فصلنامه
مهندسی مکانیک و ارتعاشات
jvibme.semnaniau.ac.ir

مروری بر میکرو کپسول مواد تغییر فاز پذیر، خصوصیات، نحوه ساخت و کاربرد آن

گلی خسروی هاشمی[۱]، هادی کارگر شریف آباد [۲*]

۱- مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، **دانشگاه آزاد اسلامی**، سمنان، ایران
۲- مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، **دانشگاه آزاد اسلامی**، سمنان، ایران
* سمنان، صندوق پستی: ۳۵۱۴۵-۱۷۹ ، h.kargar@semnaniau.ac.ir

اطلاعات مقاله
مقاله مروری
دریافت: ۱۰ تیر ۱۴۰۰
پذیرش: ۱۵ آبان ۱۴۰۰
ارائه در سایت: ۲۰ بهمن ۱۴۰۰
کلیدواژگان
مواد تغییر فاز دهنده
میکروکپسول
انرژی

چکیده
مواد تغییر فاز پذیر به طور فزاینده ای نقش مهمی به عنوان سیالات انتقال حرارت و منابع ذخیره انرژی دارند. این یک تکنولوژی جدید در زمینه ذخیره سازی انرژی حرارتی با استفاده از مواد تغییر فاز می باشد. در این مقاله به بررسی خصوصیات میکرو کپسول مواد تغییر فاز پرداخته شد و چند ماده پر کاربرد به عنوان مواد هسته و پوسته ارائه شده است. همچنین به طور اجمالی برخی از کاربرد های این مواد ذکر شده است. در ادامه به بررسی نحوه ساخت میکروکپسول بر اساس n-octadecane و پوسته silica و میکرو کپسول مواد تغییر فاز پذیر با هسته ملامین و پوسته فرمالدهید پرداخته می شود.

An overview of microcapsules of phase change materials, properties, preparation and applications

Goli Khosravi Hashemi[1], Hadi Kargarsharifabad[2*]

1- Energy and Sustainable Development Research Center, Semnan Branch, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran
2- Energy and Sustainable Development Research Center, Semnan Branch, **Islamic Azad University**, Semnan, Iran
* P.O.B. 35145-179 Semnan, Iran, h.kargar@semnnaniau.ac.ir

Article Information
Original Research Paper
Received 1 July 2021
Accepted 6 November 2021
Available Online 9 February 2022
Keywords
Phase change materials
Microcapsules
energy

ABSTRACT
Phase change materials are increasingly playing an important role as heat transfer fluids and energy storage sources. This is a new technology in the field of thermal energy storage using phase change materials. In this article, the properties of microcapsules of phase change materials are studied and some widely used materials as core and shell materials were presented. Also, some of the uses of these materials are briefly mentioned. In the following, the method of manufacturing microcapsules based on n-octadecane and silica shell and microcapsule of phase change material with melamine core and formaldehyde shell is discussed.

Please cite this article using: **برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:**
Goli Khosravi Hashemi, Hadi Kargarsharifabad, Author name, An overview of microcapsules of phase change materials, properties, preparation and applications, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 12, No. 4, pp. 52-57, 2022 (In Persian)

۱- مقدمه

ضرورت توجیه استفاده از انرژی در جامعه مدرن به روشنی واضح است. یکی از نتایج اصلی استفاده منطقی از انرژی، ذخیره سازی انرژی حرارتی می باشد. تکنیک های زیادی در زمینه استفاده از ذخایر انرژی حرارتی جایگزین احتراق سوخت های فسیلی، وجود دارد که امکان استفاده بیشتر از انرژی هایی که عرضه آن بطور ثابت وجود ندارد، مانند انرژی باقیمانده یا انرژی تجدید پذیر، را ایجاد می کند. انرژی ذخیره شده می تواند در زمان پیک انرژی الکتریکی، زمانی که تولید انرژی الکتریکی به دلیل زمان پیک بار، گران است، استفاده شود.

ذخیره سازی انرژی حرارتی بر اساس استفاده از مواد تغییر فاز (PCM[1]) جامد-مایع به دلیل دانسیته بالای ذخیره سازی انرژی حرارتی بر واحد حجم و کاهش محدوده دمایی و نیز با ترکیب ثابت از مواد جدید با خواص و محدوده دمای تغییر فاز بسیار متفاوت صورت می گیرد.

اخیرا تکنیک های جدیدی برای استفاده از PCM در سیستم ذخیره حرارتی، مبدل حرارتی و سیستم های کنترل دمایی مطرح شده است. این تکنیک جدید شامل حالتی از یک سیال ۲ فازی می باشد، از ترکیب سیالی مانند آب و یک PCM مانند پارافین، یک سیال ذخیره کننده حرارت نهان حاصل می شود.

این سیالات جدید به دلیل ارائه مزایای زیر می توانند به عنوان مواد ذخیره ساز حرارت و یا سیال انتقال حرارت استفاده شود [۱]:

۱) ظرفیت ذخیره سازی بالا در طول انتقال حرارت
۲) امکان استفاده از وسایل مشابه دیگر برای انتقال یا ذخیره سازی به دلیل اینکه این دوغاب قابل پمپاژ می باشد (کاهش اتلاف انتقال حرارت در این روش)
۳) انتقال حرارت در دمای تقریبا ثابت
۴) نرخ انتقال حرارت بالا با توجه به افزایش نسبت سطح به حجم
۵) نیروی پمپاژ پایین تر که حاصل کاهش مقدار جریان جرم به دلیل ظرفیت حرارتی بالای آن می باشد
۶) عملکرد سرمایشی بهتر آن نسبت به سیالات انتقال حرارت معمولی که به دلیل کاهش کمتر دمای سیال به علت ظرفیت حرارتی بالای آن حاصل می‌شود.

به منظور سودمند بودن، این سیالات نهان باید شرایط زیر را داشته باشند [۲]:

۱) ظرفیت حرارتی بالا،
۲) محدوده دمایی تغییر فاز منطبق بر کاربرد آن
۳) زیر سرد شدن پایین،
۴) نرخ انتقال حرارت بالا،
۵) قابلیت پمپاژ، افت فشار کم در سیستم پمپاژ،
۶) پایداری بیشتر در طول ذخیره سازی،
۷) پایداری تحت بارهای حرارتی-مکانیکی در سیستم پمپاژ.

هنگامی که مواد تغییر فاز معلق در سیالات انتقال حرارت منجمد شود، روی سطح انتقال حرارت ته نشین می‌شود که نتیجه آن افزایش نامطلوب مقاومت حرارتی در سطح می‌باشد. برای غلبه بر این موضوع، PCM ها اغلب قبل از اضافه شدن به سیالات انتقال حرارت با مواد پوسته، کپسول سازی می‌شوند، همچنین کپسول ها از نشت PCM در ادامه فاز جلوگیری می کند که در صورت نشت امکان انجماد آن در داکت و گرفتگی داکت وجود دارد.

باید به این نکته توجه داشت که کپسول ها باید به اندازه کافی در اثر تنش هایی که در اثر پمپاژ به وجود می آید مقاومت داشته باشد.

زمانی که قطرات پارافین به صورت قطرات بزرگتری شکل گیرد، مشکلات لایه بندی نیز ایجاد خواهد شد و در نتیجه یک لایه PCM به دلیل اختلاف دانسیته، روی قسمت بالایی سیستم ذخیره سازی شناور خواهد شد [۳].

بر اساس مطالعات یانگ[2] و همکارانش [۴]، پلیمر هایی که بهترین خصوصیات را در زمان میکرو کپسول سازی ارائه می دهند، پلاستیک های انعطاف پذیرند مانند متاکلرلایت پلی اتیلن (PEMA). با این پلاستیک ها ، مقدار بالاتری از گرمای نهان انجماد و ذوب بدست می آید. علاوه بر این ویسکوزیته دوغاب تاثیر قابل توجهی از مواد پوسته میکرو کپسول نمی پذیرد.

در کار تجربی هوآنگ[3] و همکارانش [۵]، از پارافین به عنوان عامل هسته سازی با دمای انجماد بالاتر استفاده می کند. با توجه به اندازه میکروسکوپی ذرات اموسیون PCM و دوغاب MPCM ، احتمال تشکیل عوامل هسته ساز با شروع فرایند انجماد در PCM کمتر است و بنابراین دمای کمتری برای شروع انجماد لازم است.

[1] Phase change material

[2] Yang
[3] Huang

این اثرات را گونتر[1] و همکارانش [۶]، در مقاله خود توضیح دادند. برای بدست آوردن سرعت غلظت، تعداد حجم فعال (قطرات) با این سرعت ها به اندازه ذرات وابسته است. حجم غیر فعال باقیمانده (قطرات بدون سرعت) می تواند بعد از هسته سازی همگن متبلور شود.

امولسیون پارافین توسط هوآنگ[2] و همکارانش [۷] توسعه پیدا کرده است، به منظور جلوگیری از زیر سرد شدن ، یک عامل هسته ساز به پارافین قبل از فرایند امولسیون سازی اضافه می شود. عامل هسته ساز سطح لازم برای شروع هسته سازی در داخل قطرات پارافین ارائه می کند، بنابراین به عنوان کاتالیزور هسته ساز عمل می کند. در امولسیون بدون عامل هسته ساز زیر سرد شدن در دمای ۷ °C رخ می دهددر حالی که با اضافه کردن عامل هسته ساز این دما به ۰,۱ °C کاهش می یابد.

برای بررسی اثرات سایز قطرات در هسته سازی و زیر سرد شدن ، هوآنگ و همکارانش [۷]، امولسیون آب-پارافین مختلفی را با اندازه ذرات متفاوت ارائه داده اند، آنها فهمیدند که علاوه بر سایز قطرات ، امولسیون surfactant تاثیر قاب توجهی بر انجماد دارد. آنه مشاهده کردند که همه امولسیون ها حاوی عوامل هسته سازی هستند که محدوده پیک انجماد را نشان می دهد.

گونتر و همکارانش [۸] امکان تفسیر مشاهدات بر اساس تئوری هسته سازی را مورد بحث قرار دادند. آنها افزایش زیر سرد شدن در امولسیون ها را با سایز قطرات ارتباط دادند. در این روش الگویی برای تبلور کریستال آلکان ارائه شد. محدوده پیک انجماد با انواع دانه های مختلف را می توان در شکل ۶ مشاهده نمود.

الوارادو[3] و همکارانش [۹]، فرایند زیر سرد شدن را در میکرو کپسول N-tetradecane و علت حذف آن را با افزودن عامل هسته ساز را بررسی کردند. میکرو کپسول N-tetradecane با کپسول ژلاتین تهیه شده است، تولید میکرو کپسول با قطر µm ۱۰۰ ، با استفاده از دو ماده مختلف و غلظت عامل هسته ساز (٪۲ سیلیس و ۲ و ٪۴ tetradecanol) صورت می گیرد. بخار سیلیس به عنوان عامل هسته ساز به تنهایی کتفی نمی باشد. غلظت ٪۲ از tetradecanol برای جلوگیری از زیر سرد شدن در tetradecane و میکرو کپسول tetradecane کافی می باشد. با این وجود مقدار عامل هسته ساز ، باید کوچکترین عامل برای از بین بردن زیر سرد شدن و کاهش حداقل حرارت نهان رسوب باشد.

ژانگ[4] و همکارانش [۱۰]، همچنین تبلور از یک DSC برای میکرو کپسول n-octadecane با l-octadecane به عنوان عامل هسته ساز را بررسی نمودند. به طور کلی ، منحنی سرمایش بدست آمده از DSC برای میکرو کپسول n- octadecane تحت تاثیر قطر متوسط ذرات می باشد. حداکثر درجه زیر سرد شدن ، با نرخ سرمایش/گرمایش DSC ، ۱۰ C/min می باشد. علاوه بر این، ٪۱۰ وزن l-octadecanol درون میکرو کپسول به عنوان عامل هسته ساز، زیر سرد شدن را با نرخ DSC در ۱۰ C/min، از ۲۶ °C به ۱۲ °C کاهش می دهد.

یاماگیشی[5] و همکارانش [۱۱]، دوغاب میکرو کپسول n-tetradecane و n-dodecane را مورد ارزیابی قرار دادند و مشاهده نمودند که علیرغم اینکه ذرات PCM در زیر سرد شدن وجود ندارد ، در میکرو کپسول وجود دارد. محدوده سایز ذرات ۵-۱۰۰ µm می باشد و دمای تبلور متناسب با سایز ذرات کاهش می یابد. l-tetradecanol به عنوان عامل هسته ساز اضافه شده و زیر سرد شدن را از بین می برد.

گریفیتس[6] و ایمس[7] [۱۲]،رفتار سلول های سقف سرد را در حالی که دوغاب MPCM در آن در گردش می باشد را مورد مطالعه قرار دادند. منحنی DSC نشان می دهد که اگر PCM به طور کامل قبل از شروع سرمایش ذوب شود، دوغاب MPCM، زیر سرد شدن را در ۵ °C نشان می دهد. با این وجود، مشاهدات تجربی و DSC نشان می دهد که اگر دوغاب MPCM قبل از اینکه کاملا ذوب شود، سرد شود، حضور مواد جامد ، نقش هسته را بازی می کند و به همین دلیل ، PCM در دمای بالاتری منجمد می شود. به همین دلیل دمای خروجی پایین تری نسبت به حالتی که مذاب کامل PCM استفاده می شود، دارد.

۲- فرایند ساخت

تکنیک میکرو کپسول سازی به طور گسترده ای در دارو سازی و در زمینه های مهندسی شیمی استفاده می‌شود. در سال های اخیر این تکنووژی در PCM ها به منظور بهبود رفتار آنها بکار رفته است. میکرو کپسول ها ذرات کوچکی از مواد هستند که با مواد دیگری پوشش داده شده اند و ماده دوم یک لایه نازکی

[1] Gunther
[2] Huang
[3] Alvarado
[4] Zhang
[5] Yamagishi
[6] Griffiths
[7] Eames

روی ماده اول تشکیل می دهد که آن را ایزوله می‌کند و از محیط بیرون محافظت می‌کند.

محدوده اندازه میکرو کپسول ها کاملا گسترده است در حدود قطر دوغاب بین ۲۰۰۰-۲۰۰ µm. ضخامت سایز پوسته بین ۰,۵ تا ۱۵۰ میکرومتر نوسان می‌کند و هسته بین ۲۰ تا ۹۵ درصد از جرم کل را تشکیل می‌دهد.

تکنیک های ساخت مختلفی برای میکرو کپسول ها وجود دارد و انتخاب بر اساس ویژگی های مواد محصور و نوع پلیمر مورد استفاده برای پوسته صورت می‌گیرد [۱۳].

میکرو کپسول هایی که از فرمالدهید ملامین ساخته شده اند به دلیل مقاومت مکانیکی (استحکام) بالا، دارای قابلیت تحمل تنش های داخلی بالاتری به علت تغییر حجم PCM می‌باشند و در نتیجه می توان از نشت PCM جلوگیری نمود.

۳ نوع موم پارافین($C_n H_{2n+2}$) یعنی n-hexadecane ، n-octadecane و n-eicosane برای کپسول سازی ترجیح داده می شود زیرا این مواد غیر سمی،غیر خورنده و از نظر شیمیایی بی اثرند و به راحتی در دسترسند و بوی نامطبوع ندارند.

از مواد تغییر فاز مهم دیگر می توان گلیکل پلی اتیلن (PEG) که به صورت PEG600 و PEG1000 و هیدرات نمک که به صورت $Na_2Co_3.10H_2O$ می‌باشد را نام برد.

در این قسمت به تشریح دو آزمایش ساخت میکروکپسول بر اساس n-octadecane و پوسته silica و میکرو کپسول PCM با هسته ملامین و پوسته فرمالدهید پرداخته می شود.

۲-۱- ساخت میکرو کپسول PCM بر اساس n-octadecane و پوسته silica به روش میعان سطحی[1] [۱۴] :

با مخلوط کردن ۳۰ گرم از n-octadecane و ۳۰ گرم از TEOS در یک بشر یک محلول روغنی بدست می‌آیدکه آن را به مدت ۳۰ دقیقه به هم می‌زنیم.

با ریختن محلول روغنی بدست آمده در ml ۳۰۰ از محلول آبی که شامل ٪۰,۵ وزنی PEO_{27}-PPO_{61}-PEO_{27} به عنوان سورفکتانت می‌باشد، یک امولسیون روغن/آب (O/W) بدست می‌آید. سپس امولسیون حاصل را در یک فلاسک ته گرد با دور rpm ۳۰۰ به مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق مخلوط می‌شود.

سپس محلول آبی اسید کلریک HCL با غلظت mol/l ۲ – که به عنوان کاتالیزر برای آغاز تراکم سیلیس مورد استفاده قرار می‌گیرد- به امولسیون در چرخش با نرخ rpm ۵۰۰، اضافه می‌شود. لازم به ذکر است که باید به خاصیت اسیدی محلول واکنش توجه شود و PH آن با PH متر اندازه گیری شود تا PH مورد نظر بدست آید زیرا مقدار محلول اسید کلریک HCL به شدت بر روی خاصیت اسیدی تاثیر می‌گذارد.

سپس امولسیون به طور مداوم در دمای °C ۳۵ و به مدت ۴۸ ساعت به هم زده می‌شود تا کاملا چگالیده شود.

سرانجام، محصولات حاصل فیلتر می‌شود و با استفاده از محلول آبی اتانول با غلظت ٪۳۰ وزنی شسته می‌شود. پودر تر بدست آمده در یک فر با دمای °C ۵۰ به مدت ۲۴ ساعت خشک می‌شود تا آب آن حذف شود.

۲-۲- ساخت میکرو کپسول PCM با هسته ملامین و پوسته فرمالدهید [۱۵] :

تهیه امولسیون: ابتدا ml۱۳ فرمالدهید را با ml ۱۴ آب مقطر مخلوط می شود. سپس ۳ گرم ملامین را به مخلوط حاصل اضافه می‌کنیم. در حالی که PH آن با triethanolamine در ۸,۵ تنظیم شده است، محلول بدست آمده در دمای °C ۷۰ بهم زده می شود. وقتی محلول کاملا شفاف شد، بار دیگر ۲ گرم ملامین اضافه می شود و به هم زده می شود تا محلول شفافی بدست آید. در انتها نیز ۲ گرم ملامین به محلول اضافه می شود و به هم زده می شود تا محلول کاملا شفاف شود و محلول پلیمری بدست آید.

تهیه امولسیون: ۲۵ گرم n-octadecane با ۱۳ گرم TA (استایرن سدیم-maleic anhydride copolymer ، محلول آبی ٪۹۰ وزنی) و ml۲۰۰ آب مخلوط می‌شود و محلول حاصل به طور مکانیکی در دمای °C ۷۰ با نرخ چرخش rpm۸۰۰ به مدت ۴۵ دقیقه به هم زده می شود تا امولسیون بدست آید. PH امولسیون با محلول اسید سیتریک ٪۱۰ وزنی در ۴,۵ تنظیم می شود.

ساخت میکروکپسول: محلول پلیمری به امولسیون در حال چرخش با نرخrpm ۶۰۰ ، با مقادیر مختلف اضافه می‌شود. بعد از اینکه همه پلیمر اضافه شد، به طور پیوسته به مدت ۹۰ دقیقه به هم زده می شود. PH امولسیون با محلول تری تانول آمین ٪۱۰ درصد وزنی در ۹ تنظیم می شود.

سپس ۱ گرم اوره اضافه می شود تا باقیمانده های فرمالدهید حذف شود.

بعد از اینکه میکروکپسول های بدست آمده فیلتر شد، با محلول آب- اتانول ٪۳۰ وزنی در دمای °C ۵۰ شسته می شود تا PH =۷ بدست آید.ماده تر بدست آمده در کوره خلا خشک می شود.

[1] Interfacial polycondensation

پودر پوسته پلیمر با تنظیم PH =۹ با محلول تری اتانول آمین ۵۰٪ وزنی بدست می‌آید. سپس مخلوط پلیمری و آب فیلتر می شود و ماده تر حاصل در کوره در دمای ۱۰۰ °C به مدت ۸ ساعت قرار می گیرد تا خشک شود.

۳- کاربرد میکرو کپسول PCM

۳-۱- کاربرد در نساجی

کاربرد میکروکپسول PCM در صنایع نساجی توسعه پیدا کرده است، خصوصا در اروپای شرقی و ژاپن و آمریکای شمالی به طور پیوسته به رشد خود ادامه می دهد. بیشتر مطالعات روی مواد نساجی MEPCM انجام شده است [۱۶].

گیرود[1] و همکارانش [۱۷] یک مفهوم جدیدی از کپسول سازی فسفات با پوسته پلی –اورتان (PU) که روی کتان، برای مقاومت در برابر آتش پوشش داده شد را ارائه دادند. گیرود و همکارانش دو نوع میکروکپسول با پوسته polyether-polyurethane و polyester-polyurethane را برای مقاومت دربرابر آتش و حرارت بررسی کردند. آنها نشان دادند که هر دو نع میکروکپسول پوشاننده پارچه کتان، یک اثر بازدارندگی روی شعله دارد و پوشش شامل میکرو کپسول با پوسته polyester-polyurethane، کمترین مقاومت را در برابر دود و CO دارد.

۳-۲- کاربرد ساختمانی

PCM در ساختمان برای ارتقا آسایش حرارتی ساختمان ها سبک برای صرفه جویی انرژی استفاده می شود [۱۸]. با این حال محدودیت هایی در استفاده از pcm در مواد ساختمانی وجود دارد. در مرحله اول، PCM ها ممکن است با ساختار مواد ساختمانی تعامل داشته باشد و خصوصیات مواد را تغییر دهد. در مرحله دوم، نشت PCM می تواند مشکلاتی روی طول عمر ساختار بگذارد. در مرحله سوم، PCM ها ضریب انتقال حرارت ضعیفی در حالت جامد دارد. برای رفع این مشکل، میکرو کپسول های PCM در مواد ساختمانی جایگذاری می شود که به دلیل سطح مبذل حرارتی بزکتر که توسط میکرو کپسول ارائه می شود، نرخ انتقال حرارت بطور قابل توجهی افزایش می یابد.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله بر روی میکرو کپسول های مواد تغییر فاز تمرکز شده است و به بررسی خصوصیات و ویژگی های PCM ها و چند ماده پر کاربرد به عنوان مواد هسته و پوسته بکار می رود و تشریح دو روش برای دو نوع میکرو کپسول PCM و بیان برخی از کاربرد های این مواد در صنایع نساجی و ساختمانی پرداخته شده است. خصوصیات اصلی MPCM، کاربری آن در سیستم ذخیره سازی انرژی حرارتی می باشد.

با بررسی نتایج موجود می توان به این نتیجه رسید که MEPCM ها پتانسیل خوبی به منظور ذخیره انرژی حرارتی دارند و می توانند در دیواره گرمکن خورشیدی بکار رود. همچنین در صنایع نساجی با کاربرد این مواد در الیاف پارچه، می تواند مقاومت خوبی از آن در برابر آتش مشاهده نمود.

۵- مراجع

[1] L. Royon, G. Guiffant, Forced convection heat transfer with slurry of phase change material in circular ducts: A phenomenological approach, Energy Conversion and Management, Vol. 49, No. 5, pp. 928-932, 2008.

[2] L. Huang, M. Petermann, C. Doetsch, Evaluation of paraffin/water emulsion as a phase change slurry for cooling applications, Energy, Vol. 34, No. 9, pp. 1145-1155, 2009.

[3] H. Mehling, L. F. Cabeza, Heat and cold storage with PCM, Heat and mass transfer, pp. 11-55, 2008.

[4] R. Yang, H. Xu, Y. Zhang, Preparation, physical property and thermal physical property of phase change microcapsule slurry and phase change emulsion, Solar energy materials and solar cells, Vol. 80, No. 4, pp. 405-416, 2003.

[5] L. Huang, C. Doetsch, C. Pollerberg, Low temperature paraffin phase change emulsions, International journal of refrigeration, Vol. 33, No. 8, pp. 1583-1589, 2010.

[6] E. Günther, T. Schmid, H. Mehling, S. Hiebler, L. Huang, Subcooling in hexadecane emulsions, International journal of refrigeration, Vol. 33, No. 8, pp. 1605-1611, 2010.

[7] L. Huang, E. Günther, C. Doetsch, H. Mehling, Subcooling in PCM emulsions—Part 1: experimental, Thermochimica Acta, Vol. 509, No. 1-2, pp. 93-99, 2010.

[8] E. Günther, L. Huang, H. Mehling, C. Dötsch, Subcooling in PCM emulsions–Part 2: Interpretation in terms of nucleation theory, Thermochimica Acta, Vol. 522, No. 1-2, pp. 199-204, 2011.

[9] J. Alvarado, C. Marsh, C. Sohn, M. Vilceus, V. Hock, G. Phetteplace, T. Newell, Characterization of supercooling suppression of microencapsulated phase change

[1] Giraud

material by using DSC, Journal of thermal analysis and calorimetry, Vol. 86, No. 2, pp. 505-509, 2006.

[10] X.-x. Zhang, Y.-f. Fan, X.-m. Tao, K.-l. Yick, Crystallization and prevention of supercooling of microencapsulated n-alkanes, Journal of colloid and interface science, Vol. 281, No. 2, pp. 299-306, 2005.

[11] Y. Yamagishi, T. Sugeno, T. Ishige, H. Takeuchi, A. T. Pyatenko, An evaluation of microencapsulated PCM for use in cold energy transportation medium, in Proceeding of, IEEE, pp. 2077-2083.

[12] P. Griffiths, P. Eames, Performance of chilled ceiling panels using phase change material slurries as the heat transport medium, Applied Thermal Engineering, Vol. 27, No. 10, pp. 1756-1760, 2007.

[13] P. M. Pérez, Caracterización de microencapsulados aplicados sobre materiales textiles, Thesis, Universitat Politècnica de València, 2007.

[14] H. Zhang, S. Sun, X. Wang, D. Wu, Fabrication of microencapsulated phase change materials based on n-octadecane core and silica shell through interfacial polycondensation, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Vol. 389, No. 1-3, pp. 104-117, 2011.

[15] Z. Jin, Y. Wang, J. Liu, Z. Yang, Synthesis and properties of paraffin capsules as phase change materials, Polymer, Vol. 49, No. 12, pp. 2903-2910, 2008.

[16] G. Nelson, Application of microencapsulation in textiles, International journal of pharmaceutics, Vol. 242, No. 1-2, pp. 55-62, 2002.

[17] S. Giraud, S. Bourbigot, M. Rochery, I. Vroman, L. Tighzert, R. Delobel, Microencapsulation of phosphate: application to flame retarded coated cotton, Polymer Degradation and Stability, Vol. 77, No. 2, pp. 285-297, 2002.

[18] D. Hawes, D. Feldman, D. Banu, Latent heat storage in building materials, Energy and buildings, Vol. 20, No. 1, pp. 77-86, 1993.