

## گزارش فنی

## طراحی، ساخت و ارزیابی عملکرد دستگاه اندازه گیری ضریب هدایت گرمایی چوب با بهره گیری از لوله‌های گرمایی صفحه تخت

سیدمعین رسولی نژادموسوی<sup>۱\*</sup>، محمدلایقی<sup>۲</sup>، صابرلطفی<sup>۳</sup>

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، عضو باشگاه پژوهشگران جوان

۲- استادیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۳- دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تبریز

## چکیده

در این پژوهش، فرآیند ساخت و عملکرد دستگاه اندازه‌گیری ضریب هدایت گرمایی چوب، با نوآوری استفاده از لوله‌های گرمایی صفحه تخت، تشریح و ارزیابی می‌شود. ضریب هدایت گرمایی در این دستگاه بنابه قانون فوریه و برابر با آیین نامه ASTM<sup>1</sup> C177، در چندین شار گرمایی به دست می‌آید. سپس با رسم نمودار تغییرات ضریب هدایت گرمایی برحسب دمای میانگین، می‌توان به معادله‌ای برای یافتن ضریب هدایت گرمایی آزمون در محدوده دمایی مشخص رسید. در این تحقیق ضریب هدایت گرمایی چوب ممرز که از شمال ایران تهیه شده است اندازه‌گیری شده تا روند به دست آوردن معادله ضریب هدایت گرمایی برای یک آزمون توسط این دستگاه مشخص شود. نتایج این تحقیق نشان داده است که ضریب هدایت گرمایی ممرز به طور خطی با دما افزایش می‌یابد. همچنین دیده شد که استفاده از لوله‌های گرمایی صفحه تخت باعث توزیع یکنواخت تر شار گرمایی ورودی بر روی سطح آزمون‌ها می‌شود که علاوه بر افزایش دقت، زمان رسیدن به شرایط ماندگار<sup>۲</sup>، کاهش می‌یابد و به دست آوردن ضریب هدایت گرمایی تسریع می‌شود، که این امر منجر به کاهش مصرف انرژی و زمان آزمایش خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: ساخت، دستگاه اندازه‌گیری ضریب هدایت گرمایی، لوله گرمایی صفحه تخت، قانون فوریه، چوب

\* مسئول مکاتبات: سیدمعین رسولی نژاد موسوی Email:moein\_rassoulinejad@yahoo.com

<sup>1</sup> American Society for Testing and Materials<sup>2</sup> steady-state-

## مقدمه

روش اندازه‌گیری ضریب هدایت گرمایی در جهت‌های طولی، شعاعی و مماسی چوب، بسیار اهمیت دارد. همچنین هدایت گرمایی چوب عامل بسیار مهمی در برنامه ریزی برای خشک کردن آن، پرس گرم فرآورده‌های آن و کاربردهای عایق کاری می‌باشد.

در گذشته روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری تجربی ضریب هدایت گرمایی انواع چوب و مواد چند سازه و عایق به کار گرفته شده و دستگاه‌های مختلفی نیز ساخته شده است. اگرچه اصول کار بیشتر این دستگاه‌ها بر پایه قانون فوریه می‌باشد اما نحوه کار هر دستگاه، شکل هندسی، دقت و محدوده کاربرد هر یک نیز متفاوت می‌باشد.

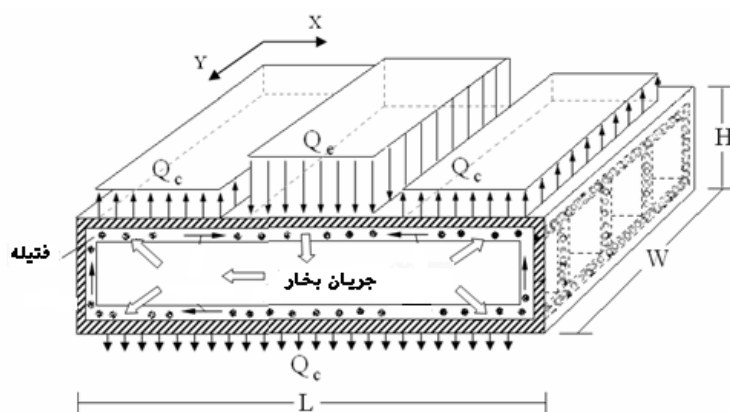
اشتینگهان و پیتر (۱) داده‌های مناسبی برای ضریب هدایت گرمایی انواع چوب در دماهای بین ۴۰- تا ۱۰۰ درجه سلسیوس ارائه داده‌اند. همچنین از دستگاهی به نام R-MATIC نیز برای اندازه‌گیری ضریب هدایت گرمایی استفاده شده که بر پایه استاندارد ASTM C518 و ISO 2581 عمل می‌کند (۲). در استاندارد ASTM-C177 (۳) آزمون با ابعاد  $0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$  بین دو صفحه با دمای قابل کنترل قرار داده می‌شود و یک گرادیان دما در طول آزمون ایجاد می‌شود. سپس با اندازه‌گیری نرخ انتقال گرما ضریب هدایت گرمایی اندازه‌گیری می‌شود. کلارک و همکاران (۴) در پژوهشی دستگاهی برای اندازه‌گیری همزمان ضریب هدایت و پخش گرمایی با روش حالت- متغیر تشریح کرده‌اند. همچنین گو و هانت (۵) تاثیر محتوای رطوبت روی ضریب هدایت گرمایی را بررسی نموده‌اند. ایکام و همکاران (۶) نیز روش‌هایی برای محاسبه و اندازه‌گیری خواص ترموفیزیکی انواع چوب‌های مناطق استوایی ارائه کرده‌اند. در استاندارد ASTM (۷) روشی ساده برای اندازه‌گیری ضریب هدایت گرمایی شعاعی مواد عایق موسوم به روش سیم و ترموکوپل تشریح شده است. در این روش ماده عایق به صورت آزمون استوانه‌ای برش داده می‌شود و سیم الکتریکی داغی از مرکز آن عبور می‌کند. با عبور جریان از سیم آزمون داغ شده و دما در دو

شعاع مختلف از مرکز آزمون استوانه‌ای توسط دو تر مو کوپل اندازه‌گیری می‌شود. سپس ضریب هدایت گرمایی ماده با استفاده از قانون فوریه در مختصات استوانه‌ای محاسبه می‌شود. دستگاه‌های دیجیتال و آنالوگ دیگری نیز در ادبیات فنی وجود دارند که انواعی از آنها عبارت‌اند از دستگاه دیجیتالی به نام C-600-S Thermal Conductivity Cell که ضریب هدایت گرمایی جامدها در محدوده  $0.1/0.259-1/65 \text{ W/m.K}$  را اندازه‌گیری می‌کند. در این پژوهش فرآیند طراحی، ساخت و عملکرد دستگاه اندازه‌گیری ضریب هدایت گرمایی چوب، با نوآوری استفاده از لوله‌های گرمایی صفحه تخت تشریح ارزیابی و پس از آن میزان ضریب هدایت گرمایی چوب ممرز که از شمال ایران با برش بینابینی تهیه شده است اندازه‌گیری و معادله‌ای برای به دست آوردن ضریب هدایت گرمایی این گونه چوب ارائه شده است.

### لوله گرمایی صفحه تخت<sup>۳</sup>

لوله‌های گرمایی صفحه تخت وسیله بسیار موثری برای انتقال گرما می‌باشند و آن‌ها نوع ویژه‌ای از لوله‌های گرمایی می‌باشند که می‌توانند شارهای گرمایی بالاتری را نسبت به نوع استوانه‌ای منتقل کنند که با توجه به مشخصه‌های مطلوب گرمایی آن‌ها، کاربردهای صنعتی زیادی دارند. این کاربردها شامل کنترل دما و رطوبت، سرمایش، بازیابی دما، هم دمایی دو نقطه و شمار بسیاری از کاربردهای فضایی در دامنه گسترده‌ای از دماها می‌باشند. لوله‌های گرمایی صفحه تخت قابلیت انتقال گرما با سرعت بالا و افت دمایی ناچیز را دارند.

<sup>3</sup> Flat plate heat pipe



شکل ۱- نمای شماتیک یک لوله گرمایی صفحه تخت

از جمله مهم‌ترین قابلیت‌های این دستگاه عبارت‌اند از: توزیع یکنواخت شار گرمایی روی سطح چوب، اندازه گیری دقیق ضریب هدایت گرمایی مواد مختلف (مواد ایزوتروپ و غیر ایزوتروپ) در سه جهت هندسی، در محدوده‌های دمایی بین ۲۰ تا ۲۰۰ درجه سلسیوس، اندازه گیری ضریب هدایت گرمایی مواد با ضخامت‌های مختلف بین ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر و نیز رسیدن دماها به حالت ماندگار در مدت زمان کوتاه.

### مواد و روش‌ها

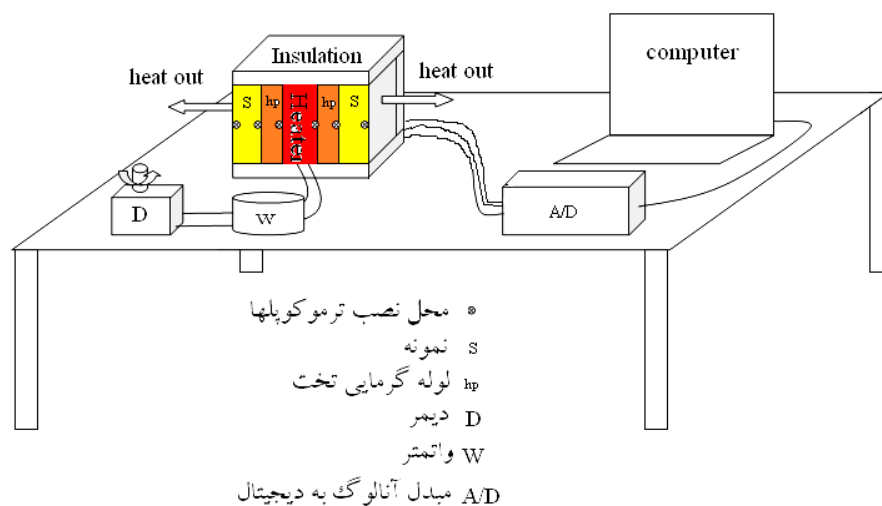
#### اجزای دستگاه

این دستگاه که ابعاد و نوع ساخت آن نیز همانند استاندارد ASTM-C177 می‌باشد، از چهار بخش اصلی هیتر ۱۰۰۰ وات با ابعاد  $0.2m \times 0.2m$  که وظیفه ایجاد شار گرمایی در چوب را دارد، دو عدد لوله گرمایی صفحه تخت برای پخش شار گرمایی به صورت یکسان روی سطح چوب و رسیدن به حالت دائم در مدت زمان کم تر، ژاکت‌های آب با گستره  $0.2m \times 0.2m$  که نقش خنک‌کنندگی را برای چوب دارد و محفظه عایق با ابعاد  $0.406m \times 0.406m$  که کلیه اجزاء دستگاه در آن‌ها قرار می‌گیرد، تشکیل شده است. (شکل‌های ۳ و ۲).

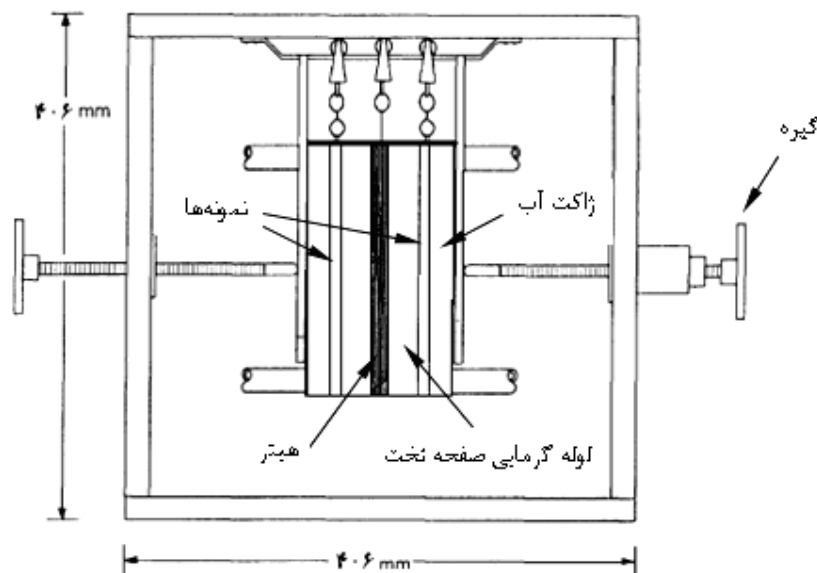
این نوع لوله‌ها از لوله‌های گرمایی ویژه‌ای می‌باشند که می‌توانند شارهای گرمایی بالاتری را نسبت به نوع استوانه‌ای منتقل کنند. با توجه به مشخصه‌های مطلوب گرمایی، این لوله‌ها می‌توانند در بسیاری از زمینه‌های کاربردی از جمله خنک‌کاری تراشه‌های نیمه‌هادی پر قدرت و تجهیزات الکترونیکی استفاده شوند (۸،۹). این لوله‌ها همچنین در بخش رادیاتور فضاپیماها (۱۰،۱۱) و نیز در سامانه و نظام کنترل گرمایی دستگاه‌های پرتوافکنی برای درمان غده‌های مغزی<sup>۴</sup> کاربرد دارند (۱۶-۱۲). هر لوله گرمایی صفحه تخت به طور معمول از دو قسمت اواپراتور و کندانسور نیز فتیله که خود یک ساختار متخلخل دارای موینگی بالا می‌باشد، تشکیل شده است.  $Q_e$  گرمای اضافه شده به قسمت اواپراتور و  $Q_c$  گرمای پس داده شده از قسمت کندانسور می‌باشد (شکل ۱).

در این پژوهش دستگاهی برای اندازه‌گیری ضریب هدایت گرمایی چوب، همانند با استاندارد ASTM C177 با نوآوری استفاده از فناوری لوله‌های گرمایی صفحه تخت ساخته شده که با آن می‌توان ضریب هدایت گرمایی گونه‌های چوبی بومی ایران را به طور دقیق اندازه‌گیری نمود و معادله‌هایی برای تعیین ضریب هدایت گرمایی آن‌ها در دماهای مختلف ارائه داد.

<sup>4</sup> - Boron Neutron Capture Therapy



شکل ۲- شماتیک دستگاه اندازه‌گیری ضریب هدایت گرمایی چوب با بهره‌گیری از لوله گرمایی صفحه تخت



شکل ۳- نمای داخلی دستگاه ساخته شده

در تماس با هیتر و ژاکت های آب نیز از گیره های محکم کننده در دو طرف دستگاه استفاده شده است. پس از محکم کردن گیره‌ها دور تا دور کلیه اجزا نمایش داده شده در شکل ۳ عایق کاری می‌شود تا از هدر رفت گرما در جهات مختلف جلوگیری شود.

همچنین این دستگاه دارای یک ترانسفورمر و یک وات متر دیجیتال از نوع *Lutron DW-6060* برای کنترل و نمایش توان گرمایی و نیز حسگرهای دما از نوع *PT-100* با دقت  $\pm 1^\circ C$  برای نمایش دمای دو طرف چوب می‌باشد. برای محکم نگه داشتن سطح آزمون‌های چوبی

## نحوه عملکرد دستگاه

با روشن کردن هیتر و تنظیم شار گرمایی به میزان دلخواه باید صبر کرد تا دماها به حالت ماندگار برسند. آنگاه با قرائت دماهای توان مشخصه (پارامتر)هایی مانند ضریب هدایت گرمایی و سرعت نفوذ گرما در درون آزمون‌های چوبی، چوب پلاستیک، تخته خرده چوب و دیگر مواد چوب پایه را به کمک قانون فوریه به طور میانگین تعیین نمود.

$$Q = 2k A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

در رابطه بالا  $Q$  میزان شار گرمایی منتقل شده از هیتر به چوب برحسب وات،  $k$  ضریب هدایت گرمایی آزمون برحسب  $(W/m.K)$ ،  $A$  سطح مقطع آزمون برحسب  $m^2$  و  $\frac{\partial T}{\partial x}$  گرادیان دما می باشد و ضریب ۲ به دلیل تقسیم شار گرمای بین دو آزمون می باشد. با توجه به اینکه برای اندازه گیری هدایت گرمایی، دماها باید به حالت ماندگار برسند توزیع دما خطی می شود و گرادیان دما را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} \quad (2)$$

که  $T_1$  دمای قسمتی از چوب است که در سمت ژاکت های آب و  $T_2$  دمای قسمتی از چوب است که در سمت هیتر قرار دارد و  $\Delta x$  فاصله ی بین مراکز دو حسگر می باشد. با توجه به شرایط بالا رابطه زیر برای به دست آوردن ضریب هدایت گرمایی پس رسیدن به حالت دائم به دست می آید:

$$k = \frac{Q \cdot \Delta x}{2 A \Delta T} \quad (3)$$

در این دستگاه به طور معمول برای سادگی کار و نیز اندازه گیری ضریب هدایت گرمایی  $A = 0.04 m^2$ ،  $\Delta x = 0.05 m$  انتخاب می شود. بنابراین رابطه زیر برای به دست آوردن ضریب هدایت گرمایی با توجه به مشخصات فوق به دست می آید:

$$k = 0.0625 \frac{Q}{\Delta T} \quad (4)$$

## شرایط آزمایش

دو آزمون بدون عیب و با سطح مقطع  $20 \times 20 \text{ cm}^2$  و ضخامت  $1 \text{ cm}$  از چوب ممرز جنگل های شمال ایران تهیه شده است. آزمون‌ها به صورت تصادفی از یک کارگاه چوب تهیه شده اند که برش آن‌ها بینابینی بوده است. دلیل انتخاب آزمون‌ها این بود که در صنعت به طور عموم برش مقطوعات به صورت صد در صد شعاعی یا مماسی انجام نمی گیرد. در ضمن رطوبت تعادل آزمون‌ها در اتاق کلیما ثابت نگه داشته شد ( $EMC=12\%$ ). سپس ضریب هدایت گرمایی آزمون‌ها با استفاده از دستگاه ساخته شده اندازه گیری و معادله ای برای ضریب هدایت گرمایی آن پیشنهاد شده است. از آن جایی که هدایت گرمایی آزمون‌ها (پس از متعادل سازی رطوبت در اتاق کلیما) در رطوبت ۱۲٪ اندازه گیری شده است و زمان آزمون در شرایط پایدار بین ۳ تا ۲ ساعت می باشد، در این معادله از تاثیر تغییرات رطوبت بر هدایت گرمایی صرف نظر شده است.

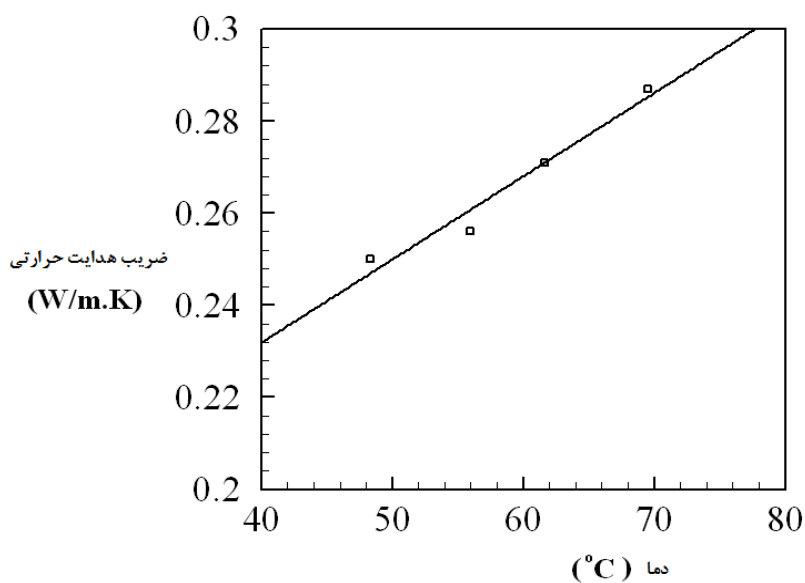
## نتایج و بحث

ضریب هدایت گرمایی آزمون‌های ممرز در محدوده دمایی  $0^\circ\text{C}$  تا  $40^\circ\text{C}$  اندازه گیری شده است. جدول ۱ مقادیر اندازه گیری شده و محاسبه شده آزمون‌ها را نشان می دهد. همچنین شکل ۴ تغییرات ضرایب هدایت گرمایی ممرز با دما را نشان می دهد. همان طور که در این شکل دیده می شود میزان ضریب هدایت گرمایی ممرز به صورت خطی با دما افزایش می یابد.

با برازش خط ضریب هدایت گرمایی چوب ممرز در شکل ۴ دیده می شود که میزان این ضریب به طور خطی از  $0.250 \text{ W/m.K}$  در دمای  $3^\circ\text{C}$  به  $0.287 \text{ W/m.K}$  در دمای  $5^\circ\text{C}$  افزایش می یابد و بیشترین انحراف از خط برازش ضریب هدایت گرمایی کم تر از ۱۰٪ و نزدیک دمای  $6^\circ\text{C}$  می باشد.

جدول ۱- مقادیر اندازه‌گیری و محاسبه شده ضریب هدایت گرمایی ممرز

شماره آزمایش	میانگین دما (°C)	وات (Watt)	اختلاف دما (°C)	میانگین انتقال گرما (W/m.K)
۱	۴۸/۳	۲۰/۰	۵/۰	.۲۵۰
۲	۵۶/۰	۲۶/۲	۶/۴	.۲۵۶
۳	۶۱/۶	۳۵/۱	۸/۱	.۲۷۱
۴	۶۹/۵	۴۵/۴	۹/۹	.۲۸۷



شکل ۴- تغییرات ضرایب هدایت گرمایی ممرز با دما در (MC=12%)

ثابت  $b$  شیب خط در شکل ۴ است که میزان آن برای ممرز  $W/m.K \times 10^{-4}$  است. بنابراین رابطه تجربی برای ضریب هدایت گرمایی این گونه را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$k(T) = 0.232 + 0.0018(T - 40); \quad 40 \leq T \leq 80 \quad (۶)$$

با توجه به شکل ۴ و خطی بودن نمودار، میزان ضریب هدایت گرمایی را در دماهای مختلف را می‌توان به صورت زیر به دست آورد:

$$k(T) = k_0 + b(T - T_0) \quad (۵)$$

که  $k_0$ ، میزان ضریب هدایت گرمایی آزمون‌ها در دمای  $40^\circ\text{C}$  و  $40^\circ\text{C}$  فرض می‌شود.

## نتیجه‌گیری

از آنجایی که چوب در رطوبت‌های کم‌تر از FSP ماده‌ای عایق می‌باشد زمان رسیدن دماها به حالت ماندگار بسیار زیاد می‌باشد و همین‌طور ناهمگن بودن چوب، مانع رسیدن گرما به‌طور یکسان به همه نقاط می‌شود که این امر موجب کاهش دقت اندازه‌گیری خواهد شد. لوله‌های گرمایی صفحه تخت که دارای قابلیت انتقال گرما با افت ناچیزی می‌باشند، باعث توزیع یکنواخت‌تر شار گرمایی روی سطح می‌شوند و هم‌نتایج آزمایش از دقت خوبی برخوردار خواهند بود و هم‌رسیدن به حالت ماندگار و به دست آوردن ضریب هدایت گرمایی تسریع می‌شود که در نهایت منجر به صرفه‌جویی در مصرف انرژی و زمان

آزمون می‌شود. همچنین با اندازه‌گیری توسط این دستگاه می‌توان معادله‌ای خطی برای ضریب هدایت گرمایی آزمون بدست آورد که با قرار دادن دمای میانگین مورد نظر در آن معادله می‌توان ضریب هدایت گرمایی را بدست آورد، این قابلیت بسیار مهم و نیز استفاده از لوله‌های گرمایی صفحه تخت از نوآوری‌های موجود در طراحی این دستگاه می‌باشد که تا به حال به انجام نرسیده است.

**ملاحظات:** این دستگاه به عنوان اختراع درسازمان ثبت اختراعات و مالکیت‌های صنعتی به شماره ۵۴۶۴۱ و به تاریخ ۸/۲۵/۸۷ به نام نویسندگان به ثبت رسیده است.

## منابع

- 1- Steinhagen, H. Peter, 1977, Thermal Conductive Properties of Wood, Green or Dry, from  $-40^{\circ}C$  to  $100^{\circ}C$  A Literature Review, General Technical Report, FPL-9.
- 2- Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus (C 518-04), Book of ASTM Standards, 04.06, D 10.1520/C0518-04, 2010
- 3- Method of Test for Thermal Conductivity of Materials by Means of the Guarded Hot Plate (C 177-45), ASTM Standards, Part 3:1084, 1955
- 4- Clarke, L.N. and R.S.T. Kingston. 1950. Equipment for the simultaneous determination of thermal conductivity and diffusivity of insulating materials using a variable-state method. Australian Journal of Applied science, Vol.1(2):172-187
- 5- Gu, H., Hunt, J. F., 2007, Two-dimensional finite element heat transfer model of softwood. Part III. Effect of moisture content on thermal conductivity, Wood and Fiber Science, 39(1), pp.159-166
- 6- Ngohe-Ekam, P.S., Meukam, P., 1, Menguy, G., Girard, P., 2006, Thermophysical characterization of tropical wood used as building materials: With respect to the basal density, Construction and Building Materials, 20, pp. 929-938
- 7- Method of Test for Thermal Conductivity of Materials by Hot Wire, ASTM Standards, Part 3:1084, 1955
- 8- Basiulis, A., Tanzer, H., and McCabe, S., 1986, Thermal Management of High Power PWB's through the Use of Heat Pipe Substrates, in: *Sixth Annual International Electronics Packaging Conference*, San Diego, CA, USA, vol. 6, p. 501
- 9- Rightley, M.J., Tigges, C.P., Givler, R.C., Robino, C.V., Mulhall, J.J., and Smith, P.M., 2003, Innovative Wick Design for Multi-source Flat Plate Heat Pipes, *Microelectronics Journal*, Vol. 34, pp. 187-194

- 10- Thomson, M., Ruel, C., and Donato, M., 1989, Characterization of a Flat Plate Heat Pipe for Electronic Cooling in a Space Environment. In: proceeding of National Heat Transfer Conference, Heat Transfer in Electronics **HTD-Vol. 111**, pp. 59–65
- 11- Ojen, H., and Hoogendoorn, C. J. , 1979, Vapor Flow Calculations in a Flat-plate Heat Pipe, *AIAA Journal*, Vol. 17, pp.1251-1259
- 12- Vafai, K., and Wang, W., 1992, Analysis of Flow and Heat Transfer Characteristics of an Asymmetrical Flat Plate Heat Pipe, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol.35, pp. 2087-2099
- 13- Vafai, K., and Zhu, N. , 1995, and Wang, W., Analysis of Asymmetrical Disk-shaped and Flat-plate Heat Pipes, *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol.117, pp. 209-218
- 14- Zhu, N., Vafai, K., 1998, Vapor and Liquid Flow in an Asymmetrical Flat Plate Heat Pipe: a Three-dimensional Analytical and Numerical Investigation, *Int. Journal of Heat Mass Transfer*, Vol.41, pp. 159-174
- 15- Zhu, N., and Vafai, K. , 1998, Analytical Modeling of the Startup Characteristics of Asymmetrical Flat Plate and Disk-shaped Heat Pipes, *Int. J. of Heat and Mass transfer*, Vol.41, pp. 2619-2637
- 16- Wang, Y., and Vafai, K. , 2000, Transient Characterization of Flat Plate Heat Pipes During Startup and Shutdown Operations, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol.43, pp.2641-2655



Technical Report**Design, Construction, and Performance Analysis of a Wood Thermal Conductivity Measurement Device using Flat Plate Heat Pipes****Seyed Moein Rassoulinejad Mousavi<sup>\*1</sup>, Mohammad Layeghi<sup>2</sup>, Saber Lotfi<sup>3</sup>****Abstract**

In this paper, the design, construction, and performance analysis of a wood thermal conductivity measurement device using flat plate heat pipes has been experimentally studied. The device was designed to measure the thermal conductivity of wood in various ranges of temperature. Thermal conductivity of hornbeam (*Carpinus betulus*) has been measured at various temperatures between 40-80 °C and a relationship has been recommended for the sample. The results show that the thermal conductivity of this species increases linearly with temperature. Also, it has been concluded that flat plate heat pipes distribute heat flux on the surface of the wood uniformly leading to a faster steady state condition, which can reduce time of the test and result in energy saving and more accurate results.

**Key words:** Design and Construction, Thermal Conductivity Measurement Device, Flat Plate Heat Pipe, Fourier's Law, Wood

---

<sup>\*</sup>Corresponding author: Email:moein\_rassoulinejad@yahoo.com