

شبیه سازی خشک کردن کاغذهای اندودشده و ارائه مدل جدید آزمایشگاهی آن

حسین شاه بیگ^۱ و احمد حلاجی ثانی

دانشکده مهندسی شیمی، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۰/۱۵

تاریخ دریافت: ۹۲/۵/۱۰

چکیده: در این تحقیق، یک مدل شبیه سازی شده که حاصل ادغام مکانیسم های انتقال حرارت و جرم در خشک کردن کاغذهای اندودشده است، ارائه می گردد. در مدل شبیه سازی، کاغذ اندودشده به سه لایه اندودشده، لایه مرطوب و لایه خشک تقسیم گردیده که در آن ضخامت هر لایه، تابعی از زمان و شرایط خشک شدن است. تأثیر پارامترهای دمای سیال، نوع سیال، زمان تأخیر و ترکیب مخلوط اندودکننده روی شدت خشک کردن مطالعه شده است. از دو سیال هوا و بخار آب داغ در دماهای 120°C ، 160°C و 200°C استفاده شد. زمان تأخیر $0/4$ و $0/2$ ثانیه در نظر گرفته شد که مطابق با شرایط صنعتی است. همچنین از دو ترکیب اندودکننده با ویسکوزیته های مختلف استفاده گردید. کاغذ اندودشده به هشت قسمت تقسیم و با نوشتن معادله های بقای جرم و انرژی برای هر لایه و حل آن ها، مقدار دما و رطوبت در هر لایه بر حسب زمان محاسبه گردید. برای بررسی نتایج شبیه سازی، از نتایج آزمایشگاهی استفاده شد که با نتایج شبیه سازی مطابقت خوبی داشت.

واژه های کلیدی: کاغذ، مدل سازی، خشک کردن، بخار آب داغ، نیروی موئینگی.

رده بندی ریاضی: ۹۳۸۳۰، ۶۵۲۰.

۱- مقدمه

کاغذ اندودشده از معدود کالاهایی است که در چند ده سال گذشته همواره افزایش تقاضا داشته است. این امر موجب رقابت در کاغذ سازان برای تولید باکیفیت بالاتر و قیمت تمام شده

۱- آدرس الکترونیکی نویسنده مسئول مقاله: حسین شاه بیگ shahbeig@ut.ac.ir

کمتر است [۱]. توسعه مدل‌های ریاضی برای خشک‌کردن کاغذ، فواید زیادی برای تولیدکنندگان دارد. با داشتن یک شبیه‌ساز رایانه‌ای خشک‌کردن، می‌توان رابطه‌ی بین سرعت تولید و انواع مختلف دستگاه‌های مورد استفاده با شرایط عملیاتی مختلف را مشخص کرد [۲-۴]. در زمانی که نیاز به تعمیر یا ساخت مجدد بخش خشک‌کن باشد، استفاده از مدل‌های خشک‌کردن واقعی بسیار مناسب است. مدل‌های خشک‌کردن کاغذ به دو بخش میکرو و ماکرو تقسیم‌بندی می‌شوند [۵]. اگر مدل چگونگی رفتار پدیده‌های انتقال در کاغذ پایه و یا بخش اندودشده را در نظر بگیرد در این صورت مدل، میکرو است و توانایی پیش‌بینی سرعت تولید در اثر تغییرات محدود یا بزرگ در شرایط عملیاتی را دارد. بر اساس مدل میکرو، می‌توان کیفیت کاغذ را بر اساس سابقه فرایندهای صورت گرفته در قسمت‌های داخلی کاغذ پایه پیش‌بینی کرد. در روش ماکرو، موازنه‌های کلی جرم و انرژی صورت می‌گیرد. مزیت عمده روش ماکرو، ساده بودن آن است؛ زیرا که اساس آن درونیابی بین دو شرط مرزی مشخص است. در یک تحقیق توسط فرکاس و همکاران در [۶]، مدلی ارائه شد که نفوذ ماده اندودکننده با انجام موازنه جرم بر روی هر جزء در یک حجم کنترل دیفرانسیلی در نظر گرفته می‌شود. غلظت ماده‌ی اندودکننده، میزان رطوبت و دما به صورت تابعی از زمان و در جهت ضخامت کاغذ نیز با این مدل قابل‌دسترسی است. در این مدل انقباض کاغذ در طی خشک‌شدن انتقال انرژی ناشی از حرکت مواد در داخل کاغذ در معادله‌ی انرژی در نظر گرفته نشده است. در یک تحقیق، مدلی توسط میهوبی و همکاران [۷] ارائه شد که در آن تخلیه آب به داخل کاغذ پایه را در نظر گرفته است و می‌تواند دما و میزان رطوبت را به صورت تابعی از زمان و مکان در داخل کاغذ پایه و لایه‌ی اندودشده ارائه کند. آن‌ها با در نظر گرفتن اختلاف در فشار مؤثری در دو بخش لایه‌ی اندودشده و کاغذ پایه، ترشدن مجدد کاغذ پایه را مدل کردند. این مدل، معادله‌های موازنه جرم را برای همه اجزای موجود در نظر نمی‌گیرد و در نتیجه نمی‌تواند میزان نفوذ و حرکت ماده‌ی اندودکننده را به داخل لایه‌ی اندودشده و کاغذ پایه پیش‌بینی نماید [۸]. انتقال آب، ذرات رنگدانه و مواد اندودکننده را در نظر گرفته و توانایی پیش‌بینی انقباض لایه اندودشده را دارد که در سایر مدل‌ها وجود ندارد [۹]. در این مدل حجم کنترل هم‌دمایی بر روی لایه اندودشده در نظر گرفته شده و موازنه جرم بر روی آن نوشته می‌شود. بیشتر مکانیسم‌های انتقال در این مدل به شکل نیمه تجربی محاسبه شده و معادله انرژی نیز به کار نرفته و در نتیجه مدل توانایی ارائه‌ی توزیع دما را ندارد. در یک مدل معادله بقای جرم برای آب و معادله بقای انرژی در نظر گرفته شده اما حرکت ماده اندودکننده دیده نشده است [۱۰ و ۱۱]. آن‌ها مدل میکروسکوپی دو بعدی و سپس سه بعدی را برای خشک‌کردن کاغذ اندودشده ارائه کردند. در مدل آن‌ها، توزیع رطوبت مواد اندودکننده تنها در لایه‌ی اندودشده در نظر گرفته شده است [۱۲ و ۱۳]. در مدلی، نخست این که مخلوط اندودکننده کل لایه‌ی کاغذ را اشباع می‌نماید و خشک‌کردن از هر دو سطح صورت می‌گیرد و دوم این که لایه اندودکننده تنها روی سطح

بالای کاغذ قرار بگیرد و تنها بخار حلال در بخش پایه نفوذ نماید [۱۴ و ۱۵]. در هر دو مدل، خشک کردن را به دو دوره‌ی سرعت ثابت و سرعت نزولی تقسیم کرد. هر چند هر دو مدل، در توزیع دما در عرض کاغذ دچار نقص است، اما گام‌هایی را برای تعیین غلظت حلال در عرض کاغذ برداشته است [۱۴ و ۱۵]. با در نظر گرفتن سایر مدل‌های موجود در بررسی نواقص آن‌ها، مدل هکیلی^۱ را به‌عنوان پایه‌ی مدل خود در نظر گرفته و تصحیح‌های لازم را بر روی مدل انجام می‌دهد. در این مدل کاغذ اندودشده به سه لایه تقسیم گردیده ولی ترکیب هر سه لایه همگن فرض شده است [۱۶]. در کارهای انجام‌شده، اگرچه به تدریج پیشرفت‌هایی در مدل‌سازی خشک‌کردن کاغذ اندودشده دیده می‌شود و با مروری بر کارهای انجام‌شده می‌توان شاهد پیشرفت‌هایی در مدل‌سازی خشک‌کردن کاغذ اندودشده بود، اما برای رسیدن به مدل ایده آل، چند نقص کلی این مدل‌ها باید برطرف شد. مهم‌ترین این نقص‌ها در نظر گرفتن جابجایی ذرات اندودکننده در حین خشک‌کردن، مکانیسم حرکت رطوبت مایع و بخار آب در حین خشک‌کردن در قسمت‌های مختلف کاغذ به‌صورت ترکیبی از نفوذ مولکولی، نفوذ نادرسون و حرکت توده‌ای، ضریب نفوذ مولکولی به‌صورت تابعی از زمان و رطوبت است که در مدل‌های گفته‌شده در نظر گرفته نشده است. با مطالعه مدل‌های قبل و با توجه به این که شبیه‌سازی در شرایط صنعتی صورت می‌گیرد، کاغذ اندودشده در این تحقیق به‌صورت سه لایه در نظر گرفته‌شده است [۱۷]:

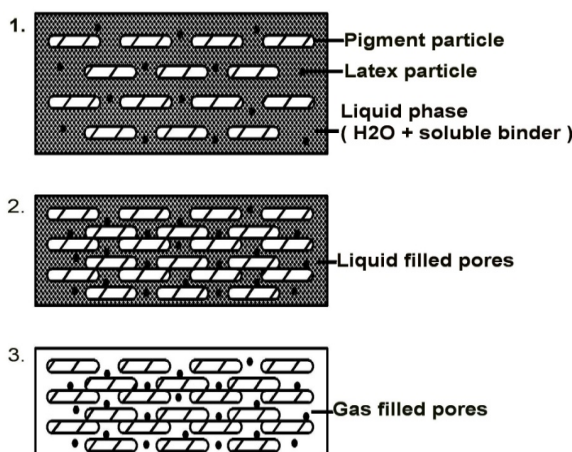
۱. لایه اندودشده،
۲. لایه مرطوب شده کاغذ پایه،
۳. لایه خشک کاغذ پایه.

ضخامت لایه‌های یک و دو به‌دلیل وجود رطوبت، تابعی از میزان رطوبت و ترکیب مخلوط اندودکننده و زمان خشک‌کردن است، در حالی که ضخامت لایه‌ی سوم ثابت مانده و تنها دمای آن در حین خشک‌کردن تغییر می‌کند. در مدل حاضر علاوه بر نوآوری فوق، انقباض کاغذ در حین خشک‌شدن آن، خیس شدن مجدد کاغذ به‌دلیل آب‌گیری از لایه‌ی اندودشده، عمق نفوذ رطوبت در کاغذ پایه، جذب گرمای تابشی در لایه‌های میانی کاغذ، حرکت توده‌ای بخار در مرحله نهایی از خشک‌کردن و نوع مواد پوشش‌دهنده نیز در نظر گرفته‌شده است.

۲- فرایند خشک‌کردن کاغذ اندودشده

به‌منظور بهبود نرمی و روشنایی کاغذ و همچنین افزایش کیفیت چاپ، کاغذ اندود می‌گردد. مخلوط اندودکننده یک ترکیب کلوئیدی است که برای ایجاد شرایط و اهداف فوق، طراحی و

ساخته می‌شود. این مخلوط ترکیبی از رنگدانه، ماده اندودکننده و مواد افزودنی است. نوع و مقدار هر یک از اجزاء، شرایط و کیفیت نهایی کاغذ را مشخص می‌کند. پس از تهیه کاغذ معمولی، آن را به واحد اندودکننده می‌فرستند. این واحد از دو بخش تشکیل شده است که اولی واحد اندود کردن و دوم واحد خشک کردن است. تکنیک‌های مختلفی برای نشان دادن مخلوط اندودکننده روی کاغذ وجود دارد. ولی امروز تکنیک اندودگر تیغه‌ای بیشتر استفاده می‌شود چون توانای نشان دادن مخلوط‌هایی با غلظت بالای جامد را دارد که موجب کم شدن زمان و هزینه خشک کردن می‌شود. بلافاصله پس از اندود کردن، کاغذ به واحد خشک کردن فرستاده می‌شود؛ زیرا در صورت خشک شدن، رطوبت موجود در لایه اندودشده وارد بخش‌های زیرین شده و به همراه خود ماده اندودکننده را منتقل می‌کند که علاوه بر طولانی کردن زمان خشک شدن موجب کاهش کیفیت کاغذ هم می‌شود. فاصله زمانی بین اندود کردن و خشک کردن، زمان تأخیر نامیده می‌شود که در شرایط صنعتی حدود ۰/۲ ثانیه است. در این جا از خشک کن های غیر تماسی نظیر خشک کن‌های تشعشعی و خشک کن جابجایی برخوردی استفاده می‌شود؛ زیرا استفاده از خشک کن‌هایی نظیر استوانه‌های دوار موجب تخریب لایه اندودشده می‌شود. امروزه از خشک کن‌های برخوردی یا ترکیبی از خشک کن‌های برخوردی و تشعشعی استفاده می‌شود. به محض ورود کاغذ اندودشده به داخل خشک کن و طی مدت زمان کوتاهی، دمای سطح کاغذ به دمای تبخیر رطوبت می‌رسد، اما رطوبت موجود در لایه اندود شده هم در اثر تبخیر از سطح و هم در اثر نفوذ و آب‌گیری به لایه پایینی از دست می‌رود. شرایط و ساختار لایه اندودشده را در طی زمان خشک کردن می‌توان به سه مرحله زمانی تقسیم کرد (شکل ۱):



شکل ۱: تغییرات در ساختار لایه اندودشده در طول خشک کردن

(۱) در ابتدای ورود به خشک‌کن، ذرات رنگدانه و اندودکننده در داخل مخلوط اندودکننده به صورت آزادانه حرکت می‌کنند. به دلیل حرکت آب به لایه‌ی مرطوب کاغذ پایه، مواد اندودکننده همراه آن وارد کاغذ پایه می‌شود اما ذرات رنگدانه به دلیل بزرگ بودن نمی‌توانند وارد منافذ کاغذ پایه شده و در نتیجه روی سطح مشترک باقی می‌مانند. این امر باعث می‌گردد که غلظت رنگدانه‌ها روی سطح مشترک کاغذ و لایه اندودشده بیشتر شود و حرکت رطوبت به لایه مرطوب مشابه مکانیسم فیلتر کردن شده، به تدریج کند گردد. با ادامه خشک‌کردن از میزان آب در لایه اندودشده کاسته شده و ذرات به هم نزدیک‌تر می‌شوند.

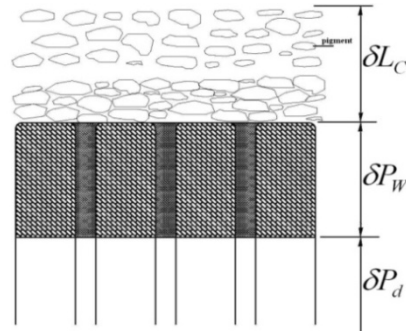
(۲) با ادامه خشک‌کردن و نزدیک‌شدن ذرات جامد به هم، در یک لحظه زمانی، ذرات جامد در لایه‌ی اندودشده به طور کامل به هم می‌پیوندند. غلظت مواد جامد در لایه در این حالت به نام اولین غلظت بحرانی (FCC) نامیده می‌شود. در این مرحله هنوز تبخیر از سطح صورت می‌گیرد.

(۳) پس از عبور از غلظت FCC، رطوبت از سطح ناپدیدشده و وارد فضای بین ذرات می‌شود. رطوبت از طریق مکانیسم‌هایی نظیر نیروی موئینگی و نفوذ مولکولی به سطح مایع رسیده و تبخیر می‌شود و بخار حاصل از فضای بین ذرات به شکل توده‌ای و نفوذ مولکولی به سطح بالایی لایه‌ی اندودشده می‌رسد. به تدریج سطح مایع پایین‌تر می‌رود و عمل خشک‌کردن کند-تر می‌شود. در این مرحله ساختار کلی لایه اندودشده تغییر نمی‌کند اما ضخامت آن کاهش می‌یابد. وقتی که سطح مایع به سطح مشترک کاغذ پایه برسد، خشک‌کردن عملاً تمام می‌گردد. غلظت جامدات در لایه‌ی اندودشده در این لحظه، غلظت بحرانی دوم (SCC) نامیده می‌شود. از این لحظه به بعد، نفوذ در رطوبت به لایه‌ی مرطوب هم تمام می‌گردد. در صورت ادامه خشک‌کردن دمای لایه‌ی اندودشده به دمای سیال خشک‌کننده می‌رسد و سرعت خشک‌کردن به دلیل این که فاصله بین محل تبخیر تا سطح جامد زیاد است، بسیار کند می‌شود.

۳- مدل‌سازی خشک‌کردن کاغذ اندودشده

۳-۱- فرمول‌بندی

در این مدل کاغذ اندودشده به سه لایه مجزا تقسیم شده است (شکل ۲). ضخامت سه لایه اندودشده لایه‌ی مرطوب کاغذ پایه و لایه‌ی خشک کاغذ پایه به ترتیب با علامت‌های δL_C ، δP_d و δP_w نشان داده شده است. ضخامت لایه‌ی اندودشده در ابتدا بستگی به غلظت و حجم ذرات جامد دارد اما در نهایت شکل قرار گرفتن ذرات جامد در کنار هم دیگر و شکل هر ذره تعیین‌کننده‌ی ضخامت نهایی آن خواهد بود (روابط ۱ تا ۳).



شکل (۲): نمای کلی از کاغذ اندودشده در حال خشک‌شدن

$$\delta L_{C,\circ} = CW \times \rho_L \left[X_{C,\circ} + \frac{\rho_L}{\rho_{c,d}} \right] \quad (۱)$$

$$\delta L_{C,t+\Delta t} = \delta L_{C,t} - \Delta \delta L_C \quad (۲)$$

$$\Delta \delta L_C = \frac{CW}{\rho_{L,t}} \times \Delta X_{C,t} \quad X_{C,t} \geq X_{SCC} \quad (۳)$$

در روابط بالا CW میزان گراماژ لایه پوششی بوده و واحد آن (gr/m^2) است و X مقدار رطوبت کاغذ است که واحد آن (مقدار جامد خشک/مقدار آب) است. در طول زمان تأخیر و تا قبل از رسیدن به شرایط SCC ، رطوبت لایه‌ی اندودشده همراه با مواد اندودکننده وارد بخش مرطوب کاغذ پایه شده و رطوبت آن بیشتر می‌شود. ضخامت لایه‌ی مرطوب کاغذ پایه به زمان تأخیر و ضریب نفوذ رطوبت پایه بستگی دارد. معادله (۴) برای تعیین عمق نفوذ پیشنهادشده است [۱۸]:

$$\delta P_{W,t} = \delta P_{W,\circ} + \sqrt{12 D_{x,t} \times t} \quad (۴)$$

که در آن $\delta P_{W,\circ}$ ضخامت لایه‌ی کاغذ پایه مرطوب قبل از ورود به خشک‌کن است و $D_{x,t}$ ضریب نفوذ رطوبت به داخل کاغذ پایه که تابعی از مقدار رطوبت و دمای کاغذ می‌باشد [۱۹]. از آنجایی که ضریب نفوذ رطوبت تابعی قوی از دما و رطوبت است (رابطه ۵) و در طول خشک‌کردن شدیداً تغییر می‌کند،

$$D_{x,t} = F(T_x, X_x) \quad (۵)$$

تابعیت ضریب نفوذ، به دما و رطوبت کاغذ متفاوت است به طوری که با افزایش دما به صورت توانی افزایش یافته ولی با کاهش رطوبت، مقدار آن شدیداً کاهش می‌یابد. ضخامت لایه‌ی خشک کاغذ پایه از معادله (۶) محاسبه می‌شود:

$$\delta P_d = \delta P_{d,\circ} - \delta P_{w,t} \quad (۶)$$

در شرایطی که $X_{C,t} < X_{SCC}$ باشد، ضخامت لایه‌ی آلوده‌شده ثابت است و مایع از سطح کاغذ آلوده‌شده ناپدید شده و به داخل لایه آلوده‌شده فرو می‌رود. در این شرایط مایع در داخل لایه‌ی آلوده‌شده تبخیر شده و سپس با طی فاصله‌ای خود را به سطح خارجی می‌رساند. این فاصله با کمک معادله‌های موازنه مواد به صورت معادله (۷) در می‌آید:

$$\delta y_V = \delta L_{C,SCC} - \frac{CW}{\varepsilon_C \rho_{L,t} \delta L_{C,\circ}} \Delta X_{C,t} \quad (۷)$$

۳-۲- مکانیسم انتقال حرارت

گرمای لازم برای خشک‌کردن کاغذ، عمدتاً از طریق برخورد عمودی سیال (هوا یا بخار آب داغ) به سطح کاغذ فراهم می‌شود. اگر هوا به عنوان سیال خشک‌کننده استفاده شود، دمای سطح کاغذ آلوده‌شده برابر دمای حباب مرطوب است و اگر از بخار آب داغ استفاده شود، برابر دمای جوش آب در فشار محفظه خشک‌کن است. ضریب انتقال حرارت جابجایی بر اساس رابطه مارتن محاسبه می‌شود [۲۰]، که به شکل هندسی نازل، فاصله نازل از سطح کاغذ، چگونگی آرایش آن‌ها و سرعت سیال بستگی دارد. همچنین از سطوح فلزی خشک‌کن به سطح کاغذ انتقال گرمای تشعشعی صورت می‌گیرد. ضریب جذب تشعشعی کاغذ تابعی از ضریب جذب آب و ذرات جامد است اما در مراحل نهایی که سطح کاغذ خشک‌شده، تشعشع به داخل کاغذ به صورت یک مدل نمایی کاهنده نفوذ کرده و جذب می‌شود. در عرض کاغذ اختلاف دما وجود دارد و به همین دلیل انتقال حرارت هدایتی بین نقاط مختلف آن صورت می‌گیرد. حرکت رطوبت به داخل کاغذ پایه نیز همراه با انتقال گرما است. عمل تبخیر همراه با گرفتن انرژی است و همچنین کاهش رطوبت در کاغذ نیز همراه با آزادسازی گرمای نهان جذب می‌باشد. شکل‌های جزئی‌تر انتقال انرژی نیز وجود دارد که به دلیل کوچک بودن از آن‌ها در مدل صرف نظر شده است.

۳-۳- مکانیزم انتقال جرم

پس از قرار گرفتن سوسپانسیون روی کاغذ، رطوبت آن به دو روش منتقل می‌شود:

الف) تبخیر: به محض ورود کاغذ اندودشده به خشک‌کن، دمای سطح آن سریعاً افزایش یافته، به دمای تبخیر می‌رسد. تا زمانی که سطح کاغذ مرطوب بماند تبخیر از آن مشابه یک سطح باز است و میزان انتقال جرم از معادله چیلتون-کالبرن^۱ (روابط ۸,a و ۸,b) محاسبه می‌گردد [۲۱].

$$\frac{\dot{m}_{ev}}{A} = \frac{P_t}{R_v T} \times \frac{h_y}{\rho C_p (Le)^{1/3}} \times \ln \left[\frac{P_t - P_{v,\infty}}{P_t - P_t} \right] \quad X_{c,t} \geq X_{c,SCC} \quad (8,a)$$

$$\frac{\dot{m}_{ev}}{A} \cong h_y C (P_{v,c} - P_{v,\infty}) \quad (8,b)$$

ضریب C در شرایط عملکرد آزمایشگاهی ثابت است و عدد بی‌بعد لوییس (Le) در شرایط آزمایشگاهی به‌دست می‌آید. در حالت $X_C < X_{C,SCC}$ ، مایع از سطح لایه اندودشده، ناپدیدشده و به درون لایه اندودشده می‌رود. در این شرایط بخار حاصل از تبخیر، از میان لایه اندودشده خشک‌شده عبور کرده، به سطح رسیده و از آن خارج می‌شود. مکانیسم‌های حرکت بخار از سطح تبخیر به سطح آزاد ترکیبی از نفوذ مولکولی و جریان آرام توده‌ای است. سرعت تبخیر رطوبت را در این حالت می‌توان با ترکیب این دو مکانیسم به صورت معادله (۹) پیشنهاد کرد [۲۲ و ۲۳]:

$$\left(\frac{\dot{m}_{ev}}{A} \right) \cong \frac{\varepsilon \psi}{R_v T \delta y_v} \left[x \eta D_v + (1-x) \frac{P_t R^r}{\lambda \mu_{v,t}} \right] D_v (P'_{v,c} - P_{v,c}) \quad (9)$$

که در آن x سهم نفوذ مولکولی در حرکت کلی بخار است و ψ فاکتور لامبیرینت^۲ است. معادله (۹) را می‌توان به صورت معادله (۱۰) ساده کرد:

$$\frac{\dot{m}_{ev}}{A} \cong \frac{\varepsilon \psi}{R_v T \delta y_v} \times \left[x \eta D_v + (1-x) \frac{P_t R^r}{\lambda \mu_{L,x}} \right] D_v (P'_{v,c} - P_{v,c}). \quad (10)$$

رابطه (۱۰) سرعت تبخیر بخار از سطح تبخیر تا سطح آزاد را می‌دهد که ترکیب آن با معادله (۸,a) سرعت کلی تبخیر به صورت رابطه (۱۱) به‌دست می‌آید:

$$\frac{\dot{m}_{ev}}{A} \cong \frac{\varepsilon \psi}{R_v T \delta y_v} \times \left[x \eta D_v + (1-x) \frac{P_t R^r}{\lambda \mu_{L,x}} \right] D_v (P'_{v,c} - P_{v,c}) \quad (11)$$

1- Chilton-Calburn

2- Labyrinth factor

$P'_{v,c}$ فشار جزئی بخار در سطح تبخیر است و مقدار آن از فشار بخار آب در دمای مشابه کمتر است. با استفاده از معادله کلین (رابطه ۱۲) خواهیم داشت:

$$P'_{v,i} = P_v^{sat} \times F_{pv} . \quad (12)$$

ضریب فشار بخار در شرایط حاضر برای آب $F_{pv} = 0.25$ در نظر گرفته شده است [۱۴].

ب) آگیری: مخلوط سوسپانسیونی که روی کاغذ قرار می‌گیرد دارای رطوبت بالا بوده و در نتیجه پس از قرار گرفتن روی کاغذ به همراه مواد افزودنی و ذرات ریز وارد بخش‌های زیرین کاغذ خشک می‌شود. شدت حرکت آب با ترکیب معادله‌های دارسی^۱، لوکاس^۲ و واشبورن^۳ به صورت زیر پیشنهاد شده است [۸]:

$$\frac{m_{d(t)}}{A} = \sqrt{\frac{2C_D \times t}{\mu_{w(T)} / \mu_{w(T_0)}}} \quad (13)$$

$$\frac{m_{d(t+\Delta t)}}{A} = \sqrt{\left(\frac{m_{d(t)}}{A}\right)^2 + \frac{2C_D \times t}{\mu_{w(T)} / \mu_{w(T_0)}}} \quad (14)$$

معادلات (۱۳) و (۱۴) تا زمانی که $X_C \geq X_{C,FCC}$ برقرار است، پس از آن آگیری صورت نخواهد گرفت.

۳-۴- مدل توزیع دما

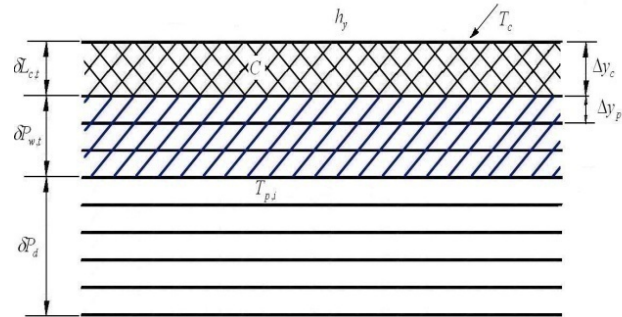
به منظور محاسبه توزیع دما، کاغذ به المان‌های دیفرانسیلی تقسیم شده است. با توجه به ضریب هدایت بالای لایه آندود شده و ضخامت کم آن، تنها یک لایه برای آن فرض شده و خواص آن در تمام نقاط یکسان در نظر گرفته شده است. چون زمان تأخیر، مدت کوتاهی در حد چند دهم ثانیه است، در اثر آگیری تنها بخشی از کاغذ پایه مرطوب شده و قسمت‌های زیرین همچنان خشک باقی مانده است. پس کاغذ پایه به دو بخش مرطوب و خشک تقسیم گردیده است. تمام کاغذ پایه به هشت قسمت مساوی تقسیم شده است (شکل ۳). با نوشتن معادله‌های موازنه‌های بقای جرم و انرژی و حل هم‌زمان آن‌ها دما و رطوبت هر المان

1- Darcy

2- Lucas

3- Washburn

دیفرانسیلی در زمان معین تعیین می‌شود. با نوشتن معادله بقای انرژی گرمایی برای لایه اندود-
شده و ساده کردن آن، معادله (۱۵) حاصل می‌شود:



شکل ۳: نمای کلی سه‌لایه در مدل

$$\rho_c^p C_{p,c}^p \Delta y_c \frac{T_c^{P+1} - T_c^P}{\Delta t} = h_y^p [T_j - T_c^P] - \frac{\gamma K_{p,l}}{\Delta y_p} [T_c^P - T_{p,l}^P] \quad (15)$$

$$- \frac{(\dot{m}_{ev})_c^p}{A} \left[(h_{fg})_c^p + (\Delta h_s)_c^p \right] + q_{abs,\odot} - \frac{(\dot{m}_d)_c^p}{A} (Cp_l)_c^p (T_c^P - T_{p,l}^P)$$

جملات سمت راست معادله (۱۵) به ترتیب انتقال حرارت جابجایی روی سطح، گرمای تشعشعی جذب‌شده روی سطح، انتقال حرارت هدایتی از لایه اندودشده به لایه زیرین، انتقال گرمای همراه جریان مایع خروجی از لایه اندودشده به لایه زیرین و گرمای نهان تبخیر و گرمای نهان جذب رطوبت است. جمله چهارم سمت راست تا زمانی که $X_c \geq X_{C,FCC}$ معتبر است، و پس از آن صفر خواهد بود. Δh_s گرمای نهان جذب آب است، که بستگی به دما و مقدار رطوبت دارد. از آنجا که در این مدل در بخش تحتانی کاغذ پایه صفحه فلزی قرار دارد، انتقال جرم تنها در جهت مثبت رخ می‌دهد.

معادله (۱۶) موازنه حرارتی برای لایه داخلی i را نشان می‌دهد که عبارت است از:

$$\begin{aligned} \rho_{P,i} C p_{P,i} \times \Delta y_p \times \frac{T_{P,i}^{P+1} - T_{P,i}^P}{\Delta t} = & \frac{K_{P,i-1}}{\Delta y_p} [T_{P,i-1}^P - T_{P,i}^P] + \frac{K_{P,i+1}^P}{\Delta y_p} [T_{P,i+1}^P - T_{P,i}^P] \\ & + \frac{(\dot{m}_d)_{P,i-1}^P}{A} (Cp)_{P,i-1}^P (T_{P,i-1}^P - T_{P,i}^P) - \frac{(\dot{m}_d)_{P,i}^P}{A} (Cp)_{P,i}^P (T_{P,i}^P - T_{P,i+1}^P) \\ & + q_{abs} F_{P,i} - \frac{(\dot{m}_{ev})_{P,i}^P}{A} \times [(h_{fg})_{P,i}^P + (\Delta h_s)_{P,i}^P] \end{aligned} \quad (16)$$

جمله‌های اول و دوم سمت راست مقدار گرمای هدایتی ورودی و خروجی از لایه i و جمله چهارم، پنجم و ششم در سمت راست تا زمانی که سطح رطوبت به سطح کاغذ پایه نرسد، برقرار است. در غیر این صورت، همه این سه جمله صفر می‌شود.

۳-۵- مدل توزیع رطوبت

معادله‌های موازنه رطوبت به دو بازه‌ی زمانی تقسیم می‌شود:

$$X_{c,t} \geq X_{c,FCC} \quad (1)$$

برای لایه پوشش داده‌شده:

$$CW \frac{X_c^{P+1} - X_c^P}{\Delta t} = -\frac{(\dot{m}_{ev})_c^P}{A} - \frac{(\dot{m}_d)_c^P}{A}$$

برای لایه مرطوب شده:

$$BW \frac{X_{b,i}^{P+1} - X_{b,i}^P}{\Delta t} = \frac{(\dot{m}_d)_{i-1}^P}{A} - \frac{(\dot{m}_d)_i^P}{A}$$

که در آن BW میزان گراماژ کاغذ پایه بوده و واحد آن (gr/m^2) است. اما لایه‌های خشک، بدون تغییر در رطوبت وجود خواهند داشت.

$$X_{c,t} < X_{c,FCC} \quad (2)$$

برای لایه پوشش داده‌شده:

$$CW \frac{X_c^{P+1} - X_c^P}{\Delta t} = -\frac{(\dot{m}_{ev})_c^P}{A}$$

برای لایه مرطوب شده:

$$BW \frac{X_{b,i}^{P+1} - X_{b,i}^P}{\Delta t} = - \frac{(\dot{m}_{ev})_{p,i}^P}{A}$$

۳-۶- تخلخل

مطالعات نشان می‌دهد که ذرات خاک رس در آبیگری تأثیر بهتری داشته و ضریب تخلخل آن‌ها به شدت کاهش می‌یابد [۲۳]. تأثیر غلظت مواد اندودکننده روی تخلخل به چگونگی قرارگیری آن‌ها بین ذرات رنگدانه بستگی دارد. گری^۱ گزارش کرده است که در مخلوط نشاسته - خاک رس با اضافه شدن مواد افزودنی تا ۵ pph مقدار تخلخل به مقدار جزئی افزایش می‌یابد و در غلظت‌های بالاتر، میزان افزایش تخلخل بیشتر است [۲۴]. در اغلب مطالعات، میزان تخلخل لایه پوشش‌دهنده بین ۰/۳۱-۰/۳۵ است.

۴- حل معادلات

معادله‌های توزیع دما و رطوبت برای لایه‌های مختلف تعریف شده است. این معادله‌ها با ساده کردن به شکل $\frac{dT_i^P}{dt}$ و $\frac{dX_i^P}{dt}$ نوشته می‌شود. معادله‌های حاصل از روش کرانک-نیکلسون حل شد. براین اساس، اگر توزیع دما در زمان t معلوم باشد توزیع دما در زمان $t + \Delta t$ برابر است با:

$$\Delta T_i = \frac{\left(\frac{dT_i}{dt}\right)_t + \left(\frac{dT_i}{dt}\right)_{t+\Delta t}}{2} \times \Delta t \quad (17)$$

و دمای جدید هر لایه از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$T_i(t + \Delta t) = T_i(t) + \Delta T_i \quad (18)$$

با استفاده از معادلات (۱۷) و (۱۸) و معادله بقای جرم و انرژی برای لایه اندودشده در شرایط $X_c < X_{c,SCC}$ می‌توان نوشت:

$$\frac{\Delta T_c^p}{\Delta t} = E_{c,t} - \frac{h}{2\rho_{c,t}Cp_{c,t}\Delta y_{c,t}}\Delta T_c - \frac{K_{P,1}}{\rho_{c,t}Cp_{c,t}\Delta y_{c,t}\Delta y_P}(\Delta T_c - \Delta T_1) + \sum_{i=1}^n \frac{(\dot{m}_{ev})_{P,i}^p}{A}(Cp_v)_{P,1}^p \left(\Delta T_1^p - \Delta T_c^p \right) \quad X_c < X_{c,SCC}$$

و در حالت کلی برای لایه i ام می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta T_i^p}{\Delta t} = E_{i,t} + & \left\{ \frac{K_{P,i-1}^p}{\gamma\rho_{P,i}Cp_{P,i}\Delta y_P^\gamma} + \frac{(\dot{m}_d)_{P,i-1}^p}{A}(Cp_L)_{P,i-1}^p \right\} (\Delta T_{i-1}^p - \Delta T_i^p) \\ & - \left\{ \frac{K_{P,i}^p}{\gamma\rho_{P,i}Cp_{P,i}\Delta y_P^\gamma} + \frac{(\dot{m}_d)_{P,i}^p}{A}(Cp_L)_{P,i}^p \right\} (\Delta T_i^p - \Delta T_{i+1}^p) \quad X_c \geq X_{c,SCC} \\ \frac{\Delta T_i^p}{\Delta t} = E_{i,t} + & \frac{K_{P,i-1}^p}{\gamma\rho_{P,i}Cp_{P,i}\Delta y_P^\gamma} (\Delta T_{i-1}^p - \Delta T_i^p) + \\ & \left\{ \frac{K_{P,i}^p}{\gamma\rho_{P,i}Cp_{P,i}\Delta y_P^\gamma} - \sum_{j>i}^n \frac{(\dot{m}_{ev})_{P,j}^p}{A}(Cp_v)_{P,i+1}^p \right\} (\Delta T_i^p - \Delta T_{i+1}^p) \quad X_c < X_{c,SCC} \end{aligned}$$

برای لایه‌های خشک کاغذ پایه:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta T_i^p}{\Delta t} = E_{i,t} + & \frac{K_{P,i-1}^p}{\gamma\rho_{P,i} \times Cp_{P,i} \times \Delta y_P^\gamma} (\Delta T_{i-1}^p - \Delta T_i^p) - \\ & \left\{ \frac{K_{P,i}^p}{\gamma\rho_{P,i} \times Cp_{P,i} \times \Delta y_P^\gamma} - \sum_{j>i}^n \frac{(\dot{m}_{ev})_{P,j}^p}{A} \times (Cp_v)_{P,j}^p \right\} (\Delta T_i^p - \Delta T_{i+1}^p) \quad X_c^p \geq X_{c,SCC} \end{aligned} \quad (19)$$

برای لایه‌ی آخر:

$$\frac{\Delta T_n^p}{\Delta t} = E_{n,t} + \frac{K_{P,n-1}^p}{\gamma \rho_{P,n-1} C p_{P,n-1} \Delta y_P} (\Delta T_{n-1}^p - \Delta T_n^p) \quad (20)$$

این معادله‌ها را می‌توان به شکل ماتریس زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} d_c & C_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_1 & d_1 & C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_\gamma & d_\gamma & C_\gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_\gamma & d_\gamma & C_\gamma & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_\gamma & d_\gamma & C_\gamma & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_\delta & d_\delta & C_\delta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_\phi & d_\phi & C_\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_\gamma & d_\gamma & C_\gamma \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_\lambda & d_\lambda \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta T_c \\ \Delta T_1 \\ \Delta T_\gamma \\ \Delta T_\gamma \\ \Delta T_\gamma \\ \Delta T_\delta \\ \Delta T_\phi \\ \Delta T_\gamma \\ \Delta T_\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{c,t} \cdot \Delta t \\ E_{1,t} \cdot \Delta t \\ E_{\gamma,t} \cdot \Delta t \\ E_{\gamma,t} \cdot \Delta t \\ E_{\gamma,t} \cdot \Delta t \\ E_{\delta,t} \cdot \Delta t \\ E_{\phi,t} \cdot \Delta t \\ E_{\gamma,t} \cdot \Delta t \\ E_{\lambda,t} \cdot \Delta t \end{bmatrix} \quad (21)$$

ضرایب معادله‌ی (۲۱) به کمک معادله‌های (۱۹) و (۲۰) به دست می‌آید. ماتریس ضرایب برای دو بازه زمانی مختلف نوشته می‌شود. مقادیر ضرایب با مقادیر فیزیکی هر لایه تعیین می‌شود.

$$\begin{aligned} d_c &= 1 + \frac{h}{\gamma \rho_{c,t} C p_{c,t} \Delta y_{c,t}} + \frac{K_{P,1}}{\rho_{c,t} C p_{c,t} \Delta y_{c,t} \Delta y_P} + \frac{(\dot{m}_d)_c^p (C p_L)_c^p}{\gamma \rho_{c,t} C p_{c,t} \Delta y_{c,t}} & X_c &\geq X_{c,SCC} \\ d_c &= 1 + \frac{h}{\gamma \rho_{c,t} C p_{c,t} \Delta y_{c,t}} + \frac{K_{P,1}}{\rho_{c,t} C p_{c,t} \Delta y_{c,t} \Delta y_P} - \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(\dot{m}_{ev})_{P,i}^p}{A} (C p_v)_{P,i}^p}{\gamma \rho_{c,t} C p_{c,t} \Delta y_{c,t}} & X_c &< X_{c,SCC} \\ C_c &= -\frac{K_{P,1}}{\rho_{c,t} C p_{c,t} \Delta y_{c,t} \Delta y_P} + \frac{(\dot{m}_d)_c^p (C p_L)_c^p}{\gamma \rho_{c,t} C p_{c,t} \Delta y_{c,t}} & X_c &\geq X_{c,SCC} \\ C_c &= -\frac{K_{P,1}}{\rho_{c,t} C p_{c,t} \Delta y_{c,t} \Delta y_P} - \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(\dot{m}_{ev})_{P,i}^p}{A} (C p_v)_{P,i}^p}{\gamma \rho_{c,t} C p_{c,t} \Delta y_{c,t}} & X_c &< X_{c,SCC} \end{aligned}$$

برای لایه‌های مرطوب کاغذ پایه:

$$a_i = -\frac{K_{P,i-1}}{\gamma \rho_{P,i} C_{p_{P,i}} \Delta y_P} - \frac{\frac{(\dot{m}_d)_{P,i-1}^p}{A} (C_{p_L})_{P,i-1}^p}{\gamma \rho_{P,i} C_{p_{P,i}} \Delta y_P} \quad X_c \geq X_{c,SCC}$$

$$a_i = -\frac{K_{P,i-1}}{\gamma \rho_{P,i} C_{p_{P,i}} \Delta y_P} \quad X_c < X_{c,SCC}$$

$$d_i = 1 + \frac{K_{P,i-1}^p + K_{P,i}^p}{\gamma \rho_{P,i} C_{p_{P,i}} \Delta y_P} + \frac{\frac{(\dot{m}_d)_{P,i-1}^p}{A} (C_{p_L})_{P,i-1}^p}{\gamma \rho_{P,i} C_{p_{P,i}} \Delta y_P} + \frac{\frac{(\dot{m}_d)_{P,i}^p}{A} (C_{p_L})_{P,i}^p}{\gamma \rho_{P,i} C_{p_{P,i}} \Delta y_P} \quad X_c \geq X_{c,SCC}$$

$$d_i = 1 + \frac{K_{P,i-1}^p + K_{P,i}^p}{\gamma \rho_{P,i} C_{p_{P,i}} \Delta y_P} + \frac{\sum_{j>i}^n \frac{(\dot{m}_{ev})_{P,j}^p}{A} (C_{p_v})_{P,i+1}^p}{\gamma \rho_{P,i} C_{p_{P,i}} \Delta y_P} \quad X_c < X_{c,SCC}$$

$$C_i = -\frac{K_{P,i}^p}{\gamma \rho_{P,i} C_{p_{P,i}} \Delta y_P} - \frac{\frac{(\dot{m}_d)_{P,i}^p}{A} (C_{p_L})_{P,i}^p}{\gamma \rho_{P,i} C_{p_{P,i}} \Delta y_P} \quad X_c \geq X_{c,SCC}$$

$$C_i = -\frac{K_{P,i}^p}{\gamma \rho_{P,i} C_{p_{P,i}} \Delta y_P} - \frac{\sum_{j>i}^n \frac{(\dot{m}_{ev})_{P,j}^p}{A} (C_{p_v})_{P,i+1}^p}{\gamma \rho_{P,i} C_{p_{P,i}} \Delta y_P} \quad X_c < X_{c,SCC}$$

برای لایه‌های خشک کاغذ پایه:

$$a_i = -\frac{K_{P,i-1}}{\gamma \rho_{P,i} C_{p_{P,i}} \Delta y_P}$$

$$d_i = 1 + \frac{K_{P,i-1}^p + K_{P,i}^p}{\gamma \rho_{P,i} C_{p_{P,i}} \Delta y_P} + \frac{\sum_{j>i}^n \frac{(\dot{m}_{ev})_{P,j}^p}{A} (C_{p_v})_{P,i+1}^p}{\gamma \rho_{P,i} C_{p_{P,i}} \Delta y_P}$$

$$C_i = -\frac{K_{P,i}^p}{\gamma \rho_{P,i} C_{P,i} \Delta y_P^\gamma} - \frac{\sum_{j>i}^n \frac{(\dot{m}_{ev})_{P,j}^p}{A} (C_{P_v})_{P,i+1}^p}{\gamma \rho_{P,i} C_{P,i} \Delta y_P}$$

و برای لایه‌ی آخر:

$$a_n = \frac{K_{P,n-1}^p}{\gamma \rho_{P,n} C_{P,n} \Delta y_P^\gamma}, \quad d_n = 1 + \frac{K_{P,n-1}^p}{\gamma \rho_{P,n} C_{P,n} \Delta y_P^\gamma}$$

به‌منظور یافتن فاصله‌ی زمانی Δt و فاصله‌ی مکانی Δy_p مناسب که ایجاد ناپایداری نکند، عددهای مختلفی مورد امتحان قرار گرفتند. در بازه‌ی زمانی اعداد $0/01 - 0/1$ ثانیه و در بازه‌ی مکانی تعداد ۴ تا ۱۲ فاصله مورد امتحان قرار گرفت و در نهایت فاصله‌ی زمانی $0/01$ ثانیه و تعداد هشت فاصله‌ی مکانی در کاغذ پایه در نظر گرفته شد. در این شرایط در جواب‌ها پایداری مناسبی دیده می‌شد.

۵- آزمایش‌ها

۵-۱- شرح دستگاه

برای تأیید مدل، آزمایش‌ها در یک واحد اندودکننده که قابل مقایسه با واحدهای صنعتی است در دانشگاه م‌گ‌گیل^۱ انجام شد. شرایط دستگاه به‌گونه‌ای بود که زمان تأخیر در آن به $0/2$ ثانیه می‌رسید و زمان اعمال سوسپانسیون روی سطح کاغذ به کمتر $0/01$ ثانیه رسید. شرایط کنترلی از طریق سیستم مانیتورینگ انجام می‌شد.

۵-۲- ترکیب سوسپانسیون

به‌منظور ارزیابی نوع جامد سوسپانسیون کننده در کیفیت و سرعت خشک کردن کاغذ اندود-شده، دو سوسپانسیون با ترکی‌های مختلف (جدول ۱) مورد استفاده قرار گرفت. ویسکوزیته سوسپانسیون پوشش‌دهنده با استفاده از ویسکومتر چرخشی^۲ در دماهای مختلف اندازه‌گیری شد. هر دو سوسپانسیون رفتار سیال شبه‌پلاستیک را نشان دادند؛ با این تفاوت که در سوسپانسیون B تغییرات ویسکوزیته با دما، بیشتر است.

1- McGill

2- HAAKE Rotovisco

جدول ۱: ترکیب سوسپانسیون (بر حسب pph)

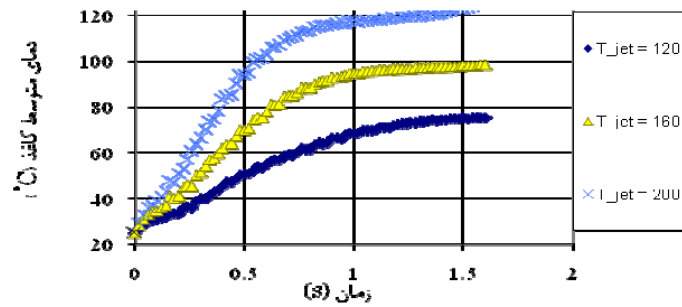
سوسپانسیون A		سوسپانسیون B	
اجزا	مقدار	اجزا	مقدار
خاک رس	۱۰۰	خاک رس	۱۰۰
نشاسته	۲	نشاسته	۱۰
کربوکسی متیل سلولز	۰/۸	کربوکسی متیل سلولز	۰/۸
درصد جامد	۶۰	درصد جامد	۶۰

۵-۳- انجام آزمایش

جهت بررسی ترکیب سوسپانسیون آندودکننده، از دو ترکیب استفاده شد. دو زمان تأخیر در محدوده عمل‌کرد صنعتی به کار برده شد. جهت بررسی شدت خشک‌کردن از سه دمای ۱۲۰، ۱۶۰ و ۲۰۰ سانتی‌گراد استفاده شد. سرعت سیال در مقایسه با شرایط صنعتی ۴۰ m/s انتخاب شد. مطالعات تجربی بر اساس ۱۲ ترکیب از این سه پارامتر انجام شد. برای هر یک از این پارامترها کاغذ آندودشده در دستگاه قرار گرفته و پس از فاصله‌های زمانی معین از دستگاه خارج شده، به مدت ۲۴ ساعت در داخل آون 105°C نگه داشته می‌شود و سپس وزن می‌شود. با انجام آزمایش‌های مقدماتی زمان خشک‌کردن کمتر از ۴ ثانیه تعیین شد. به همین خاطر برای هر ترکیب ۱۲ زمان مختلف مابین ۳/ تا ۳/۲ ثانیه انتخاب شد. بنابراین در کل تحقیق ۴۳۲ آزمایش انجام شد.

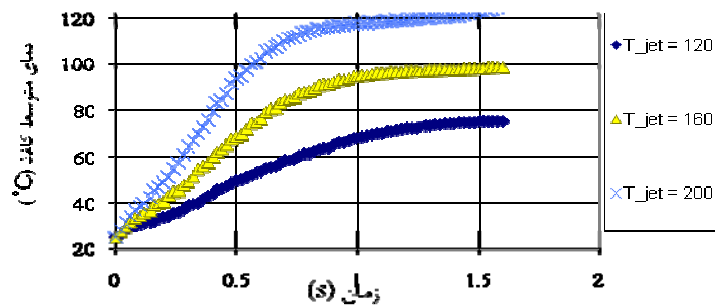
۶- بحث و نتایج

دمای اولیه کاغذ پایه 25°C ، ضریب تخلخل لایه آندودشده ۰/۲۶، ضخامت اولیه کاغذ $100\mu\text{m}$ و مقدار وزن به سطح کاغذ پایه 48 gr/m^2 در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج مدل‌سازی دمای لایه آندودشده و دمای متوسط کاغذ بر حسب زمان خشک‌کردن با هوای ۱۲۰، ۱۶۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است.

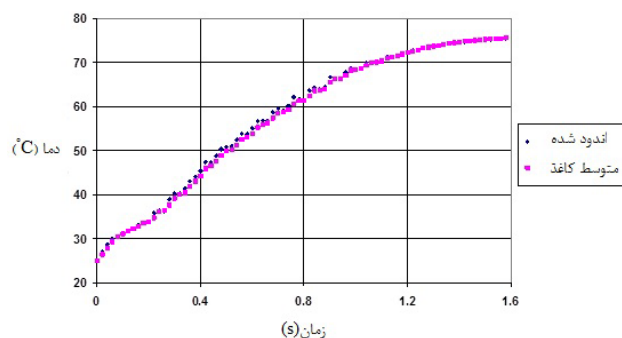


شکل ۴: دمای لایه اندودشده (سیال خشک کن هوا)

در شکل (۶) دمای لایه‌ی اندودشده و دمای متوسط کاغذ بر حسب تابعی از زمان برای شرایط خشک کردن با هوای 120°C آورده شده است. در همه حالات سرعت افزایش دما در ابتدا زیاد بوده، به تدریج کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن است که در ابتدا اختلاف دمای بین سطح کاغذ و سیال خشک کننده زیاد است و در ادامه با افزایش دمای سطح کاغذ و کاهش اختلاف دما، از سرعت افزایش دما کاسته می‌شود. با افزایش دمای سیال خشک کننده سرعت افزایش دما بیشتر شده، زمان خشک کردن کمتر می‌شود.

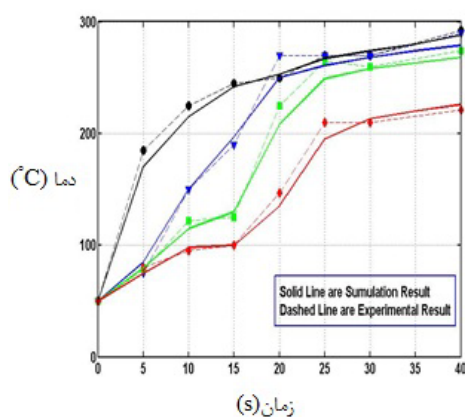


شکل ۵: دمای متوسط کاغذ (سیال خشک کن هوا)

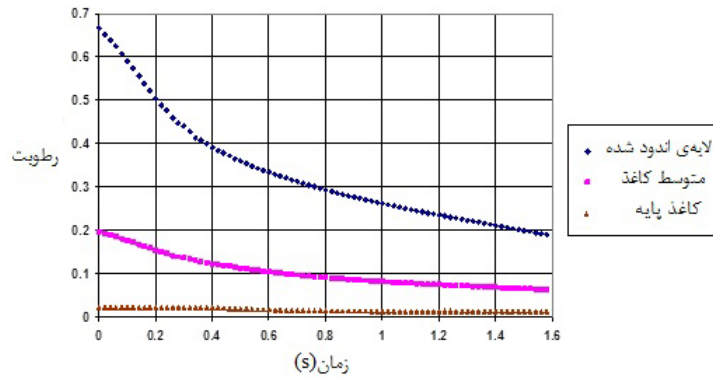


شکل ۶: دمای لایه‌ی اندودشده و دمای متوسط کاغذ بر حسب تابعی از زمان برای شرایط خشک‌کردن با هوای داغ 120°C

اندازه‌گیری دمای لایه‌های مختلف در حین آزمایش، مشکل است؛ زیرا ضخامت ترمیستورها بیشتر از کاغذ است و همچنین در صورت قرار گرفتن در کاغذ، در زمان اندود کردن، در اثر اعمال فشار تیغه، تخریب می‌شود. برای بررسی صحت مدل، کاغذ سه لایه‌ای با ضخامت کلی ۶۰۰ میکرومتر تهیه و بین لایه‌های ترمیستورهای ریز و مقاوم قرار داده شد. در شکل (۷) نتایج اندازه‌گیری دمای سه لایه با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه شده است [۱۵].

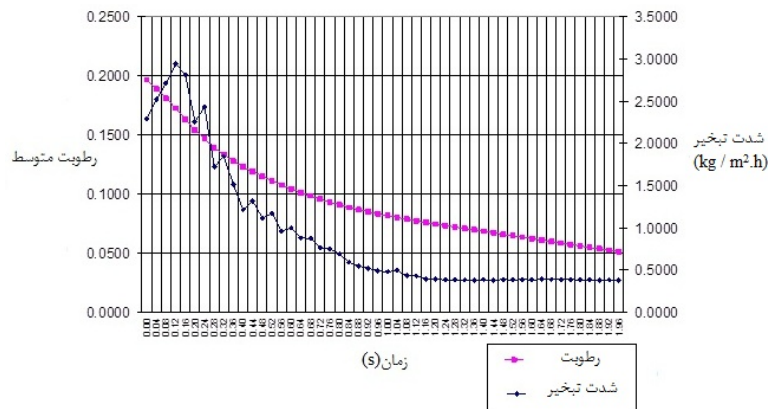


شکل ۷: مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی



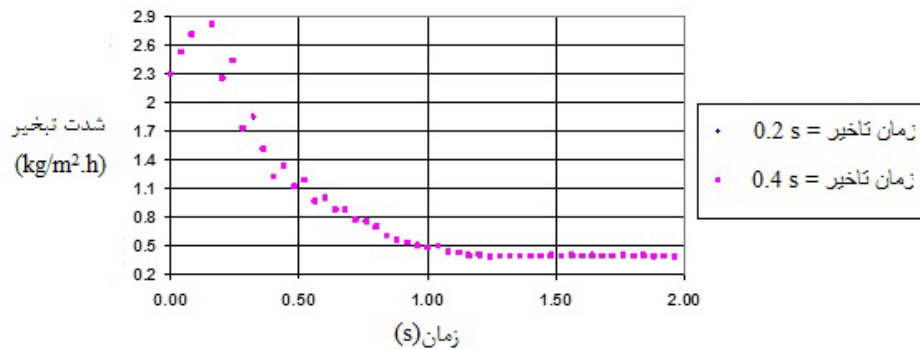
شکل ۸: رطوبت متوسط کاغذ، رطوبت لایه‌ی آندود شده و رطوبت متوسط کاغذ پایه بر حسب زمان.

در شکل (۸) رطوبت لایه آندود شده، رطوبت متوسط کاغذ و رطوبت متوسط کاغذ پایه در شرایط خشک کردن با هوای 120°C آورده شده است و در شکل (۹) رطوبت متوسط کاغذ و شدت تبخیر آورده شده است. سرعت کاهش رطوبت در لایه‌ی آندود شده زیاد است؛ زیرا هم با تبخیر و هم از طریق تخلیه مایع به کاغذ پایه، رطوبت خود را از دست می‌دهد. رطوبت متوسط کاغذ پایه در ابتدا به دلیل ورود رطوبت حاصل از تخلیه‌ی مایع، افزایش می‌یابد ولی پس از رسیدن لایه آندود شده به شرایط و ناپیوسته شدن فاز مایع، مقدار آن کاهش می‌یابد.



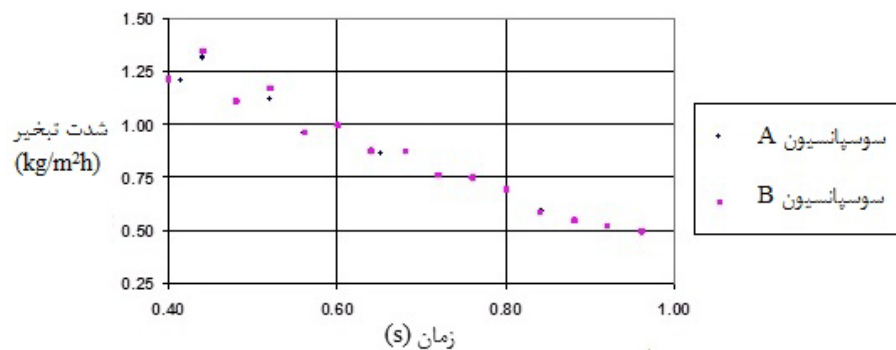
شکل ۹: رطوبت متوسط کاغذ و شدت تبخیر $\left(\frac{\dot{m}_{ev}}{A}\right)$

در شکل (۱۰)، سرعت کلی خشک‌شدن با هوای 120°C در دو زمان تأخیر 0.2 و 0.4 ثانیه بر اساس نتیجه‌های مدل و شبیه‌سازی باهم مقایسه شده‌اند. با افزایش زمان تأخیر، حجم بیشتری از مایع وارد کاغذ پایه می‌شود و در نتیجه جهت تبخیر این رطوبت احتیاج به دمای بالاتری است و ضمن این‌که رطوبت فرورفته فاصله مکانی بیشتری باید طی بکند تا به سطوح بیرونی برسد، پس زمان خشک‌کردن در این حالت بیشتر است.



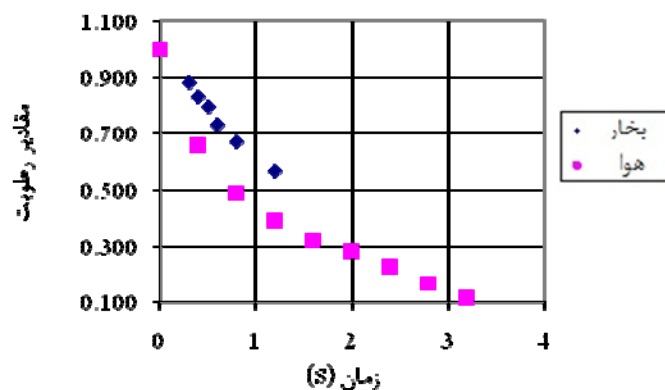
شکل ۱۰: مقایسه‌ی سرعت کلی خشک‌کردن با زمان تأخیرهای متفاوت

در شکل (۱۱)، سرعت کلی خشک‌کردن با هوای 120°C برای دو مخلوط آندودکننده A و B داده شده است. سرعت تخلیه مایع با ویسکوزیته بیشتر، کمتر بوده و مایع در لایه‌ی آندود شده باقی می‌ماند و در نتیجه سرعت خشک‌شدن آن بیشتر می‌شود.



شکل ۱۱: مقایسه‌ی سرعت کلی خشک‌کردن در مخلوط‌های آندودکننده A و B

در شکل (۱۲) رطوبت متوسط کاغذ اندودشده برای شرایط خشک‌شدن با هوای ۱۲۰°C با زمان تأخیر $۰/۲$ ثانیه و سرعت ۴۰m/s بر حسب زمان براساس نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی مقایسه شده است. تفاوت بین نتایج کمتر از ۱۰% است.



شکل ۱۲: مقادیر مختلف رطوبت در زمان‌های متفاوت در دمای ۱۲۰°C

مراجع

- [1] Kaisa, K., Pekka, R., Likka, H. and Antila, A. (2010). The effect of choice of utility systems on primary energy consumption-case: press and drying sections of a paper, *J. of Chem. Eng.*, **21**(4), 547-552.
- [2] Chang, H.H. and Yeong, K.Y. (2010). Dynamic modeling of the steam supply system for a paper drying cylinder, *Korean J. Chem. Eng.*, **27**(5), 1384-1390.
- [3] Chang, H.H., Hyunjun, C. and Yeong, K.Y. (2011). Dynamic modeling of paper drying processes. *Korean J. Chem. Eng.*, **28**(8), 1651-1657.
- [4] Lingbo, K., Huanbin, L., and Jigeng, L. (2011). Waste Integration of coating paper machine drying process, *J. of Drying Tech.* **29**(4), 442-450.
- [5] Petteri, P., Tuomas, S. and Jouko, N. (2013). On-site evaluation method for the nonstick properties of paper machine drying cylinder coating materials-A description of the methodology and two case studies, *Measurement*, **46**(3), 1061-1064.

- [6] Farkas, I., Lampinen, M.J. and Ojala, K. (1991). Water flow and binder migration during drying of coated paper, *Drying Technology*, **9**(4), 1019-1049.
- [7] Mihoubi, D. Zagrouba, F. and Vaxelire, J. (2004). Transfer phenomena during the drying of a shrinkable product: modeling and simulation, *J. of Drying Tech*, **22**(1 and 2), 91-109.
- [8] Heikkilae, P., and Norrdahl, P. (1990). Water absorption from pigment coating into Base Stock, *AIChE Annual Meeting*, Chicago.
- [9] Bernarda, P. and Bruneau, D. (1996). Modeling Binder Migration during drying of a paper coating, *Tappi*, **79**(9), 130-143.
- [10] Karlsson, M. (1984). On-line Study and Mathematical Modeling of a paper dryer section. Ph.D. thesis, Abo Akademi.
- [11] Rajala, P.M. and Karlsson, M.A. (1999). A Drying Model for coated paper, for improved printing properties, *Proceedings of the ASME Heat transfer division ASME HTD*, **317**(1 and 2), 445-450.
- [12] Nowicki, S.C. and Davis, H.T. (1991). Drying and binder migration in coated papers" *Tappi proceeding, coating conference*, 337-353.
- [13] Pan, S.X., Davis, H.T. and Scriven, L.E. (1996). Substrate effects on binder migration in drying porous coatings, *Tappi proceedings, coating conference*, 115-133.
- [14] Guttoff, E.B. (1999). Two- Sided drying of coatings on porous webs, *Drying Technology*, **17**(4 and 5), 691-709.
- [15] Guttoff, E.B. (1996). Modeling solvent drying of coated webs including the initial Transient, *Drying Technology*, **14**, (4 and 5), 1673-1693.
- [16] Kanzamar, N., Manfred, J.H., Tietz, M. and Helmer, K. (2004). An improved drying model for coated paper, *proceeding of the 14th International Drying Symposium*, Sao- Paulo Brazil, **B**, 1193-1200.
- [17] Mujumdar S. (2004). Research and development in drying: recent trends and future prospects. *J. of Drying Tech.*, **22**(1 and 2), 1-26.
- [18] Arpacı, V. (1966). Conduction heat transfer, Addison Wesley, Reading.
- [19] Hashemi, S.J, Roald, M. and Murray Douglas, W.J. (2003). Mechanism of through air drying of paper application in hybrid drying, *Drying Technology*, **21**, 349-368.

- [20] Martin, H. (1977). Heat and Mass Transfer between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces, in J.P. Hartnet and T.F. Irvine, Jr., Eds., *Advances in Heat transfer*, **13**, Academic Press, New York.
- [21] Engstrom, G. and Rigdahl, M. (1986). In-Situ studies of water Drainage from wet coating layers, *Tappi*, **69**(1), 86-89.
- [22] Toei, R. (1983). Drying Mechanism of Capillary Porous Bodies, in *Advances in Drying*, **2**, Hemisphere publishing, 269–297.
- [23] Masamune, S. and Smith, J. (1962). Pore Diffusion in Silver Catalyst, *AIChE. Journal*, **8**(2), 217 – 221.
- [24] Garey, C., Leekley, R. and Hultman, J. (1975). Effect of mixed-binder systems on the film volume and pore-size distribution of isolated clay coatings, *Tappi*, **58**(5), 79 – 82.

Simulation of Coated Paper Drying and Presentation of Its Experimental Model

Hossein Shahbeig and Ahmad HallajiSani

School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

In this study, a simulation model, which integrates the mechanism of heat and mass transfer in drying of the coated paper, is presented. In the simulation model, the paper divided into three layers: coated paper, wet base paper and dry base paper, where each thickness of layer is depend on drying conditions and time. The effects of fluid temperature, fluid type, time delay and the suspension, were studied. Two types of fluid (air and superheat steam) in 120° C, 160° C, 200° C were used. The delay time of 0.2 and 0.4 second were considered in accordance with industry requirements. In addition, two types of suspension with different viscosity were used. Coated paper, divided into eight parts, and the equation of mass balance and energy balance for all layers are written and they are solved for each layer, the temperature and humidity of each layer were calculated based on the time. To evaluate the simulation results, the experimental results were in good conformity with the simulation results.

Keywords: Paper, Modeling, Drying, Superheated steam, Capillary force.

Mathematics Subject Classification (2010): 93A30, 65C20.