

آنالیز حرارتی لایه های استیله شده راش

آیسونا طلایی^۱، بهبود محبی^۲، سعید کاظمی نجفی^۳

گروه علوم چوب و کاغذ، دانشگاه تربیت مدرس، گروه علوم چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، صندوق پستی ۳۵۶-۴۶۴۱۴، نور-مازندران
mohebyb@modares.ac.ir

چکیده

در این پژوهش تأثیر استیلاسیون بر روی رفتار حرارتی لایه های راش مورد مطالعه قرار گرفت. لایه های راش در شرایط اتمسفری و درون آون در دمای 120°C با انیدرید استیک و بدون حضور کاتالیست، در طی زمان های ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۰۲ دقیقه تیمار شدند. درصد افزایش وزنی (WPG) لایه ها به عنوان شاخص شدت تیمار استیلاسیون $1/24$ ، $9/01$ ، $11/49$ ، $13/15$ و $17/81$ به دست آمد. لایه های تیمار شده و تیمار نشده برای بررسی رفتار حرارتی توسط دستگاه آنالیز حرارتی هم زمان (STA) مورد آزمون قرار گرفتند و نمودارهای وزن سنجی حرارتی (TGA) و آنالیز حرارتی دیفرانسیلی (DTA) آنها ثبت گردید. نتایج DTA نشان دادند که کلیه نمونه ها دارای دو پیک گرمای می باشند و با افزایش شدت تیمار استیلاسیون نقطه شروع اشتعال نمونه های استیله شده در پیک گرمای اول نسبت به نمونه های استیله نشده (شاهد) در دمای بالاتری قرار دارد؛ ضمن این که اشتعال آنها انرژی نسبتاً کمتری آزاد می کند؛ ولی نمونه های استیله شده دیرتر به پیک گرمای دوم می رسند و انرژی بیشتری نسبت به نمونه شاهد آزاد می کنند. بررسی نمودارهای TGA نشان داد که با افزایش شدت تیمار، تخریب حرارتی نمونه های استیله شده در دماهای بالاتری نسبت به نمونه های تیمار نشده روی می دهد. کاهش جرم در نمونه شاهد در دمای کمتر و با سرعت بیشتری صورت می گیرد؛ در حالی که با افزایش شدت تیمار استیلاسیون کاهش جرم دیرتر و در دمای بالاتری اتفاق می افتد.

واژه های کلیدی: استیلاسیون، راش (*Fagus orientalis* Lipsky)، تخته لایه، رفتار حرارتی، وزن سنجی حرارتی (TGA)، آنالیز حرارتی دیفرانسیلی (DTA).

۱- مقدمه

کاربرد و استفاده از محصولات چوبی بستگی به ویژگی های تکنیکی مورد نیاز مشتریان دارد. از فرآورده های صفحه ای چوبی انتظار می رود که دارای مقاومت های مکانیکی مناسب بوده و از ثبات ابعاد، مقاومت بیولوژیک و مقاومت در برابر حرارت و آتش و غیره برخوردار باشند. اگرچه نتایج پژوهشها برای یافتن راه حل مناسب برای افزایش دوام چوب در برابر عوامل مخرب امیدوارکننده بوده اند؛ اما بسیاری از مواد حفاظتی پیشنهادی از لحاظ زیست محیطی و سلامت انسانها مورد تأیید نیستند. پس برای اجتناب از آثار زیانبار مواد و روشهای مزبور، روند تحقیقات باید همسو با مسایل زیست محیطی باشد. استیله کردن چوب و مواد مرکب یکی از روشهای اصلاح شیمیایی دوستدار طبیعت است که برخی مقاومت های مکانیکی، ثبات ابعاد و مقاومت بیولوژیکی را در چوب و مواد لیگنوسلولزی افزایش می دهد [۱، ۲]. البته بعضی از مقاومتها کاهش می یابند که در حد استاندارد قابل قبول می باشند. پژوهش های بسیاری در باره استیلاسیون انجام گرفته است؛ مانند تأثیر استیلاسیون بر

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم چوب و کاغذ، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار گروه علوم چوب و کاغذ

۳- استادیار گروه علوم چوب و کاغذ، دانشگاه تربیت مدرس

مقاومت بیولوژیک [۴،۷،۸،۱۰،۱۱]، مقاومت‌های مکانیکی [۶،۹،۱۵]، ثبات ابعاد [۱۴،۱۲،۱۰]؛ ولی تا کنون در مورد اثر استیلایسیون بر رفتار حرارتی لایه های چوب راش گزارشی در دست نیست.

چوب و مواد لیگنوسولوزی با افزایش دما با دو مکانیزم متفاوت تخریب می شوند: در طی مکانیزم اول که در دمای کمتر از ۳۰۰°C روی می دهد، بسپارهای دیواره سلولی از طریق شکستن اتصالات شیمیایی درونی، حذف مولکول های آب^۱، تشکیل رادیکال های آزاد، تشکیل گروههای کربونیل، کربوکسیل و هیدروپراکساید، هم چنین تشکیل منوکسید کربن و دی اکسید کربن و در نهایت تشکیل ذغال کربنی فعال^۲ تخریب می شوند. اکسایش ذغال فعال منجر به سوختن بدون شعله یا آفروختگی^۳ می شود و همچنین اکسایش ثانوی گازهای قابل اشتعال فرار سبب افزایش احتراق با شعله می گردد [۱۳].

مکانیزم دوم که در دمای بالاتر از ۳۰۰°C روی می دهد، منجر به شکستن پیوندهای ثانوی و تشکیل ترکیبات واسطه مانند انیدرومنوساکاریدهای^۴ می شود که تبدیل به ترکیباتی با وزن مولکولی کمتر می گردند (اولیگوساکاریدها و پلی ساکاریدها) و این ترکیبات نیز منجر به تشکیل ترکیبات کربونیزه شده می گردند [۱۳].

رفتار حرارتی چوب در برابر تغییرات حرارت فزاینده مورد مطالعه قرار گرفته است؛ ولی در باره چوب های تیمار شده گزارشی وجود ندارد. این پژوهش برای بررسی اثر تیمار شیمیایی استیلایسیون بر روی چگونگی رفتار حرارتی لایه های استیله شده راش در برابر تغییر دامنه وسیعی از دما استوار می باشد تا به این پرسش مهم پاسخ بگوید که آیا چوب استیله شده در مقایسه با چوب تیمار نشده در برابر تخریب حرارتی از خود مقاومتی نشان می دهد؟

۲- مواد و روشها

استیلایسیون- لایه های چوب راش (*Fagus orientalis* Lipsky) به ابعاد ۲×۵۰×۵۰ mm تهیه و سپس در آن و در دمای ۱۰۳±۳°C به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند تا وزن خشک آنها با ترازوی دقیق (۰/۰۰۱ گرم) اندازه گیری شود. برای دستیابی به شدت های مختلف تیمار استیلایسیون، لایه ها درون بشر حاوی انیدرید استیک غوطه ور شدند و در زمان های مختلف (۱۵، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۰۲۰ دقیقه) در درون آن با دمای ۱۲۰°C و در شرایط فشار اتمسفری تیمار گردیدند. پس از تیمار، نمونه ها چندین بار آبشویی شدند تا بوی اسید استیک ناشی از فرآیند استیلایسیون از بین برود. سپس در دمای ۱۰۳±۲°C خشک شدند و درصد افزایش وزنی آنها طبق رابطه ۱ محاسبه گردید:

$$\text{WPG (\%)} = (\text{W}_{\text{act}} - \text{W}_{\text{od}}) / \text{W}_{\text{od}} \times 100 \quad (1)$$

WPG = درصد افزایش وزن لایه (/.)

W_{od} = وزن خشک قبل از استیله کردن (g)

W_{act} = وزن خشک بعد از استیله کردن (g)

بررسی رفتار حرارتی - آنالیز حرارتی به صورت اندازه گیری خواص فیزیکی و شیمیایی مواد به عنوان تابعی از درجه

حرارت تعریف می شود. دو تکنیک اصلی آنالیز حرارتی عبارتند از **وزن سنجی حرارتی** یا **آنالیز ترموگراویمتری**^۵

(TGA) که در آن تغییر در وزن نمونه به عنوان تابعی از درجه حرارت یا زمان گرمادهی ثبت می شود. دیگری **آنالیز**

حرارتی جزئی یا دیفرانسیلی^۶ (DTA) است که در آن، اختلاف در درجه حرارت ΔT بین نمونه و یک ماده مرجع بی اثر،

به عنوان تابعی از دما یا زمان، اندازه گیری و ثبت می شود. بنابراین تکنیک DTA تغییر در محتوای گرمایی را نشان می دهد.

1 Dehydration (elimination of water)

2 Reactive carbonaceous char

3 Glowing

4 Anhydromonosaccharides

5 Thermogravimetric Analysis (TGA)

6 Differential Thermal Analysis (DTA)

در این پژوهش از دستگاه آنالیز حرارتی هم زمان^۱ نوع PL-STA-1500 که قادر به اجرای هم زمان دو تکنیک TGA و DTA می باشد، استفاده شد (شکل ۱). بدین منظور، با استفاده ترازوی دقیق (بادقت ۰/۰۰۰۱ گرم)، نمونه های آزمونی به اندازه ۲ میلی گرم از لایه ها تهیه شدند و سپس تحت آزمایش های TGA و DTA قرار گرفتند. در این آزمایش منبع گاز مورد استفاده هوا و میزان افزایش دما در هر دو آزمایش ۱۰°C/min بود. داده های دستگاه STA در طی آزمایش، شامل پارامتر های درصد کاهش وزن^۲ در ترموگرام های TGA و انرژی به صورت پیک های گرمازا (میزان انرژی آزاد شده بر حسب میکرو ولت) در نمودارهای DTA بودند.



شکل ۱. دستگاه آنالیز حرارتی هم زمان (STA)

۳- نتایج و بحث

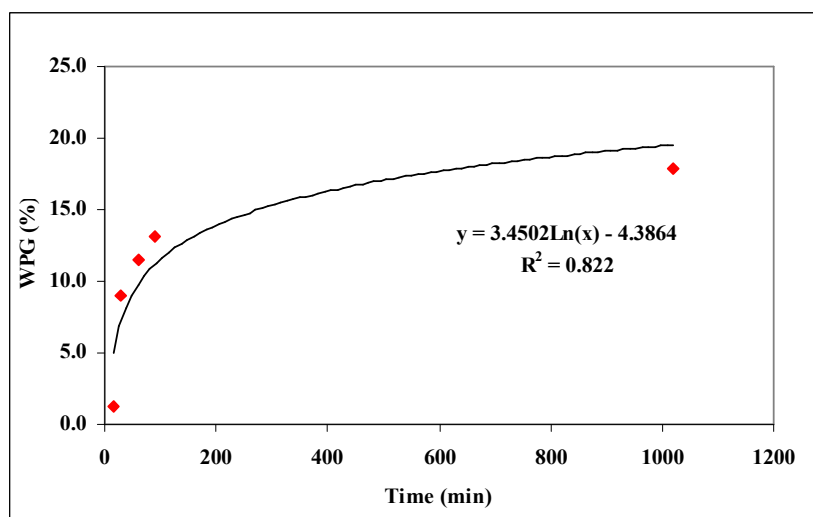
استیلاسیون - درصد افزایش وزن لایه ها (WPG) به عنوان شاخص شدت تیمار استیلاسیون در زمان های مختلف واکنش در جدول ۱ و شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش زمان، شدت تیمار استیلاسیون افزایش می یابد؛ به طوری که از ۱/۲۴٪ در ۱۵ دقیقه به ۱۷/۸۱٪ در ۱۰۲۰ دقیقه می رسد. بر اساس معادله به دست آمده، واکنش استیلاسیون از یک روند لگاریتم طبیعی پیروی می کند.

این پدیده را چنین می توان توجیه کرد که با گذشت زمان، نفوذ ماده انیدرید استیک به درون لایه های دیواره سلولی بیشتر می شود و قابلیت دسترسی آن به مواضع واکنش پذیر بسپارهای دیواره سلولی (گروه های هیدروکسیل) افزایش می یابد. بر اثر جایگزینی نخستین و سریع گروه های بزرگ و آب گریز استیل به جای گروه های کوچک و آب دوست هیدروکسیل، درصد وزنی در ابتدا به سرعت افزایش پیدا می کند و پس از ۹۰ دقیقه واکنش، با رسیدن به درصد وزنی ۱۳/۱۵٪، این روند با شیب و شدت کمتری ادامه پیدا می کند. به نظر می رسد که عملاً درصد وزنی ۱۳/۱۵٪ نقطه شروع کاهش شدت واکنش بسپارهای دیواره سلولی باشد؛ زیرا تا این مرحله اکثر گروه های هیدروکسیلی بسپارهای دیواره سلولی که در بخش های بیرونی تر و قابل دسترس می باشند با گروه های استیل جایگزین شده اند و در نهایت دسترسی این گروه ها به گروه های هیدروکسیلی بسپارهای درونی تر کمتر می شود و لذا زمان بیشتری برای واکنش آنها لازم است.

1 Simultaneous Thermal Analysis
2 Mass Loss

جدول ۱. شدت های تیمار لایه های راش در شرایط اتمسفری و درون آون

انحراف معیار	درصد افزایش وزنی (%)	زمان واکنش (دقیقه)
۰/۰۴	۱/۲۴	۱۵
۰/۲	۹/۰۱	۳۰
۰/۹۷	۱۱/۴۹	۶۰
۰/۲۷	۱۳/۱۵	۹۰
۰/۳۴	۱۷/۸۱	۱۰۲۰

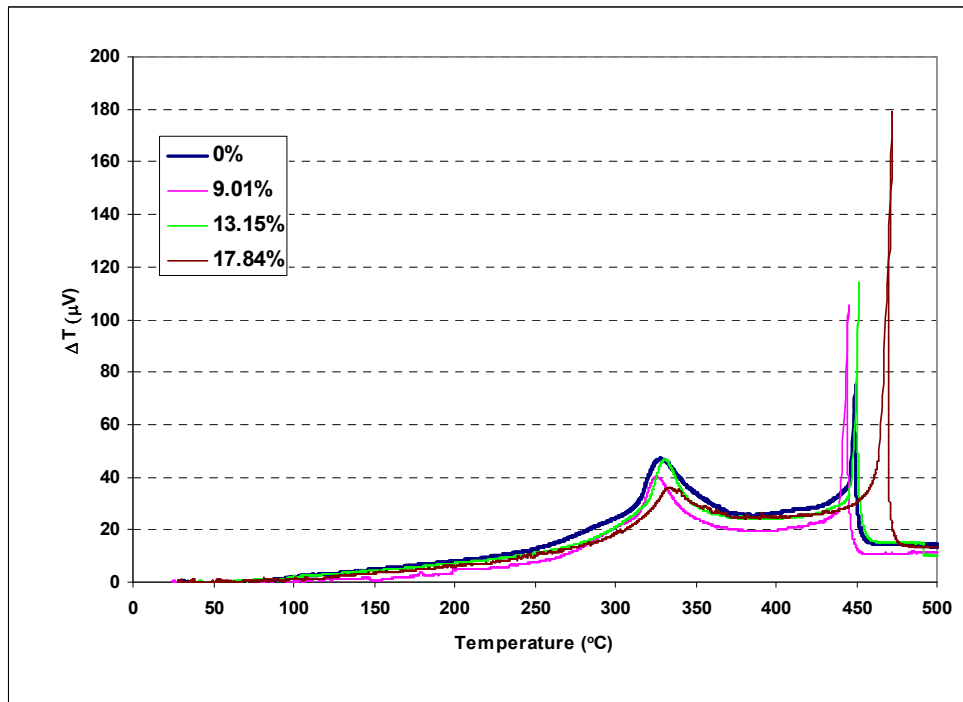


شکل ۲. شدت های تیمار لایه های راش در شرایط اتمسفری و درون آون

شکل ۳ ترموگرام آنالیز دیفرانسیلی حرارتی (DTA) را در لایه های استیله شده راش نشان می دهد. با توجه به شکل مشاهده می شود که با افزایش درجه حرارت در نمونه های استیله شده و نمونه شاهد، گرما (ΔT) آزاد می شود که این امر ناشی از پیرولیز چوب می باشد.

با توجه به نمودار، دو پیک گرمازا در طی فرآیند مشخص هستند که پیک اول در حدود دمای 330°C و پیک دوم در حدود دمای 450°C ظاهر می شوند. پیک نخست نقطه شروع اشتعال چوب (پیرولیز اولیه) محسوب می گردد و پیک دوم مربوط به سوختن ذغال باقی مانده و گازهای فرار قابل اشتعال (پیرولیز ثانویه) می باشد.

با دقت در این نمودار مشاهده می گردد که سوختن چوب تیمار نشده عملاً از دمای 95°C - 90°C شروع می شود؛ در حالی که با افزایش شدت تیمار استیلاسیون این نقطه به دماهای بالاتر جابه جا می شود؛ به طوری که این نقطه برای بالاترین شدت تیمار ($17/81\%$) حدود 150°C می باشد. یعنی تیمار استیلاسیون نقطه شروع سوختن لایه ها را به تعویق می اندازد.



شکل ۳. نمودار DTA در لایه های استیله شده راش

هم چنین دقت در نمودار نشان می دهد که نقطه شروع اشتعال (پیرولیز اولیه) نیز با افزایش شدت تیمار استیلاسیون در دمای بالاتری رخ می دهد. ضمن این که میزان انرژی آزاد شده در این ناحیه کمی پایین تر از نمونه تیمار نشده می باشد. پیک دوم این نمودار نشان می دهد که در پیرولیز ثانویه، انرژی آزاد شده در نمونه های استیله شده بیشتر از نمونه شاهد است. دمای نقطه پیرولیز ثانویه در نمونه هایی با شدت تیمار متوسط (۹/۰۱٪ و ۱۳/۱۵٪) مشابه نمونه شاهد می باشد؛ در حالی که نمونه استیله شده با شدت بالا (۱۷/۸۱٪)، علاوه بر این که انرژی بسیاری تولید می کند، پیرولیز نیز در دمای بالاتری رخ می دهد.

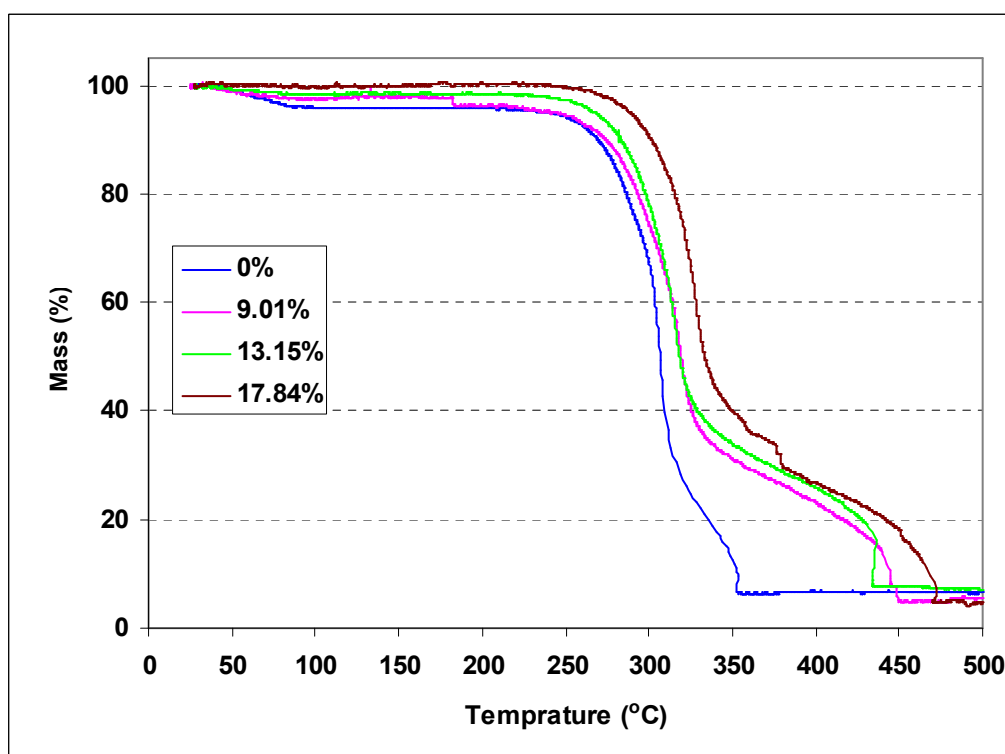
این نتایج در ضمن تأیید گزارشهای Browne (۱۹۵۸) و Rowell (۲۰۰۵) نشان می دهد که پیرولیز فعال در دامنه دمایی 50°C - 280°C روی می دهد و با افزایش دما سرعت می گیرد [۵، ۱۳]. بر اساس این گزارش می توان پیک نخست را به خروج گازهای اشتعال پذیر؛ به ویژه منوکسید کربن، متان، فرمالدهید، اسید استیک، اسید فرمیک، متانول، هیدروژن و هم چنین قطران های قابل اشتعال مرتبط دانست. پیک دوم را نیز می توان به واکنش های ثانویه محصولات پیرولیز اولیه و گازهای فرار قابل اشتعال که با سوختن ذغال تسریع می شوند، ارتباط داد.

با توجه به این که در طی فرآیند پیرولیز و تخریب حرارتی در لایه های استیله شده، پدیده استیل زدایی^۱ روی می دهد و گاز اسید استیک تولید می شود؛ این گاز نیز در طی واکنش با اکسیژن هوا به گازهای متان و دی اکسید کربن تبدیل می گردد. گاز متان قابلیت تولید حرارت بیشتری دارد و به تناسب شدت تیمار نیز بیشتر تولید می شود و این امر منجر به تولید انرژی بیشتری در نمونه های استیله شده نسبت به نمونه شاهد می گردد.

از طرف دیگر، به نظر می رسد که لایه های استیله شده نسبت به نمونه شاهد نیاز به انرژی اولیه بیشتری دارند تا بتوانند به مرحله سوختن (پیرولیز فعال) برسند. بدین سبب می توان پایین بودن تراز انرژی نمونه های استیله شده در نقطه پیرولیز اولیه (حدود دمای 330°C) را ناشی از همین نکته دانست؛ یعنی احتمالاً بخشی از گرمای داده شده صرف واکنش های استیل زدایی و شکستن پیوندهای استری (C-O-C) بین گروه های استیل و بسپارهای دیواره سلولی می شود که نتیجه آن تشکیل

گروه های استیل است که در جای خود با بخار آب ناشی از فرآیند پیرولیز ترکیب شده و تولید اسید استیک می کنند. برای شکستن پیوندهای C-O ۷۸ Kcal/mol، گروه های کربونیلی C=O ۱۸۷ Kcal/mol، پیوندهای C-C ۸۰ Kcal/mol و پیوندهای C-H ۹۸ Kcal/mol انرژی لازم است [۳]. بنابراین با توجه به این که انجام این واکنش ها مستلزم صرف انرژی است، میزان انرژی آزاد شده از سوختن لایه های استیله شده کمتر از نمونه های شاهد می باشد.

شکل ۴ نمودارهای TGA به دست آمده از نمونه های استیله شده و شاهد را نشان می دهد. در این نمودار کاهش جرم ناشی از پیرولیز لایه های چوبی نشان داده شده است. با دقت در این نمودار مشاهده می گردد که با افزایش دما، جرم نمونه شاهد کاهش پیدا می کند و از دمای حدود ۵۰°C تا ۹۵°C به صورت تدریجی و با شیب ملایمی کاهش می یابد و سپس تا حدود ۲۵۰°C تقریباً ثابت می شود. اما از دمای ۲۵۰°C به بالا کاهش جرم به صورت ناگهانی روی می دهد و سپس در دمای ۳۳۰°C کاهش جرم با سرعت و شیب کمتری ادامه پیدا می کند تا این که از حدود دمای ۳۵۰°C به بالا ثابت می شود.



شکل ۴. نمودار TG و درصد کاهش جرم در لایه های استیله شده راش

به نظر می رسد کاهش جرم اولیه نمونه های شاهد به دلیل خروج مواد استخراجی فرار و تبخیر تدریجی رطوبت جذب شده پیرامون نمونه شاهد باشد. اما شدت کاهش جرم در نمونه های استیله شده، با افزایش شدت تیمار کاهش پیدا می کند. این امر احتمالاً به خروج نخستین مواد استخراجی در حین فرآیند استیلاسیون و شستشوی نمونه ها و همچنین به کاهش قابلیت جذب رطوبت نمونه های استیله شده باز می گردد.

کاهش شدید جرم در ۲۵۰°C ناشی از فرآیند پیرولیز فعال و ناگهانی و نیز تولید گازهای اشتعال پذیر؛ مانند منوکسید کربن، متان، فرمالدهید، اسید استیک، اسید فرمیک، متانول، هیدروژن و قطران های قابل اشتعال می باشد. در واقع، بخش عمده ای از فاز جامد که مواد تشکیل دهنده دیواره سلولی هستند، در ۲۵۰°C به فاز گازی قابل اشتعال تبدیل می شوند و در نتیجه آن کاهش شدید وزن را منجر می گردند؛ ولی بر اثر خروج بخش عمده این گازها در ۳۳۰°C کاهش جرم روند ملایم تری پیدا می کند.

کاهش جرم در نمونه شاهد در دمای کمتر و با شدت بیشتری صورت می گیرد؛ در حالی که با افزایش شدت تیمار استیلایسیون کاهش جرم دیرتر و در دمای بالاتری اتفاق می افتد. در بالاتر از دمای 350°C وزن نمونه شاهد ثابت می شود، یعنی به خاکستر تبدیل می گردد؛ اما در نمونه های استیله شده تشکیل خاکستر و ثبات وزن در بالاتر از 440°C روی می دهد. تیمار استیلایسیون سبب می شود که در چوب مقدار ماده قابل اشتعال بیشتری وجود داشته باشد و سوختن مدت زمان بیشتری ادامه یابد. از طرف دیگر به نظر می رسد که احتمالاً به دلیل وجود مقدار ماده بیشتر و همچنین بالاتر بودن تراز انرژی پیوندهای استری و گروه های استیلی نسبت به ترکیبات بسپارهای دیواره سلولی، در عمل کاهش جرم در نمونه های استیله شده دیرتر از نمونه های تیمار نشده باشد.

۴- نتیجه گیری

بررسی رفتار حرارتی نشان داد که استیله کردن لایه های راش تا حدودی بر رفتار حرارتی آنها اثر می گذارد و در مقایسه با نمونه های تیمار نشده، به تناسب افزایش شدت تیمار استیلایسیون از سرعت کاهش جرم لایه ها بر اثر تخریب حرارتی می کاهد. هم چنین نقطه اشتعال و پیرولیز ثانویه لایه ها را به دماهای بالاتری منتقل می کند؛ در حالی که در پیرولیز اولیه به دلیل صرف انرژی برای شکستن پیوند های اتری در نمونه های استیله شده واکنش های گرمایی که منجر به تولید انرژی می گردند کمتر از نمونه های شاهد می باشد؛ اما در پیرولیز ثانویه انرژی آزاد شده در لایه های استیله شده به تناسب شدت تیمار استیلایسیون بالاتر از نمونه های شاهد است. در نهایت می توان ابراز داشت که استیله کردن سرعت و روند تخریب حرارتی را در لایه های استیله شده کند می کند؛ ولی مانع آن نمی شود. به تعبیری دیگر استیله کردن تا حدودی نقش کند سوز کردن را بر روی لایه های راش دارد.

مراجع

۱. محبی ب.، اصلاح چوب و مواد لیگنوسلولزی و فن آوری هایشان، اولین همایش ملی فرآوری مواد سلولزی، ۹-۱۰ مهر، پردیس ۳ دانشکده فنی دانشگاه تهران، رضوان شهر: ۴۰۵-۴۰۸/۱۲، ۱۳۸۲.
۲. محبی ب.، استیلایسیون چوب و مواد لیگنوسلولزی، دومین همایش دانشگاه و صنعت چوب خراسان، ۲۲-۲۵ اردیبهشت، مشهد: ۱۹/۱-۱۹/۱۸، ۱۳۸۳.
3. Anonymous, Bond Energy, Online at: <http://users.rcn.com/jkimball.ma.ultranet/BiologyPages/B/BondEnergy.html>, 2003.
4. Beckers E.P.J., Militz H. & Stevens M., Acetylation of wood: Laboratory durability test (part II) and field trials, International Research Group on Wood Preservation, Document No. RG/WP 95-40048., 1995.
5. Browne F.L., Theories of the combustion of wood and its control: A survey of the literature, FPRL Report No. 2136, 1958.
6. Fuwape J.A. & Oyagade A.O., Strength and dimensional stability of acetylated *Gamelina* and spruce particleboard, Journal of Tropical Forest Products, 6(2): 184-189, 2000
7. Ibach R.E., Hadi Y.S., Nandika D., Yusuf S. & Indrayani Y., Termite and fungal resistance in situ polymerized tributyltin acrylate and acetylated Indonesian and USA wood, The International Research Group on Wood preservation, Document No. IRG/WP 00-30219, 2000.
8. Larsson Brield P., Simonson R. & Bergman O., Resistance of acetylated wood to biological degradation: Evaluation of field test, The International Research Group on Wood Preservation, IRG Document No. IRG/WP 97-30139, 1997.
9. Mahlberg, R., Paajanen, L., Nurmi, A., Kivisto, A., Rowell, R. M., Effect of chemical modification of wood on the mechanical and adhesion properties of wood fiber / polypropylene fiber and polypropylene / veneer composites, Holz als Roh- und Werkstoff, 59: 319-326, 2001
10. Militz H., Die Verbesserung des Schwind- und Quellverhaltens und der Dauerhaftigkeit von Holz mittels Behandlung mit unkalysiertem Essigsäureanhydrid, Holz als Roh- und Werkstoff 49: 147-152, 1991.
11. Mohebbi B., Biological attack of acetylated wood, Ph.D. Thesis, Göttingen University, Göttingen: p. 147, 2003.

12. Mohebbi B. & Talaii A., Smoke analysis of acetylated beech layers, 2nd European Conference on Wood Modification, Göttingen, 5-6 Oct., Göttingen, Germany, 2005
13. Rowell R.M., Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites, Taylor & Francis, London, New York: p. 487, 2005.
14. Rowell R.M., I. Y., Kawai S., and Norimoto M., Dimensional stability, decay resistance and mechanical properties of veneer-faced low-density particleboards made from acetylated wood, Wood and Fiber Science, 21(1): 67-79, 1989.
15. Rowell R. M., Youngquist J.A., and Imamura Y., Strength test on acetylated aspen flakeboards exposed to a brown rot fungus, Wood and Fiber Science 20(2): 266-271, 1988.