PERFORMANCE OPTIMIZATION AND EVALUATION OF MULTIFUNCTIONAL NANOCOMPOSITES AS MONO AND BILAYERED SMART PACKAGING FILMS

VIKRAMSINGH THAKUR

DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

DECEMBER 2024

PERFORMANCE OPTIMIZATION AND EVALUATION OF MULTIFUNCTIONAL NANOCOMPOSITES AS MONO AND BILAYERED SMART PACKAGING FILMS

by

VIKRAMSINGH THAKUR

Department of Materials Science and Engineering

Submitted

in fulfilment of the requirements of the degree of

Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

DECEMBER 2024

Dedicated to my family

Father : Late Rajendrasingh Thakur

Mother : Mrs. Asha Thakur

Wife : Mrs. Nidhi Gupta

This work is a reflection of our shared journey

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled "Performance optimization and evaluation of multifunctional nanocomposites as mono and bilayered smart packaging films" submitted to the Indian Institute of Technology Delhi by Mr. Vikramsingh Thakur, for the award of the degree of Doctor of Philosophy in the Department of Materials Science and Engineering, is a bonafide record of original research work carried out by the candidate. The results contained in this thesis have not been submitted, in part or full, to any other university or institute for the award of any degree. I further certify that Mr. Vikramsingh Thakur has fulfilled all the requirements for the submission of the thesis.

Bhabani. K. Satapathy
Professor
Department of Materials Science and Engineering
Indian Institute of Technology Delhi
Hauz Khas, New Delhi- 110016

ACKNOWLEDGEMENTS

An undertaking of this kind would not have been realized without the collective efforts of many individuals. Firstly, I would like to express my sincere gratitude to my thesis supervisor, Prof. Bhabani Satapathy. I am indebted to him for the guidance and opportunities which will help me throughout my career. He has always encouraged me to develop a deep understanding and carry out meaningful scientific research. I am grateful for his generosity in countless discussions, insightful suggestions and for giving me academic freedom to develop various skills. It is also necessary to mention his continuous availability and support throughout my Ph.D. and even during the trying times of COVID-19 lockdown, which were instrumental in an uninterrupted workflow.

I would also like to thank the SRC members, Prof. Josemon Jacob, Prof. Bijay Tripathi, and Prof. Bhanu Nandan for their valuable suggestions, encouragement, and feedback from time to time. Additionally, I would like to thank DRC (DMSE) for organizing half-yearly seminars, allowing me to disseminate my research findings and progress to a broader audience.

It is my pleasure to thank Mr. Surendra Sharma, Mr. Gajraj Singh, Mr. E. Islam, Mr. Jitendra Kumar, Mr. Ashish Sharma, Mr. Brijesh Kumar, Mr. Ashok Kapoor, Mr. Gyanendra Kr. Yadav, Dr. Molla Mehedi Hassan, Mrs. Astha Sharma, Mr. Kshitij Sharma and Dr. Pooja Semalti, for tremendous support in performing various experimental characterizations. I especially thank Mr. E. Islam for supporting infrastructural developments for the film unit setup. Additionally, Mr. Subhash Chand, Mr. Amit Kumar, Mr. Sudhir Pandey, Mrs. Jyoti, Mr. Ramesh, Mr. Narendra, Mrs. Shalini, and Mrs. Sunita Rani Arora have immensely helped and supported in various documentations, organizing seminars, and purchasing activities.

I extend my sincere thanks to all the colleagues in Processing Laboratory – Dr. S. Samantaray, Dr. D. Saha, Dr. D. Sharma, Dr. P. Chauhan, Dr. U. Chakraborty, K. Das, K Dubey, H Peshne, S. Pathak, V. Rai, D. Sharma, S. Rautela, S. Gupta, A. Kasera and A. Kumar. I especially thank Mr. Akhlesh Rajak, Mr. Raghav Bansal, Mr. Sonu Singh, Dr. Saroj, and Dr. Saha for stimulating academic and non-academic discussions. I acknowledge all the collaborators for countless hours working together and doing impactful research. Working with all of them was a great pleasure and learning opportunity. I would also like to acknowledge the enlightening and insightful discussions with all the group members during the Saturday meetings.

I greatly acknowledge the generous financial support from the Prime Minister Research Fellowship for the Ph.D. assistantship that enabled me to pursue my research and attend conferences nationally and internationally

Expressing my sincerest gratitude to my family for their unwavering support and love – my parents, Late Rajendrsingh Thakur and Asha Thakur, my wife Nidhi Gupta. Their love and constant belief in me give me the strength to face challenges with utmost courage. I am always indebted to them for their continuous encouragement and tireless efforts, which have been indispensable to my success.

Vikramsingh

•

ABSTRACT

This thesis investigates the development and evaluation of nanocomposite materials for improved food packaging purposes, focusing on significant challenges in achieving multifunctionality regarding the issues of mechanical strength, barrier qualities, shelf-life enhancement and intelligent functionality. The research encompasses four interlinked studies, with each study expanding upon the discoveries of the preceding effort. Linear low-density polyethylene (LLDPE) nanocomposites film with organically modified clay (Cloisite 30B) as a filler and LLDPE-grafted-maleic anhydride (LLDPE-g-MA) as a modifier was prepared by extrusion film blowing. The thermal properties, as investigated by thermogravimetric analysis (TGA) and differential scanning calorimetry (DSC), indicated increased crystallinity with enhanced thermal stability. Morphological attributes of nanocomposite films were demonstrated by transmission electron microscopy, and the thickness distribution of clay platelets was analyzed by kite plot. The radius of gyration (R_g) of LLDPE chains is studied by small-angle X-ray scattering (SAXS) from the Guinier region. The analysis of tear fracture and its associated surface morphology was done by scanning electron microscopy (SEM). The oxygen transmission rate (OTR) and water vapor transmission rate (WVTR) were measured for nanocomposite films. The 5 wt. % clay-loaded nanocomposite film showed a ~23.5 % and ~33.4 % decrease in WVTR and OTR, respectively, compared to that of neat LLDPE films. The effect of crystallinity on tear energy and the influence of clay thickness in film transmittance on the barrier properties of various nanocomposite films with varied clay content were discussed. The paper demonstrated the correspondence between lower Rg values to low platelet thickness, which in turn remained directly correlated to OTR and WVTR. Our study comprehensively demonstrates that there exists a correspondence between lower R_g values and $t_{platelets}$ thickness, which in turn remained directly correlated to OTR and WVTR, leading to a

significantly enhanced extent of barrier performance. This study can further be extrapolated for the fillers used for improving the barrier performance in the LLDPE matrix.

Expanding upon these discoveries, the studies examined hybrid nanocomposites that combine organically modified montmorillonite (O-MMT) with halloysite nanotubes (HNT). The combination of nanosheets and nanotubes led to enhanced mechanical and barrier properties due to their synergistic effects. A smaller ratio of inter-particle distance to length ($\tau/d < 0.13$) was determined to be essential in order to achieve a high critical tear energy and outstanding barrier performance. The hybrid fillers exhibited improved ethylene absorption capability, indicating potential for prolonging the shelf life of fruits, namely bananas. Subsequently, the research advanced by integrating natural antioxidants, particularly resveratrol, into the nanocomposite system the strategy of using sustainable biomass resources instead of traditional antioxidants in synergy with nano-reinforced filler has been established as a food safety way to achieve ethylene scavenging efficiency with improved mehano-barrier performance. Herein, the effects of different content of resveratrol (0.5, 1.5, and 2 phr) and the inclusion of HNTs (5 wt. %) on the physiological weight loss, ripening index, and migratory properties of the resulting composite films for the enhanced shelf-life banana. The analysis of tear strength and its associated thermomechanical response was done using dynamic mechanical analysis. The oxygen transmission rate (OTR) and water vapor transmission rate (WVTR) were measured for nanocomposite films. The 5 wt. % HNT-loaded nanocomposite film with 1.5 phr resveratrol showed a ~25.7 and ~34.4% decrease in WVTR and OTR, respectively, compared to that of neat LLDPE films. The ternary composite of LLDPE, HNT and resveratrol (LLHRe15) exhibited a maximum tear force of ~13.46 N, indicating a significant ~186.4 percent improvement compared to the neat LLDPE. Through the analysis of these factors in relation to banana preservation and the use of different substances that simulate food, our goal is to clarify the mechanisms that contribute to the observed increase in shelf life and evaluate any potential restrictions in terms of migration behaviour.

The research resulted in the design of a novel packaging structure that consists of two layers and has advanced functional capabilities. Bilayered intelligent films based on electrospun polyvinyl alcohol/red cabbage extract-anthocyanins (PVA/RCA) nanofibrous mats, bolstered by oxygen-plasma treated clay-filled polyethylene/clay nanocomposites for monitoring the food freshness have been fabricated and evaluated. The nanofibrous mats (PVRC) of PVA/RCA were optimally fabricated by electrospinning, followed by their morphological and physio-mechanical characterization. The pH-responsive sensing of the PVRC mats to hydrochloric acid (HCl) and ammonia (NH_3) vapors as stimuli were analyzed using the absorption spectra corresponding to HCl and NH_3 at ~530 nm and ~650 nm, respectively. The oxygen transmission rate (OTR) of 1083.7 cc/m^2/day and water-vapor transmission rate (WVTR) of 8 g/m^2/day for the novel bi-layered electrospun mat-on-film packaging construct showed enhanced barrier performance with respect to stand-alone LLDPE blown-film (LL) with OTR and WVTR of 1502.8 cc/m^2/day and 16.25 g/m^2/day, respectively. The bi-layered constructs were further evaluated as freshness indicators by real-time monitoring of chickens and prawns for intelligent food packaging. This work makes a substantial contribution to the world of packaging science and technology through the development of a multifunctionality approach via utilizing natural/food-safe additives as active and intelligent agents for improved mechano-barrier, shelf-life enhancement, and integral intelligent functionalities.

सार

इस शोध प्रबंध में खाद्य पैकेजिंग के उद्देश्यों के लिए नैनोकॉम्पोजिट सामग्रियों के विकास और मूल्यांकन का अध्ययन किया गया है, जिसमें यांत्रिक शक्ति, अवरोध गुण, शेल्फ-लाइफ वृद्धि, और बुद्धिमान कार्यक्षमता के मुद्दों को लेकर बहुक्रियाशीलता प्राप्त करने की महत्वपूर्ण चुनौतियों पर ध्यान केंद्रित किया गया है। शोध में चार आपस में जुड़े अध्ययन शामिल हैं, जिनमें से प्रत्येक अध्ययन पिछले प्रयास की खोजों पर विस्तार करता है। क्लोइसाइट 30बी (Cloisite 30B) को फिलर और एलएलडीपीई-ग्लाइसेड-मेलिक एनहाइड्राइड (LLDPE-g-MA) को संशोधक के रूप में उपयोग करते हुए लीनियर लो-डेंसिटी पॉलीएथिलीन (LLDPE) नैनोकॉम्पोजिट फिल्म को एक्सट्रूज़न फिल्म ब्लोइंग द्वारा तैयार किया गया। थर्मोग्रैविमेट्रिक विश्लेषण (TGA) और डिफरेंशियल स्कैनिंग कैलोरीमेट्री (DSC) द्वारा जांचे गए थर्मल गुणों ने थर्मल स्थिरता के साथ बढ़ी हुई क्रिस्टलीयता को संकेतित किया। नैनोकॉम्पोजिट फिल्मों के संरचनात्मक गुणों को ट्रांसमिशन इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी द्वारा प्रदर्शित किया गया, और मिट्टी के प्लेटलेट्स की मोटाई वितरण का विश्लेषण पतंग ग्राफ द्वारा किया गया। लीनियर लो-डेंसिटी पॉलीएथिलीन (LLDPE) श्रृंखला के जाईरेशन के त्रिज्या (Rg) का अध्ययन गिनियर क्षेत्र से स्मॉल-एंगल एक्स-रे स्कैटरिंग (SAXS) द्वारा किया गया। आंसू टूटने के विश्लेषण और इसके संबंधित सतह आकृति का अध्ययन स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी (SEM) द्वारा किया गया। नैनोकॉम्पोजिट फिल्मों के लिए ऑक्सीजन ट्रांसमिशन दर (OTR) और जल वाष्प ट्रांसमिशन दर (WVTR) को मापा गया। 5 wt. % क्ले-लोडेड नैनोकॉम्पोजिट फिल्म ने क्रमशः neat LLDPE फिल्मों की तुलना में WVTR और OTR में ~23.5 % और ~33.4 % की कमी दिखाई। विभिन्न नैनोकॉम्पोजिट फिल्मों के बैरियर गुणों पर फिल्म ट्रांसमिटेंस में आंसू ऊर्जा और क्ले मोटाई के प्रभाव की चर्चा की गई। इस अध्ययन से यह स्पष्ट हुआ कि निचले Rg मानों और प्लेटलेट्स की मोटाई के बीच संबंध है, जो बदले में OTR और WVTR से सीधे

संबंधित हैं, जिससे बैरियर प्रदर्शन में महत्वपूर्ण वृद्धि हुई है। इस अध्ययन को LLDPE मैट्रिक्स में बैरियर प्रदर्शन को बेहतर बनाने के लिए फिलर्स के उपयोग के लिए आगे बढ़ाया जा सकता है। इन खोजों का विस्तार करते हुए, शोधकर्ताओं ने ऑर्गेनिकली मॉडिफाइड मॉन्टमोरिलोनाइट (O-MMT) को हॉलोयसाइट नैनोट्यूब्स (HNT) के साथ मिलाकर हाइब्रिड नैनोकॉम्पोजिट्स का अध्ययन किया। नैनोशीट्स और नैनोट्यूब्स के संयोजन से उनके तालमेल प्रभावों के कारण यांत्रिक और अवरोध गुणों में वृद्धि हुई। उच्च क्रिटिकल आंसू ऊर्जा और उत्कृष्ट बैरियर प्रदर्शन प्राप्त करने के लिए कणों के बीच की दूरी से लंबाई का छोटा अनुपात ($\tau/d < 0.13$) आवश्यक पाया गया। हाइब्रिड फिलर्स ने बेहतर एथिलीन अवशोषण क्षमता दिखाई, जो फल, विशेष रूप से केले के शेल्फ जीवन को बढ़ाने की क्षमता को इंगित करता है। इसके बाद, शोध ने नैनोकॉम्पोजिट प्रणाली में प्राकृतिक एंटीऑक्सिडेंट्स, विशेष रूप से रेस्वेराट्रॉल को एकीकृत करके इसे आगे बढ़ाया। पारंपरिक एंटीऑक्सिडेंट्स के बजाय स्थायी बायोमास संसाधनों का उपयोग करने की रणनीति को नैनो-प्रबलित फिलर के साथ मिलाकर एथिलीन स्कैवेंजिंग दक्षता प्राप्त करने का एक खाद्य सुरक्षा तरीका स्थापित किया गया है, जिसमें मेहानो-बैरियर प्रदर्शन में सुधार हुआ है। यहां, रेस्वेराट्रॉल (0.5, 1.5, और 2 phr) की विभिन्न सामग्री और HNTs (5 wt. %) की सामग्री के प्रभाव को केले के शेल्फ जीवन को बढ़ाने के लिए प्राप्त होने वाली कॉम्पोजिट फिल्मों के शरीर के वजन घटाव, पकने का सूचकांक, और प्रवासन गुणों पर अध्ययन किया गया। डायनामिक मेकेनिकल विश्लेषण का उपयोग करके आंसू शक्ति और इसके संबंधित थर्मोमेकेनिकल प्रतिक्रिया का विश्लेषण किया गया। नैनोकॉम्पोजिट फिल्मों के लिए ऑक्सीजन ट्रांसमिशन दर (OTR) और जल वाष्प ट्रांसमिशन दर (WVTR) को मापा गया। 5 wt. % HNT-लोडेड नैनोकॉम्पोजिट फिल्म के साथ 1.5 phr रेस्वेराट्रॉल ने क्रमशः neat LLDPE फिल्मों की तुलना में WVTR और OTR में ~25.7 % और ~34.4 % की कमी दिखाई। तृतीयक कॉम्पोजिट (LLHRe15) ने ~13.46 N की अधिकतम आंसू बल प्रदर्शित की, जो neat LLDPE की तुलना में ~186.4 प्रतिशत सुधार दर्शाता है। केले के संरक्षण और विभिन्न पदार्थों के उपयोग के संबंध में इन कारकों का

विश्लेषण करके जो खाद्य पदार्थों का अनुकरण करते हैं, हमारा लक्ष्य शेल्फ लाइफ में देखी गई वृद्धि में योगदान देने वाले तंत्र को स्पष्ट करना और प्रवासन व्यवहार के संदर्भ में किसी भी संभावित प्रतिबंध का मूल्यांकन करना है। शोध का परिणाम एक नया पैकेजिंग संरचना डिजाइन में हुआ, जिसमें उन्नत कार्यात्मक क्षमताओं के साथ दो परतें शामिल हैं। भोजन की ताजगी की निगरानी के लिए इलेक्ट्रोस्पन पॉलीविनाइल अल्कोहल/रेड कैबेज एक्सट्रैक्ट-एंथोसाइनिन्स (PVA/RCA) नैनोफाइब्रस मैट्स पर आधारित बाइलेयर्ड बुद्धिमान फिल्मों का निर्माण और मूल्यांकन किया गया। PVA/RCA के नैनोफाइब्रस मैट्स (PVRC) का इलेक्ट्रोस्पिनिंग द्वारा इष्टतम निर्माण किया गया, उसके बाद उनके संरचनात्मक और भौतिक-यांत्रिक गुणों का विश्लेषण किया गया। PVRC मैट्स की pH-संवेदनशील प्रतिक्रिया को हाइड्रोक्लोरिक एसिड (HCl) और अमोनिया (NH3) वाष्प के रूप में उत्तेजनाओं के प्रति अवशोषण स्पेक्ट्रा का उपयोग करके विश्लेषित किया गया, जो क्रमशः ~530 nm और ~650 nm पर HCl और NH3 से संबंधित था। नई बाइलेयर्ड इलेक्ट्रोस्पन मैट-ऑन-फिल्म पैकेजिंग संरचना के लिए ऑक्सीजन ट्रांसमिशन दर (OTR) 1083.7 cc/m2/day और जल वाष्प ट्रांसमिशन दर (WVTR) 8 g/m2/day थी, जो स्टैंडअलोन LLDPE ब्लोन-फिल्म (LL) के संबंध में बेहतर बैरियर प्रदर्शन दिखाती है, जिसमें क्रमशः OTR और WVTR 1502.8 cc/m2/day और 16.25 g/m2/day थी। बाइलेयर्ड संरचनाओं का आगे मूल्यांकन ताजगी सूचकों के रूप में किया गया, जिसमें बुद्धिमान खाद्य पैकेजिंग के लिए वास्तविक समय में मुर्गियों और झींगा का परीक्षण किया गया। यह कार्य खाद्य पैकेजिंग विज्ञान और प्रौद्योगिकी की दुनिया में महत्वपूर्ण योगदान करता है, जिसमें प्राकृतिक/खाद्य-सुरक्षित योजकों को सक्रिय और बुद्धिमान एजेंटों के रूप में उपयोग करके बहुक्रियाशीलता दृष्टिकोण का विकास किया गया है, जो बेहतर मेहानो-बैरियर, शेल्फ-लाइफ वृद्धि, और एकीकृत बुद्धिमान कार्यक्षमता प्राप्त करते हैं।

Table of Contents

List of Figures

List of Tables

List of Equations

List of Symbols

α: Aspect ratio

β: Line broadening at half the maximum intensity (FWHM)

χ_c: Degree of crystallinity

χ_c(DSC): Degree of crystallinity from DSC

χ_c(XRD): Degree of crystallinity from XRD

Δ: Change in a quantity

ΔA: Difference in absorption

ΔE: Euclidean distance (color difference)

ΔHm: Heat of enthalpy of melting peak

ΔHm°: Heat of enthalpy for 100% crystalline polymer

ε: Strain

εB: Elongation at break

ε%: Percent elongation

η*: Complex viscosity

θ: Diffraction angle

λ: Wavelength

λL: Extension ratio of legs

ν: Poisson's ratio

π: Pi (mathematical constant)

ρ: Density

σ: Stress

a: Red-green color component

A: Absorbance

Ac: Absorbance of control solution

As: Absorbance of sample solution

b: Yellow-blue color component

d: Average length of HNT / d-spacing

D: Diffusion coefficient

D_p: Average crystallite size

E': Storage modulus

EεD: Strain energy density

Fmax: Maximum load

G': Storage modulus

I: Scattering intensity

I(q): Scattering intensity as a function of q

I0: Initial intensity

Ie: Equilibrium absorption intensity

It: Absorption intensity in time

k: Rate constant

L: Lightness color component

n: Order of reflection

P: Gas permeability coefficient

P(r): Pair distance distribution function

P_0: Permeability of neat polymer

σs: Tensile strength

σTS: Tensile strength

σYS: Yield strength

τ: Tortuosity factor / Inter-particle distance

τ/d: Ratio of inter-particle distance to length

Φ: Volume fraction of nanofiller

ω: Angular frequency

q: Scattering vector

R: Universal gas constant

R_g: Radius of gyration

R_p: Relative gas permeability

S: Solubility coefficient / Order parameter

S_{max}: Maximum displacement

t: Thickness

$t_{1/2}$: Half-time of crystallization

tc: Crystallization time

Tc: Crystallization temperature / Critical tear energy

TF: Tear force / Tearing force

T_g: Glass transition temperature

T_m: Melting temperature

T_{max}: Maximum degradation temperature

T_{on}: Crystallization onset temperature

T_{onset}: Onset degradation temperature

T_{offset}: Offset degradation temperature

$t_{platelets}$: Thickness of clay platelets

w: Weight fraction of clay in composites in TGA or width of specimen for mechanical testing

List of Abbreviations

A

ABTS: 2,2'-Azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)
AFM: Atomic Force Microscopy
ALD: Atomic Layer Deposition
AR: Aspect Ratio
ATR: Attenuated Total Reflectance

B

BHA: Butylated Hydroxyanisole
BHT: Butylated Hydroxytoluene
BN: Boron Nitride
BUR: Blow-Up Ratio

C

C: Carbon
CA: Contact Angle
CAGR: Compound Annual Growth Rate
CD: Cross Direction
CMC-Na: Sodium Carboxyl Cellulose
CNC: Cellulose Nanocrystals
CO2: Carbon Dioxide
CR: Polychloroprene Rubber
CS: Chitosan

D

DLC: Diamond-Like Carbon
DMA: Dynamic Mechanical Analysis
DPPH: 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl
DSC: Differential Scanning Calorimetry
DTGA: Differential Thermogravimetric Analysis

E

EAC: Ethylene Absorption Capacity
EDX: Energy Dispersive X-ray
EDTA: Ethylenediaminetetraacetic Acid
EFSA: European Food Safety Authority
EPDM: Ethylene Propylene Diene Monomer
EU: European Union
EVA: Ethylene Vinyl Acetate
EVOH: Ethylene Vinyl Alcohol

F

FCM: Food Contact Materials
FDA: Food and Drug Administration
FDM: Fused Deposition Modelling
FESEM: Field Emission Scanning Electron Microscopy
FTIR: Fourier Transform Infrared Spectroscopy
FWHM: Full Width at Half Maximum

G

G': Storage Modulus

H

H_2O: Water

GEO: Zingiber Officinale Rosc

GRAS: Generally Recognized as Safe

H_2S: Hydrogen Sulfide

HCl: Hydrochloric Acid

HDPE: High-Density Polyethylene

HDT: Heat Deflection Temperature

HNT: Halloysite Nanotubes

I

IFT: Indirect Fourier Transform

K

KGM: Konjac Glucomannan

L

LAK: Dimethyl 5-sulfoisophthalate, potassium salt

LDH: Layered Double Hydroxide

LDPE: Low-Density Polyethylene

LL: Linear Low-Density Polyethylene

LLC: LLDPE/Clay

LLCP: LLDPE/Clay Plasma-treated

LLDPE: Linear Low-Density Polyethylene

LLDPE-g-MA: Linear Low-Density Polyethylene grafted with Maleic Anhydride

LLP: LLDPE Plasma-treated

LVR: Linear Viscoelastic Response

M

MA: Maleic Anhydride

MD: Machine Direction

MFI: Melt Flow Index

MMT: Montmorillonite

MOF: Metal-Organic Framework

MoS_2: Molybdenum Disulfide

N

Na-MMT: Sodium Montmorillonite

NaOH: Sodium Hydroxide

NH3: Ammonia

NH4OH: Ammonium Hydroxide

NIAS: Non-Intentionally Added Substances

O

O: Oxygen

o-MMT: Organically Modified Montmorillonite

OTR: Oxygen Transmission Rate

OWRK: Owens, Wendt, Rable, and Kaelble

P

PA: Polyamide

PA6: Polyamide 6

PBAT: Poly (butylene adipate-co-terephthalate)

PBS: Poly (butylene succinate)

PCL: Polycaprolactone

R

RCA: Red Cabbage Anthocyanin

Re: Resveratrol

REO: Rosmarinus officinalis L

Rg: Radius of Gyration

RI: Ripening Index

rpm: Revolutions Per Minute

PCN: Polymer-Clay Nanocomposites

PE: Polyethylene

PE-CVD: Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition

PEO: Polyethylene Oxide

PET: Polyethylene Terephthalate

PIB: Poly(isobutylene)

PLA: Polylactic Acid

PLW: Physiological Weight Loss

PMMA: Poly (methyl methacrylate)

POE: Polyolefin Elastomer

PP: Polypropylene

PPC: Poly (propylene carbonate)

PS: Polystyrene

PVA: Polyvinyl Alcohol

PVD: Physical Vapor Deposition

PVDF-TFE: Poly (vinylidene fluoride-co-tetrafluoroethylene)

PVP: Polyvinylpyrrolidone

PVRC: PVA/Red Cabbage Anthocyanin

RSA: Radical Scavenging Activity

S

SAXS: Small-Angle X-ray Scattering

SCCM: Standard Cubic Centimetres per Minute

sCF: Short Carbon Fiber

SEM: Scanning Electron Microscopy

Si: Silicon

SiO2: Silicon Dioxide

SiOx: Silicon Oxide

SPS: Starch/Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate

SSPS: Soybean Polysaccharide

T

T-AC: Tetrahedral Amorphous Carbon

TA: Tannic Acid

TBHQ: Tert-Butylhydroquinone

TD: Transverse Direction

TEM: Transmission Electron Microscopy

TGA: Thermogravimetric Analysis

TPS: Thermoplastic Starch

TVB-N: Total Volatile Basic Nitrogen

STEM: Scanning Transmission Electron Microscopy

U

UV: Ultraviolet

UV-VIS: Ultraviolet-Visible

V

VTMS: Vinyltrimethoxysilane

W

WCA: Water Contact Angle

WVTR: Water Vapor Transmission Rate

X

XPS: X-ray Photoelectron Spectroscopy

XRD: X-ray Diffraction

Z

ZnO: Zinc Oxide

ZrP: Zirconium Phosphate