

**Programa de Doctorado en Ingeniería
Universidad de Costa Rica - Instituto
Tecnológico de Costa Rica**

**Informe de la investigación de pasantía en
Pedregal, S.A. Planta en Belén de Heredia**

**Hazel Aragón Oconor
Carné 920245**

Junio de 2022

Resumen ejecutivo

Se estudió el efecto de la incorporación del material plástico residual no valorizable en concreto usado en la fabricación de bloques de construcción.

En específico, se evaluó la existencia de algún efecto en la difusividad de agua en esas matrices porosas.

El material plástico se adicionó en la forma del producto *Resin8*, cuya composición es propiedad de la Empresa.

No se encontró diferencia significativa en la capacidad de sorción de H₂O a 23 °C, con respecto al bloque estándar (sin plástico agregado).

El área fluxional específica para el secado a 50°C y 87 kPa de presión atmosférica, no fue afectado por la presencia de plástico en la forma de *Resin8*.

Los ecobloques *Resin8*-plástico con contenido de 3% y 5% mostraron un área fluxional específica menor en 25% a los casos de bloque estándar, ecobloque con *Resin8*-plástico al 1% y ecobloque con *Resin8*-blíster al 1% de medicamentos.

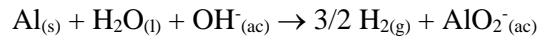
I. Introducción:

En este informe se presentan resultados relativos a la difusividad de agua en las matrices sólidas *Resin8* (con y sin plástico genérico agregado, PL) y en bloques ya moldeados y fraguados, que de igual manera contienen plástico incorporado y los productos tradicionales sin la incorporación de residuos plásticos genéricos no valorizables.

Se verá que los resultados indican que la presencia de PL incorporado a la formulación de los bloques de construcción no altera los parámetros de secado de los productos finales.

El Dr. Julio F. Mata Segreda presentó a Pedregal la idea de explorar las propiedades de ecobloques para los cuales, el residuo plástico usado fuera constituido exclusivamente por empaques de medicinas (blisters). La razón no solo es el inmenso volumen de ese tipo de residuo no reciclable, sino también sacar ventaja de que se trata de un material hecho de PVC y aluminio metálico que actualmente no es recibido en las recicladoras tradicionales en Costa Rica.

El medio básico del concreto transforma lentamente el aluminio metálico en ion aluminato:



que actúa como ligante adicional para los componentes orgánicos e inorgánicos de los *ecobloques*.

Igualmente, en el caso discutido antes, él determinó la rapidez de absorción de agua por *Resin8* con blíster exclusivamente (*Resin8*-blíster) y los resultados fueron los siguientes:

A. Absorción de agua en *Resin8* tradicional 22 °C

$$\frac{C(\text{H}_2\text{O})}{\text{masa matriz sólida}} = (166 \pm 3) \frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{kg sólido}} \times \left[\frac{t}{h} \right]^{0.132 \pm 0.007}$$

De manera análoga al anterior caso, se calcula para este material

$$\frac{1}{m} \left[\frac{dC(\text{H}_2\text{O})}{dt} \right]_{12h} = (2,5 \pm 0,1) \frac{\text{g H}_2\text{O h}^{-1}}{\text{kg sólido}}$$

B. Absorción de agua en *Resin8*- blíster 22 °C

$$\frac{C(\text{H}_2\text{O})}{\text{masa matriz sólida}} = (2,2 \pm 0,3) \times 10^2 \frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{kg sólido}} \times \left[\frac{t}{h} \right]^{0.09 \pm 0,01}$$

De manera análoga al anterior caso, se calcula para este material

$$\frac{1}{m} \left[\frac{dC(\text{H}_2\text{O})}{dt} \right]_{12h} = (2,1 \pm 0,4) \frac{\text{g H}_2\text{O h}^{-1}}{\text{kg sólido}}$$

C. Absorción de agua en bloque tradicional, 22 °C

$$\frac{C(H_2O)}{\text{masa matriz sólida}} = (56 \pm 7) \frac{g H_2 O}{kg \text{ sólido}} \times \left[\frac{t}{h} \right]^{0.14 \pm 0.05}$$

De esta relación es posible calcular (arbitrariamente) la rapidez de absorción de H₂O a 12 h:

$$\frac{1}{m} \left[\frac{dC(H_2O)}{dt} \right]_{12h} = (0,9 \pm 0,4) \frac{g H_2 O h^{-1}}{kg \text{ sólido}}$$

D. Absorción de agua en eco bloques

$$\frac{C(H_2O)}{\text{masa matriz sólida}} = (52 \pm 7) \frac{g H_2 O}{kg \text{ sólido}} \times \left[\frac{t}{h} \right]^{0.2 \pm 0.1}$$

De manera análoga al anterior caso, se calcula para este material

$$\frac{1}{m} \left[\frac{dC(H_2O)}{dt} \right]_{12h} = (1,4 \pm 0,7) \frac{g H_2 O h^{-1}}{kg \text{ sólido}}$$

Considerando los ámbitos de incertidumbre y lo heterogéneo del número reducido de las muestras estudiadas, el Prof. Mata Segreda concluyó que la adición de residuos plásticos no altera la permeabilidad de los eco bloques, con respecto al producto tradicional.

El Prof. Mata Segreda determinó también la cinética de secado a 50°C de muestras de esos dos materiales, obteniendo los siguientes resultados.

E. Parámetros de secado de bloque tradicional a 50°C

Fracción de secado crítico = (0,44 ± 0,08)

Tasa de secado en segunda etapa = (0,065 ± 0,002) h⁻¹ m⁻²

F. Parámetros de secado de eco bloque a 50°C

Fracción de secado crítico = (0,524 ± 0,003)

Tasa de secado en segunda etapa = (0,056 ± 0,005) h⁻¹ m⁻²

Otra vez se nota que la presencia de residuos PL no altera significativamente la difusividad de agua en ambas matrices sólidas.

El caso de la incorporación específica de blíster, tampoco indica que haya un efecto significativo en la difusividad del agua en la *Resin8* con blíster vs. *Resin8*.

Se hace evidente que las conclusiones de los estudios preliminares del Prof. Mata Segreda son únicamente válidos si se siguen los procedimientos desarrollados por Pedregal S.A. para la fabricación de los eco bloques experimentales (molienda, composición de la mezcla y condiciones de fraguado).

Pensando en la oportunidad de que esta innovación permee a pequeñas y grandes empresas, se hace muy

necesario establecer parámetros de calidad y desempeño para los futuros “ecobloques de otras empresas”. Por esta razón debe desde ahora obtenerse parámetros cinéticos de difusividad de agua en los eventuales ecobloques de construcción. Por supuesto que, estos datos de calidad científico-técnicos solo son pertinentes al aspecto de permeabilidad al agua.

En esta investigación se tomaron muestras de la materia de *Resin8* y la *Resin8* - blíster al 1%, mezclado con agregados de concreto. Bloques estándar, bloque *Resin8* al 1%, 3% y 5% mezclado con agregado de concreto para ser estudiados sus parámetros fisicoquímicos y constatar cuanto es el nivel de significancia de las variables de los productos entre sí.

II. Objetivo general:

Determinar los parámetros cinéticos de sorción y de secado de agua del bloque estándar y los ecobloques, para eventual generación de parámetros de desempeño.

III. Objetivos específicos:

1. Determinar los parámetros cinéticos de sorción de agua a temperatura ambiente (23 °C) y para secado a 50 °C (*vide infra*).
2. Determinar criterios de calidad para la permeabilidad de los ecobloques resultantes.
3. Generar los criterios numéricos científico-técnicos, necesarios para poder sustentar una solicitud de emisión de una norma técnica sobre permeabilidad del agua, ante los organismos de calidad costarricenses.
4. Presentar estos resultados en al menos un foro internacional sobre materiales de construcción.

IV. Metodología

Los procedimientos para seguir son los mismos que se han usado en la tesis doctoral de la autora, para cuantificar la absorción y secado (desorción) de líquidos combustibles por las matrices biomásicas *pinzote* de palma aceitera (*Elaeis guinnensis*) y cáscara de semilla de *coyol* (*Acrocomia* sp.).

A. Sorción de líquidos por matrices porosas. En frascos de Kubelka se equilibra el líquido bajo estudio (agua para el caso del proyecto de ecomateriales) con cantidades del sólido poroso. Se da seguimiento a la absorción de líquido, para luego obtener los parámetros de ajuste c y q en la ecuación empírica:

$$\frac{\text{Cantidad de agua absorbida}}{\text{masa de material poroso}} = c \times t^q$$

Ec. 1

en donde c y q son parámetros empíricos similares a los resultantes de integrar la ecuación que define la segunda ley de Fick ($q = 1/2$).

B. Curva de secado de material poroso impregnado con agua. El seguimiento de la pérdida de masa (m) a diferentes tiempos (t) permite obtener los parámetros cinéticos para secado de un material poroso (curva de Krishner).

La visión microscópica del proceso de secado de un material poroso muestra tres fases cinéticas (McCabe, 2007). La primera se evidencia por una rapidez de secado constante. La interpretación molecular es que el ritmo del proceso está definido por el balance entre la rapidez de evaporación de agua superficial y la llegada de más agua a la superficie, proveniente de regiones cercanas a esta. Este régimen de rapidez constante es función de las características moleculares del agua (u otros líquidos) tales como propensión al paso de fase condensada a fase gaseosa (presión de vapor) y masa molecular.

La segunda fase es de rapidez variable. Comienza cuando aparecen “islas secas” en la superficie de las partículas; lo que implica que se hace determinante las características de difusión de agua (u otros líquidos) en la matriz sólida porosa. La rapidez de esta segunda fase cinética depende del grado de humedad residual. La ecuación 2 describe el proceso:

$$-\frac{dm}{dt} = k \times \text{Área} \times (m - m_{final}) \quad \text{Ec. 2}$$

El parámetro k de la Ec. 2 se obtiene por regresión lineal de los valores instantáneos $-dm/dt$ en función ($m - m_{final}$). Los datos crudos son aquellos masa - tiempo medidos por medio de una balanza de secado (Conejo Barboza & Mata Segreda, 2018). Los valores $-dm/dt$ se obtienen por diferenciación analítica de los pares de datos de la fase de rapidez variable de secado. El valor del área fluxional del transporte de humedad sólido → entorno gaseoso se detalla en el artículo recién citado.

El valor de k es entonces la tasa específica de secado, que refleja la transferencia de masa en el sistema de poros de los sólidos en estudio.

Una tercera fase matemáticamente más compleja se observa a valores muy elevados de secado (mayor a 90%), razón por la cual no se incluye en el análisis.

C. Materiales. Las determinaciones indicadas en A y B se realizaron en bloques estándar, *ecobloques*-blister, y el material denominado *Resin8* de Pedregal, que la empresa ha encontrado que cumple con los estándares de resistencia mecánica y de otras propiedades.

V. Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados de medición de parámetros de la materia prima para la *Resin8*, *Resin8*-blíster al 1% y bloques. Los parámetros estudiados son % (H₂O)_{sat}, 50 °C, área fluxional específica (m²/ kg), x_c , k_2 (s⁻¹m⁻²), y la relación de los coeficientes de difusión del agua en el poro y en la fase líquida libre, $D_{\text{poro}}/D_{\text{líquido}}$. En los siguientes cuadros se presentan los parámetros de las diferentes pruebas realizadas.

Cuadro 1. Resumen de parámetros dinámicos para materia prima *Resin8*, *Resin8*-blíster al 1%, *Resin8*-plástico al 1%, 3% y %5, a 50 °C y 87 kPa.

Parámetro	Materia prima <i>Resin8</i>	<i>Resin8</i> -blíster al 1%	<i>Resin8</i> - plástico al 1%	<i>Resin8</i> - plástico al 3%	<i>Resin8</i> - plástico al 5%
% (H ₂ O) _{sat} , 50°C	16 ± 0,8 N=7	16,1 ± 1 N=8	6,1 ± 1,1 N=8	6,4 ± 0,5 N=8	5,7 ± 0,46 N=6
Área fluxional específica / m ² / kg	2,4 ± 0,1 N= 8	2,8 ± 0,4 N=8	1,0 ± 0,1 N=8	1,3 ± 0,1 N=8	1,03 ± 0,08 N=5
x_c	0,33 ± 0,04 N=8	0,36 ± 0,05 N=7	0,52 ± 0,06 N=8	0,47 ± 0,04 N=8	0,52 ± 0,02 N=6
$k_2/ s^{-1} m^{-2}$	(5,63 ± 0,10) × 10 ⁻³ N=8	(1,08 ± 0,22) × 10 ⁻² N=8	(2,0 ± 0,3) × 10 ⁻² N=8	(1,7 ± 0,2) × 10 ⁻² N=8	(2,2 ± 0,2) × 10 ⁻² N=5
$D_{\text{poro}}/ D_{\text{líquido}}$	0,35 ± 0,07 N=8	0,43 ± 0,08 N=8	0,8 ± 0,2 N=8	0,6 ± 0,1 N=8	0,083 ± 0,03 N=5

Cuadro 2. Resumen de parámetros dinámicos para bloque estándar, ecobloque *Resin8*–blíster al 1%, ecobloque *Resin8-plástico* al 1%, 3% y al %5, a 50 °C y 87 kPa.

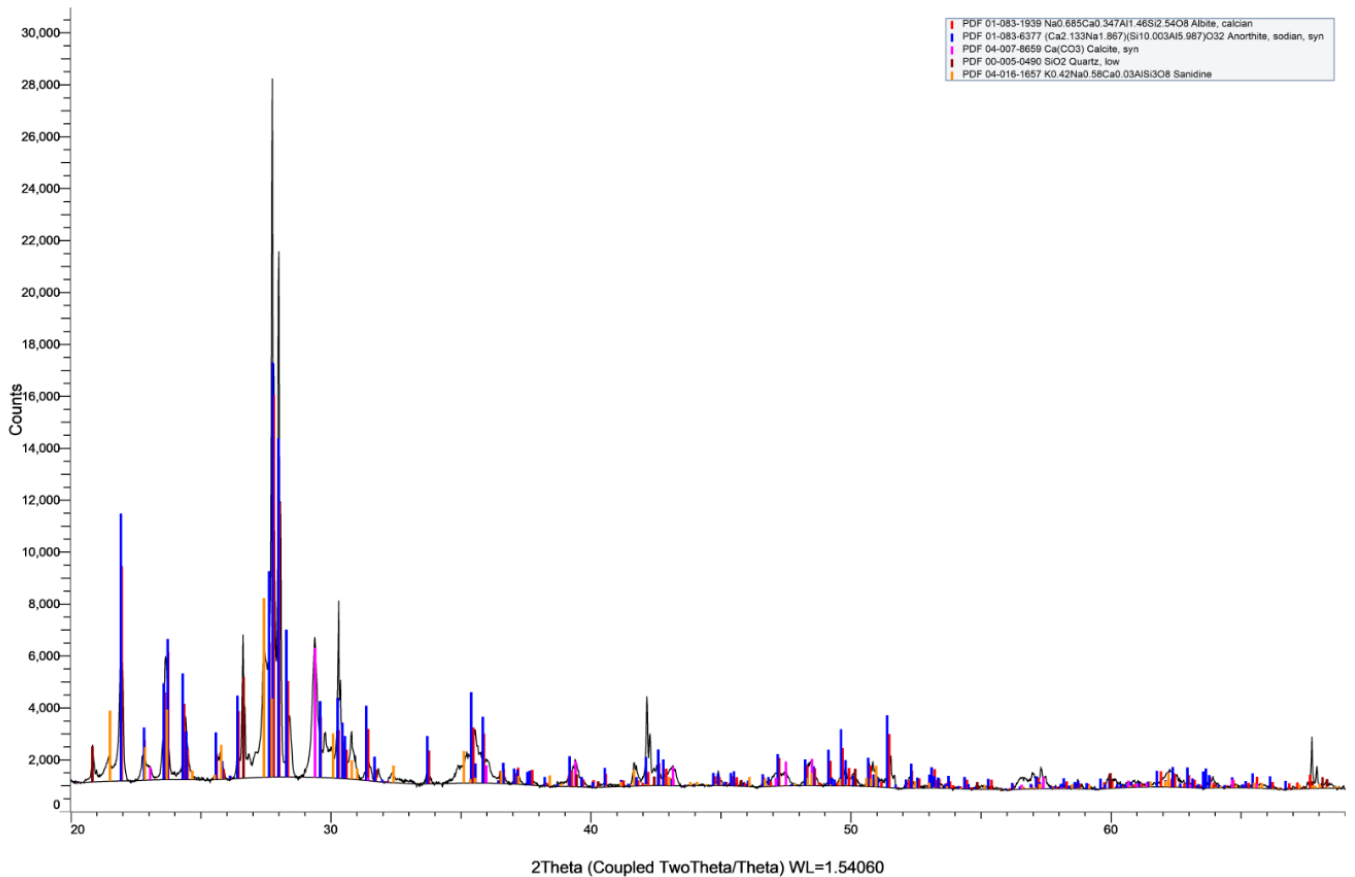
Parámetro	Bloque estándar	Ecobloque	Ecobloque	<u>Ecobloque</u>	Ecobloque
		<i>Resin8-blíster al 1%</i>	<i>Resin8- plástico al 1%</i>	<i>Resin8- plástico al 3%</i>	<i>Resin8- plástico al 5%</i>
% (H_2O_{sat} , 50°C)	4,5 ± 0,3 N=8	4,2 ± 0,3 N=8	4,2 ± 0,3 N=8	3,5 ± 0,2 N=8	3,0 ± 0,5 N=7
Área fluxional específica / m ² / kg	0,9 ± 0,1 N= 8	1,1 ± 0,2 N=8	1,1 ± 0,2 N=8	0,75 ± 0,06 N=7	0,62 ± 0,06 N=6
x_c	0,36 ± 0,03 N=7	0,31 ± 0,06 N=8	0,31 ± 0,06 N=8	0,40 ± 0,07 N=8	0,4 ± 0,1 N=8
$k_2 / s^{-1} m^{-2}$	(2 ± 0,1) x 10 ⁻² N=8	(2,6 ± 0,6) x 10 ⁻² N=7	(2,6 ± 0,6) x 10 ⁻² N=7	(2,5 ± 0,5) x 10 ⁻² N=7	(4 ± 2) x 10 ⁻² N=6
$D_{poro} / D_{líquido}$	0,29 ± 0,08 N=8	0,31 ± 0,07 N=7	0,31 ± 0,07 N=7	0,4 ± 0,1 N=8	0,45 ± 0,07 N=6

Cuadro 3. Resumen de prueba de capacidad de sorción para bloque de construcción estándar, ecobloque *Resin8*-blíster al 1%, ecobloque *Resin8* al 1%, ecobloque *Resin8* al 3% y ecobloque *Resin8* al 5%, a 23 °C y 87 kPa.

Material	Capacidad de sorción / cm ³ g ⁻¹
Bloque estándar	0,10
Ecobloque <i>Resin8</i> – blíster al 1%	0,074
Ecobloque <i>Resin8</i> al 1%	0,10
Ecobloque <i>Resin8</i> al 3%	0,10
Ecobloque <i>Resin8</i> al 5%	0,10

Difractograma Difractograma de rayos X del ecobloque *Resin8* - blíster al 1%

Bloque/Blister Pedregal



Materia prima para la Resin8-plástico y Resin8-blíster al 1%

El parámetro dinámico $k_2/s^{-1}m^{-2}$ para la materia prima para Resin8- plástico y Resin8-blíster al 1% del cuadro 1, se observa que se tiene diferencias estadísticamente significativas. Lo que se puede inferir es que el residuo de blíster existe aluminio metálico residual, lo que disminuye la compatibilidad con el H₂O con el cemento fraguado, que contiene plásticos mixtos en la Resin8-blíster comparado con la materia prima de Resin8-plástico. Puede pensarse que el aluminio estimula la difusión del H₂O en la superficie.

Bloque estándar y ecobloque Resin8-blíster 1%, a 50 °C y 87 kPa.

Con respecto al bloque Resin8- blíster 1% y al bloque estándar, los parámetros cinéticos se muestran en el cuadro 2, en donde se observa que no existen diferencias significativas en los parámetros dinámicos como son: % (H₂O)_{sat}, x_c , k_2 , $D_{poro}/D_{líquido}$. El parámetro de área fluxional específica si es diferente con un nivel de certeza del 95%.

Bloque estándar y ecobloque Resin8- plástico 1%, 50 °C y 87 kPa.

Con respecto al bloque estándar y para el ecobloque Resin8- plástico 1%, se muestran los parámetros cinéticos en el cuadro 2. No se observó diferencias significativas.

Ecobloque Resin8-blíster 1%, ecobloque Resin8- plástico al 1%, ecobloque Resin8- plástico al 3% y ecobloque Resin8 al 5%, a 50 °C y 87 kPa.

Tampoco se observaron diferencias significativas entre ambos ecobloques, lo que permite suponer que la incorporación de blíster no desmejora las propiedades del ecobloque Resin8-blister 1%.

Resin8-blister al 1% vs Resin8-plástico al 1%, al 3% y al 5%

Se observó diferencias significativas en el parámetro dinámico % (H₂O)_{sat} del Resin8-blister al 1% comparado con las demás formulaciones de Resin8.

Capacidad de sorción para bloque estándar, ecobloque Resin8- blíster 1%, ecobloque Resin8- plástico 1%, al 3%, al 5%, a 50 °C y 87 kPa.

Para los ecobloque Resin8-blister al 1% es la única diferencia observable.

Difractograma de rayos X del ecobloque *Resin8*- blíster al 1%.

El resultado del difractograma del ecobloque *Resin8*-blíster al 1% se observa que la cristalinidad es relativamente alta alrededor de 85%, el blíster solo genera una obstrucción sin que haya variación significativa, en la fase inorgánica de los bloques. En otras palabras, la interacción blíster-inorgánicos es de naturaleza mecánica.

VI. Conclusiones

No hay diferencia en la capacidad de sorción de H₂O por efecto del contenido de plástico en general, aunque si hay una modesta disminución de 25% para el caso de la formulación con blíster.

El área fluxional específica para el secado a 50 °C y 87 kPa de presión atmosférica, no fue afectada por la presencia de plástico por la presencia de *Resin8*.

Los ecobloques con contenido 3% y 5% de *Resin8* mostraron un área fluxional específica menor en 25%, a los casos de bloque estándar, ecobloque *Resin8*-1% y ecobloque *Resin8*-1% blíster de medicamentos.

En la formulación *Resin8*-blister al 1%, el mecanismo de evaporación superficial como determinante cinético es estimulado (área fluxional específica es proporcional a la rapidez de secado inicial de una muestra).

El área fluxional específica para evaporación del H₂O es mayor para el material ecobloque *Resin8*-blíster al 1% que para el caso del bloque estándar.

Referencias

Conejo-Barboza, G., Mata-Segreda, J. F. "Drying kinetics as tool for the assessment of dynamic porosity of catalyst-support materials", *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*, **2018**, DOI: 10.5171/2018.901967.

McCabe, W. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química* (Sétima edición). México DF. McGraw-Hill Interamericana.

Moya, R.; Camacho, D. ; Mata, J.; Soto-Fallas, R. (2013). " Fungal decay, coating, burning propeties and change of color of particleboards manufactured with woody biomass, agricultural wastes and Tetra Park residues", *Journal of Biomaterials and Nanobiotechonology*, **2013**,4,334-342.

Moya R.;Camacho D.; Soto F. R.; Mata-Segreda J. (2014). " Internal bond of particleborads mde of three wood species mixture with empty fruit bubch of *Elaeis guineensis*, laevas of *Ananas comosus* or Tetra Park", *Goblal Advancend Reasech Journal of Agricultural Science*,**2014**, 3(11), 387-393.

Moya, R.; Camacho D.;Oporto G. S.; Soto R. F.; Mata, J. S. (2014). " Physicla, mechanical and hidration kinetics of prticleboards manufactured with woody biomass (*Cupressus lusitanica*, *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*), agricultural resources, and Tetra packages", *Waste Managament and Research* ,**2014**, 32 (2), 106-114.

Moya- Roque, R.; Camacho-Cornejo, D.; Soto-Fallas, R; Mata-Segreda J.(2015). "Internal Bond Strength of particle boards manufactured from a mixture of *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, *Cupressus lusitanica* with the fruit of *Elaeisguinesis*, leaves of *Ananas comosus* and tetra pack packages", *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, **2015**, 12(28), 36-45.

Moya R.; Camacho D.; Soto R.; Mata-Segreda J.F; Vega-Baudrit J. (2015). " Chemical and extractives compatibility of empty bunch fruit of *Elaeis guneensis*, leaves of *Ananas comosus* and *Tetrapak* with wood used inparticleborads in tropical areas", *Latin American Applied Researc*, **2015**, 45, 1-10.