

ECO-MATERIAL A BASE DE RESIDUOS: COMPORTAMIENTO FÍSICO Y MECÁNICO

Adriana Rojas-León^a, A. M. Bolarín-Miró^b, E. M. Otazo-Sánchez^a, F. Prieto-García^a, F. Fuentes Talavera^c, A. D. Román-Gutiérrez^{*a}

^aÁrea Académica de Química, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo
Adriana_electron@hotmail.com, elenamariaotazo@gmail.com, prietog@uaeh.edu.mx,
aroman@uaeh.edu.mx

^bÁrea Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales. UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo
anabolarin@msn.com

^cDepartamento de Madera, Celulosa y Papel, UDG, Guadalajara, México
ffuentes@dmcyp.cucei.udg.mx

RESUMEN

La paja de cebada, es un residuo que se usa como alimento animal, sin embargo, solo una pequeña proporción tiene este fin, el resto se ha convertido en un problema ambiental debido a las grandes cantidades que se generan cada año. Por otro lado, el polietileno de alta densidad es de los plásticos con más presencia en los vertederos municipales principalmente por los diversos usos que se le ha dado. Con el fin de seguir con el concepto de desarrollo sostenible, en este estudio, ambos residuos se usaron como materia prima en la fabricación de tableros de partículas, dando así una alternativa de disposición final. El objetivo de esta investigación fue caracterizar las propiedades físicas y mecánicas del material elaborado por medio de la normatividad alemana DIN. Un diseño experimental 2³ se realizó para conocer las combinaciones posibles con las variables, tamaño de partícula de la paja de cebada, PC, (0.425, 0.60 y 1.00 mm) y proporción paja de cebada/polietileno de alta densidad, PC/PEAD, (40, 50 y 60%). Las propiedades higroscópicas evaluadas fueron absorción de agua (AA) e hinchamiento del espesor (HE) durante 2 y 24 h de inmersión en agua. Módulo de ruptura (MOR) y módulo de elasticidad (MOE) fueron evaluados para determinar el comportamiento mecánico de los tableros. De acuerdo a la norma DIN 68 761, los 9 tableros elaborados cumplen con lo estipulado en la absorción de agua para uso general. En cuanto al MOR los valores fluctuaron desde 20.5 hasta 26.5 MPa, superando lo estipulado por la norma DIN 52 362. El MOE tuvo resultados que van desde 1879 a 2585 MPa, inferiores a otros valores reportados para tableros realizados con materias primas similares.

Palabras clave: tablero de partículas, paja de cebada, polietileno de alta densidad, reciclabilidad, propiedades.

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de residuos ha ido en aumento día con día debido al gran potencial industrial que presentan al incorporarlos en diversos procesos, exhibiendo ventajas de disponibilidad y sustentabilidad. Dentro de los residuos que más se generan en todo el mundo se encuentran los concebidos por las actividades agrícolas, en particular los derivados de la cosecha de cereales, los cuales pueden ser utilizados como sustitutos de materias primas que procedan de fuentes fósiles.

La cebada (*Hordeum vulgare*) es uno de los cereales más importantes en todo el mundo, con una producción mundial de 123.5 millones de toneladas [1]. Dentro de los residuos que se generan a partir

de la cosecha de este grano, se encuentra la paja, la cual resulta ser una fuente importante de biomasa para la fabricación de productos de mayor valor agregado. De las aplicaciones más interesantes que se le ha dado, es la elaboración de materiales compuestos, en particular la de tableros de partículas (TP) [2-5].

A favor de seguir con el concepto de desarrollo sostenible para satisfacer las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las futuras, actualmente la tendencia en materiales compuestos, se basa en la combinación de residuos generados de diversas fuentes. Los residuos sólidos urbanos presentan de igual forma un problema con su disposición final, en particular los plásticos, por lo que la combinación residuos agrícolas-plásticos se vislumbra como una combinación con alto potencial de investigación.

Conjuntamente, las propiedades finales que presentan los materiales compuestos a base de residuos agrícolas-plásticos, como: alta durabilidad, resistencia a la humedad y a los hongos, han generado la amplia aplicación que se les puede dar en: la industria automotriz, de construcción y de decoración [4-6]. Asimismo, el potencial que muestran estos eco-materiales, ha diversificado en diversas investigaciones de forma que cada vez más se incorporan nuevas combinaciones para su desarrollo. Durante la última década se ha utilizado PP [7], PEAD [8-11], PEBD [12], entre otros. Sin embargo, el uso de plásticos reciclados como matriz ha sido poco estudiado, lo que conllevaría a la reducción del costo final del producto, al utilizar materia prima reciclada y los beneficios para el medio ambiente.

Por lo anterior, los objetivos de este estudio fueron: a) evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los TP elaborados con paja de cebada (PC) y PEAD reciclado (PEADr) y b) establecer los usos que se les puede dar a los TP de acuerdo a la normatividad internacional.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

Se usó PC cultivada en el Valle de Apan, México; cosecha 2010, suministrada por la Cooperativa Financiera Cebaderos. Se molió y se clasificó las partículas obtenidas por medio de un tamiz vibratorio. Las partículas utilizadas fueron las recolectadas en las mallas #18 (1.00 mm), #30 (0.60) y #40 (0.425 mm). Se secaron a una temperatura promedio de 100 °C hasta obtener un contenido de humedad menor o igual a 2%. El PEADr se obtuvo de botes de leche, los cuales se lavaron, se secaron a temperatura ambiente y posteriormente se trituraron hasta obtener partículas de aproximadamente 1 cm x 1 cm.

2.2 Diseño experimental

El software Statgraphics se utilizó para el diseño experimental factorial ortogonal 2^3 , el cual consistió de dos variables y tres niveles (tamaño de partícula: 0.425, 0.60 y 1.00 mm y % de fibra: %40, %50 y %60). Un total de 9 combinaciones con dos réplicas resultaron para la formulación de los TP (tabla 1).

2.3 Elaboración de TP

Las partículas de PC, en las proporciones mencionadas en la tabla 1, se mezclaron de forma manual con el PEADr en un recipiente. Se colocó una capa de paja y después una de plástico, posteriormente se agitó constantemente. La mezcla de partículas y de plástico se distribuyó de manera manual y aleatoria dentro de un marco metálico con las dimensiones deseadas para la formación de un colchón de partículas.

Para la formación del colchón en caliente se colocó las placas metálicas que contenían el colchón, anteriormente formado, en la prensa, a una temperatura de 170 °C, con una presión de 6 MPa durante 10 minutos. Se dejó enfriar el tablero ya prensado para su desmolde del marco metálico.

Tabla 1. Diseño ortogonal 2³ para la fabricación de los TP

No. de experimento	ωPC/ωPEADr (%)	Tamaño de partícula (mm)
1	40/60	0.60
2	40/60	1.00
3	60/40	1.00
4	50/50	0.60
5	60/60	0.60
6	50/50	1.00
7	60/40	0.425
8	50/50	0.425
9	40/60	0.425

2.4 Evaluación de las propiedades de los TP

2.4.1 Propiedades físicas

Para la determinación del comportamiento dimensional, se evaluó la absorción de agua (AA) y el hinchamiento del espesor (HE) durante 2 y 24 horas. Se siguió lo establecido en las normas alemanas DIN 52 351 y 52 364 [13]. Debido a que la PC está formada de partículas fibrosas más que por fibras individuales, se optó por la norma DIN 52 364 (1994) para las dimensiones de las muestras de ensayo (25 x 25 x 5 mm). Sin embargo, el procedimiento para determinar la AA e HE fue basado en las indicaciones de la norma DIN 52 351 (1994), cuya diferencia principal es un tamaño mayor de muestra (50 x 100 x 5 mm). 10 especímenes se analizaron para cada combinación con 2 réplicas.

2.4.2 Propiedades mecánicas

Para conocer el comportamiento mecánico de los TP, se estimó el módulo de ruptura (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE) por medio de la norma DIN 52 362 (1994). Los ensayos se llevaron a cabo en una máquina universal de pruebas fisico-mecánicas de la firma Karl Frank modelo 1981 con una capacidad de carga de 50000 N. La velocidad fue constante de 5mm/min, para asegurar que el rompimiento ocurriera entre los 60 y 90 segundos después del inicio del ensayo. Se evaluaron un total de 6 especímenes para cada combinación, con dos réplicas. MOR y MOE se calcularon siguiendo las ecuaciones 1 y 2 respectivamente:

$$MOR = \frac{3FL}{2ae^2} \quad (1)$$

$$MOE = (F/d) \frac{L^3}{4ae^3} \quad (2)$$

Donde P representa la fuerza máxima de ruptura, L es el claro entre los soportes, a es el ancho del espécimen, e el espesor del mismo y d el incremento de la deformación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Estabilidad dimensional de los TP

Las propiedades de estabilidad dimensional son de las características más importantes de los TP expuestos a condiciones ambientales, determinando así el uso final que se les puede dar. Los

porcentajes de AA y de HE para 2 y 24 h, para las nueve combinaciones de manufactura de los TP, se muestran en la figura 1 y en la figura 2, respectivamente.

Los valores para AA durante 2 y 24 h varían desde 4.60 hasta 19.60% y desde 10.25 hasta 29.52%, respectivamente. Para HE el rango fue desde 0.90 hasta 8.41% y desde 3.28 hasta 12.54%. Los valores más bajos corresponden a la combinación 9, la cual presenta el mayor contenido de plástico (60%) y con el menor tamaño de partícula (0.425 mm).

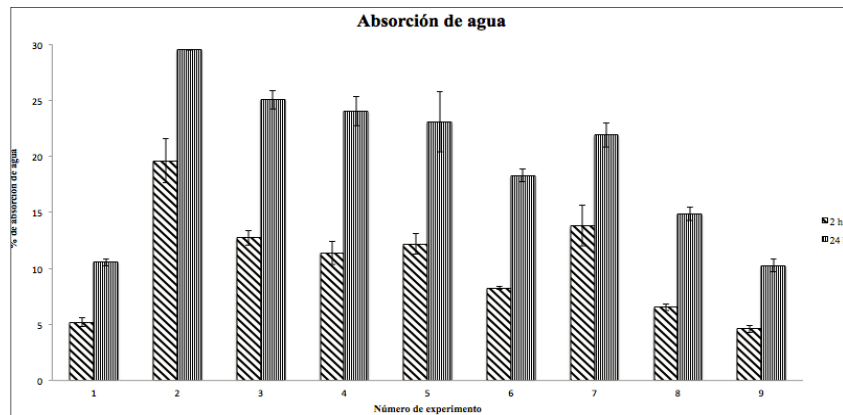


Figura 1. Valores promedio de absorción de agua después de inmersión de agua durante 2 y 24 h de los 9 experimentos de fabricación de tableros de partículas

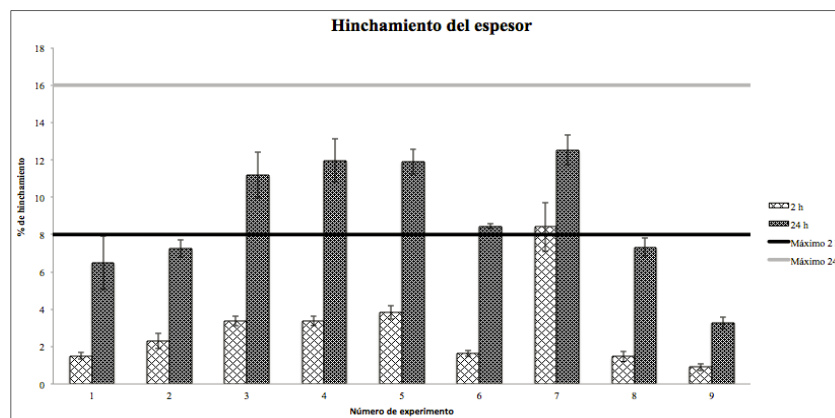


Figura 2. Valores promedio de hinchamiento del espesor después de inmersión de agua a 2 y 24 h de los 9 experimentos de fabricación de tableros de partículas

Lo anterior señala que el contenido de agua que presentan los compósitos es absorbida por la PC. Stokke y Gardner [14] reportaron que la AA en los materiales lignocelulósicos se debe a la presencia de lúmenes en la fibra, huecos e imperfecciones en la interface fibra-plástico y a las micro-grietas que probablemente se formaron durante el proceso de manufactura. Además, con el aumento en el porcentaje de contenido de material lignocelulósico, hay más sitios de residencia del agua y por lo tanto se absorbe más agua [15], Zabihzadeh [11] menciona que la celulosa y las hemicelulosas son las principales responsables de la absorción del agua en las fibras naturales debido al contenido de

numerosos grupos hidroxilo accesibles que estarán interactuando fácilmente con las moléculas de agua mediante puentes de hidrógeno.

En cuanto al tamaño de partícula, a tamaños de partícula mayores, la AA y el HE aumentará, como lo sugieren Wang y Morrel [16] que a partículas más uniformes y pequeñas, es más eficiente el recubrimiento con el plástico dificultando el ingreso de humedad al material.

Antecedentes en la literatura, han reportado valores similares para materiales elaborados con materias primas semejantes. Fuentes-Talavera et al. [17] obtuvieron un contenido de 24.2 y 5.4% de AA y HE a 24 h respectivamente para un compósito a base de bagazo de caña con PEADr, en la misma proporción de 60/40 fibra-plástico. Se ha reportado que los tableros de partículas a base de paja de cereales son más resistentes al agua que los elaborados con partículas de madera [2].

Por otro lado, la norma alemana DIN 68 761 estipula los requisitos que deben cumplir los tableros de partículas de uso general e indica que el HE a 2 h no debe ser mayor a un 8% y a las 24 h es del 16%. De acuerdo con esta normatividad, todas las combinaciones cumplen con lo estipulado para tableros de partículas. En el caso de la absorción, la norma DIN no establece niveles máximos exigidos para esta propiedad, efectuándose este ensayo sólo a modo de control.

3.2 Comportamiento mecánico de los TP

3.2.1 Resistencia a la flexión (MOR)

Los valores obtenidos de MOR para todas las combinaciones probables, de acuerdo al diseño de experimentos, se muestran en la figura 3. Los valores van desde 20.5 hasta 26.5 MPa. La exigencia que establece la norma DIN 52 362 es de un mínimo de 16 MPa. Este requerimiento fue superado por todos los tratamientos.

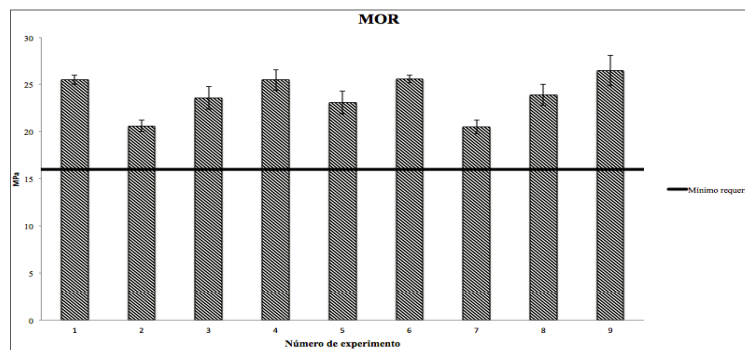


Fig. 3. Valores promedio de resistencia a la flexión de los 9 experimentos de fabricación de tableros de partículas

El TP 9, elaborado con el menor contenido de PC y el tamaño más pequeño de partícula, es el mejor tratamiento en cuanto a la ruptura. Lo anterior sugiere que a menores contenidos de PC, se obtendrán valores más altos en MOR. Una posible explicación de esto se atribuye principalmente a la disminución en el contenido de porosidad por consecuencia a una disminución en el contenido de partículas [7]. Además también se relaciona con la falta de adhesión en la interface de partículas-plástico debido a la incompatibilidad química entre las dos materias primas [18, 19].

Por otro lado, generalmente compósitos elaborados con partículas más grandes presentan mejores propiedades mecánicas [20]. Sin embargo, los resultados en nuestra investigación, indican que a tamaños más pequeños el MOR aumenta. Lo anterior podría deberse a la disminución del coeficiente

de esbeltez (relación longitud/diámetro de las partículas), ya que se ha reportado que las características dimensionales de las partículas influyen tanto al MOR como al MOE [21, 22]. Otra explicación podría ser a que cuando las partículas son de tamaño mayor, los espacios entre partículas incrementan dando lugar a una área disponible para el plástico, aumentando el área de contacto entre éste y la paja, lo cual conlleva a una disminución de las propiedades de flexión [21].

Comparando lo que se obtuvo en esta investigación con otros trabajos similares, los valores de MOR obtenidos en esta investigación son ligeramente superiores. Hung y Wu [18] realizaron un tablero con partículas de bambú y PEADr obteniendo un valor de 17.6 MPa en el tablero con una proporción de 60/40% de fibra/plástico. Cabe señalar que los autores mencionados modificaron las partículas con una esterificación para incrementar las propiedades. Azizi et al. [23] usó paja de cebada como reforzamiento en una resina urea-formaldehído obteniendo un MOR de 7.8 MPa.

3.2.2 Módulo de elasticidad (MOE)

Los valores promedio obtenidos para los 9 experimentos de MOE se muestran en la figura 4. La variación de los valores va de 1879 a 2585 MPa. Para esta propiedad no existen exigencias en la norma DIN. Sin embargo, comparando los valores de esta investigación con lo reportado en otros trabajos previos se encuentran por debajo. Panthapulakkal y Sain [24] mencionan que para un compuesto elaborado con paja de trigo y PEAD virgen en una proporción 65/35 % obtuvieron un MOE de 3900 MPa, lo que sugiere que en la elaboración de TP con PC y PEADr se debe incorporar un agente compatibilizador para que esta propiedad mejore.

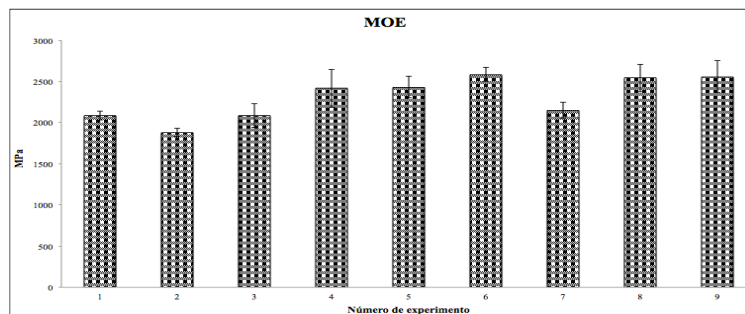


Figura 4. Valores promedio de módulo de elasticidad de los 9 experimentos de fabricación de tableros de partículas

Generalmente, compósitos elaborados con partículas más grandes presentan mejores propiedades mecánicas [20]. Sin embargo, los resultados en nuestro experimento indican que a tamaños más pequeños el MOR aumenta. Lo anterior podría deberse a la disminución del coeficiente de esbeltez (relación longitud/diámetro de las partículas), ya que se ha reportado que las características dimensionales de las partículas influyen tanto al MOR como al MOE [21, 22]. Otra explicación podría deberse a que cuando las partículas son de tamaño mayor, los espacios entre partículas incrementan dando lugar a una área disponible para el plástico, aumentando el área de contacto entre éste y la paja, lo cual conlleva a una disminución de las propiedades de flexión [21].

Los valores más bajos de manera general se presentaron en las combinaciones con 40/60 % y los valores más altos en las combinaciones 50/50 %. Sin embargo, los valores de MOE decaen cuando se tiene una relación 60/40%, probablemente este decremento puede ser debido a una concentración de esfuerzos. A contenidos mayores de plástico puede aumentar el efecto de la concentración de tensión

alrededor de las partículas de paja, lo que tendrá como consecuencia un fallo prematuro. Además, la cristalinidad tanto de la celulosa presente en la PC como del PEADr puede tener influencia sobre este comportamiento. El porcentaje de cristalinidad del PEAD está entre el rango de 60-80% y se ha reportado que en los plásticos reciclados el grado de cristalinidad es generalmente menor al de los plásticos vírgenes [25] por consecuencia de una reticulación que tienen los plásticos durante la exposición a una termo o foto oxidación [26]. Comparando la cristalinidad del PEADr con la de la celulosa presente en la PC, la cual se reporta con un 74.4% [27], el material lignocelulósico es más rígido, dando lugar a que a más % de PC el material compuesto disminuya su flexibilidad.

Por otro lado, en el MOE el tamaño de partícula presenta la misma tendencia que en el MOR. Este comportamiento es parecido a lo que presentó el MOR y puede deberse a las mismas razones, una disminución en el coeficiente de esbeltez de las partículas de PC y/o a un aumento en el área de contacto de las partículas-plástico.

CONCLUSIONES

Los TP elaborados con PC y PEADr en las proporciones propuestas en este estudio, %PC: 40, 50 y 60; tamaño de partícula: 0.425, 0.60 y 1.00 mm, cumplen con los requisitos establecidos en las normas DIN en cuanto al comportamiento físico en las 9 combinaciones generadas por el diseño experimental, así como en el módulo de flexión (MOR). Los valores que mostraron en MOE se encuentran por debajo de lo reportado para materiales elaborados con materias similares.

Contenidos mayores de PC y tamaños más grandes de partícula tendrán un efecto negativo sobre la estabilidad dimensional de los TP. Debido principalmente al contenido de material lignocelulósico presente en la fibra y sus numerosos grupos hidroxilo accesibles que estarán interactuando fácilmente con las moléculas de agua mediante puentes de hidrógeno. Así mismo, a un mayor tamaño de partícula es más ineficiente el recubrimiento con el plástico facilitando el ingreso de humedad al material.

Por otro lado, una disminución en el % de PC y un aumento en el TP tienen una influencia negativa tanto en el MOR como en MOE. Sin embargo, cuando se trata de la elasticidad después del 50% de PC se observa una disminución en los valores de MOE, probablemente debido a una concentración de esfuerzos o al % de cristalinidad del material lignocelulósico en comparación del PEADr.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Gobierno del Estado de Hidalgo por el apoyo otorgado a través del proyecto: FOMIX-HGO-2010-150905. Rojas-León además, agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca 59009, otorgada para estudios de posgrado.

BIBLIOGRAFÍA

1. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Estadísticas de producción mundial de cebada en el año 2011. Consultado el 22 de Julio de 2013. http://faostat3.fao.org/home/index_es.html?locale=es#DOWNLOAD
2. L. Zhang, Y. Hu, "Novel lignocellulosic hybrid particleboard composites made from rice straws and coir fibers", *Materials and Design*, Vol. 55, 2014, pp. 19-26.
3. X. D. Zhu, F. H. Wahg, Y. Liu, "Properties of wheat-straw boards with FRW based on interface treatment", *Physics Procedia*, Vol. 32, 2012, pp. 430-443.

4. X. Li, Z. Cai, J. E. Winandy, A. H. Basta, "Effect of oxalic acid and steam pretreatment on the primary properties of UF-bonded rice straw particleboards", *Industrial Crops and Products*, Vol. 33, 2011, pp. 665-669.
5. T. Tabarsa, S. Jahanshahi, A. Ashori, "Mechanical and physical properties of wheat straw boards bonded with tannin modified phenol–formaldehyde adhesive", *Composites: Part B*, Vol. 42, 2011, pp. 176-180.
6. R. Hashim, W. N. A. Wan Nadhari, O. Sulaiman, F. Kawamura, S. Hiziroglu, M. Sato, T. Sugimoto, T. Seng, R. Tanaka, "Characterization of raw materials and manufactured binderless particleboard from oil palm biomass". *Materials and Design*, Vol. 32, 2011, pp. 246-254.
7. N. Ayrimis, J. H. Kwon, T. H. Han, "Improving core bond strength and dimensional stability of particleboard using polymer powder in core layer", *Composites: Part B*, Vol. 43, 2012, pp. 3462-3466
8. M. C. Ngueho Yemele, A. Koubaa, A. Cloutier, P. Soulounganga, T. Stevanovic, M. P. Wolcott, "Effects of hot water treatment of raw bark, coupling agent, and lubricants on properties of bark/HDPE composites", *Industrial Crops and Products*, Vol. 42, 2013, pp. 50-56
9. N. Petchwattana, S. Covavisaruch, S. Chanakul, "Mechanical properties, thermal degradation and natural weathering of high density polyethylene/rice hull composites compatibilized with maleic anhydride grafted polyethylene", *J Polym Res*, Vol. 19, 2012, pp. 1-9
10. P. Shahi, A. H. Behraves, S. Y. Daryabari, M. Lotfi, "Experimental investigation on reprocessing of extruded wood flour/ HDPE composites", *Polym Composite*, Vol. 33, 2012, pp. 753-763
11. S. M. Zabihzadeh, "Water uptake and flexural properties of natural filler/HDPE composites", *BioResources*, Vol.5, 1, 2010, pp. 316-323.
12. Y. Habibi, W. K. El-Zawawy, M. M. Ibrahim, A. Dufresne, "Processing and characterization of reinforced polyethylene composites made with lignocellulosic fibers from Egyptian agro-industrial residues", *Composites Science and Technology*, Vol. 68, 2008, pp. 1877-1885.
13. DIN, 1994. Taschenbuch Nr. 60. Holzfaserplatten, Spanplatten, Sperrholz. Normen Richtlinien. Deutsches Institut für Normung E.V., 5. Auflage. Beuth Verlag GmbH, Köln und Berlin, 326 pp
14. D. D. Stokke, D. J. Gardner, "Fundamental aspects of Wood as a component of thermoplastics composites", *Journal of Vinyl and Additive Technology*, Vol. 9, 2003, pp. 96-104
15. A. Ashori, A. Nourbakhsh, "Characteristics of wood–fiber plastic composites made of recycled materials", *Waste Management*, Vol. 29, 2009, pp. 1291-1295
16. H. Zhang, J. Liu, Z. Wang, X. Lu, "Mechanical and thermal properties of small diameter original bamboo reinforced extruded particleboard", *Materials Letters*, Vol. 100, 2013, pp. 204-206.
17. F. J. Fuentes-Talavera, J. A. Silva-Guzmán, H. G. Richter, R. Sanjuán-Dueñas, J. Ramos Quirarte, "Effect of production variables on bending properties, water absorption and thickness swelling of bagasse/plastic composite boards", *Industrial Crops and Products*, Vol. 26, 2007, pp. 1-7.
18. K. C. Hung, J. H. Wu, "Mechanical and interfacial properties of plastic composite panels made from esterified bamboo particles. *J Wood Sci*, Vol. 56, 2010, pp. 216-221.
19. P. W. Balasuriya, L. Ye, Y. W. Mai, J. Wu, "Mechanical properties of wood flake–polyethylene composites. II. Interface modification", *J Appl Polym Sci*, Vol. 83, 2002, pp. 2505-2521.
20. H. S. Yang, D. J. Kim, H. J. Kim "Rice straw–wood particle composite for sound absorbing wooden construction materials", *Bioresource Technology*, Vol. 86, 2, 2003, pp. 117– 121.

21. X. Li, Z. Cai, J. E. Winandy, A. H. Basta, "Selected properties of particleboard panels manufactured from rice straws of different geometries", *Bioresource Technology*, Vol. 101, 2010, pp. 4662-4666.
22. N. Boquillon, G. Elbez, U. Schonfeld, "Properties of wheat straw particleboards bonded with different types of resin", *Journal of Wood Science*, Vol. 50, 2004, pp. 230-235.
23. K. Azizi, T. Tabarsa, A. Ashori, "Performance characterizations of particleboards made with wheat straw and waste veneer splinters", *Composites: Part B*, Vol. 42, 2011, pp. 2085-2089
24. S. Panthapulakkal, M. Sahin, "Agro-residue reinforced high-density polyethylene composites: Fiber characterization and analysis of composite properties", *Composites: Part A*, Vol. 38, 2007, pp. 1445-1454.
25. S. Kazemi-Najafi, "Use of recycled plastics in wood plastic composites - A review", *Waste Management*, Vol. 33, 2013, pp. 1898-1905
26. S. M. Tamboli, S. T. Mhaske, D. D. Kale, "Crosslinked polyethylene. *Indian Journal of Chemistry Technology*", Vol. 11, 2004, pp. 853-864.
27. S. Martínez-Lozano, "Evaluación de la biomasa como recurso energético renovable en Cataluña". Tesis de Doctorado. Universidad de Girona, Girona, España, 2009.