Bartın Orman Fakültesi Dergisi | Journal of Bartin Faculty of Forestry
2025, 27(3): 476 – 489 | DOI: 10.24011/barofd.1711947

Carnauba ve Soya Mumu Kullanılarak Üretilen Biyobazlı Kâğıt Kaplamaların Su Bariyer Özelliklerinin İncelenmesi

Doğan Tutak[1,*]

[1] Marmara Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Basım Teknolojileri Bölümü, İstanbul, Türkiye [2,3] Bartın Üniversitesi, Orman

Makale Tarihçesi
Gönderim: 02.06.2025
Kabul: 21.11.2025
Yayım: 15.12.2025

Araştırma Makalesi

Öz − Gıda uygulamaları için kâğıt ve karton ambalajların kuvvetli nem direncine sahip olmaları ve dispersiyon kaplama uygulamaları, basım ve ambalaj sektörünün önde gelen konularından biri olmuştur. Özellikle direkt veya dolaylı olarak sıvıya temas eden ambalajlar için bu konu daha da önemli hale gelmiştir. Bu çalışmada, kağıtlar, soya proteini izolatı (SPI) baz olmakla birlikte soya mumu ve Carnauba mumu ile karıştırılarak hazırlanan iki farklı yeni dispersiyon bariyer kaplaması ile kaplanmıştır. Uygulanan kaplamaların, kağıtların optik, mekanik ve bariyer özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek için farklı test yöntemleri kullanılmıştır. ASTM E-96 Desiccant yöntemi kullanılarak su buharı bariyeri özellikleri, sarkıt damla yöntemi ve Young denklemi kullanılarak kontak açısı ve yüzey gerilimi, çekme mukavemeti (TS) ve uzama yüzdesi (% EB), spektrofotometre cihazı kullanılarak kaplamalı, kaplamasız ve basılı numunelerin CIE *L*a*b** değerleri, kâğıt ve baskı parlaklığı ölçümleri hazırlanan örnekler üzerinden yapılmıştır. Kaplamaların kâğıt CIE *L*a*b** değerleri 5 değerinin altında kalarak uygun bir kaplama rengine sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kaplamaların kâğıt yüzey ve baskı parlaklığı artmıştır. Kaplamaların bariyer özellikleri, yani su buharı geçirgenliği oranı (WVTR) soya mumu kaplamada %10, Carnauba kaplamada ise %15 değerinde azalma tespit edilmiştir. Yüzey ıslanabilirliği ve su direnci hem soya mumu hem de carnauba mumu eklendiğinde iyileştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler − *soya proteini izolat1ı 1, soya mumu 2, Carnauba mumu 3, kâğıt 4, WVP 5*

Investigation of Water Barrier Properties of Biobased Paper Coatings Produced Using Carnauba and Soy Wax

[1]Marmara University, Faculty of Applied Sciences, Department of Printing Technologies, Istanbul, Türkiye

Article History
Received: 02.06.2025
Accepted: 21.11.2025
Published: 15.12.2025

Research Article

Abstract − The strong moisture resistance of paper and board packaging for food applications and the application of dispersion coatings have become one of the leading topics of the printing and packaging industry. This issue has become even more important, especially for packaging that comes into direct or indirect contact with liquids. In this study, papers were coated with two different new dispersion barrier coatings prepared by mixing soy protein isolate (SPI) base with soy wax and Carnauba wax. Different test methods were used to study the effects of applied coatings on the optical, mechanical and barrier properties of papers. Water vapor barrier properties were measured using the ASTM E-96 Desiccant method, contact angle and surface energy using the pendant drop method and Young's equation, tensile strength (TS) and elongation percentage (% EB), CIE *L*a*b** values of coated, uncoated and printed samples using spectrophotometer, and paper and print gloss measurements were performed on the prepared samples. The paper CIE *L*a*b** values of the coatings remained below 5 and had a suitable coating color. The coatings also increased the paper surface and printing gloss. The barrier properties of the coatings of the water vapor permeability ratio (WVTR) were reduced by 10% for the soy wax coating and 15% for the carnauba wax coating. Surface wettability and water resistance were improved when both soy and carnauba wax were added.

Keywords − *soy protein isolate 1, soy wax 2, Carnauba wax 3, paper 4, WVP 5*

[1] dtutak@marmara.edu.tr
*Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1. Giriş

Kâğıt, kristalin yapıda uzun zincirli selüloz moleküllerinden oluşan ve kristalin yapıyı düzenli olarak bozan amorf bölgeler içeren, mikrofibrillerden oluşan gözenekli bir selüloz yapıya sahiptir (Khwaldia vd., 2010). Paketleme, baskı/yazma, mikroakışkanlık ve ev ürünleri gibi çeşitli uygulamalar için mükemmel bir malzemedir (Tutak, 2025; Rastogi ve Samyn 2015) Kâğıt veya mukavva gibi selülozik substratlar, hafif, düşük fiyatlı, basımı kolay, biyolojik olarak parçalanabilir, geri dönüştürülebilir ve çeşitli endüstrilerde kullanılabilir olmasının yanı sıra iyi mekanik özellikleri nedeniyle gelişen küresel ambalaj pazarında hayati bir rol oynar (Marzbani vd., 2021).

Selüloz hidrofilik bir yapıya sahiptir. Selülozun temel birimindeki OH bölgeleri ($C_6H_{10}O_5$) ve liflerin oluşturduğu ağsı yapıdaki gözenekliliğinden dolayı, kâğıdın su buharı bariyer özellikleri sınırlıdır. Bundan dolayı kâğıt veya karton ambalaj çevreden veya gıdadan kolayca su emerek fiziksel ve mekanik mukavemetini kaybeder. (Jung, vd., 2018; Jahangiri vd., 2024). Bu nedenle bariyer özelliklerini geliştirmek için, kâğıt genellikle selüloz, nişasta, kazeinatlar, izole soya proteini, glüten, zein, kitosan, aljinat gibi yenilenebilir biyopolimerler kullanılarak kaplanır. Bu polimerler liflerden oluşan kâğıt yüzeyindeki gözenekleri doldurarak yoğun bir tabaka oluşturur. Kâğıt yüzeyine parlaklık, matlık, dolgunluk ve yüzey düzgünlüğü gibi farklı özellikler kazandırır (An vd., 2008; Basak vd., 2024;). Biyobozunur polimerler, kalıcı mikroplastikler oluşturmadıkları için plastiklere veya plastik kaplı kağıtlara potansiyel alternatifler sunarlar. Nişasta, selüloz ve bazı polyesterler, yapılarında hidrolize edilebilir ester bağlarının bulunması nedeniyle biyobozunur ya da kompostlanabilirler (Yadav vd., 2024).

Biyopolimerler arasında, mumlar ve uzun zincirli yağ asitleri gibi lipit malzemeler yüksek hidrofobisiteye ve düşük polariteye sahiptir. Bu, onları kâğıt veya karton üzerine kaplandığında, nem geçirgenliğini azaltmak için umut verici bir çözüm haline getirir. Bunun yanında, mum ve selüloz liflerinin geri dönüşümü sırasında hamur haline getirirken kolayca ayrılabilirler (Wang vd., 202; Jahangiri vd., 2024;).

Gıda bileşenlerinin birbirleriyle etkileşimi ve ambalaj malzemesiyle sürekli teması, zamanla besin değerinde değişikliklere neden olabileceğinden, gıda ile temas eden malzemelerin yüksek performanslı, düşük maliyetli, çevresel kaygı yaratmayan ve geri dönüştürülebilir olmasının yanı sıra iyi bariyer özelliklerine de sahip olması gerekmektedir (Alamri vd., 2021; Geueke vd., 2018).

Soya mumu, bol miktarda bulunan doğal soya fasulyelerinden elde edilir. Bu nedenle, soya fasulyesi mumu ucuzdur, doğaldır ve çevre kirliliği olmadan biyolojik olarak parçalanabilir, bu da sağlık ve çevreyi koruma açısından büyük avantajlara sahiptir. Soya fasulyesi mumunun ana bileşeni, stearik asitten oluşan triasilgliserittir (Shen vd., 2020). Soya yağı, çeşitli yağ asitlerinden oluşur: palmitik asit (%10), stearik asit (%4), oleik asit (%18), linoleik asit (%55) ve linolenik asit (%13) (Clemente ve Cahoon, 2009). Nikel katalizörü ile yüksek sıcaklıkta hidrojenasyon işlemi, yağdaki doymamış yağ asitlerini doymuş bir forma dönüştürür. Bu prosedür, soya yağının kimyasal olarak stabilize olmasını ve erime sıcaklığını yükselterek, soya mumuna dönüştürür (Shaharuddin vd., 2023). Kâğıt kaplama malzemesi olarak da yoğun bir şekilde kullanılmaktadır.

Brezilya palmiyesi Copernicia prunifera'nın (Mill.) H. E. Moore yaprak eksüdatından elde edilen carnauba mumu, toksik olmayan doğal bir üründür. Hidrokarbonlar, yağ asitleri, hidroksile edilmiş yağ asitleri, uzun zincirli alkoller, dioller, esterler ve ana bileşeni mirisil serotat olan sinamik asit türevlerinin bir karışımı olan doymamış mum örneklerinden oluşur. Oldukça hidrofobik bir yapıya sahiptir ve orta sarı renktedir. Kâğıt kaplaması olarak uygulandığında potansiyel bariyer özelliklerine sahiptir (dos Santos vd., 2023; Mendonça vd., 2024). Carnauba mumu en sert mumdur ve ticari doğal mumlar arasında en yüksek erime noktasına ve düşük çözünürlüğe sahiptir ve ağırlıklı olarak sinnamik asidin alifatik esterleri ve diesterlerinden oluşur.

Bileşenleri nispeten inert ve kararlıdır. Bu ve diğer özellikleri nedeniyle carnauba mumu gıda ve kâğıt kaplama malzemesi olarak da kullanılmaktadır (de Freitas vd., 2019).

Bu çalışma, soya protein izolatı bazlı, soya mumu ve carnauba mumu ile güçlendirilerek hazırlanmış olan kâğıt kaplama malzemesinin su bariyer özelliğinin artırılmasını amaçlamıştır. Kaplamalar başarılı bir şekilde hazırlandıktan ve baz kâğıt üzerine uygulandıktan sonra, kağıtların optik özellikleri, mekanik özellikleri, basılabilirlik özellikleri, su ve su buharı bariyer özellikleri incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışmada, baz kâğıt olarak 80 g/m2 Staples marka, 30% geri dönüştürülmüş birinci hamur kâğıt kullanılmıştır. Kullanılan birinci hamur baz kâğıdın teknik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Kaplamalarda bağlayıcı olarak soya protein izolatı (SPI), nem direncini artırmak ve su buharı geçirmezlik sağlamak için Soya mumu ve Carnauba mumu, plastikleştirici olarak Gliserol, pH dengeleyici olarak NaOH kullanılmıştır. Soya protein izolatı, Axio supply company'den, Carnauba mumu Essential Labs Company'den, Soya mumu Candlewic Company'den temin edilmiştir. Diğer kimyasallar Merck Amerika firmasından temin edilmiştir.

Tablo 1
Baz kâğıt teknik özellikleri

Gramaj	g/m^2	80
Kâğıt kalınlığı	µm	98,04 ± 3
Yüzey pürüzlülüğü	ml/min	178,66
Opaklık (Opacity)	%	91,3
Pürüzlülük (Porosity)	ml/min	13,99
Parlaklık (Gloss)	75°	6,45
	L*	94,3
CIE	a*	1,73
	b*	-7,68

2.1. Kaplamaların hazırlanması

Öncelikle, damıtılmış (DI) su 500 ml'lik bir beherde, manyetik karıştırıcı üzerinde 70°C'ye kadar ısıtılmış ve soya protein izolatı (SPI) eklendikten sonra 10 dakika süreyle 500 rpm'de karıştırılmıştır. Karıştırma süresinde önce Gliserol, daha sonra ayrı ayrı karışımlarda, 40°C de eritilen soya mumu ve 80°C de eritilen carnauba mumu eklenmiştir. pH ölçümü sonrasında pH değeri 9-9.5 aralığına gelinceye kadar NaOH eklenerek kaplamalar hazırlanmıştır (Tablo 2). Laboratuvar tipi kâğıt kaplama cihazında, laboratuvar koşullarında kaplamalar Meyer 18 numaralı çubuk kullanılarak baz kâğıt yüzeyine tek kat olarak uygulanmıştır. Uygulama işlemi, kurutulma işlemi ve ölçümler 23°C oda sıcaklığında ve %50 nem değerinde bulunan şartlandırma odasında yapılmıştır.

Tablo 2
Kaplama formülasyonu

Formül	DI su (ml)	Soya Protein İzolat (g)	Gliserol (g)	Soya mumu (g)	Carnauba mumu (g)	NaOH (g)
F0	0	0	0	0	0	*
F1	100	12	1	3	0	*
F2	100	12	1	0	3	*

* pH değeri 9-9.5 aralığına ulaşıncaya kadar eklenmiştir.
** Formülasyonda F0 kaplanmamış ve üzerinde herhangi bir işlem yapılmamış base kâğıdı ifade etmektedir.

Kaplamaların ağırlık yüzdesi (alt tabakanın kütlesine göre) Formül 1'e göre hesaplanmıştır. Kaplamaların kalınlığı, kaplanmamış ve kaplanmış kağıtların toplam kalınlık farkları, pürüzlülük (roughness) değerleri Roughness – Sheffield, TAPPI T538'e, parlaklık (gloss) değerleri TAPPI-T-480 om-20'ye göre 75° ve opaklık (opacity) değerleri TAPPI Method T425'e göre Technidyne Profile Plus hassas ölçüm cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Genel olarak, kaplama kalınlıkları 3-10 µm arasında kalınlık göstermiştir. Kaplama kalınlığı ölçümleri için, kaplanmış kağıtların genişliği ve uzunluğu boyunca farklı pozisyonlarda en az 5 ölçüm yapılmıştır. Kaplamaların ağırlık miktarının ölçümü için, ortalama en az 3 numune ölçülmüştür. Kaplamaların, kaplama ağırlığı ve toplam kalınlıkları Tablo 3'de gösterilmiştir.

$$Kaplama\ ağırlığı\ \% = \frac{\text{Kaplanmış kağıt } \left(\frac{g}{m^2}\right) - Kaplanmamış\ kağıt\ \left(\frac{g}{m^2}\right)}{Kaplanmamış\ kağıt\ \left(\frac{g}{m^2}\right)}\ x\ 100 \quad (1)$$

Tablo 3
Kaplamalı kağıtların toplam kaplama kalınlığı ve ağırlık yüzdesi

Formül	Toplam Kalınlık (µm)	Kaplama ağırlığı (%)
F0	98,04 ± 0,51	None
F1	101,09 ± 0,96	6,82 ± 1,91
F2	104,13 ± 1,27	9,29 ± 2,34

2.2 Su Buharı Bariyeri Özellikleri

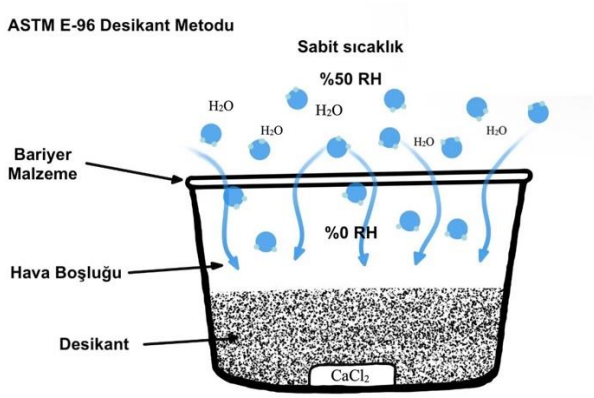
Baz kâğıt ve kaplanan kağıtlar, su buharına karşı bariyer özelliklerinin değerlendirilmesi için Thwing-Albert, 68-3000 Vapometer EZCups kullanılarak, ASTM E-96 Desiccant Method yöntemi (Şekil 1) ile 23°C sıcaklık, %50 bağıl nem (RH) koşullarında Caron 6010 şartlandırma dolabında şartlandırılarak ölçülmüştür. Teste başlamadan önce, baz kâğıt, kaplanmış kağıtlar ve CaCl2 kaplara yerleştirilmiş, ağırlıkları tartılmış ve kayıt altına alınmıştır. Şartlandırma dolabına yerleştirilen örnekler, her 24 saatte bir olmak üzere 7 gün boyunca tartılarak kaydedilmiştir. Bu adımdan sonra, su buharı iletim oranını (WVTR) belirlemek için hesaplamalar yapılmıştır (Formül 2) (Al-Ajlouni vd., 2023). Baz kâğıt ve kaplanmış kağıtlar için üç örnek analiz edilmiştir. Kaplamaların WVTR değerleri g/(m2gün) olarak gösterilmiştir.

$$WVTR = \frac{m}{A*t} = \frac{(\frac{m}{t})}{A} \quad (2)$$

m: Kağıtlardan geçen su buharının veya nemin kütle değişimi (g),

A: cm^2 cinsinden alan,

t: gün ve m/t, g/gün cinsinden doğrunun eğimidir. H_2O



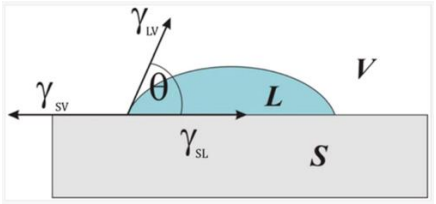
Şekil 1. ASTM E-96 Desiccant Metodu

2.3 Çekme mukavemeti (TS) ve uzama yüzdesi (% EB)

Kaplamalı ve kaplamasız kağıtların kopma ve uzama özelliklerinin tespiti için "Instron" çekme mukavemeti test cihazı kullanılmıştır. Çekme mukavemeti (TS) ve kopma anındaki uzama yüzdesi (% EB), TAPPI T 494 om-01 "Kâğıdın çekme testi" ne uygun olarak yapılmıştır. Örneklerin mukavemeti ve uzaması, 10 cm × 1,5 cm hazırlanan şeritlerinin her iki ucuna, kopma noktasına kadar 500 N kuvvet uygulanması sonucunda ölçülmüştür. Her bir kaplama için 5'er örnek ölçülmüştür.

2.4 Kontak açısı ve yüzey gerilimi

Yüzey gerilimi ve kontak açısı, FTA200 cihazı ile sarkıt damla analizi kullanılarak ölçülmüştür. Ölçüm üç farklı sıvı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. (Arıtılmış DI su, n-Hekzadekan, Metilen iyodür (MI)). Yüzey geriliminin ölçülmesi için, sıvı bir iğne pompasıyla cam slayt üzerindeki baz kâğıt ve kaplanmış kağıtların yüzeyine düşerken ve düştükten sonra damlaların 310 görüntüsü çekilmiştir. Her örnekten 5 farklı ölçüm alınmıştır. Hesaplamalar, damladan önceki sıvının son durumuna göre yapılmıştır. Yüzey gerilimi görüntüsü, damlacık iğne ucundan ayrılmak ve alt tabakaya inmek üzereyken seçilmiştir. Kontak açısı, damlacığın alt tabaka yüzeyine dokunduğu ve eksenel simetrik bir menisküs şekline sahip olduğu görüntülerden seçilmiştir. Kontak açıları, Young denklemi (Formül 3) kullanılarak hesaplanmıştır. Yüzey serbest enerjisinin hesaplanmasında Owens-Wendt modeli kullanılmıştır, Islanma ve yayılma görüntüleri Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Kontak açısı (Altay vd., 2020).

SV katı-buhar ara yüz enerjisidir; SL katı-sıvı ara yüz enerjisidir; LV sıvı-buhar ara yüz enerjisidir ve sıvı damlasının sıvı-buhar ara yüzü ve katı-sıvı ara yüzleri boyunca uzanan teğet çizgiler arasındaki kontak açısıdır (Altay vd., 2022).

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos\theta \quad (3)$$

2.5 Kaplamalı, kaplamasız ve basılı numunelerin CIE L*a*b* değerleri

Kaplamaların yüzeyine "Vanson, Quickson Pro® Process" magenta ofset baskı mürekkebi kullanılarak, baskıya uygun test cihazında, 400 N basınç altında IGT C1 test baskı cihazı ile ISO 2864-1:2017 standardına uygun olarak baskılar yapıldı. Baskılar tamamlandıktan sonra kağıtlar tam kurumanın gerçekleşmesi için 24 saat şartlandırılmış odada (23°C sıcaklık ve %50 RH) bekletilmiştir. Kaplamasız, kaplanmış ve basılı numunelerin CIE *L*a*b** ölçümleri bir X-Rite eXact Spektrofotometresi ile yapıldı. Spektrofotometrenin ölçüm koşulları, 400–700 nm aralığında bir D50 aydınlatıcı ve 2° gözlemci açılı ve 0/45° geometrili bir polarizasyon filtresi olarak belirlendi (Tutak 2017). Renk ölçümleri, ISO 12647-2 standardına göre CIE *L*a*b** renk sistemi ile yapıldı. Ölçülen renk farkları, CIE76 standardına göre (Formül 4) ile hesaplandı.

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(L^*_2 - L^*_1)^2 + (a^*_2 - a^*_1)^2 + (b^*_2 - b^*_1)^2} \quad (4)$$

Bir rengi tarif etmek için basit değerler kullanılabilir. CIE *L*a*b** sisteminde;

*L** = Lightness-Parlaklığı,

*a** = kırmızı/yeşil değerini,

*b** = sarı/mavi değerini,

ΔE^*_{ab} = renk farkını gösterir. (Tutak, 2013)

2.6 Kâğıt ve baskı parlaklığı

Kaplamalı ve kaplamasız kağıtların parlaklığı, TAPPI-T-480 om-20'ye göre 75° (kâğıt düzleminden 15°) geometriye sahip "Technidyne PROFILE/Plus® 75º Gloss" Glossmeter kullanılarak ölçülmüştür. Basılı kağıtların parlaklığı, ISO 2813:2014'e göre BYK Gardner GmbH mikro Tri-gloss (60° geometri) ölçüm cihazı ile ölçülmüştür.

2.7 ATR-FTIR ölçümleri

Kaplamalı ve kaplamasız kağıtların ATR-FTIR spektrum ölçümleri "PerkinElmer Spectrum 100 FT-IR Spectrometer" cihazı ile ölçülmüştür.

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışmada, soya mumu ve carnauba mumu kullanılarak hazırlanmış kâğıt yüzey kaplamaları 80 g/m2 baz kâğıt üzerine başarılı bir şekilde kaplanmıştır. Kaplamalar üzerinden kağıtların optik, fiziksel ve mekanik ölçümleri yapılmıştır. Üzerine ofset baskı mürekkebi uygulanarak basılabilirlik parametreleri ölçülmüştür. Kaplanmış ve kaplanmamış kağıtların su ve su buharına karşı davranışları da test edilmiştir. Ölçüm sonuçları, tablolar ve şekiller ile aşağıda açıklanmıştır.

3.1 Kontak açıları ve yüzey gerilimi

Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen kontak açıları ve yüzey gerilimi değerleri Tablo 4'te sunulmuştur.

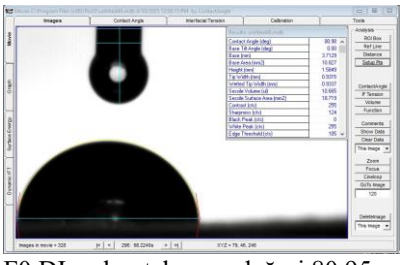
Tablo 4

Kaplamalı ve kaplamasız kağıtların kontak açıları ve yüzey gerilimi değerleri

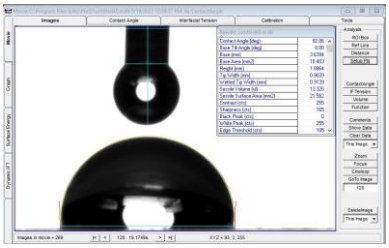
	Deiyonize su (DI)				n-Hekzadekan				Metil iyodür (MI)			
Kâğıt Kaplama Tipi	Kontak açısı, cam üzeri [derece]	STDEV	Yüzey gerilimi, [mN/m]	SSTDEV	Kontak açısı, cam üzeri [derece]	STDEV	Yüzey gerilimi, [mN/m]	STDEV	Kontak açısı, cam üzeri [derece]	STDEV	Yüzey gerilimi, [mN/m]	STDEV
0	80,95	2,34	60,16	1,09	18,94	1,47	19,16	0,31	37,58	1,56	15,07	2,18
F1	92,28	2,82	60,31	1,04	28,78	2,95	19,48	0,48	42,23	2,65	14,62	2,75
F2	81,01	5,89	60,28	1,11	28,46	5,72	19,83	0,58	43,05	1,26	18,02	1,51

* STDEV: Standard deviation

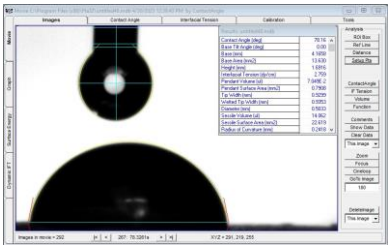
Tablo 4'de DI su, n-Hekzadekan ve Metilen iyodid (MI) ile yapılan ölçümlerin değerleri sunulmuştur. Değerleri incelendiğinde, DI su ile yapılan ölçümlerde en düşük kontak açısı değerinin kaplanmamış kâğıt yüzeyinde oluştuğu görülmektedir. Carnauba mumu kaplı kâğıt yüzeyi de kaplanmamış kâğıt yüzeyine benzer bir özellik göstermiştir. Pürüzlü yüzey yapısının varlığı, hidrofobisite için özellikle önemlidir, çünkü yüzey düşük yüzey enerjili malzemelerle modifiye edilmiş olduğunda, su temas açısı 120°'yi geçemez (Zhang vd., 2023). Mendonça'nın bir çalışmasında; carnauba mumu formasyonundaki doğal kauçuk, temas açısı değerini (80,83° ve 88,13°) düşürmüş ve ıslanabilirlik değerini (0,06 ve 0,08 °/s) artırmıştır (Mendonça vd., 2024). Şekil 3 incelendiğinde Carnauba mumu kullanılan kaplama kontak açısında ise ciddi bir değişme gözlenmemiştir. Literatür ile uyumluluk göstermektedir. n-Hekzadekan ve Metilen iyodid (MI) için temas açıları ise baz kağıda göre yükselmiştir. Yükselme miktarları n-Hekzadekan için F1 %51,9, F2 için ise %50,2'dir. İki değer birbirine çok yakındır. Metilen iyodid (MI) için F1 %12,3, F2 için ise %14,5'dir. Bu iki değerde birbirine çok yakındır.



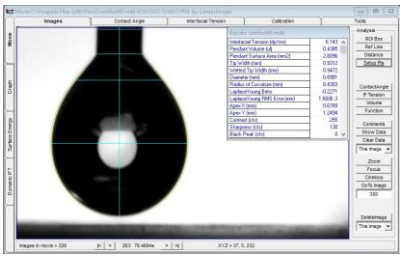
F0 DI su kontak açısı değeri 80.95



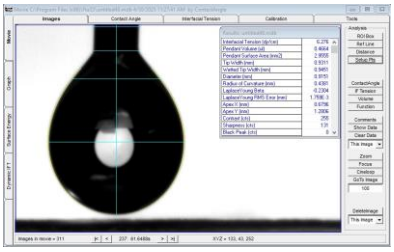
F1 DI su kontak açısı değeri 92.28



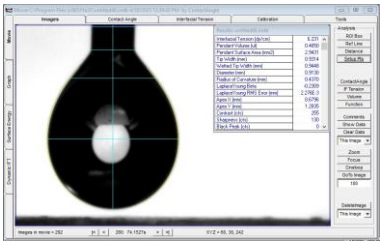
F2 DI su kontak açısı değeri 81.01



F0 DI su yüzey gerilimi değeri 60.16



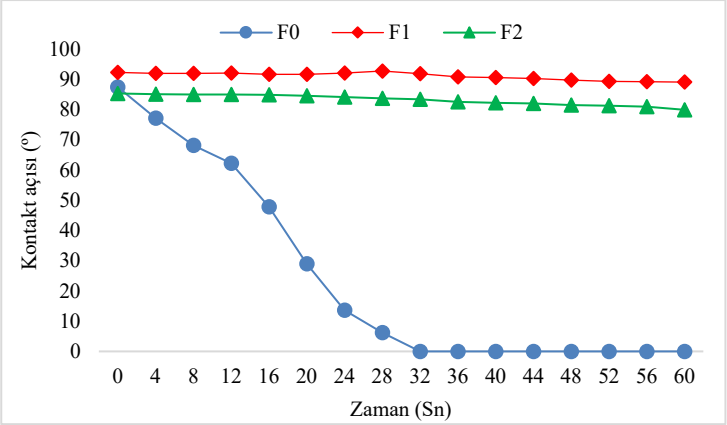
F1 DI su yüzey gerilimi değeri 60.31



F2 DI su yüzey gerilimi değeri 60.28

Şekil 3. Kaplanmış ve kaplanmamış kağıtların kontak açısı ve yüzey gerilimi.

Şekil 3, FTA200 cihazıyla yakalanan görüntülerden kaplamalar üzerindeki saflaştırılmış DI suyunun sarkıt damlacıklarını ve yüzey kontak açılarını göstermektedir. Ancak kaplamalı kağıtlarda özellikle soya mumu kullanılan kaplama için, yüzey kontak açısını baz kâğıda göre yaklaşık olarak %14 civarında artırmıştır.

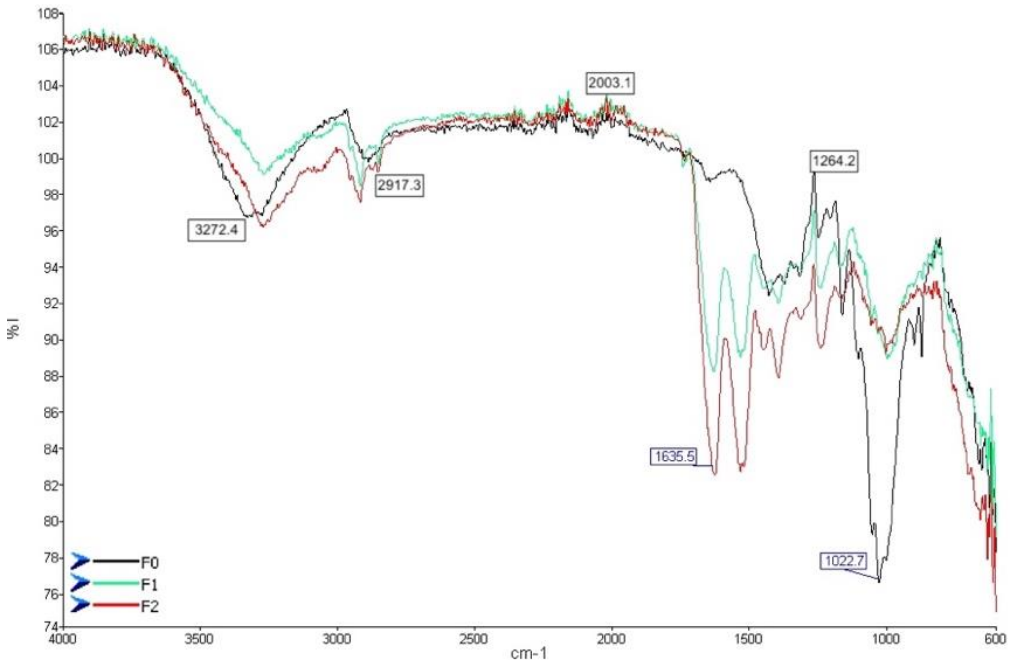


Şekil 4. Kontak açısının zamana bağlı değişimi (DI su için)

Kontak açısı, zamana bağlı olarak değerlendirildiğinde, baz kâğıt değerlerinin hızla azaldığı ve 32. saniyede tamamen emildiği ve sıfırlandığı Şekil 4'te görülmektedir. Bunun nedeni kaplamasız olan kağıtlarda, hidrofobik olan kâğıt liflerinin suyu daha hızlı emmesi olarak kabul edilebilir. Soya mumu ve Carnauba mumu kaplamalı kâğıtlarda ise kaplamalar liflerin üzerini örterek liflerin suya olan ulaşımını engellediği için emilme kaplamasız kağıtlara göre farklı davranış göstermiş çok az emilim gerçekleşmiştir.

3.2 ATR-FTIR spektrumları

Soya mumu ve carnauba mumu kullanılarak hazırlanan kaplama formülasyonları baz kâğıt yüzeyine kaplanmıştır. Baz ve kaplanmış kağıtların kimyasal yapıları ATR-FTIR ile sunulmuştur. Şekil 5, Baz kâğıt ve kaplanmış kağıtların ATR-FTIR spektrumlarını göstermektedir.



Şekil 5. Baz kâğıdın, soya mumu ve carnauba kaplamalı kâğıdın ATR-FTIR spektrumları. F0: Baz kâğıt, F1: Soya mumu içerikli kaplanmış kâğıt, F2: Carnauba mumu içerikli kaplanmış kâğıt.

Şekil 5'e göre, alkali kâğıt substratı 3272 cm^{-1}'de -OH gerilme modu, 2917 cm^{-1}'de C-H gerilmesi Alifatik zincirlerde karakteristiktir ve yüksek oranda doymuş hidrokarbon zinciri içerdiğini doğrular. Balmumu ve yağ yapısının temel bileşenini göstermektedir. 1635 cm^{-1} bandının artışı oksidasyon veya karbonil oluşumunu göstermektedir. 1022 cm^{-1}'de C-O gerilme modu gliserol ester bağlarını işaret etmektedir. Bu bulgular literatürle tutarlıdır (Arman Kandirmaz ve Ozcan, 2019). Ayrıca, soya mumuna ve carnauba kaplı kağıtlara bakıldığında 3300 cm^{-1} bölgesinde geniş bir tepenin varlığı, O–H gerilme titreşimlerine atfedilebilir. Soya mumu ve diğer bitkisel mumlar, uzun zincirli yağ asitleri ve doymuş hidrokarbonlardan oluşur. Doğal mumlar, hidroksil grubu gerilme titreşimlerine yol açan steroller, sterol esterleri ve uzun zincirli alkollerden oluşur. Soya mumu ve carnauba mumu birbirleri ile örtüşen özellikler göstermiştir (Sena vd., 2022).

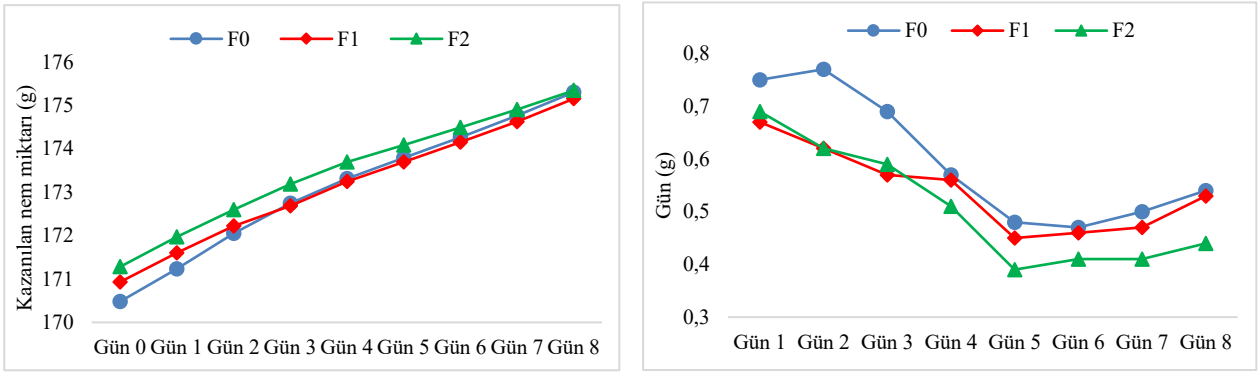
3.3 Su Buharı Bariyeri Özellikleri

Baz kâğıt ve kaplanmış kağıtlar su buharı bariyer özelliği açısından değerlendirilmiş ve sonuçlar Tablo 5'de verilmiştir. Kaplama yapılan kağıtlarda WVTR değerinde düşüş tespit edilmiştir. Su buharı geçirgenliğinde F1'de yaklaşık %10, F2' de ise yaklaşık %15 azalma tespit edilmiştir.

Tablo 5
Baz kâğıdın, soya mumu ve carnauba kaplamalı kâğıtların toplam nem kazanımları (g/m2/gün)

For-mül	Kütle değişimi (g)	WVTR (g/m^2/gün)
F0	4,77	188,26
F1	4,33	170,91
F2	4,06	160,24

Şekil 6 incelendiğinde kağıtların 8 gün boyunca düzenli nem artışına sahip olduğu görülmektedir. Yapılan testler kaplanmış ve kaplanmamış numuneler arasında farklılıklar gösterirken, carnauba ve soya mumu kaplaması su buharına karşı daha iyi bariyer görevi görmüştür.



Şekil 6. Baz kâğıdın, soya mumu ve carnauba kaplamalı kâğıtların nem kazanım değerleri

Balmumu hidrofobik olduğu için su buharının kâğıttan geçmesini zorlaştırır. Su buharı hidrofilik bölgelerden daha kolay geçer. Kâğıt kaplamasına hidrofobik bir malzeme eklendiğinde su moleküllerinin kâğıdın içerisinden geçmesi zorlaşır (Mendonça vd., 2024). Carnauba mumundaki düşük polar bileşik (ester grupları) konsantrasyonu ve yüksek alkan konsantrasyonu, su buharı bariyer özelliklerinden sorumludur. Bununla birlikte, carnauba mumu, su buharıyla etkileşime girecek kadar hidrofilik bileşenler içerir ve bu nedenle malzemelerin su buharı geçirgenliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (de Campos vd., 2019). Kaplamasız kâğıda göre her iki kaplanmış kâğıdın da daha az su buharı geçirdiği tespit edilmiştir.

3.4 Çekme mukavemeti (TS) ve uzama yüzdesi (% EB)

Kâğıt için mekanik özellikleri farklı uygulamalar için kritik büyük önem taşır. Çekme mukavemeti ve uzama yüzdesi malzemenin dayanıklılığını ve yükte gösterdiği performansı ortaya koyar. Tablo 6'da kaplamalı ve kaplamasız kağıtların çekme mukavemeti ve uzama yüzdesi değerleri verilmiştir.

Tablo 6
Kaplamalı ve kaplamasız kağıtların Çekme mukavemeti (TS) ve uzama yüzdesi (% EB) değerleri

Formül	F0		F1		F2	
Kâğıt su yönü	MD	CD	MD	CD	MD	CD
Kopma Değeri	6,797	3,133	8,35	3,67	8,75	3,629
Uzama Değeri	1,31	2,27	3,41	4,43	2,97	3,41

Kâğıt, lif yöneliminden kaynaklanan anizotropik bir malzemedir ve mekanik özellikleri Makina yönünde (MD) ve Makine yönünün tersinde (CD) yönlerinde farklılık gösterir. Genellikle MD kağıtlarda daha sert ve dirençlidirler ve daha düşük uzama gösterirler. Bu davranış, çok katmanlı kağıtlar için de geçerlidir (dos Santos vd., 2023). Liflerin nemle paralel olarak ayrılması ve kurutmayla oluşan horni-fikasyon, lifler arasındaki etkileşimlerin engellenmesine ve bu da liflerin mukavemetinin azalmasına neden olmuştur (Rhim, 2010).

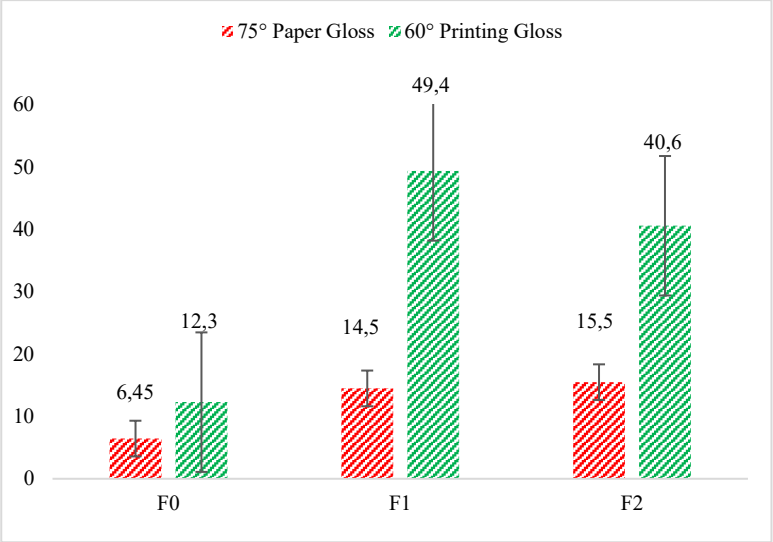
Kaplanmış kağıtların kopma ve uzama değerlerine bakıldığında, kaplanmış kağıtların kopma değerlerinin CD baz kâğıda göre çok fazla bir değişim gözlenmezken, MD bir miktar arttığı tespit edilmiştir. Uzama değerlerinde ise tabloya göre hem MD hem de CD değerler artmıştır.

3.5 Pürüzlülük (Roughness) ve Parlaklık (Gloss) değerleri

Tablo 7
Kaplamalı ve kaplamasız kağıtların Pürüzlülük (roughness) değerleri

Kâğıt Türü	**Pürüzlülük (Roughness)** (ml/min)
F0	178,66
F1	162
F2	446

Tablo 7'ye göre pürüzlülük (roughness) değerleri incelendiğinde, soya mumu kullanılan kaplamada %9'luk bir azalma tespit edilirken, Carnauba mumu kaplanmış kâğıtta ise soya mumunun tam aksine %250'lik bir artış tespit edilmiştir.



Şekil 7. Kâğıt ve baskı parlaklığı değerleri

Şekil 7 kâğıt ve baskı parlaklıkları incelendiğinde, her iki kaplama türünün de hem kâğıt parlaklığını artırdığı hem de baskı parlaklığını artırdığı görülmektedir. Soya mumu kaplamalı kâğıtta baskı parlaklığı yaklaşık olarak 4 kat artarken carnauba mumu kaplamalı kâğıtta bu oran 3 kat olarak tespit edilmiştir.

3.6 CIE*L*a*b** ve ΔE^*_{ab} değerleri

Basım endüstrisinde renk farkı toleransı genellikle 1 ve 6 ΔE^*_{ab} arasındadır. Bu, tolerans küresinin dışında olan örneklerin standarttan 6 ΔE^*_{ab} birimden daha fazla uzaktadır demektir. ΔE^*_{ab} 1'den az olan toleranslar göz tarafından ayırt edilememekle birlikte genellikle matbaacının prosesinde elde edilemeyen toleranslardır. 2-4 ΔE^*_{ab} birimine kadar uzaklığı olan örnekler genellikle çoğu gözlemci tarafından referans renkten pek ayırt edilemezler. Matbaacılıkta genellikle ΔE^*_{ab} 2-3 fark kabul edilebilir farktır. Ofset baskı renk farkı standardı olan ISO 12647-2'ye göre ΔE^*_{ab} 4-5 kabul sınırları içindedir (Tutak, 2013).

Hem kâğıt kaplamalarının hem de baskı CIEL*a*b* ve ΔE*ab değerlerinin karşılaştırılması sonucunda, kaplanmış kâğıt CIEL*a*b* ve ΔE*ab değerleri ISO standart değerlerine göre 5 değerinin altında kalarak kabul edilebilir sınırlar içerisinde yer almaktadır. Bu sonuçlar bize kaplamaların başarılı olduğunu gösterir.

Tablo 8
Baz ve kaplanmış kağıtların CIEL*a*b* ve ΔE*ab değerleri

	*L**	*a**	*b**	ΔE^*_{ab}(CIE76)
ISO Std.	95	0	-2	Ref.
F0	94,3	1,73	-7,68	5,97
F1	93,19	1,44	-5,94	4,56
F2	92,21	1,01	-3,43	3,29

Tablo 9'da baskılı kâğıt CIE*L*a*b** ve ΔE^*_{ab} değerleri incelendiğinde, standart değerlerin çok üzerinde ölçülmüştür. Kabul edilebilir değerlerin ΔE^*_{ab} 0 ile 5 arasında olduğu düşünüldüğünde, elde edilen değerler baskı için kabul edilemez aralıktadır.

Tablo 9

Baskılı kağıtların CIE *L*a*b** ve ΔE^*_{ab} değerleri

	*L**	*a**	*b**	ΔE^*_{ab} (CIE76)
ISO Std.	56	61	-1	Ref.
F0	47,82	63,93	12,86	16,3
F1	47,43	64,86	10,18	14,6
F2	44,78	71,71	7,22	17,5

4. Sonuçlar

Soya protein izolatı bazlı, soya mumu ve carnauba mumu ile güçlendirilerek hazırlanmış olan kâğıt kaplama malzemesinin kullanıldığı bu çalışmada, su ve su buharına karşı daha güçlü direnç gösterebilecek bir kâğıt kaplama malzemesi amaçlanmıştır. Baz kâğıda uygulanan bu kaplamaların kâğıt üzerinde parlaklığa, su buharı geçirgenliğine ve mekanik özelliklerine etkileri tespit edilmiştir.

Kaplamaların WVTR testi sonuçları göstermiştir ki kaplanmış kağıtlar baz kâğıda göre daha az su buharı geçirgenliğine sahiptir. WVTR değerinde düşüş tespit edilmiştir. Su buharı geçirgenliğinde soya mumu kaplamada yaklaşık %10, carnauba mumu kaplamada ise yaklaşık %15 azalma tespit edilmiştir. Bu da uygulanan kaplamalarda istenilen sonuca ulaşıldığını göstermektedir.

Kâğıdın emicilik özelliğini gösteren kontak açısı değerleri incelendiğinde, her iki kaplamanın da son derece başarılı olduğu tespit edilmiştir. Baz kâğıt yüzeyi kontak açısı hızlıca sıfırlanırken (yani su hızlıca emilirken), her iki kaplanmış kâğıdın da kontak açısı değerleri bir dakika süreyle neredeyse hiç değişmeden formunu korumuştur. Her iki kaplamada bu karakteristik özelliği ile su emilimine engel olmuştur.

Kağıtların yüzey kaplamalarının *CIEL*a*b** ve ΔE^*_{ab} değerleri incelendiğinde kaplamaların *CIEL*a*b** ve ΔE^*_{ab} değerleri 5 değerinin altında kalmıştır ve standartlara uygunluk göstermiştir. Ancak aynı şey baskı değerleri için söylenemez.

Kaplanmış kağıtların kopma değerlerinin makina yönünde bir miktar arttığı tespit edilmiştir. Uzama değerlerinde ise hem makina yönünde hem de makine yönünün tersinde uzama değerleri artmıştır.

Kaynaklar

Al-Ajlouni, K, Fleming, P.D., Pekarovicova A. (2023). Crosslinking of glucomannan-based biofilms by tartaric acid: Rheology and barrier properties of the biofilms for food packaging. International Circular of Graphic Education and Research, 6(14), 26-36.

Alamri, M. S., Qasem, A. A., Mohamed, A. A., Hussain, S., Ibraheem, M. A., Shamlan, G., ... and Qasha, A. S. (2021). Food packaging's materials: A food safety perspective. Saudi Journal of Biological Sciences, 28(8), 4490-4499. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.04.047

Altay, B. N., Ma, R., Fleming, P. D., Joyce, M. J., Anand, A., Chen, T., ... and He, D. (2020). Surface free energy estimation: A new methodology for solid surfaces. Advanced Materials Interfaces, 7(6), 1901570. https://doi.org/10.1002/admi.201901570

Altay, B. N., Fleming, P. D., Rahman, M. A., Pekarovicova, A., Myers, B., Aydemir, C., & Karademir, A. (2022). Controlling unequal surface energy results caused by test liquids: the case of UV/O3 Treated PET. Scientific Reports, 12(1), 6772. https://doi.org/10.1038/s41598-022-10816-6

An, J., Zhang, M., Wang, S., and Tang, J. (2008). Physical, chemical and microbiological changes in stored green asparagus spears as affected by coating of silver nanoparticles-PVP. LWT-Food Science and Technology, 41(6), 1100-1107. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.06.019

Arman, Kandirmaz, E., and Ozcan, A. (2019). Antibacterial effect of Ag nanoparticles into the paper coatings. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 34(4), 507-515. https://doi.org/10.1515/npprj-2019-0034

Basak, S., Dangate, M. S., and Samy, S. (2024). Oil-and water-resistant paper coatings: A review. Progress in Organic Coatings, 186, 107938. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107938

Clemente, T. E., & Cahoon, E. B. (2009). Soybean oil: genetic approaches for modification of functionality and total content. Plant physiology, 151(3), 1030-1040. https://doi.org/10.1104/pp.109.146282

de Freitas, C. A. S., de Sousa, P. H. M., Soares, D. J., da Silva, J. Y. G., Benjamin, S. R., & Guedes, M. I. F. (2019). Carnauba wax uses in food–A review. Food chemistry, 291, 38-48. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.133

de Campos, A., Claro, P. C., Luchesi, B. R., Miranda, M., Souza, F. V., Ferreira, M. D., & Marconcini, J. M. (2019). Curaua cellulose sheets dip coated with micro and nano carnauba wax emulsions. Cellulose, 26(13), 7983-7993. https://doi.org/10.1007/s10570-019-02637-0

dos Santos, A. D. A., Matos, L. C., Mendonça, M. C., do Lago, R. C., dos Santos Muguet, M. C., Damásio, R. A. P., ... & Tonoli, G. H. D. (2023). Evaluation of paper coated with cationic starch and carnauba wax mixtures regarding barrier properties. Industrial Crops and Products, 203, 117177. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117177

Geueke, B., Groh, K., and Muncke, J. (2018). Food packaging in the circular economy: Overview of chemical safety aspects for commonly used materials. Journal of cleaner production, 193, 491-505. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.005

Jung, J., Raghavendra, G. M., Kim, D., and Seo, J. (2018). One-step synthesis of starch-silver nanoparticle solution and its application to antibacterial paper coating. International journal of biological macromolecules, 107, 2285-2290 https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.10.108

Khwaldia, K., Arab-Tehrany, E., & Desobry, S. (2010). Biopolymer coatings on paper packaging materials. Comprehensive reviews in food science and food safety, 9(1), 82-91. https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2009.00095.x

Marzbani, P., Azadfallah, M., Yousefzadeh, M., Najafi, F., Pourbabaee, A. A., Koivula, H., and Ritala, M. (2021). Effect of polyethylene wax/soy protein-based dispersion barrier coating on the physical, mechanical, and barrier characteristics of paperboards. Journal of Coatings Technology and Research, 18, 247-257. https://doi.org/10.1007/s11998-020-00403-7

Mendonça, M. C., Durães, A. F. S., dos Santos, A. D. A., Matos, L. C., Mascarenhas, A. R. P., Scatolino, M. V., ... & Tonoli, G. H. D. (2024). Natural rubber, cellulose micro/nanofibrils and carnauba wax: renewable and low-cost coatings improving the barrier properties in papers. Cellulose, 31(15), 9413-9433. https://doi.org/10.1007/s10570-024-06162-7

Rastogi, V. K., and Samyn, P. (2015). Bio-based coatings for paper applications. Coatings, 5(4), 887-930. https://doi.org/10.3390/coatings5040887

Rhim, J.W., (2010). Effect of moisture content on tensile properties of paper-based food packaging materials. Food Sci. Biotechnol. 19, 243–247. https://doi.org/10.1007/s10068-010-0034-x

Sena, B., Dhal, S., Sahu, D., Sarkar, P., Mohanty, B., Jarzębski, M., ... & Pal, K. (2022). Variations in microstructural and physicochemical properties of soy wax/soybean oil-derived oleogels using soy lecithin. Polymers, 14(19), 3928. https://doi.org/10.3390/polym14193928

Shaharuddin, S. I. S., Mansor, M. A., Rashid, M. A., Shaffiar, N., & Ahmad, Z. (2023). The Effects of Beeswax Additions on the Structural, Thermal, Mechanical and Mass Loss Properties of Soy Wax Blends. Journal of Mechanical Engineering (1823-5514), 20(1). https://doi.org/10.24191/jmeche.v20i1.21079

Shen, T., Fan, S., Li, Y., Xu, G., and Fan, W. (2020). Preparation of edible non-wettable coating with soybean wax for repelling liquid foods with little residue. Materials, 13(15), 3308. https://doi.org/10.3390/ma13153308

Tutak, D. (2025). Production of nano silver and nano silica coated paper to be used in active packaging. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 40(3),567-577 https://doi.org/10.1515/npprj-2024-0028

Tutak, D. (2017). Modified deinking of digitally printed paper with water based inkjet ink. Cellullose Chemistry and Technology, 51(5-6), 483-488.

Tutak, D., (2013) CMYK renk ayrım sistemine alternatif sistemin geliştirilmesi, Doktora tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, Sayfa 24-25

Wang, D., Huang, J., Guo, Z., and Liu, W. (2021). Durable mixed edible wax coating with stretching superhydrophobicity. Journal of Materials Chemistry A, 9(3), 1495-1499. https://doi.org/10.1039/D0TA10638K

Yadav, S., Khan, A., Hamdani, S. S., & Rabnawaz, M. (2024). Degradable polymeric waxes for paper coating applications. ACS Applied Polymer Materials, 6(6), 3263-3272. https://doi.org/10.1021/acsapm.3c03072

Zhang, N., Gao, C., Meng, L., & Tang, X. (2023). Preparation and characterization of carnauba wax-based particle with hierarchical structure and its use as hydrophobic coating for chitosan films. Carbohydrate Polymers, 319, 121224. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121224