

Dinamičke karakteristike ireverzibilnih termokromnih boja u ovisnosti o vrsti podloge

Ćurković, Petra

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

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:216:179159>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-08**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Graphic Arts Repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAFIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

Petra Čurković



Sveučilište u Zagrebu
Grafički fakultet

Smjer: tehničko-tehnološki

ZAVRŠNI RAD

**Dinamičke karakteristike ireverzibilnih termokromnih boja u
ovisnosti o vrsti podloge**

Mentor:

doc. dr. sc. Rahela Kulčar

Student:

Petra Ćurković

Zagreb, 2019.

Rješenje o odobrenju teme završnog rada

ZAHVALA

Zahvaljujem se svojoj mentorici doc. dr. sc. Raheli Kulčar koja mi je svojim znanstvenim i stručnim savjetima nesebično pomagala tijekom izrade ovog završnog rada.

Posebno hvala mojim prijateljima i kolegama na velikoj podršci i koji su moj studentski život učinili lakšim i zanimljivijim.

Nikada dovoljno reći hvala mojoj predivnoj obitelji, roditeljima, braći, šogoricama i nećacima koji su mi bili velika podrška i oslonac tokom čitavog mog školovanja, pa tako i u pisanju ovoga rada. Hvala im što me hrabрили, podupirali i poticali prema ostvarenju viših ciljeva. Bez njih ovo ne bi bilo moguće!

I na kraju, najveća hvala dragome Bogu na svemu navedenom ranije. Hvala Mu što je ispravio krive puteve, hvala što je uslišao molitve i želje i što je uvijek tu!

SAŽETAK

Termokromni sistemi mogu biti reverzibilni (promjena u boji je višekratna) ili ireverzibilni (promjena boje je jednokratna i trajna). Ireverzibilne boje mogu u početku biti nebojene ili obojene i kada ih izložimo visokim temperaturama intenzivno se oboje ili prijeđu u neku drugu boju. Kada se jednom oboje u to drugo stanje, pri hlađenju se više ne mogu vratiti u prvobitno stanje. U ovom završnom radu ispitat će se karakteristike nekih ireverzibilnih termokromnih boja te utjecaj različitih vrsta podloge na promjenu boje. Dinamika promjene boje pratit će se kroz jedan ciklus zagrijavanja svakih nekoliko stupnjeva. Ispitat će se i miješanje tih boja različitih aktivacijskih temperatura. Njihove kolorimetrijske karakteristike opisat će se pomoću krivulja spektralnih refleksija i CIELAB sustava boje.

KLJUČNE RIJEČI:

termokromne boje, ireverzibilne boje, kolorimetrijske razlike, temperatura aktivacije

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. TEORIJSKI DIO	2
2.1. Kromogeni materijali	2
2.2. Termokromne boje.....	3
2.3. Termokromne boje na bazi tekućih kristala.....	5
2.4. Termokromne boje na bazi leukobojsila	7
2.5. Ireverzibilne boje	8
2.6. Primjena termokromnih boja	11
2.7. Mjerenje boja	15
3. EKSPERIMENTALNI DIO	16
3.1. Izbor boje	16
3.2. Sušenje boje	17
3.3. Tehnika tiska.....	17
3.5. Odabir vrste podloge.....	17
3.4. Spektrofotometrijsko mjerenje	17
3.5. Sustav zagrijavanja	19
3.6. Postupak mjerenja.....	20
4. REZULTATI I RASPRAVA	22
4.1. Rezultati mjerenja Mg60 ireverzibilnog uzorka	22
5. ZAKLJUČAK	49
6. LITERATURA.....	50

1. UVOD

Cilj ovog završnog rada jest ispitati kolorimetrijske razlike dviju termokromnih ireverzibilnih boja pri čemu je navedena razlika u temperaturi aktivacije. Ispitivanje se provodilo na ukupno jedanaest uzoraka. Na četiri različite tiskovne podloge otisnuta je ireverzibilna boja kojoj je temperatura aktivacije prema uputstvu proizvođača $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, ta boja mijenja obojenje iz svijetlo roze boje u purpurnu. Zatim na još četiri podloge otisnuta je ireverzibilna boja s aktivacijskom temperaturom na $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, koja je prije zagrijavanja transparentna, a zatim mijenja boju u ružičastu. Zadnja tri uzorka otisnuta su na tri podloge s mješavinom dviju prethodno navedenih boja. Korištene tiskovne podloge su dva premazana papira: PP i Niklaselect (Ni), te dva nepremazana papira: voluminozni (V) i FASSON Extrawhite papir. Za ispitivanje kolorimetrijskih razlika za mix ireverzibilnih boja koristile su se tri tiskovne podloge, prethodno navedene, osim voluminoznog papira. Usporedbom izmjerenih kolorimetrijskih vrijednosti te iščitavanjem iz dobivenih grafova zaključuje se kako do promjena u boji dolazi postepeno. Te promjene, kao što je vidljivo iz krivulja spektralne refleksije, nisu nagle već su kontinuirane i događaju se polagano. Također se vidi da je duljim zagrijavanjem, odnosno na temperaturama višim od temperature aktivacije, boja sve intenzivnija.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. Kromogeni materijali

Termokromne boje pripadaju kromogenim materijalima. Za njih je karakteristično da mijenjaju svoje obojenje, a da bi uopće došlo do takve promjene, potreban je neki vanjski podražaj. Danas je vizualni podražaj jako bitan i neprestano je oko nas. Okruženi smo raznim zanimljivim plakatima i vizualima koji privlače našu pozornost i zato je za uspjeh na tržištu bitna inovativnost i kreativnost kako bi privukli kupca ili korisnika da se odluči upravo za taj proizvod i uslugu koja se reklamira. Ta inovativnost nezamisliva je bez vizualnog identiteta koji se mora razlikovati od ostalih. Zato je i upotreba kromogenih materijala sve izraženija i učestalija. Neki najnoviji trendovi i istraživanja u grafičkoj tehnologiji pokazali su da će se primjena takvih boja jako brzo širiti, a samim time i razvijati. Vanjski podražaji na koje boje mogu reagirati, različiti su, a to ovisi o vrsti boje o kojoj se radi. Tako postoje:

- Termokromne boje kod kojih je utjecaj temperature podražaj zbog kojeg dolazi do reakcije promjene boje iz jedne u drugu ili iz bezbojnog stanja u obojeno.
- Fotokromne boje kod kojih do određene promjene u boji dolazi zbog utjecaja svjetla na podlogu na kojoj je otisnuta tkva boja.
- Piezokromne boje za utjecaj imaju različiti pritisak.
- Elektrokromne boje reagiraju na promjenu električnog polja.
- Halokromne boje kod kojih je podražaj promjena pH vrijednosti.
- Biokromne boje koje kao podražaj imaju biokemijsku reakciju (pr. kameleon koji mijenja boju kože) [1] .

Trenutno najviše dominiraju i najveću su primjenu našle upravo termokromne i fotokromne boje. Fotokromni materijali našli su svoju primjenu u lećama naočala koje se aktiviraju i postaju tamnije što je količina svjetla veća, ali se njima također postižu i sjajna dizajnerska rješenja. Tako postoje plakati koji pri danjem svjetlu apsorbiraju svjetlost sunca te otkrivaju otisak. Fotokromne boje apliciraju se na raznim tiskovnim podlogama

i imaju široku namjenu, od proizvodne ambalaže do raznih zanimljivih i oku primamljivih vizuala.



Slika 1 - Primjena fotokromne boje na ambalaži čipsa

Izvor:

<https://www.ctiinks.com/photochromic-inks>

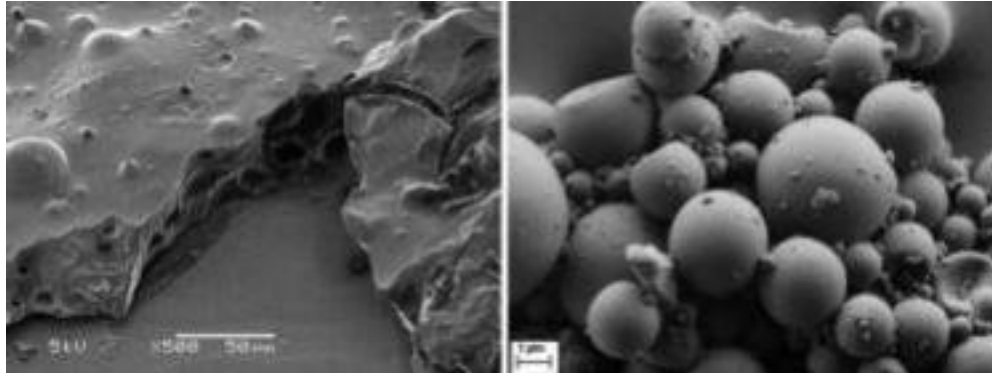
Slika (Slika 1) predstavlja primjenu fotokromne boje na ambalaži čipsa. Na policama trgovina ambalaža je bijela, bez otiska. A na vanjskom svjetlu, upijajući sunčevu svjetlost pojavljuje se otisak kao odgovor na fotokemijsku reakciju [2].

2.2. Termokromne boje

Boje koje mijenjaju svoje obojenje pod utjecajem vanjskog podražaja, temperature nazivaju se termokromne boje. Mogu se nalaziti u dva optička stanja, obojeno i bezbojno stanje. A s obzirom na trajnost termokromne reakcije dijelimo ih čak u tri skupine, to su reverzibilne boje kod kojih je promjena višekratna i povratna, ireverzibilne boje kod kojih je promjena jednokratna i trajna te ne tako poznate i raširene u primjeni, subreverzibilne čija je promjena ograničena na određeni vremenski interval u kojem postoje temperature kod kojih promjena ostaje vidljiva i ne mijenja se, sve dok se ne postignu temperature koje su iznad ili ispod intervala, tada se boja vraća u prvobitno stanje. Da bi uopće došlo do termokromne promjene, za to je potrebno postići određenu temperaturu koju nazivamo temperaturom aktivacije. Temperature aktivacije mogu biti različite za različite boje i ona je određena od proizvođača boje. Također je karakteristično pojava histereze boje, odnosno pojava da učinci djelovanja temperature kasne, a to odstupanje varira oko tri

stupnja ispod ili iznad propisane temperature aktivacije. Prema vrsti nositelja obojenja za termokromne boje karakteristične su dvije vrste, boje na bazi tekućih kristala i boje kojima su nositelji obojenja leukobojila. Boje na bazi tekućih kristala mijenjaju svoje obojenje kroz cijeli dio vidljivog spektra, poznatog kao igra boja ili raspon igre boja te se primjenjuju za reverzibilne boje i ireverzibilne boje. Boje građene na bazi leukobojila češće su u upotrebi. Oni uzrokuju promjenu obojenja iz obezbojenog u obojeno ili iz jedne boje u drugu. Ova dva različita kemizma boja razlikuju se po mogućnostima promjene obojenja unutar vidljivog spektra, jednostavnosti primjene te točnosti indikacije temperature zbog koje leukobojila imaju nižu razinu točnosti u indikaciji temperature. Veličina pigmenata u termokromnim bojama je 3-5 μ m, što znači da su čak deset puta veći od pigmenata konvencionalnih tiskarskih boja [1]. Termokromne boje otiskuju se svim glavnim tehnikama tiska, ofsetom, sitotiskom, fleksotiskom i dubokim tiskom. Pokritnost termokromnih boja puno je manja nego kod običnih, konvencionalnih boja pa je zato potreban što deblji nanos boje kako bi otisak termokromnom bojom bio što bolji. Najbolji rezultati postižu se tehnikom propusnog tiska odnosno sitotiska, a najslabiji rezultati dobiju se fleksotiskom. Sitotiskom se boja protiskuje kroz mrežicu na materijal koji se otiskuje. Glavna prednost je raspon mogućnosti odabira materijala na koji se tiska te veliki formati koji su karakteristični za sitotisk. Termokromne boje imaju slabu postojanost na UV zračenje pa se većinom koriste za primjene koje neće biti izložene direktnom Sunčevu svjetlu. Upravo zbog velike osjetljivosti pigmenata termokromnih boja, bilo je potrebno zaštititi ih od vanjskih utjecaja kao npr. raznih mehaničkih oštećenja koji bi mogli uzrokovati nepoželjne reakcije i efekte, koji se mogu dogoditi uslijed rukovanja bojom, ali i naknadnih efekata koji nastaju nakon sušenja. Zbog toga je proveden proces mikrokapsulizacije kao najraširenije i najuspješnije metode kako bi se pigmenti zaštitili i na taj način sačuvali svoje djelovanje [3]. Proces mikrokapsulizacije daje okrugle mikrokapsule. Mikrokapsule moraju biti otporne na standardno miješanje i sami proces primjene. Negativni utjecaji koji mogu nepovoljno djelovati na pigmente termokromnih boja su UV zračenje, visoke temperature, agresivna otapala, ali i utjecaj same podloge na koju se boja otiskuje. Problem može nastati zbog pH vrijednosti papira jer upravo zbog niskog pH može nastupiti propadanje kapsule u samo nekoliko tjedana. Pigmenti termokromnih boja zbog kapsulizacije veći su od konvencionalnih i to je jedan od razloga boljeg otiska tehnikom sitotiska koji dopušta veće pigmente zbog različitih

linijatura mrežice. Kapsule termokromnih boja za ofset su manje. Na tržištu su dostupne termokromne boje na bazi otapala, na bazi vode i UV sušeće boje. Upravo zbog kompliciranije strukture i kapsulizacije termokromnih boja, ali i određenog roka trajanja koji je kratak (6 mjeseci) puno su skuplje od konvencionalnih boja i zato je njihova upotreba još uvijek puno manja [4].



Slika 2 - Mikroskopska slika tekućih kristala (lijevo) i leukobojila (desno)

Izvor:

https://lh3.googleusercontent.com/HZJ4SLq_w7a1kZsiPiWmgG4P2WeGLDruwOpcbh_cimnT-HISjAwfdAJof4uEvAWJGheoY3g=s170

2.3. Termokromne boje na bazi tekućih kristala

Termokromne boje na bazi tekućih kristala mogu biti otisnute na svim vrstama tiskovnih podloga. Kako bi ostvarile što bolji vizualni efekt potrebno ih je gledati nasuprot crnoj podlozi. Temperatura aktivacije kod boja na bazi tekućih kristala uzrokuje kontinuiranu promjenu obojenja duž cijelog vidljivog spektra, za razliku od leukobojila. Tekući kristali imaju simetričnu geometriju, a budući da su u tekućem stanju njihove se molekule međusobno izvijaju i kreću. Lagano zagrijavanje potiče narušavanje geometrije, promjene u valnim duljinama reflektiranog svjetla i samim time kristali mijenjaju boju. Svojstvo promjene obojenja dobiveno je finim i vrlo osjetljivim rasporedom molekula, te se takva struktura i geometrija molekula može lako narušiti. Pojam koji se veže za tekuće kristale jest širina pojasa, a to je temperaturni raspon u kojem kristali reflektiraju valne duljine vidljivog dijela spektra. Dok termokromni tekući kristali s porastom temperature prolaze kroz svoju širinu pojasa, reflektiraju vidljivo svjetlo od dužih valnih duljina (crvena boja) do kraćih valnih duljina (plava boja). Taj proces traje sve dok se ne postigne

temperaturna točka prekida. Temperaturna točka prekida je temperatura na kojoj termokromni tekući kristali prestaju reflektirati boje u vidljivom dijelu spektra [4].



Slika 3 - Primjena tekućih kristala. Kontinuirana promjena obojenja duž cijelog vidljivog spektra

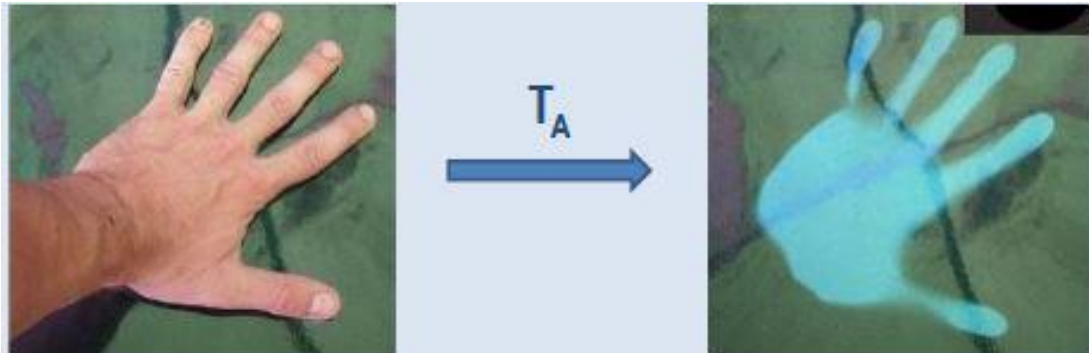
Izvor: Predavanja iz kolegija „Primjena i ispitivanje grafičkih materijala“

Upotreba tekućih kristala rjeđa je od leukobojila jer zahtijevaju posebno specijalizirano rukovanje i otiskivanje. Tekući kristali primjenjuju se kod proizvoda kod kojih promjena u temperaturi mora biti točno definirana, posebno u medicinske svrhe kod kojih je namjena termokromnih boja indikator pravilne temperature skladištenja, tj. strogo je zabranjena upotreba određenog proizvoda ako je bio izložen temperaturi iznad ili ispod dozvoljene. Trenutno na tržištu postoje dva tipa termokromnih tekućih kristala s obzirom na širinu pojasa: uskopojasni i širokopojasni. Uskopojasni najčešće imaju temperaturni raspon između 0,5 °C do 4 °C, a širokopojasni od 5 °C do 30 °C. Termokromizam je također prikazan određenom vrstom tekućih kristala. Tzv. kiralni (imaju nesimetrični prostorni raspored atoma ili molekula) nematički tekući kristali poprimaju spiralnu strukturu i, kada je duljina koraka spirale istoga reda veličine kao valna duljina svjetla, boja može nastati iz slučajnog bijelog svjetla efektom interferencije. Prednost termo – indikatora na bazi tekućih kristala je detekcija promjene temperature koja je maja od 1 K. Mane su relativno skupi troškovi i ograničena stabilnost obrade, jer postupci ekstruzije nisu mogući uporabom termo – indikatora na bazi tekućih kristala [4].

2.4. Termokromne boje na bazi leukobojila

Termokromne boje na bazi leukobojila češće su u upotrebi upravo zbog lakšeg rukovanja nego s bojama na bazi tekućih kristala. Termokromne boje mijenjaju obojenje kao odgovor na promjenu temperature. Poznate termokromne boje često uključuju leukobojila kao komponentu koja mijenja boju (eng. color changing component). Reakcije obojenja i obezbojenja smatraju se reverzibilnima i vjeruje se da je proces ponovljiv i do nekoliko tisuća puta. Reverzibilni termokromni organski materijali obično se sastoje od najmanje tri komponente i to od bojila (koloranta), kolor razvijaa i otapala. Kako bi se postigao željeni efekt komponente su pomiješane u točno određenim omjerima i obično su kapsulizirane kako bi efekt bio dulje vrijeme vidljiv i kvalitetan, s obzirom na broj ponavljanja reverzibilne reakcije. Budući da leukobojila apsorbiraju svjetlo, boje s takvom bazom moraju biti otisnute na što svjetlijoj podlozi, najbolje bijeloj. Dostupne su boje s različitim temperaturama aktivacije, od -15°C do 65°C , no većina se kreće na tri standardna temperaturna područja: hladnom (oko 10°C), temperaturi ljudskog tijela (oko 31°C) i vrućem (oko 43°C). Za leukobojila je karakteristično odstupanje u nekoliko stupnjeva ispod ili iznad temperature aktivacije. Zato boje na bazi leukobojila nisu pouzdane kao indikatori temperature za razliku od boja na bazi tekućih kristala. Pojava da učinci nekog djelovanja kasne u odnosu na to djelovanje naziva se histereza i upravo za ovaj učinak odstupanja kod leukobojila kažemo da je histereza boje. Koloranti koji se najčešće koriste pripadaju grupi spirolaktona kao što su ftalidi ili fluorani. Lakton je jedan od najpoznatijih spojeva termokromnih koloranata. U kontaktu s kiselinom razvijaa dolazi do otvaranja laktonskog prstena koji je bezbojan te se dobiva obojena forma. Kao razvijaa koriste se Bisphenol A, a kao organska otapala koriste se masne kiseline, amidi i alkoholi. Reverzibilna promjena boje pojavljuje se kroz dvije kompetitivne reakcije, između bojila i razvijaa te između otapala i razvijaa. Prva od te dvije interakcije prevladava na nižim temperaturama, na kojima se otapalo nalazi u krutom stanju, tvoreći obojenje sa bojilo – razvijaa kompleksom. Organsko otapalo je pri nižim temperaturama u krutom stanju, a povećanjem temperature prelazi u tekuće stanje. Otapalo u tekućem obliku uzrokuje raspad kompleksa bojilo – razvijaa, uzrokujući dominaciju interakcije otapalo – razvijaa što sustav pretvara u bezbojno stanje. Kada se termokromni kompleks ponovno ohladi, otapalo se stvrdne, a razvijaa i bojilo se ponovno spoje te se boja vrati u prvobitno stanje. Neka leuko tiskarska bojila se mijenjaju iz jedne u drugu boju. To se postiže bojama koje su kombinacija

leukobojila i procesnih tiskarskih boja. Trajnost leukobojila smanjuje se u slučaju da je boja u kontaktu sa nekim otapalima ili izložena vrlo visokim temperaturama [4].



Slika 4 - Termokromna boja na bazi leukobojila

Izvor: Predavanja iz kolegija „Primjena i ispitivanje grafičkih materijala“

2.5. Ireverzibilne boje

Termokromne ireverzibilne boje čije se kolorimetrijske karakteristike ispituju u ovome završnom radu su boje čija je promjena boje jednokratna i nepovratna. Dakle, ireverzibilne boje jednom kada promijene svoje obojenje nemaju mogućnost povrata u početnu boju. Ireverzibilne boje mogu u početku biti nebojene ili obojene, a kada se izlože visokim temperaturama intenzivno se oboje ili prijeđu u neku drugu boju. Duljim zagrijavanjem, što se postižu više temperature boja postaje inenzivnija. Ireverzibilne boje građene na bazi leukobojila potrebno je također inkapsulirati zbog mogućih oštećenja koja nisu dozvoljena s obzirom na njihovu primjenu koja može biti štetna za čovjeka i čovjekovo zdravlje (npr. medicinske svrhe). Polimerne ovojnice pigmentne kapsule stabilne su na oksidaciju. Ako je ta ovojnica oštećena, dinamičnost boje je ireverzibilno nestala (nema povratka). Postoji mogućnost da se kolor razvijač, kao komponenta termokromne boje otopi, ali bez ikakve promjene boje. Međutim razvijač kao kompozitni materijal razvija termokromnu boju, reverzibilno ili ireverzibilno. U papiru koji je osjetljiv na temperaturu, kolorant i kiseli kolor razvijač, obično fenol, dispergira se kao netopljiva čestica u sloju materijala u obliku filma. Kada se postigne temperatura 80 – 120°C, smjesa se topi kao rezultat lokaliziranog zagrijavanja. Posljedica je da kolorant i kolor razvijač zajedno difundiraju i reaguju tako da formiraju boju. Ovak

proces podržan je prisutnošću treće komponente, senzibilizatora, kao što je dibenzil tereftalat, koji pospješuje difuziju djelujući kao otapalo. U tom slučaju, proces je nepovratan i formira se stalna slika [5]. Nasuprot termokromnom efektu organskih kompozita, termokromizam anorganskih pigmenata, kao što su metalne soli i metalni oksidi, poznati su već odavna. U većini anorganskih pigmenata smatra se da se termokromni efekt pojavljuje na temperaturi iznad 100°C i da je ireverzibilan. Prednost anorganskih pigmenata je njihova termostabilnost iznad 200°C i njihova postojanost na UV zračenje u tolikoj mjeri da su moguće i primjene u kojima će biti izložene vanjskim vremenskim uvjetima. Međutim, većina anorganskih pigmenata za takve aplikacije je toksična. Sve glavne vrste boja, kako one na bazi vode tako i one UV sušeće dostupne su za aplikaciju na papiru, plastici i tekstu [4].



Slika 5 - Primjeri primjene ireverzibilnih naljepnica na proizvodima

Izvor:

<https://www.ctiinks.com/cold-chain-alerts>

Termokromne ireverzibilne boje svoju su primjenu prije svega našle u tzv. pametnoj ambalaži koja je sve više u upotrebi na raznim proizvodima. Najčešća upotreba je u medicinske svrhe kao indikator da je proizvod bio pravilno steriliziran te kao indikator svježine na ambalaži namirnica koje imaju kratki vijek trajanja. Također su pokazatelji da su se poštivali temperaturni uvjet određenog proizvoda kako za vrijeme skladištenja, tako i tijekom transporta. Ireverzibilne indikatore imaju proizvodi koji su osjetljivi na visoke temperature, kao npr. cjepiva u medicini, koja ako su bila izložena višoj temperaturi od dozvoljene više nisu upotrebljiva i mogu nepovoljno djelovati na čovjekovo zdravlje. Tvrtke su razvile netoksične organske termokromne boje koje se mogu ugraditi u razne komercijalne tinte i boje. Svojevremeno nepovratne promjene boje u odnosu na temperaturno izlaganje tijekom vremena omogućen je razvoj indikatora

temperature i vremena (eng. temperature and time, TTI). Prednosti TTI indikatora uključuje fleksibilnu kalibraciju, raznolikost boja, ekonomičnost, skladištenje na sobnoj temperaturi i jednostavnu aktivaciju. Indikator upozorava korisnika promjenom boje kada je proizvod bio izložen temperaturi / vremenu koje premašuje dopušteno i vjerojatno je oštećen. Takve naljepnice mogu se koristiti na prehrambenoj ambalaži, a ljepila koja se koriste ispunjavaju sve zahtjeve za primjenu jer postoji mogućnost slučajnog kontakta između ljepila i hrane. Jedna od primjena je sigurnosni tisak na čekovima, ulaznicama, razne recepte i komercijalne svrhe. Neki od poznatijih primjera za komercijalne svrhe su naljepnice za pivo koje promjenom boje iz bijele u plavu signaliziraju da je pivo postiglo idealnu temperaturu za konzumaciju. Također se indikator može nalaziti i na kutiji od pizze koji nakon dostave signalizira potrošaču je li pizza još uvijek dovoljno topla za konzumaciju ili se za vrijeme transporta već ohladila, te kupac time dobiva mogućnost da dostavljenu pizzu odbije.



Slika 6 - Primjena ireverzibilne naljepnice u farmaciji

Izvor:

<http://sky-rad.com/irreversible-thermochromic/>

Prvi primjer termokromne naljepnice s ireverzibilnom bojom u Hrvatskoj bila je upravo napljenica na pivu poznate pivovare Ožujsko. Zahvaljujući posebnoj tehnologiji termoosjetljive tinte COLD EDGE koja reagira na temperaturu, etiketa tijekom hlađenja piva postupno mijenja boju iz bijele u plavu te signalizira potrošaču da je pivo idealno ohlađeno. Etiketa je bila aplicirana na staklene boce i limenke [6].



Slika 7 - Primjena termokromne naljpnice u Hrvatskoj

Izvor:

<https://www.bljesak.info/lifestyle/flash/savrseno-ohladeno-ljeto-uz-novu-zujinu-termoetiketu/118419>

2.6. Primjena termokromnih boja

Danas je sve veća upotreba termokromnih materijala i na tržištu su se pojavili novi proizvođači termokromnih boja i zbog toga se može pretpostaviti da će se njihova primjena proširiti i na neka nova područja grafičke tehnologije. Neke od najvažnijih primjena su pametna ambalaža, indikatori namijenjeni aplikacijama na dječju opremu, komercijalne svrhe, sigurnosni tisak (pr. čekovi) te različite vrste temperaturnih indikatora, za medicinske svrhe kao indikator pravilne sterilizacije proizvoda, indikator svježine namirnica koje imaju kratki vijek trajanja, ali također se njima postižu i sjajna dizajnerska rješenja. Može se reći da su ireverzibilne boje pronašle konkretnu primjenu koja omogućava ljudima lakše snalaženje s proizvodima koje konzumiraju i kupuju jer su nositelji informacija o određenom proizvodu na kojega su aplicirane. Reverzibilne boje se više koriste u neke komercijalne svrhe, pronašle su primjenu u reklamama pojedinih tvrtki (pr. vizitke). Jedan od primjera zanimljivog prikaza što se može postići reverzibilnom bojom svakako je šalica koja se često nađe kao poklon za rođendan. Šalica mijenja boju, odnosno pojavi se određeni otisak kada se u šalicu ulije topli sadržaj, a kada se sadržaj ohladi, šalica se ponovno vrati u prvobitno stanje. Reverzibilna boja može biti aplicirana na tapetu za zid na kojoj se pojavljuje određeni otisak toplinom koja dolazi od radijatora koji se nalazi u prostoriji. Svakako zanimljiv primjer primjene ireverzibilne boje dolazi i iz Amerike. Poznati „PizzaHut“, aplicirao je boju na svoje kutije za dostavu.

Na njima se nalazi temperaturni indikator koji pokazuje je li pizza još uvijek vruća prilikom kućne isporuke kupcima, te se uz indikator nalazi natpis koji kupcu poručuje ukoliko pizza prilikom preuzimanje nije vruća, sljedeća narudžba će biti besplatna.



Slika 8 - Primjena na kutijama američkog "PizzaHut-a"

Izvor: Predavanja iz kolegija „Primjena i ispitivanje grafičkih materijala“

Svi teže tomu da naprave nešto spektakularno i inovativno što bi moglo privući pozornost kupca. Tako je tvrtka koja se bavi proizvodnjom češljeva za kosu, vrlo jednostavan proizvod poput četke za kosu pretvorila u nešto novo i funkcionalno pomoću mikroprocesora. Temperatura električnog uređaja prikazana je digitalnim indikatorom. Četka je napravljena od određenog keramičkog materijala s termokromnim premazom, boja četke mijenja se od svijetle boje do crne. Kada se postigne optimalna temperatura za oblikovanje kose (oko 50 °C) boja se promijeni u svijetlu boju. A kada se četka ohladi ispod sobne temperature, boja se naglo promijeni u crnu u samo nekoliko sekundi [7].



Slika 9 - Termokromna četka kada je vruća (lijevo) i na sobnoj temperaturi (desno)

Izvor:

Ferrara M., Bengisu M., *Materials that change color smart materials, Intelligent design*, Springer, 2014.

Korisna primjena u obliku sjajnog rješenja koje dolazi za roditelje koji svojim bebama pripremaju hranu u bočicama. Temperaturni indikator koji otkriva da je sadržaj dovoljno ugrijan, ali i dovoljno ohlađen kako se beba ne bi opekla ili pojela hladni sadržaj iz bočice pri konzumaciji. Indikator se otkriva zelenom bojom odnosno smješkom, a crvena boja na bočici znači da još nije postignuta idealna temperatura za konzumaciju. U današnjem svijetu u kojemu postoje krivotvoreni dokumenti, sjajno rješenje našlo se i za sigurnosni tisak. Termokromna boja aplicira se na dokumente i prilikom temperature od 32°C dolazi do laganog nestajanja boje, što bi konkretno značilo promjenu obojenja prilikom ljudskog dodira. Provjera je vrlo jednostavna, trljanjem na zaštićenom mjestu utvrđujemo autentičnost dokumenta. Iz navedenih primjera zaključak je da su u svijetu grafičke tehnologije uistinu termokromnim bojama „otvorena vrata“ i da njihova primjena neće stati već će se i dalje razvijati te će sve više biti zastupljena na tržištu. Unatoč tome što je tisak termokromnom bojom skuplji nego običnom, konvencionalnom bojom, puno je prednosti koje ona nudi i pruža. Mogu se aplicirati na sve tiskovne podloge (pr. papir,

tekstil, metal, staklo, itd...) koristeći konvencionalne tehnike od fleksotiska do propusnog tiska.



Slika 10 - Primjena termokromne boje u sigurnosnom tisku

Izvor: Predavanja iz kolegija „Primjena i ispitivanje grafičkih materijala“

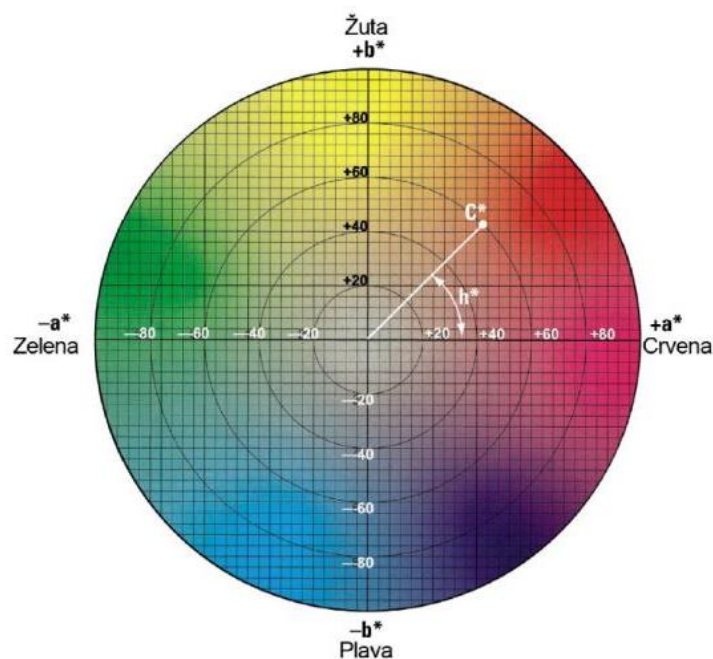


Slika 11 - Primjena na limenkama piva

Izvor: Predavanja iz kolegija „Primjena i ispitivanje grafičkih materijala“

2.7. Mjerenje boja

Kako čovjekovo oko vidi boju ovisi o stimulaciji receptora za crvenu, zelenu i plavu komponentu i zato su potrebne vrijednosti kako bi se opisale sve moguće boje. Ključni sustavi su međunarodno standardizirani, pa se primjenjuju u industrijskoj proizvodnji. Najraširenija je primjena XYZ i CIE $L^*a^*b^*$ sustava boja. CIE $L^*a^*b^*$ prostor boja zasnovan je na suprotnoj teoriji boja od CIE XYZ sustava, on je trodimenzionalni prostor boja temeljen na objektivnom vrednovanju boja i najbliži je vizualnoj percepciji. Funkcija svjetline L^* daje skalu neutralne boje od crne do bijele (od 0 do 100 jedinica svjetline), a kromatičnost boje definira se u odnosu na neutralnu os koja ima vrijednost 0 kromatičnosti. CIE a^* je koordinata za crvenu-zelenu, a CIE b^* za žutu-plavu. CIE $L^*a^*b^*$ svoju primjenu nalazi u formuli boja, procesnoj kontroli i kontroli kvalitete. Svaka boja definira se svjetlinom i kromatičnošću s tri točke na svakoj osi. Suvremeni spektrofotometri sadrže informacije o CIE standardnom promatraču, krivuljama spektralne emisije za mnoge standardne izvore svjetla i mikroracunalo za izračunavanje CIE tristimulusnih vrijednosti [8].



Slika 12 - CIE LAB sustav boja

Izvor: Predavanja iz kolegija: „Kvalitativne metode ispitivanja reprodukcije boja“

3. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu ovoga rada provedeno je ispitivanje kolorimetrijskih razlika triju termokromnih boja s različitim temperaturama aktivacije u ovisnosti o vrsti podloge. Cilj rada je vidjeti kako tiskovna podloga može utjecati na kolorimetrijske razlike i kada se te razlike najviše očituju, odnosno pri kojim temperaturama su najuočljivije. Uzorci su praćeni svakih nekoliko stupnjeva, a najviša postignuta temperatura je 82° C. Odabrane su četiri vrste papira i dvije različite ireverzibilne boje i njihov mix. Ukupno je promatrano jedanaest uzoraka.

3.1. Izbor boje

Za potrebe ovoga rada korištena je termokromna ireverzibilna boja proizvođača TMC Hallcrest. Naziv boje je Kromagen Magenta MB60-NH. Njena temperatura aktivacije prema uputstvu proizvođača je 60 °C. Boja je na vodenoj bazi i namijenjena je za tehniku sitotiska. Boja se mijenja od svijetlo roze do magente. Otisak je osjetljiv na oštećenje uzrokovano abrazijom. Veći nanos boje povećava intenzitet boje. Boja ne smije biti ostavljena na temperaturi manjoj od 25° C, propisani rok trajanja je šest mjeseci. Druga korištena boja je ireverzibilna boja s temperaturom aktivacije 75° C. Ona mijenja obojenje iz bezbojne u ružičastu. I treća korištena boja je mix prethodno dvije navedene ireverzibilne boje.

UZORCI BOJA	PROIZVOĐAČ	TEMPERATURA AKTIVACIJE	BOJA	TEHNI- KA TISKA	KRATICA
Kromagen Magenta	Hallcrest	60	roza - magenta	sitotisak	Mg60
THERMO- SIL RED	Siltech LTD	75/80	bezbojna - ružičasta	sitotisak	RED 75/80

Tablica 1 – Izbor boje

3.2. Sušenje boje

Sušenje se odvijalo nakon tiska na zraku, kao što je propisano prema uputama proizvođača.

3.3. Tehnika tiska

Uzorci su otisnuti na poluautomatskom sitotiskarskom stroju . Korištena veličina mrežice je 120T/4.

3.5. Odabir vrste podloge

Za ovo ispitivanje korištene su četiri različite vrste tiskovne podloge tj. četiri različita papira. Mg60 otisnuta je na četiri podloge, PP, voluminozni (V), Niklaselect (Ni) i FASSON Extrawhite. THERMOSIL RED otisnuta je na PP, voluminoznom (V), Niklaselectu (Ni) i FASSON Extrawhite-u. A MIX je otisnut na PP, Niklaselect (Ni) i FASSON Extrawhite. Za odabrane papire izmjerena je bjelina.

PODLOGA	VRSTA PODLOGE	CIE BJELINA (W)
PP	premazan	92,3
Niklaselect (Ni)	premazan	75,0
Voluminozni (V)	nepremazan	63,9
FASSON Extrawhite	nepremazan	113,3

Tablica 2 – Odabir vrste podloge

3.4. Spektrofotometrijsko mjerenje

Za spektrofotometrijsko mjerenje i dobivanje kolorimetrijskih parametara L^* , a^* , b^* i C^* , te krivulje spektralne refleksije korišten je spektrofotometar Ocean Optics USB 2000+ te program SpectraSuite. Uređaj koristi integracijsku sferu ISP-30-6-R-GT. Sfera

je premazana s tvari koja visoko difuzno reflektira svjetlo (npr. barijev sulfat – BaSO₄). Mjerenje je izvršeno u vidljivom dijelu spektra od 400 – 700 nm. Geometrija mjerenja spektrofotometra je bila di:8 uz vrstu rasvjete D50 i standardni promatrač 2°.



Slika 13 – Integracijska sfera OcenOptics ISP-30-6-R-GT

Za izvor svjetla koristio se Ocean Optics LS-1 tungsten halogen izvor svjetla koji zrači u valnom području od 360 do 2000 nm.



Slika 14 – Izvor svjetla, LS-1 (Tungsten-halogen lampa)

3.5. Sustav zagrijavanja

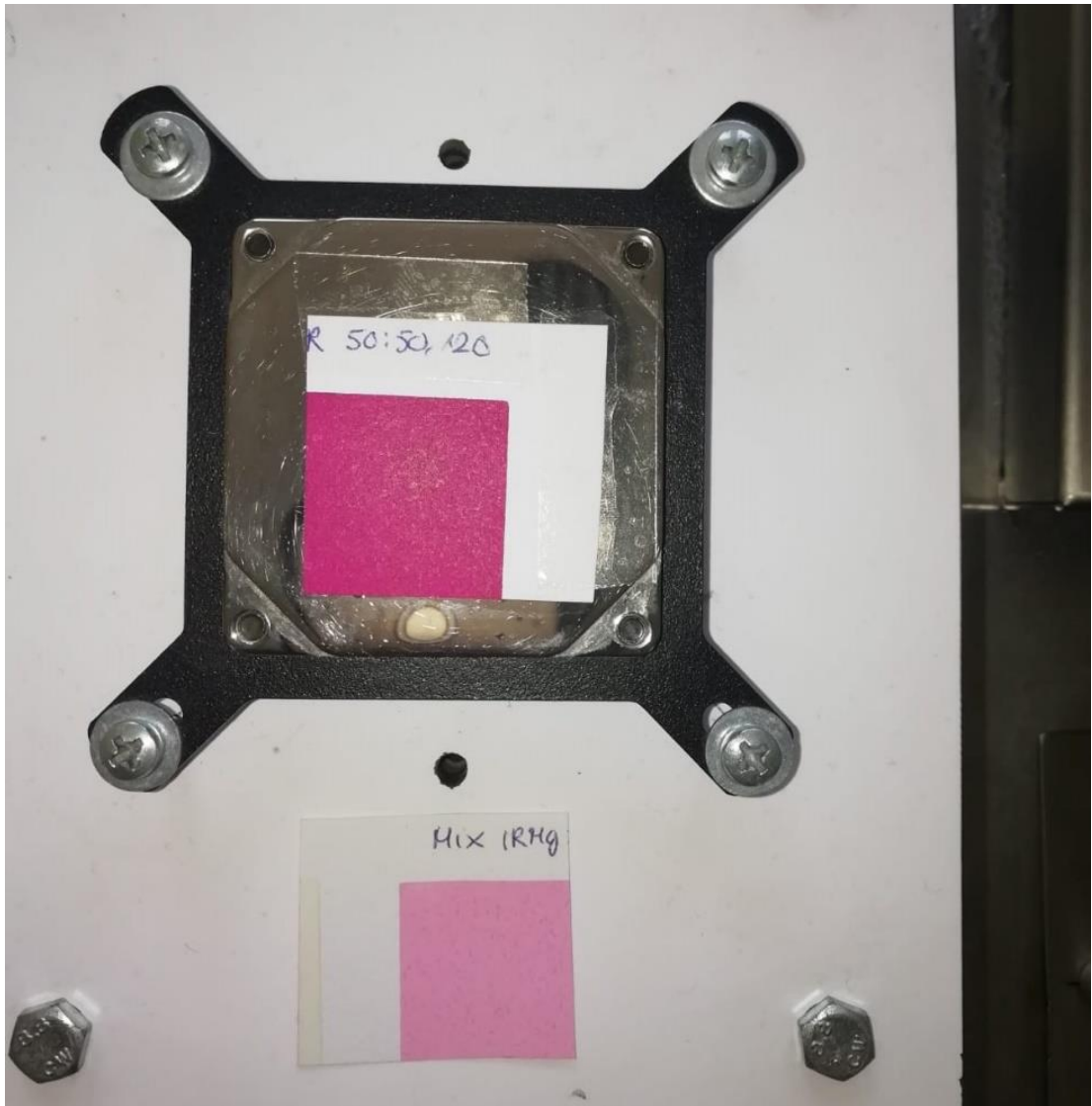
Sustav za zagrijavanje i hlađenje posebno je dizajniran za ovakvu vrstu eksperimentalnog istraživanja i mjerenja termokromnih boja. Budući da se ovaj rad bavi istraživanjem kolorimetrijskih karakteristika ireverzibilnih boja, bilo je potrebno samo zagrijavanje. Glavna karakteristika sustava je da može zagrijavati i hladiti po potrebi, te održavati stalnu temperaturu. Uzorci su zagrijavani, na metalnoj tj. bakrenoj pločici. Temperatura površine bakrene pločice je varirala kao posljedica cirkulacije zagrijavane vode koja se cijevima provodi do pločice i tako zagrijava uzorak do određene temperature. U spremniku s tekućinom nalazi se grijač i sustav za hlađenje koji dovode tekućinu na željenu temperaturu. Temperatura cirkulirajuće vode kontrolirala se i regulirala pomoću termostata i komandne jedinice. Preciznost regulirane temperature definirana je u 1°C .



Slika 14 - Termostatički cirkulator

3.6. Postupak mjerenja

Prije početka mjerenja, bilo je potrebno napraviti kalibraciju spektrofotometra s integracijskom sferom. Nakon toga, na komandnoj jedinici termostatičkog cirkulatora postavila se odabrana temperatura: za ireverzibilnu boju s temperaturom aktivacije 60°C početna temperatura bila je 40°C , za ireverzibilnu boju s temperaturom aktivacije 75° , početna temperatura bila je postavljena na 65°C , dok je početak mjerenja za mješavinu te dvije boje bio postavljen na temperaturu od 60°C . Nakon postizanja određene temperature, na bakrenu pločicu postavi se uzorak, a na uzorak integracijska sfera. Mjerenje se provodi svaka 2°C , a oko temperature aktivacije svakih 1°C .



Slika 15 - Postupak mjerenja uzorka

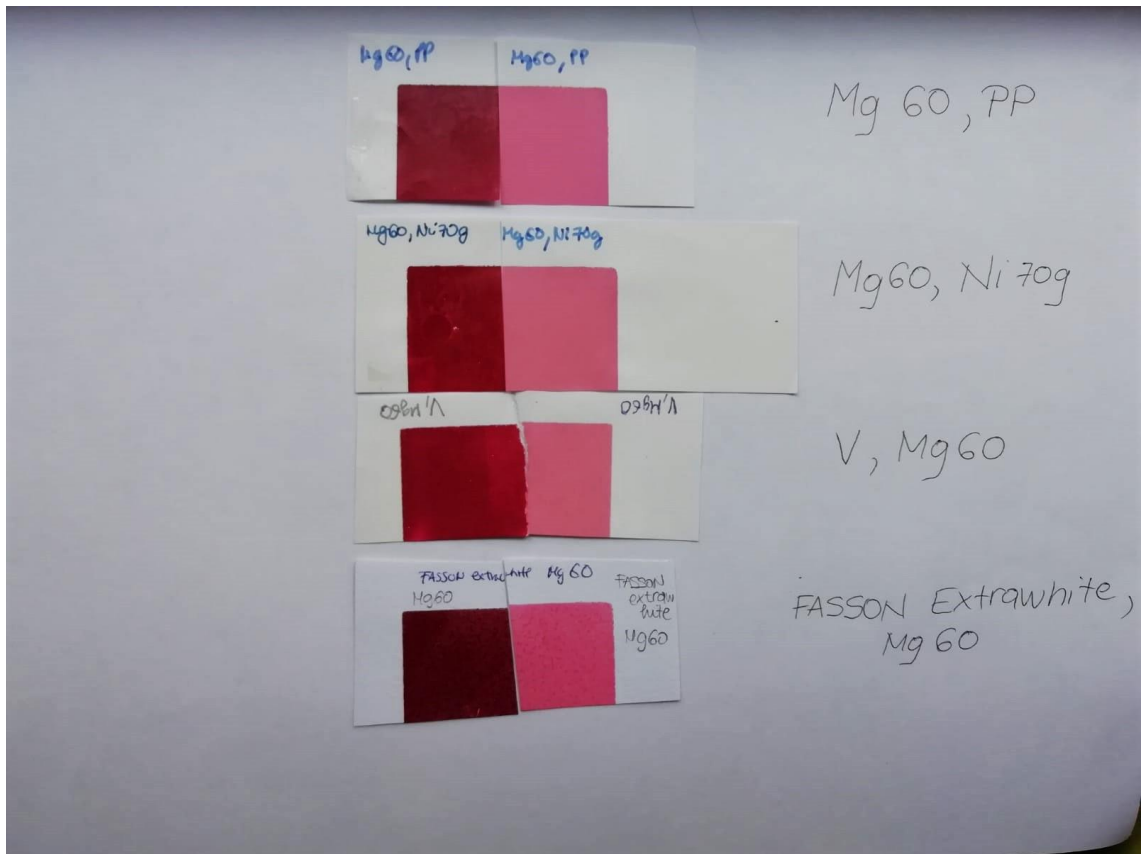
4. REZULTATI I RASPRAVA

4.1. Rezultati mjerenja Mg60 ireverzibilnog uzorka

Za prikaz termokromne promjene tona boje otisnuta četiri uzorka, izvršena su mjerenja u temperaturnim ciklusima ovisno o temperaturi aktivacije korištene termokromne boje. Pomoću krivulja spektralnih refleksija, te CIELAB sustava boja prikazane su promjene tona boje na pojedinačnim uzorcima. Rezultati su prikazani grafovima koji prikazuju krivulje spektralnih refleksija na različitim izmjerenim temperaturama, a^*/b^* graf te L^*/T . Boja se mijenja iz svijetlo roze u magenta boju.

Uzorak	Ciklus mjerenja
Ireverzibilna boja Mg60	40 ° C – 82 ° C (40 ° C - 56° C po 2 ° C, 57 ° C – 69 ° C po 1 ° C i 75 ° C - 80 ° C po 5 ° C)

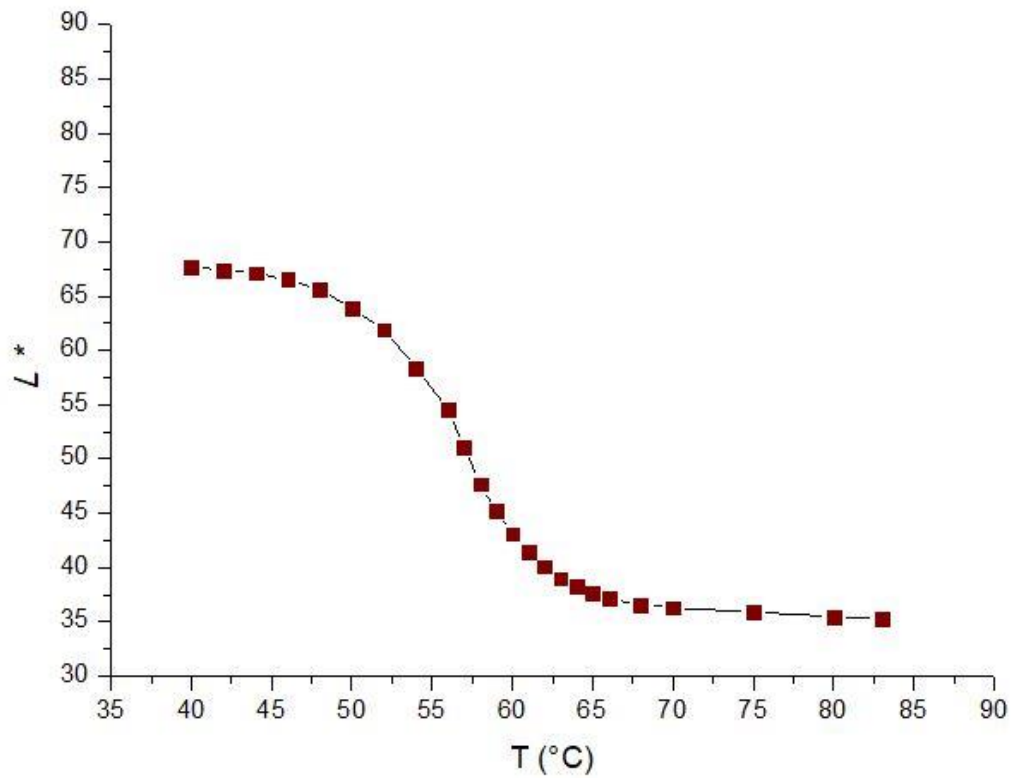
Tablica 3 – Ciklus mjerenja uzoraka



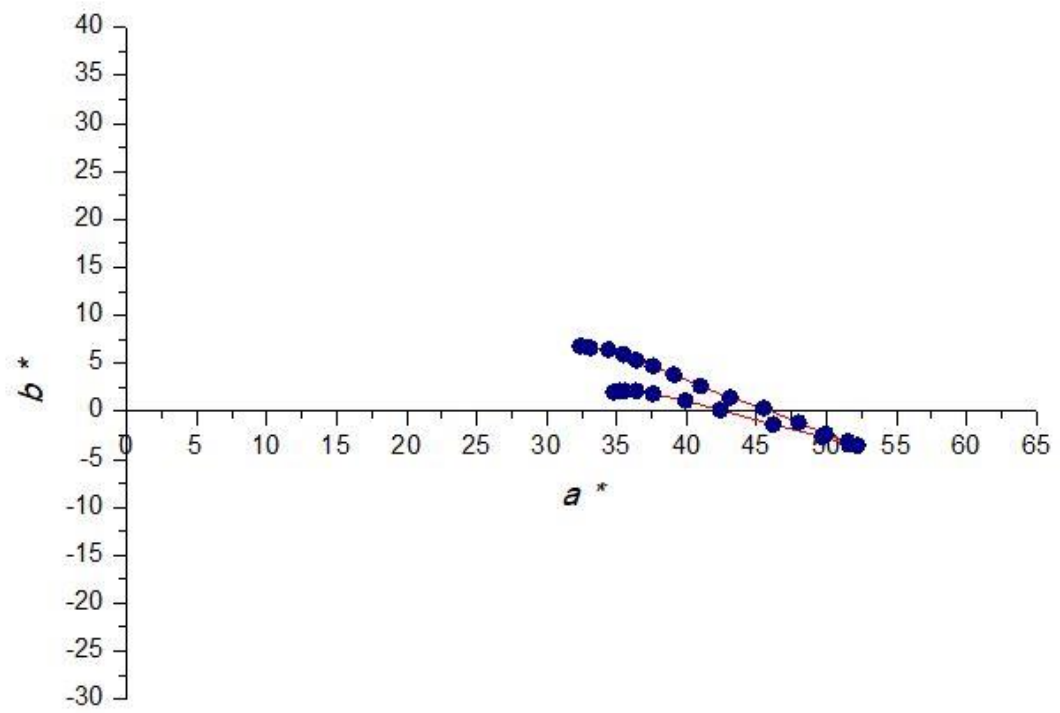
Slika 16 - Uzorci za boju Mg 60

Dobiveni rezultati prikazani su grafovima ovisnosti temperature i svjetline. Drugi graf prikazuje vrijednosti a^* i b^* kromatične osi. I na kraju su prikazane krivulje spektralne refleksije. Sva tri grafa prikazana su za svaki uzorak.

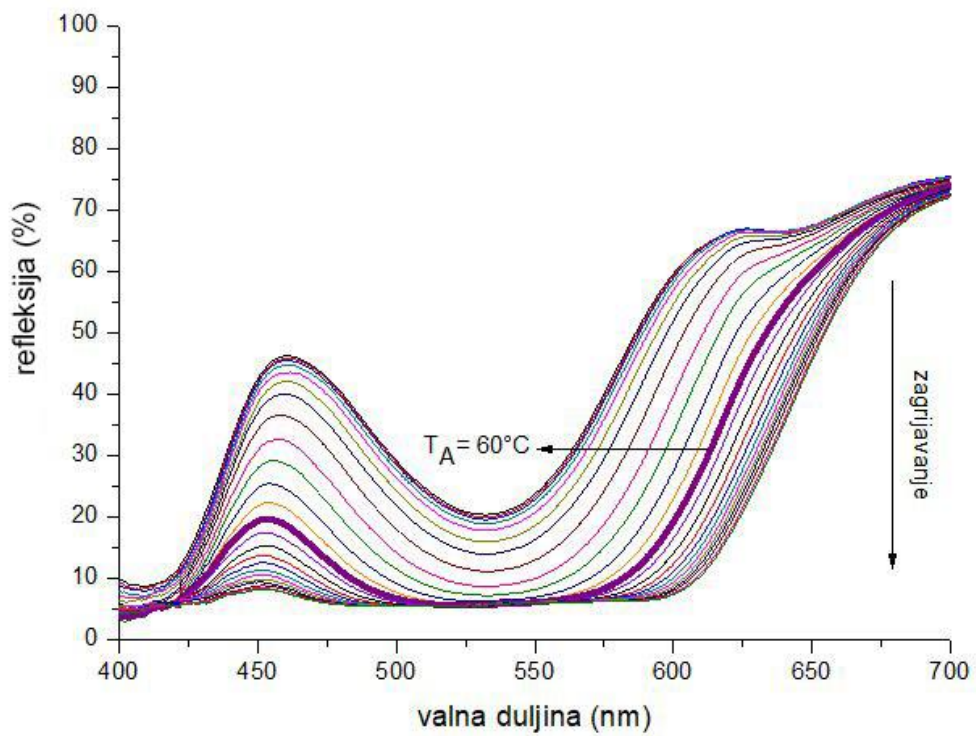
Sljedeća tri prikazana grafa odnose se za tiskovnu podlogu PP otisnut s ireverzibilnom bojom Mg60. Svjetlina se kod ovog uzorka smanjuje već prije 60°C, to znači da se promjena događa i prije propisane temperature aktivacije. U a^*/b^* dijagramu (Slika 19) vidi se da se boja proteže kroz prvi i četvrti kvadrant a^*/b^* grafa. S duljim zagrijavanjem, odnosno postizanjem viših temperatura, razlike u krivuljama spektralnih refleksija su sve manje.



Slika 17 – L^*/T graf za Mg60 na PP

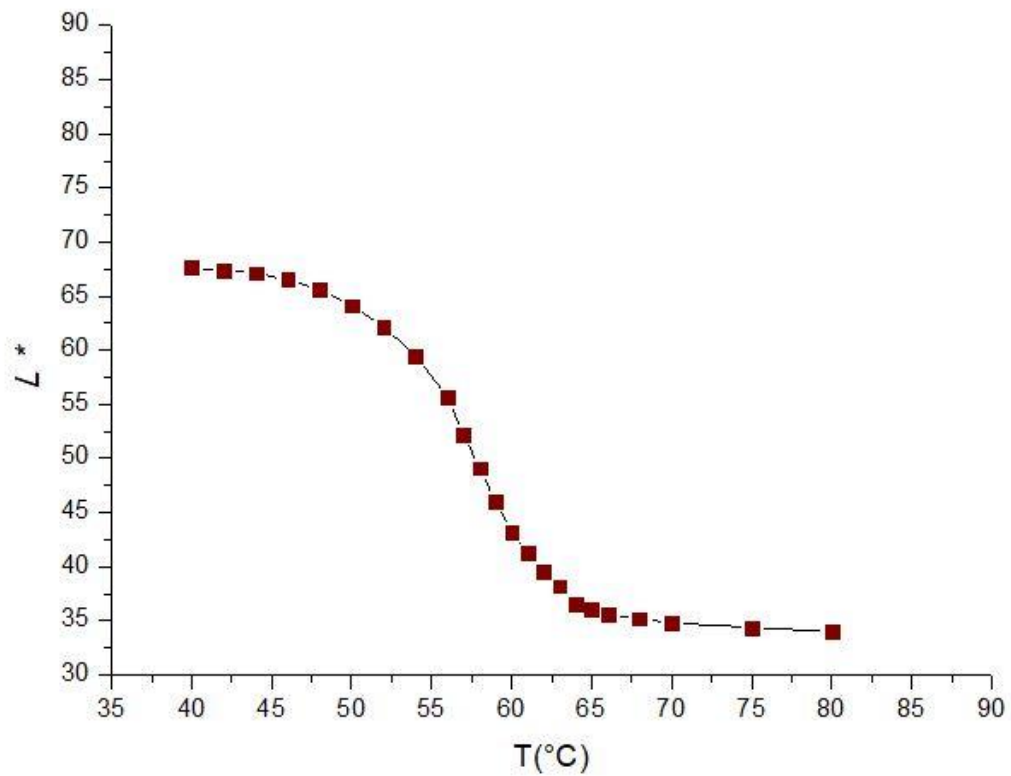


Slika 18 - a^*/b^* graf za Mg60 na PP

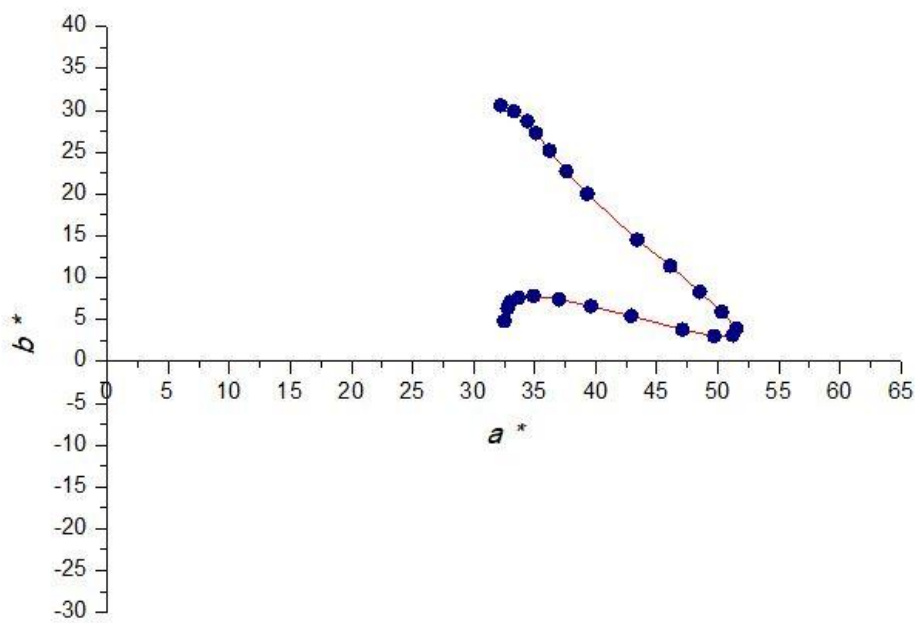


Slika 19 - Krivulje spektralne refleksije za Mg60 na PP

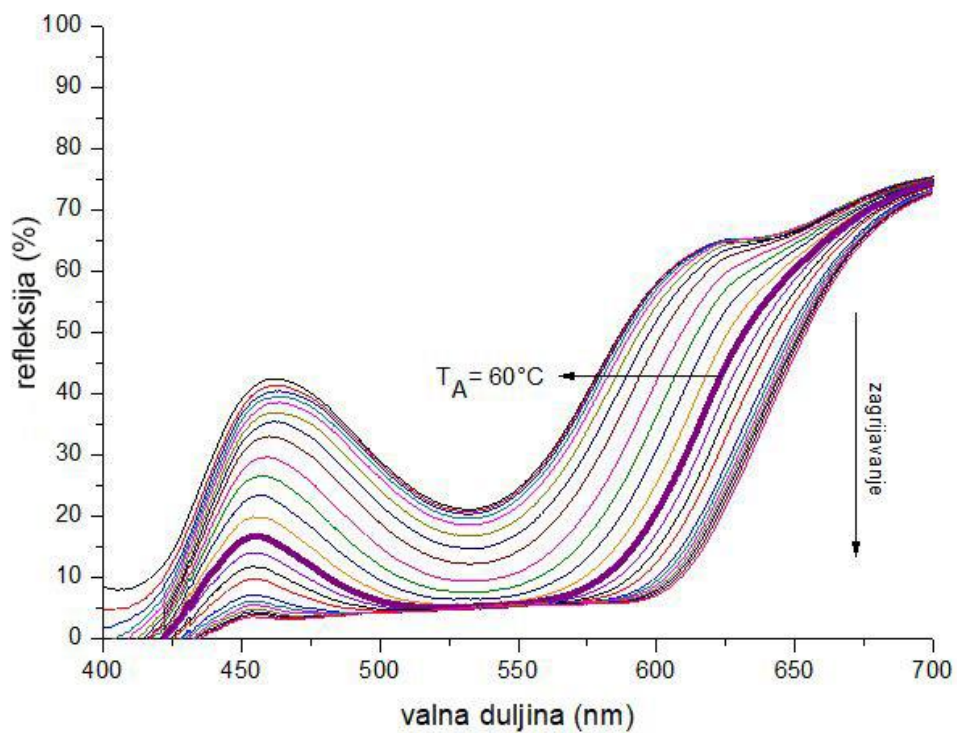
Sljedeća tri grafa pokazuju promjene kod uzorka otisnutog na papirnu podlogu Ni. Svjetlina se počela smanjivati prije aktivacijske temperature. Boja kod ovog uzorka prostire se u prvom kvadrantu a^*/b^* grafa, a krivulje spektralne refleksije se sve više sužavaju, odnosno pri većim temperaturama razlike su manje uočljive.



Slika 20 - L^*/T graf za Mg60 na Ni

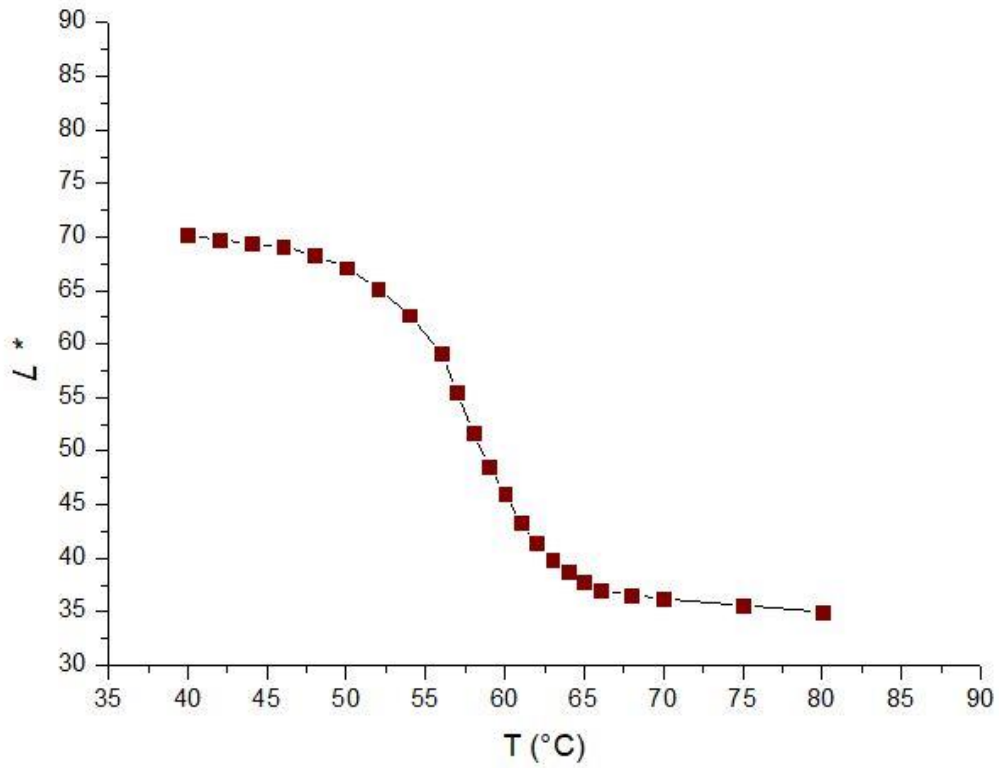


Slika 21 - a^*/b^* graf za Mg60 na Ni

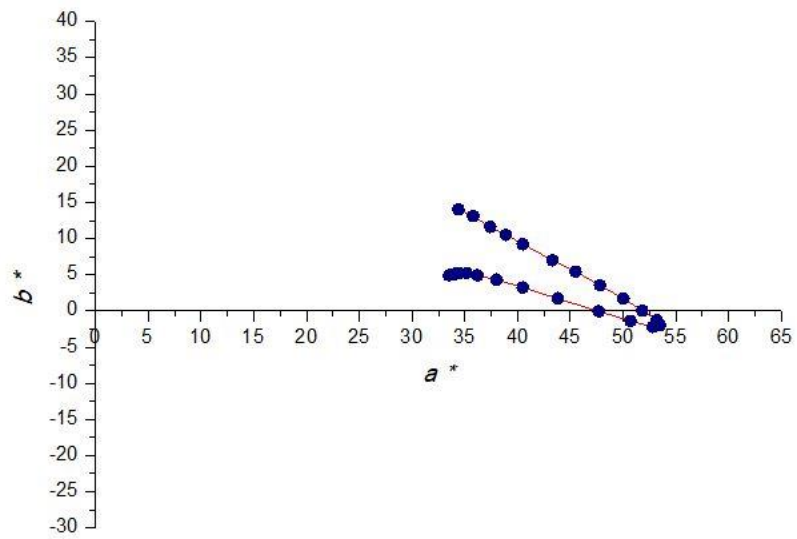


Slika 22 - Krivulje spektralne refleksije za Mg60 na Ni

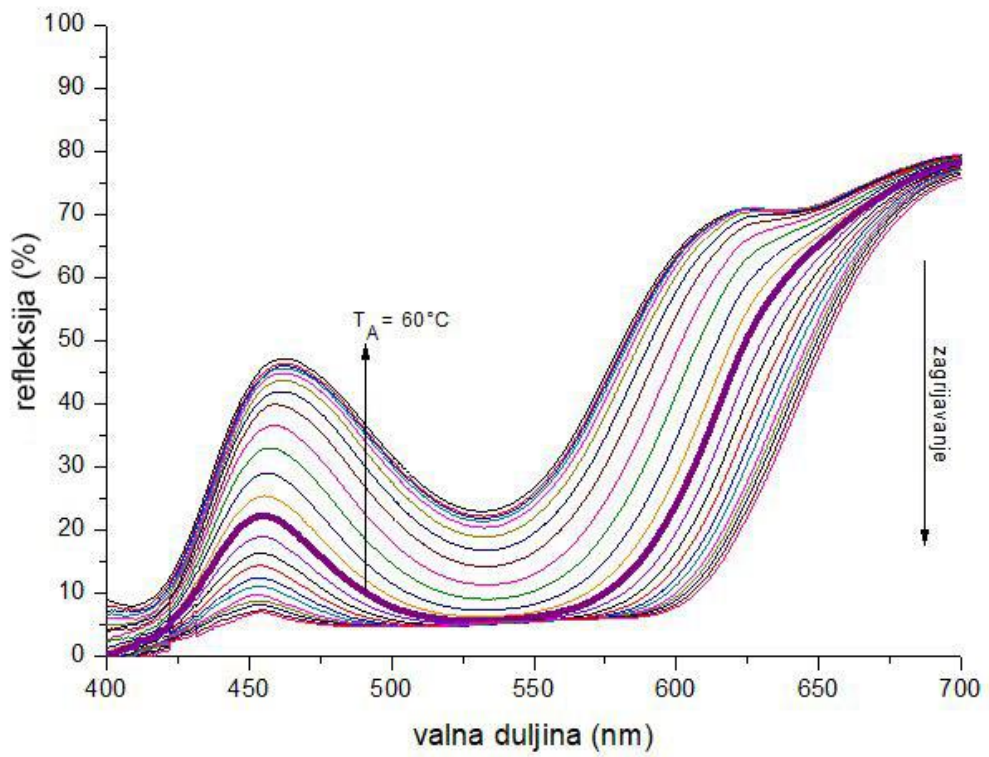
Slijede grafovi za uzorak voluminoznog papira. Slika 24 prikazuje ovisnost svjetline o temperaturi, koja se također počela smanjivati prije aktivacijske temperature. Slika 25 prikazuje prostiranje boje u prvom i drugom kvadrantu a^*/b^* dijagrama.



Slika 23 - L^*/T graf za Mg60 na V

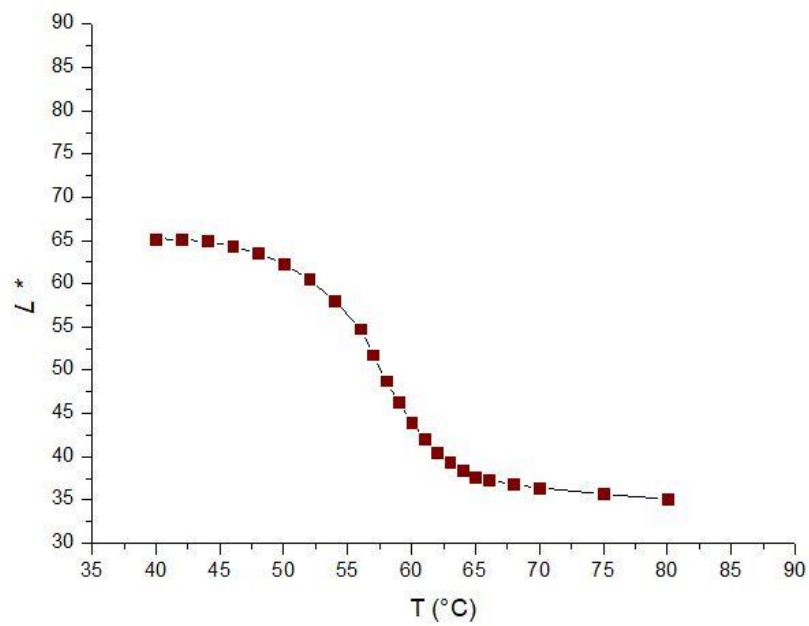


Slika 24 - a^*/b^* garf za Mg60 na V

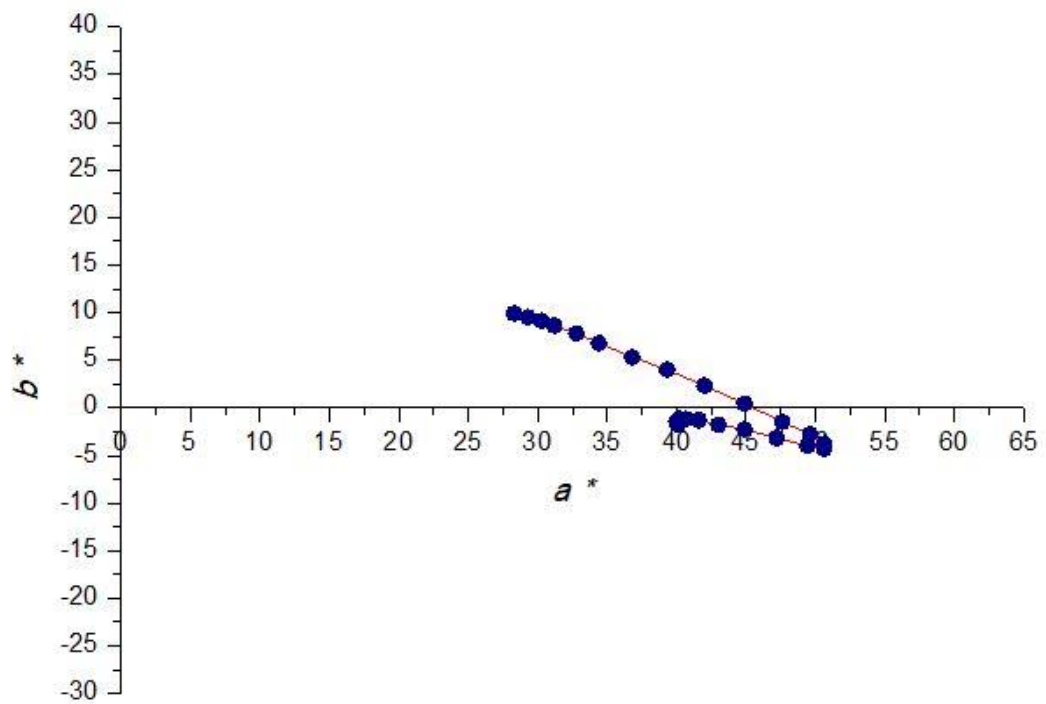


Slika 25 - Krivulje spektralne refleksije za Mg60 na V

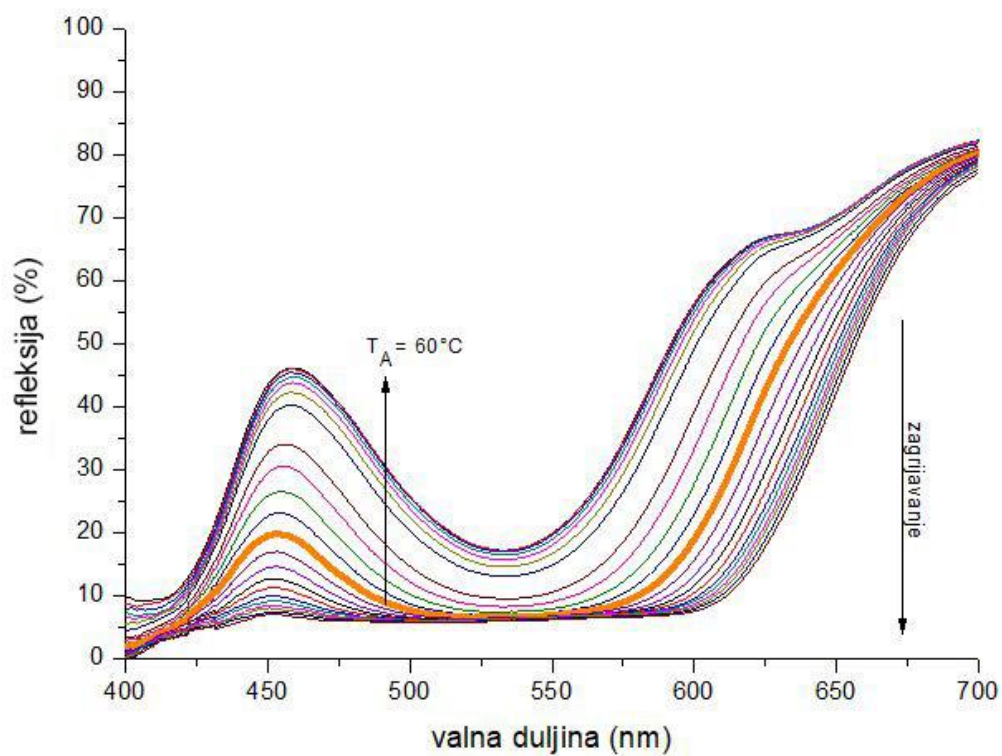
Četvrti uzorak bio je otisnut na papir FASSON Extrawhite. Slijede grafovi koji prikazuju rezultate mjerenja.



Slika 26 - L^*/T graf za Mg60 na FASSON



Slika 27 - a^*/b^* graf za Mg60 na FASSON



Slika 28 - Krivulje spektralne refleksije za Mg60 na FASSON

Nakon izmjerenih dinamičkih karakteristika boje aktivacijske temperature 60°C , drugo mjerenje odnosilo se na četiri iste podloge, ali s otisnutom ireverzibilnom bojom temperature aktivacije 75°C .

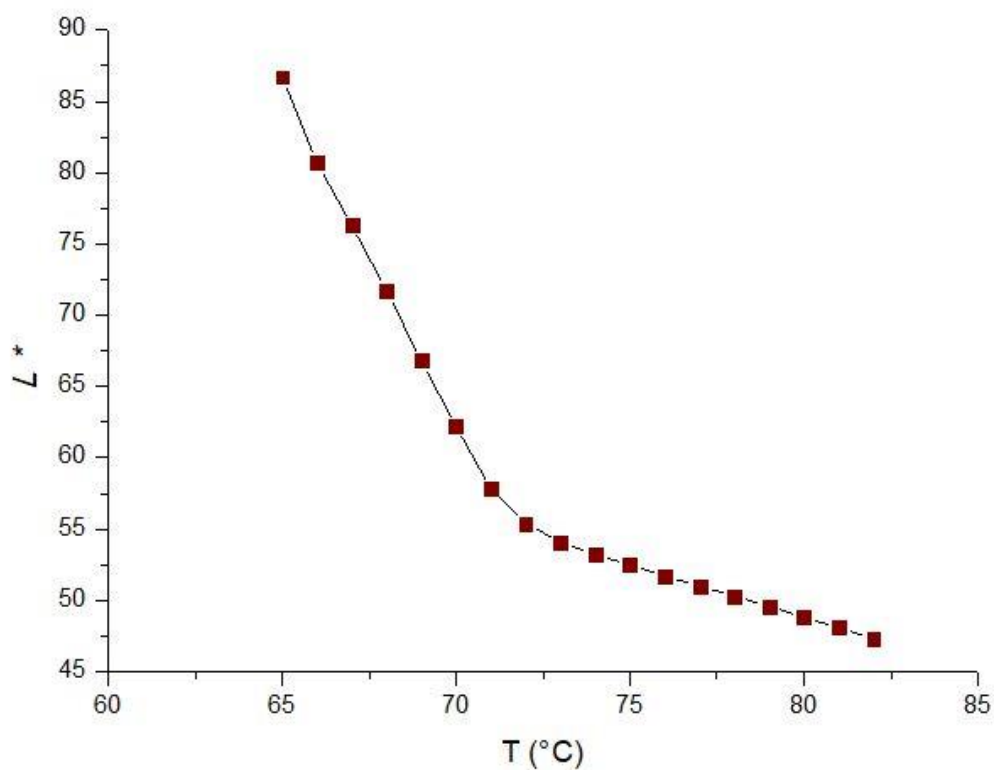


Slika 29 - Uzorci s ireverzibilnom bojom Mg75/80

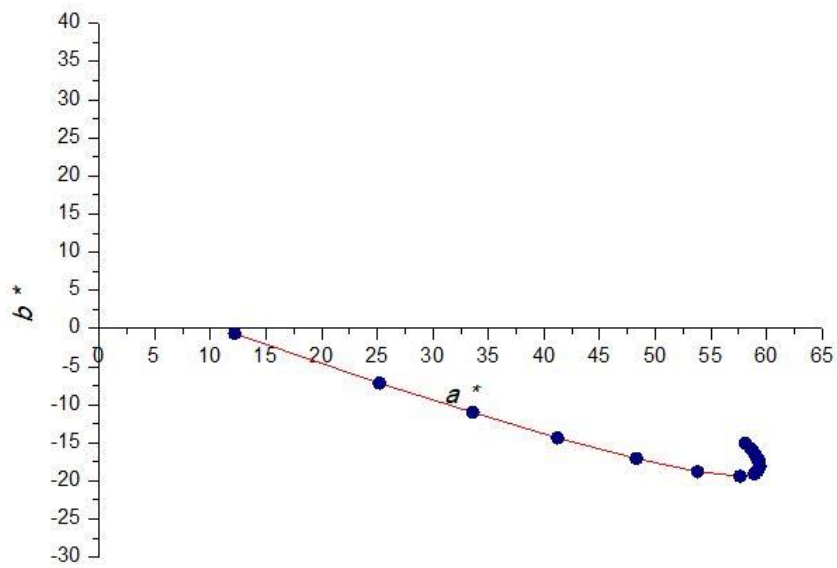
Uzorak	Ciklus mjerenja
Ireverzibilna boja s temperaturom aktivacije 75° C	65° C – 82° C (po 1°C)

Tablica 4 – Ciklus mjerenja THERMOSIL RED uzorka

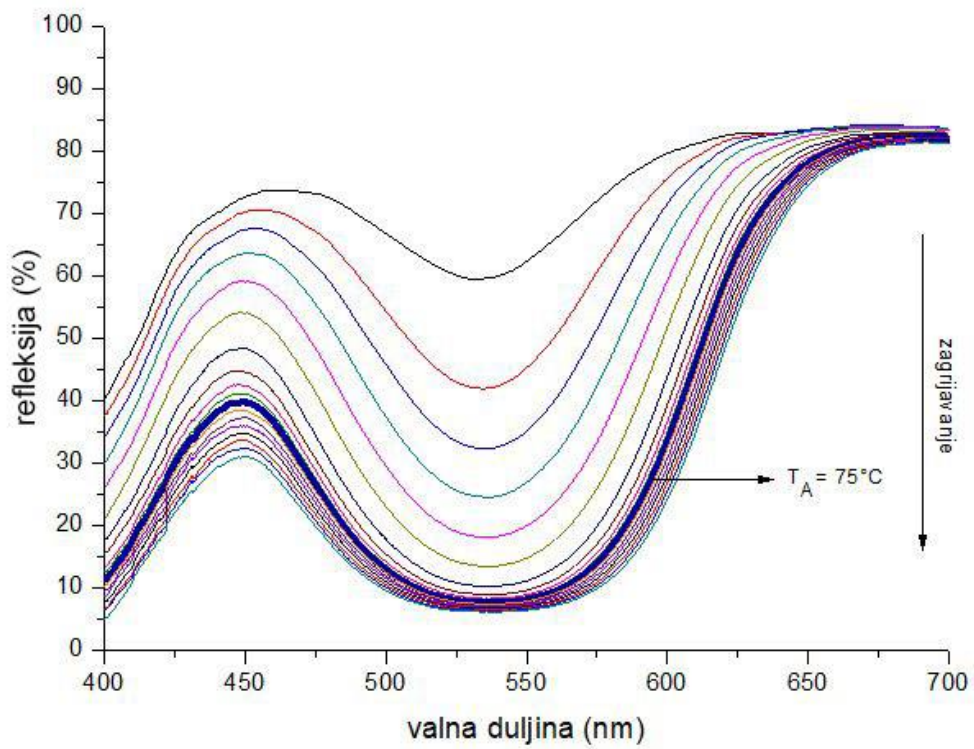
Slijede grafovi koji opisuju kolorimetrijske razlike termokromne ireverzibilne boje s temperaturom aktivacije 75°C. To su L^*/T graf, a^*/b^* graf i graf spektralnih krivulja refleksije za voluminozni papir.



Slika 30 - L^*/T graf za THERMOSIL RED na V

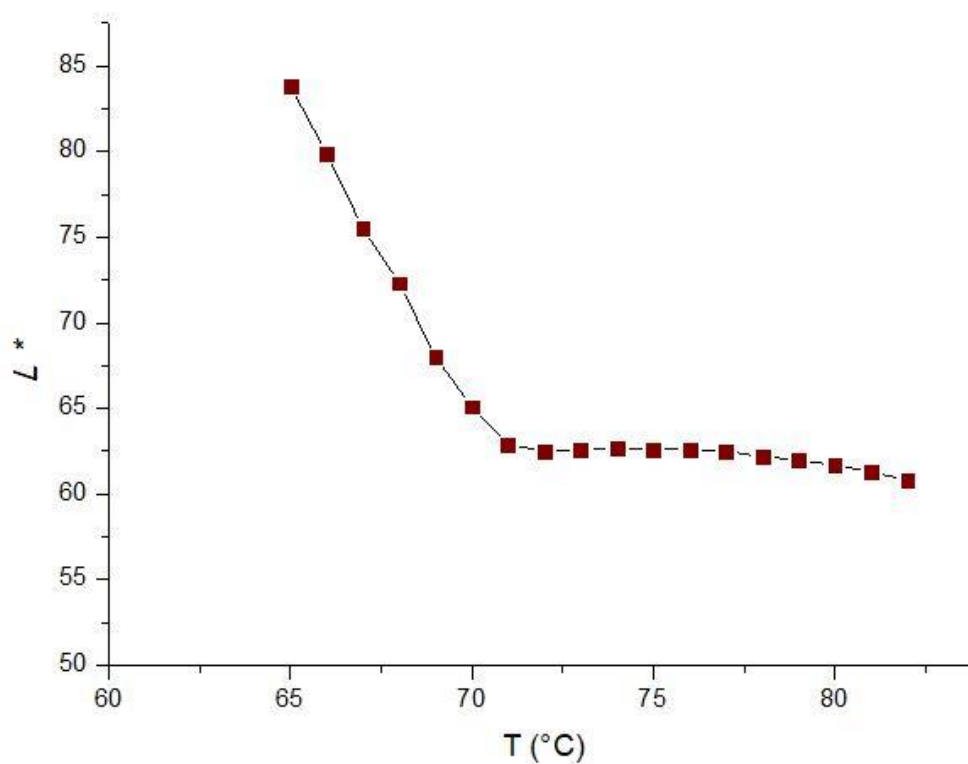


Slika 31 - a^*/b^* graf za THERMOSIL RED na V

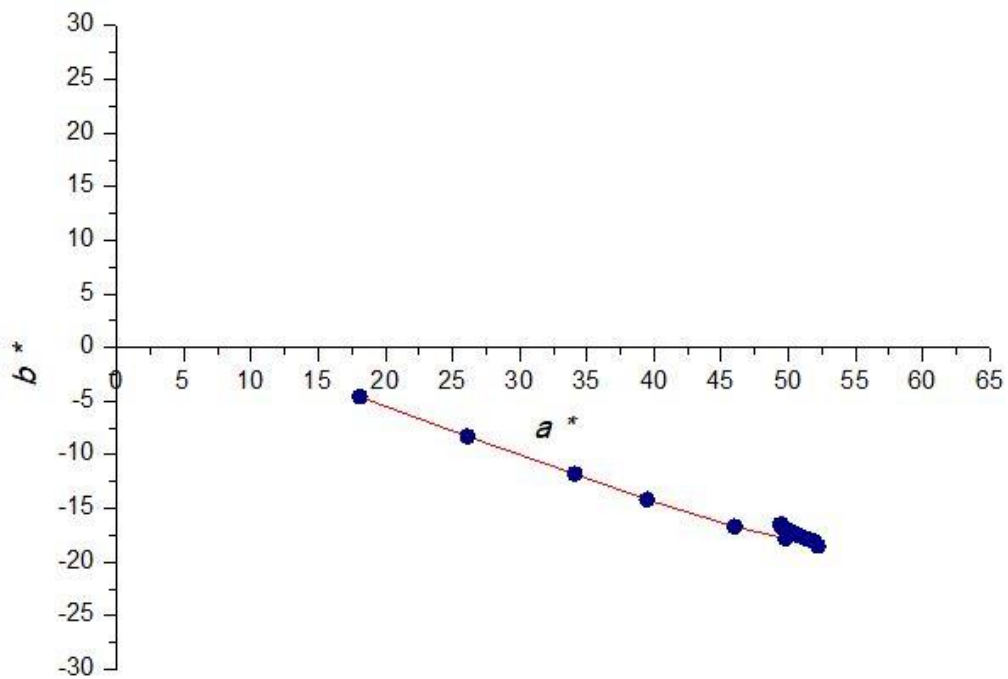


Slika 32 - Krivulje spektralne refleksije za THERMOSIL RED na V

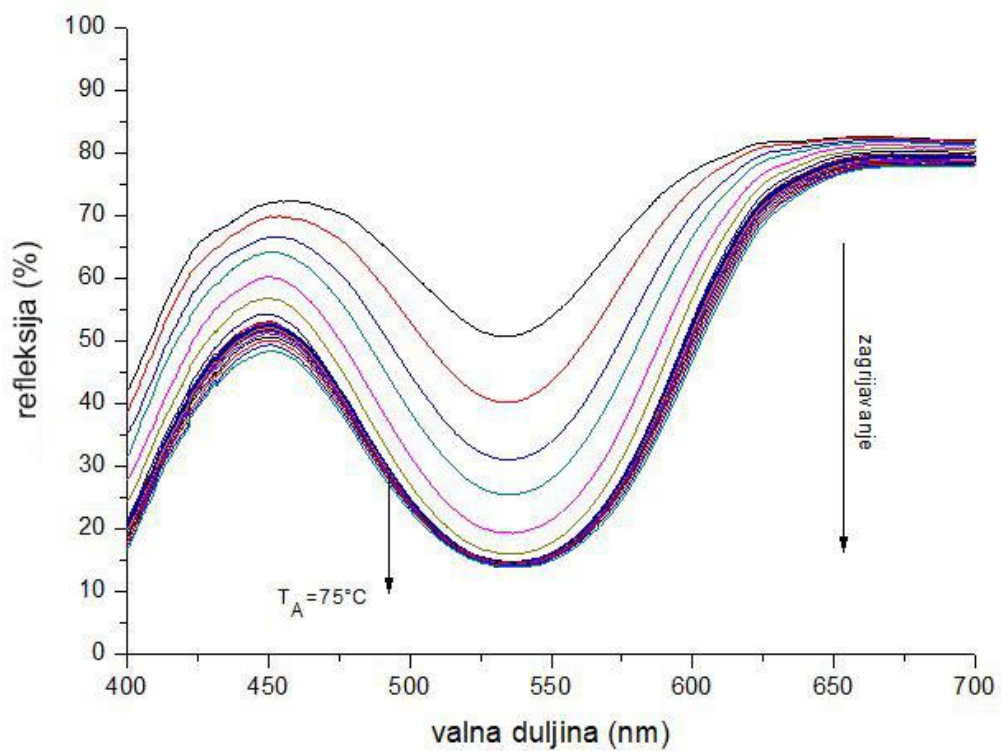
Slijede grafovi koji opisuju kolorimetrijske razlike termokromne ireverzibilne boje s temperaturom aktivacije 75°C. To su L^*/T graf, a^*/b^* graf i graf spektralnih krivulja refleksije za uzorak Ni.



Slika 33 - L^*/T graf za THERMOSIL RED na Ni

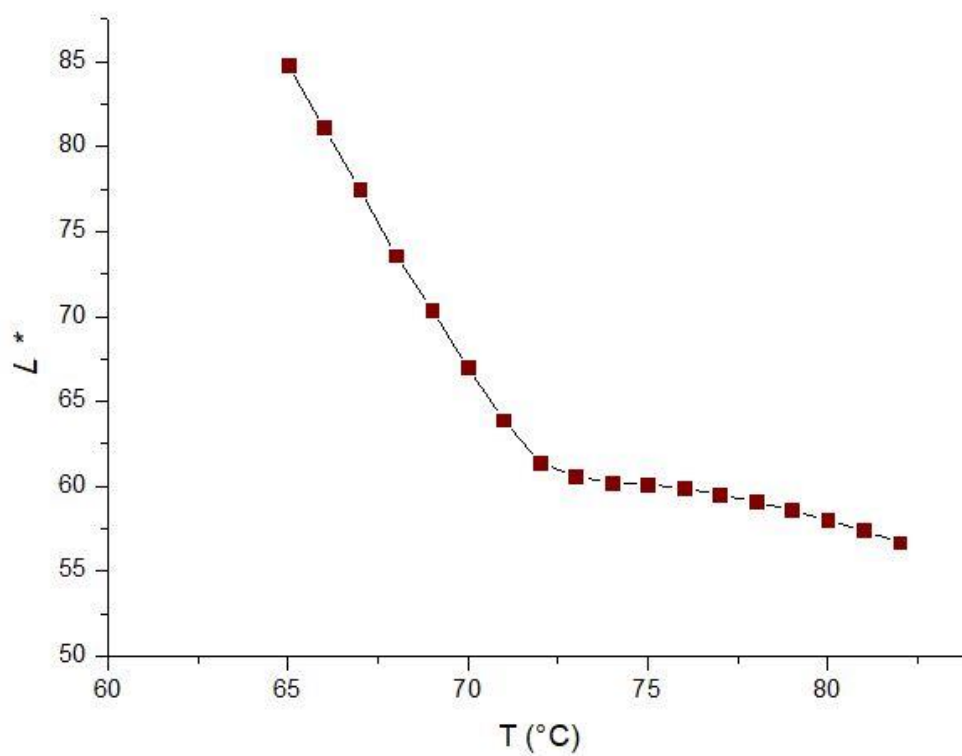


Slika 34 - a^*/b^* graf za THERMOSIL RED na Ni

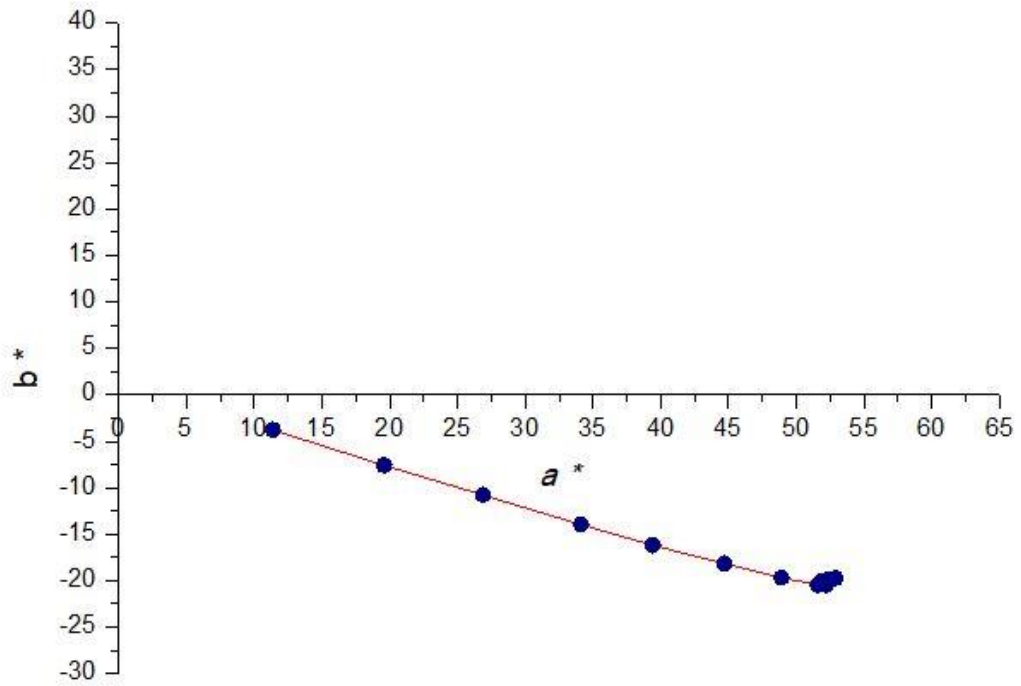


Slika 35 - Krivulje spektralne refleksije za THERMOSIL RED na Ni

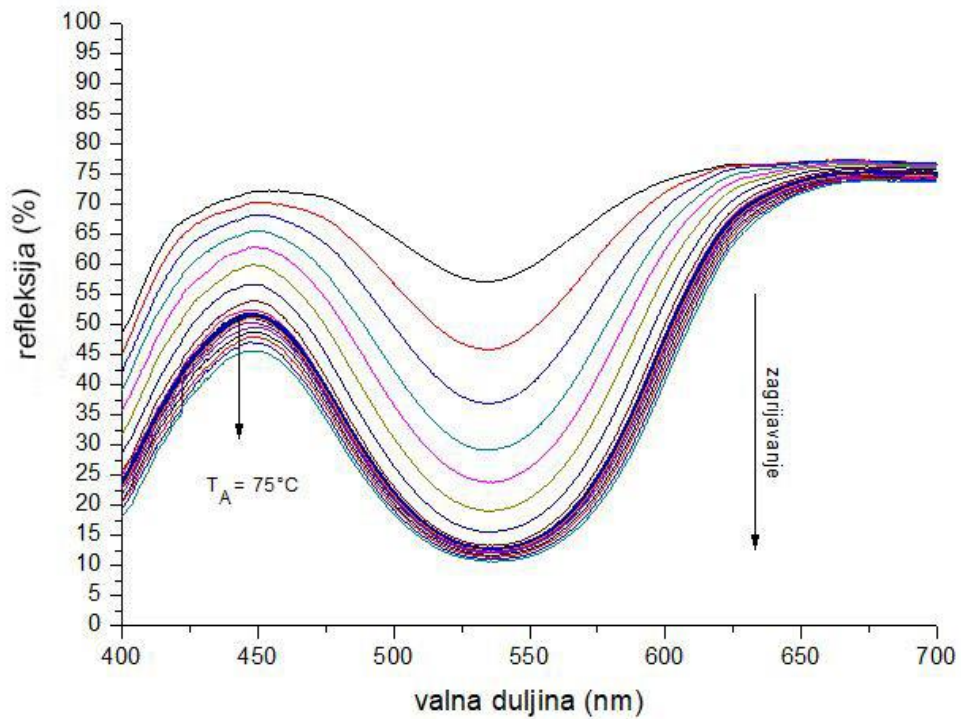
Sljedeća tri grafa opisuju kolorimetrijske razlike termokromne ireverzibilne boje s temperaturom aktivacije 75°C. To su L^*/T graf, a^*/b^* graf i graf spektralnih krivulja refleksije za PP.



Slika 36 - L^*/T graf za THERMOSIL RED na PP

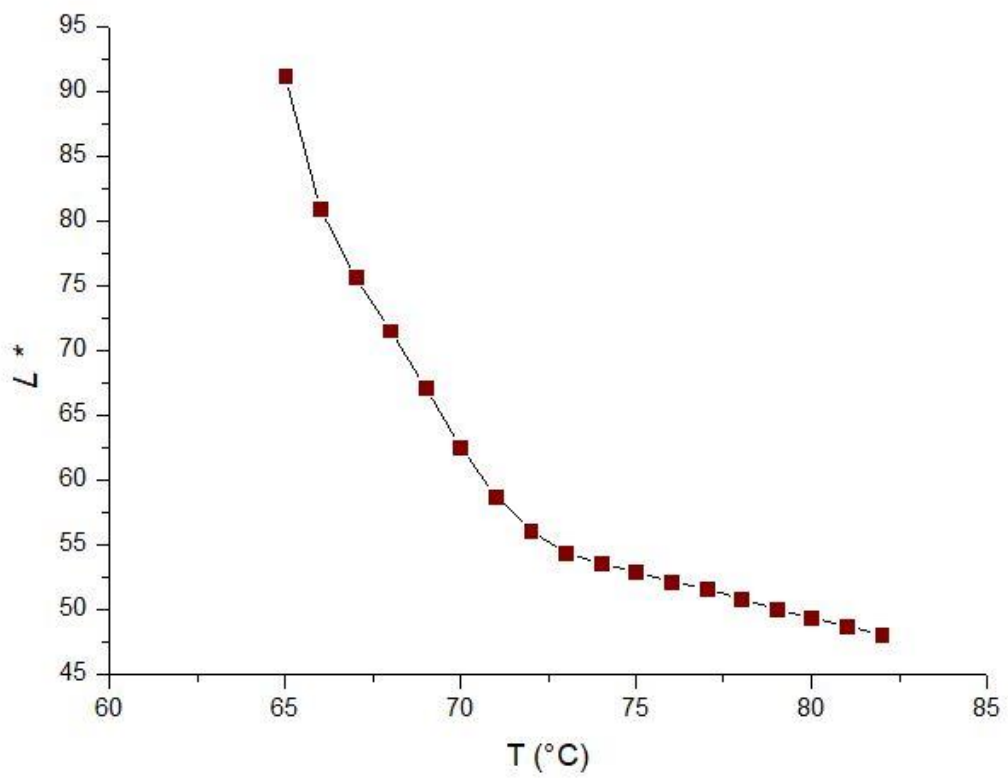


Slika 37 - a^*/b^* graf za THERMOSIL RED na PP

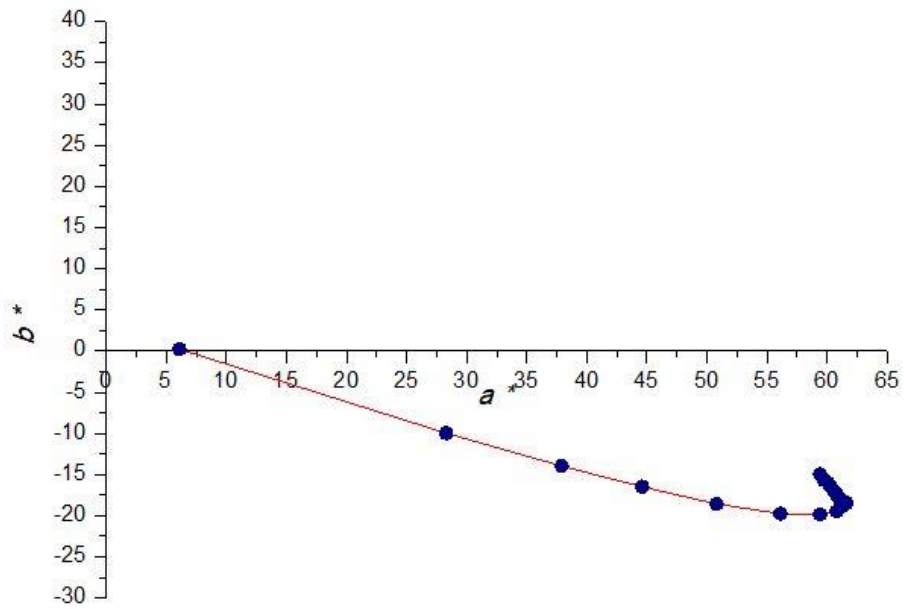


Slika 38 - Krivulje spektralne refleksije za THERMOSIL RED na PP

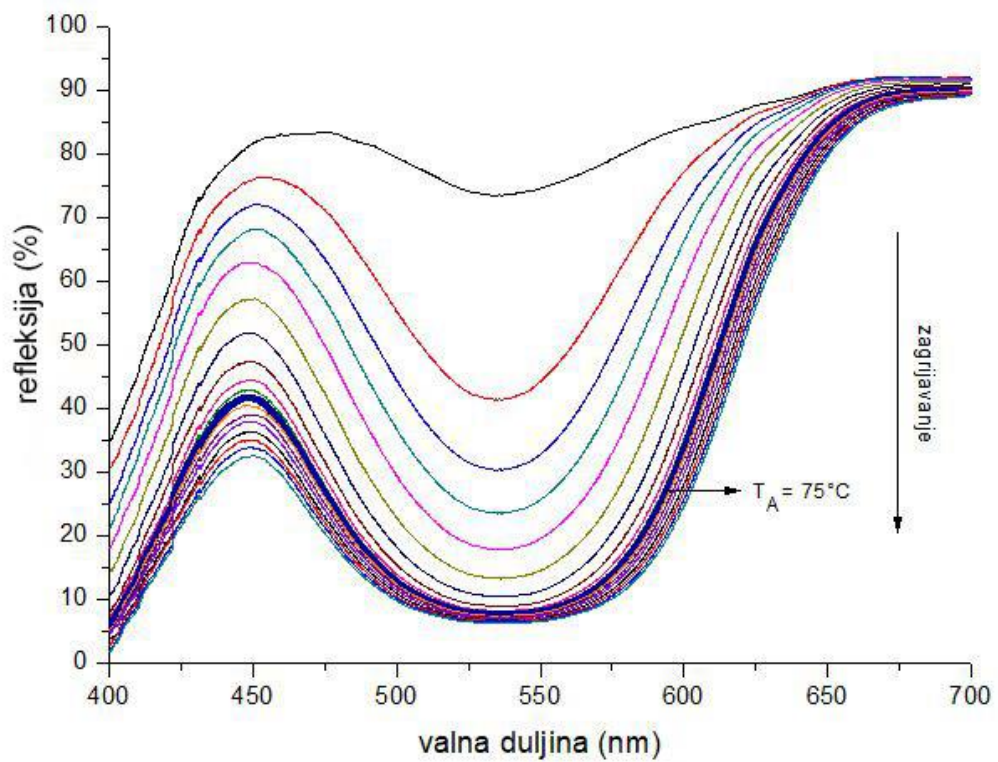
Slijede grafovi koji opisuju kolorimetrijske razlike termokromne ireverzibilne boje THERMOSIL RED s temperaturom aktivacije 75° C. To su L^*/T graf, a^*/b^* graf i graf spektralnih krivulja refleksije za FASSON Extrawhite podlogu.



Slika 39 - L^*/T graf za THERMOSIL RED na FASSON



Slika 40 - a^*/b^* graf za THERMOSIL RED na FASSON

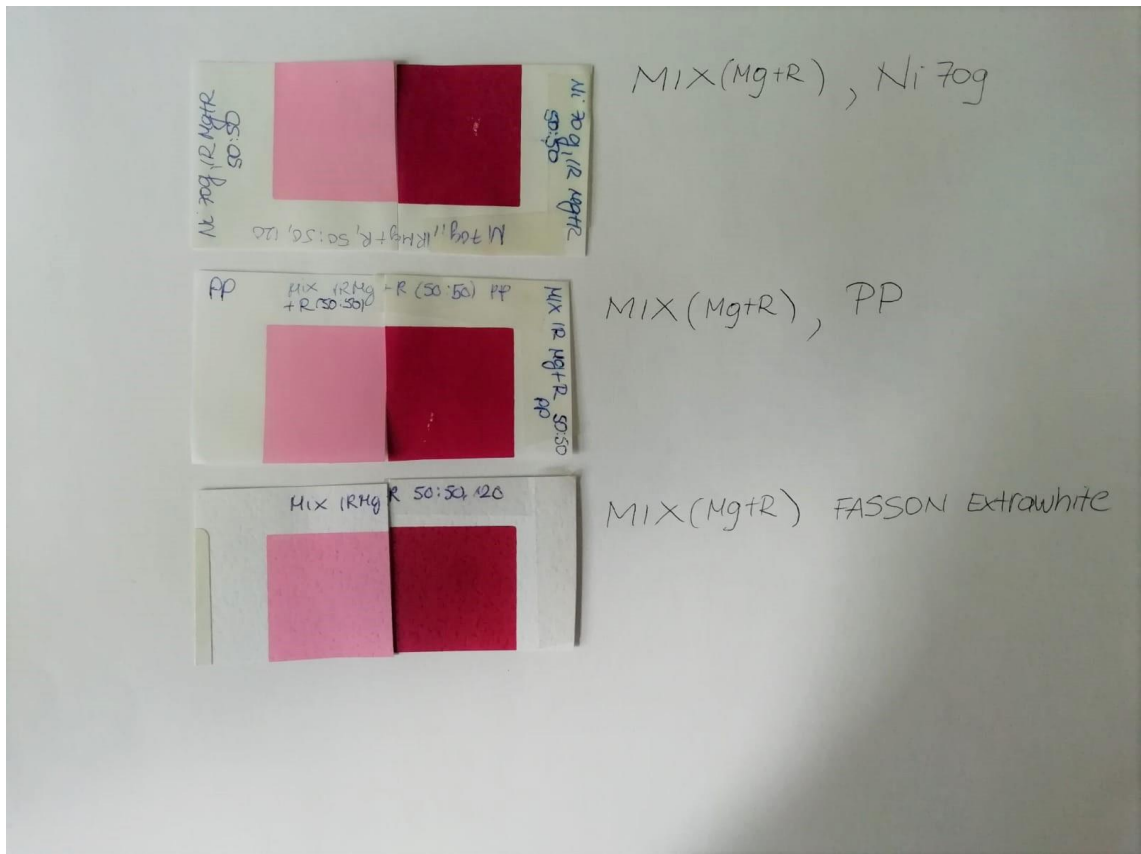


Slika 41 - Krivulje spektralne refleksije za THERMOSIL RED na FASSON

Nakon izmjerenih dinamičkih karakteristika boje aktivacijske temperature 75°C, zadnji uzorci bili su otisnuti mješavinom prethodne dvije boje. MIX uzorak izmiješan je u omjeru 50:50, ireverzibilna boja s temperaturom aktivacije 60°C i boja s aktivacijskom temperaturom 75°C. MIX je otisnut na tri različite podloge.

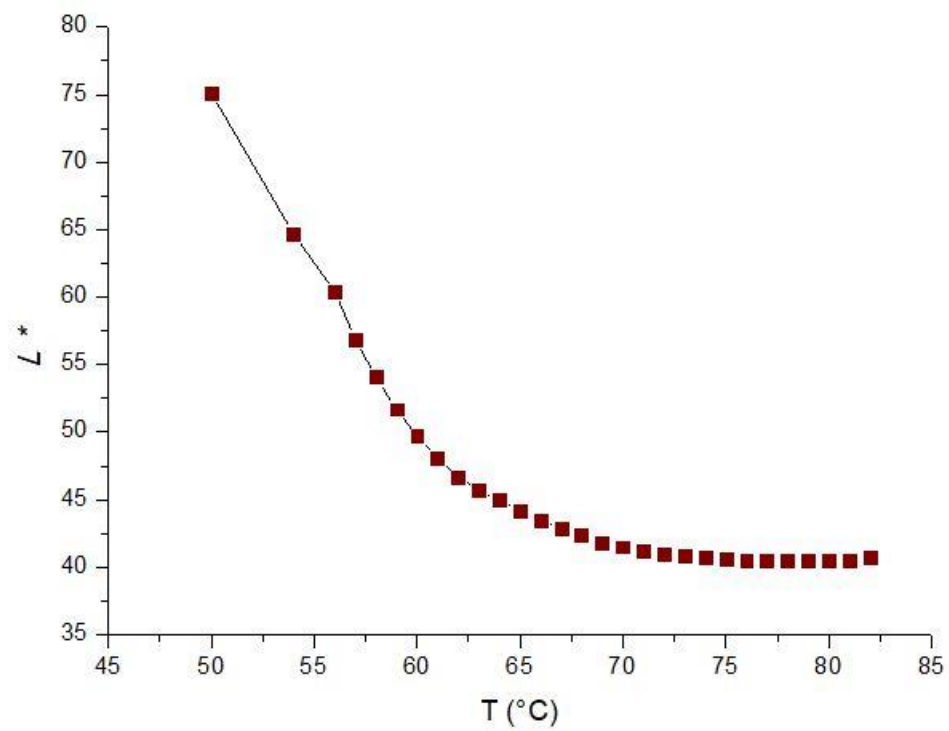
Uzorak	Ciklus mjerenja
MIX	50° C – 82° C (50 – 56°C po 2°C, 57 – 82°C po 1°C)

Tablica 5 – Ciklus mjerenja MIX uzorka

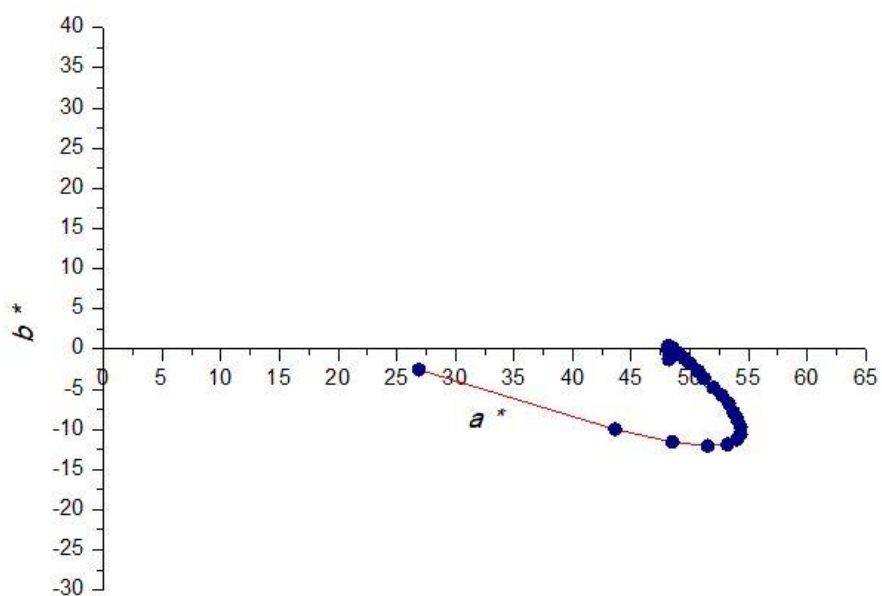


Slika 42 - Uzorci s MIX bojom

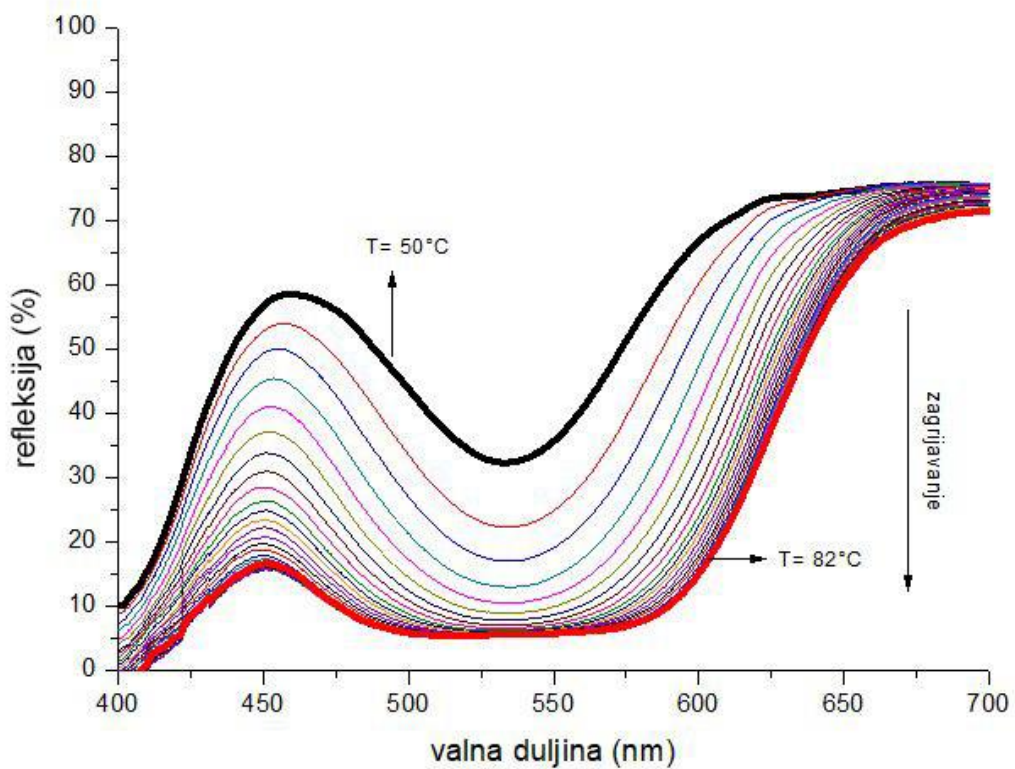
Slijede grafovi koji opisuju kolorimetrijske razlike termokromne mješavine dviju ireverzibilnih boja. To su L^*/T graf, a^*/b^* graf i graf spektralnih krivulja refleksije za Ni.



Slika 43 - L^*/T graf za MIX na Ni

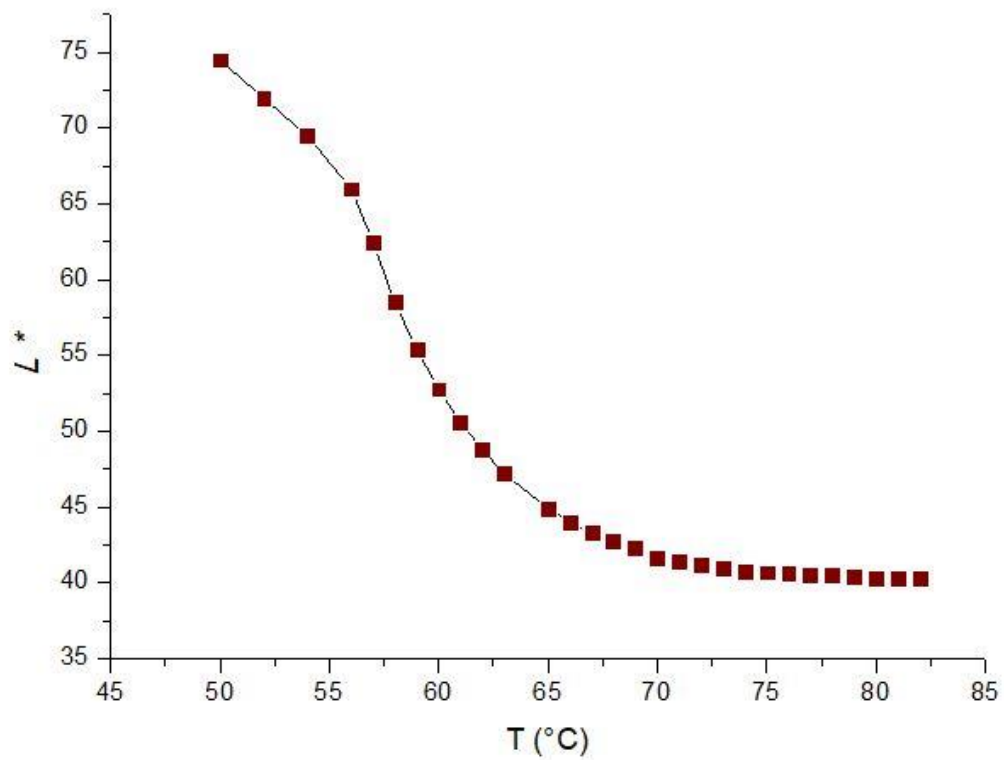


Slika 44 - a^*/b^* graf za MIX na Ni

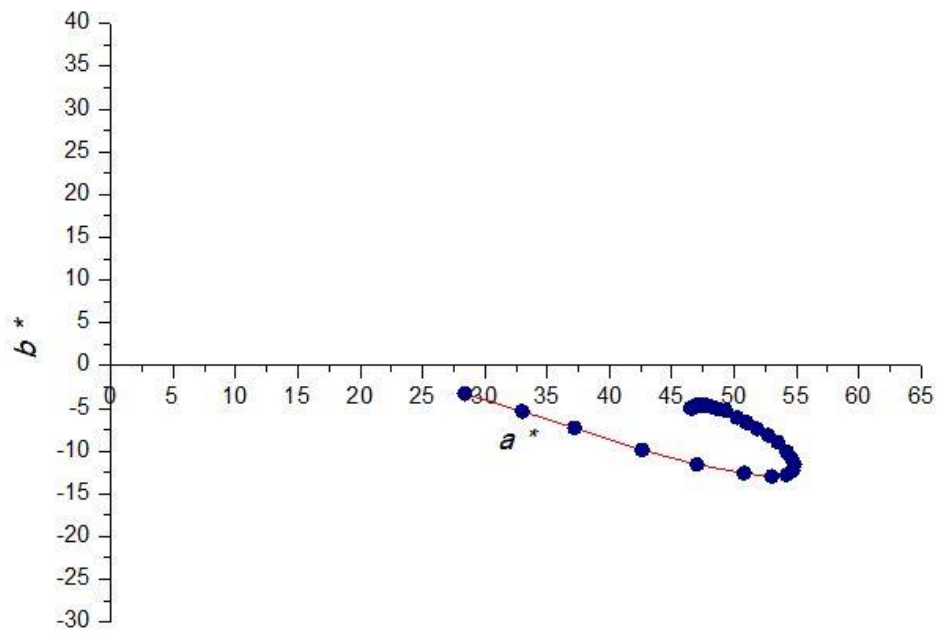


Slika 45 - Krivulje spektralne refleksije za MIX na Ni

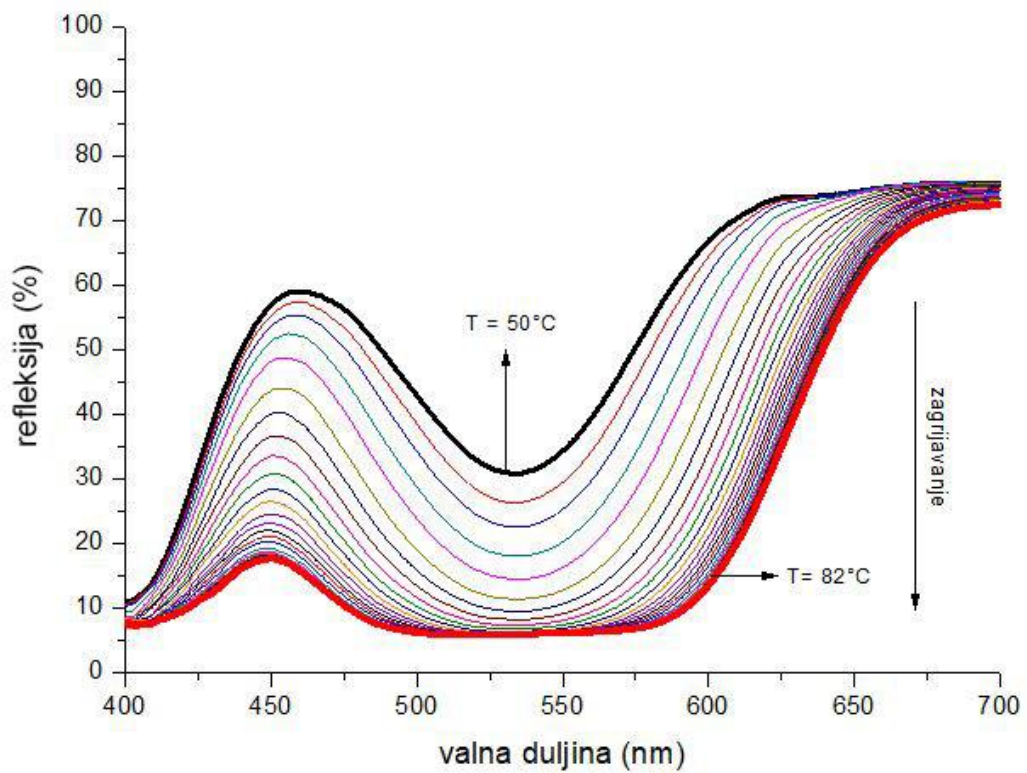
Slijede grafovi koji opisuju kolorimetrijske razlike termokromne mješavine dviju ireverzibilnih boja. To su L^*/T graf, a^*/b^* graf i graf spektralnih krivulja refleksije za PP.



Slika 46 - L^*/T graf za MIX na PP

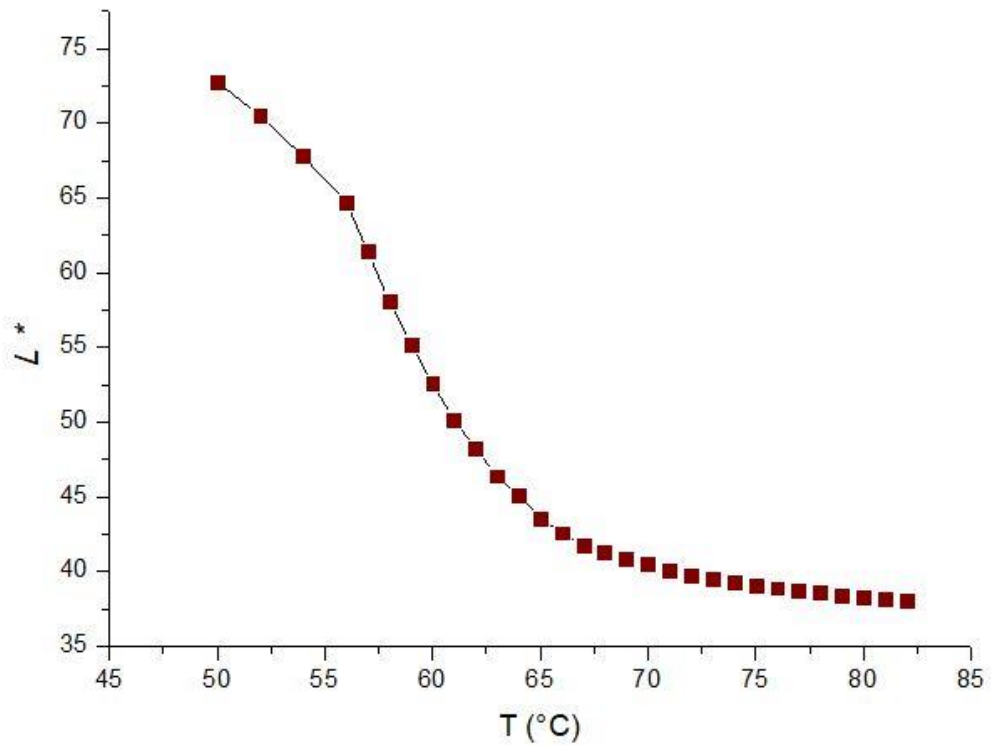


Slika 47 a^*/b^* graf za MIX na PP

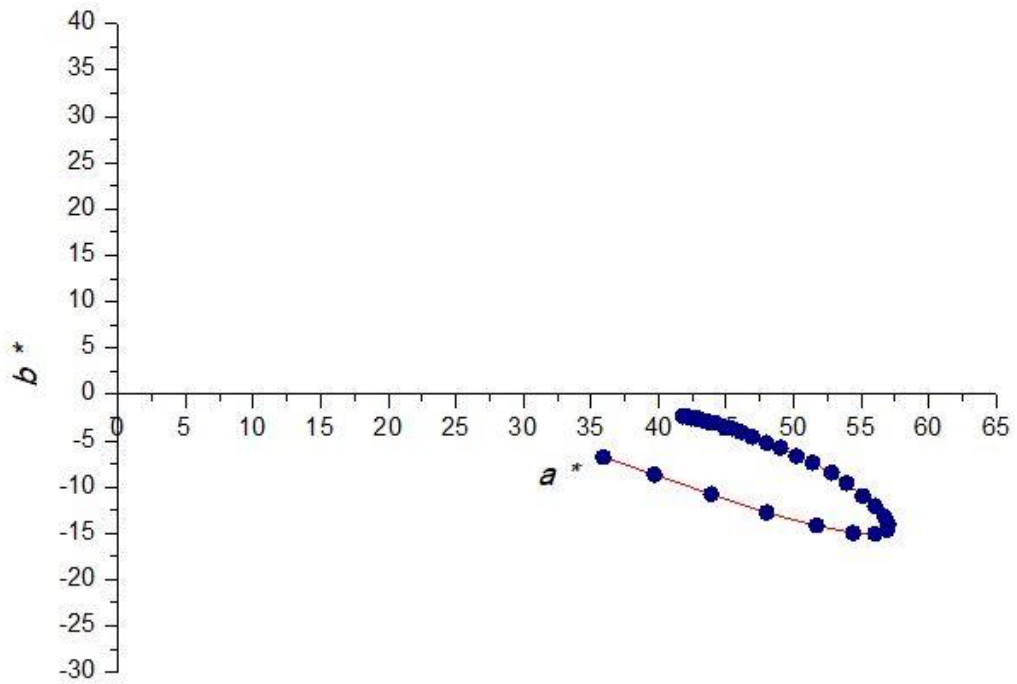


Slika 48 - Krivulje spektralne refleksije za MIX na PP

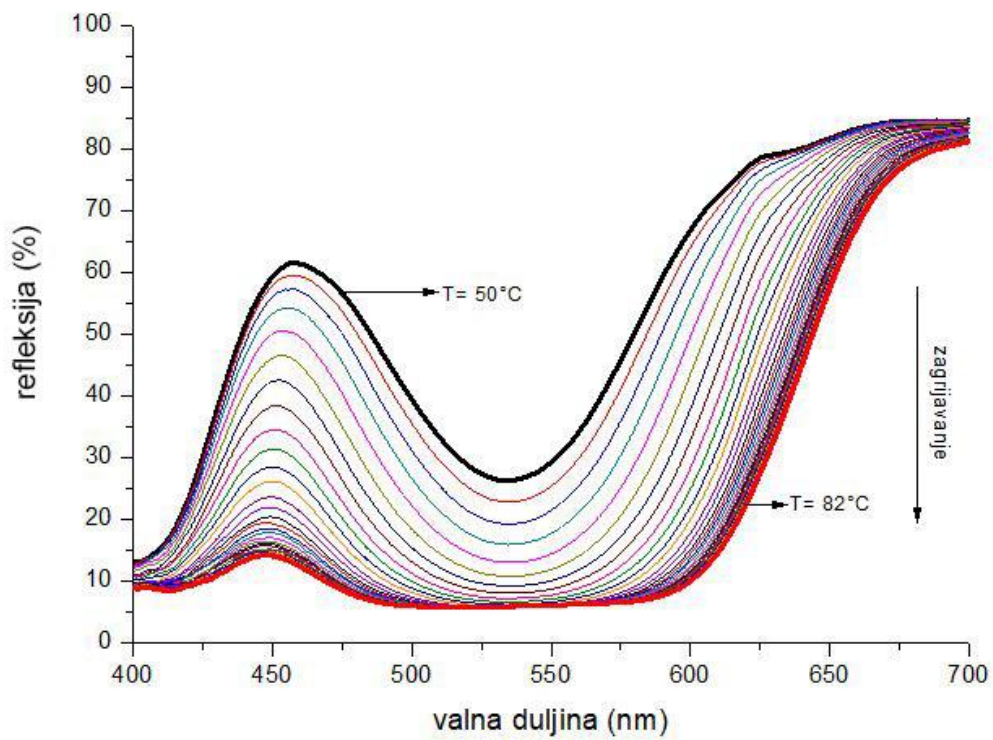
Slijede grafovi koji opisuju kolorimetrijske razlike termokromne mješavine dviju ireverzibilnih boja. To su L^*/T graf, a^*/b^* graf i graf spektralnih krivulja refleksije za zadnji uzorak tj. papirnu podlogu FASSON Extrawhite.



Slika 49 - L^*/T graf za MIX na FASSON



Slika 50 - a^*/b^* graf za MIX na FASSON



Slika 51 - Krivulje spektralne refleksije za MIX na FASSON

5. ZAKLJUČAK

Uspoređujući dobivene rezultate mjerenja i njihove grafove za odabrane termokromne boje na različitim tiskovnim podlogama, može se zaključiti više bitnih činjenica koje otkrivaju svojstva ireverzibilnih boja.

Promjenom temperature, ton boje se mijenja polagano i kontinuirano, nikada isprekidano i/ili naglo. Također se razlike očituju u odabranim tiskovnim podlogama, iz grafova se vidi da ista boja nema identične vrijednosti niti jedne od izmjerenih vrijednosti (L^* , a^* , b^*), a to proizlazi iz činjenice da sve tiskovne podloge nemaju ista svojstva, odnosno svaki papir je drugačijih karakteristika. Razlog tih kolorimetrijskih razlika je u različitoj gramaturi papira, debljini papira, upojnosti tiskovne boje koja je različita za svaku od navedenih korištenih tiskovnih podloga. Međutim te varijacije su oku promatrača nezamjetne, ali i prema dobivenim vrijednostima mjerenja može se reći da se instrumentalnim istraživanjem, analiziranjem i obradom podataka došlo do zaključka da se termokromna boja ponaša slično na različitim podlogama.

Iz L^*/T grafa vidi se da se zagrijavanjem svjetlina boje smanjuje i to je specifično za svaku od ovih boja i za svaku tiskovnu podlogu. Zbog različitih podloga također postoje varijacije za svaki od papira, a razlog tomu je razlika papira u bjelini, opacitetu, transparentnosti, dodatku optičkih bjelila u samoj proizvodnji papira i sl.

Jedan od zaključaka do kojeg se došlo obradom podataka je taj da se termokromna reakcija (promjena boje) dogodila i prije propisane temperature aktivacije prema uputstvu proizvođača, ali i da na višim temperaturama boja postaje još intezivnija.

Iz grafova koji prikazuju krivulje spektralne refleksije može se iščitati da se promjene događaju postepeno i da se razlike sve manje očituju duljim zagrijavanjem.

Najveće razlike u a^*/b^* dijagramu koji pokazuje kromatične osi, odnosno promjenu boje, očituju se kod ireverzibilne boje s temperaturom aktivacije 75°C , upravo zbog toga što je promjena boje išla od bijele (transparentne) do ružičaste.

6. LITERATURA

1. Legac E. (2017). Utjecaj tiskovne podloge na kolorimetrijske karakteristike sitotiskarskih termokromnih boja, Završni rad, Grafički fakultet
2. <https://www.ctiinks.com/cold-chain-alerts>
3. Stržić, Jakovljević M., Termokromne tiskarske boje na bazi tekućih kristala, doktorski rad, Grafički fakultet u Zagrebu, 2018.
4. Kulčar R. (2010). Kolorimetrijska analiza i parametri stabilnosti UV-termokromnih boja, Doktorska disertacija, Grafički fakultet
5. Seeboth A., Löttsch D., Thermochromic phenomena in polymers. Shawbury: Smithers Rapra Technology Limited; 2008.
6. <https://www.jatrgovac.com/2015/04/ozujsko-pivo-odsad-s-termoosjetljivom-etiketom/>
7. Ferrara M., Bengisu M., Materials that change color smart materials, Intelligent design, Springer, 2014
8. <http://silverstripe.fkit.hr/kui/assets/Uploads/Osvrti-683-685.pdf>
9. Tomašegović D. (2015). Spektromotometrijsko određivanje kolorimetrijskih karakteristika termokromnih boja na bazi leukobojila, Završni rad, Grafički fakultet
10. Žužić A. (2016). Kolorimetrijska svojstva reverzibilne termokromne tiskarske boje na različitim tiskovnim podlogama, Završni rad, Grafički fakultet
11. http://repro.grf.unizg.hr/media/download_gallery/OSNOVE%20O%20BOJI.pdf
12. R.M. Christie,(2001). Colour Chemistry, RSC Paperbacks, Heriot – Watt University, Scottish Borders Campus, Galashiels, UK
13. <http://sky-rad.com/irreversible-thermochromic/>

