples follows the simultaneous great humidity content increase.

Conclusion: The cyclic changes of the relative humidity in the air, with the negligible influence of the time duration drastically decrease the nominal compression strength of the corrugated boxes. The storage of the fruit in the cold storage plants demands the usage of the high quality boards produced from the high quality non recycled raw material.

The analysis of the paper quality control measurements for the flat and wall layer is suggested in its production process. These data could be used for determining the influences on the boundary compression durability of each layer of the corrugated board as well as the boundary compression durability of the boxes. The setting of the humidity barrier on the surface of the corrugated board is also suggested. This decision however should be based on the size and on the degree of the humidity circulation.

# Sadržaj

---

## SAŽETAK

## SUMMARY

<b>1. UVOD I PREGLED PODRUČJA ISTRAŽIVANJA</b> .....	1
1.1. Faktori koji utječu na čvrstoću ambalaže od valovitog kartona .....	8
1.1.1. Sastavnice valovitog kartona .....	8
1.1.2. Proizvodni proces izrade valovitog kartona .....	14
1.1.3. Reologija valovitog kartona .....	16
<b>2. CILJ ISTRAŽIVANJA I HIPOTEZE</b> .....	23
<b>3. METODOLOGIJA RADA</b> .....	28
3.1. Plan i metode istraživanja .....	28
3.2. Označavanje uzoraka .....	32
3.3. Regresijska analiza .....	35
3.4. Algoritmi mjerenja debljine papira i praznih međuprostora u valovitom kartonu .....	36
<b>4. REZULTATI I RASPRAVA</b> .....	38
4.1. Mjerenje ravnih i valovitih slojeva valovitog kartona neinvazivnom metodom .....	38
4.2. Rezultati ispitivanja za valoviti karton AS-0 .....	43
4.3. Rezultati ispitivanja za valoviti karton AS-1 .....	51
4.4. Rezultati ispitivanja za valoviti karton 3KSE .....	58
4.5. Rezultati ispitivanja za valoviti karton BTKE/2F .....	64
4.6. Rezultati ispitivanja za valoviti karton 2KŠ-E .....	69
4.7. Rezultati ispitivanja za valoviti karton 2KŠ .....	73
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	80
<b>6. LITARATURA</b> .....	83
<b>POPIS TABLICA I SLIKA</b> .....	88
<b>POPIS OBJAVLJENIH RADOVA</b> .....	92
<b>ŽIVOTOPIS</b> .....	98

# UVOD I PREGLED PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

---

Rad „Istraživanje čvrstoće ambalaže u kondicioniranim uvjetima“ obuhvaća parametre koji utječu na mehanosorpcijska svojstva valovitog kartona uslijed drastičnih promjena temperature i relativne vlažnosti zraka. Na Grafičkom fakultetu se obrađuje ova tema kroz znanstvene projekte, izučavanju na kolegijima te u neposrednoj suradnji s industrijom ambalaže. Otvorena su mnoga poglavlja koja su usmjerila ova istraživanja prema veličinama održivosti ambalaže u ekstremnim situacijama. Razvijeni su modeli ambalaže u kondicioniranim uvjetima. Oni osiguravaju točne pretpostavke o tlačnoj čvrstoći kutija i daju mogućnost proizvođačima i korisnicima tih kutija da bolje procijene utjecaje promjena na valovitom kartonu. Eksperiment na modelu bazira se na mjerenjima realnih ambalažnih uzoraka da bi se izbjegla skupa testiranja u proizvodnji. Opća istraživanja čvrstoće ambalaže od valovitog kartona uključuju statističku metodu kojima se obrađuju podaci mjerenja širokog utjecaja vlage na njih. Razvijaju se algoritmi koji precizno definiraju odnose količine papirnatih slojeva i praznih međuprostora u valovitom kartonu [26]. Dosadašnja istraživanja najistaknutijih autora tretiraju valoviti karton kao viskoelastičan materijal koji se širi adsorpcijom vlage [11]. Njegova najvažnije mehaničko svojstvo je otpornost na tlačnu čvrstoću [25]. Faktori koji utječu na čvrstoću kutija od valovitog kartona u hladnjačama su: svojstva valovitog kartona, temperatura i vlaga u hladnjači, temperatura i vlaga u kutiji, te adsorpcija i desorpcija vlage.

Kutije od valovitog kartona imaju važnu ulogu kod skladištenja, transporta i prodaje voća i povrća. Cijena kutija u agrokulturnoj industriji nije zanemariva pa bilo kakva ušteda na pakiranju može povećati profit te industrije. Zapakirano voće i povrće može provesti i do pola godine u hladnjači na niskoj temperaturi i velikoj vlažnosti. Skladištenje u hladnjačama zahtjeva upotrebu visoko kvalitetnih kartona proizvedenih od visokokvalitetne sirovine sa ravnim slojem te valovitim srednjim slojem ljepljenim voodootpornim ljepilom. Spomenute prethodne studije i praktična iskustva u hladnjačama pokazuju da vlaga ima dominantni utjecaj na čvrstoću valovitog kartona. U uvjetima velike vlažnosti i niske temperature, kod

---

hladnjača u kojima se čuva voće i povrće, valoviti karton adsorbira vlagu i gubi na tlačnoj čvrstoći. Istraživani faktori ograničeni su na temperaturu i vlažnost hladnjače. Ostali faktori, kao npr. kako su kutije s proizvodima prevezene i naslagane, također utječu na svojstva valovitog kartona, ali su ti utjecaji van dosega ovog istraživanja.



Slika 1. Deformiranje kutije pod opterećenjem vlastite težine i sadržaja

Vlaga ima dominantnu ulogu u čvrstoći abalaže pa je stanje ambalaže u jako prelaznim kondicioniranim uvjetima od velikog interese za izučavanje općih sustava pakiranja s valovitim kartonima. Ako se vlazi doda varijabla temperatura i vlačne sile u transportu, tada se postavlja sadržaj istraživanja prema konkretnim primjenama. Na slici 1 prikazano je defeormiranje ambalažne kutije (Hladnjača-Agroprerada d.d.). Kutija na dnu bi se i više deformirala da u njoj nema jabuka. Povezujemo čvrstoću ambalaže za transport voća i povrća

u sustavima hladnjača i vanjskim meteorološkim stanjima. Te izmjene okoline potakle su mnoge istraživače da stvaraju svoje modele kojima bi najbolje opisali međuzavisnosti veličina koje su odgovorne za takove primjene. Pojedini autori su davali naglasak na nekim varijablama što govori da su se usredotočili na ciljane situacije. Gotovo svi su razmatrali varijable:

- geometrijski oblik i njegov odnos prema čvrstoći savijanja,
- visina vala,
- omjer perioda i bočnog kuta,
- način i vrsta ljepljenja,
- temperatura u nekoliko točaka; izrada valovitog kartona, u procesu pakiranja i stanju prije i poslije utjecaja vlage,
- vrsta materijala: celuloza, poluceluloza, lignin
- tlačna čvrtoća brida valovitog kartona

Opsežan pregledni članak je sakupljen u radu A.L. Nevinsa [37] gdje su pobrojani i spomenuti rezultati drugih autora. A.L. Nevins je interpretirao rezultate u cilju izvođenja analitičkih povezanosti varijabli koje opisuju valoviti karton najviše s geometrijske strane i odnosa prema čvrstoći ambalaže. Manje su iznesena istraživanja obzirom na kondicioniranje što se u ovom radu postavlja kao ciljano istraživanje. Autor se najviše bavi pregledom drugih članaka bez njihove međusobne povezanosti i razlika. Nema dublje kritike o korisnosti njihovih izvještaja. Ne kritizira iznesene modele, niti njihovu matematičku interpretaciju. Ipak, taj vrijedan pregledan rad daje sistematičan uvid u dosadašnja ispitivanja o kvaliteti primjene ambalaže od valovitog kartona; Whitsitt i Markstrom [35, 41, 46, 47] matematički su opisali da je čvrstoća savijanja proporcionalna kvadratu debljine valovitog kartona. Maksimalna debljina valovitog kartona je funkcija visine vala i debljine ravnog sloja. Svojstva valovitog kartona na koje se, na temelju čvrstoće kutije na tlak, može utjecati tijekom procesa proizvodnje valovite ljepenke su njegova debljina, oblik i proces izrade vala, temperatura i vlaga u kartonu. Tokom i nakon proizvodnje valovitog kartona debljina se može smanjiti tlakom. Fellers i Carlsson [20, 21] svojim analitičkim relacijama ukazuju da je čvrstoća savijanja proporcionalna kubu debljine. Nije razložio odnos prema slojevima i načinu njihova ljepljenja što bi doprinjelo diskusiji o vlažnosti. Urbanik [44] je modelirao utjecaj oblika vala, uključujući visinu vala, visinu do vrha, bočni kut i faktor vala, na tlačnu čvrstoću brida i čvrstoću savijanja valovitog kartona. Na temelju njegova modela, mali postotak

smanjenja visine vala iz proizvodnje tokom formiranja vala uzrokuje smanjenje tlačne čvrstoće na brid do 3%. To smanjenje debljine tokom proizvodnje povećava se korištenjem rebrastih valjaka s manjim profilom vala ili većom zategnutošću valovitog sloja.

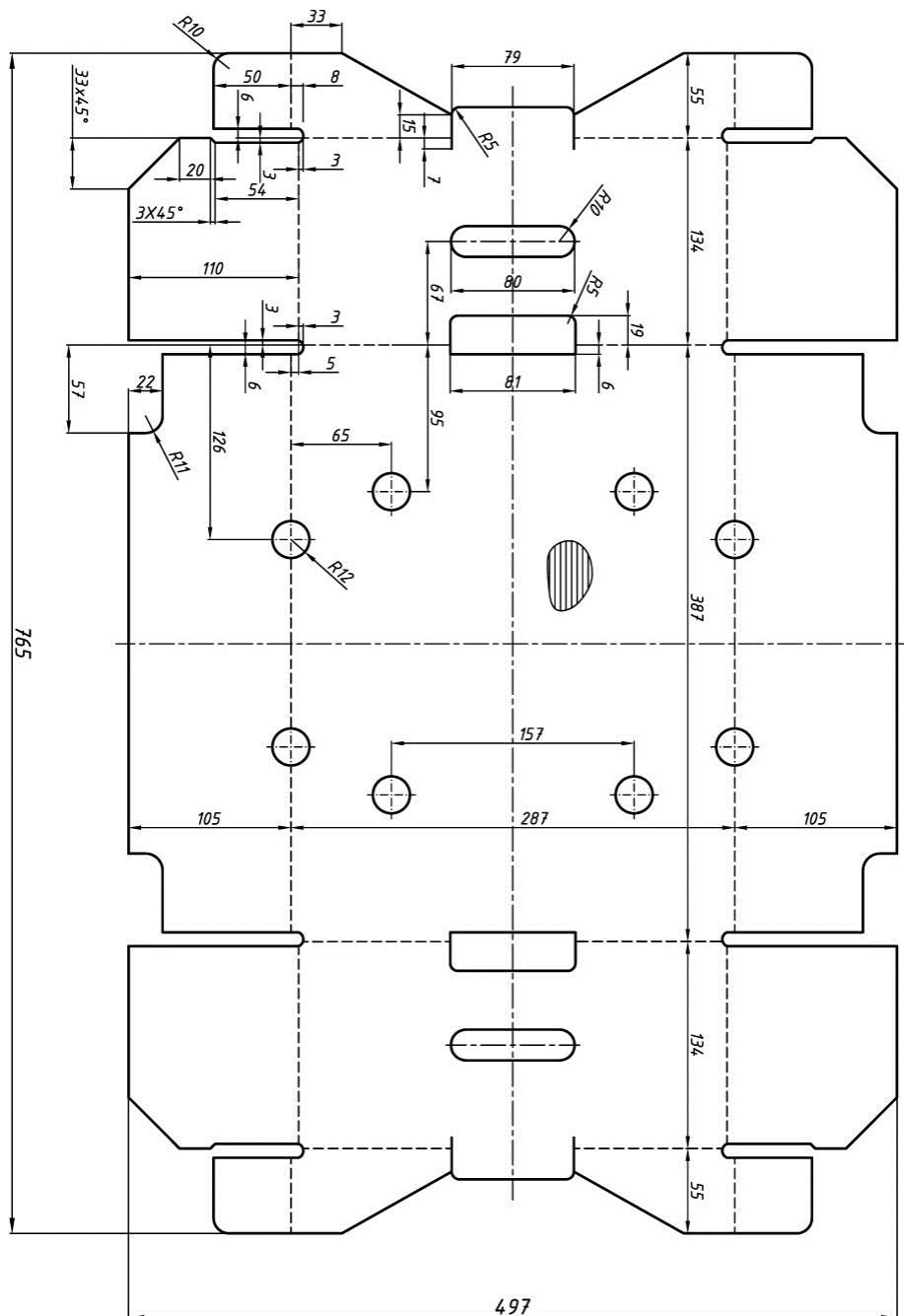
Kroeschell [31] tvrdi, na temelju teoretske analize, da gnječenje ploče valovitog kartona utječe na tlačnu čvrstoću brida tako da smanjuje debljinu na razinu visine, što dovodi do poteškoća kod savijanja. Tvrdi da je utjecaj gnječenja na tlačnu čvrstoću brida varijabilan. On je također istražio da tlačna čvrstoća na brid valovite ljepenke ovisi o površinskoj adheziji do određene vrijednosti iznad koje nema utjecaja na tlačnu čvrstoću na brid. On tvrdi da je površinska adhezivna čvrstoća od 400N/m samo pola čvrstoće koja se inače smatra minimumom. Wennerblom-ova [45] istraživanja nalaze da utjecaji poput svojstava ravnog i valovitog sloja, sastava škroba, sadržaja tvari škroba i brzina izrade vala ne utječe na čvrstoću površinske adhezije krajnjeg valovitog kartona. Prema njemu, jedini faktor koji utječe na čvrstoću površinske adhezije je količina korištenog škroba. Autor nije uključio odnos škroba prema vlažnosti nosioca svih dijelova kartona što bi napravilo opsežan zahvat u dokazu realne primjenjivosti različitih valovitih kartona. Schape [40] iznosi da je utjecaj čvrstoće adhezije na tlačnu čvrstoću brida valovitog kartona iznad 730 N/m minimalan i nije statistički bitan. Salmen i Back [17, 39] mjerili su utjecaj temperature i vlage prema modulu elastičnosti kraft papira. McKee [36] je objavio dvije jednačbe koje predviđaju tlačnu čvrstoću kutija od valovitog kartona. One daju pretpostavke o čvrstoći kutije na tlak iz laboratorijskih mjerenja otpornosti na brid i otpornosti na savijanje. Kako bi predvidjeli tlačnu čvrstoću kutija u hladnjačama koristeći McKee-ovu jednačbu, testovi se moraju raditi s uzorcima koji su na istim temperaturama i s istim sadržajem vlage, što u ovom radu nije moguće obzirom smo uzorke kutija izlagali realnim stanjima vanjske temperature i vlage. Prepoznato je da temperatura i vlaga utječu na svojstva čvrstoće papira i valovitog kartona, ali ti utjecaji nisu dobro istraženi jer prijašnja ispitivanja nisu pokrila sva svojstva ili su se koristili različiti uzorci. Kawanishi [27] je mjerio utjecaj vlage na svojstva čvrstoće valovitog kartona i razvio je empirijsku formulu za predviđanje tlačne čvrstoće kutije za kartone za omatanje i pravilno izrezane kartone. Istraživao je sedam ulaznih parametara, no sve osim sadržaja vlage i debljine bili su parametri konstrukcije kutije. Ti parametri konstrukcije kutije generalno su utvrđeni krajnjim korištenjem i iz tog razloga oni su nepromjenjivi. Njegova formula pokazuje da je značajan utjecaj na tlačnu čvrstoću kutije najvećim dijelom imao sadržaj vlage u bočnim stranama kutije. Sadržaj vlage u valovitom kartonu ovisit će o uvjetima u okolini, a

debljina je prvenstveno ovisna o profilu vala na papir stroju, no može biti smanjena lomom valovitog kartona tokom i nakon proizvodnje. Nedostatak ove formule je u tome što autor ne navodi nikakve podatke o tome kolike su varijacije u faktoru vala ili broju valova. U cilju optimiziranja čvrstoće i minimaliziranja štete valovitog kartona, na temelju analize Kawanishi-eve formule, sadržaj vlage valovitog kartona trebalo bi držati što nižim. Analiza također sugerira da bi u ravnom sloju papirna vlakna trebala biti većih proporcija, na trošak valovitog sloja. Kellicut i Landt [28, 29] izveli su jednadžbu koja predviđa tlačnu čvrstoću kutije na temelju parametara dizajna kutije i testa ukupne čvrstoće na gnječenje valovitog kartona. Taj izraz označava da je tlačna čvrstoća kutije izravno proporcionalna čvrstoći ravnog sloja na gnječenje. Chalmers [14, 15, 16] promatra utjecaj relativne vlažnosti na svojstva čvrstoće papira na tlačnu čvrstoću i istezanje. Postoji diskusija o troslojnom uzorku valovitog kartona s uskom primjenom obzirom na dimenziju kutija. Benson [12] je mjerio linearan odnos čvrstoće papira na istezanje i sadržaja vlage. On tvrdi da vlačno naprezanje mjerenih uzoraka kraft kartona slijedi linearan trend u odnosu na sadržaj vlage, do 13% vlage. U radu „*Tlačna čvrstoća valovitog kartona u ovisnosti o vlažnosti okoline*“; Babić, [8] napominje nužnost odabira kvalitetnih materijala te opisuje nelinearne trendove kod ovisnosti čvrstoće kutije o njenoj konstrukciji. Maltenfort [34] tvrdi da su uzorci pod konstantnim istezanjem ili tlakom izloženi puzanju (eng. Mechanosorptive Creep). To dovodi do deformacija koje mogu uzrokovati lom uzorka nakon što se produži vrijeme testiranja više nego to dozvoljavaju konstantni laboratorijski testovi. Puzanje kartona pokazuje ovisnost o promjenjenom naprezanju i sadržaju vlage uzoraka. Taj proces značajno se povećava cikličkim promjenama sadržaja vlage uzorka uz pomoć cikličkih promjena vlažnosti zraka [9,11,18]. Ovaj se proces može opisati krivuljom puzajućih deformacija koja prikazuje ovisnost tlačne čvrstoće o vremenu, ravnomjerno naslaganih kutija jedne na drugu. Krivulja ima tri područja. U prvom području razina deformacija brzo raste, u drugom se stabilizira na konstantnu razinu dok se u trećem deformacija naglo povećava nakon čega slijedi lom kutije (kutija). Povećanje razine apsorpcije i desorpcije vlage ne pospješuje razinu puzanja. Korištenje vodootpornog adheziva smanjuje razinu puzanja uzoraka za testiranje tlačne čvrstoće brida valovitog kartona u okolini cikličke vlage [10]. Da bi se predvidio uravnoteženi sadržaj vlage u valovitom kartonu potrebna su saznanja o odgovarajućim izotermama sorpcije i uvjetima okoline. Većina objavljenih izoterma za karton izmjerene su na sobnoj temperaturi od 20-25°C. Eagleton i Marcondes [19] objavljuju najkorisniju kolekciju izoterma za valoviti



karton. Mjerenjem širokog raspona temperature od 1-40°C uz relativnu vlažnost zraka od 42-96%, dokazan je njen značajan utjecaj, posebno oko 0°C.

U ovom radu se diskutiraju rezultati ispitivanja s naglaskom prema vrsti ambalaže koja je najbližnja tipu „Holandez“, slika 2. To je nacrt kutije sa oznakama dimenzija, žlijebljenja i izrezivanja.



Slika 2. Prirez kutije za voće i povrće tipa „Holandez“

Ova vrsta ambalaže je najčešća u transportu voća koje prolazi kroz višednevno kondicioniranje. Kutije nisu zasebno spremljene u hladnjači već su naslagane u vertikalnom nizu zajedno s unutarnjim sadržajem, najčešće voćem i povrćem. Čvrstoća valovite ambalaže ispitivana je na veoma divergentne načine obzirom na vlagu, kondicionire uvjete i primjenu. Autori ovih istraživanja uveli su matematičke modele kako bi našli analitičke međuzavisnosti varijabli koje smatraju odgovornim za te pojave [5, 6, 7, 32]. Čvrstoći ambalaže pristupali su na različite načine. Od ispitivanja pojedinačnih uzoraka do kutija s opterećenim sadržajem. U istraživanjima za ovaj rad izvedena su mjerenja do situacija loma zbog istežanja kutije u nekoliko različitih kondicioniranih stanja. Mjerenja deformacija zbog nekoliko naslaganih kutija interesantno je u primjeni „puzanja“ cijelog paketa. Izvlačenje iz hladnjače je vitalno za održivost tehnologije Holadez kotija u složenom transportu koji prolazi kroz različita stanja pod izmjenama vlažnosti. Sama vlažnost ima slijedeći korak: sušenje kod kojeg se valoviti karton deformira, razljepljuje a potom gubi vlagu u nastavku transporta ili u konačnoj isporuci krajnjem kupcu. Na slici 3 daje se takav primjer u dva ekstremna stanja: u vlažnom i suhom (razlijepljenom).



Slika 3. Uzorci valovitog kartona u vlažnom i suhom stanju

Promatra se deformacija valovitog kartona od maksimalne penetracije vlage, do raspadanja kutije i samog kartona. U realnim uvjetima je vlaga različito deformirala karton zbog prirode skladištenja i korištenja kutija. Različita su stanja kutija na dnu i na vrhu stupa od 12 pakiranja pod opterećenjem s voćem.

### 1.1. Faktori koji utječu na čvrstoću ambalaže od valovitog kartona

U ovom poglavlju se navode naslovi, imena i pojmovi (tablica 1, slika 4), koji će se koristiti tokom cijelog rada. Valoviti karton koji se koristi u proizvodnji kutija za pakiranje voća i povrća obuhvaća četiri komponente: ravni gornji sloj, donji ravni sloj, valoviti sloj i adheziv. Gornji, ravni ili vanjski sloj (lice) prvi je od dva ravna sloja koji su dodani valovitom sloju kako bi ga formirali u valoviti karton. Donji ili unutarnji ravni sloj (naličje) je zaljepljen za drugu stranu valovitog sloja i time formira valoviti karton. Tablica 1 prikazuje faktore koji utječu na čvrstoću kutija od valovitog kartona. Četiri najznačajnija faktora su: konstrukcija kutije, temperatura, vlaga i vrijeme. U optimiziranju svojstava kutije u ovom istraživanju, broj faktora koji su se uzeti u obzir je smanjen s obzirom na utjecaj proizvođača valovitog kartona.

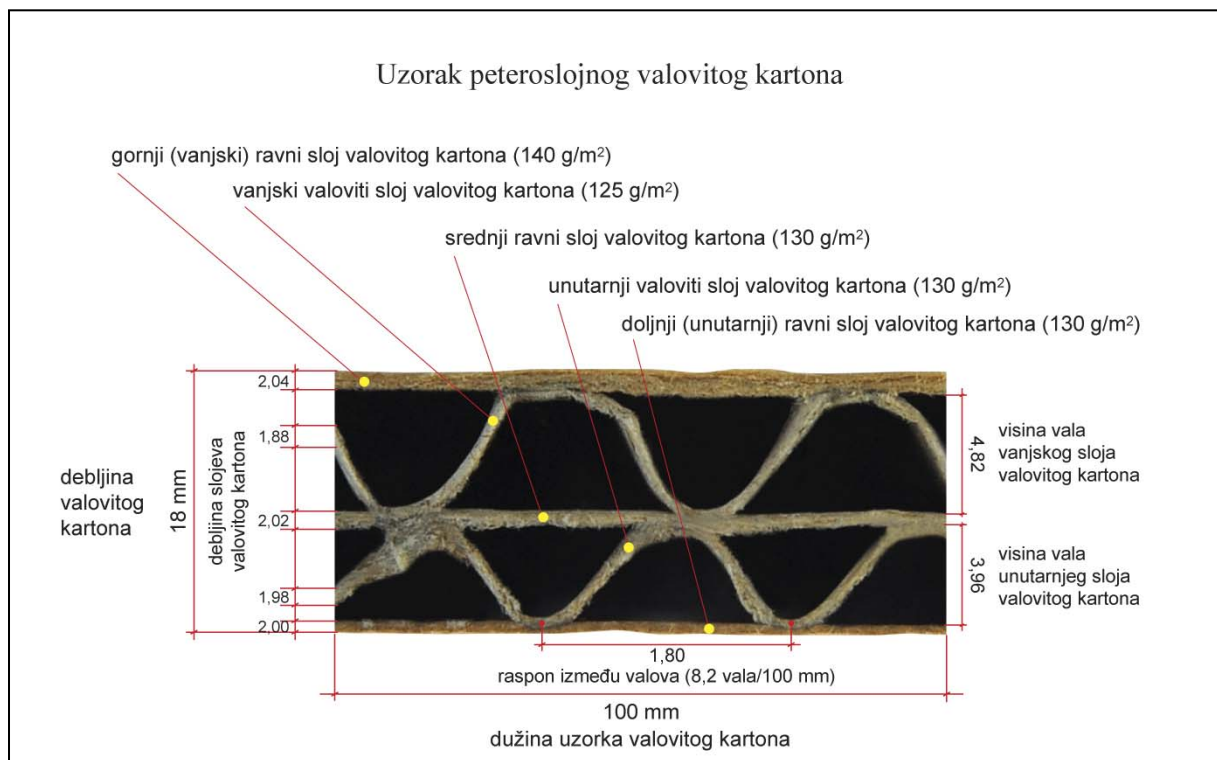
Tablica 1. Faktori utjecaja na čvrstoću valovitog kartona tijekom skladištenja u hladnjači

KONSTRUKCIJA	TEMPERATURA	VLAGA	VRIJEME
Svojstva valovitog kartona	Temperatura kutije	Vlaga u valovitom kartonu	Vrijeme čuvanja
Broj slojeva	Temperatura voća i povrća (sadržaja)	Vlaga u voću i povrću (sadržaju)	Vrijeme opterećenja
Vrsta slojeva	Temperatura hladnjače	Vlaga u hladnjači	Vrijeme respiracije voća i povrća (sadržaja)
Gramatura slojeva	Temperatura zraka	Vlaga u zraku	Vrijeme fermentacije voća i povrća (sadržaja)

#### 1.1.1 Sastavnice valovitog kartona

Valoviti karton jedan je od najčešće upotrebljivanih ambalažnih materijala. Proizvodi se od recikliranog papira i prirodnih materijala poput celuloze, a njegova osnovna namjena je izrada ambalažnih kutija. Osnovna značajka valovitog kartona je što, za razliku od ostalih kartona, sadrži periodično ovalovljen sloj papira, valoviti sloj, koji je naljepljen na barem jedan ravan sloj papira. Specifična struktura ovog kartona daje mu bolju čvrstoću nego što bi ju slojevi imali svaki posebno. Valoviti karton koji se koristi u proizvodnji obuhvaća četiri

komponente: ravni gornji sloj, donji ravni sloj, valoviti sloj i adheziv, slika 4. Ravni sloj sa lica (gornje strane) prvi je od dva ravna sloja koji su dodani valovitom sloju kako bi formirali valoviti karton sa jednim licem, i drugi zadnji ravni sloj je zaljepljen za drugu stranu valovitog sloja i time formira valoviti karton sa stražnjim ravnim slojem (naličjem).

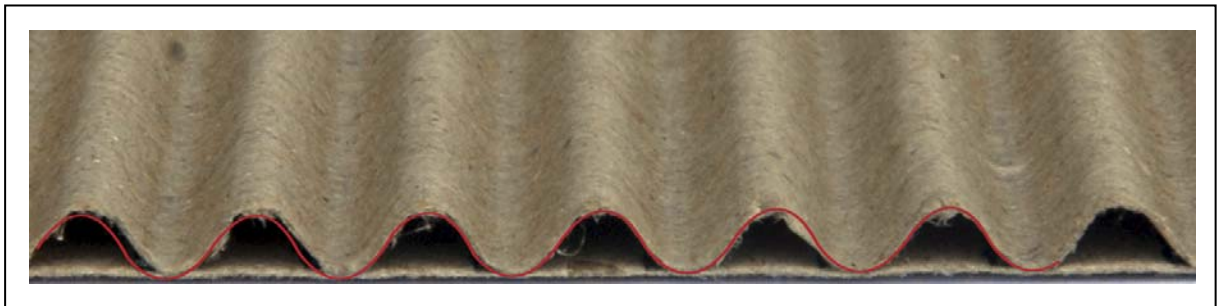


Slika 4. Sastavnice valovitog kartona, makro fotografija tipičnog peteroslojnog valovitog kartona

Vanjski i unutarnji sloj, tj. ravni slojevi valovitog kartona, izrađuju se od sirovine koja ima željenu čvrstoću, a to su najčešće mekana i dugačka vlakna četinjača. Takvi papiri poznati su pod nazivom kraft, a dobivaju se kiselim postupkom proizvodnje papira. Prirodna boja im je smeđa, ali imaju mogućnost djelomičnog ili potpunog bijeljenja, čime im se smanjuje čvrstoća materijala za 5-10% [2]. Papiri za ravni sloj mogu sadržavati manju ili veću količinu recikliranih vlakana iz otpadnog papira koji se mogu prepoznati po sitnim tamnim mrljama koje su zaostali pigmenti boje. Povećanjem sadržaja recikliranih vlakana u papiru smanjuje mu se čvrstoća. Optimalna čvrstoća postiže se korištenjem istog materijala za izradu oba ravna sloja, vanjskog i unutarnjeg, kod troslojnog valovitog kartona.

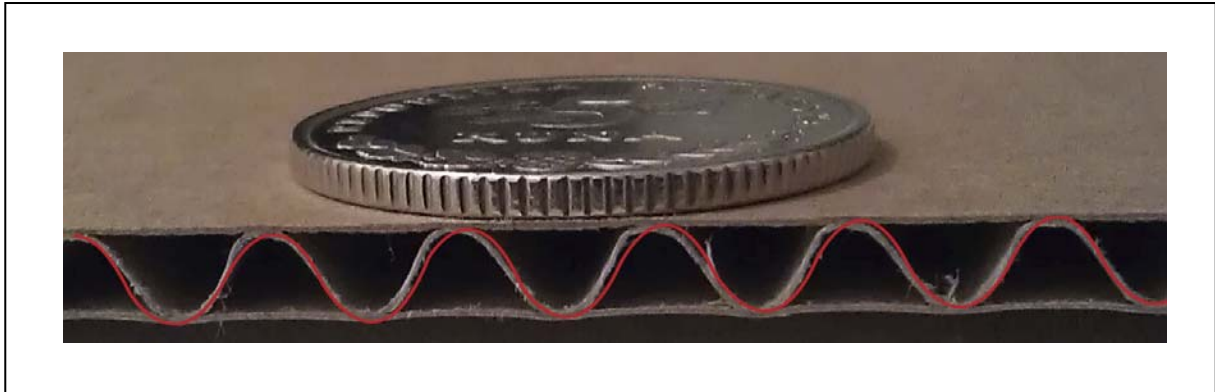
Za dobivanje papira za valoviti sloj, najbolju kvalitetu pokazuju kratka tvrda vlakna četinjača koja se proizvode posebnom metodom kuhanja pulpe, a takav papir je poznat kao polukemijski [3]. Ipak se valoviti sloj proizvodi prvenstveno iz recikliranih vlakanaca, s tim da ne pokazuje znatna odstupanja u kvaliteti i čvrstoći u odnosu na polukemijski.

Treća vrlo važna sastavnica valovitog kartona je sam adheziv, odnosno ljepilo, koje povezuje slojeve papira. U industriji valovitog kartona glavni adheziv, natrijev silikat, gotovo je u potpunosti zamijenjen škrobom, i to najčešće kukuruznim škrobom [2]. Među najčešćim razlozima deformacija valovitog kartona je pogrešno nanošenje adheziva. U nastavku (slika 5, 6, 7 i 8) su prikazana različita rješenja valovitog kartona. Za prikazana rješenja date su informacije o periodama i broju slojeva. Valoviti karton je najmanje dvoslojan, slika 5 a najčešće troslojan-jednovalan, kada je valoviti sloj papira uljepljen između dva ravna sloja papira. U slučajevima dodavanja slojeva nastaje višeslojni valoviti karton.



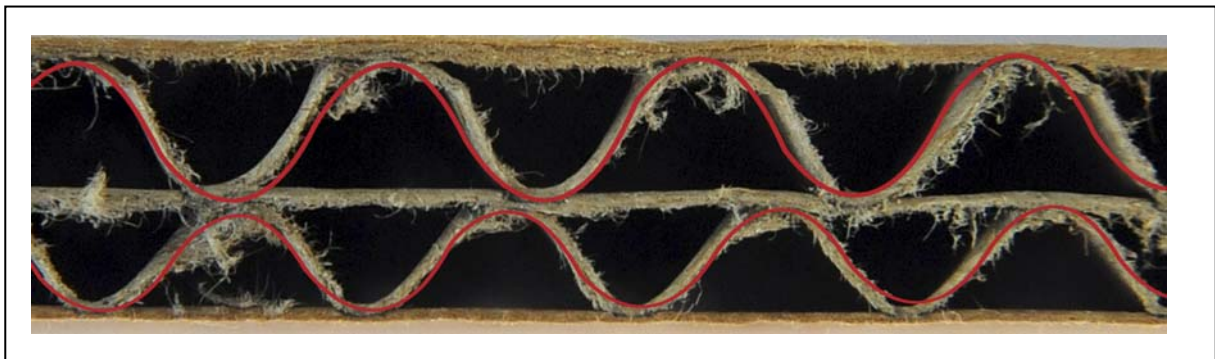
Slika 5. Dvoslojni valoviti karton, A val, 11 valova/cm

Dvoslojni valoviti karton sastoji se od dva međusobno sljepljena sloja papira, od kojih je jedan ravan, a drugi valoviti. Koristi se za omatanje proizvoda ili kod unutarnje amortizacije. Dvoslojni valoviti karton ne koristi se kod proizvodnje kutija.



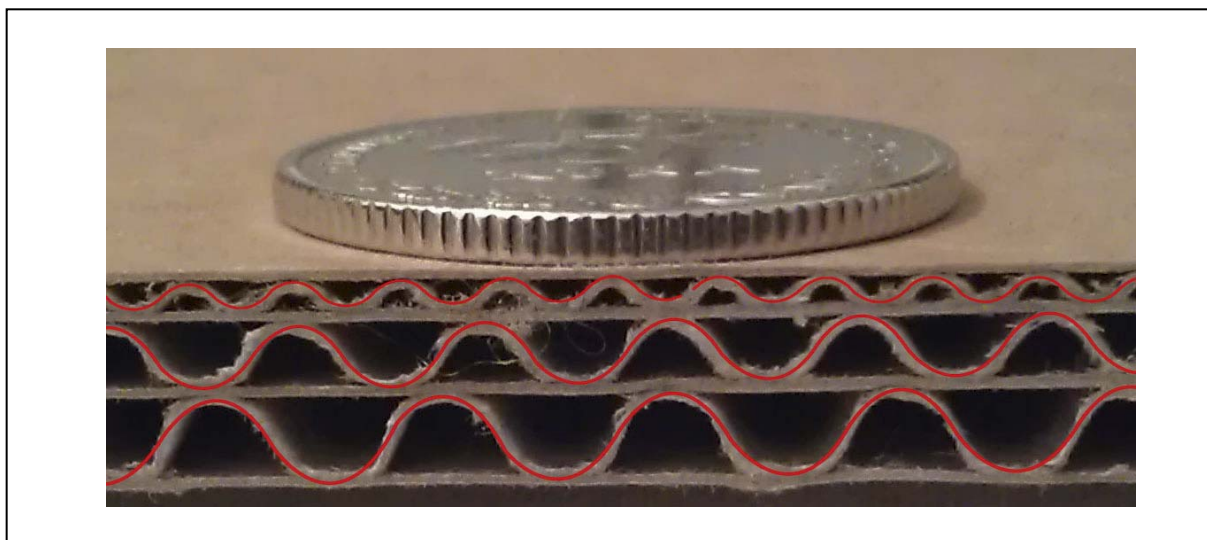
Slika 6. Troslojni valoviti karton, A val-11 valova/cm

Troslojni valoviti karton, slika 6, sastavljen je od tri sloja, dva ravna i jedan valoviti u sredini. Koristi se za transportne kutije različitih dimenzija, jer je takva kutija čvrsta i pogodna za zaštitu proizvoda od transporta i skladištenja. Više od 90% svih kutija od valovitog kartona izrađene su od ove vrste.



Slika 7. Peteroslojni valoviti karton, A val-11 valova/cm, C val-13 valova/cm

Peteroslojni valoviti karton građen je od pet slojeva međusobno sljepljenih papira, od kojih su dva valovita i tri ravna, slika 7. Izrađuje se iz A ili B vala u kombinaciji sa C valom. Pri tome je bolja kombinacija B i C vala, i to takva da se B val nalazi s vanjske strane kutije, a C val s unutarne. Ova vrsta kartona koristi se isto kao i troslojni valoviti karton, ali za proizvode veće mase i važnije namjene, prvenstveno kod pakiranja za izvoz. Kutija proizvedena od ove vrste materijala ima bolje mehaničke karakteristike u odnosu na kutiju od troslojnog valovitog kartona.



Slika 8. Sedmeroslojni valoviti karton, D val-29 valova/cm, C val-13 valova/cm, A val-11 valova/cm

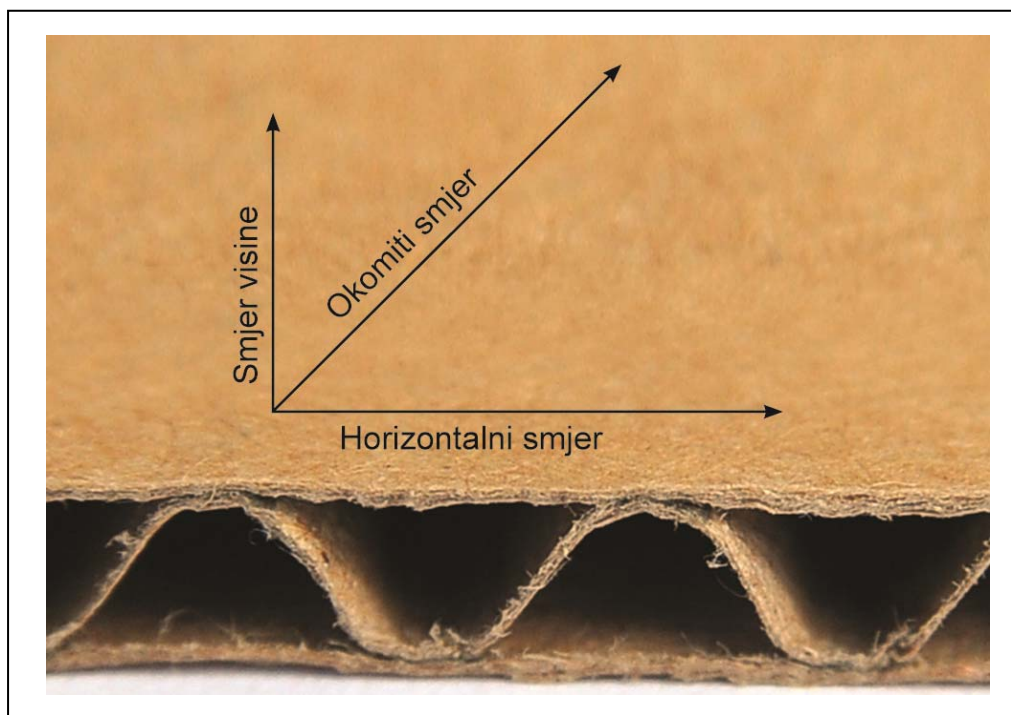
Sedmeroslojni valoviti karton, slika 8 ima sedam slojeva papira, od kojih su tri valovita i četiri ravna. Koriste se kad je potrebna izuzetna čvrstoća u skladištenju i transportu. Osim vrste valovitih kartona, razlikujemo i vrste valova, tablica 2 koji se koriste u izradi valovitog kartona zbog različitih primjena i potrebnih svojstava.

Tablica 2. Vrste valova [3]

Profil vala	Visina vala (mm)	Broj valova/m
A	4.8	110
B	2.4	150
C	3.6	130
D	1.2	290
E	0.7	350
G i N	0.5	550

C val je najpopularniji profil vala i gotovo potpuno je zamijenio A val. Oko 15% količine valovitog sloja može se uštediti korištenjem C vala. Kutija s valovitim slojem A vala

ima najbolju tlačnu čvrstoću. Ako usporedimo tu čvrstoću s C i B valom, C val ima 15% manju tlačnu čvrstoću, a B val 25% manju. No, B val ima najveću čvrstoću na gnječenje, 50% veću od A vala i 25% veću od C vala, i koristi se najviše za izradu kutija za voće i povrće [2]. E val ili mikroval je najtanji materijal u grupi materijala od valovitog kartona, ali ima najveću gustoću valova. Izuzetno je pogodan za kutije manjih dimenzija s velikom čvrstoćom i otpornošću na vanjske utjecaje. Primjenu nalazi i kod kutija koje koristi potrošač ili koje se negdje izlažu, pa je vanjski sloj takve kutije često višebojno otisnut.



Slika 9. Smjerovi vlaknaca u valovitom kartonu

Papir je višefazna smjesa koji se sastoji od vlage, vlaknaca, praznina i kemijskih aditiva [4]. Osnovne komponente papira zapravo su međusobno isprepletene i vezane vlaknaca koja tvore kompleksnu mrežu. Označavanje dimenzija ravnog sloja, valovitog sloja i valovitog kartona bazira se na procesu proizvodnje papira i valovitog kartona. Zbog kontinuiranog procesa proizvodnje papira, vlaknaca (slika 9) su više orijentirana u smjeru proizvodnje papira nego u bilo kojem drugom smjeru [1]. Smjer proizvodnje papira i valovitog kartona je isti smjer u kojem se kreću ta dva procesa proizvodnje. Tu orijentaciju nazivamo smjer proizvodnje. Ravninski smjer koji je okomit na smjer proizvodnje, a jednak



je širini stroja za proizvodnju, zove se okomiti smjer. Treći smjer je smjer visine i ovisi o faktoru vala, a ujedno je najmanja dimenzija valovitog kartona.

Za procjenu čvrstoće valovitog kartona koristi se nekoliko testova, a to su test bridne čvrstoće kutije (ECT), test krutosti na savijanje u 3 i 4 točke savijanja, test gnječenja i test čvrstoće linearne adhezije. Također se rade ispitivanja čvrstoće ravnog i valovitog sloja na tlačnu čvrstoću u kratkim rasponima, te vlačne čvrstoće obzirom na svojstva ravnog i valovitog sloja. Tokom istraživanja na doktorskom radu pojavila se potreba preciznog mjerenje elemenata valovitog kartona na kojima su izvršeni eksperimenti u svrhu utvrđivanja čvrstoće kartona u kondicioniranim uvjetima [26]. Razvijena je neinvazivna metoda mjerenja debljine papira i svakog elementa koji čine valoviti karton u različitim stanjima njihove vlažnosti.

### *1.1.2. Proizvodni proces izrade valovitog kartona*

Valoviti karton se sastoji od jednog ili više valovitih slojeva papira koji su uljepljeni između ravnih slojeva. Proizvodni proces možemo podijeliti u dva dijela; mokri i suhi. U prvom dijelu, između rebrastih valjaka ravni papir postaje valoviti i lijepi se na ravni sloj. U suhom dijelu proizvodnje, pomoću zagrijavanja, suši se valoviti karton. Problem u proizvodnji valovitog kartona je razlika u vlažnosti pojedinih slojeva. Tada može doći do pojave izvijanja kartona ili močenja ravnih slojeva između valovitih. Taj fenomen naziva se vitoperenje ili valovljenje kartona [3]. Tokom proizvodnog procesa izrade kutije od valovite ljepenke postoji problem od pucanja kutije zbog širenja unutarnjeg sloja nakon perforacije. Kako bi se karton pravilno savio, moraju se definirati kartonska žljebljenja pa se definiraju linije savijanja. Time se omogućuje ljepljenje kutije na ispravan način i skraćuje se vrijeme koje je za to potrebno na minimum. Žljebljenjem se stvara trajna deformacija – lokalno se smanjuje krutost pa se karton lakše savija duž linije žljebljenja. Takva lokalna deformacija može uzrokovati povećanje napetosti i rezultirati pucanjem kartona.

Otvoreni prirez kutije od valovitog kartona nakon žljebljenja i perforiranja, gdje se pojavljuju pukotine zbog širenja unutarnjeg sloja. Efekt loma kartona najčešće se uočava okomito na smjer valovljenja. MD smjer predstavlja smjer proizvodnje, a CD okomiti smjer. Također se može pojaviti i pucanje vanjskog sloja kutije, no to nije uzrokovano širenjem zbog savijanja. Arci ljepenke se savijaju tako da se minimalizira prostor za skladištenje pa se najčešće upotrebljavaju savijanja od 180°. Pri slaganju kupova araka na vertikalnu hrpu

(formiranje kupova) takva savijanja mogu izazvati pucanje vanjskog sloja. Oba slučaja nisu poželjna jer smanjuju krutost materijala. Obzirom kako vlažnost i temperatura variraju tokom godišnjih doba, praksa pokazuje da je utjecaj mehaničkih svojstava papira i pucanje zbog širenja češće u hladnim mjesecima [1]. Mehanička svojstva papira važna su za strukturalno modeliranje slojeva u valovitom kartonu. Papir se u osnovi sastoji od celuloznih vlaknaca, ali se u njega dodaju i nevlaknaste sirovine radi ostarivanje dodatnih svojstava. Točan sastav ovisi o vrsti papira koji se proizvodi. Drvne pulpe podijeljene su po načinu proizvodnje, te po vrstama drveta koje su u proizvodnji upotrebljene. Ta dva faktora određuju kemijski sastav, strukturu i stanje vlaknaca u pulpi koji pak određuju svojstva papira kao budućeg proizvoda. Drva pulpa je najvažniji izvor vlaknaca. Tu razlikujemo dvije skupine: sirovine proizvedene od mekog i tvrdog drveta, koje se razlikuju po svojoj strukturi (dužini vlaknaca). Vlakanca mekog drveta su u prosjeku duga 3 - 5 mm i debljine 20 – 80  $\mu\text{m}$ , dok se kod tvrdog drveta njihova dužina kreće od 1 - 2 mm, i debljine manje od 20  $\mu\text{m}$ . Iako su oblikom vrlo slična, potrebno je napomenuti da vlakanca mekog drveta daju snagu i provode tekućinu, a vlakanca tvrdog drveta dobijaju snagu od mekih vlaknaca, no imaju druge sustave koji provode tekućinu, tzv. kapilare. Zid vlakanca prikazanog sastoji se od 4 sloja: sloj P – primarni sloj, S1 – sekundarni prvi sloj, S2 – sekundarni drugi sloj, koji je najčešće i najdublji, te S3 – sekundarni treći sloj. Rupa u sredini zida naziva se lumenom, a područje koje okružuje vlakno naziva se srednjom lamelom. U S2 sloju se fibrili ovijaju spiralno oko osi vlakna, a izgledom podsjećaju na male pletenice građene u osnovi od molekula celuloze.

Veze vlaknaca u papiru proizlaze zbog tendencije molekula celuloze da se međusobno vežu u suhom stanju. Tako postoje dvije vrste veza – veze unutar i veze između vlaknaca. Vezanje unutar vlaknaca uzrokovano je kemijskim vezama (poput vodikovih veza), međumolekularnim Van der Waalsovima silama kao i međusobnim ispreplitanjem molekula. Kada su dva vlakna međusobno jako blizu dolazi do intermolekularne veze te se takvo vezivanje naziva međusobnim vezivanjem vlaknaca.

Mehaničko ispreplitanje i sile površinske napetosti fibrila manifestiraju se privlačnim silama među vlakancima. Vodikova veza vrsta je intermolekularne sile koja se stvara između električnih naboja suprotnog polariteta. Iako je vodikova veza jača nego većina intermolekularnih veza, ona je ipak mnogostruko slabija u odnosu na ionske i kovalentne veze, a vodikove veze između vlaknaca identične su vodikovim vezama unutar vlaknaca.

Svaka glukozna skupina u njihovom sastavu tako može oformiti tri vodikove veze koje omogućuju vezivanje molekula vode unutar celulozne molekule vlakanca.

U mokrom ili vlažnom stanju moguće je stvaranje većeg broja vodikovih veza između fibrila nego što je moguće u suhom stanju što čini moker papir fleksibilnijim. Upravo to je razlog zašto je papir osjetljiv na vlagu, relativnu vlažnost zraka i temperaturu. Zbog kontinuirane prirode proizvodnje papira vlakanca su većinom orijentirana u smjeru proizvodnje, tzv. tok vlakanca, nego u ostalim smjerovima. Kod arka papira možemo razlikovati tri osi simetrije definirane na slici 9.

Papir kao higroskopan materijal uslijed promjene relativne vlažnosti zraka i temperature mijenja mehanička svojstva kao što je krutost. Količina vlage u papiru ovisi o trenutnim klimatskim uvjetima, ali i o prijašnjim stanjima materijala. Porast relativne vlage zraka i temperature rezultira manjom mehaničkom otpornošću na vlak i tlak, te je stoga važno kontrolirati klimatske uvjete kako bi zadržali potrebna mehanička svojstva materijala. Tijekom inicijalne faze testa na vlak, sva vlakna nisu napeta. S vremenom se sila raspoređuje na sva vlakna, pa se opterećenje raspoređuje po manje-više linearnoj funkciji. Kako bi se izbjegao opisani efekt, poželjno je preopteretiti uzorak prije ispitivanja, da se sila podjednako rasporedi.

### *1.1.3. Reologija valovitog kartona*

Valoviti karton koji ima gotovo najveću relativnu čvrstoću (čvrstoća u odnosu na težinu) među materijalima, uz nisku cijenu i stopostotnu obnovljivost bio bi idealan materijal da nema jednu manu - izrazitu osjetljivost prema vodi.

Sadržaj vlage kartona koji je u ravnoteži s okolnim zrakom ovisi o relativnoj vlažnosti tog zraka, sastavu kartona (različita vlakna različito apsorbiraju vlagu iz zraka), te načinu na koji je postignuto ravnotežno stanje, tj. primanjem ili otpuštanjem vlage, Niskanen [38].

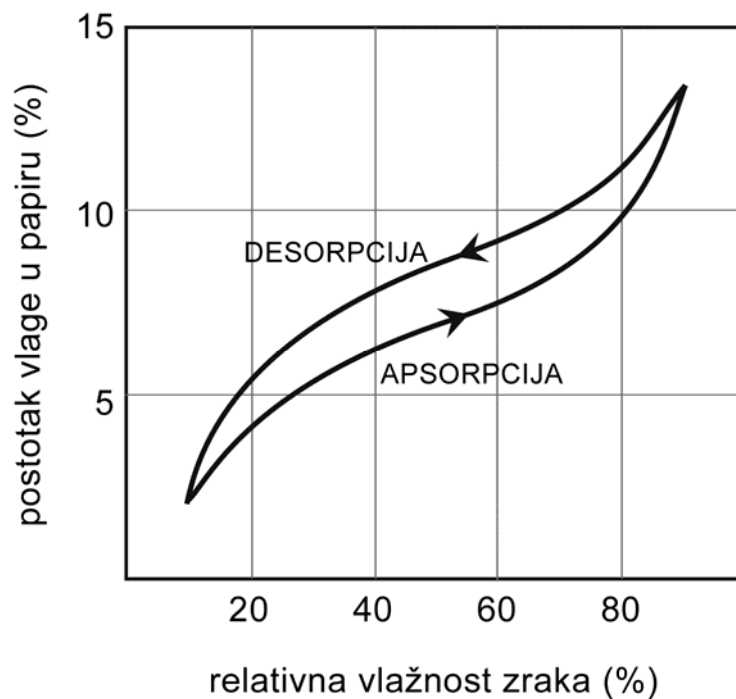
Relativna vlažnost zraka izravno utječe na količinu vlage u papiru koja se povećava s povećanjem temperature, Taylor [42]. Sama relativna vlažnost se ne mora nužno dovoditi u vezu s koncentracijom vode u zraku. Temperatura je također bitan faktor kada govorimo o vlaženju papira u različitim uvjetima. Drugi bitni faktori su tlak vodene pare i tlak zasićenja, to jest tlak pri kojem zrak sadrži 100% vodene pare .

Relativna vlažnost  $r$  predstavlja omjer vlage koja se stvarno nalazi u  $1 \text{ m}^3$  zraka i maksimalne količine koji bi isti volumen zraka pri istoj temperaturi i tlaku mogao primiti. Raste s padom temperature maksimalno do 100%, nakon čega daljnjim padom temperature dolazi do kondenzacije (pretvaranja vlage, odnosno vodene pare u vodu).

Pri potpunoj zasićenosti zraka ( $r = 100\%$ ) temperature  $23^\circ\text{C}$ , sadržaj vlage u papiru je najčešće između 25-30%. Pri konstantnoj relativnoj vlažnosti sadržaj vlage je prilično neosjetljiv na promjene temperature, osim u vrlo vlažnim klimatskim uvjetima gdje je potrebna temperaturna promjena veća od  $10^\circ\text{C}$ , prije nego što se sadržaj vlage u papiru značajno promjeni. Sadržaj vlage ovisi o svojstvima pulpe od koje je proizveden papir. Za istu relativnu vlažnost, papiri proizvedeni od mehaničke pulpe (drvenjača) često sadrže više vlage nego papiri proizvedeni od kemijske pulpe (sulfitna i sulfatna celuloza).

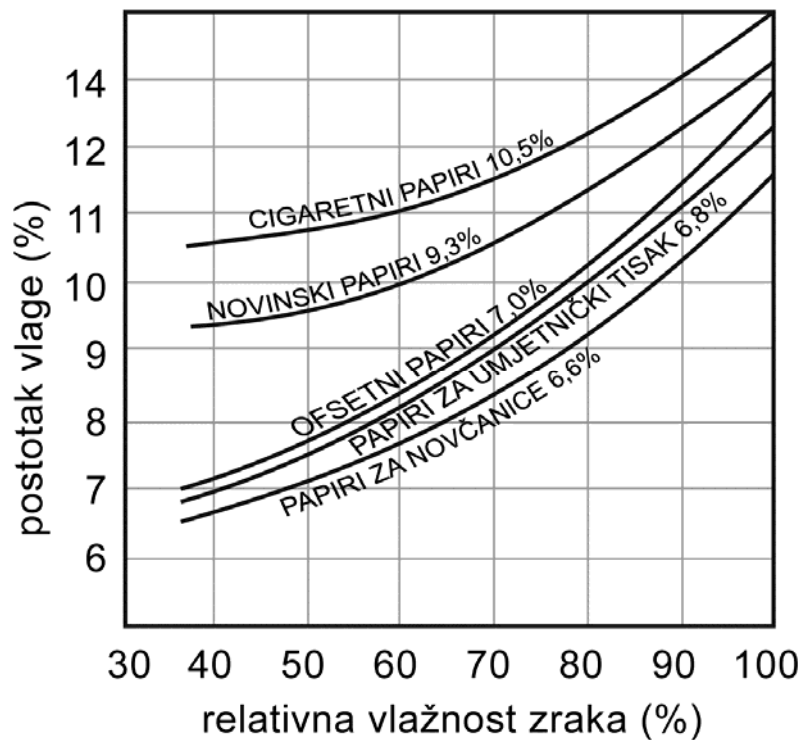
Stoga, relativna vlažnost se definira kao omjer tlaka vodene pare u zraku u odnosu na tlak zasićenja pare. Klimatski sustav nikad nije u termodinamičkoj ravnoteži. Neka određena vrsta papira istog sastava može pokazivati različitu higroekspanziju zbog različitog tretiranja vlakanaca u prošlosti, kada su bila traumatizirana različitim uvjetima prerade te nekoliko puta reciklirana. Tlak zasićenja se pojavljuje u kapilarama vlakanaca koje sadrže tekućinu, te se u njima izjednačuje brzina isparavanja i kondenziranja. Kako se kinetička energija povećava sa temperaturom, tlak zasićenja pare se povećava.

Drvena vlakanca su higroskopna, trenutno apsorbiraju vodu. Stoga se sadržaj vlage u papiru definira kao omjer apsorbirane vode i mase suhog papira. Kada je u ravnoteži s okolišnim zrakom, sadržaj vlage papira ovisi o relativnoj vlažnosti zraka i ravnotežnoj temperaturi. Sadržaj vlage papira smanjuje se povećanjem temperature ili smanjivanjem relativne vlažnosti. Postoji određena razlika u sadržaju vlage zbog različite dinamike apsorpcije i desorpcije – fenomen histereze.



Slika 10. Dijagram histereze papira, Golubović, [22]

Histereza podrazumijevamo razliku u sadržaju vlage u papiru, koja nastaje pri istoj relativnoj vlažnosti zraka, kada do ravnotežnog stanja s okolišem papir dolazi iz veće relativne vlažnosti mehanizmom desorpcije, u odnosu na dolazak u ravnotežno stanje apsorpcijom iz niže relativne vlažnosti, slika 10. Histereza je razlika puteva deformacije papira pri uvjetima vlaženja i sušenja (apsorpcija i desorpcija vlage). Kao pojava se povezuje s higroskopnom prirodom vlakana. Toplinska energija u funkciji desorpcije je potrebna da bi se uklonila voda iz vlakana. S druge strane, toplina apsorpcije oslobađa se kada vlakna upijaju vodu. Sadržaj vlage je veći pri otpuštanju vlage. Dakle, karton nakon što upije određenu količinu vlage pri povećanju relativne vlažnosti nakon aklimatiziranja na niže vrijednosti relativne vlažnosti zraka, ne otpusti istu količinu vlage koju je apsorbirao. Kod standardnih postupaka ispitivanja, preporuka je da se za postizanje ravnotežnog stanja upija vlaga iz atmosfere. TAPPI, FEFCO i ostali standardi odredili su standardnu klimu za većinu testiranja:  $50\% \pm 2\%$  relativne vlažnosti zraka i temperatura  $23 \pm 1^\circ\text{C}$ . Ovisnost primanja vlage o vrsti sirovine (celuloze) za izradu papira pri određenoj relativnoj vlažnosti prikazuje dijagram na slici 11 [22].

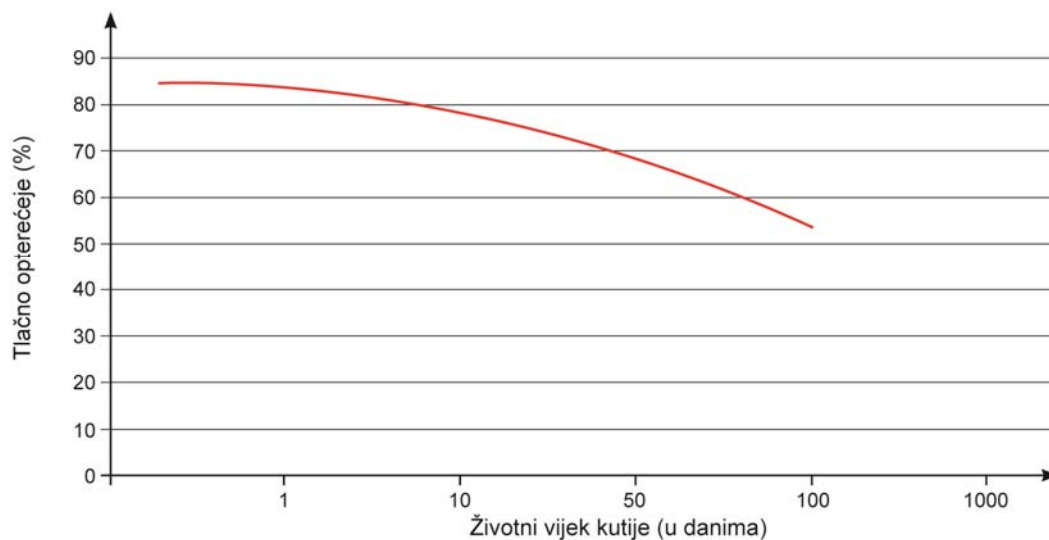


Slika 11. Ovisnost vlage u papiru o relativnoj vlažnosti zraka na primjeru različitih vrsta papira

Faktori koji su istraživani u ovom poglavlju ograničeni su na temperaturu i vlažnost hladnjače. Za temperaturu u hladnjačama očekuje se da varira 0-2°C i oscilira s ciklusom isključivanja/uključivanja sistema hlađenja i za vrijeme izmjene vanjskog zraka, na primjer tokom punjenja i pražnjenja. Za vlagu u hladnjači također se očekuje da oscilira u sinkronizaciji s temperaturom. Temperature u hladnjačama variraju, a obično ih se drži na oko 0°C. Papir, kao higroskopan materijal, upija ili otpušta vlagu kako bi postigao ravnotežu s okolinom. Smanjenjem temperature, sadržaj vlage u papiru se povećava na konstantnoj relativnoj vlažnosti. Zbog toga temperatura ima indirektan utjecaj na svojstva papira jer utječe na sadržaj vlage. Hlađenje također povećava krutost valovitog kartona. Iako, povećavanje krutosti papira i valovitog kartona zbog temperature je neznčajno u usporedbi s povećanjem sadržaja vlage uzrokovano visokom vlagom na koju nailazimo u hortikulturalnim hladnjačama. Sadržaj vlage valovitog kartona na standardnim uvjetima za testiranje je otprilike 8.1%, dok u hortikulturalnim hladnjačama sadržaj vlage može doseći i 20%. Standardni laboratorijski testovi obično mjere čvrstoću papira na vlak i tlak, a svojstva

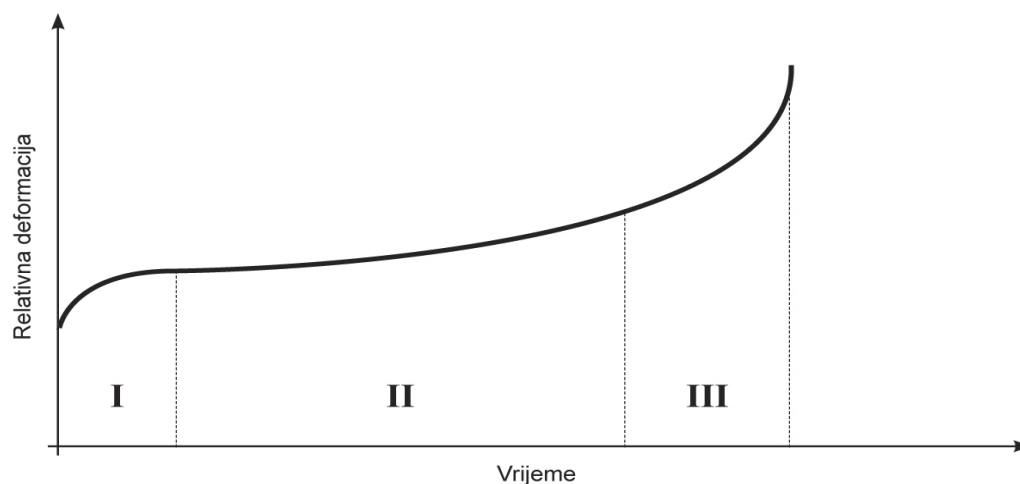
valovitog kartona i tlačna čvrstoća kutije vrše se pod stalnim opterećenjem u roku od par sekundi. Iako, papir, valoviti karton i kutije se ponašaju različito u uvjetima konstantnog opterećenja ili kada se primjeni tlačno opterećenje koje je niže od standardnih laboratorijskih testiranja.

Ambalaža od valovitog kartona izložena je puzanju, Haraldsson [23], gdje se uzorak pod konstantnim istezanjem ili tlakom, koje je manje nego maksimalno istezanje izmjereno u standardnim laboratorijskim testiranjima na tlak, deformira u smjeru istezanja. Ta deformacija može dovesti do pucanja uzorka nakon što produžimo vrijeme testiranja više nego je to dozvoljeno kod konstantnih laboratorijskih testova na vlak. Na primjer, za kutiju s opterećenjem koje odgovara 70% njegove maksimalne čvrstoće, kako je izmjereno standardnim laboratorijskim testiranjima, očekuje se deformacije već nakon jednog dana, dok se kutija s opterećenjem od 54% maksimalne čvrstoće deformira nakon otprilike 100 dana.



Slika 12. Životni vijek kutije u ovisnosti o tlačnom opterećenju prema Maltenfortu

Maltenfort [33] nije detaljno objasnio kako su pripremljeni uzorci koji su dali informacije za sliku 12., iako se samo može kvantitativno koristiti za predviđanje utjecaja opterećenja na vrijeme deformacije. Važan zaključak proizlazi iz ove slike, a to je da bi povećanje čvrstoće valovitog kartona trebalo odgoditi vrijeme deformacije pod konstantnim tlačnim opterećenjem.



Slika 13. Dijagram puzanja valovitog kartona, Koning i Stern, [30]

Na slici 13 je predstavljena grafička ilustracija procesa puzanja valovitog kartona. Dijagram je podijeljen u tri karakteristična dijela, odnosno proces puzanja u tri stadija:

**I-početni stadij:** U prvom stadiju krivulja ne počinje iz ishodišta dijagrama budući da je deformacija nastala istog trenutka kad je ispitni uzorak opterećen. Prvi stadij karakterizira u početku povećana i promjenljiva brzina puzanja (nelinearan odnos).

**II-stadij puzanja:** Naziva se stadijem (približno) konstantnog gradijenta (brzine) puzanja. Naime u tom stadiju je dijagram približno pravac. Nagib tog "pravca" govori o otpornosti materijala prema puzanju. Što je strmiji sklonost puzanju je veća. Ukoliko je paralelan s osi apscisa onda je materijal potpuno otporan na puzanje. Drugi stadij vremenski traje puno dulje nego prvi i treći stadij.

**III-stadij puzanja:** Završni je stadij gdje se brzina puzanja povećava i više ne postoji linearna ovisnost između istežanja i vremena. Završni stadij završava sa lomom uzorka.

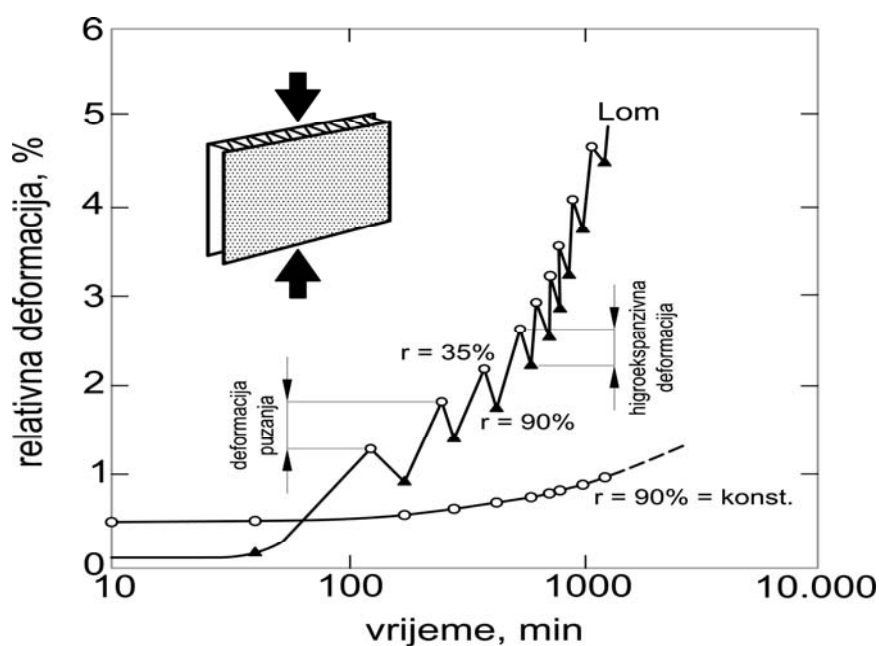
Puzanje papira ovisno je o primjenjenom naprezanju i sadržaju vlage uzoraka. Brzina puzanja se povećava ili smanjuje s promjenom sadržaja vlage u papiru, što se prikazuje izokronim krivuljama. Najveće je puzanje pri visokom sadržaju vlage u papiru, a uzrokovano je prodiranjem vode u papir, što rezultira omekšavanjem papira. Količina i kompozicija hemiceluloze i lignina u vlakancima određuje brzinu puzanja papira. Zanimljivo opažanje o utjecaju vlage u papiru je da brzina puzanja postaje posebno visoka ako relativna vlažnost zraka varira. Cikličkom promjenom relativne vlažnosti zraka, brzina puzanja postaje značajno veća nego pri bilo kojoj razini konstantne vrijednosti relativne vlažnosti unutar ciklusa. Ova pojava zove se ubrzano puzanje. Porast relativne deformacije po ciklusu promjene relativne vlažnosti je konstantan i nezavisan o brzini promjene relativne vlažnosti. Za porast relativne



deformacije obzirom na prethodna razmatranja ključna je razlika između početne i krajnje vrijednosti relativne vlažnosti zraka u jednom ciklusu. Ukoliko u jednom ciklusu povećamo relativnu vlažnost od 30%-90% za posljedicu ćemo imati veću relativnu deformaciju nego za jedan ciklus promjene 50%-90%.

Tlačno puzanje, slika 14 osobito ono uzrokovano kružnim izmjenama relativne vlažnosti u zraku smatra se glavnim uzrokom lomova (urušavanja, kolapsa) kutija koje ulazi u nadležnost (ingerenciju) inženjera i proizvođača valovitog kartona (jer oni upotrebom različitih kartona, vrsta valova i općenito konstrukcijom kutije mogu utjecati na tlačnu čvrstoću kutije, pa samim time i na vijek trajanja kutije).

Naravno, izvan njihove kompetencije su lomovi kutija kao rezultat npr. nesavjesnog postupanja s ambalažom transportnih radnika (nepravilno slaganje, bacanje kutija, oštećenja nepravilnim rukovanjem transportnim vozilima).



Slika 14. Dijagram tlačnog puzanja valovitog kartona pri cikličkoj izmjeni relativne vlažnosti

Dijagram na slici 14 prikazuje odnos relativne deformacije kao funkcije vremena u ovisnosti o konstantnoj visokoj relativnoj vlažnosti od 90% (donja krivulja) i pri cikličkim promjenama relativne vlažnosti od 35% do 90% (gornja izlomljena krivulja). Vidljivo je kako deformacija progresivno napreduje kako se broj ciklusa povećava. Korištenje vodootpornog adheziva smanjuje razinu deformacija puzanja uzoraka valovitog kartona ispitivanih na bridnu tlačnu čvrstoću u okolini promjenljive relativne vlažnosti zraka i temperature.

## CILJEVI ISTRAŽIVANJA I HIPOTEZE

---

Cilj ovoga istraživanja je razviti model za predviđanje čvrstoće kutije na tlačno opterećenje bazirano na kondicioniranim uvjetima relativne vlažnosti i temperature okoline. U radu se istražuju nova rješenja i njihova verifikacija u realnoj proizvodnji izrade kutije od valovitog kartona. Znanja o ovom području zatvorena su u uska istraživanja na proizvodnju kutija od peteroslojnog valovitog kartona, tipa *holandez* i na uvjete u hladnjači za voće i povrće. Unapređenje proizvodnje ambalaže moguće je ostvariti povećanjem njene prosječne izdržljivosti. Istražuju se svojstva izdržljivosti kutije s ciljem smanjenja razlike između njene prosječne i potrebne izdržljivosti, a da je pri tom zadržana prihvatljivo mala vjerojatnost loma.

Definirani su parametri koji određuju donju granicu kvalitete kutije od valovitog kartona kod koje postoji minimalna mogućnost njenog loma. Kutije od valovitog kartona koje se koriste u distribuciji voća i povrća susreću se na svom distribucijskom putu od proizvođača do potrošača s vrlo promjenljivim vremenskim uvjetima. Distribucijski put podrazumjeva najčešće dulji boravak u različitim hladnjačama pri prijevozu i skladištenju te kratkotrajno izlaganje vanjskim atmosferskim uvjetima pri pretovaru. U hladnjačama, radi očuvanja kvalitete i kvantitete voća i povrća vladaju niske temperature i visoka relativna vlažnost što ima izrazito nepovoljan utjecaj na mehanička svojstva valovitog kartona. U tim uvjetima, zbog higroskopnosti celuloznih vlaknaca, pojačava se njegovo reološko svojstvo koje za posljedicu ima značajno smanjenje vijeka trajanja kutije.

Cjelokupnim procesom manipulacije s ambalažom od valovitog kartona unaprijeđuje se te se predlaže novi način istraživanja kako bi se postigli povezani ciljevi smanjenja promjenljivosti i povećanja tlačne čvrstoće kutije. Skladištenje voća i povrća u hladnjačama te transportni uvjeti određuju jedno od najzahtjevnijih okruženja za ambalažu od valovitog kartona. Zahtjevi za ambalažu navode industriju voća da koriste valovite kartone visoke

djelotvornosti s relativno teškim Kraft kartonima, proizvedenih od čiste celuloze i spojeni vodootpornim ljepilima. Korištenje valovitog kartona nameće nužan i izrazit trošak industriji voća. Ispravnim odabirom izmjerenih podataka i dobivenih informacija ustanovljena su poboljšanja u proizvodnji kutija. Ona se postižu kroz usavršeno znanje onih faktora koji imaju najveći utjecaj na tlačnu čvrstoću kutije te je pružanje takvog znanja krajnji cilj ovog istraživanja.

Čvrstoća ambalaže kao osnovica istraživanja je dinamični sustav obzirom na vrijeme u kojem se pakirane namirnice nalaze. Istraživanje je ograničeno s nekoliko praktičnih uvjeta. Omogućen je pristup u jedinicu za proizvodnju valovitog kartona u Belišću d.d. koji proizvodi kutije iz rola valovitog kartona. Ne uključuje se eksperiment u jedinicama za proizvodnju celuloze i papira. Istraživanje je ograničeno odlukom da se koriste jabuke kao jedina vrsta voća koja se pakira u ispitivane uzorke kutija. Izbor ispitivane kutije bio je temeljen na količini koja je proizvedena u Belišće d.d. te jedinici za precizno izrezivanje (štancanje) utora za oblikovanje kutija. Konstrukcija kutije nije se uzimala u obzir u ovom istraživanju.

Razvojem i adekvatnim unosom informacija u određenu bazu smanjili bi varijacije u izdržljivosti kutije. To bi omogućilo smanjenje razlike između prosječne izdržljivosti i potrebne izdržljivosti kutije a da pri tom kutija zadrži prihvatljivo malu mogućnost loma.

U radu se predložu novi modeli za opisivanje stupnja deformacije valovitog kartona kao i stupnja predvidivosti njegove tlačne izdržljivosti. On pokazuje viskoelastična svojstva i širi se adsorpcijom vlage. Kako bi razumjeli pojavu utjecaja vlage i temperature na valoviti karton potrebno je usmjeriti određeni trud k shvaćanju cikličkih promjena na njegova svojstva.

Znanstvenim pristupom provest će se eksperimentalni plan s izvedenim realnim metodama koje će biti primjenjene u realnoj ambalažnoj industriji. Na temelju kvantificiranih podataka dobivena mjerenja vlažnosti i čvrstoće dobiva se novi uvid u planiranje upotrebe i poboljšanja ambalaže od valovitog kartona. Rezultati će se interpretirati regresijskom analizom.

Cilj istraživanja je definirati analitičke funkcije koje pokazuju smjer planiranja različitih eksperimentalnih uvjeta i izbor materijala. Time bi se uveo novi način sagledavanja čvrstoće valovitog kartona a potom primjena u industriji ambalaže općenito. Eksperimentiranjem s vlažnošću valovitog kartona dokazuje se preciznost ispitivanja kartona respektirajući težinu kutije i smanjenje kvalitete. U razmatranje se uzimaju parametri donje

granice zadovoljenja agrokulturne industrije. Ispitivanja se baziraju na simulaciji distribucijskog puta od proizvođača do potrošača sa vrlo promjenljivim vremenskim uvjetima. U tom smislu su razvijene metode i modeli koji osiguravaju zadane pretpostavke za postizanje poboljšanja svojstva kutija od valovitog kartona. To bi osiguralo viši stupanj automatizacije koji se može postići unapređenjem procesa proizvodnje kutija i povećanjem preciznosti tehnike ispitivanja valovitog kartona. U radu se postavljaju slijedeće hipoteze:

***Hipoteza rada 1:*** cikličke promjene relativne vlažnosti zraka uz zanemarivi utjecaj vremena trajanja opterećenja drastično samanjuju nominalnu tlačnu čvrstoću kutija od valovitog kartona

Predistraživanja su uputila na smjerove eksperimentalnog rada. Faktori koji utječu na tlačnu izdržljivost kutija od valovitog kartona u hladnjačama uključujući temperaturu i vlagu u hladnjači. To su cikličke promjene do kojih dolazi prilikom manipulacije paletizirane robe koja se mora distribuirati s jednog na drugo mjesto. Distribucijski put podrazumjeva dulji boravak u hladnjači pri skladištenju te kratkotrajno izlaganje atmosferskim uvjetima pri pretovaru. Promjena količine vlage uzrokovana je visokom relativnom vlažnošću zraka i niskom temperaturom u hladnjači, koje u njoj vladaju zbog očuvanja kvalitete i kvantitete voća i povrća. Skladištenje voća u rashlađenoj hladnjači zahtjeva upotrebu visokokvalitetnih kartona proizvedenih od nereciklirane sirovine sa ravnim slojevima i valovitim srednjim slojem ljepljenim voodootpornim ljepilima.

Nepoznanice koje su prisutne pri određivanju utjecaja cikličke promjene količine vlage na kompresijske i vlačne sile unutar valovitog kartona, fokusirane su na ciklički fenomen tlačnog puzanja materijala. Zbog svojstva histereze valovitog kartona, koji upija i otpušta vlagu u zrak, jedan dio apsorbirane vlage ostaje u njemu. Ponavljanjem tog procesa upijanja i otpuštanja vlage dolazi do efekta akumulacije vlage u kartonu što rezultira kolapsom ili urušavanjem kutija. Tlačno puzanje je glavni, ali ne i jedini, uzrok lomova i urušavanja kutija na paletama koje se nalaze u hladnjačama. Do urušavanja dolazi i zbog nepravilnog slaganja kutija u kupove te zbog oštećenja nepravilnim rukovanjem transportnim sredstvima.

Mjerenjem vlage i temperature u hladnjači te u njenoj vanjskoj okolini pokazuju znatne varijacije i naklonjenost povećanju relativne vlažnosti zraka za vrijeme ispitivanja.

Visoka relativna vlažnost zraka smanjuje nivo gubitka vlažnosti u voću ali također smanjuje i čvrstoću valovitog kartona putem većeg unosa vlage. Visoka vlažnost predstavlja veliki rizik i za voće i za kutije. Kod prvog izaziva truljenje i pojavu plijesni a kod drugog veliki pad čvrstoće i vrlo zahtjevnu okolinu za dobivanje prihvatljivih svojstava kutija od valovitog kartona. Prosječne dnevne temperature u hladnjači pokazuju manja odstupanja dok je u vanjskoj okolini ona znatno varira.

Razlika u temperaturi između hladnjače i vanjske okoline su velike pa predstavljaju zanata problem u održanju potrebnih svojstva čvrstoće kutije. Interval toplinskog šokiranja kutija na paletama, zajedno s upakiranim sadržajem, se istražuje metodom simulacije i eksperimentirana na distribucijskom putu u vremenu manipulacije pri pretovaru iz hladnjače u prijevozno sredstvo. Na temelju izmjerenih podataka tokom predistraživanja, upućuje smjer plana eksperimentiranja s kutijama od valovitog kartona. Interes je određivanje parametra koji valoriziraju mehaničkih svojstava valovitog kartona u okolini velikog sadržaja vlage.

U planu istraživanja se određuju postupci mjerenja kontrole kvalitete papira za ravni i valoviti sloj već u proizvodnom procesu njegove izrade. Takvi podaci se koriste za utvrđivanje utjecaja na graničnu tlačnu izdržljivost svakog sloja valovitog kartona kao i graničnu tlačnu izdržljivost kutije. Cilj istraživanja je numeričko i analogno rješenje opisa ovih pojava. Jednostavan način poboljšanja karakteristika valovitog kartona, s namjerom poboljšanja tlačne izdržljivosti bio bi reduciranje upijanja vlage. Posebna pozornost mora biti usmjerena na osiguranje optimalne vlažnosti oko skladištenog voća. Niska vlažnost ubrzava sušenje a visoka truljenje kod voća a drastični pad čvrstoće kod kutija. Troškovi vezani uz promjene koje utječu na reduciranje vlage u valovitom kartonu, moraju odgovarati uštedama postignutim reduciranjem njegove težine. Isto tako, promjene na valovitom kartonu ne bi smjele znatnije utjecati na proces recikliranja, jer bi se tada povećali toškovi odlaganja.

Plan istraživanja i eksperimentalnog rada uključuje postavljanje barijere za vlagu na površinu valovitog kartona. U području izučavanja kutija od valovitog kartona se posebna pažnja daje obloženosti unutarnje donje strane kutije, obzirom da bi samo voće puštalo najviše vlage u paleti i oko palate. Odluka o postavljanju obloge s vanjske strane kutije ima svoj značaj o veličini i stupnju kruženja vlage. Utjecaj vlage i temperature na svojstva izdržljivosti valovitog kartona samo je dio informacija potreban za precizno određivanje karakteristika kutija od valovitog kartona. Zbog toga se istraživanje proširuje na sakupljanje informacija o protoku zraka, kontinuiranom mjerenju temperature, vlažnosti zraka i količine

vlage u papiru unutar hladnjače. Kutija koja je predmet ovo rada je proizvedena od različitih testnih uzoraka ravnih i valovitih slojeva te različitih unosa gramatura. Valoviti slojevi su formirani u C i B profile valova za unutarnje i vanjske stjenke dok su ravni slojevi izrađeni od dva sloja papira od kojih niti jedan nije izbijen osim vanjskog sloja vanjske stjenke. Iz gore rečenog, postavlja se hipoteza:

***Hipoteza rada 2:*** poboljšane tehnike ispitivanja omogućuju da se osnovna težina kutije minimizira i da se smanji kvaliteta kutije do one donje granice koja može izdržati definirani distribucijski put a podložna je drastičnim promjena vlažnosti zraka i temperature okoline. Ta donja granica kvalitete kutije mora biti točno određena kako bi se smanjila mogućnost loma.

# METODOLOGIJA RADA

---

## 3.1. Plan i metode istraživanja

Metodologija rada u istraživanju postavlja klasifikaciju, terminologiju i riječnik „čvrstoće ambalaže od valovitog kartona“. Za potrebe istraživanja izrađeni su uzorci peteroslojnog valovitog kartona. Uzorci su izrađeni od različitih ravnih i valovitih slojeva papira i njihovih različitih gramatura. Za izradu ravnih slojeva korišteni su papiri: šrenc, smeđi testliner, bijeli testliner i kraftliner dok su za izradu valovitih slojeva korišteni welensthof i semi-chemical papiri. Uzorci valovitog kartona izrađeni su u poduzeću Belišće d.d. Izrađeno je šest potpuno različitih uzoraka sa kombinacijama ravnih i valovitih slojeva s pripadajućom gramaturom za svaki sloj papira. Vrste papira i gramature s njihovim ulaznim vrijednostima detaljno je opisan u tablicama od 3 do 8. Od dobivenih uzoraka valovitog kartona izrađene su transportne kutije za voće i povrće. Kutije su izrađene na automatskom stroju za štancanje Bobst te na automatskom stroju za formiranje kutija lijepljenjem Teco 2. Za potrebe istraživanja osiguran je dio prostora u hladnjači u skladišno distributivnom centru Konzuma. Uzorci kutija slagani su na palete standardne veličine od 800 x 1200 mm. U bazi palete bilo je osam kutija a po visini deset. U svim kutijama kao sadržaj su se koristile jabuke. Svaka kutija zajedno sa sadržajem imala je istu težinu od deset kilograma. Tijekom ispitivanja uzorci kutija se vade iz hladnjače, gdje su kondicionirani uvjeti vlage i temperature i izlažu se vanjskim (dnevnim) klimatskim uvjetima.

Jedan ciklus podrazumijeva boravak kutija u komori za hladnjače unutar 24 h pri konstantno niskoj temperaturi od 2-4°C i visokoj relativnoj vlažnosti zraka od 75-85%. Nakon toga slijedi kratkotrajno izlaganje od 15 minuta u promjenljivim vanjskim uvjetima, uglavnom relativno visoke ljetne temperature i relativno niske vlažnosti zraka uz prisustvo snažnog sunčevog zračenja. Time se simulira stvarna situacija pri distribuciji. Posljedica tih promjena je apsorpcija i desorpcija vlage iz zraka kojim valoviti karton svakim ciklusom postaje sve slabiji. Mehanosorpcijske deformacije koje nastaju u valovitom kartonu posljedica su tlačnog puzanja (creep) kutija.

Tablica 3. Uzorci valovitog kartona AS-0

Klasifikacija oznake kvalitete AS-0	AS-0		
Karakteristike sastavnica peterslojnog valovitog kartona	Slojevi (unosi) papira	Vrsta papira	Gramatura papira
	vanjski ravni sloj	bijeli kraftliner	135 g/m <sup>2</sup>
	vanjski valoviti sloj	SC fluting	175 g/m <sup>2</sup>
	srednji ravni sloj	SC fluting	175 g/m <sup>2</sup>
	unutarnji valoviti sloj	SC fluting	175 g/m <sup>2</sup>
	unutarnji ravni sloj	kraftliner	175 g/m <sup>2</sup>
dimenzije kutije za voće i povrće	500 x 300 x 170 mm		
gramatura [g/m <sup>2</sup> ]	1038		
debljina [mm]	6.58		
BST [kPa]	1757		
ECT [kN/m]	15.37		
sadržaj vlage [%]	7.1		
FCT [kPa]	277		
PET [J]	10.10		

Tablica 4. Uzorci valovitog kartona AS-1

Klasifikacija oznake kvalitete AS-1	AS-1		
Karakteristike sastavnica peterslojnog valovitog kartona	Slojevi (unosi) papira	Vrsta papira	Gramatura papira
	vanjski ravni sloj	bijeli kraftliner	135 g/m <sup>2</sup>
	vanjski valoviti sloj	SC fluting	150 g/m <sup>2</sup>
	srednji ravni sloj	testliner	125 g/m <sup>2</sup>
	unutarnji valoviti sloj	SC fluting	150 g/m <sup>2</sup>
	unutarnji ravni sloj	kraftliner	186 g/m <sup>2</sup>
dimenzije kutije za voće i povrće	500 x 300 x 170 mm		
gramatura val. kartona [g/m <sup>2</sup> ]	916		
debljina [mm]	6.53		
BST [kPa]	1608		
ECT [kN/m]	13.73		
sadržaj vlage [%]	5.6		
FCT [kPa]	232		
PET [J]	9.20		



Tablica 5. Uzorci valovitog kartona 3KSE

Klasifikacija oznake kvalitete 3 KSE	<b>3KSE</b>		
Karakteristike sastavnica peteroslojnog valovitog kartona	Slojevi (unosi) papira	Vrsta papira	Gramatura papira
	vanjski ravni sloj	liner 0	175 g/m <sup>2</sup>
	vanjski valoviti sloj	medium	150 g/m <sup>2</sup>
	srednji ravni sloj	liner 0	175 g/m <sup>2</sup>
	unutarnji valoviti sloj	medium	150 g/m <sup>2</sup>
	unutarnji ravni sloj	liner 0	175 g/m <sup>2</sup>
dimenzije kutije za voće i povrće	500 x 300 x 170 mm		
gramatura [g/m <sup>2</sup> ]	924		
debljina [mm]	6.43		
BST [kPa]	1722		
ECT [kN/m]	11.07		
sadržaj vlage [%]	5.6		
FCT [kPa]	126		
PET [J]	9.6		

Tablica 6. Uzorci valovitog kartona BTKE/2F

Klasifikacija oznake kvalitete BTKE/2F	<b>BTKE/2F</b>		
Karakteristike sastavnica peteroslojnog valovitog kartona	Slojevi (unosi) papira	Vrsta papira	Gramatura papira
	vanjski ravni sloj	bijeli testliner	140 g/m <sup>2</sup>
	vanjski valoviti sloj	SC fluting	150 g/m <sup>2</sup>
	srednji ravni sloj	testliner	130 g/m <sup>2</sup>
	unutarnji valoviti sloj	SC fluting	150 g/m <sup>2</sup>
	unutarnji ravni sloj	liner 0	175 g/m <sup>2</sup>
Dimenzije kutije za voće i povrće	500 x 300 x 170 mm		
gramatura [g/m <sup>2</sup> ]	865		
debljina [mm]	6.27		
BST [kPa]	1258		
ECT [kN/m]	9.94		
sadržaj vlage [%]	5.8		
FCT [kPa]	129		
PET [J]	8.8		

Tablica 7. Uzorci valovitog kartona 2KŠ-E

Klasifikacija oznake kvalitete 2 KŠ-E	2KŠ-E		
Karakteristike sastavnica peteroslojnog valovitog kartona	Slojevi (unos) papira	Vrsta papira	Gramatura papira
	vanjski ravni sloj	Liner 0	140 g/m <sup>2</sup>
	vanjski valoviti sloj	medium	100 g/m <sup>2</sup>
	srednji ravni sloj	šrenc	110 g/m <sup>2</sup>
	unutarnji valoviti sloj	medium	150 g/m <sup>2</sup>
	unutarnji ravni sloj	liner 0	175 g/m <sup>2</sup>
Dimenzije kutije za voće i povrće	500 x 300 x 170 mm		
gramatura [g/m <sup>2</sup> ]	741		
debljina [mm]	6.33		
BST [kPa]	1375		
ECT [kN/m]	9.6		
sadržaj vlage [%]	5.3		
FCT [kPa]	168		
PET [J]	8.2		

Tablica 8. Uzorci valovitog kartona 2KŠ

Klasifikacija oznake kvalitete 2 KŠ	2KŠ		
Karakteristike sastavnica peteroslojnog valovitog kartona	Slojevi (unos) papira	Vrsta papira	Gramatura papira
	vanjski ravni sloj	liner 0	140 g/m <sup>2</sup>
	vanjski valoviti sloj	medium	100 g/m <sup>2</sup>
	srednji ravni sloj	šrenc	110 g/m <sup>2</sup>
	unutarnji valoviti sloj	medium	100 g/m <sup>2</sup>
	unutarnji ravni sloj	liner 0	140 g/m <sup>2</sup>
Dimenzije kutije za voće i povrće	500 x 300 x 170 mm		
gramatura [g/m <sup>2</sup> ]	672		
debljina [mm]	6.35		
BST [kPa]	1363		
ECT [kN/m]	8.95		
sadržaj vlage [%]	5.0		
FCT [kPa]	182		
PET [J]	7.25		

Ispitivana je gramatura, debljina, otpornost na prskanje po Mullenu, otpornost horizontalne površine valovitog kartona na tlačnu čvrstoću, otpornost vertikalne površine valovitog kartona na tlačnu čvrstoću, sadržaj vlage u valovitom kartonu, otpornost valovitog kartona na dinamičko probijanje, otpornost kutije od valovitog kartona na tlačnu čvrstoću, relativna vlažnost zraka u hladnjači, relativna vlažnost zraka u okolini, temperatura hladnjače i temperatura okoline. Brojna mjerenja su interpretirana regresijskom analizom

### 3.2. Klasifikacija označavanja papirnatih slojeva u valovitom kartonu

U istraživanju su korišteni papiri za ravni sloj: šrenc, smeđi testliner, bijeli testliner, bijeli kraftliner a za valovite slojeve welensthof i semi-chemical papiri. Ovakvi nazivi papira su uobičajeni u industriji ambalaže na području Republike Hrvatske i ne postoje druga rješenja. Postoji potreba za novim načinom označavanja da se standardizira postojeće stanje. Kutije od valovitog kartona za voće i povrće svrstavaju se u transportnu i komercijalnu ambalažu pa je nivo kvalitete važan s oba aspekta. Vrsta i gramatura slojeva papira od koje se izrađuje valoviti karton a potom kutija u potpunosti određuju njenu kvalitetu jer se njihovim brojnim kombinacijama mogu dobiti kutije veoma različitih karakteristika. Oznake materijala iz tablice 10 su tržišne oznake jednog proizvođača i ne opisuju materijal u potpunosti. Svaki proizvođač u Republici Hrvatskoj ima drugačije oznake. Tako se, na primjer, valoviti karton koji jedna tvornica proizvodi pod oznakom 2T-b na tržištu pojavljuje i s oznakama 2K-b, 1919B, 2K-3, 2PK-b, T 21 B od nekih drugih proizvođača. Za potpuni opis kvalitete valovitog kartona, predlaže se da se pored oznaka vrste papira i valova, navede i gramatura papira na slijedeći način:

T = testliner

R = reciklirani fluting

B = b-val



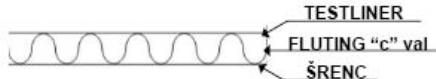
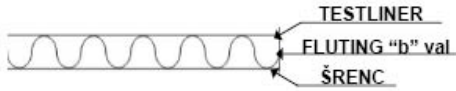
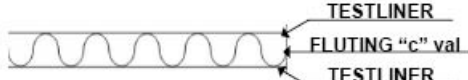
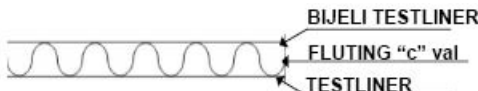


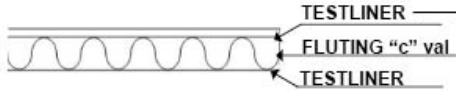
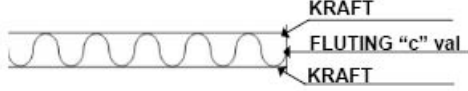
4 = 140 g/m<sup>2</sup>

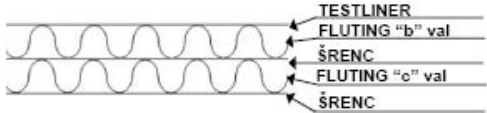
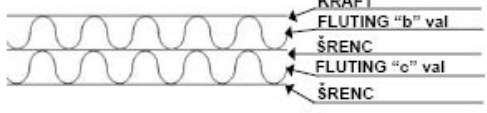
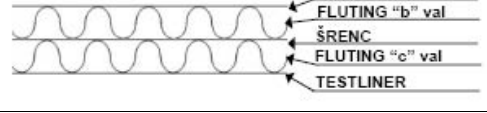
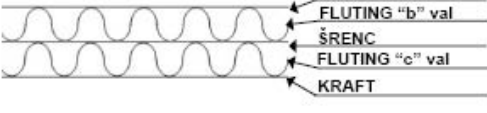
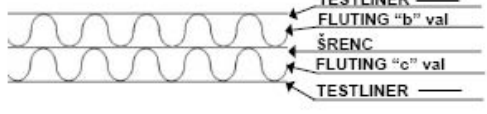
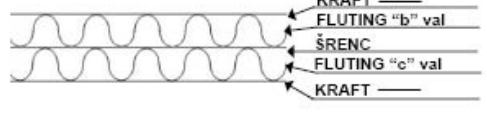
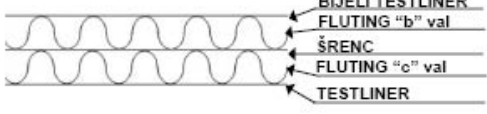
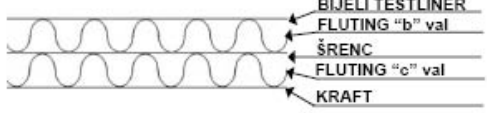
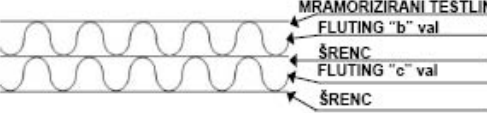
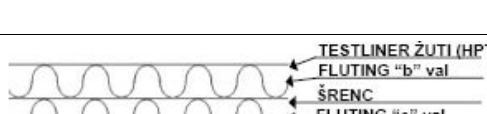
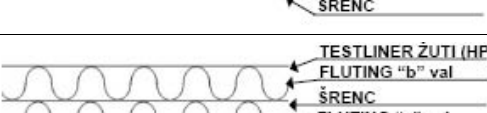
1 = 112 g/m<sup>2</sup>

Iz primjera se vidi da se u ovom slučaju radi o troslojnom valovitom kartonu čiji su ravni slojevi izrađeni od testlinera 140 g/m<sup>2</sup>, dok je srednji valoviti sloj reciklirani fluting, 112 g/m<sup>2</sup> s profilom *b* vala. Do sada niti jedan proizvođač valovitog kartona u svojim šiframa

nije imao oznaku gramature. Obzirom da su unosi papira uvijek kreću u rasponu od 100gr/m<sup>2</sup> do 200gr/m<sup>2</sup> dovoljno je upisati jednoznamenasti broj od 0 do 9 koji će označavati gramaturu kao iz navedenog primjera. Time bi proizvođač ali i potrošač kutija od valovitog kartona imao potpunu informaciju o kakvoj se kvaliteti materijala radi.

Tablica 9. Osnovne kombinacije papira za izradu valovitog kartona

Oznake materijala	Kombinacije papira
<b>Š-B</b>	
<b>T-E</b>	
<b>TŠ-c</b>	
<b>TŠ -b</b>	
<b>2T-c</b>	
<b>BT-c</b>	
<b>BK-c</b>	
<b>KT-c</b>	
<b>ETT-c</b>	
<b>2K-c</b>	

Oznake materijala	Kombinacije papira
<b>T2Š-b/c</b>	 <p>TESTLINER FLUTING "b" val ŠRENC FLUTING "c" val ŠRENC</p>
<b>K2Š-b/c</b>	 <p>KRAFT FLUTING "b" val ŠRENC FLUTING "c" val ŠRENC</p>
<b>2TŠ-b/c</b>	 <p>TESTLINER FLUTING "b" val ŠRENC FLUTING "c" val TESTLINER</p>
<b>ETKŠ-b/c</b>	 <p>TESTLINER FLUTING "b" val ŠRENC FLUTING "c" val KRAFT</p>
<b>E2TŠ-b/c</b>	 <p>TESTLINER FLUTING "b" val ŠRENC FLUTING "c" val TESTLINER</p>
<b>E2KŠ-b/c</b>	 <p>KRAFT FLUTING "b" val ŠRENC FLUTING "c" val KRAFT</p>
<b>BTŠ-b/c</b>	 <p>BIJELI TESTLINER FLUTING "b" val ŠRENC FLUTING "c" val TESTLINER</p>
<b>BKŠ-b/c</b>	 <p>BIJELI TESTLINER FLUTING "b" val ŠRENC FLUTING "c" val KRAFT</p>
<b>M2Š-b/c</b>	 <p>MRAMORIZIRANI TESTLINER FLUTING "b" val ŠRENC FLUTING "c" val ŠRENC</p>
<b>Ž2Š-b/c</b>	 <p>TESTLINER ŽUTI (HPT) FLUTING "b" val ŠRENC FLUTING "c" val ŠRENC</p>
<b>ŽTŠ-b/c</b>	 <p>TESTLINER ŽUTI (HPT) FLUTING "b" val ŠRENC FLUTING "c" val TESTLINER</p>

### 3. 3. Regresijska analiza

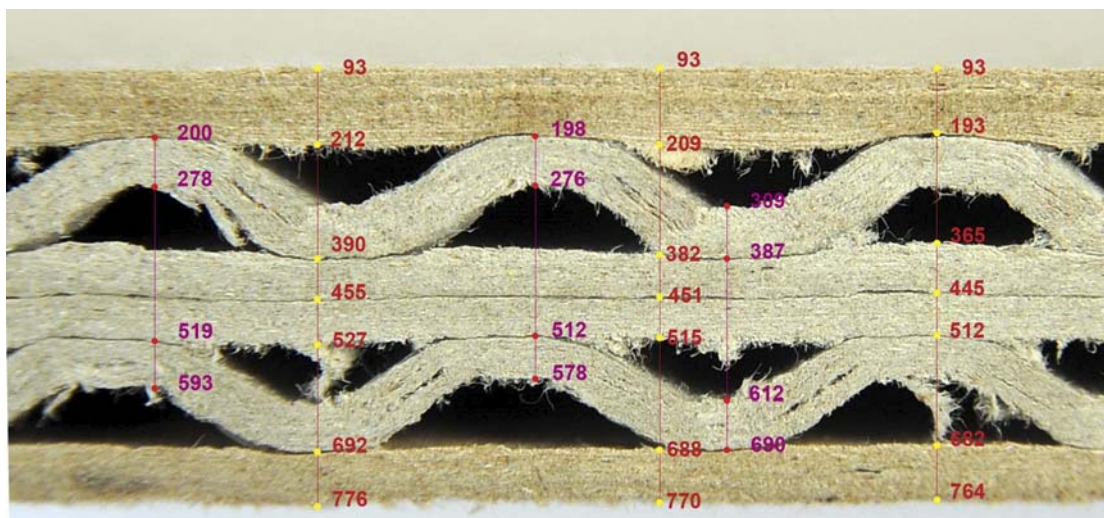
Metoda regresijske analize je algebarski model kojim se analitički određuje statistička povezanost jedne numeričke varijable s dvije ili više drugih numeričkih varijabli. Regresijski model je u pravilu jednadžba koja sadrži varijable i parametre:  $Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_k) + e$

Ako pretpostavimo da se linearna regresijska veza između regresand varijable  $Y$  i odabranog skupa regresorskih varijabli želi utvrditi na osnovu  $n$  opažanja (mjerjenja) u gornjem izrazu  $y$  je vektor stupac opaženih vrijednosti zavisne varijable a  $X$  je matrica vrijednosti nezavisnih varijabli. Značenje slučajne varijable je dvojako: s jedne strane ona predstavlja greške u mjerenju varijabli  $y$ , a s druge strane utjecaj izostavljenih varijabli na zavisnu varijablu. Dakle, ako su utjecaji varijabli koje nismo uključili u model mali, a greške pri mjerenju male i slučajne možemo pretpostaviti da je varijabla  $e$  slučajnog karaktera i da u prosjeku ne utječe na zavisnu varijablu. Pri tome je ozbiljniji problem kada nisu precizno izmjerene nezavisne varijable, za razliku od slučaja kada su neprecizno izmjerene zavisne varijable, zato što pogreške u mjerenju nezavisnih varijabli uzrokuju pristrane ocjene parametara metodom najmanjih kvadrata. Zadatak regresijske analize je pronaći procjene nepoznatih parametara i nepoznate varijance slučajnih varijabli. U najvećem broju slučajeva za ocjenjivanje parametara koristi se metoda najmanjih kvadrata. Cilj metode najmanjih kvadrata je minimizirati zbroj kvadrata odstupanja slučajnih varijabli na temelju uzorka. Standardizirani regresijski koeficijenti za razliku od nestandardiziranih omogućuju usporedbu relativne važnosti pojedinih nezavisnih varijabli u modelu. U tom slučaju standardizirani regresijski koeficijent uz  $j$ -tu regresorsku varijablu pokazuje za koliko će se standardnih devijacija promijeniti varijabla  $\hat{y}$  ako se varijabla  $x_j$  promijeni za jednu standardnu devijaciju, uz pretpostavku da se ostale varijable neće promijeniti. Nakon što se izračunaju ocjene parametara osnovnog skupa potrebno je testirati hipoteze o statističkoj značajnosti odabranih regresorskih varijabli. Često se postupak testiranja značajnosti parametara provodi pomoću jednosmjernih testova ispitujući značajnost i samih predznaka ocijenjenih regresijskih koeficijenata koji ovise o smjeru povezanosti određene regresorske varijable s regresand varijablom.

### 3.4. Algoritmi mjerenja debljine papira i praznih međuprostora u valovitom kartonu

Postavljamo novu metodu kvantitativnog određivanja deformacija u mikrostrukтури valovitog kartona. Presjek valovitog kartona, mekanog ili vlažnog materijala mjeri se neinvazivnim postupkom [26]. Sastoji se od dva odvojena koraka: Prvi, nazvan „piksel preciznost“ (PP), je mjerenje debljine slojeva valovitog kartona u njegovoj mikrostrukтури. i drugi, nazvan „višeslojne debljinske razlike“ (VD) mjeri debljine presjeka pojedinih elemenata u dužem profilnom rezu te ih postavlja u relativne međuodnose. Mjerenja visoke preciznosti dimenzije svakog sloja valovitog kartona ili njegovog dijelića postavlja nov način kvantitativno određenja strukture promjena materijala od čega je ova ambalaža građena.

Optička snimka digitalnom kamerom omogućuje preciznost od preko tisuću dijelova na jednom milimetru. Budući da se snimanje odvija u različitim bližim ili daljnjim pozicijama, snima se i tvrdi talon (kovanica od 5 kuna). I za njega se određuje debljina kao broj piksela na istoj snimci, u isto vrijeme. Svako mjerenje će dati drugačiji broj piksela. Posebno se izmjeri takav tvrdi predmet kako bi se odredila veličina svakog piksela u realnom mjerenju debljine pojedinih mikrodjelova valovitog kartona. Na slici broj 15 date su piksel pozicije, relativno za dvostruko slijepljeni troslojni karton.



Slika 15. Vrijednost pozicije piksela na slici valovitog kartona

Ovaj debeli šesteroslojni valoviti karton nije tipičan. Izabran je zbog ilustracije metoda mjerenja i demonstracije izvornog računarskog programa. Talon od novčića (kovanica od 5 kuna) ima debljinu 1,88 milimetra. Mjeren je i debeli valoviti karton. Širina je 13,86 mm te

zajedno mjereni materijal i etalon, slika 16. Odavde slijedi, za ovu snimku, da je piksel definiran kao 0.0203 milimetra. Pojedini sloj je mjerjen na desetak mjesta kako bi se utvrdila njegova debljina i razlike kroz statističke algoritme te su izračunate srednje vrijednosti i standardne devijacije pojedinog sloja ovog troslojnog valovitog kartona. Ovakova mjerenja se provode konvencionalnim programima zasnovanim na piksel grafici u kojoj se prikazuju slikovni elemnti sa troznamenkastim razlučivanjem.



Slika 16. Mjerenje debelog, tvrdog šesteroslojnog valovitog kartona i etalona

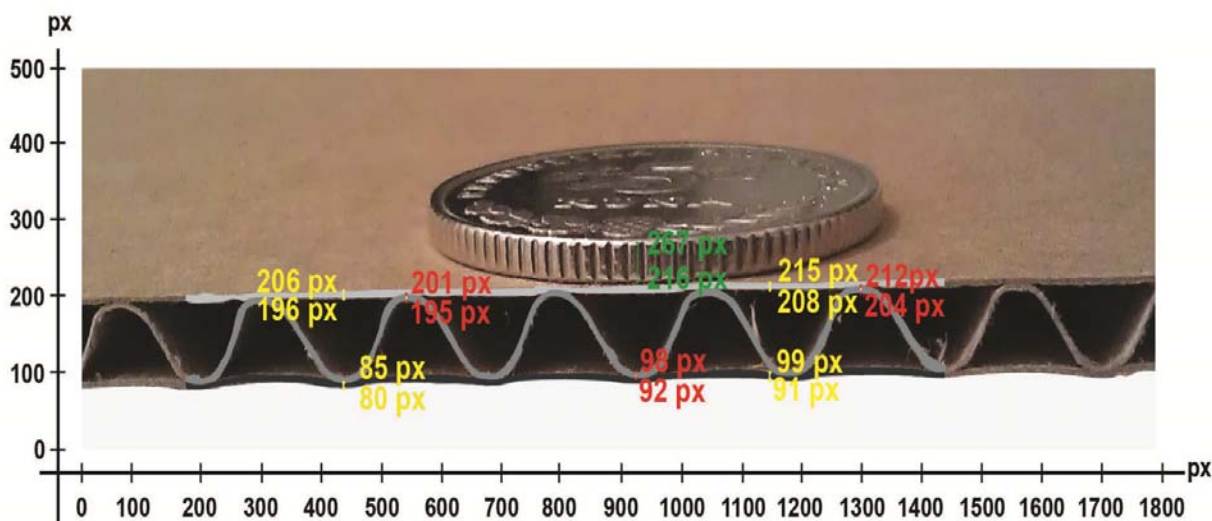
Drugi korak u metodi je mjerenje „višeslojne debljinske razlike“ kojom se proračunava količina papira i praznih međuprostora u valovitom kartonu. Makro fotografija presjeka valovitog kartona raščlanjuje se na piksel strukturu visoke rezolucije. Svakom slikovnom elementu se pridružuje pokrivenost nakon interpretacije presjeka valovitog kartona u vektorskoj grafici. Pikseli predstavljaju papir od kojeg je formiran valoviti karton. Prostor slike izvan kartona je izdvojeno označen budući da površine nisu ravne. Ti pikseli se zbrajaju zasebno i ne utječu na konačan rezultat zastupljenosti pojedinih slojeva valovitog kartona. Svi dijelovi koji predstavljaju papir, umjetno su razlučeni po slojevima pridruživanjem pseudo boje. Metoda i programsko rješenje je osnova izračunavanja deformacija nastalih zbog invazivnih djelovanja na valoviti karton, te izučavanje meteoroloških utjecaja koji mijenjaju geometriju mikrostrukture takovog ambalažnog materijala.



## REZULTATI I RASPRAVA

### 4.1. Mjerenje ravnih i valovitih slojeva valovitog kartona neinvazivnom metodom

U ovom poglavlju prikazuju se eksperimenti na različitim stupnjevima vlaženja valovitog kartona. Proučene su mikrostrukture papira za valoviti karton, njihove deformacije uslijed vlage sa ciljem potpunog razumjevanja njegove transformacije čime se mijenjaju i njegova fizikalna svojstva čvrstoće. U svrhu ovog rada izabrani su pojedinačni uzorci prije i nakon ekstremnog utjecaja vlage kako bi se dobio vizuelni uvid u njegovo raspadanje. Izabrani su primjeri troslojnog, peteroslojnog i sedmeroslojnog valovitog kartona (slike 17, 18, 19) i njihove vrijednosti (tablice 10, 11, 12). Precizno mjrenje elemenata valovitog kartona na kojima su izvršeni eksperimenti u svrhu utvrđivanja čvrstoće kartona u kondicioniranim uvjetima izvedeno je neinvazivnom metodom određivanja debljine papira i svakog elementa koji čine valoviti karton u različitim stanjima njihove vlažnosti.

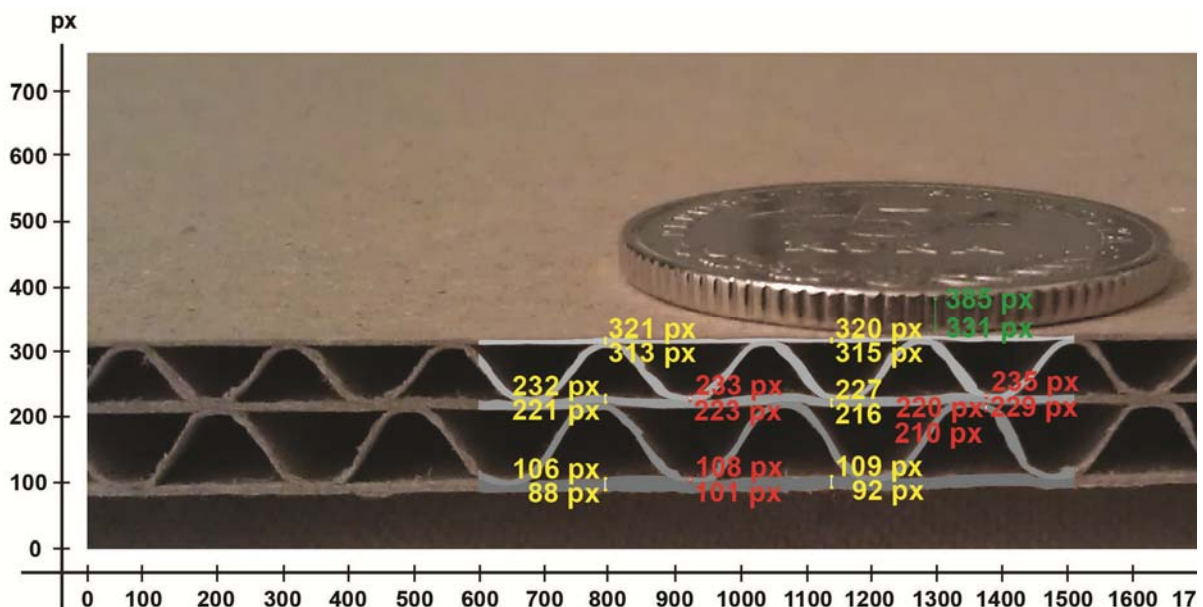


Slika 17. Troslojni valoviti karton i etalon

Tablica 10. Debljina troslojnog valovitog kartona i njegovih slojeva (talon = 0.0458 mm/px)

	Debljina papira		Debljina valovitog kartona		Širina vala	
	px	mm	px	mm	px	mm
min	6	0,274	109	4,992	247	11,312
max	11	0,503	126	5,770	259	2,702
sr	<b>7,75</b>	<b>0,354</b>	<b>113,3</b>	<b>5,189</b>	<b>252</b>	<b>11,541</b>
std	2,85	0,130	14,22	0.651	8,3	0,380

Debljina novčića koji služi kao talon iznosi 1,88 mm, (poglavlje 3.4, slika 16). Slike su snimane iz različitih udaljenosti i imaju različitu veličinu piksla naspram centimetru. Debljina novčića na slici broj 17 iznosi (267-216 px) 41 px. Na ovaj slici veličina piksla iznosi (1,88 mm/41) 0,0458 mm. Ova veličina se mijenja od slike do slike ovisno o trenutnom snimanju. U tablici 10 su date debljine slojeva papira i ukupna debljina valovitog kartona. Razmak između pojedinih valova u prosjeku iznosi 251,6 px što je 11,523 mm. Širina valova ima standardnu devijaciju u iznosu od 8,3 px.



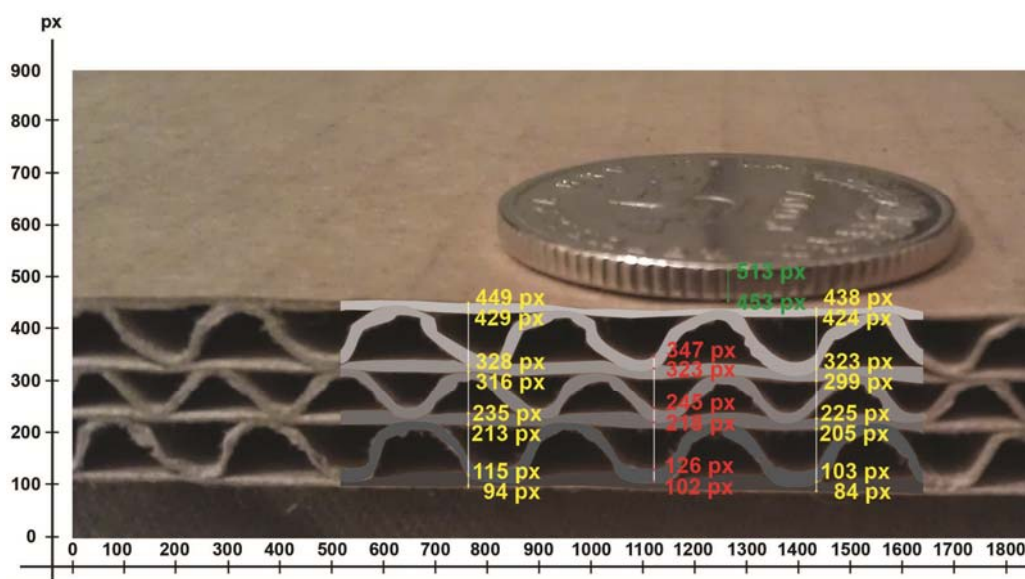
Slika 18. Peteroslojni valoviti karton i etalon

Tablica 11. Peteroslojni valoviti karton-gornji sloj (talon = 0,0348 mm/px)

	Debljina papira		Debljina gornjeg sloja valovitog kartona		Širina vala	
	px	mm	px	mm	px	mm
min	7	0,243	95	3,306	237	8,247
max	11	0,382	108	3,758	248	8,630
sr	<b>7,85</b>	<b>0,273</b>	<b>102</b>	<b>3.549</b>	<b>240,8</b>	<b>8,379</b>
std	2,45	0,085	13,42	0.467	5,5	0,191

Tablica 12. Peteroslojni valoviti karton-donji sloj (talon = 0,0348 mm/px)

	Debljina papira		Debljina donjeg sloja valovitog kartona		Širina vala	
	px	mm	px	mm	px	mm
min	7	0,243	132	4,593	272	9,465
max	17	0,591	144	5,011	310	10,788
sr	<b>14,0</b>	<b>0,487</b>	<b>137</b>	<b>4,767</b>	<b>285,5</b>	<b>9,935</b>
std	6,12	0,212	6,30	0.467	18,3	0,636



Slika 19. Sedmeroslojni valoviti karton i etalon

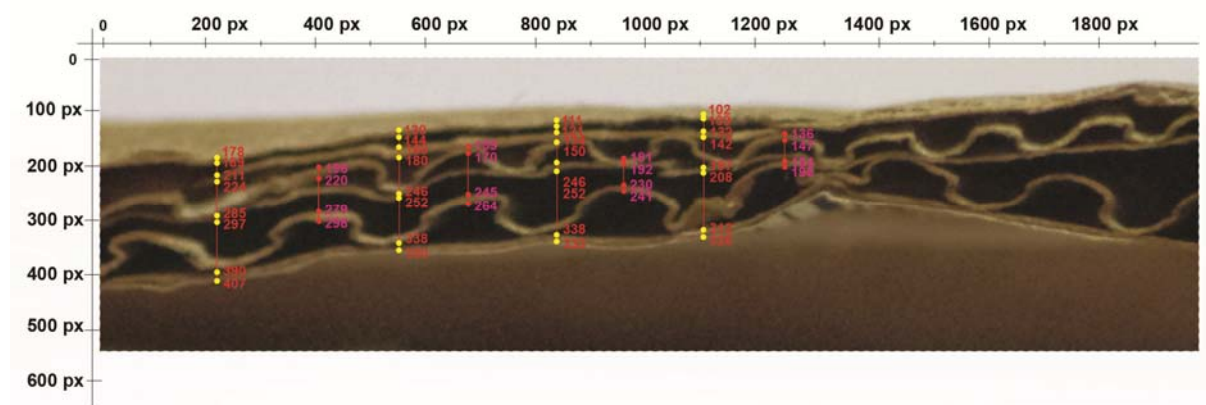
Tablica 13. Sedmeroslojni valoviti karton – svih 7 slojeva (talon = 0,031 mm/px)

	Debljina papira		Debljina valovitog kartona		Širina vala	
	px	mm	px	mm	px	mm
min	12	0,372	345	10,695	298	9,238
max	27	0,837	354	10,974	307	9,517
sr	<b>20</b>	<b>0,620</b>	<b>351</b>	<b>10,881</b>	<b>226,75</b>	<b>7,029</b>
std	5,42	0,168	4,05	1,891	5,30	0,164

Tokom rada provedena su eksperimenti na različitim uzorcima valovitog kartona prije i poslije vlaženja i mehaničkih pritisaka. Drastičan primjer promjena unutar slojeva valovitog kartona prikazan je na slici 20 nakon eksperimentalnog, umjetnog djelovanja sa vlagom. Ekstremna deformacija uslijed vlage do razine raspadanje valovitog kartona prikazana je na doljnjem primjeru, slika 21.



Slika 20. Mjerenje etalona i uzorka valovitog kartona



Slika 21. Uzorak deformiranog peteroslojnog valovitog kartona uslijed vlage i opterećenja

Mjerenja su provedena na velikom uzorku pod istim geometrijskim snimanjima. Za ilustraciju na ovom radu izabran je uzorak na slici 21 koji pokazuje ekstremno veliku situaciju raspadanja valovitog kartona pod utjecajem vlage. Kada bi mjerili talon i uzorak zajedno nismo sigurni u ishod zbog različitosti pritisaka. Zbog toga se u ovoj radnji uvodi mjerenje preko pixl metode. Novčić debljine 1.88 mm ima 110 px. Debljina 1px je 0,017 mm. Slika ilustrira velike deformacije uslijed vlage i mehaničkih pritisaka koji indiciraju nejednoličnost i nekonzistentnost materijala. Karton je toliko olabavljen da je jedini način mjerenja preko neinvazivne pixl metode. Pretpostavka je da peridičnost i visina vala jednaka na cijelom prostoru pruža veću čvrstoću nego kada je peridičnost i visina deformirana kao na gornjoj slici. Sva mjerenja u nastavku temelje se na razlikama između deformiranih i nedeformiranih kartona zbog vlage i mehaničkih opterećenja.

Tablica 14. Deformirani peteroslojni valoviti karton – svih 5 slojeva (talon = 0,017 mm/px)

	Debljina papira		Debljina valovitog kartona		Širina vala	
	px	mm	px	mm	px	mm
min	6	0,102	151	2,567	185	3,145
max	24	0,408	224	3,808	296	5,032
sr	<b>11</b>	<b>0,187</b>	<b>195</b>	<b>3,315</b>	<b>266</b>	<b>4,522</b>
std	7	0,119	38	0,646	55	0,935

Ovom kvantitativnom metodom mjerenja utvrđene su deformacije unutar slojeva valovitog kartona. U tablici 14 date su veličine minimuma i maksimuma te standardne devijacije. Uspoređivanjem sa prethodnim tablicama čiji uzorci valovitog kartona nisu bili pod utjecajem vlage i mehaničkih opterećenja prikazana je nastala razlika između njih. Preko ove slike se pokazuje raspad slojeva valovitog kartona čime je narušena čvrstoća kutije. Numerički podaci u tablici 14 su poveznica između razumjevanja čvrstoće valovitog kartona pod djelovanjem vlage i mehaničkih pritisaka.

## 4.2. Rezultati ispitivanja za valoviti karton AS-0

Mjerenja tlačne čvrstoće, vlažnosti, temperature te vremenska trajanja pojedinih eksperimenata dali su novu i drugačiju interpretaciju od uobičajenih tvrdnji. Rezultati su prikazani u tablicama od 15 do 22 za svaku kvalitetu valovitog kartona posebno. Postavljene su analitičke relacije, interpretirane regresijskim modelima. U komori za hlađenje vrijednosti stanja zraka održavani su tijekom ispitivanja u rasponu temperature od 2.9°C do 5.1°C. Izmjerene vrijednosti stanja zraka komore za hlađenje i okoline u periodu od pet dana prikazane su u tablici 15.

Relativna vlažnost zraka bila je u granicama od 72 do 82.5%. Stanje zraka izvan komore na otvorenom prostoru u periodu ispitivanja bilo je izrazito promjenljivo. Uglavnom očekivane niske vrijednosti relativne vlažnosti zraka za ljetni period od 35.1 do 56.5% uz velika odstupanja temperature koja se kretala od 17.1°C do 33.1°C.

Tablica 15. Parametri stanja zraka komore za hlađenje i okoline

Broj dana	1. dan	2. dan	3. dan.	4. dan	5. dan
Relativna vlažnost komore $r_k$ [%]	72.1	82.5	77.5	72.5	72
Temperatura komore $t_k$ [°C]	4.1	3.0	2.9	5.1	3.4
Vanjska temperatura zraka $t$ [°C]	20.5	28.1	17.1	32.1	33.1
Vanjska relativna vlažnost zraka $r$ [%]	56.5	35.1	93.0	40.1	39.0
Temperaturna razlika $\Delta T$ [°C]	16.4	32.1	14.2	27	29.7
Razlika relativne vlažnosti zraka $\Delta r$ [%]	15.6	47.4	-15.5	32.4	33

Izmjereni podaci pokazuju izloženost ambalaže od valovitog kartona vrlo promjenljivim klimatskim uvjetima kakvi su često prisutni u realnom distribucijskom putu od proizvođača do potrošača što je i bio cilj istraživanja.

Tablica 16. Rezultati ispitivanja za valoviti karton kvalitete AS-0

<b>Kvaliteta AS-0</b>						
Broj dana/vrsta ispitivanja	Ulazni podaci	1. dan	2. dan	3. dan	4. dan	5. dan
gramatura [g/m <sup>2</sup> ]	1038	1079	1122	1132	1135	1145
debljina [mm]	6.58	6.62	6.7	6.70	6.73	6.75
BST [kPa]	1757	1623	1603	1488	1598	1542
ECT [kN/m]	15.37	13.93	11.28	12.69	10.47	7.66
sadržaj vlage [%]	7.1	10.50	10.96	15.11	15.70	15.15
FCT [kPa]	277	272	196	133	154	143
PET [J]	10.10	10.30	10.00	10.00	10.10	10.10
BCT [kg]	580	440	470	340	250	280

Peteroslojni valoviti karton kvalitete AS-0 najveće gramature, te nominalno prema svojim sastavnicama najkvalitetniji i najskuplji valoviti karton od ispitivanih pokazuje porast gramature i debljine usporedo s povećanjem sadržaja vlage. Sadržaj vlage u valovitom kartonu povećan je čak 113%. Ravnotežni sadržaj vlage za različite temperature i relativne vlažnosti zraka u valovitom kartonu AS-0 prikazan je na slici 23, a brzina upijanja vlage na slici 24. Ovim se dokazuje da je kod valovitog kartona došlo do znatnog upijanja vlage u komori za hlađenje, te su se kao posljedica toga pojavile u određenoj mjeri higroekspanzivne deformacije. Na temelju izmjerenih vrijednosti i podataka pokazuje se znatno smanjenje svih mehaničkih svojstava u relativno kratkom vremenskom periodu ispitivanja. Iznimka je dinamička žilavost valovitog kartona PET koja je zadržala početnu vrijednost. BST je smanjen za oko 12%, FCT za skoro 50%. Najvažnije mehaničko svojstvo valovitog kartona koje umnogome određuje tlačnu čvrstoću ambalaže ECT smanjen je za samo 7 dana za 50%. Time se potvrđuje da je kod valovitog kartona došlo do pojave ubrzanih mehanosorpcijskih deformacija zbog sinergije različitih faktora kao što su sadržaj vlage u valovitom kartonu, broj toplinskih šokova (broj kratkotrajnih izlaganja ambalaže vanjskim atmosferskim uvjetima), omjer opterećenja i nominalne tlačne čvrstoće (BCT) i u nešto manjoj mjeri vrijeme trajanja opterećenja. Opisani rezultati po danima prikazani su u tablici 16.

Tlačna čvrstoća BCT ambalaže od valovitog kartona smanjena je za gotovo 52% čime se potvrđuje da je ECT valovitog kartona najbolji procjenitelj tlačne čvrstoće takve ambalaže. Na temelju vrijednosti koje su dobivene mjerenjem vidljivo je kako znatno smanjenje mehaničkih svojstava valovitog kartona prati istovremeno veliko povećanje sadržaja vlage. Iz tog razloga iznimno je bitno utvrditi higroskopsnost ispitivanih valovitih kartona, odnosno sposobnost i brzinu upijanja vlage iz zraka koji ga okružuje. Stoga će modelima regresijske analize kreiranje izoterma upijanja vlage za sve ispitivane kvalitete valovitog kartona.

Određene su relacije za ravnotežne uvjete sadržaja vlage u valovitom kartonu te izvedena međuzavisnost o relativnoj vlažnosti i temperaturi zraka koji ga okružuje. Sadržaj vlage definiran je kao omjer mase apsorbirane vlage i mase suhog ili vlažnog valovitog kartona. Model ima široku primjenu u prehrambenoj industriji pri analizi adsorpcije i desorpcije vlage različitih prehrambenih proizvoda, osobito voća i povrća. Model je moguće primijeniti i na papir, odnosno valoviti karton koji onda u svom osnovnom obliku glasi:

$$m_{\infty} = \frac{m_0 \cdot c \cdot k \cdot r}{(1 - k \cdot r) \cdot (1 - k \cdot r + c \cdot k \cdot r)}$$

gdje je:

$m_{\infty}$  – ravnotežni sadržaj vlage valovitog kartona pri adsorpciji ili desorpciji vlage iz zraka

(u % ili g vlage/100g suhog ili vlažnog valovitog kartona)

r – relativna vlažnost zraka (u %)

$m_0$  – sadržaj vlage pri zasićenju monosloja (u %); c, k - Guggenheimovi koeficijenti

U modificiranom modelu koeficijente  $m_0$ , c, k možemo definirati kao funkcije temperature i zraka:

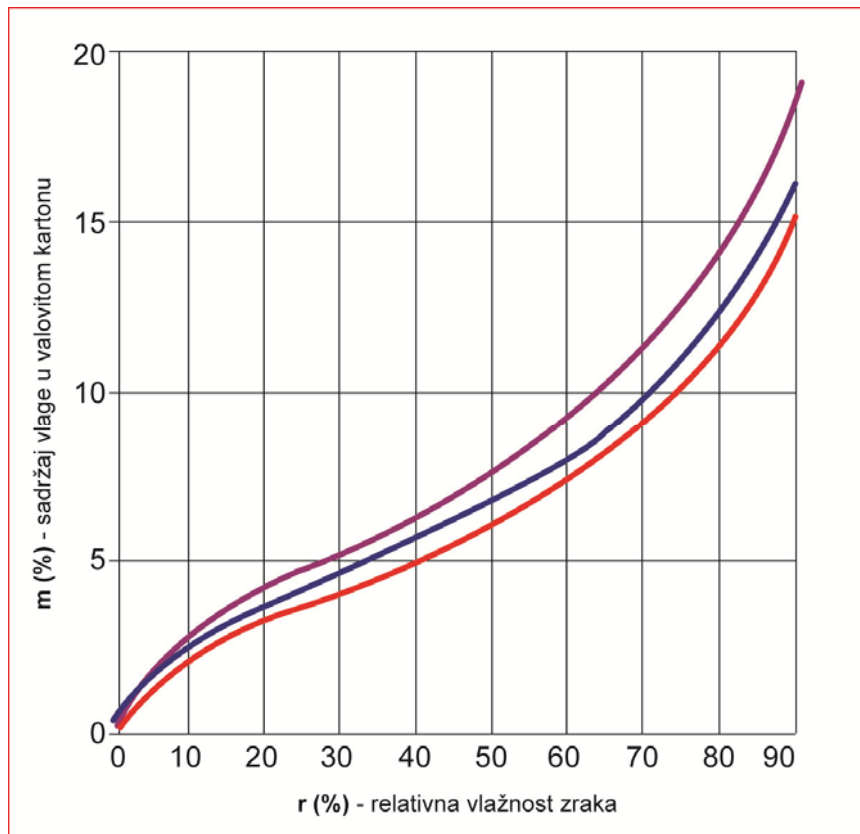
$$c(T) = c_1 \cdot e^{\frac{c_2}{T}}, k(T) = k_1 \cdot e^{\frac{k_2}{T}}, m_0(T) = m_1 \cdot e^{\frac{m_2}{T}}$$

Ovako definiran model predstavlja ravnotežni sadržaj vlage u valovitom kartonu kao funkciju dvije varijable, relativne vlažnosti i temperature zraka  $m_{\infty} = f(r, T)$  sa 6 bezdimenzionalnih koeficijenata  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $k_1$  i  $k_2$  koji ovise o svojstvima valovitog kartona. Vrijednosti koeficijenata dobivenih regresijskom analizom kao i pripadajući izrazi regresijskih funkcija nalaze se u prilogu.



Na temelju mjerenja uzoraka valovitog kartona u različitim modelima varijabli i relativne vlažnosti određene su veličine izoterme upijanja vlage koje su prikazane na slici 22.

Numeričke vrijednosti imaju međusobno odstupanje pa je odlučeno da se izračuna njihova optimalna krivulja regresivnom metodom.

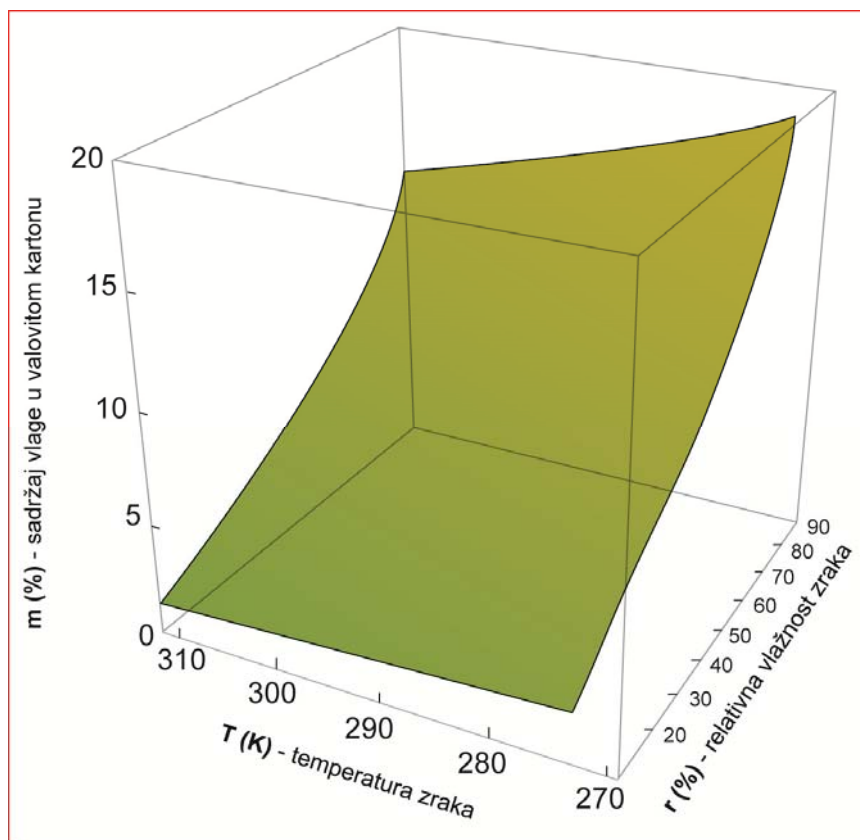


Slika 22. Izoterme upijanja vlage valovitog kartona kvalitete AS-0 pri temperaturama 3°C, 10°C i 23°C

Brzina reakcije valovitog kartona na promjenu relativne vlažnosti zraka koji ga okružuje, odnosno brzina upijanja može se odrediti postavljanjem diferencijalne jednadžbe promjene sadržaja vlage u jedinici vremena koja glasi:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = b \cdot (m_{\infty} - m)$$

$\frac{\partial m}{\partial t}$  - parcijalni diferencijalni prirast vlage po diferencijalnom prirastu vremena



Slika 23. Ravnotežni sadržaj vlage valovitog kartona kvalitete AS-0 u ovisnosti o temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka

Ako su atmosferski uvjeti konstantni rješenje diferencijalne jednadžbe glasi:

$$\frac{(m_{\infty} - m)}{(m_0 - m_{\infty})} = a \cdot e^{-b \cdot t}$$

odnosno u transformiranom obliku

$$m = m_{\infty} - (m_0 - m_{\infty}) \cdot a \cdot e^{-b \cdot t}$$

$m_0$  – prosječni početni sadržaj vlage u valovitom kartonu

$m$  – prosječni trenutni sadržaj vlage u valovitom kartonu

$m_\infty$  – prosječni ravnotežni sadržaj vlage u valovitom kartonu

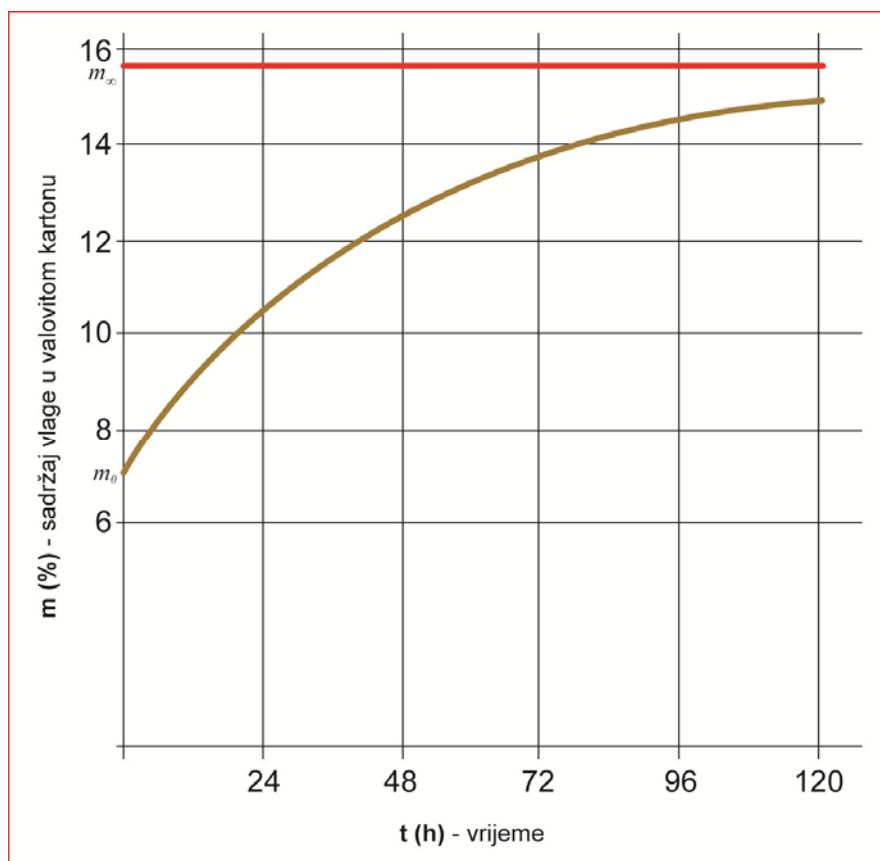
$a$  ( $s^{-1}$ ,  $h^{-1}$ ) - konstanta

$b$  ( $s^{-1}$ ,  $h^{-1}$ ) - konstanta

Nakon uvrštavanja izmjenjenih vrijednosti dobivamo izraz za brzinu upijanja vlage iz zraka valovitog kartona kvalitete AS-0:

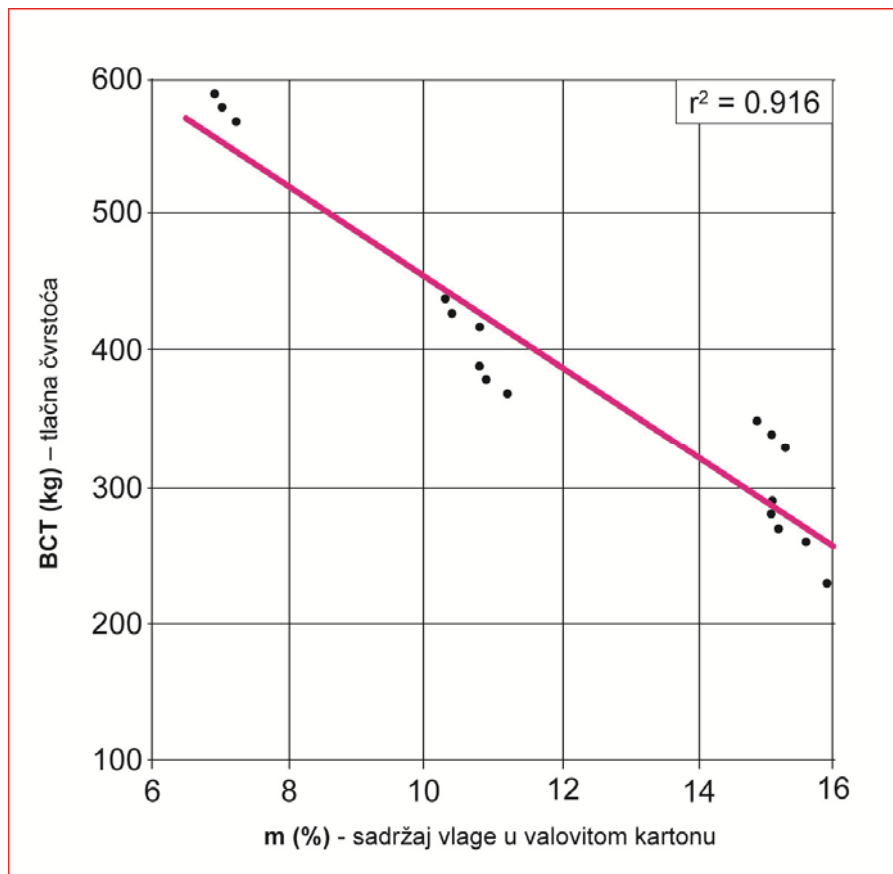
$$m = 15.7 - 8.6 \cdot e^{-0.021t},$$

gdje vrijednost eksponenta -0.021 u izrazu predstavlja higroekspanzivni koeficijent valovitog kartona AS-0.



Slika 24. Brzina upijanja vlage valovitog kartona kvalitete AS-0

Na slici 25. prikazane su točke koje predstavljaju izmjerene vrijednosti tlačne čvrstoće i sadržaja vlage svih uzoraka valovitog kartona kvalitete AS-0, te njihova aproksimacija regresijskim pravcem izraz.



Slika 25. Ovisnost tlačne čvrstoće o sadržaju vlage za valoviti karton AS-0

$$BCT = 785.588 - 32.962 \cdot m,$$

gdje je:

BCT – tlačna čvrstoća (kg)

m – sadržaj vlage (%)

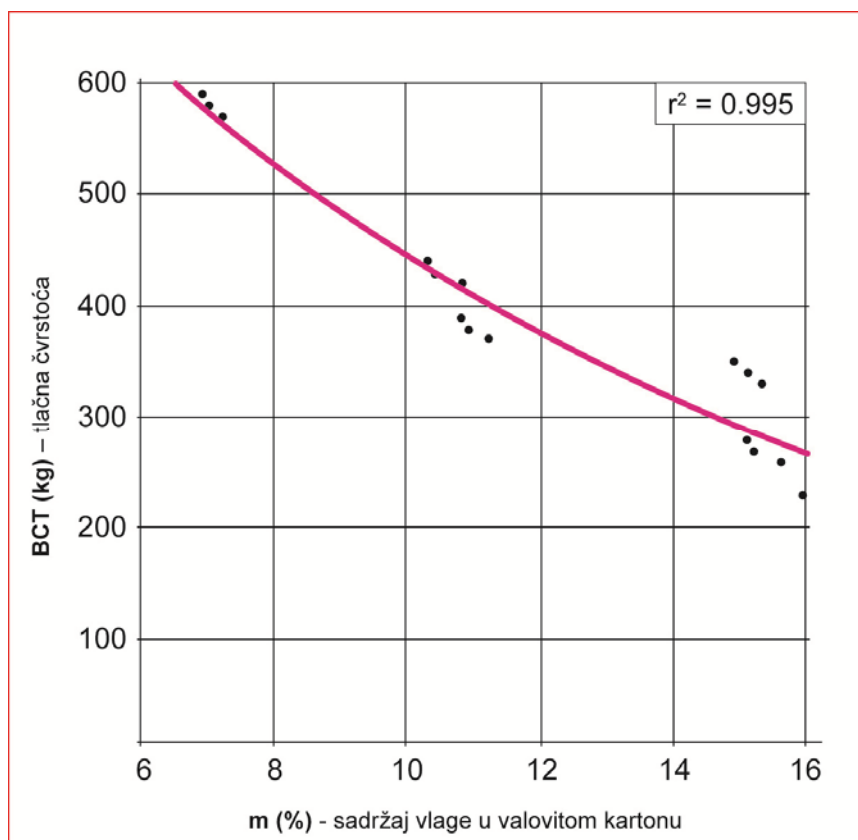
Izrazom se utvrđuje prosječno smanjenje tlačne čvrstoće za 32 kg za prosječan porast sadržaja vlage u valovitom kartonu za 1%.

Zaključuje se kako je regresijskom metodom potvrđena jaka negativna veza između sadržaja vlage u valovitom kartonu i tlačne čvrstoće (koeficijent korelacije  $r = -0.957$ ) uz blagu nelinearnost, te relativno malu disperziju rezultata.

Obzirom na određenu nelinearnost rezultata regresijskom metodom dobivena je eksponencijalna funkcija procjene izraz.

$$BCT = 1037.34 \cdot e^{-0.0847 \cdot m}$$

Ova funkcija, slika 26., bolje procjenjuje rezultate ispitivanja od prethodne, a to potvrđuje i koeficijent determinacije  $r^2$ . Eksponent u izrazu - 0.0847 pokazuje osjetljivost ove kvalitete valovitog kartona na promjenu mehaničkih svojstava obzirom na porast vlage, te ga se može interpretirati kao svojevrsan koeficijent mehanosorpcije valovitog kartona.



Slika 26. Ovisnost tlačne čvrstoće o sadržaju vlage za valoviti karton AS-0 eksponencijalni oblik

### 4.3. Rezultati ispitivanja za valoviti karton AS-1

Tablica 17. Rezultati ispitivanja za valoviti karton kvalitete AS-1

Kvaliteta AS-1						
Broj dana/vrsta ispitivanja	Ulazni podaci	1. dan	2. dan	3. dan	4. dan	5. dan
gramatura [ $\text{g/m}^2$ ]	916	955	975	1008	1020	1037
debljina [mm]	6.53	6.60	6.58	6.68	6.72	6.72
BST [kPa]	1608	1570	1484	1339	1401	1370
ECT [kN/m]	13.73	11.45	8.5	7.89	6.99	5.69
sadržaj vlage [%]	5.6	11.08	11.85	13.13	11.29	14.54
FCT [kPa]	232	200	150	110	99	98
PET [J]	9.20	9.70	9.65	9.35	9.20	8.80
BCT [kg]	500	400	240	230	190	200

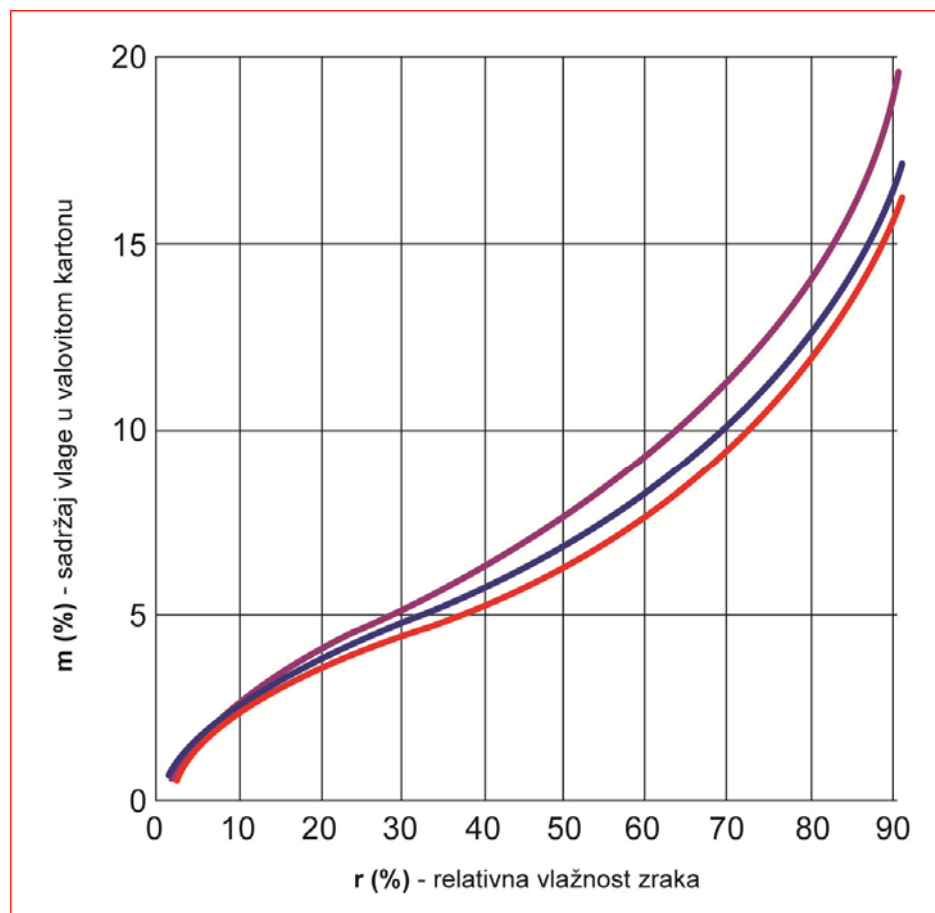
Peteroslojni valoviti karton kvalitete AS-1 je niže ukupne gramature od prethodnog AS-0 za  $122 \text{ g/m}^2$  ili za 12%. Razlog je u tome što su u ovom uzorku sva tri srednja sloja niže gramature. Sastavnice ovog valovitog kartona su slijedeće: vanjski bijeli sloj je kraftliner  $135 \text{ g/m}^2$ , vanjski valoviti sloj je SC fluting  $150 \text{ g/m}^2$ , srednji ravni sloj je testliner  $125 \text{ g/m}^2$ , unutarnji valoviti sloj je SC fluting  $150 \text{ g/m}^2$  i unutarnji ravni sloj je kraftliner  $186 \text{ g/m}^2$ . Gramatura valovitog kartona AS-1 raste s povećanjem vlage i to za 12% nakon petodnevnog drastičnog izlaganja povećanoj temperaturi i relativnoj vlažnosti okolnog zraka.

Debljina uzorka AS-1 također raste s porastom vlage i to za 3%. Istovremeno sadržaj vlage je porastao za 160% što ukazuje na veliku upojnost ispitivanog uzorka koju je primio u komori za hlađenje. Kao posljedica unutar strukture valovitog kartona javljaju se higrekspanzivne deformacije koje umanjuju i sve ostale mehaničke karakteristike. Otpornost na prskanje (BST) pokazuje nelinearno smanjenje od  $1608 \text{ kN/m}$  prvog dana do  $1370 \text{ kN/m}$  šestog dana i iznosi 14%. Na ovu otpornost najviše utječu ravni slojevi valovitog kartona. Najveći pad vrijednosti dogodio se nakon drugog dana, i to za 7% od ukupno 14%, što iznosi 50% smanjenja otpornosti na prskanje. Tako drastično smanjenje je u korelaciji s porastom vlage koja se sa 5,6% prvog dana povisilaka na 11,8% drugi dan, što iznosi više od 100% porasta. U preostalim danima ispitivanja vrijednosti otpornosti na prskanje imale su

manjeznačajan pad te su se kretala od 7 do 14%. Opisani rezultati po danima prikazani su u tablici 17.

Otpornost brida valovitog karona na pritisak (ECT), pada sa početnih 13,73 kN/m prvog dana za više od 50%. Nakon šestog dana izmjerena vrijednost ECT-a iznosi 5,69 kN/m. Najveći pad vrijednosti ECT-a dogodio se nakon drugog dana i to za 40%. ECT je podatak koji najbolje opisuje sastav valovitog kartona. U preostala tri dana vrijednosti ECT-a su se smanjila za 33%.

Udio vlage u valovitom kartonu AS-1 pokazuje značajan rast u prva dva dana. Dok je početna vlaga 5,6%, nakon drugog dana ona raste više od 100% i iznosi 11,8%. U slijedećim danima pokazuje oscilacije, jer raste sa 11,08% na 13,13% a onda se spušta na 11,29% da bi zadnji dan porasla na 14,54%. Na slici 27 prikazane su izoterme upijanja vlage u valoviti karton, a na slici 28 ravnotežni sadržaj vlage za različite temperature i relativne vlažnosti zraka. Brzina upijanja vlage iz zraka valovitog kartona kvalitete AS-1 prikazana je na slici 29.



Slika 27. Izoterme upijanja vlage valovitog kartona kvalitete AS-1 pri 3°C, 10°C i 23°C

Ove promjene vrijednosti sadržaja vlage unutar valovitog kartona mogu se objasniti sa promjenama stanja zraka u komori za hlađenje te u okolnom prostoru. Nakon trećeg dana u komori za hlađenje došlo je do značajnijeg porasta temperature sa  $2,9^{\circ}\text{C}$  na  $5,1^{\circ}\text{C}$ , što iznosi oko 57%. Također je došlo i do značajnijeg porasta vanjske temperature zraka sa  $17,1^{\circ}\text{C}$  na  $32,1^{\circ}\text{C}$ , što iznosi oko 47% porasta. Zaključuje se da je vanjska temperatura zraka direktno utjecala na porast temperature komore zbog ciklusa uključivanja i isključivanja sistema za hlađenje te izmjenom vanjskog zraka za vrijeme punjenja i pražnjenja komore.

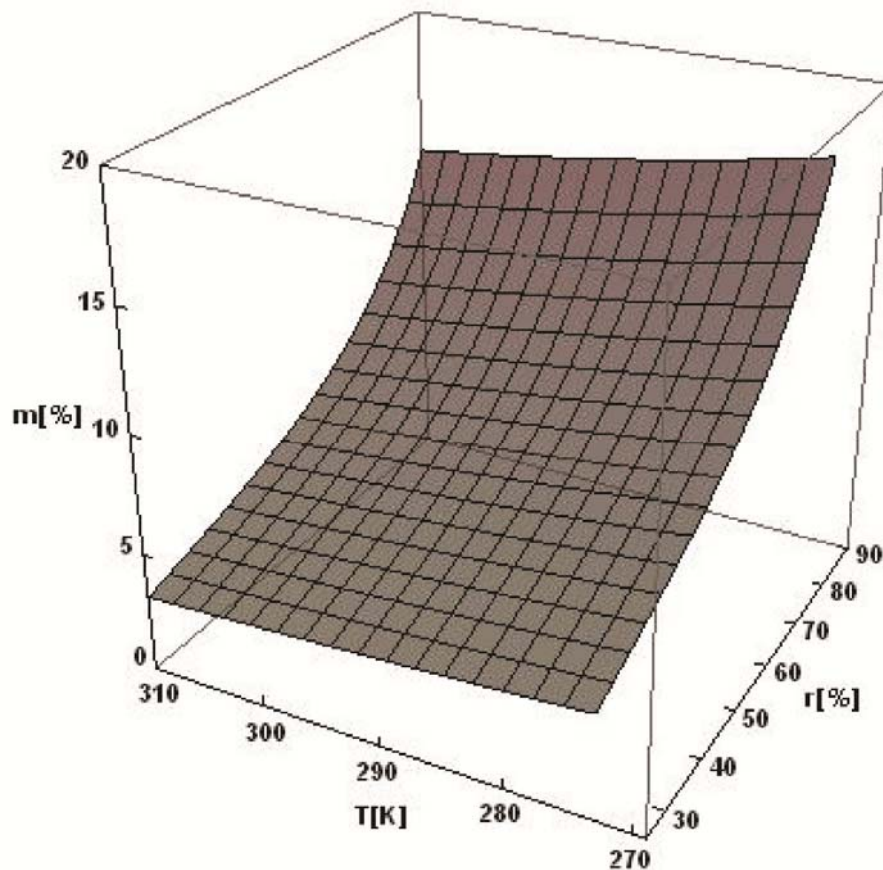
Otpornost horizontalne površine valovitog kartona na tlačno opterećenje (FCT) najviše ovisi o krutosti valova a služi za procjenu sposobnosti amortizacije udaraca. Izmjerene vrijednosti padale su sa 232 kPa prvog dana do 98 kPa zadnjeg dana ispitivanja, dakle otpornost se smanjila za 57%. Specifično je što je najveći pad zabilježen tek na kraju četvrtog dana ispitivanja u iznosu od 53%. Nakon toga vrijednosti su se neznatno smanjivale za oko 9%. Zaključuje se da velike temperaturne razlike koje su se dogodile nakon drugog i trećeg dana kao i razlike u relativnoj vlažnosti zraka nisu utjecale na FCT kao na ostale mehaničke karakteristike. To znači da bi kutije izrađene od ove kvalitete valovitog kartona mogle izdržati značajne vanjske udarce i dobro ih amortizirati.

Slijedeći pokazatelj čvrstoće valovitog kartona AS-1 je otpornost na dinamičko probijanje (PT). Ovaj pokazatelj je u direktnoj vezi sa njegovim ravnim slojevima. Što su ona bolja potrebna je veća energija za probijanje valovitog kartona. Rezultati su pokazali da je otpornost na probijanje vrlo visoko jer su vrijednosti pale za samo 5% nakon šest ciklusa ispitivanja. Sa početne vrijednosti od 9,20 J vrijednosti su pale na 8,80J. Zanimljivo je da je nakon drugog dana otpornost na probijanje čak i porasla za 5%, da bi u slijedećim danima vrijednosti padale u iznosima za 1% nakon drugog dana, za 4% nakon trećeg, za 2% nakon četvrtog dana te za 5% zadnjeg dana.

Otpornost kutija prema vertikalnom pritisku (BCT) je direktni pokazatelj čvrstoće kutije. Na slikama 30 i 31 prikazani su linearni i eksponencijalni regresijski modeli koji procjenjuju tlačnu čvrstoću o sadržaju vlage. Kutije izrađene od valovitog kartona kvalitete AS-1 pokazuju da je njihova čvrstoća, nakon šestodnevnog ispitivanja pala za 60%. Nakon trećeg dana vrijednost je pala za 52%, što je 87% od ukupne vrijednosti. U ostalim danima otpornost kutija prema vertikalnom pritisku imaju manje značajan pad u iznosu od 13%. Kao izravan pokazatelj čvrstoće, zaključuje se da je BCT u jakoj korelaciji s promjenama temperature i relativne vlažnosti zraka. Kako je relativna vlažnost zraka drastično porasla



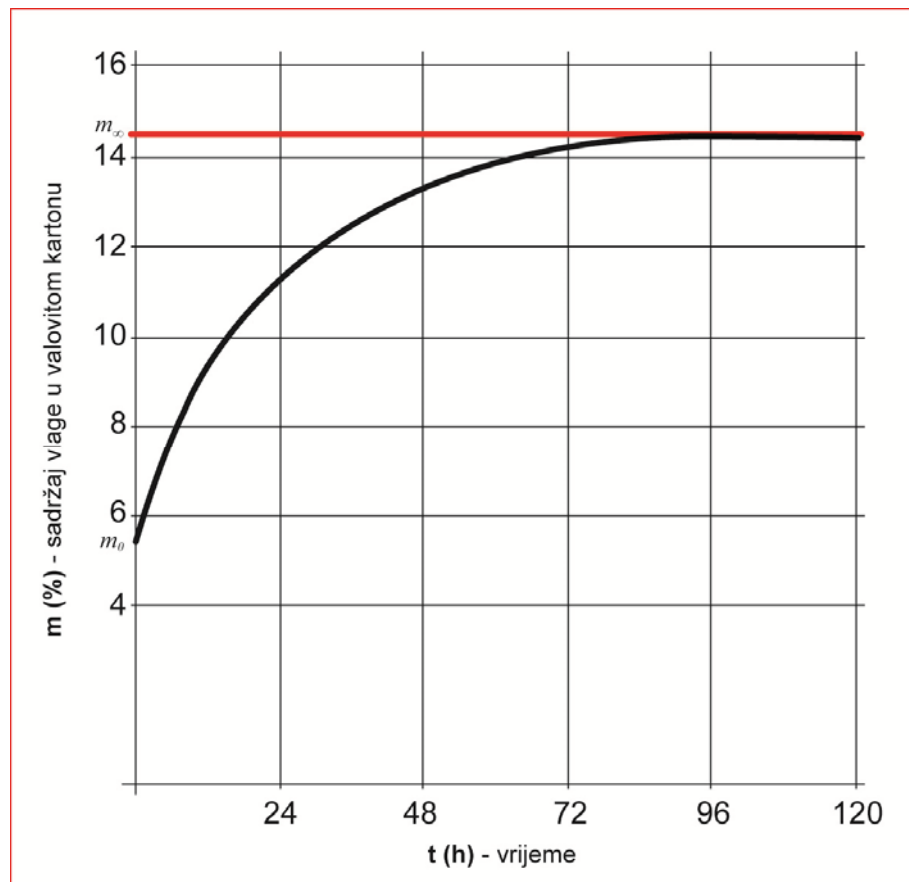
između drugog i trećeg dana, sa 35,1% na 93% što je 167% povećanje, dok se u komori zahlađenje ona smanjila za 9%, vlaga je izraziti krivac za drastičan pad vrijednosti BCT-a.



Slika 28. Ravnotežni sadržaj vlage valovitog kartona kvalitete AS-1 u ovisnosti o temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka

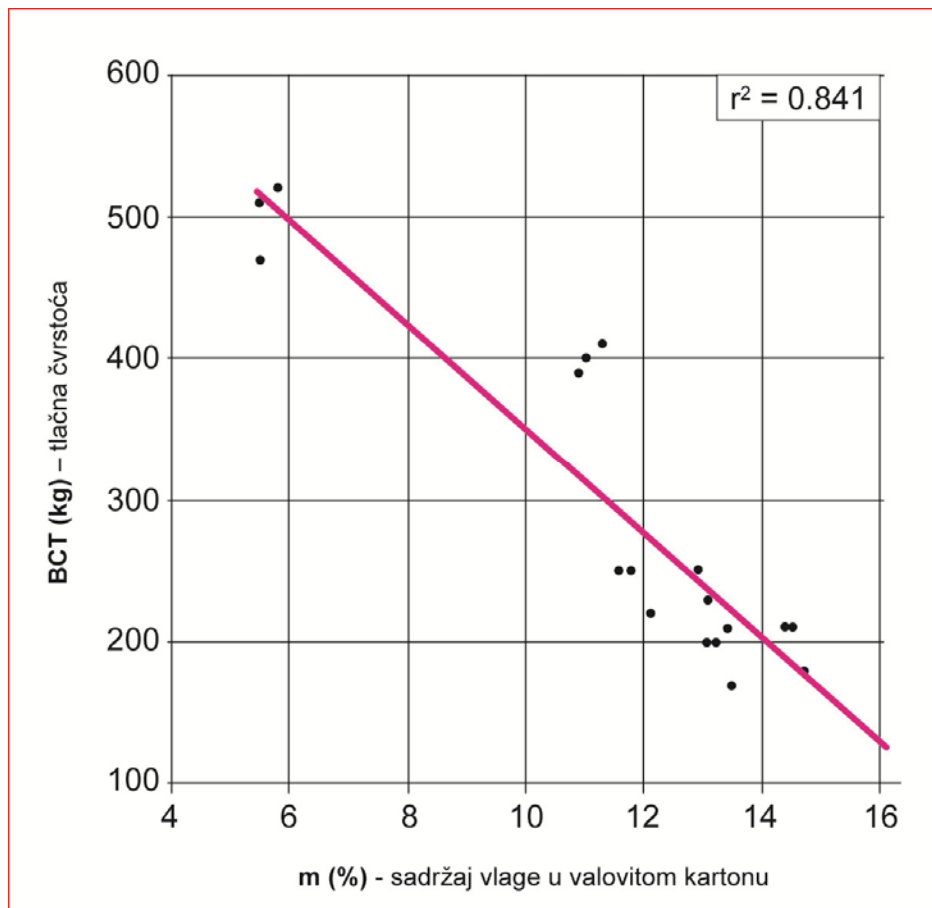
$$m = 14.54 - 8.94 \cdot e^{-0.03955 \cdot r},$$

gdje vrijednost eksponenta  $-0.03955$  u gornjem izrazu predstavlja higroekspanzivni koeficijent valovitog kartona AS-1.



Slika 29. Brzina upijanja vlage valovitog kartona kvalitete AS-1

Na slici 30 prikazane su točke koje predstavljaju izmjerene vrijednosti tlačne čvrstoće i sadržaja vlage svih uzoraka valovitog kartona kvalitete AS-1, te njihova aproksimacija regresijskim pravcem.



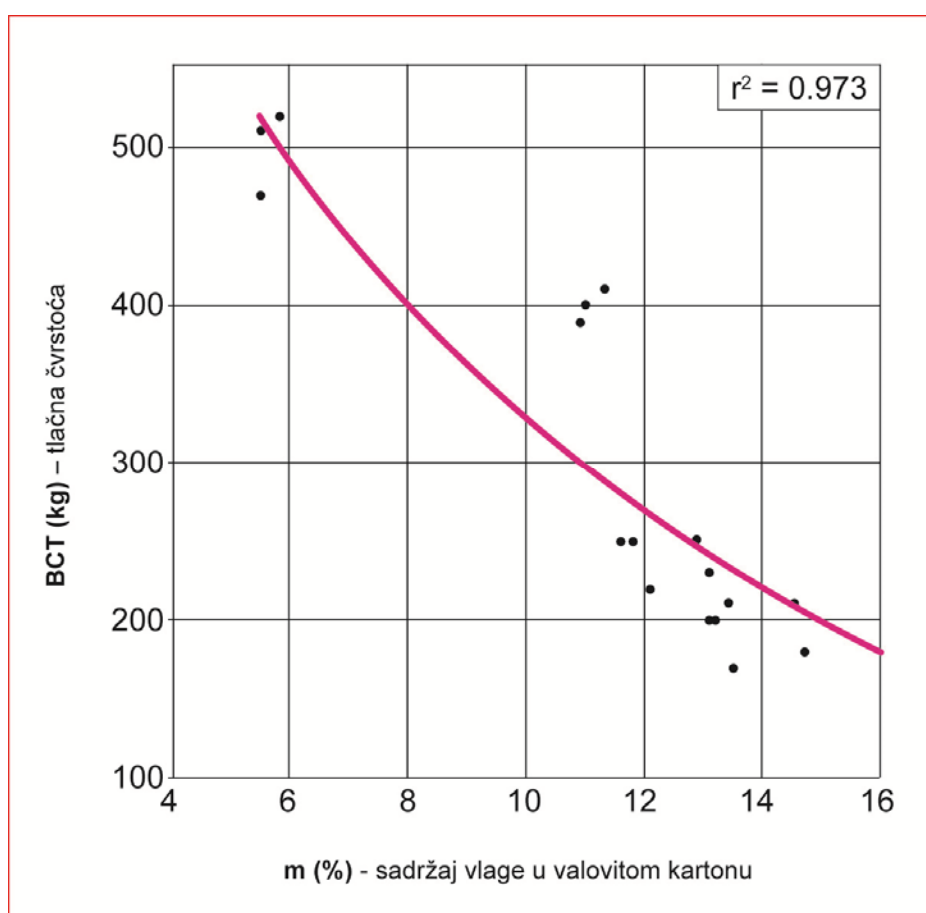
Slika 30. Ovisnost tlačne čvrstoće o sadržaju vlage za valoviti karton AS-1 linearni model

Valoviti karton kvalitete AS-1 pokazuje manju otpornost na utjecaj vlage za razliku od valovitog kartona kvalitete AS-0. Regresijski pravac je strmiji, prema doljnjem izrazu za 1% porasta sadržaja vlage tlačna čvrstoća smanjuje se čak 37 kg što je u relativnom smislu još značajniji pad uzme li se u obzir manja početna tlačna čvrstoća ambalaže od ove vrste valovitog kartona.

$$BCT = 721.513 - 37.000 \cdot m$$

Disperzija rezultata ispitivanja veća je nego u prethodnom slučaju, te je izraženija nelinearnost modela. Time je potvrđena opravdanost određivanja eksponencijalne funkcije procjene.

Koeficijent mehanosorpcije iznosi -0.101 i veći je za oko 20% od koeficijenta mehanosorpcije valovitog kartona kvalitete AS-0 (-0.084).



Slika 31. Ovisnost tlačne čvrstoće o sadržaju vlage za valoviti karton AS-1

Slika 31 je grafički prikaz izraza:

$$BCT = 907.09 \cdot e^{-0.101 \cdot m}$$

Primjećuje se dobra otpornost ove vrste valovitog kartona u području sadržaja vlage do 11%, no nakon što vlaga prijeđe tu granicu u valovitom kartonu dolazi do naglog pada vrijednosti čvrstoće.

#### 4.4. Rezultati ispitivanja za valoviti karton 3KSE

Tablica 18. Rezultati ispitivanja za valoviti karton kvalitete 3KSE

Kvaliteta 3KSE						
Broj dana/vrsta ispitivanja	Ulazni podaci	1. dan	2. dan	3. dan	4. dan	5. dan
gramatura [ $\text{g}/\text{m}^2$ ]	924	970	998	977	1025	1045
debljina [mm]	6.43	6.52	6.55	6.58	6.6	6.54
BST [kPa]	1722	1794	1882	1888	1897	1915
ECT [ $\text{kN}/\text{m}$ ]	11.07	10.11	7.72	8.75	5.91	5.21
sadržaj vlage [%]	5.6	11.77	11.57	14.6	13.06	14.41
FCT [kPa]	126	121	105	100	75	85
PET [J]	9.6	9.4	9.1	9.0	8.35	8.3
BCT [kg]	400	340	300	220	210	190

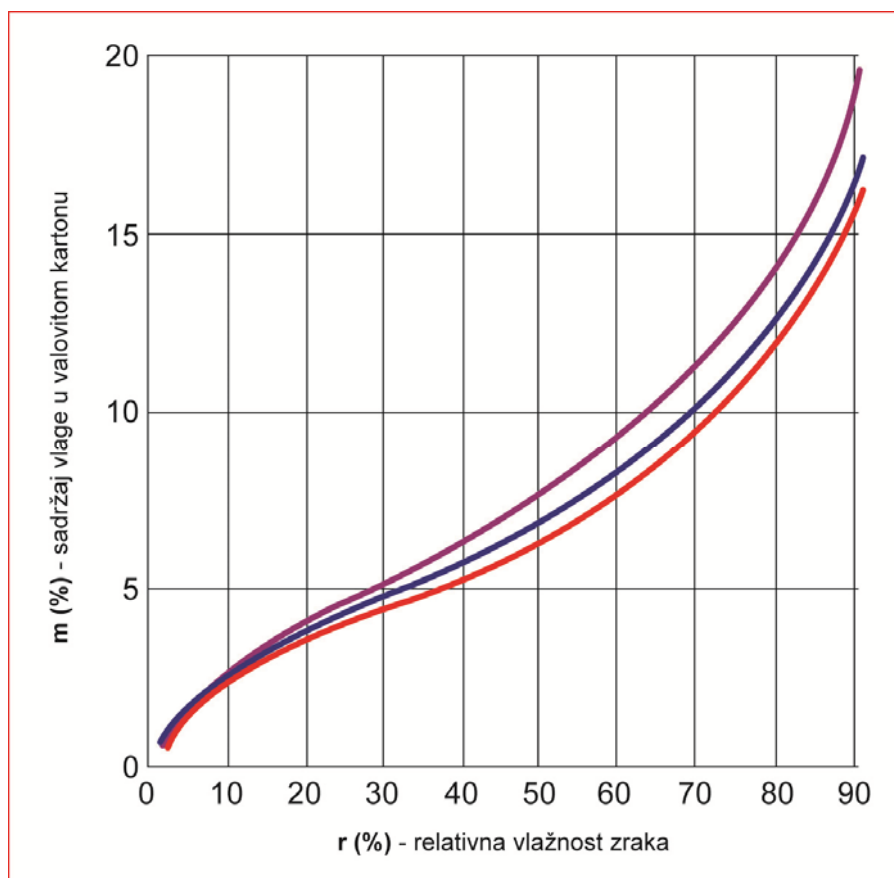
Peteroslojni valoviti karton kvalitete 3KSE je nešto više ukupne gramature od prethodnog AS-1 za  $8\text{g}/\text{m}^2$  ili za 1%. Ovaj uzorak valovitog kartona sastavljen je od identična 3 ravna sloja i to od lineru  $0,175\text{g}/\text{m}^2$ . Valoviti slojevi, vanjski i unutarnji su od istog materila i iste gramature, wellenstof medium  $150\text{g}/\text{m}^2$ . Gramatura i debljina ovog valovitog kartona raste s povećanjem vlage. Gramatura je porasla za 13% sa početnih  $924\text{g}/\text{m}^2$  na  $1045\text{g}/\text{m}^2$ , dok je debljina porasla za 2%, sa 6,43 mm na 6,54 mm. Sadržaj vlage u valovitom kartonu porastao je sa 5,6% nakon prvog dana na 14,41% nakon šestog dana što čini porast vrijednosti od 157%. Ispitivani uzorak ima veliku upojnost koju je primio u komori za hlađenje.

Otpornost na prskanje (BST) pokazuje porast od 1722 kN/m prvog dana do 1915 kN/m šestog dana i iznosi 11%. Vrijednosti osciliraju iz dana u dan, pa tako nakon tri dana otpornost raste za 3,5% a nakon toga pada za 6% da bi zadnji dan ispitivanja ponovo porasla za 14%. Zaključuje se da promjene temperaturne i relativne vlažnosti zraka najmanje utječu na otpornost na prskanje po Mullenu. Ovakvi rezultati pokazuju da ujednačene gramature tri ravna sloja i iste kvalitete papira mogu znatno utjecati na čvrstoću kutije.

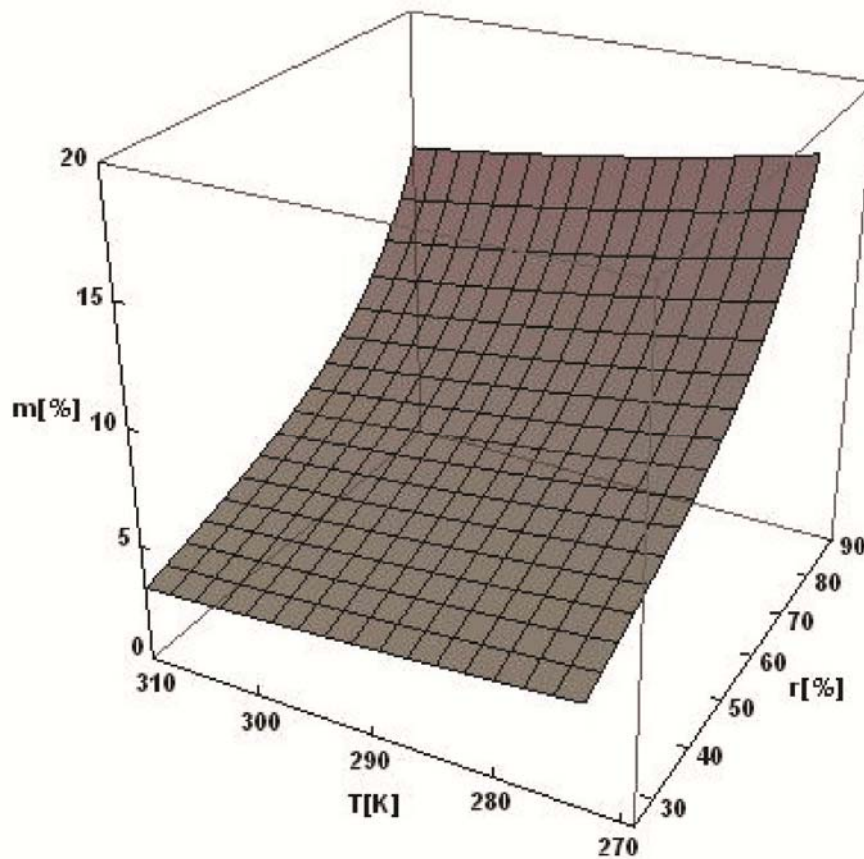
Otpornost brida valovitog kartona na pritisak (ECT), pada sa početnih  $11,07\text{ kN}/\text{m}$  prvog dana za više od 50%. Nakon šestog dana izmjerena vrijednost ECT-a iznosi  $5,21\text{ kN}/\text{m}$ .

Najveći pad vrijednosti ECT-a dogodio se nakon drugog dana i to za 30%. U preostala tri dana vrijednosti ECT-a su se smanjila za 32%. Opisani rezultati po danima prikazani su u tablici 18.

Udio vlage u valovitom kartonu 3KSE pokazuje značajan rast u prva dva dana. Dok je početna vlaga 5,6%, nakon drugog dana ona raste više od 100% i iznosi 11,77%. Brzina upijanja vlage iz zraka valovitog kartona kvalitete 3KSE prikazana je na slici 32.



Slika 32. Izoterme upijanja vlage valovitog kartona kvalitete 3KSE pri 3°C, 10°C i 23°C



Slika 33. Ravnotežni sadržaj vlage valovitog kartona kvalitete 3KSE u ovisnosti o temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka

U slijedećim danima pokazuje oscilacije, jer pada na 11,57% da bi slijedeći dan narasla na 14,6%, opet pala na 13,06 i zaustavila se na 14,41%. Ove oscilacije uzrokovane se promjenama stanja zraka u komori za hlađenje i u okolnom zraku. Temperature u komori za hlađenje oscilirale su u rasponu od početnih 4,1°C do 3,4°C, dok su temperature okolnog zraka također oscilirale u rasponu od 16,4°C do 29,7°C što je porast od 47%. Vanjska temperatura zraka direktno je utjecala na porast temperature komore zbog ciklusa uključivanja i isključivanja sistema za hlađenje te izmjene vanjskog zraka za vrijeme punjenja i pražnjenja komore.

Otpornost horizontalne površine valovitog kartona na tlačno opterećenje (FCT) je dobar procjenitelj sposobnosti amortizacije udaraca a najviše ovisi o krutosti valova. Izmjerene vrijednosti padale su sa 126 kPa prvog dana do 85 kPa zadnjeg dana ispitivanja, dakle otpornost se smanjila za 33%. Specifično je što je najveći pad zabilježen tek na kraju

petog dana ispitivanja u iznosu od 40%. Nakon toga vrijednost otpornosti površine valovitog kartona na pritisak (FCT) je u zadnjem danu čak porasla za 14% i iznosila je 85 kPa. Zaključuje se da razlike u temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka imaju manji utjecaj na otpornost površine valovitog kartona nego na ostala mehanička svojstva. Razlog može biti u kombinaciji unosa ujednačenih gramatura ravnih slojeva. Naime, tri ravna sloja ovog uzoraka imaju istu gramaturu od 175 g/m<sup>2</sup> i istu kvalitetu papira, liner 0. Također i dva valovita sloja imaju istu gramaturu od 150 g/m<sup>2</sup> i istu kvalitetu unosa, medium. Vrijednosti nam ukazuju da kutije izrađene od ove kvalitete valovitog kartona mogu izdržati značajne vanjske udarce te ih mogu dobro amortizirati.

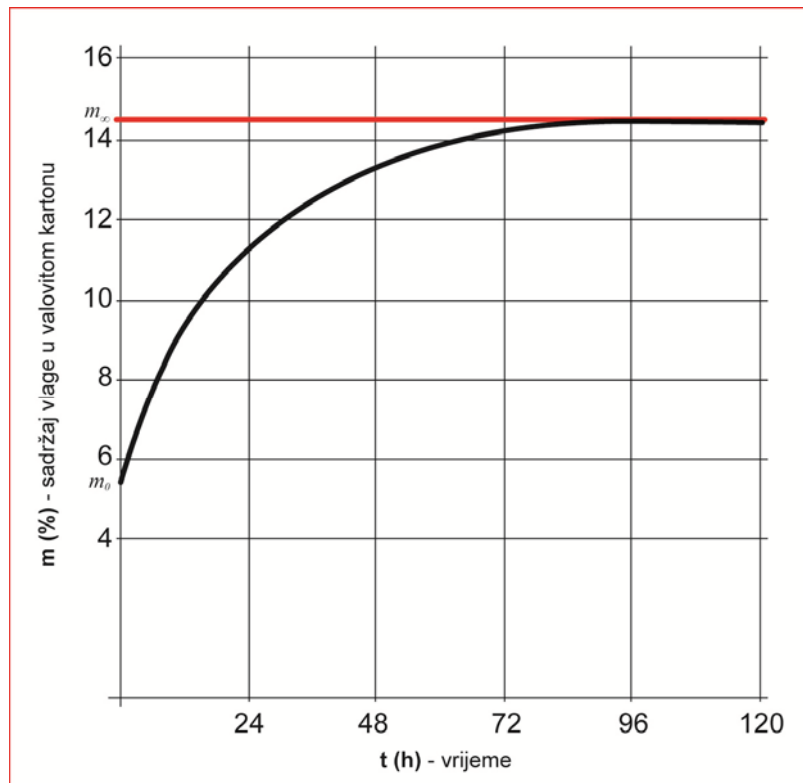
Otpornost na dinamičko probijanje (PT) je pokazatelj koji je u direktnoj vezi sa njegovim ravnim slojevima. Ako su ravni slojevi valovitog kartona kvalitetni, potrebna je veća energija za njeogovo probijanje. Rezultati pokazuju dobru otpornost na probijanje jer su pali za 13% nakon šest ciklusa ispitivanja. Početna vrijednost od 9,60 J pala je na 8,30 J. Zanimljivo je da je nakon trećeg dana otpornost na probijanje pala za 5%, da bi u slijedećim danima vrijednosti padale u iznosima za 1% nakon četvrtog dana, za 7% nakon petog da bi zadnji dan bila za svega 0,5% niža od prethodnog.

Tlačna čvrstoća (BCT) kutije od valovitog kartona smanjena je za 52%. Nakon trećeg dana tlačna čvrstoća kutija je pala 25% što je otprilike 50% od ukupnog smanjenja. U ostala tri dana tlačna čvrstoća se spustila za dodatnih 25% i zaustavila se na 190 kg. Tlačna čvrstoća je izravan pokazatelj čvrstoće kutije. Kako je nakon trećeg dana relativna vlažnost zraka okoline naglo porasla na 93%, stvorila se velika razlika između nje i relativne vlažnosti komore za hlađenje. U komori je bilo 77,5% vlažnosti pa je nastala razlika od -15,5%. Upravo su te velike razlike u vlazi ali i temperaturi djelovale na dobivene vrijednosti tlačne čvrstoće kutije. Zaključuje se da je tlačna čvrstoća kutije (BCT) u jakoj korelaciji s promjenama temperature i relativne vlažnosti zraka koja je izraziti krivac za njen drastičan pad vrijednosti.

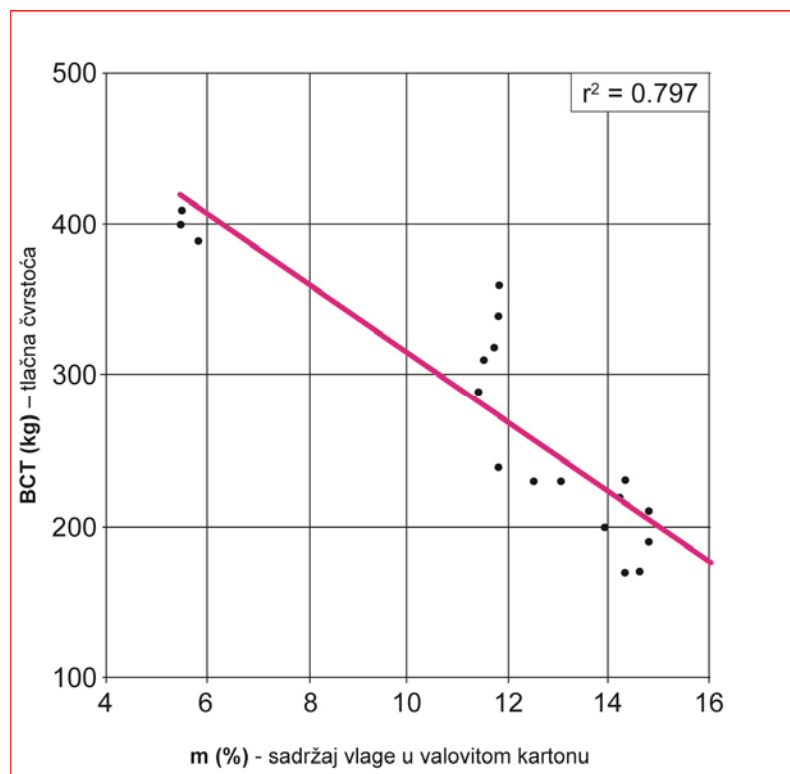
$$m = 14,6 - 9 \cdot e^{-0,0482 \cdot t}$$

gdje vrijednost eksponenta -0.0482 u izrazu predstavlja higroekspanzivni koeficijent valovitog kartona 3KSE.





Slika 34. Brzina upijanja vlage valovitog kartona kvalitete 3KSE

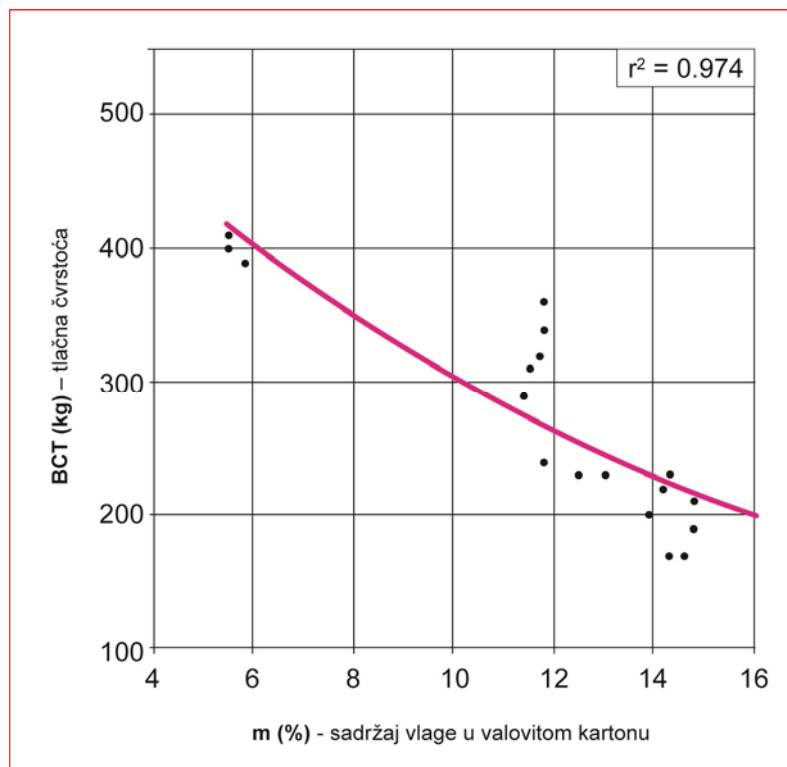


Slika 35. Ovisnost tlačne čvrstoće o sadržaju vlage za valoviti karton 3KSE linearni model

$$BCT = 546.783 - 23.134 \cdot m$$

Valoviti karton kvalitete 3KSE pokazuje relativno veliku otpornost na utjecaj vlage za razliku od valovitih kartona kvalitete AS-0 i AS-1. Regresijski pravac ima manji nagib, prema gornjem izrazu za 1% porasta sadržaja vlage tlačna čvrstoća smanjuje se 23 kg. Iako manje početne tlačne čvrstoće, odnosno ukupno slabijih mehaničkih svojstava zbog jeftinijih sastavnica te manje gramature ovaj valoviti karton pokazao je iznimnu žilavost u teškim i promjenljivim uvjetima relativne vlažnosti zraka i temperature. Disperzija kao i nelinearnost još su veće nego kod prethodno diskutiranog valovitog kartona kvalitete AS-1. Eksponecijalni oblik funkcije procjene (donji izraz) uz koeficijent determinacije  $r^2 = 0.974$  daje prihvatljivu aproksimaciju rezultata ispitivanja. Za razliku od prethodnih valovitih kartona rezultati su neobično disperzirani.

Koeficijent mehanosorpcije najbolji je dosad i iznosi samo -0.0707.



Slika 36. Ovisnost tlačne čvrstoće o sadržaju vlage za valoviti karton 3KSE eksponencijalni oblik

$$BCT = 615.883 \cdot e^{-0.0707 \cdot m}$$

#### 4.5. Rezultati ispitivanja za valoviti karton BTKE/2F

Tablica 19. Rezultati ispitivanja za valoviti karton kvalitete BTKE/2F

Kvaliteta BTKE/2F						
Broj dana/vrsta ispitivanja	Ulazni podaci	1. dan	2. dan	3. dan	4. dan	5. dan
gramatura [ $\text{g}/\text{m}^2$ ]	865	892	917	943	928	965
debljina [mm]	6.27	6.42	6.48	6.36	6.43	6.43
BST [kPa]	1258	1206	1246	1249	1201	1160
ECT [ $\text{kN}/\text{m}$ ]	9.94	8.68	5.54	7.19	6.23	3.89
sadržaj vlage [%]	5.8	10.51	11.49	13.74	15.24	14.27
FCT [kPa]	129	117	88	65	73	81
PET [J]	8.8	8	7.7	8	7.6	6.85
BCT [kg]	370	280	220	190	180	120

Valoviti karton kvalitete BTKE/2F je peteroslojni uzorak srednje gramature u iznosu od  $865 \text{ g}/\text{m}^2$ . Njegove sastavnice su: bijeli testliner kao vanjski ravni sloj od  $140 \text{ g}/\text{m}^2$ , sc fluting kao vanjski valoviti sloj od  $150 \text{ g}/\text{m}^2$ , testliner  $130 \text{ g}/\text{m}^2$  kao srednji ravni sloj, sc fluting  $150 \text{ g}/\text{m}^2$  kao unutarnji valoviti sloj i liner 0 kao unutarnji ravni sloj gramature  $175 \text{ g}/\text{m}^2$ . Ovaj uzorak je lakši od prethodnih i to za 17% od uzorka AS-0, te za približno 6% od uzorka AS-1 i 3KSE. Na osnovu izmjenjenih vrijednosti i podataka uočava se znatno smanjenje svih mehaničkih karakteristika. Sve vrijednosti su drastično smanjene što ukazuje na velike higroekspanzivne deformacije u valovitom kartonu.

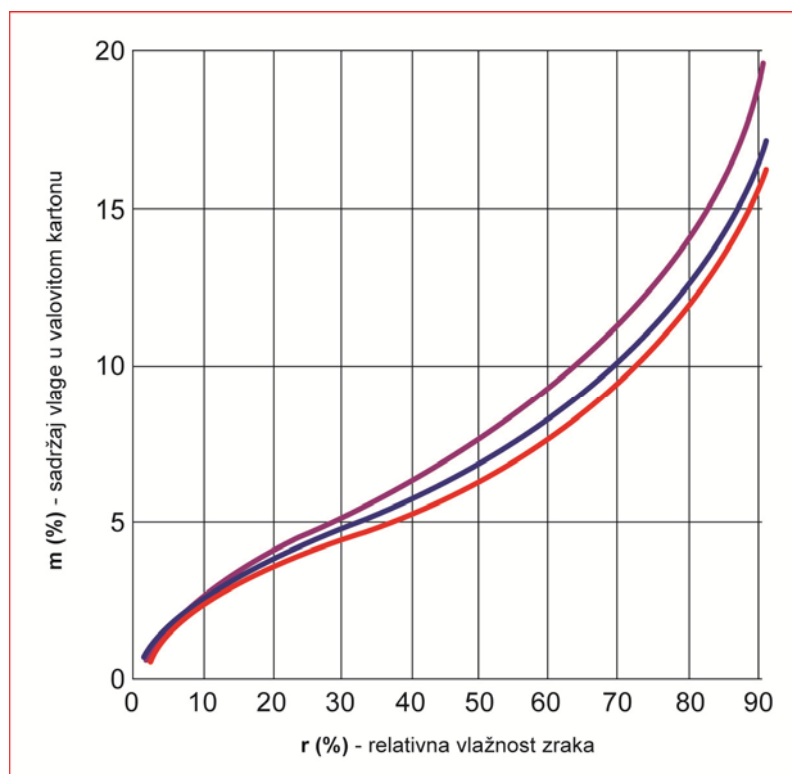
Gramatura i debljina su se povećale, kao i kod prijašnjih uzoraka, s povećanjem vlage. Gramatura valovitog kartona BTKE/2F je porasla za 11,6%, od početnih  $916 \text{ g}/\text{m}^2$  prvog dana na  $1037 \text{ g}/\text{m}^2$  zadnjeg dana ispitivanja. Porastom vlage povećana je i debljina za oko 3%. Maksimalna debljina valovitog kartona je funkcija visine vala i debljine ravnih slojeva. Ukoliko debljina znatno poraste uslijed povećanja vlage mogu nastati problemi u procesu žlijebljenja kutija.

Otpornost na prskanje (BST) pokazuje pad vrijednosti od  $1258 \text{ kN}/\text{m}$  prvog dana do  $1160 \text{ kN}/\text{m}$  šestog dana i iznosi 8%. Vrijednosti osciliraju iz dana u dan, pa tako nakon drugog dana otpornost pada za 4% dok slijedeća dva dana raste za 3%. Zadnja dva dana

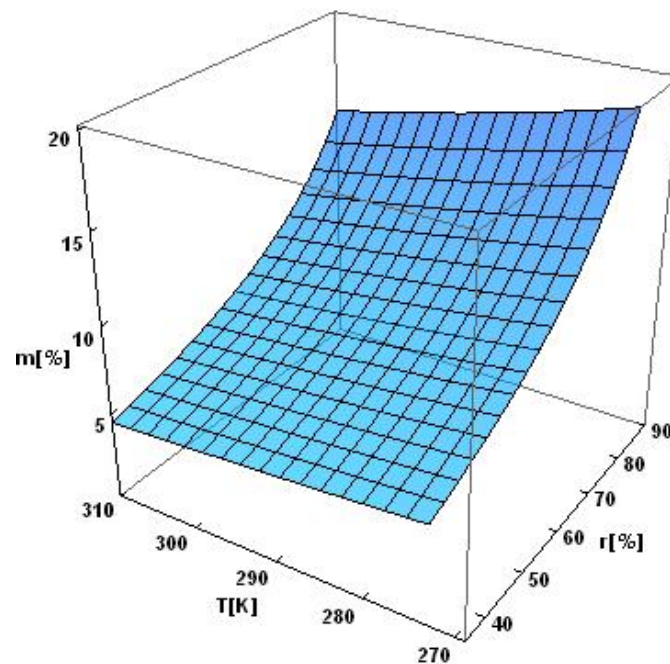
ispitivanja ponovo pada za 4% odnosno 7%. Ove oscilacije mogu se povezati sa velikom upojnošću vlage ali i sa vrlo različitim unosima papira čija kombinacija izaziva ovakve promjene. Kod njega su sva tri ravna sloja različita prema gramaturi i kvaliteti. Zaključuje se da promjene temperaturne i relativne vlažnosti zraka imaju znatan utjecaj na otpornost na prskanje po Mullenu.

Najvažnije mehaničko svojstvo valovitog kartona koje umnogome određuje tlačnu čvrstoću ambalaže ECT smanjen je u 7 dana za 60%. Time se potvrđuje da je kod valovitog kartona došlo do pojave ubrzanih mehanosorpcijskih deformacija zbog sinergije različitih faktora kao što su sadržaj vlage u valovitom kartonu, broj toplinskih šokova, i trajanje opterećenja u kupu. Opisani rezultati po danima prikazani su u tablici 19.

Sadržaj vlage u valovitom kartonu porastao je za 160%. Uzorak ima tendenciju velike upojnosti vlage (slika 37) koju je primio u komori za hlađenje i usljed te higroekspanzivnosti umanjuju se svi ostali parametri čvrstoće. Udio vlage (brzina upijanja) u valovitom kartonu BTKE/2F pokazuje značajan rast u prva dva dana, slika 39. Dok je početna vlaga 5,8%, nakon drugog dana ona raste 100% i iznosi 10.51%. Ravnotežni sadržaj vlage valovitog kartona kvalitete BTKE/2F prikazana je na slici 38.



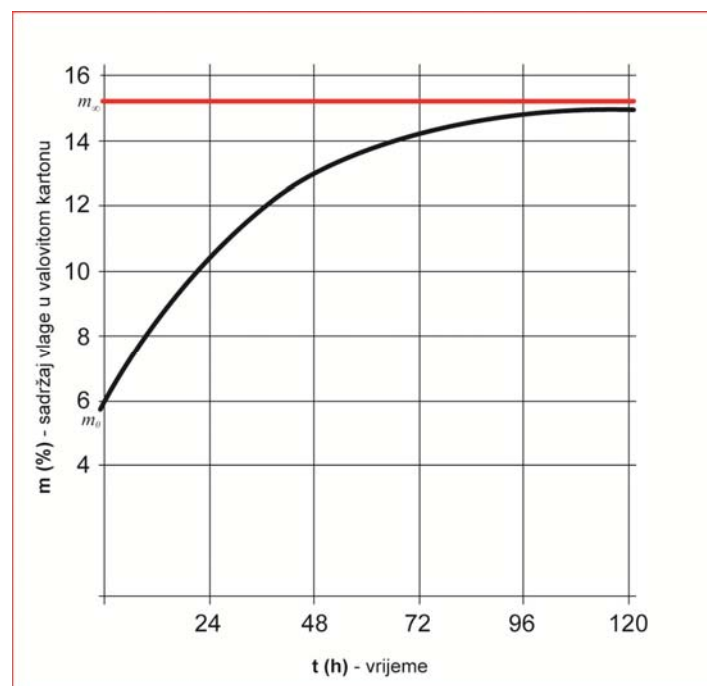
Slika 37. Izoterme upijanja vlage valovitog kartona kvalitete BTKE/2F pri temperaturama 3°C, 10°C i 23°C



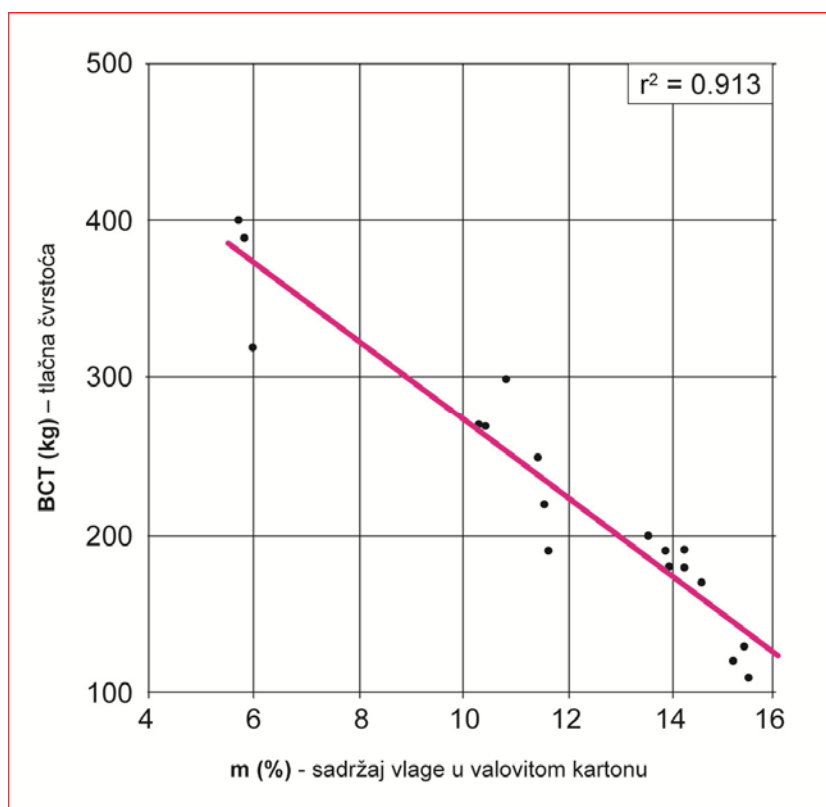
Slika 38. Ravnotežni sadržaj vlage valovitog kartona kvalitete BTKE-2F u ovisnosti o temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka

$$m = 15.24 - 9.44 \cdot e^{-0.0288 \cdot t}$$

gdje vrijednost eksponenta  $-0.0288$  u izrazu predstavlja higroekspanzivni koeficijent valovitog kartona BTKE/2F.



Slika 39. Brzina upijanja vlage valovitog kartona kvalitete BTKE/2F



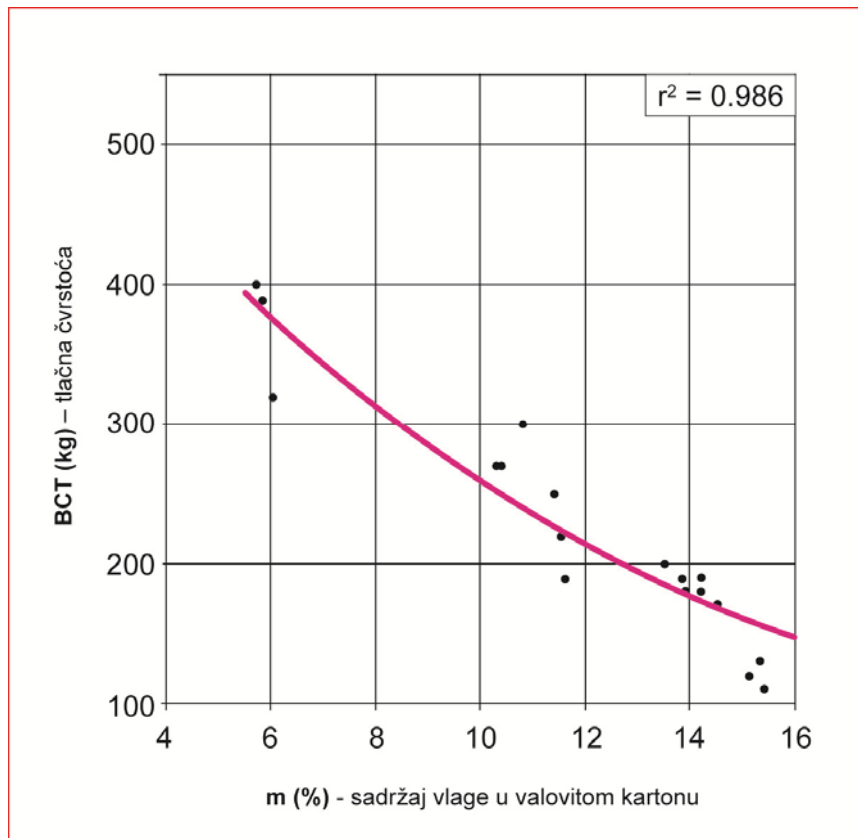
Slika 40. Ovisnost tlačne čvrstoće o sadržaju vlage za valoviti karton BTKE-2F linearni model

$$BCT = 522.727 - 24.972 \cdot m$$

Na slikama 40 i 41 prikazani su rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće valovitog kartona kvalitete 3KSE (linearni i eksponencijalni model) obzirom na utjecaj vlage, te regresijski pravac (gornji izraz).

Za porast od 1% sadržaja vlage tlačna čvrstoća smanjuje se skoro 25 kg, što je u relativnom smislu znatno obzirom na skromiju čvrstoću ovog valovitog kartona. Koeficijent mehanosorpcije iznosi -0.0939 i tek je nešto veći od koeficijenta mehanosorpcije najskupljeg i najjačeg valovitog kartona kvalitete AS-0.

I linearni i eksponencijalni oblik funkcije procjene relativno dobro aproksimiraju rezultate ispitivanja uz visoke vrijednosti koeficijenata determinacije.



Slika 41. Ovisnost tlačne čvrstoće o sadržaju vlage za valoviti karton BTKE-2F eksponencijalni oblik

$$BCT = 660.01 \cdot e^{-0.0939 \cdot m}$$

#### 4.6. Rezultati ispitivanja za valoviti karton 2KŠ-E

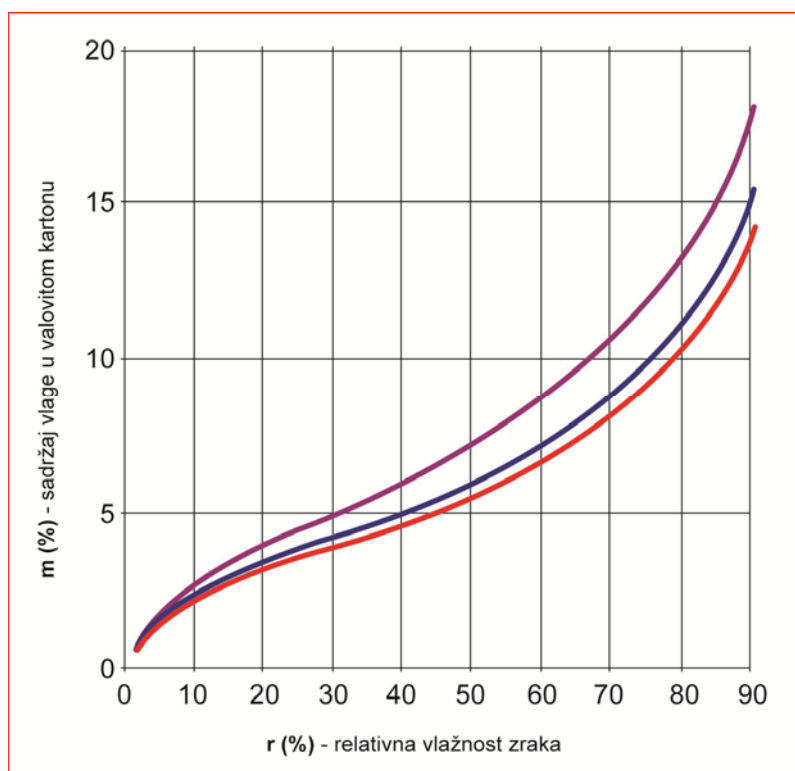
Tablica 20. Rezultati ispitivanja za valoviti karton kvalitete 2KŠ-E

Kvaliteta 2KŠ-E						
Broj dana/vrsta ispitivanja	Ulazni podaci	1. dan	2. dan	3. dan	4. dan	5. dan
gramatura [g/m <sup>2</sup> ]	741	784	789	Lom uzoraka		
debljina [mm]	6.33	6.35	6.33			
BST [kPa]	1375	1221	1150			
ECT [kN/m]	9.6	7.94	6.25			
sadržaj vlage [%]	5.3	9.88	10.35			
FCT [kPa]	168	148	100			
PET [J]	8.2	7.65	7.8			
BCT [kg]	340	240	150			

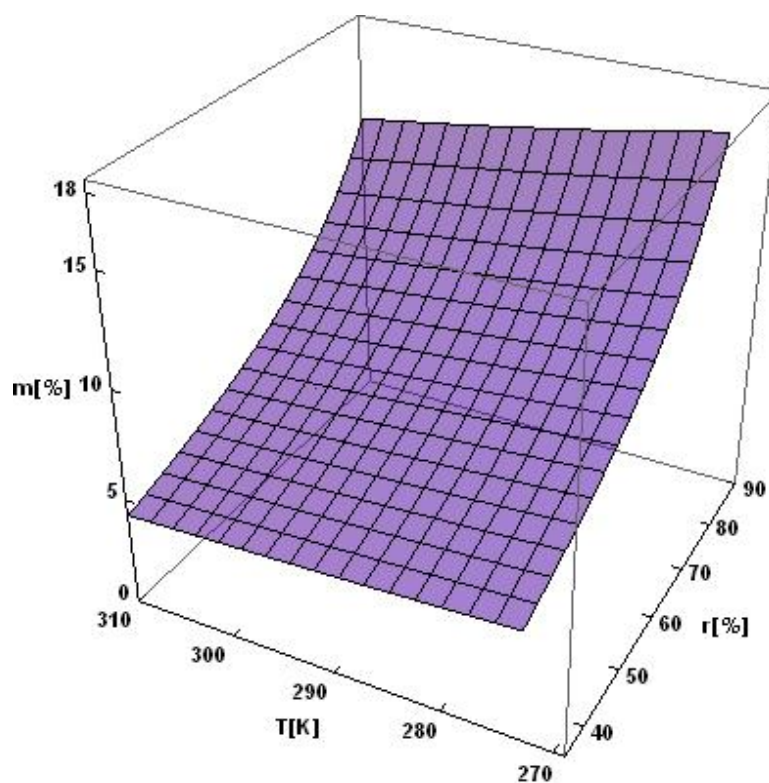
Peteroslojni valoviti karton kvalitete 2KŠ-E je nešto više ukupne gramature od prethodnog AS-1 za 8 g/m<sup>2</sup> ili za 1%. Ovaj uzorak valovitog kartona sastavljen je od identična 3 ravna sloja i to od linera 0,175g/m<sup>2</sup>. Valoviti slojevi, vanjski i unutarnji su od istog materila i iste gramature, wellenstof medium 150 g/m<sup>2</sup>. Gramatura i debljina ovog valovitog kartona raste s povećanjem vlage. Gramatura je porasla za 13% sa početnih 924 g/m<sup>2</sup> na 1045 g/m<sup>2</sup>, dok je debljina porasla za 2%, sa 6,43 mm na 6,54 mm. Sadržaj vlage u valovitom kartonu porastao je sa 5,6% nakon prvog dana na 14,41% nakon šestog dana što čini porast vrijednosti od 157%. Ispitivani uzorak ima veliku upojnost koju je primio u komori za hlađenje.

Otpornost na prskanje (BST) pokazuje porast od 1722 kN/m prvog dana do 1915 kN/m šestog dana i iznosi 11%. Vrijednosti osciliraju iz dana u dan, pa tako nakon tri dana otpornost raste za 3,5% a nakon toga pada za 6% da bi zadnji dan ispitivanja ponovo porasla za 14%. Zaključuje se da promjene temperaturne i relativne vlažnosti zraka najmanje utječu na otpornost na prskanje po Mullenu. Ovakvi rezultati pokazuju da ujednačene gramature tri ravna sloja i iste kvalitete papira mogu znatno utjecati na čvrstoću kutije. Opisani rezultati po danima prikazani su u tablici 20. Na slikama 42, 43 i 44 prikazane se izoterme upijanja vlage, ravnotežni sadržaj te brzina upijanja za uzorak valovitog kartona 2KŠ-E.





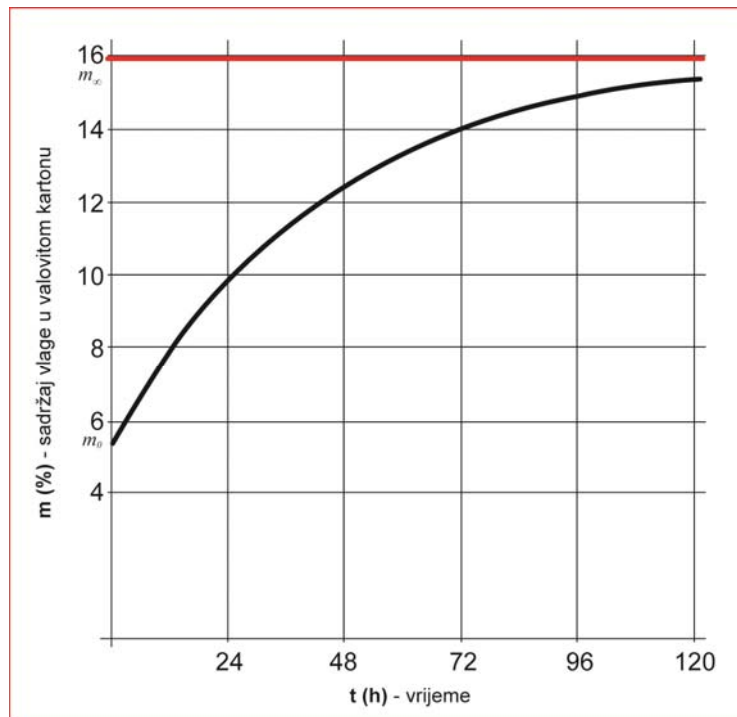
Slika 42. Izoterme upijanja vlage valovitog kartona kvalitete 2KŠ-E pri temperaturama 3°C, 10°C i 23°C



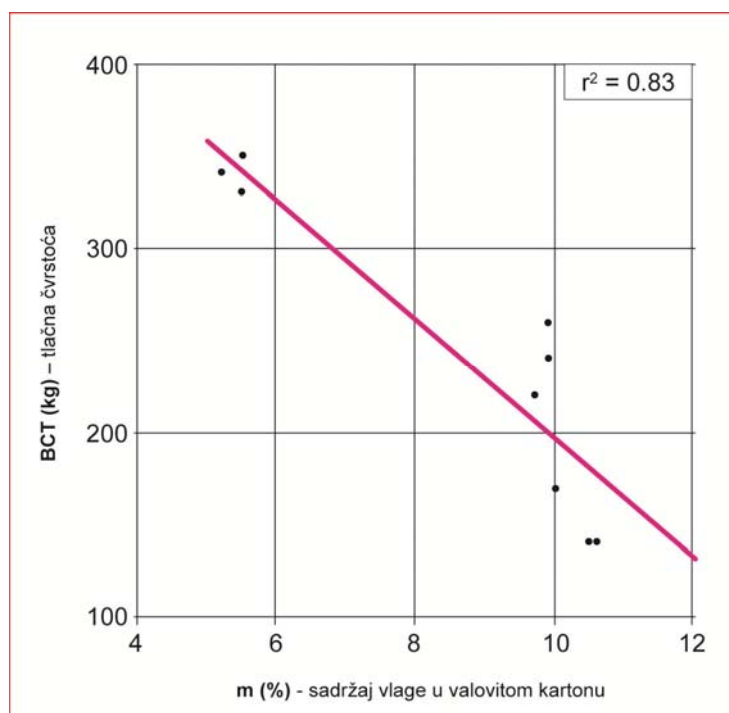
Slika 43. Ravnotežni sadržaj vlage valovitog kartona kvalitete 2KŠ-E u ovisnosti o temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka

$$m = 15.9 - 10.6 \cdot e^{-0.0236 \cdot t}$$

gdje vrijednost eksponenta  $-0.0236$  u gornjem izrazu predstavlja higroekspanzivni koeficijent valovitog kartona 2KŠ-E.



Slika 44. Brzina upijanja vlage valovitog kartona kvalitete 2KŠ-E



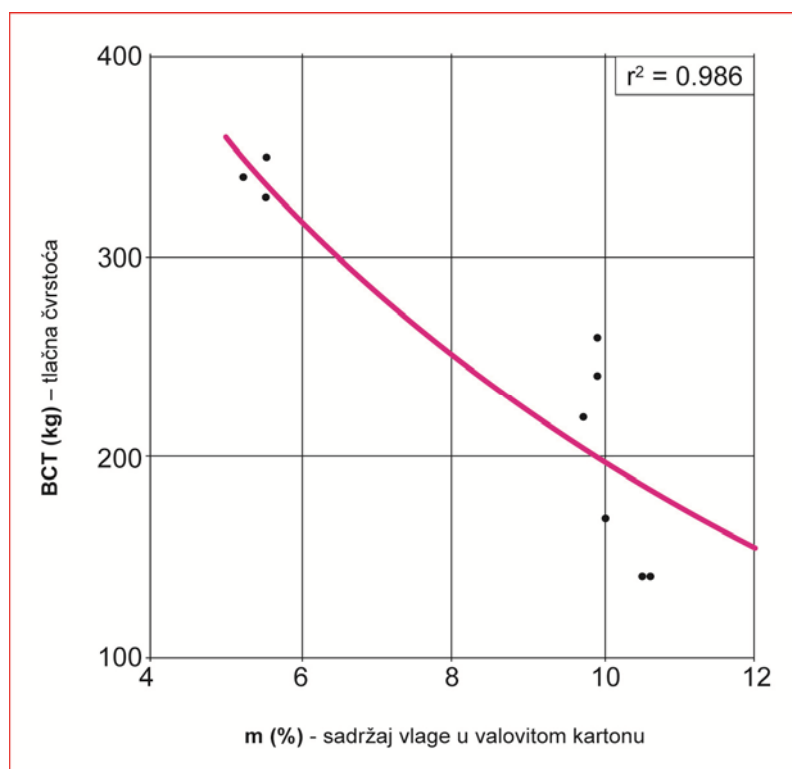
Slika 45. Ovisnost tlačne čvrstoće o sadržaju vlage za valoviti karton 2KŠ-E linearni model

$$BCT = 571.388 - 32.116 \cdot m$$

Valoviti karton kvalitete 2KŠ-E nije dočekaio kraj ispitivanja u teškim i promjenljivim uvjetima relativne vlažnosti zraka i temperature. Niske početne tlačne čvrstoće, visoke higroskopnosti i higroekspanzivnosti, te izrazito visokog koeficijenta mehanosorpcije od čak - 0.121 treći dan ispitivanja došlo je do loma kutije. Posljedica je bila urušavanje svih kutija složenih na paleti.

Prema gornjem izrazu zaključuje se da za 1% prosječnog porasta sadržaja vlage dolazi do prosječnog smanjenja tlačne čvrstoće za 32 kg. Ako se u uzme u obzir tlačna čvrstoća prije ispitivanja koja iznosi 340 kg, znači da u relativnom smislu valoviti karton kvalitete 2KŠ-E za porast vlage od samo 1% gubi prosječno 10% početne tlačne čvrstoće. Time se potvrđuje kako ovu kvalitetu valovitog kartona treba apsolutno izbjegavati za transport voća i povrća, odnosno u uvjetima visoke i promjenljive relativne vlažnosti zraka.

Slike 45 i 46 prikazuju linearni i eksponencijalni regresijski model procjene rezultata ispitivanja, gdje eksponencijalni oblik očekivano daje bolju aproksimaciju.



Slika 46. Ovisnost tlačne čvrstoće o sadržaju vlage za valoviti karton 2KŠ-E eksponencijalni oblik

$$BCT = 656.529 \cdot e^{-0.121 \cdot m}$$

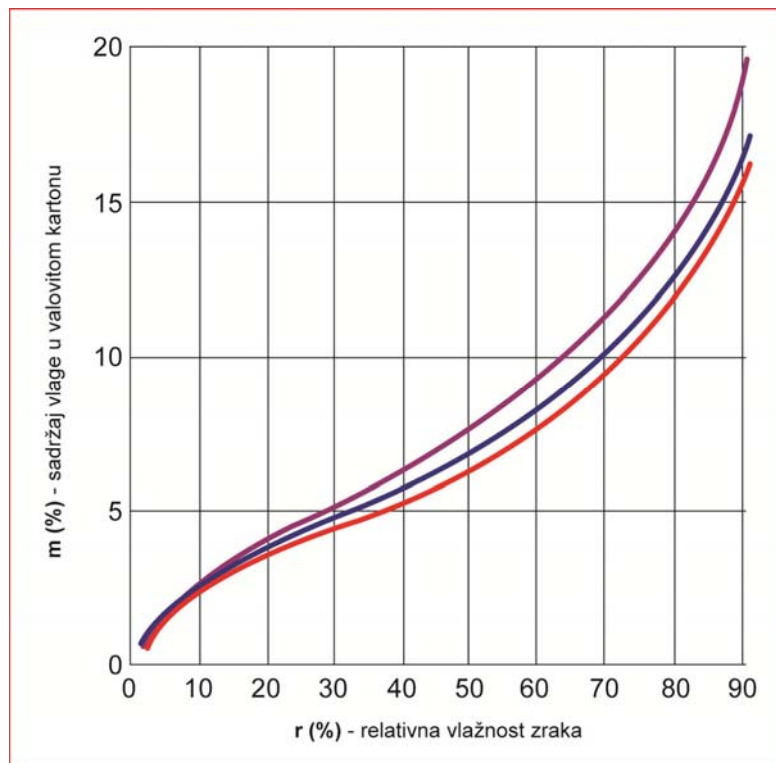
#### 4.7. Rezultati ispitivanja za valoviti karton 2KŠ

Tablica 21. Rezultati ispitivanja za valoviti karton kvalitete 2KŠ

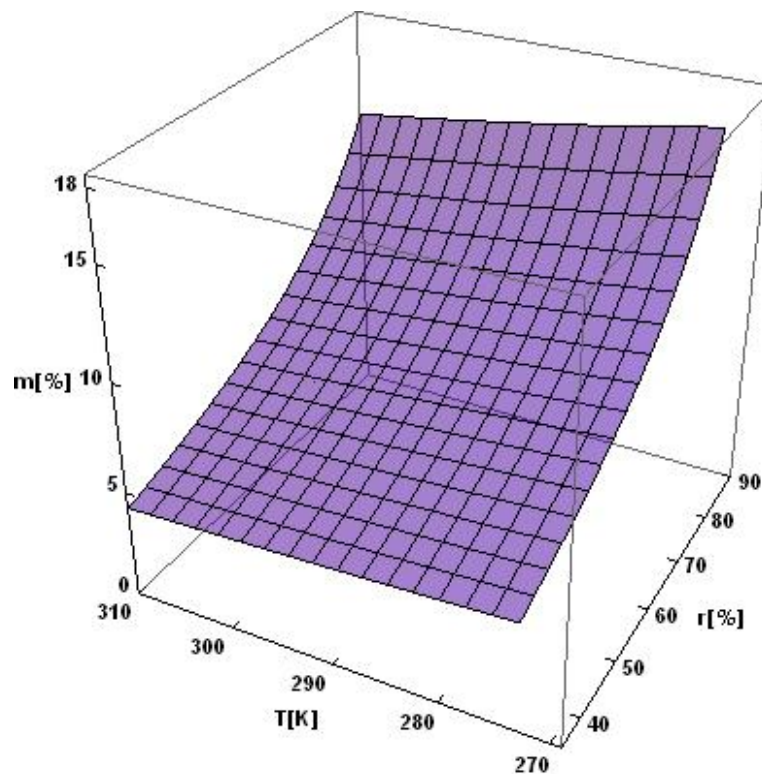
Kvaliteta 2KŠ						
Broj dana/vrsta ispitivanja	Ulazni podaci	1. dan	2. dan	3. dan	4. dan	5. dan
gramatura [ $\text{g/m}^2$ ]	672	693	731	Lom uzoraka		
debljina [mm]	6.35	6.35	6.29			
BST [kPa]	1363	1406	1185			
ECT [kN/m]	8.95	7.64	4.47			
sadržaj vlage [%]	5.0	11.68	14.54			
FCT [kPa]	182	156	89			
PET [J]	7.25	7.4	6.2			
BCT [kg]	280	170	120			

Peteroslojni valoviti karton kvalitete 2KŠ je nešto više ukupne gramature od prethodnog AS-1 za  $8 \text{ g/m}^2$  ili za 1%. Ovaj uzorak valovitog kartona sastavljen je od identična 3 ravna sloja i to od linera  $0,175 \text{ g/m}^2$ . Valoviti slojevi, vanjski i unutarnji su od istog materila i iste gramature, wellenstof medium  $150 \text{ gr/m}^2$ . Gramatura i debljina ovog valovitog kartona raste s povećanjem vlage. Gramatura je porasla za 13% sa početnih  $924 \text{ g/m}^2$  na  $1045 \text{ g/m}^2$ , dok je debljina porasla za 2%, sa  $6,43 \text{ mm}$  na  $6,54 \text{ mm}$ . Sadržaj vlage u valovitom kartonu porastao je sa 5,6% nakon prvog dana na 14,41% nakon šestog dana što čini porast vrijednosti od 157%. Ispitivani uzorak ima veliku upojnost koju je primio u komori za hlađenje.

Otpornost na prskanje (BST) pokazuje porast od  $1722 \text{ kN/m}$  prvog dana do  $1915 \text{ kN/m}$  šestog dana i iznosi 11%. Vrijednosti osciliraju iz dana u dan, pa tako nakon tri dana otpornost raste za 3,5% a nakon toga pada za 6% da bi zadnji dan ispitivanja ponovo porasla za 14%. Zaključuje se da promjene temperaturne i relativne vlažnosti zraka najmanje utječu na otpornost na prskanje po Mullenu. Ovakvi rezultati pokazuju da ujednačene gramature tri ravna sloja i iste kvalitete papira mogu znatno utjecati na čvrstoću kutije. Opisani rezultati po danima prikazani su u tablici 21. Na slikama 47, 48 i 49 prikazane se izoterme upijanja vlage, ravnotežni sadržaj te brzina upijanja za uzorak valovitog kartona 2KŠ.



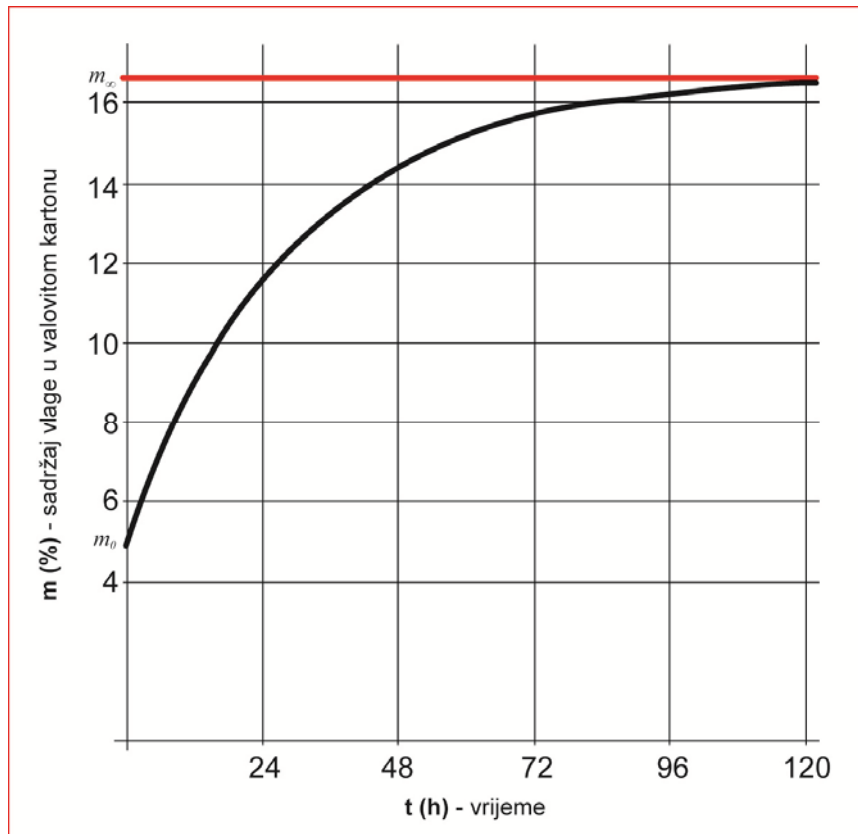
Slika 47. Izoterme upijanja vlage valovitog kartona kvalitete 2KŠ pri temperaturama 3°C, 10°C i 23°C



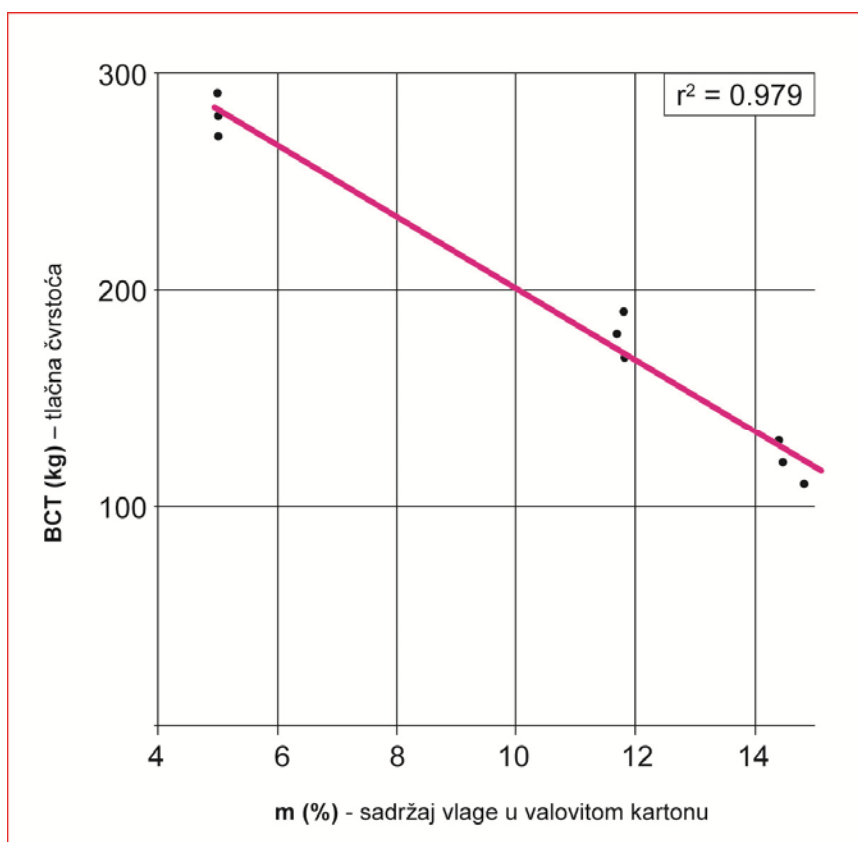
Slika 48. Ravnotežni sadržaj vlage valovitog kartona kvalitete 2KŠ u ovisnosti o temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka

$$m = 16.7 - 11.7 \cdot e^{-0.0353 \cdot t}$$

gdje vrijednost eksponenta  $-0.0353$  u gornjem izrazu predstavlja higroekspanzivni koeficijent valovitog kartona 2KŠ.



Slika 49. Brzina upijanja vlage valovitog kartona kvalitete 2KŠ



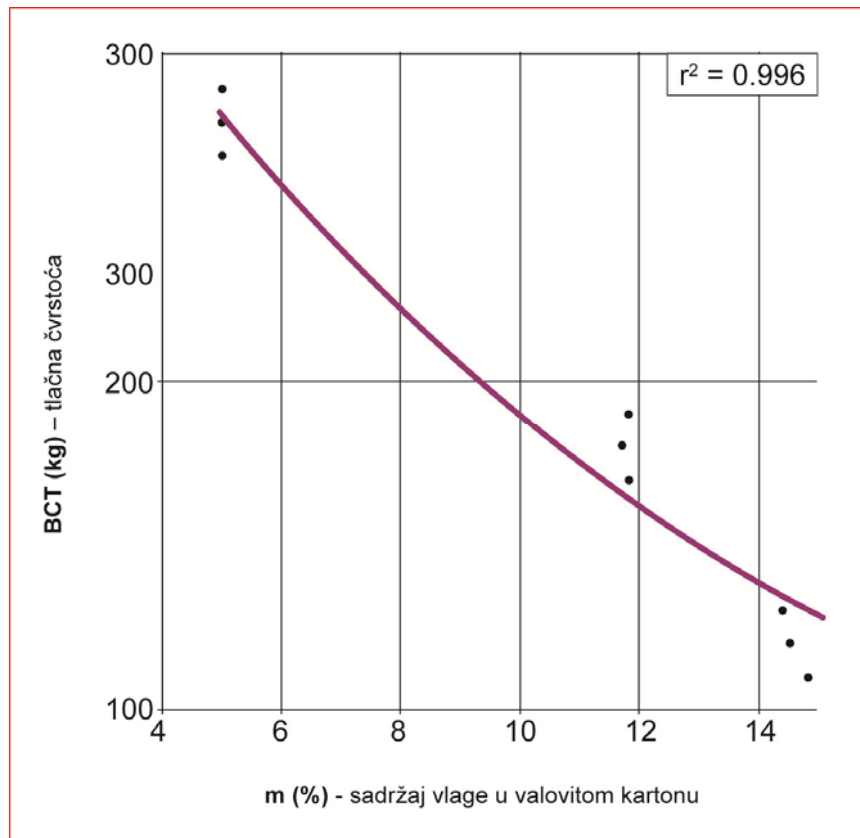
Slika 50. Ovisnost tlačne čvrstoće o sadržaju vlage za valoviti karton 2KŠ linearni model

$$BCT = 364.432 - 16.381 \cdot m$$

Valoviti karton kvalitete 2KŠ kao ni prethodni valoviti karton kvalitete 2KŠE nije izdržao ispitivanje, odnosno simulaciju distribucijskog puta.

Od ispitivanih, ova vrsta valovitog kartona pokazala je najveću higroekspanzivnost, te su tako već treći dan ispitivanja vrijednosti sadržaja vlage premašivale 14%.

U relativnom smislu obzirom na količinu upijene vlage valoviti karton kvalitete 2 KŠ nije pokazao tako drastičan pad tlačne čvrstoće, što dokazuje i niska vrijednost koeficijenta mehanosorpcije -0.0786. No uzimajući u obzir nisku početnu tlačnu čvrstoću i izrazitu higroekspanzivnost ovu vrstu valovitog kartona treba izbjegavati pri distribuciji agrokultura.



Slika 51. Ovisnost tlačne čvrstoće o sadržaju vlage za valoviti karton 2KŠ eksponencijalni oblik

$$BCT = 419.338 \cdot e^{-0.0786 \cdot m}$$

Slike 50 i 51 prikazuju linearni i eksponencijalni regresijski model procjene rezultata ispitivanja.



U tablici 22 daje se pregled rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće i sadržaja vlage svih šest opisanih kvaliteta valovitog kartona po danima.

Tablica 22. Pregled rezultata ispitivanja za svih šest kvaliteta valovitog kartona

<b>1. dan</b>					
<b>Razlike u parametrima stanja zraka u komori za hlađenje i na otvorenom prostoru</b>					
$\Delta t = +16.4^{\circ}\text{C}$ , $\Delta r = -15.6\%$					
$(t = 4.1^{\circ}\text{C}, r = 72.1\%) \rightarrow (t = 20.5^{\circ}\text{C}, r = 56.5\%)$					
<b>Promjena tlačne čvrstoće nakon 1. dana <math>\Delta\text{BCT}</math> (kg)</b>					
AS0	AS-1	3KSE	BTKE/2f	2KŠ-E	2KŠ
24.138% (580→440)	20% (500→400)	15% (400→340)	24.33% (370→280)	29.41% (340→240)	39.28% (280→170)
<b>Promjena sadržaja vlage nakon 1. dana <math>\Delta m</math> (%)</b>					
+47.89% (7.1→10.5%)	+97.86% (5.6→11.08%)	+110.17% (5.6→11.77%)	+81.2% (5.8→10.51%)	+86.42% (5.3→9.88%)	+133.6% (5→11.68%)
<b>2. dan</b>					
<b>Razlike u parametrima stanja zraka u komori za hlađenje i na otvorenom prostoru</b>					
$\Delta t = +25.1^{\circ}\text{C}$ , $\Delta r = -47.4\%$					
$(t = 3.0^{\circ}\text{C}, r = 82.5\%) \rightarrow (t = 28.1^{\circ}\text{C}, r = 35.1\%)$					
<b>Promjena tlačne čvrstoće nakon 2. dana <math>\Delta\text{BCT}</math> (kg)</b>					
AS-0	AS-1	3KSE	BTKE/2f	2KŠ-E	2KŠ
+6.8% (440→470)	-40% (400→240)	-13.33% (340→300)	-21.43% (280→220)	-37.5% (240→150)	(170→lom)
<b>Promjena sadržaja vlage nakon 2. dana <math>\Delta m</math> (%)</b>					
+4.38% 10.5→10.96%	+6.95% 11.08→11.85%	-1.7% 11.77→11.57%	+8.47% 10.51→11.49%	+4.76% 9.88→10.35%	+24.49% 11.68→14.54%

<b>3. dan</b>					
<b>Razlike u parametrima stanja zraka u komori za hlađenje i na otvorenom prostoru</b>					
$\Delta t = 14.2^{\circ}\text{C}$ , $\Delta r = +15.5\%$					
$(t = 2.9^{\circ}\text{C}, r = 77.5\%) \rightarrow (t = 17.1^{\circ}\text{C}, r = 93.0\%)$					
<b>Promjena tlačne čvrstoće nakon 3. dana <math>\Delta BCT</math> (kg)</b>					
AS-0	AS-1	3KSE	BTKE/2f	2KŠ-E	2KŠ
-27.7% (470→340)	-4.16% (240→230)	-26.6% (300→220)	-21.43% (220→190)	(150→lom)	
<b>Promjena sadržaja vlage nakon 3. dana <math>\Delta m</math> (%)</b>					
+37.8% 10.96→15.1%	+10.8% 11.85→13.13%	+26.19% 11.57→14.6%	+19.58% 11.49→13.74%		

<b>4. dan</b>					
<b>Razlike u parametrima stanja zraka u komori za hlađenje i na otvorenom prostoru</b>					
$\Delta t = 27.0^{\circ}\text{C}$ , $\Delta r = 32.4\%$					
$(t = 5.1^{\circ}\text{C}, r = 72.5\%) \rightarrow (t = 32.1^{\circ}\text{C}, r = 40.1\%)$					
<b>Promjena tlačne čvrstoće nakon 4. dana <math>\Delta BCT</math> (kg)</b>					
AS-0	AS-1	3KSE	BTKE/2f	2KŠ-E	2KŠ
-26.47% (340→250)	-17.39% (230→190)	-4.54% (220→210)	-10.52% (190→170)		
<b>Promjena sadržaja vlage nakon 4. dana <math>\Delta m</math> (%)</b>					
+3.9% 15.11%→15.7%	+1.22% 13.13%→13.29%	-10.55% 14.6%→13.06%	+10.92% 13.74%→15.24%		

<b>5. dan</b>					
<b>Razlike u parametrima stanja zraka u komori za hlađenje i na otvorenom prostoru</b>					
$\Delta t = 29.7^{\circ}\text{C}$ , $\Delta r = 33.0\%$					
$(t = 3.4^{\circ}\text{C}, r = 72.0\%) \rightarrow (t = 33.1^{\circ}\text{C}, r = 39.0\%)$					
<b>Promjena tlačne čvrstoće nakon 5. dana <math>\Delta BCT</math> (kg)</b>					
AS-0	AS-1	3KSE	BTKE/2f	2KŠ-E	2KŠ
+12% (250→280)	+5.26% (190→200)	-9.52% (210→190)	-29.42% (170→120)		
<b>Promjena sadržaja vlage nakon 5. dana <math>\Delta m</math> (%)</b>					
-3.5% 15.7→15.15%	+9.4% 13.29→14.54%	+10.34% 13.06→14.41%	-6.36% 15.24→14.27%		



## ZAKLJUČAK

---

Znanstveni doprinos u radu su metode i modeli za određivanje čvrstoće kutije na tlačno opterećenje bazirano na kondicioniranim uvjetima relativne vlažnosti i temperature okoline. Rezultati su prikazani kroz brojna mjerenja interpretirana regresivnom analizom. Napisane su originalne analitičke funkcije koje pokazuju i međusobno uspoređuju različite eksperimentalne uvjete i materijale. Time je uveden novi način pristupa studiji o čvrstoći valovitog kartona i ambalaže općenito.

Istraživanje je ograničeno na proizvodnju kutija od peteroslojnog valovitog kartona, oblik kutije tipa “*holandez*“ i na uvjete u hladnjači za voće i povrće. Kutija je proizvedena od različitih testnih uzoraka ravnih i valovitih slojeva te različitih unosa gramatura. Valoviti slojevi su formirani u C i B profile valova za unutarnje i vanjske stijenke dok su ravni slojevi izrađeni od dva sloja papira od kojih niti jedan nije izbijeljen osim vanjskog sloja vanjske stijenke. Tisak vanjskog sloja unutarnje stijenke bio je minimalan, oko 10% površine dok je vanjski sloj vanjske stijenke bio otisnut na preko 50% površine. Za precizno mjerenje elemenata valovitog kartona na kojima su izvršeni eksperimenti u svrhu utvrđivanja čvrstoće kartona u kondicioniranim uvjetima uvedena je neinvazivna metoda određivanja debljine papira koji čine valoviti karton u različitim stanjima njihove vlažnosti.

Simuliranjem distribucijskog puta od proizvođača do potrošača s vrlo promjenljivim vremenskim uvjetima razvijeni su modeli koji osiguravaju točne pretpostavke kojima su postignuta poboljšanja. Ta poboljšanja osiguravaju viši stupanj automatizacije koji je postignut unapređenjem procesa proizvodnje i povećanjem preciznosti tehnike ispitivanja valovitog kartona. Unapređenje proizvodnje ambalaže ostvareno je povećanjem njene prosječne izdržljivosti. Smanjenjem varijacije u izdržljivosti kutije omogućeno je smanjenje razlike između njene prosječne i potrebne izdržljivosti a da je pri tom zadržana prihvatljivo mala mogućnost loma. Nova rješenja koja su predložena u radnji verificirana su u realnoj proizvodnji. Eksperimentiranjem je dokazana povećana preciznost ispitivanja valovitog kartona.

Dokazana je nužnost minimiziranja osnovne težine kutije i smanjivost kvalitete do one donje granice koja zadovoljava potrebe agrokulturne industrije. Definirani su parametri koji određuju donju granicu kvalitete kutije od valovitog kartona kod koje postoji minimalna mogućnost njenog loma. Skladištenje voća u rashlađenoj hladnjači zahtjeva upotrebu visokokvalitetnih kartona proizvedenih od visokokvalitetne (nereciklirane) sirovine sa ravnim slojevima i valovitim srednjim slojem ljepljenim voodootpornim ljepljivim. Faktori koji utječu na tlačnu izdržljivost kutija od valovitog kartona u hladnjačama uključujući temperaturu i vlagu u hladnjači, su i cikličke promjene do kojih dolazi prilikom manipulacije paletizirane robe koja se mora distribuirati s jednog na drugo mjesto. Distribucijski put podrazumjeva dulji boravak u hladnjači pri skladištenju te kratkotrajno izlaganje atmosferskim uvjetima pri pretovaru. Promjena količine vlage uzrokovana je visokom relativnom vlažnošću zraka i niskom temperaturom u hladnjači, koje u njoj vladaju zbog očuvanja kvalitete i kvantitete voća i povrća.

Nepoznanice koje su prisutne pri određivanju utjecaja cikličke promjene količine vlage na kompresijske i vlačne sile valovitog kartona fokusirane su na ciklički fenomen tlačnog puzanja materijala. Zbog histereze valovitog kartona koji upija i otpušta vlagu u zrak, jedan dio apsorbirane vlage ostaje u njemu. Ponavljanjem tog procesa upijanja i otpuštanja vlage dolazi do efekta akumulacije vlage u kartonu što rezultira kolapsom ili urušavanjem kutija. Tlačno puzanje je glavni ali ne i jedini uzrok lomova i urušavanja kutija na paletama koje se nalaze u hladnjačama. Do urušavanja dolazi i zbog nepravilnog slaganja kutija u kupove te zbog oštećenja nepravilnim rukovanjem transportnim sredstvima.

Mjerenjem vlage i temperature u hladnjači te u njenoj vanjskoj okolini, prosječni dnevni profili pokazali su znatne varijacije i naklonjenost povećanju relativne vlažnosti zraka za vrijeme ispitivanja. Vлага u hladnjači varirala je od 72% do 82,5% dok je u vanjskoj okolini varirala od 35,1% do 93%, što je stvorilo prosječnu razliku u relativnoj vlažnosti zraka u iznosu od 22,58%. Visoka relativna vlažnost zraka smanjuje nivo gubitka vlažnosti u voću ali također smanjuje i čvrstoću valovitog kartona putem većeg unosa vlage. Visoka vlažnost od oko 100% predstavlja veliki rizik i za voće i za kutije. Kod prvog izaziva truljenje i pojavu plijesni a kod drugog veliki pad čvrstoće i vrlo zahtjevnu okolinu za dobivanje prihvatljivih svojstava kutija od valovitog kartona.

Prosječne dnevne temperature u hladnjači pokazuju manja odstupanja u rasponu od 2,9°C do 5,1°C dok je u vanjskoj okolini ona varirala od 17,1°C do 33,1°C. Prosječna razlika

u temperaturi između hladnjače i vanjske okoline iznosi 23,88°C. Interval toplinskog šokiranja kutija na paletama, zajedno s upakiranim sadržajem, u trajanju od 15 minuta potvrdio se optimalnim jer je time simuliran distribucijski put i vrijeme manipulacije potrebno pri pretovaru iz hladnjače u prijevozno sredstvo. Na temelju izmjerenih podataka kod svih šest kvaliteta vidljivo je znatno smanjenje mehaničkih svojstava valovitog kartona praćeno velikim povećanjem sadržaja vlage.

Iz rezultata u radu predlaže se mjerenja kontrole kvalitete papira za ravni i valoviti sloj u samom proizvodnom procesu njegove izrade. Takvi podaci se koriste za određivanje utjecaja na graničnu tlačnu izdržljivost svakog sloja valovitog kartona kao i graničnu tlačnu izdržljivost kutije. Jednostavan način poboljšanja karakteristika valovitog kartona, s namjerom poboljšanja tlačne izdržljivosti bio bi reduciranje upijanja vlage. Posebna pozornost mora biti usmjerena na osiguranje optimalne vlažnosti oko skladištenog voća. Niska vlažnost ubrzava sušenje a visoka truljenje kod voća a drastični pad čvrstoće kod kutija. Troškovi vezani uz promjene koje utječu na reduciranje vlage u valovitom kartonu, moraju odgovarati uštedama postignutim reduciranjem njegove težine. Isto tako, promjene na valovitom kartonu ne bi smjele znatnije utjecati na proces recikliranja, jer bi se tada povećali toškovi odlaganja.

Predlaže se i postavljanje barijere za vlagu na površinu valovitog kartona. Logično bi bilo obložiti donju stranu kutije iznutra, obzirom da bi samo voće puštalo najviše vlage u paleti i oko palate. Odluka o postavljanju obloge s vanjske strane kutije trebala bi se bazirati na studiji o veličini i stupnju kruženja vlage. Utjecaj vlage i temperature na svojstva izdržljivosti valovitog kartona samo je dio informacija potreban za precizno određivanje karakteristika kutija od valovitog kartona. Bilo bi potrebno istražiti i informacije o protoku zraka, kontinuiranom mjerenju temperature, vlažnosti zraka i količine vlage u papiru unutar hladnjače.

# Literatura

---

1. **Allerby, I. M., Laing, G. N., and Cardwell, R. D.** (1985). Compressive strength - from components to corrugated container. *Appita Conference Notes – Unpublished*, 1-11.

2. **Andersson, O. and Berkyto, E.** (1951a). Some factors affecting the stress-strain characteristics of paper. I. Influence of temperature. *Svensk Papperstidning*. **54**, 437-40.

3. **Andersson, O. and Berkyto, E.** (1951b). Some factors affecting the stress-strain characteristics of paper. II. Influence of relative humidity. *Svensk Papperstidning*. **54**, 441-4.

4. **Babić, Darko; Kropar-Vančina, Vesna; Jurečić, Denis.**, Odnos između nosivosti i smjera vlakana kod kartonskih kutija // *DAAAM International Scientific Book 2005 / Katalinić, Branko (ur.)*. Vienna : DAAAM International Vienna, 2005. Str. 017-024.

5. **Babić, Darko; Lajić, Branka; Jurečić, Denis; Pasanec Preprotić, Suzana.**, The construction of corrugated boxes as a key parameter of their strength // *Proceeding of the 11th International Design Conference and Workshop (Design 2010): Design graphics with security elements; Vol. 4 / Žiljak, Vilko; Milčić, Diana (ur.)*. Zagreb: University of Zagreb, Faculty of Graphic Arts, 2010. 1957-1962 (predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

6. **Babić, Darko; Jurečić, Denis; Lajić, Branka.**, Utjecaj veličine valova na čvrstoću vertikalne i horizontalne površine valovitog kartona // *Annals of DAAAM for 2006 & Proceedings / Katalinić, Branko (ur.)*, Vienna: DAAAM International Vienna, 2006. 019-020 (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

7. **Babić, Darko; Lajić, Branka; Jurečić, Denis.**, Čvrstoća konstrukcije transportne kutije za voće i povrće // *MATRIB 2006: 11. Savjetovanje o materijalima, tehnologijama, trenju i trošenju: zbornik sažetaka = abstracts book / Grilec, Krešimir (ur.)*. Zagreb: Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, 2006. 388-397 (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

**8. Babić, Darko; Lajić, Branka; Jurečić, Denis.**, Relation between the Resistance to Perforation and Flat Pressure Force in Dependence on the Relative Humidity of the Corrugated Board // *10. Savjetovanje o materijalima, tehnologijama, trenju i trošenju: zbornik radova* / Grilec, Krešimir (ur.). Zagreb : Croatian Society for Materials and Tribology, 2005. 1-5 (predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

**9. Bandyopadhyay, A.**, Radhakrishnan, H., Ramarao, B. V., and Chatterjee, S. G. (2000). Moisture sorption response of paper subjected to ramp humidity changes: modeling and experiments. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. **39**, (1), 219-226.

**10. Batelka, J. J.** (1994). The effect of boxplant operations on corrugated board edge crush test. *Tappi Journal*. **77**, (4), 193-198.

**11. Bell, L. N.** and Labuza, T. P. (2000). *Moisture sorption, practical aspects of isotherm measurement and use*, American association of cereal chemists, USA, Pages. 25-27, 50-51.

**12. Benson, R. E.** (1971). Effects of relative humidity and temperature on tensile stress-strain properties of Kraft linerboard. *Tappi Journal*. **54**, (5), 699-3.

**13. Byrd, V. L.** (1986). Adhesives influence on edgewise compression creep in a cyclic relative-humidity environment. *Tappi Journal*. **69**, (10), 98-100.

**14. Chalmers, I. R.** (1998). The effect of humidity on packaging grade paper elastic modulus. *Appita Journal*. **51**, (1), 25-28.

**15. Chalmers, I.** (1999). Creep Effects on Paper, *Board and Containers*, ed. R., PAPRO New Zealand, Rotorua, Pages. 237-245.

**16. Chalmers, I. R.** (2000). A comparison between static and cyclic humidity compression creep performance of linerboard. *Proceedings, 4th International Symposium, Moisture and Creep Effects on Paper, Board and Containers*, ed. Serra-Tosio, Jean-Marie and Vullierme, Isabelle, Ecole Francaise de Papeterie et des Industries Graphiques, Domaine Universitaire, Grenoble, France, Pages. 44-53.

**17. Back, E. L.** and **Salmen, N. L.** (1981). Glass transitions of main wood components and some implications for pulping processes. *Int. Symp. Wood Pulping Chem.* **5**, 47-51.

**18. Coffin, D. W.** and Habeger, C. C. (2000). Accelerated Creep Mechanics: Part I. *Proceedings of the 4th International Symposium on Moisture and Creep Effects on Paper, Board and Containers*, ed. Serra-Tosio, Jean-Marie and Vullierme Isabelle, Ecole Francaise de Papeterie et des Industries Graphiques, Domaine Universitaire, France, Pages. 107-120.

- 19. Eagleton, D. G. and Marcondes, J. A.** (1994). Moisture-sorption isotherms for paper-based components of transport packaging for fresh produce. *Tappi Journal*. **77**, (7), 75-81.
- 20. Fellers, C.** (1983). Edgewise Compression Strength of Paper. *Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard*, ed. Mark, Richard E., Marcel Dekker, Inc, New York, Pages. 349-383.
- 21. Fellers, C. and Carlsson, L. A.** (1983). Bending Stiffness, with Special Reference to Paperboard. *Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard*, ed. Mark, R. E., Marcel Dekker, Inc, New York, Pages. 323-347.
- 22. Golubović A.** (1993). *Svojstva i ispitivanje papira*
- 23. Haraldsson, T., Fellers, C., and Söremark, C.** (1997). Creep properties of paper - principles of evaluation. *Proceedings 3rd International Symposium, Moisture and References* Page R.5
- 24. Jurečić, Denis; Jokić, Tigran; Miljković, Petar; Kajganović, Jelena; Pasanec Preprotić, Suzana.**, Primjena Guggenheim–Anderson–De Boer (GAB) modela u analizi reoloških svojstava valovitog kartona // 14. međunarodno savjetovanje tiskarstva, dizajna i grafičkih komunikacija Blaž Baromić: zbornik radova / Mikota, Miroslav (ur.). Zagreb: Garfički fakultet, 2010. 220-227 (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).
- 25. Jurečić, D.; Babić, D. & Lajić, B.**, Važni faktori kvalitete valovitog kartona // *Annals of DAAAM 2008 & Proceedings* / B Katalinić (ur.). Beč: DAAAM International, Vienna, 2008. 0689-0690 (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).
- 26. Jurečić, D.; Stanić, N., Žiljak, V., Lajić, B., & Žiljak-Stanimirović, I.**, Algoritmi i izvorni kod za mjerenje količine papira i praznih prostora u valovitom kartonu // 16. međunarodna konferencija tiskarstva, dizajna i grafičkih komunikacija Blaž Baromić: zbornik radova / Mikota, Miroslav (ur.). Zagreb: Garfički fakultet, 2012. 491-502 (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).
- 27. Kawanishi, K.** (1989). Estimation of the compression strength of corrugated fibreboard boxes and its application to box design using a personal computer. *Packaging Technology and Science*. **2**, 29-39.
- 28. Kellicutt, K. Q. and Landt, E. F.** (1951). Basic design data for the use of fiberboard in shipping containers. *Forest Products Laboratory report No. D1911 - original not sighted*.



29. Kellicutt, K. Q. and Landt, E. F. (1952). Development of design data for corrugated fiberboard shipping containers. *Tappi Journal*. **35**, 398-402.
30. Koning, J. W. Jr. and Stern, R. K. (1977). Long-term creep in corrugated fiberboard containers. *Tappi Journal*. **60**, (12), 128-131.
31. Kroeschell, W. O. (1992). The edge crush test. *Tappi Journal*. June, 79-82.
32. Lajić, Branka; Babić, Darko; Jurečić, Denis., Ispitivanje čvrstoće transportne kutije od valovitog kartona u ovisnosti o materijalu i konstrukciji // *Proceedings of International conference on Computer Aided Design and Manufacturing CADAM 2006 /* Obsiger, Boris (ur.). Rijeka: Zigo Rijeka, 2006. 55-57 (predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).
33. Maltenfort, G. G. (1988a). Compression test estimation. *Corrugated Shipping Containers An Engineering Approach*, Jelmar Publishing Co., Inc., Plainview N.Y., Pages 70-94.
34. Maltenfort, G. G. (1988b). Long term stacking. *Corrugated Shipping Containers, An Engineering Approach*, Jelmar Publishing Co., Inc., Plainview N.Y., Pages 71, 72 and 114.
35. Markström, H. (1999). *Testing Methods and Instruments for Corrugated Boards*, Lorentzen and Wettre, Sweden, Pages 10, 14, 32, 33, 38 and 43.
36. McKee, R. C., Gander, J. W., and Wachuta, J. R. (1963). Compression Strength Formula for Corrugated Boxes. *Paperboard Packaging*. **48**, (8), 144-159.
37. Nevins Logie, A. (2008). *Significant Factors Affecting Horticultural Corrugated Fibreboard Strength, Doctor thesis, Massey University, Palmerston North, New Zealand, Chapter 2, Literature Review, Page 2,1-2,56*
38. Niskanen K. (1998). *Paper Physics*
39. Salmen, N. L. and Back, E. L. (1980). Moisture-dependent thermal softening of paper, evaluated by its elastic modulus. *Tappi Journal*. **63**, (6), 117-120.
40. Schaepe, M. (2000). The influence of pin adhesion strength on edge crush and box compression strength. *Corrugating International*. **2**, (2), 35-39.
41. Sprague, C. H. and Whitsitt, W. J. (1982). Medium Fracture and Strength Losses in Fluting. *Tappi Journal*. **65**, (10), 133-134.
42. Taylor, B. (1999). The interaction of paper moisture and temperature and its effects on corrugated board quality. *Corrugating International*. **1**, (2), 39-50.

- 
- 43. Uesaka, T.,** Ishizawa, T., Kodaka, I. et al., (1987). *Japan Tappi* **41** (4), 335.
- 44. Urbanik, T. J.** (2001). Effect of corrugated flute shape on fibreboard edgewise crush strength and bending stiffness. *Journal of Pulp and Paper Science*. **27**, (10), 330-335.
- 45. Wennerblom, A.B.,** *Tappi Journal* **75**, (4), 97 (1994).
- 46. Whitsitt, W. J. and Sprague, C. H.** (1987). Compressive strength retention during fluting of medium - Strength losses in fluting. *Tappi Journal*. **70**, (2), 91-96.
- 47. Whitsitt, W. J.** (1988). Papermaking factors affecting box properties. *Tappi Journal*. **71**, (12), 163-167.

# Popis tablica i slika

---

## a) *Popis tablica:*

**Tablica 1.** Faktori utjecaja na čvrstoću valovitog kartona tijekom skladištenja u hladnjači, strana 8

**Tablica 2.** Vrste valova, strana 12

**Tablica 3.** Uzorci valovitog kartona AS-0, strana 26

**Tablica 4.** Uzorci valovitog kartona AS-1, strana 26

**Tablica 5.** Uzorci valovitog kartona 3KSE, strana 27

**Tablica 6.** Uzorci valovitog kartona BTKE/2F, strana 27

**Tablica 7.** Uzorci valovitog kartona 2KŠ-E, strana 28

**Tablica 8.** Uzorci valovitog kartona 2KŠ, strana 28

**Tablica 9.** Osnovne kombinacije papira za izradu valovitog kartona, strana 30

**Tablica 10.** Debljina troslojnog valovitog kartona i njegovih slojeva (talon = 0.0458 mm/px), strana 36

**Tablica 11.** Peteroslojni valoviti karton-gornji sloj (talon = 0,0348 mm/px), strana 37

**Tablica 12.** Peteroslojni valoviti karton-donji sloj (talon = 0,0348 mm/px), strana 37

**Tablica 13.** Sedmeroslojni valoviti karton – svih 7 slojeva (talon = 0,031 mm/px), strana 38

**Tablica 14.** Deformirani peteroslojni valoviti karton – svih 5 slojeva (talon = 0,017 mm/px), strana 39

**Tablica 15.** Parametri stanja zraka komore za hlađenje i okoline, strana 40

**Tablica 16.** Rezultati ispitivanja za valoviti karton kvalitete AS-0, strana 41

**Tablica 17.** Rezultati ispitivanja za valoviti karton kvalitete AS-1, strana 48

**Tablica 18.** Rezultati ispitivanja za valoviti karton kvalitete 3KSE, strana 55

**Tablica 19.** Rezultati ispitivanja za valoviti karton kvalitete BTKE/2F, strana 61

**Tablica 20.** Rezultati ispitivanja za valoviti karton kvalitete 2KŠ-E, strana 66

**Tablica 21.** Rezultati ispitivanja za valoviti karton kvalitete 2KŠ, strana 70

**Tablica 22.** Pregled rezultata ispitivanja za svih šest kvaliteta valovitog kartona, strana 75

**b) Popis slika:**

**Slika 1.** Deformiranje kutije pod opterećenjem vlastite težine i sadržaja, strana 2

**Slika 2.** Prerez kutije za voće i povrće tipa „Holandez“, strana 6

**Slika 3.** Uzorci valovitog kartona u vlažnom i suhom stanju, strana 7

**Slika 4.** Sastavnice valovitog kartona, makro fotografija tipičnog peteroslojnog valovitog kartona, strana 9

**Slika 5.** Dvoslojni valoviti karton, A val, 11 valova/cm, strana 10

**Slika 6.** Troslojni valoviti karton, A val-11 valova/cm, strana 11

**Slika 7.** Peteroslojni valoviti karton, A val-11 valova/cm, C val-13 valova/cm, strana 11

**Slika 8.** Sedmeroslojni valoviti karton, D val-29 valova/cm, C val-13 valova/cm, A val-11 valova/cm, strana 12

**Slika 9.** Smjerovi vlakanaca u valovitom kartonu, strana 13

**Slika 10.** Dijagram histereze papira, Golubović [1], strana 18

**Slika 11.** Ovisnost vlage u papiru o relativnoj vlažnosti zraka na primjeru različitih vrsta papira, strana 19

**Slika 12.** Životni vijek kutije u ovisnosti o tlačnom opterećenju prema Maltenfortu, strana 20

**Slika 13.** Dijagram puzanja valovitog kartona, Koning i Stern, strana 21

**Slika 14.** Dijagram tlačnog puzanja valovitog kartona pri cikličkoj izmjeni relativne vlažnosti, strana 22

**Slika 15.** Vrijednost pozicije piksla na slici valovitog kartona, strana 33

**Slika 16.** Mjerenje debelog, tvrdog šesteroslojnog valovitog kartona i etalona, strana 34

**Slika 17.** Troslojni valoviti karton i etalon, strana 35

**Slika 18.** Peteroslojni valoviti karton i etalon, strana 36

**Slika 19.** Sedmeroslojni valoviti karton i etalon, strana 37

**Slika 20.** Mjerenje etalona, uzorka valovitog kartona, strana 38

**Slika 21.** Uzorak deformiranog peteroslojnog valovitog kartona uslijed vlage i opterećenja, strana 38

**Slika 22.** Izoterme upijanja vlage valovitog kartona kvalitete AS-0 pri temperaturama 3°C, 10°C i 23°C, strana 43

**Slika 23.** Ravnotežni sadržaj vlage valovitog kartona kvalitete AS-0 u ovisnosti o temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka, strana 44

**Slika 24.** Brzina upijanja vlage valovitog kartona kvalitete AS-0, strana 45

**Slika 25.** Ovisnost tlačne čvrstoće o sadržaju vlage za valoviti karton AS-0, strana 46

**Slika 26.** Ovisnost tlačne čvrstoće o sadržaju vlage za valoviti karton AS-0 eksponencijalni oblik, strana 47

**Slika 27.** Izoterme upijanja vlage valovitog kartona kvalitete AS-1 pri 3°C, 10°C i 23°C, strana 49

**Slika 28.** Ravnotežni sadržaj vlage valovitog kartona kvalitete AS-1 u ovisnosti o temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka, strana 51

**Slika 29.** Brzina upijanja vlage valovitog kartona kvalitete AS-1, strana 52

**Slika 30.** Ovisnost tlačne čvrstoće o sadržaju vlage za valoviti karton AS-1 linearni model

**Slika 31.** Ovisnost tlačne čvrstoće o sadržaju vlage za valoviti karton AS-1, strana 54

**Slika 32.** Izoterme upijanja vlage valovitog kartona kvalitete 3KSE pri 3°C, 10°C i 23°C, strana 56

**Slika 33.** Ravnotežni sadržaj vlage valovitog kartona kvalitete 3KSE u ovisnosti o temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka, strana 57

**Slika 34.** Brzina upijanja vlage valovitog kartona kvalitete 3KSE, strana 59

**Slika 35.** Ovisnost tlačne čvrstoće o sadržaju vlage za valoviti karton 3KSE linearni model, strana 59

**Slika 36.** Ovisnost tlačne čvrstoće o sadržaju vlage za valoviti karton 3KSE eksponencijalni oblik, strana 60

**Slika 37.** Izoterme upijanja vlage valovitog kartona kvalitete BTKE/2F pri temperaturama 3°C, 10°C i 23°C, strana 62

**Slika 38.** Ravnotežni sadržaj vlage valovitog kartona kvalitete BTKE-2F u ovisnosti o temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka, strana 63

**Slika 39.** Brzina upijanja vlage valovitog kartona kvalitete BTKE/2F, strana 63

**Slika 40.** Ovisnost tlačne čvrstoće o sadržaju vlage za valoviti karton BTKE-2F linearni model, strana 64

**Slika 41.** Ovisnost tlačne čvrstoće o sadržaju vlage za valoviti karton BTKE-2F eksponencijalni oblik, strana 65

**Slika 42.** Izoterme upijanja vlage valovitog kartona kvalitete 2KŠ-E pri temperaturama 3°C, 10°C i 23°C, strana 67

**Slika 43.** Ravnotežni sadržaj vlage valovitog kartona kvalitete 2KŠ-E u ovisnosti o temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka, strana 67

**Slika 44.** Brzina upijanja vlage valovitog kartona kvalitete 2KŠ-E, strana 68

**Slika 45.** Ovisnost tlačne čvrstoće o sadržaju vlage za valoviti karton 2KŠ-E linearni model, strana 68

**Slika 46.** Ovisnost tlačne čvrstoće o sadržaju vlage za valoviti karton 2KŠ-E eksponencijalni oblik, strana 69

**Slika 47.** Izoterme upijanja vlage valovitog kartona kvalitete 2KŠ pri temperaturama 3°C, 10°C i 23°C, strana 71

**Slika 48.** Ravnotežni sadržaj vlage valovitog kartona kvalitete 2KŠ u ovisnosti o temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka, strana 71

**Slika 49.** Brzina upijanja vlage valovitog kartona kvalitete 2KŠ, strana 72

**Slika 50.** Ovisnost tlačne čvrstoće o sadržaju vlage za valoviti karton 2KŠ linearni model, strana 73

**Slika 51.** Ovisnost tlačne čvrstoće o sadržaju vlage za valoviti karton 2KŠ eksponencijalni oblik, strana 74

# Popis objavljenih radova

---

## *Poglavlja u knjizi*

1. Babić, Darko; Jurečić, Denis; Tomaš, Ante., **Interakcije u doradnom procesu kao rezultat plastificiranja digitalno otisnutih araka** // DAAAM International Scientific Book 2006 / Katalinić, Branko (ur.). Vienna: DAAAM International Vienna, 2006. Str. 1-8.
2. Jurečić, Denis; Babić, Darko; Kropar-Vančina, Vesna., **Ambalaža kao nositelji informacije** // DAAAM International Scientific Book 2006 / Katalinić, Branko (ur.). Vienna: DAAAM International Vienna, 2006. Str. 305-312.
3. Babić, Darko; Kropar-Vančina, Vesna; Jurečić, Denis., **Odnos između nosivosti i smjera vlaknaca kod kartonskih kutija** // DAAAM International Scientific Book 2005 / Katalinić, Branko (ur.). Vienna : DAAAM International Vienna, 2005. Str. 017-024.
4. Milković, Marin; Babić, Darko; Jurečić Denis., **Ispitivanje čvrstoće mekovezane knjige** // Tiskarstvo 03 / Lovreček, Mladen (ur.). Zagreb: FS d.o.o. i Grafički fakultet, 2003.

## *Kongresno priopćenje (sažeci) u ostalim časopisima*

1. Jurečić, Denis; Babić, Darko; Vančina-Kropar, Vesna., **Ranking of the Visual Information on Graphic Design of Packaging which mostly Motivate the Purchasing of the Packet Product** // *Annals of DAAAM for 2006 & Proceedings of the The 17th International DAAAM Symposium Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Mechatronics and Robotics* / Katalinić, Branko (ur.). Vienna: DAAAM International Vienna, 2006. 189-190 (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni).
  2. Babić, Darko; Jurečić, Denis; Tomaš, Ante., **Interakcije u doradnom procesu kao rezultat plastificiranja digitalno otisnutih araka** // *Annals of DAAAM for 2005 &*
-

*Proceedings of the The 16th International DAAAM Symposium Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Young Researchers and Scientist / Katalinić, Branko (ur.). Vienna: DAAAM International Vienna, 2005. 15-15 (poster, međunarodna recenzija, sažetak).*

### ***Radovi u postupku objavljivanja***

1. Babić, Darko; Jurečić, Denis; Lajić, Branka., **Čvrstoća holandez kutije u ovisnosti o materijalu.** // *MED06, Book of abstracts.* (2007.) (prihvaćen za objavljivanje).

### ***Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunar.rec.***

1. Pasanec Preprotić, Suzana; Lajić, Branka; Jurečić, Denis., **PERFECT BINDING TECHNIQUE AFFECTS THE PAPERBACK ADHESIVE BINDING STRENGTH** // *15th International Conference on printing, Design and Graphic Communications Blaž Baromić 2011. Proceedings / Mikota, M. (ur.). Zagreb: Hrvatsko društvo grafičara, Hrvatska / Croatian Society of Graphic Artists, Croatia, 2011. 428-436 (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).*

2. Babić, Darko; Lajić, Branka; Jurečić, Denis; Pasanec Preprotić, Suzana., **The construction of corrugated boxes as a key parameter of their strength** // *Proceeding of the 11th International Design Conference and Workshop (Design 2010): Design graphics with security elements; Vol. 4 / Žiljak, Vilko; Milčić, Diana (ur.). Zagreb: University of Zagreb, Faculty of Graphic Arts, 2010. 1957-1962 (predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).*

3. Jurečić, Denis; Jokić, Tigran; Miljković, Petar; Kajganović, Jelena; Pasanec Preprotić, Suzana., **Primjena Guggenheim–Anderso–De Boer (GAB) modela u analizi reoloških svojstava valovitog kartona** // *14. međunarodno savjetovanje tiskarstva, dizajna i grafičkih komunikacija Blaž Baromić: zbornik radova / Mikota, Miroslav (ur.). Zagreb: Garfički fakultet, 2010. 220-227 (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).*

4. Miljković, Petar; Jurečić, Denis; Babić, Darko., **Uses of Resource Links for to Metadata Flow in Automatic Workflow** // *11 th International design conference DESIGN 2010. / Žiljak, Vilko; Milčić, Diana (ur.). - Zagreb: Faculty of Graphic Arts, University of Zagreb, 2010. 1917.-1922. (ISBN: 978-953-7738-03-7). Dubrovnik-Hrvatska, 2010. (predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).*



5. Pasanec Preprotić, Suzana; Jurečić, Denis; Babić, Darko; Lajić, Branka., **Important factors of paperback books quality of adhesion strength in adhesive binding** // *Annals of DAAAM for 2010 & Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Interdisciplinary Solutions"* / Katalinić, Branko (ur.). Vienna: DAAAM International, Vienna, 2010. 0953-0954 (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

6. Jurečić, D.; Babić, D. & Lajić, B., **važni faktori kvalitete valovitog kartona** // *Annals of DAAAM 2008 & Proceedings* / B Katalinić (ur.). Beč: DAAAM International, Vienna, 2008. 0689-0690 (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

7. Babić, Darko; Jurečić, Denis; Lajić, Branka., **Utjecaj veličine valova na čvrstoću vertikalne i horizontalne površine valovitog kartona** // *Annals of DAAAM for 2006 & Proceedings* / Katalinić, Branko (ur.), Vienna: DAAAM International Vienna, 2006. 019-020 (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

8. Babić, Darko; Lajić, Branka; Jurečić, Denis., **Čvrstoća konstrukcije transportne kutije za voće i povrće** // *MATRIB 2006: 11. Savjetovanje o materijalima, tehnologijama, trenju i trošenju: zbornik sažetaka = abstracts book* / Grilec, Krešimir (ur.). Zagreb: Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, 2006. 388-397 (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

9. Lajić, Branka; Babić, Darko; Jurečić, Denis., **Ispitivanje čvrstoće transportne kutije od valovitog kartona u ovisnosti o materijalu i konstrukciji** // *Proceedings of International conference on Computer Aided Design and Manufacturing CADAM 2006* / Obsiger, Boris (ur.). Rijeka: Zigo Rijeka, 2006. 55-57 (predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

10. Babić, Darko; Lajić, Branka; Jurečić, Denis., **Relation between the Resistance to Perforation and Flat Pressure Force in Dependence on the Relative Humidity of the Corrugated Board** // *10. Savjetovanje o materijalima, tehnologijama, trenju i trošenju: zbornik radova* / Grilec, Krešimir (ur.). Zagreb : Croatian Society for Materials and Tribology, 2005. 1-5 (predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

11. Jurečić, Denis; Babić, Darko; Kropar-Vančina, Vesna., **Evaluation of information visual elements on the graphic design of packaging** // *Annals of DAAAM for 2005 & Proceedings* / Katalinić, Branko (ur.). Vienna: DAAAM International Vienna, 2005. 175-176 (predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

12. Jurečić, Denis; Babić, Darko; Lajić, Branka., **Evaluation of the Colour Influence as te Information Carrier on the Surface of the Board Packaging** // *CADAM 2005 = Selected Papers* / Obsiger, Boris (ur.). Rijeka: Zigo, 2005. 63-70 (predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

13. Jurečić, Denis; Babić, Darko; Sabati, Zvonimir., **Presentation of the Image Information on Graphic Design of Packaging** // *Zbornik radova 9. međunarodnog savjetovanja tiskarstva, dizajna i grafičkih komunikacija Blaž Baromić = Proceedings* / Bolanča, Zdenka ; Mikota, Miroslav (ur.). Zagreb; Senj; Ljubljana: Grafički fakultet Sveučilišta u Zagrebu; Ogranak Matice hrvatske Senj; Inštitut za celulozu in papir, 2005. 251-258 (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

14. Babić, Darko; Kropar-Vančina, Vesna; Jurečić, Denis., **Bearing Capacity of Board Box and Grain Direction** // *Annals of DAAAM for 2004 & Proceedings of the 15th International DAAAM Symposium* / Katalinić, Branko (ur.). Beč : DAAAM International, 2004. 17-18 (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

15. Babić, Darko; Šimunković, Branko; Jurečić, Denis., **Uvjeti kod otiskivanja folijom u knjigoveštvu** // *Zbornik radova 7. znanstveno stručnog simpozija hrvatskih grafičara "Blaž Baromić"* / Bolanča, Zdenka (ur.). Zagreb; Senj: Grafički fakultet Sveučilišta u Zagrebu; Matica hrvatska, 2003. 127-133 (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

#### ***Drugi radovi u zbornicima skupova s recenzijom***

1. Kropar-Vančina, Vesna; Jamnicki, Sonja; Jurečić, Denis., **Otpornost dnevnih tiskovina na otiranje** // *10. međunarodno savjetovanje tiskarstva dizajna i grafičkih komunikacija, Blaž Baromić 2006., ZBORNIK RADOVA* / Bolanča, Zdenka; Mikota, Miroslav (ur.). ZAGREB: Faculty of Graphic Arts, University of Zagreb, 2006. 233-237 (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, stručni).

2. Jurečić, Denis; Kropar-Vančina, Vesna; Jamnicki, Sonja., **Projektiranje i konstruiranje vreća za pakiranje sipkih roba** // *9th international confernce on printing, design and graphic communications* / Bolanča, Zdenka; Mikota Miroslav (ur.). Zagreb: Faculty of Graphic Arts, University of Zagreb, 2005. 264-268 (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, stručni).

3. Babić, Darko; Jurečić, Denis; Popović, Siniša., **Heavy Duty pakovanje kao mogućnost supstitucije drvene, metalne i plastične ambalaže** // *Zbornik radova 8.*

*savjetovanja dizajna i grafičkih komunikacija Blaž Baromić / Bolanča, Zdenka; Mikota, Miroslav (ur.). Zagreb; Senj: Grafički fakultet Sveučilišta u Zagrebu; Ogranak Matice hrvatske Senj, 2004. 229-234 (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, stručni).*

4. Mikota, Miroslav; Momčilović, Ana; Jurečić, Denis., **Uloga fotografske ilustracije u promociji ekologije na www-u** // *6. simpozij grafičara / Zjakić, Igor (ur.). Zagreb: M-print, 2002. 23-27 (predavanje, domaća recenzija, objavljeni rad, stručni).*

5. Mikota, Miroslav; Momčilović, Ana; Jurečić, Denis., **Uloga fotografske ilustracije u promociji ekologije na www-u** // *Zbornik radova 6. znanstveno-stručnog simpozija hrvatskih grafičara / Zjakić, Igor (ur.). Senj: Grafički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Matica hrvatska - Senj, 2002. 30-34 (predavanje, domaća recenzija, objavljeni rad, stručni).*

#### ***Sažeci u zbornicima skupova***

1. Lajić, Branka; Jurečić, Denis; Pasanec Preprotić, Suzana., **Zaštita ambalaže lijekova od krivotvorenja** //(predavanje, sažetak, stručni).

2. Pasanec Preprotić, Suzana; Babić, Darko; Lajić, Branka; Jurečić, Denis., **Distribucija čvrstoće knjižnog bloka u ovisnosti o položaju lista papira** // *Zbornik radova sa Znanstvenog stručnog skupa Tiskarstvo 2010: digitalni sustavi u tiskarstvu / Žiljak, Vilko (ur.). Zagreb: FS; FotoSoft (predavanje, međunarodna recenzija, sažetak, stručni).*

3. Jurečić, Denis; Babić, Darko; Lajić, Branka; Pasanec Preprotić, Suzana., **Trendovi zaštite ambalažom u suvremenom pakiranju i distribuciji proizvoda** // *Zbornik radova sa Znanstvenog stručnog skupa Tiskarstvo 2010: digitalni sustavi u tiskarstvu / Žiljak, Vilko (ur.). Zagreb: FS; FotoSoft, 2010. (predavanje, međunarodna recenzija, sažetak, stručni).*

4. Tomaš, Ante; Babić, Darko; Jurečić, Denis., **The Forming of the Standardisation in the Printing Process** // *Annals of DAAAM for 2003 & Proceedings of the 14.th International DAAAM Symposium Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Reconstruction and Development / Katalinić, Branko (ur.). Vienna: DAAAM International Vienna, 2003. 467-468 (poster, sažetak, znanstveni).*

***Neobjavljena sudjelovanja na skupovima***

1. Babić, Darko; Jurečić, Denis., **Planiranje upravljanje i kontrola doradne proizvodnje računalom** //(predavanje, domaća recenzija, neobjavljeni rad, stručni).

***Znanstveni radovi u drugim časopisima***

1. Babić, Darko; Miljković Petar; Jurečić, Denis., **Process and Structure of JDF Protocol in Production of Hard cover Books.** // *Annual ... of the Croatian Academy of Engineering.* **1** (2009.); 151-158 (članak, znanstveni).

***Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom***

1. Jurečić, Denis; Jokić, Tigran; Miljković, Petar; Kajganović, Jelena; Pasanec Preprotić, Suzana., **Primjena Guggenheim–Anderso–De Boer (GAB) modela u analizi reoloških svojstava valobitog kartona** // *14. međunarodno savjetovanje tiskarstva, dizajna i grafičkih komunikacija Blaž Baromić: zbornik radova / Miroslav Mikota, Miroslav (ur.).* Zagreb: Garfički fakultet, 2010. 220-227 (poster, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

2. Miljković, Petar; Jurečić, Denis; Babić, Darko., **Uses of Resource Links for to Metadata Flow in Automatic Workflow** // *11 th International design conference DESIGN 2010. / Žiljak, Vilko ; Milčić, Diana (ur.). - Zagreb: Faculty of Graphic Arts, University of Zagreb, 2010. 1917.-1922. (ISBN: 978-953-7738-03-7).*Dubrovnik-Hrvatska, 2010. (predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).

# Životopis

---

- Ime i prezime: Denis Jurečić  
Rođen: 27. srpnja 1966 god. u Zaprešiću  
Narodnost: Hrvat
- Obrazovanje: **1992. god. diplomirao**, Grafički fakultet, Zagreb  
mentor: dr. sc. Darko Babić, docent  
tema: Istraživanje unutrašnjeg transporta u proizvodnji valovitog kartona
- 2004. god. magistrirao**, Fakultet organizacije i informatike, Varaždin, Poslijediplomski studij - informacijske znanosti  
smjer: multimedijски sustavi  
mentor: dr. sc. Zvonimir Sabati, docent  
komentor: dr. sc. Darko Babić, izv. prof.  
tema: Evaluacija elemenata vizualne informacije na grafičkoj opremi ambalaže
- Radno mjesto: od 1993 - 2012 god. - Grafički fakultet u Zagrebu  
asistent na katedri za ambalažu, knjigoveštvo i projektiranje  
2012 – Minerva Graphica d.o.o.
- Područje rada: grafička tehnologija, grafička dorada, ambalaža i projektiranje