



Aprovechamiento de recursos renovables en la obtención de nuevos materiales

Use of renewable resources to obtain new materials

Sandra Liliana Gómez Ayala
Docente - Ingeniería Ambiental
Universidad Libre - Socorro
sandra.l.gomez@unilivre.edu.co

Fabián Leonardo Yory Sanabria
Docente - Ingeniería Ambiental
Universidad Libre - Socorro
fabian.rory@unilivre.edu.co

(Tipo de Artículo: Revisión. Recibido: 14/05/2017. Aprobado: 23/08/2017)

Resumen. La producción de plásticos a nivel mundial presenta cifras abrumadoras debido a que tienen aplicaciones en diferentes campos, desde la medicina hasta la industria de empaques. Uno de los problemas radica en que la materia prima para preparar esos plásticos proviene de fuentes fósiles, los principales responsables de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera y después de usar esos materiales se desechan y tardan varios años en descomponerse. Otro problema está enfocado hacia la agricultura e incluye los procesos que generan desechos orgánicos como la industria azucarera y del café, que pueden contaminar el medio ambiente sin tratamiento adecuado. Cada vez cobra más importancia reemplazar los plásticos convencionales por biomateriales cuyos sustratos de partida provengan de fuentes renovables, que sean biodegradables y que puedan tener aplicaciones similares a los materiales convencionales. Por ello, en este artículo se destacan los últimos avances en el área de los materiales a partir de recursos renovables, en especial de los polímeros biobasados, de su biodegradabilidad y sus aplicaciones, para generar curiosidad y propiciar la búsqueda de alternativas de aprovechamiento de las fuentes renovables en la obtención de nuevos biopolímeros.

Abstract. *The production of plastics around the world has been increasing dramatically due to their multiple applications in different fields, from medicine up to the packaging industry. One of the problems lies in the origin of the raw material: plastic comes from fossil sources, the main responsible for the carbon emissions into the atmosphere. The situation worsens when, after using these materials, they are discarded and take many years to decompose. Another problem is related to agriculture and it includes the processes that generate organic wastes (e.g. in sugar and coffee industries), because if an appropriate treatment is not given to them, they will also pollute the environment. According to this, the conventional plastics must be replaced by biomaterials whose starting substrates come from renewable sources. They must be biodegradable and have the same applications. This article highlights the recent advances in materials development, specifically those created from biobased polymers (including their biodegradability and their applications), in order to generate curiosity and to promote the search for alternative uses of renewable sources.*

Palabras clave. Biodegradabilidad; bioplástico; biopolímero; polímero biobasado; recursos renovables.

Keywords. *Biobased polymer; biodegradability; bioplastic; biopolymer; renewable resources.*

DOI 10.21500/20275846.3008

1. Introducción

En los últimos años existe un creciente interés por el futuro de la humanidad desde el punto de vista de la protección del medio ambiente. Factores como nuevas posturas en sostenibilidad, avances en la nanotecnología y la crisis petrolera de las últimas décadas muestran una visión diferente en las tendencias para el aprovechamiento de los recursos naturales. Entre éstas, se encuentra una enfocada hacia la ciencia de los polímeros para desarrollar nuevos materiales a partir de recursos renovables en lugar de los tradicionales polímeros basados en fuentes fósiles que generan grandes cantidades de residuos no biodegradables y su disposición final se convierte en un grave problema [1-5], a pesar que existen programas de

reciclaje [6-8]. Por ello, se hace necesario encontrar materiales preferentemente renovables, biodegradables e inofensivos para el medio ambiente.

Según Peplow, “los polímeros han infiltrado casi todos los aspectos de la vida moderna desde la ropa, la pintura, el empaquetamiento de medicamentos para su liberación controlada hasta los materiales auto-curativos y para impresión tridimensional” [3]. Debido al uso generalizado, la producción y disposición de los polímeros obtenidos a partir de recursos renovables se convierten en una solución y en un proceso sostenible y sustentable. Actualmente, este campo se encuentra en expansión, siendo el foco de atención en varios estudios y sectores de aplicación, tales como: alimentos (envasado y empaquetamiento), agricultura y

biomedicina, entre otros. Lo ideal para este tipo de materiales es un balance entre el rendimiento durante su vida útil y su comportamiento al degradarse después del uso (o balance entre sus propiedades a largo plazo y el fin de su ciclo de vida) [9].

Colombia presenta al sector agrícola como uno de sus pilares en la economía por lo que no es difícil de plantear que son muchos los residuos que se generan por esta actividad. Dichos residuos se convierten en un problema medio ambiental debido a que se queman como alternativa de tratamiento (se emplean como fuente de energía) y en otras ocasiones, son arrojados a fuentes hídricas o suelos [10-11]. Los plásticos fueron posicionados en el país desde hace más de 50 años por un gremio que se denomina Acoplásticos. La industria de los plásticos abarca desde productos domésticos hasta pinturas y mueve aproximadamente 17 billones de pesos al año. Cabe destacar que se producen plásticos amigables con el medio ambiente y se están comercializando plásticos derivados de productos vegetales, pero su uso es limitado porque no presentan algunas características que se requieren para ciertas aplicaciones. Por ello, se considera que el panorama de los bioplásticos en Colombia es aún incipiente y se requiere de tecnología e investigación para poder aprovechar esos desechos generados en la agricultura.

El objetivo de este artículo es definir ciertos términos que son motivo de debate en los últimos años relacionados con los biomateriales y mostrar las tendencias en el aprovechamiento de recursos renovables en el desarrollo de bioplásticos: de su biodegradabilidad y aplicaciones, para propiciar la curiosidad hacia su estudio en Colombia desde la academia hasta la industria y de esta forma generar cambios que contribuyan a la conservación del medio ambiente y a la economía del país.

2. Marco teórico

De acuerdo con la *American Society for Testing of Materials* (ASTM) y la *International Standards Organization* (ISO), los plásticos degradables son polímeros que presentan cambios en su estructura química bajo condiciones ambientales específicas causando una pérdida considerable en sus propiedades físicas y mecánicas. Teniendo en cuenta lo anterior, los plásticos biodegradables son aquellos que tienen la capacidad de descomponerse en presencia de enzimas producidas por microorganismos como las bacterias, los hongos y las algas. En resumen, degradable se refiere a la descomposición por cambios químicos o físicos mientras que biodegradable se debe a degradación por mecanismos biológicos [12, 13]. El problema de disposición final de los residuos plásticos genera su acumulación en el ambiente, forzando a la industria a producir plásticos sostenibles y biodegradables. La biodegradación de polímeros conlleva tres etapas importantes: (i) biodeterioración, es un cambio en las propiedades físicas, mecánicas y químicas del material debido al crecimiento de microorganismos en o dentro de la superficie del polímero; (ii) biofragmentación, es la

transformación de polímeros a oligómeros y monómeros por la acción de microorganismos y (iii) asimilación, en donde los microorganismos satisfacen sus necesidades de carbono, energía y nutrientes de la fragmentación de los polímeros y convierten el carbono del plástico en dióxido de carbono, agua y biomasa [14]. De esto se puede concluir que, los factores que afectan la biodegradación del plástico en el ambiente son la estructura química, la cadena de polímeros, la cristalinidad y la complejidad de la fórmula del polímero. Generalmente, los polímeros de cadena corta, con una parte amorfa y fórmula menos compleja son más susceptibles a degradarse por microorganismos, además se debe considerar que las condiciones ambientales juegan un rol importante en la biodegradación de este tipo de materiales siendo el pH, la temperatura, la humedad y el oxígeno (dependiendo del tipo de microorganismo (aerobio o anaerobio), los factores ambientales más significativos [14].

El término biobasado se enfoca en las materias primas y se aplica a los polímeros derivados de fuentes renovables. Las materias primas pueden ser renovables cuando se restablecen mediante procedimientos naturales a un ritmo comparable o más rápido que el consumo. Según la ASTM, los materiales biobasados son materiales orgánicos donde el carbono proviene de un recurso renovable vía procesos biológicos [12, 15].

Un plástico compostable, definido por la ASTM, es un material que experimenta degradación por procesos biológicos y se transforma en dióxido de carbono, agua, compuestos inorgánicos y biomasa a una rapidez similar a otros materiales compostables conocidos, además, sin dejar residuos distinguibles o tóxicos. Por ello, un plástico compostable es biodegradable mientras que un plástico biodegradable no siempre es compostable [14]. Así, la diferencia entre polímeros biodegradables y polímeros compostables está determinada por la tasa de biodegradación, desintegración y toxicidad [12].

Cualquier polímero que cumpla los requerimientos de las normas ISO y ASTM presenta las siguientes características: (i) se desintegra rápidamente durante el compostaje; (ii) se biodegrada rápidamente en las condiciones del compostaje; (iii) no disminuye el valor del compost terminado y puede mantener vida vegetal y (iv) no contiene grandes cantidades de metales o cualquier material tóxico [12].

En la definición de biopolímero o bioplástico sobresalen dos criterios: (1) el origen de la materia prima y (2) la biodegradabilidad del polímero, la diferencia radica en los tres tipos de biopolímeros: (a) los biopolímeros de materias primas renovables (biobasados) y son biodegradables; (b) los biopolímeros que se derivan de materias primas renovables (biobasados) y no son biodegradables y (c) los biopolímeros provenientes de fuentes fósiles y son biodegradables [12].

Los biopolímeros pueden ser clasificados según su respuesta al calor como termoplásticos (se deforman

cuando se calientan, son polímeros de alto peso molecular), termoestables (no experimentan cambios al variar la temperatura debido a que presentan una red tridimensional espacial con fuertes enlaces covalentes) y elastómeros (son polímeros que muestran un comportamiento elástico) [12].

Otra clasificación de los bioplásticos es debida a su composición y pueden ser combinados (son mezclas de polímeros de diferentes orígenes), biocompuestos (son biopolímeros o polímeros sintéticos reforzados con fibras naturales) o laminados [6, 12, 15].

3. Antecedentes

Maurice Lemoigne, químico y bacteriólogo francés, descubre que la bacteria Gram-positiva *Bacillus megaterium* produce el biopoliéster intracelular, polihidroxibutirato (PHB) en el Instituto Pasteur en 1926 [14]. Hoy en día, el PHB es reconocido como el primer y más importante tipo de polihidroxialcanoato (PHA). Se identifican aproximadamente 100 tipos diferentes de PHA en una amplia variedad de microorganismos encontrados en el ambiente. A pesar de la importancia del descubrimiento de Lemoigne, fue realmente apreciado sólo hasta casi 55 años después [16]. En la década de los 80's los químicos y biólogos consideran seriamente el problema ambiental de los desechos plásticos derivados del petróleo, iniciando estudios acerca de la forma de degradar este tipo de material. Para lograrlo, producen materiales biobasados como el ácido poliláctico (PLA) a partir de la fermentación de sustancias naturales como el almidón y los aceites [16]. A mediados de los 80's en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) se logra aislar la primera enzima, una tiolasa, en un proceso biológico para obtener bioplástico [16]. La comercialización de materiales derivados de PHA y PHB inicia en los años 90's, desde entonces se presenta un aumento del interés por la producción de bioplásticos biodegradables [16].

4. Polímeros biobasados y biodegradables: perspectivas en los últimos años

Este tipo de materiales pueden ser producidos por sistemas biológicos (microorganismos, plantas y animales) o pueden ser sintetizados a partir de materias primas biológicas (por ejemplo, maíz, azúcar, almidón, etc). En general, incluyen polímeros sintéticos a partir de recursos renovables, tales como: el ácido poliláctico (PLA); biopolímeros producidos por microorganismos como el PHA y los biopolímeros naturales como el almidón o las proteínas. Éstos últimos, se definen como aquellos que son biosintetizados por medio de varias rutas por la biosfera. Los polímeros biobasados y biodegradables más usados son el almidón y el PHA [15].

Existen tres alternativas para producir bioplásticos a partir de materiales naturales: (1) la extracción y modificación de polímeros naturales de la biomasa; (2) la polimerización de monómeros biobasados y (3) la extracción de polímeros producidos en microorganismos [15, 17, 18].

4.1 Extracción y modificación de polímeros naturales de la biomasa

Los polímeros naturales son los producidos por los organismos vivos y son esenciales para la vida, algunos de pueden ser extraídos y modificados en plásticos para un uso comercial, como el caucho natural y los polisacáridos (almidón, celulosa, quitina), proteínas, entre otros [19]. A continuación, se relacionan algunos ejemplos de polímeros que son extraídos y modificados en bioplásticos.

4.1.1 Proteínas

Un estudio publicado en 2013 presenta el uso de la proteína del huevo y el glicerol para producir bioplásticos [20]. Dos años más tarde, Dou y colaboradores presentan la estructura y algunas propiedades de plásticos a partir de la queratina hidrolizada de las plumas de los pollos [21]. Posteriormente, se logra obtener materiales plásticos del gluten para la liberación controlada de fertilizantes en las cosechas [22]. Al presentarse la necesidad de preservar alimentos de calidad por mucho tiempo, se aborda la elaboración y caracterización de películas comestibles de las proteínas del suero láctico (WPI) [23, 24].

4.1.2 Polisacáridos

Se preparan biomateriales utilizando como materia prima la nanocelulosa de los residuos de la cáscara del plátano, que juega un rol importante a nivel farmacéutico, medico, biomédico y en la bioingeniería [25].

El crecimiento demográfico también incrementa la generación de residuos sólidos (orgánicos, papel, plástico, caucho, metal, madera, vidrio, cerámica y textiles) y de residuos agrícolas y es por esto que Liew y Khor deciden construir recipientes bioplásticos con fibras de papel periódico, almidón de yuca, glicerol y vinagre [26], mientras que Mostafa y colaboradores, establecen un método eficiente para la producción de biofibras de acetato de celulosa a partir de las fibras de lino y de linters de algodón. Este bioplástico de acetato de celulosa puede tener aplicaciones tanto en la industria de alimentos como en el campo de la medicina [27].

En cuanto a polímeros como el almidón para la elaboración biomateriales, en Malasia lo aprovechan de la planta *Tacca Leontopetaloides* junto con glicerol y aceite de palma [28]. En Colombia, se extrae de la yuca y al mezclarlo con fique y glicerol se elaboran biomateriales semirrígidos [29, 30]. Sin embargo, cuando el almidón de yuca se mezcla con glicerol, glutaraldehído, polietilenglicol y perclorato de litio se obtienen películas eléctricamente conductoras [31].

Para mejorar las propiedades de los plásticos de almidón y competitividad en el mercado, se incorpora quitosano como un compatibilizador entre el almidón y la montmorillonita (mineral del grupo de los silicatos) en películas nanocompuestas según Ghani y colaboradores [32, 33].

4.2 Polimerización de bio-monómeros

A partir de monómeros derivados de recursos naturales y mediante síntesis química se pueden convertir en biomateriales [1, 2, 4, 5, 34-38] como los poliésteres y el PLA. Un ejemplo es el enunciado por Dai y Qiu en 2016, en el que, por medio de una policondensación, en dos etapas, sintetizan materiales biodegradables: tres nuevos copoliésteres poli (succinato de butileno-co-succinato de decametileno) (PBDS) y su homopolímero poli (succinato de butileno) (PBS) a partir de monómeros biobasados como el ácido succínico, el 1,4-butanodiol y el 1,10-decanodiol [34].

En 2014, se obtiene un nuevo polímero que es biodegradable, el poli (2,5-furancarboxilato de 1,20-eicosanodiilo) a partir del ácido 2,5-furandicarboxílico y el 1,20-eicosanodiol y presenta propiedades similares a las poliolefinas como el polietileno [4]. La biodegradabilidad, morfología y las propiedades mecánicas de materiales compuestos de cáscara de arroz con poli (adipato succinato de butileno) y ácido acrílico van reportadas por Wu [38].

4.3 Extracción de polímeros producidos en microorganismos

Los bioplásticos en esta clasificación son polímeros que se generan en los microorganismos. En el caso de las bacterias, producen polímeros cuando hay carbono en exceso y al menos otro nutriente esencial para el crecimiento. Los polímeros se acumulan en forma de gránulos intercelulares como una reserva de carbono para energía. Las bacterias toman el azúcar de las reservas de las plantas como combustible en este proceso celular [17]. Ese crecimiento y acumulación de polímeros en la bacteria ocurre en un biorreactor durante el proceso de fermentación. El polímero es extraído del microorganismo por una secuencia de procesos que incluyen centrifugación, filtración a presión y secado. Los microorganismos utilizados para este propósito algunas veces son modificados genéticamente para metabolizar las diferentes materias primas y para incrementar la eficiencia de conversión de éstas en polímeros [17]. El bioplástico producido de esta forma más estudiado es el PHA. El PHA es un poliéster y presenta muchos tipos, entre los más comunes están el PHB y el poli(hidroxivalerato) (PHV). Los PHA's se pueden clasificar en términos de la longitud de sus cadenas, siendo termoplásticos cuando son cortas y elastómeros cuando son de una longitud media [16, 40, 41].

Como un ejemplo, en 2015 se realiza un estudio en el que transforman compuestos contaminantes a bioplásticos. Los investigadores encuentran que el ácido benzoico es un compuesto clave para la biorremediación de aguas contaminadas con sustancias aromáticas por *Cupriavidus necator*. Esta cepa muestra capacidad para convertir los compuestos aromáticos en PHB [40]. Otra investigación evalúa la viabilidad para producir PHA de las aguas residuales de una fábrica de papel siendo una buena alternativa por el tratamiento de aguas de ese tipo

[41]. También, se logra obtener poliésteres utilizando una microalga (presenta la bacteria *R. eutropha* H16) como un bioreactor. De esta manera fue factible producir PHB [42].

5. Biodegradabilidad de biomateriales

La biodegradación comienza cuando los microorganismos crecen en la superficie del biopolímero secretando enzimas que lo descomponen en unidades monoméricas tales como hidroxiacidos. En el caso de los poliésteres alifáticos, los hidroxiacidos son utilizados como fuentes de carbono por el microorganismo para su crecimiento. En ambientes aerobios, los biopolímeros se degradan en dióxido de carbono y agua, mientras que en ambientes anaerobios los productos de degradación son el dióxido de carbono y el metano. En ambos procesos, una pequeña parte del biopolímero se convierte en biomasa, siendo un rendimiento entre el 10% y el 40%, dependiendo del material [9]. El proceso de biodegradación puede variar de días a meses o años, y depende del tipo de polímero. Durante un largo periodo de tiempo, la biomasa y otros residuos pueden mineralizarse a dióxido de carbono. La biodegradación es un efecto compuesto de diferentes mecanismos que pueden proceder simultánea o consecutivamente en el polímero. La velocidad a la que los polímeros son degradados puede ser monitoreada por: un examen visual, cambios en las propiedades mecánicas y físicas, peso molecular, cambios químicos, hidrólisis, biodegradación térmica, pérdida de peso, evolución de gases (dióxido de carbono y metano), consumo de oxígeno, marcaje con isótopos, formación de zona clara (al inocular microorganismos) y ecotoxicidad [9, 12, 14, 26, 28, 38, 43].

6. Aplicaciones

Los bioplásticos son usados en la industria textil, biomédica, cosmética, de alimentos, farmacéutica, del papel, automotriz, entre otras [44-49]. Según, Balaguer y colaboradores, las películas de gliadinas reforzadas con cinamaldehído y natamicina presentan un notorio potencial para retener y liberar compuestos, por lo que pueden ser empleadas en el desarrollo de películas antimicrobianas las cuales pueden extender el tiempo de vida de alimentos al usarlas como empaques [49]. En el mismo año (2014) investigadores preparan un material de empaque para alimentos de un biocompuesto de quitosano a partir de las semillas del pomelo. Este producto muestra un crecimiento bajo de bacterias y hongos incrementando la duración de alimentos perecederos cien por ciento [50].

7. Conclusiones

Es innegable el potencial que tienen los recursos renovables para la producción de biomateriales, en especial las plantas y los residuos de los procesos productivos que tienen que ver con la agricultura pero, las aplicaciones comerciales son lentas porque por un lado, aún es complicado competir con los plásticos derivados del petróleo y por el otro, trabajar con esos recursos es más difícil que con los derivados del

petróleo, ya que contienen compuestos en cantidades variables y con diferentes propiedades físicas y químicas; aunque algunos biopolímeros vegetales como el almidón y proteínas fibrosas son más sencillos de purificar que la celulosa y los polihidroxialcanoatos.

8. Trabajos futuros

Teniendo en cuenta la problemática del uso de plásticos convencionales, se trabajará en la producción de biomateriales a partir de fuentes renovables como los subproductos del beneficio de café.

Referencias

- [1] A. Tsui; Z. C. Wright and C.W. Frank. "Biodegradable Polyesters from Renewable Resources". *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.*, pp.143-170, 2013.
- [2] V. Tsanaktsis; Z. Terzopoulou; S. Exarhopoulos; D. N. Bikiaris; D. S. Achilias; D. G. Papageorgiou and G. Z. Papageorgiou. "Sustainable, eco-friendly polyesters synthesized from renewable resources: preparation and thermal characteristics of poly(dimethylpropyleneurethane)". *Polym. Chem.*, Vol. 6, No. 48, pp. 8284-8296, 2015.
- [3] M. Peplow. "The plastics revolution: how chemists are pushing polymers to new limits". *Nature*, Vol. 536, No. 7616, pp. 266-268, 2016.
- [4] C. Vilela; A. F. Sousa; A. C. Fonseca; A. C. Serra; J. F. J. Coelho; C. S. R. Freire and A. J. D. Silvestre. "The quest for sustainable polyesters – insights into the future". *Polym. Chem.*, Vol. 5, No. 9, pp. 3119-3141, 2014.
- [5] A. Llevot; P. K. Dannecker; M. von Czapiewski; L. C. Over; Z. Söyler and M. A. R. Meier. "Renewability is not enough: recent advances in the sustainable synthesis of biomass-derived monomers and polymers". *Chem. Eur. J.*, Vol. 22, No. 33, pp. 11510-11521, 2016.
- [6] A. Soroudi and I. Jakubowicz. "Recycling of bioplastics, their blends and biocomposites: A review". *Eur. Polym. J.*, Vol. 49, No. 10, pp. 2839-2858, 2013.
- [7] J. Hildebrandt; A. Bezama and D. Thran. "Cascade use indicators for selected biopolymers: are we aiming for the right solutions in the design for recycling of bio-based polymers?". *Waste Manag. Res.*, Vol. 35, No. 4, pp. 367-378, 2017.
- [8] A. M. Ragossninge and D. R. Schneider. "What is the right level of recycling of plastic waste?". *Waste Manag. Res.*, Vol. 35, No. 2, pp. 129-131, 2017.
- [9] J. D. Badia; O. Gil-Castell and A. Ribes-Greus. "Long-term properties and end-of-life of polymers from renewable resources". *Polym. Degrad. Stab.*, Vol. 137, pp. 35-57, 2017.
- [10] T. Marulanda; L. F. Zapata y M. C. Jaramillo. "Producción de bioetanol a partir de *Elodea* sp.". *Ing. USBMed*, Vol. 8, No. 1, pp. 37-42, 2017
- [11] C. E. Aristizábal. "Caracterización físico-química de una vinaza resultante de la producción de alcohol de una industria licorera, a partir del aprovechamiento de la caña de azúcar". *Ing. USBMed*, Vol. 6, No. 2, pp. 36-41, 2015.
- [12] M. Niaounakis. *Biopolymers: reuse, recycling and disposal*. In W. Andrew (Ed.), Oxford: Elsevier Inc., 2013, pp. 77-94.
- [13] M. Karamanlioglu; R. Preziosi and G. D. Robson. "Abiotic and biotic environmental degradation of the bioplastic polymer poly (lactic acid): a review". *Polym. Degrad. and Stab.*, Vol. 137, pp. 122-130, 2017.
- [14] S. M. Emadian; T. T. Onay and B. Demirel. "Biodegradation of bioplastics in natural environments". *Waste Manag.*, Vol. 59, pp. 526-536, 2017.
- [15] A. Rudin and P. Choi. *The elements of polymer science and engineering*. Third edition, Oxford: Elsevier Inc., 2013, pp. 521-535.
- [16] B. E. DiGregorio. "Biobased performance bioplastic: Mirel". *Chem. Biol.*, Vol. 16, No. 1, pp. 1-2, 2009.
- [17] G. Pacheco; N. C. Flórez y R. Rodríguez-Sanoja. "Bioplásticos", *BioTecnología*, Vol. 18, No. 2, pp. 27-36, 2014.
- [18] J. B. van Beilen and Y. Poirier. *Plants as factories for bioplastics and other novel biomaterials*. In A. Altman and P. M. Hasegawa (Ed.) *Plant Biotechnology and agriculture prospects for the 21st century*, Oxford: Elsevier Inc., 2012, pp. 481-494.
- [19] I. Leceta, A. Etxabide; S. Cabezudo; K. de la Caba and P. Guerrero. "Bio-based films prepared with by-products and wastes: environmental assessment," *J. Clean. Prod.*, Vol. 64, 218-277, 2014.
- [20] R. Lee; M. Pranata; Z. Ustunol and E. Almenar. "Influence of glycerol and water activity on the properties of compressed egg white-based bioplastics". *J. Food Eng.*, Vol. 118, pp. 132-140, 2013.
- [21] Y. Dou; B. Zhang; M. He; G. Yin and Y. Cui. "The structure, tensile properties and water resistance of hydrolyzed feather keratin-based bioplastics". *Chin. J. Chem. Eng.*, Vol. 24, No. 3, pp. 415-420, 2016.
- [22] D. Gómez-Martínez; P. Partal; I. Martínez and C. Gallegos. "Gluten-based bioplastics with modified controlled-release and hydrophilic properties". *Ind. Crops Prod.*, Vol. 43, pp. 704-710, 2013.
- [23] D. Escobar; R. Márquez; L. Repiso; A. Sala and C. Silvera. "Elaboración, caracterización y comparación de películas comestibles en base a aislado de proteínas de suero lácteo (WPI)". *Innotec*, No. 3, pp. 57-62, 2008.
- [24] D. Escobar; A. Sala; C. Silvera; R. Harispe y R. Márquez. "Películas biodegradables y comestibles desarrolladas en base a aislado de proteínas de suero lácteo: estudio de dos métodos de elaboración y del uso de sorbato de potasio como conservador". *Innotec*, No. 4, pp. 33-36, 2009.
- [25] A. B. M. S. Hossain; N. A. Ibrahim and M.S. AlEissa. "Nano-cellulose derived bioplastic biomaterial data for vehicle bio-bumper from banana peel waste biomass". *Data Brief.*, Vol. 8, pp. 286-294, 2016.
- [26] K. C. Liew and L. K. Khor. "Effect of different ratios of bioplastic to newspaper pulp fibres on the weight loss of bioplastic pot". *J. King Saud Univ. Sci.*, Vol. 27, No. 2, pp. 119-238, 2015.
- [27] N. A. Mostafa; A. A. Faraq; H. M. Abo-dief and A. M. Tayeb. "Production of biodegradable plastic from agricultural wastes". *Arab. J. Chem.*, in press, corrected proof.
- [28] N. S. M. Makhtara; M. F. M. Raisa; M. N. M. Rodhia; N. B. M. Musaa and K. H. K. Hamida. "Tacca Leontopetaloides starch: new sources starch for biodegradable plastic". *Procedia Eng.*, Vol. 68, pp. 385-391, 2013.
- [29] D. P. Navia; H. S. Villada y A. A. Ayala. "Isotermas de adsorción de bioplásticos de harina de yuca moldeados por compresión". *Rev. Bio. Agro.*, Vol. 9, pp. 77-87, 2011.
- [30] D. P. Navia; H. S. Villada y A. A. Ayala. "Evaluación mecánica de bioplásticos semirrígidos elaborados con harina de yuca". *Rev. Bio. Agro.*, Vol. 11, pp. 77-84, 2013.
- [31] A. Arrieta y A. Jaramillo. "Bioplásticos eléctricamente conductores de almidón de yuca". *Rev. Col. Mat.*, No. 5, pp. 42-49, 2014.
- [32] S. W. A. Ghani; A. A. Bakar and S. A. Samsudin. "Mechanical properties of chitosan modified montmorillonite filled tapioca starch nanocomposite films". *Adv. Mater. Res.* Vol. 689, pp. 145-154, 2013.
- [33] S. W. A. Ghani; A. A. Bakar and S. A. Samsudin. "Mechanical and physical properties of chitosan-compatible montmorillonite-filled tapioca starch nanocomposite films". *J. Plast. Film Sheeting*, Vol. 32, No. 2, pp. 140-162, 2016.
- [34] X. Dai and Z. Qiu. "Synthesis and properties of novel biodegradable poly (butylene succinate-co-decamethylene succinate) copolymers from renewable resources". *Polym. Degrad. Stab.*, Vol. 134, pp. 305-310, 2016.
- [35] G. Walther. "High-performance polymers from nature: catalytic routes and processes for industry". *Chem. Sus. Chem.*, Vol. 7, No. 8, pp. 2081-2088, 2014.
- [36] A. F. Sousa; C. Vilela; A. C. Fonseca; M. Matos; C. S. R. Freire; G.-J. M. Gruter; J. F. J. Coelho and A. J. D. Silvestre. "Biobased polyesters and other polymers from 2,5-furandicarboxylic acid: a tribute to furan excellency". *Polym. Chem.*, Vol. 6, No. 33, pp. 5961-5983, 2015.
- [37] M. J. Soares; P.-K. Dannecker; C. Videla; J. Bastos; M. A. R. Meier and A. F. Sousa. "Poly (1,20-eicosanediyl 2,5-furandicarboxylate), a biodegradable polyester from renewable resources". *Eur. Polym. J.*, In Press, Accepted Manuscript, 2017.
- [38] K. M. Zia; A. Noreen; M. Zuber; S. Tabasum and M. Mujahid. "Recent developments and future prospects on bio-based polyesters derived from renewable resources: a review". *Int. J. Biol. Macromolec.*, Vol. 82, pp. 1028-1040, 2016.
- [39] C.-S. Wu. "Characterization and biodegradability of polyester bioplastic-based green renewable composites from agricultural residues". *Polym. Degrad. Stab.*, Vol. 97, pp. 64-71, 2012.
- [40] N. Berezina; B. Yada and R. Lefebvre. "From organic pollutants to bioplastics: insights into the bioremediation of aromatic compounds by *Cupriavidus necator*". *N. Biotechnol.*, Vol. 32, No. 1, pp. 47-53, 2015.
- [41] Y. Jiang; L. Marang; J. Tamis; M. C. M. van Loosdrecht; H. Dijkman and R. Kleerebezem. "Waste to resource: Converting paper mill wastewater to bioplastic". *Water Res.*, Vol. 46, No. 17, pp. 5517-5530, 2012.

- [42] F. Hempel; A. S. Bozarth; N. Lindenkamp; A. Kling; S. Zauner; U. Linne; A. Steinbüchel and U. G. Maier. "Microalgae as bioreactors for bioplastic production". *Microb. Cell Fact.*, Vol.10, 2011.
- [43] G. Dogossy and T. Czigany. "Thermoplastic starch composites reinforced by agricultural by-products: properties, biodegradability, and application". *J. Reinf. Plast. Compos.*, Vol. 30, No. 21, pp. 1819-1825, 2011.
- [44] A. Noreen; K. M. Zia; M. Zuber; M. Ali and M. Mujahid. "A critical review of algal biomass: a versatile platform of bio-based polyesters from renewable resources". *Int. J. Biol. Macromolec.*, Vol. 86, pp. 937-949, 2016.
- [45] K. M. Zia; S. Tabasum; M. Nasif; N. Sultan; N. Aslam; A. Noreen and M. Zuber. "A review on synthesis, properties and applications of natural polymer based carrageenan blends and composites". *Int. J. Biol. Macromolec.*, Vol. 96, pp. 282-301, 2017.
- [46] F.P. La Mantia and M. Morreale. "Green composites: A brief review". *Compos Part A*, Vol. 42, pp. 579-588, 2011.
- [47] N. Peelman; P. Ragaert; B. De Meulenaer; D. Adons; R. Peeters; L. Cardon; F. Van Impe and F. Devlieghere. "Review: application of bioplastics for food packaging". *Trends Food Sci Technol.*, Vol. 32, No. 2, pp. 128-141.
- [48] S. Suttiruengwong; S. Pitak; M. SaeDan; W. Wongpornchai and D. Singho. "Binary-additives toughened biopolymer for packaging application". *Energy procedia*, Vol. 56, pp. 431-438, 2014.
- [49] M. P. Balaguer; P. Fajardo; H. Gartner; J. Gomez-Estaca; R. Gavara; E. Almenar and P. Hernandez-Munoz. "Functional properties and antifungal activity of films based on gliadins containing cinnamaldehyde and natamycin". *Int J Food Microbiol.*, Vol. 173, pp. 62-71, 2014.
- [50] Y. M. Tan; S. H. Lim; B. Y. Tay; M. W. Lee and E. S. Thian. "Functional chitosan-based grapefruit seed extract composite films for applications in food packaging technology". *Mater. Res. Bull.*, Vol. 69, pp. 142-146, 2014.