سامانه نوین خنک‌سازی قلب راکتورهای پرتابل به کمک مبدل گرمایی یخ‌خشک

پرویز پروین[۱]، مریم ایلچی قزاانی[۲]، کامران سپانلو[۳]، فروغ حیدریان[۴]

چکیده: عمدتاً سازوکار برداشت پسماند گرمایی (RHR: Residual heat removal) به هنگام خاموشی سریع راکتور (Shutdown) در زمان حادثه یا در شرایط طبیعی کار راکتور برای بارگذاری مجدد سوخت یا سرویس‌های دوره‌ای از وظایف ECCS (Emergency core cooling system) به شمار می‌آید. در این مقاله، روش نوینی به منظور خنک‌سازی مؤثر قلب راکتورهای پرتابل در سامانه ECCS ارائه شده است که بر پایه تبادل گرمایی میان حمام کرایوژن و خنک‌کننده داغ عمل می‌کند. ترکیب بهینه اتیلن گلیکول و پودر یخ خشک (دی اکسید کربن جامد)، حمام دما پایین تعادلی را ایجاد می‌کند که قادر است در مدت زمان کوتاهی آب داغ را تا دمای دلخواه پایین آورده و پایدار نماید. این زمان به پارامترهایی از جمله نسبت حجمی سیال خنک‌شونده به محلول خنک‌کننده (V_R)، دمای اولیه سیال داغ، دبی سیال خنک‌کننده و مقدار و نحوه بارگذاری بستگی دارد.

واژه های کلیدی: یخ خشک، اتیلن گلیکول، مبدل حرارتی، راکتور پرتابل.

۱- مقدمه

در یک نیروگاه هسته‌ای PWR (Pressurized-water reactor)، فرآیند شکافت در قلب راکتور درون میله‌های سوخت واقع در دیگ فشار (RPV: Reactor pressure vessel)، عامل تولید انرژی گرمایی است. گرمای تولید شده توسط فرآیندهای رسانش و همرفت به آب اطراف قلب راکتور منتقل می‌شود که در یک مسیر بسته در مدار اول جریان داشته و به مولدهای بخار پمپ می‌شود. مولد بخار یک مبدل حرارتی است که آب تحت فشار (2250 Psia) مدار اول با دمای ۳۲۵°C درون لوله‌های U شکل فولادی آن جریان دارد و انرژی گرمایی را به خنک‌کننده در مدار دوم انتقال می‌دهد. آب مدار دوم در یک چرخه کاملاً مجزا در فشار اتمسفر با گردش در اطراف این لوله‌ها، ضمن برداشت حرارت جوش آمده و بخار داغ با دمای ۲۷۰°C تشکیل می‌شود. بخار داغ تولید شده توربین را به حرکت درمی‌آورد. چرخش توربین، ژنراتور نیروگاه را به کار انداخته و منجر به تولید انرژی الکتریکی و تأمین گرمای مورد نیاز برای فرآیندهای صنعتی، نمک زدایی (شیرین سازی) آب دریا و تأمین حرارت منطقه‌ای در شهرها می‌گردد. بخار خروجی از توربین توسط پمپ‌های سیرکولاسیون در سومین مدار به برج‌های خنک کننده (کندانسور) هدایت شده و پس از برداشت گرما به هوا، رودخانه‌ها و آب دریاها وارد می‌شود. بدترین شرایط بحرانی راکتور شامل حوادثی نظیر حالت فقدان سیستم خنک‌کننده (LOCA) در TMI در آمریکا و گردش قدرت در حادثه چرنوبیل است. با افزایش دمای قلب راکتور یا بروز احتمالی حادثه، سیستم‌های چهارکاناله کنترل ایمنی وظیفه خاموش کردن راکتور و برداشت انرژی گرمایی پسماند قلب

۱) استاد، دانشکده مهندسی هسته‌ای و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر. آدرس پست الکترونیک:parvin@aut.ac.ir

۲) کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی هسته‌ای و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر. آدرس پست الکترونیک:m_ilchi@aut.ac.ir

۳) استاد، نظام ایمنی هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران. آدرس پست الکترونیک:ksepanloo@aeoi.org.ir

۴) کارشناسی ارشد، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز. پست الکترونیک:heydarian.foroogh@gmail.com

Archive of SID

www.SID.ir

راکتور را به عهده دارند تا ایمنی راکتور به سطح مورد نظر رسانده شود. در این حالت سیستم خنک‌کننده اصلی از مبدل گرمایی جدا شده و سیستم خنک کننده اضطراری موسوم به ECCS گرمای اضافی قلب هسته راکتور را خارج می‌سازد. در این شرایط، حوادثی چون زلزله و قطع لوله‌ها همواره ما را با مشکل کمبود خنک‌کننده مواجه می‌سازد. در این مقاله به ارائه طراحی نوینی از یک مبدل حرارتی به منظور خنک سازی آب اطراف هسته راکتورهای آب سبک تحت فشار موسوم به راکتورهای PWR در شرایط ECC پرداخته می‌شود. ضمناً در راکتورهای قدرت با توان کمتر و متحرک قابل نصب بر کشتی یا ناو، ضرورتاً به سیستم‌های فشرده و پر راندمان خنک‌ساز مدار آب ثانویه نیاز است که روش حاضر بر پایه مبدل گرمایی یخ‌خشک می‌تواند بعنوان یک گزینه مناسب درنظر گرفته شود. سیستم‌های کناری (Backup auxiliary system) به هنگام عملکرد غیرطبیعی نیروگاه شامل خنک‌ساز مجرای قلب راکتور (RCIC)، سیستم کنترل مایع، سیستم جانشین (Standby) و عملگر خنک‌ساز استخر آب (RHR) می‌باشند که کلاً بنام سیستم‌های اضطراری خنک کننده قلب راکتور موسومند و بعنوان سیستم‌های ایمنی برای برآورد فرضیات مختلف و سناریوهای متفاوت حادثه طراحی و ساخته شده‌اند. در غیر اینصورت یا در صورت عمل نکردن ECCS به هنگام حادثه، بدترین وقایع تخریب و ذوب قلب راکتور و بدنبال آن رها شدن تولیدات شکافت و مواد رادیواکتیو به محیط را روی خواهند داد. سیستم ECCS شامل تزریق خنک‌ساز فشار پایین در سیستم برداشت پسماند گرمایی و سیستم‌های اسپری قلب در فشار پایین و بالای قلب و همچنین سیستم ضد فشار اتوماتیک است. در اساس، سیستم RCIC بطور اتوماتیک عمل می‌کند تا شرایط ایمنی در سیستم مدار اول ایزوله را فراهم کند. آب از طریق تانک ذخیره و نیز بخار میعان شده در مبدل RHR یا از طریق استخر آب اضطراری تأمین می‌شود. توربین با بخشی از گرمای بخار RPV در حال خاموشی بکار خود ادامه می‌دهد و آب میعان شده مجدداً در استخر وارد می‌شود.

نقش اصلی ECCS حفاظت از حفاظ سوخت است و در حالیکه حادثه شکست لوله مدار اصلی روی داده باشد، از تخریب سوخت بدلیل دمای بالا جلوگیری می‌کند. هدف اسپری قلب فشار بالا (HPCS)، کاهش فشار سیستم بویلر و فراهم کردن آب در حالت فقدان سیستم خنک‌کننده (LOCA) و جلوگیری از تخریب حفاظ سوخت با پاشش آب در منطقه ضایعه دیده ساختار میله‌های سوخت است [۱]. هدف اسپری قلب فشار پایین (LPCS) جلوگیری از تخریب حفاظ سوخت در زمانیست که قلب راکتور بر اثر حادثه، پوشش خود را از دست می‌دهد و RPV به فشار اتمسفر می‌رسد. در هنگامیکه فشار RPV کاهش می‌یابد، دیگر ECCS نمی‌تواند سطح آب لازم در قلب راکتور را تأمین کند.

با کاهش فشار، نرخ جریان آب افزایش می‌یابد و برای اطمینان بیشتر در هنگام قطع برق و نیز سیستم ایمنی از دیزل ژنراتور بهره می‌گیرد. کاربردهای RHR شامل محافظت از حفاظ سوخت و جلوگیری از خردسازی، کنترل دمای استخر اضطراری، برداشت گرمای اضافی و گرمای محسوس از راکتور به هنگام خاموشی برای بارگذاری سوخت و سرویس‌های منظم یا به هنگام حادثه و میعان‌سازی بخار راکتور به منظور برداشت گرمای اضافی در زمان عمل نکردن کندانسورهای اصلی می‌باشد.

در این مقاله یک سیستم سرمایشی که بر پایه تبادل حرارتی میان حمام تبریدی (cryogen bath) و خنک‌کننده (آب) عمل می‌کند، ارائه شده است که شامل ترکیبی بهینه از اتیلن گلیکول و پودر یخ خشک [۲] بوده و قادر به خنک‌سازی سریع بدون نیاز به مصرف الکتریسیته برای مدت زمان‌های طولانی می‌باشد که برای استفاده در سیستم ECC پیشنهاد می‌گردد.

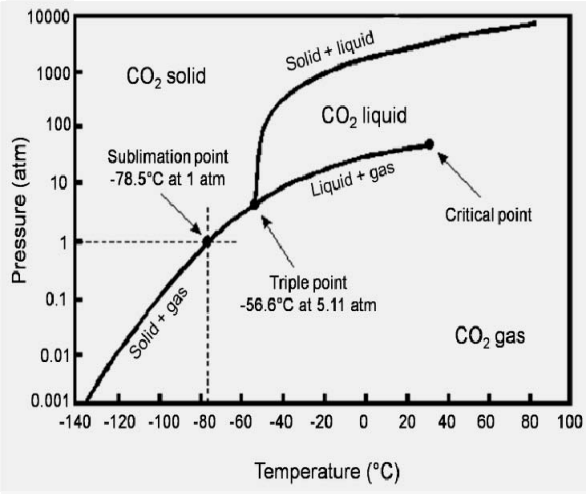
Archive of SID

www.SID.ir

۲. آرایه تجربی

چیلر یخ خشک [۲] بعنوان سرد کننده سریع سیالات داغ مبتنی بر ساز و کار تبرید از طریق افزودن مقدار معینی یخ‌خشک در محلول اتیلن گلیکول ($C_2H_6O_2$) موسوم به ضدیخ طراحی و ساخته شده که قادر است بدون استفاده از سیستم‌های تبریدی متداول و بدون مصرف برق شهری، عملکرد تبریدی با دبی خروجی (lit/min)۳/۲ در دمای ۱°C را فراهم نماید. مزیت بکارگیری ضدیخ به عنوان سیستم تبرید، شامل پایین بودن دمای نقطه انجماد، پایداری در دما و فشار محیط، بالا بودن گرمای نهان و سازگاری در ترکیب با یخ‌خشک می‌باشد.

مولکول دی اکسید کربن (CO_2) از تشکیل پیوند دوگانه میان یک اتم کربن و دو اتم اکسیژن در یک ساختار خطی بوجود می‌آید. سادگی ساختار و غیر قطبی بودن این مولکول سبب شده تا در دمای معمولی به شکل گازی بی‌رنگ با بوی کمی تند درآید. این گاز در فشار اتمسفر با دمای ۷۸/۵°C- متراکم شده و جسم جامد سفید رنگی (برف کربنیک) تشکیل می‌شود که در دما و فشار محیط به سرعت تصعید می‌گردد.



شکل ۱. دیاگرام فازی CO_2 [۴].

از آنجا که برف کربنیک در عمل تصعید از فاز مایع عبور نمی‌کند، آن را اصطلاحاً یخ‌خشک می‌نامند [۴]. دمای پایین و قدرت سرمازایی بالای یخ‌خشک، آن را به ماده‌ای مناسب برای بسیاری از مصارف برودتی تبدیل نموده است.

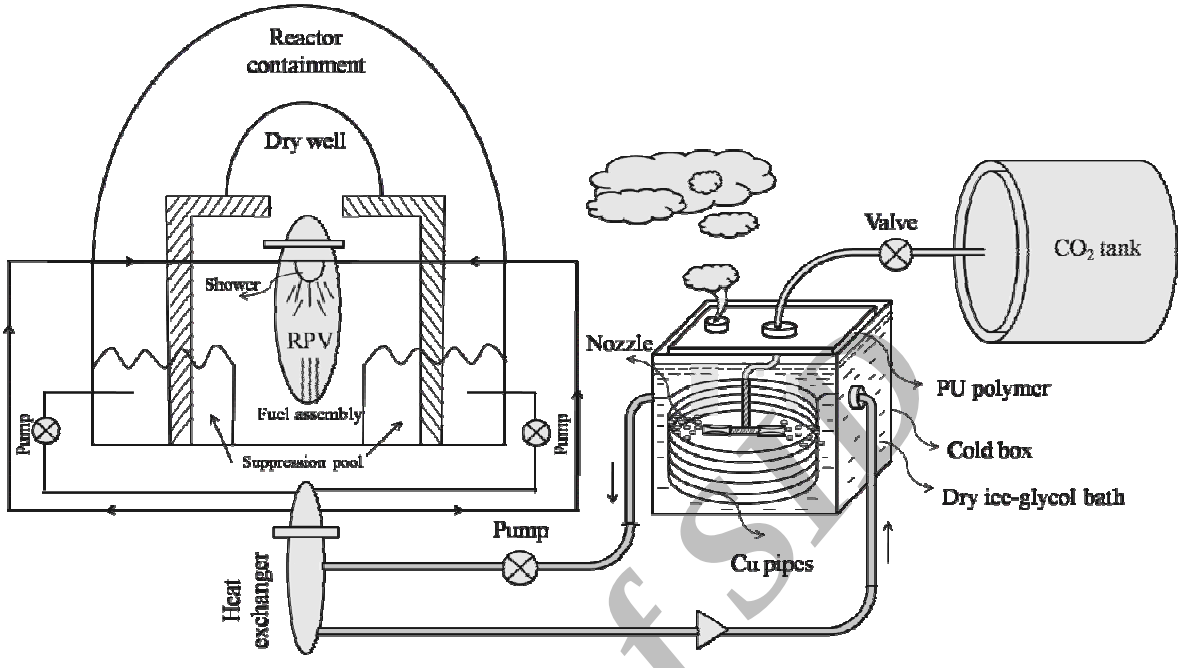
چیلر یخ‌خشک شامل جعبه‌ای با عایق‌بندی پلی‌اورتان به ابعاد $۸۰^{cm}\times۴۵^{cm}\times۴۵^{cm}$ و حجم تقریبی ۱۶۰ لیتر از جنس استیل SS-316 با لوله گذاری به شکل مارپیچ به قطر ۰/۵ اینچ و طول ۴۰ متر با جنس مس (Cu) می‌باشد (شکل ۲). در این شبیه‌سازی بجای آب داغ راکتور از یک مخزن آب استفاده نمودیم. چرخش آب توسط یک پمپ کوچک سیرکولاسیون در یک چرخه بسته صورت می‌پذیرد که در نتیجه‌ی تبادل حرارتی با مبرد امکان خنک‌سازی سریع را ایجاد می‌نماید.

از آنجایی که آدیاباتیک نبودن مخزن حاوی مبرد سرعت تصعید یخ خشک را افزایش می‌دهد، لذا لازم است تا کل مجموعه از نظر حرارتی با الیاف پلی‌اورتان عایق بندی شود تا تماس با محیط خارج کمتر شده و راندمان سیستم افزایش یابد. از سوی دیگر، با تصعید یخ خشک فشار داخلی سیستم افزایش می‌یابد. لذا، پس از عایق کاری به ناچار از یک سیستم کنترل آزاد کننده فشار (سوپاپ اطمینان) در بالای محفظه استفاده کردیم تا با خروج گازهای CO_2 تولید شده، فشار سیستم در ۱atm ثابت بماند. در روی محفظه، جایگاه دیگری به منظور تزریق مستقیم مایع CO_2 به درون گلیکول تعبیه شده است.

در این سیستم، مایع CO_2 در دمای ۲۵°C- و فشار bar ۲۰-۱۶ مستقیماً از تانک خارج شده و از طریق شیرآلات دما پایین ویژه کرایوجنیک پس از عبور از شیپوره (نازل) به شدت سرد می‌شود. از آنجا که مایع CO_2 در دمای معمولی (۲۷-۲۳°C) در فشارهای کمتر از bar ۶ به حالت جامد درمی‌آید (شکل ۱)، لذا زمانیکه این مایع از طریق نازل به اتمسفر محیط پاشیده شود، به صورت پودر درمی‌آید. پودر یخ خشک با راندمان بالا و سطح مقطع بزرگ، عمل تبرید را بسرعت انجام می‌دهد.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۲. شماتیک بخشی از سیستم ECCS نیروگاه هسته‌ای PWR شامل سیستم برداشت پسماند گرمایی (RHR) و عملکرد تزریق خنک‌ساز فشار پایین به همراه چیلر یخ‌خشک با تزریق مستقیم مایع CO_2 و شیپوره.

در این مقاله، به منظور سهولت کار، سیستم دیگری طراحی و ساخته شده که در آن تجهیزات پیچیده شامل تانک CO_2 و نازل حذف و به جای آن از تزریق دستی قالب‌های یخ‌خشک بهره گرفته می‌شود. در این حالت نیز تبادل حرارتی در چیلر مشابه روش اول است.

۳. روش کار

ابتدا ۶۶ لیتر ضدیخ را در محفظه ریخته و بطور ثابت مقادیر معینی یخ‌خشک را به درون آن اضافه می‌کنیم. حمام یخ‌خشک-اتیلن گلیکول، ابتدا موجب ایجاد ژل سرد شده و سپس در دماهای پایین‌تر بصورت یک مایع جوشان درمی‌آید. تا زمانی‌که تبادل حرارتی بین یخ‌خشک و ضدیخ ادامه دارد، چنین قلیانی وجود خواهد داشت. دمای این ترکیب از ۳۰۰K تا $-20^{\circ}C$ متغیر است [۵] که به میزان یخ خشک ورودی بستگی دارد. تصعید یخ خشک سبب ایجاد مه غلیظی در اطراف محفظه می‌شود که تا اتمام کامل یخ ادامه خواهد یافت. از سوی دیگر، آب سرد در حلقه خنک‌سازی به تدریج گرمای خود را به ژل داده و خنک می‌شود.

در طول فرآیند دماهای مبرد و سیال در نقاط مختلف داخل و خارج مخزن و نیز دمای محیط کار توسط چند ترموکوپل دیجیتالی اندازه‌گیری می‌شود.

آزمایشات در طرحواره closed loop با بارگذاری‌های مختلف یخ، نسبت‌های حجمی متفاوت آب/ضدیخ با دماهای اولیه مختلف آب تکرار شد. در این طرحواره، آب در یک سیکل بسته در سیستم چرخش دارد. لذا دمای آب ورودی به سیستم دائماً در حال تغییر است. دمای محیط در طول آزمایش در حدود $23^{\circ}C$ ثابت نگه داشته شده است.

۴. نتایج

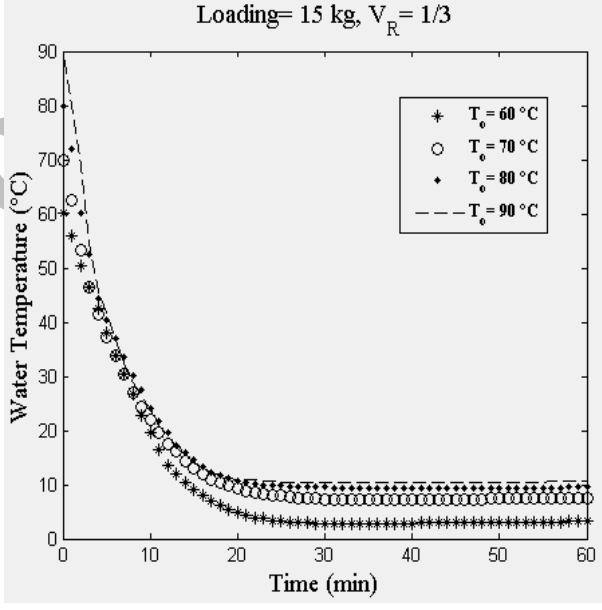
نخست، قابلیت سیستم برای کاربردهایی که دمای اولیه آب (T_0) تا نزدیکی دمای جوش در فشار اتمسفر

Archive of SID

www.SID.ir

بالا می‌رود، مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمایشات برای دماهای اولیه متفاوت در بارگذاری ۱۵ kg و نسبت حجمی۱/۳ در مدت زمان ۱ ساعت تکرار شدند (شکل ۳).

در تمامی حالات، دمای محیط و دمای اولیه ضدیخ بطور یکسان ۲۳°C بوده و از تغییرات گرمایی ناچیز ناشی از کارکرد پمپ سیرکولاسیون در آب صرفنظر شده است. بلافاصله بعد از افزودن یخ‌خشک به سیستم، افت شدید در دمای آب رخ خواهد داد که تا زمان به اتمام رسیدن یخ در محلول ادامه می‌یابد. افت سریع دما تا ۲۰ دقیقه اول ادامه یافته و سپس فرآیند افزایش آرام دما، ساعت‌ها به طول می‌انجامد.

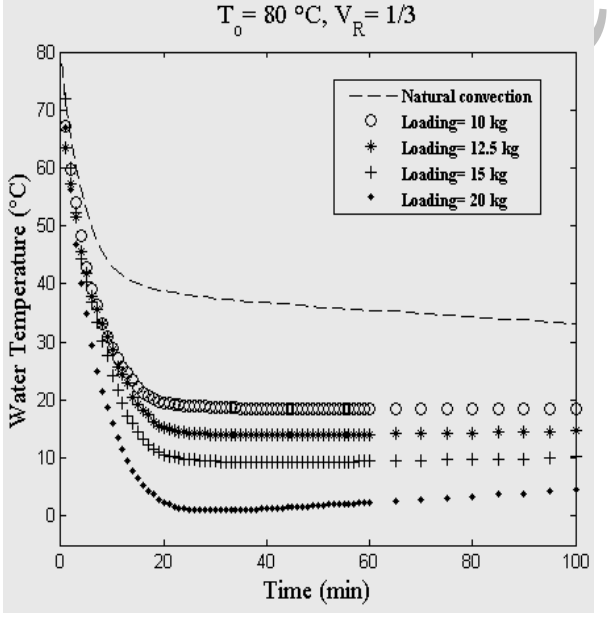


شکل ۳. تغییرات زمانی افت دمای آب در VR=1/3 و بارگذاری ۱۵ kg در مدت مشاهده ۱ ساعت.

کمینه دمای آب (T_{min}) با دماهای اولیه ۶۰°C، ۷۰°C، ۸۰°C و ۹۰°C در بارگذاری ۱۵ kg و نسبت حجمی ۱/۳، بترتیب در دماهای ۲/۸°C، ۶/۲°C، ۹/۱°C و ۱۰/۹°C رخ می‌دهد. با افزایش خطی دمای اولیه سیال، نرخ افت دما بترتیب برابر ۴/۴°C/min، ۴/۸°C/min، ۵/۶°C/min و ۶/۶°C/min است که بصورت غیرخطی افزایش می‌یابد. توجیه رفتار غیرخطی ناشی از طبیعت پیچیده حمام یخ‌خشک- اتیلن گلیکول می‌باشد. هرچه دمای اولیه آب بیشتر باشد، نرخ افت دما بیشتر بوده و زمان رسیدن به کمینه دما کوتاهتر است. حال آنکه این کمینه در دمای بزرگتری رخ می‌دهد.

از سوی دیگر، نرخ رشد دما با افزایش T_0 رفتاری کاهشی داشته و بترتیب برابر ۲۲m°C/min، ۲۰m°C/min، ۱۸m°C/min و ۱۶m°C/min خواهد بود. کندی نرخ افزایش دما ناشی از بالا بودن گرمای نهان محلول اتیلن گلیکول و بزرگ بودن نسبت حجمی محلول به آب (۳ برابر) می‌باشد. نکته جالب اینکه، نرخ رشد دما نسبت به نرخ افت آن در یک بارگذاری و نسبت حجمی معین، بسیار کوچک است. این مطلب ویژگی برجسته خنک‌سازی سریع و پایداری زمانی دما در این چیلر را تداعی می‌نماید.

بعلاوه، توان خنک‌سازی سیستم برای سیال آب با دمای اولیه ۸۰°C در حضور بارگذاری و شرایط بدون بارگذاری مورد مقایسه قرار گرفته است (شکل ۴).



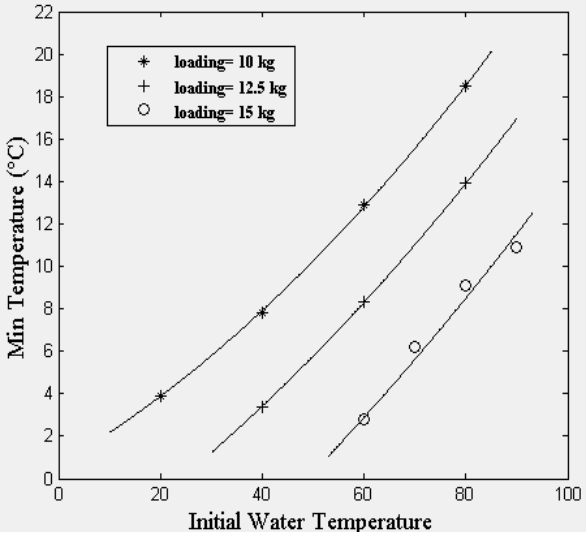
شکل ۴. تغییرات زمانی افت دمای آب در بارگذاری‌های متفاوت در مقایسه با شرایط بدون بارگذاری.

با بکارگیری ۱۰kg، ۱۲/۵kg، ۱۵kg و ۲۰kg یخ‌خشک در چیلر می‌توان بترتیب ظرف مدت ۱۴، ۱۳، ۱۱ و ۸ دقیقه آب داغ در دمای ۸۰°C را به دمای

www.SID.ir

محیط ($23^{\circ}C$) رساند. حال آنکه فروافت خودبخودی دما ساعت‌ها به طول می‌انجامد. این نتیجه، کاربرد ویژه و منحصر به فرد سیستم در شرایط خنک‌سازی سریع و ارزان سیالات داغ مانند آب و روغن را در صنعت توجیه می‌نماید.

شکل (۵) قدرت خنک سازی چیلر در دماهای اولیه متفاوت آب برای نسبت حجمی ۱/۳ نشان داده شده است. آزمایشات در حجم ثابت آب (۲۲ لیتر) برای بارگذاری‌های مختلف ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵kg تکرار شد.



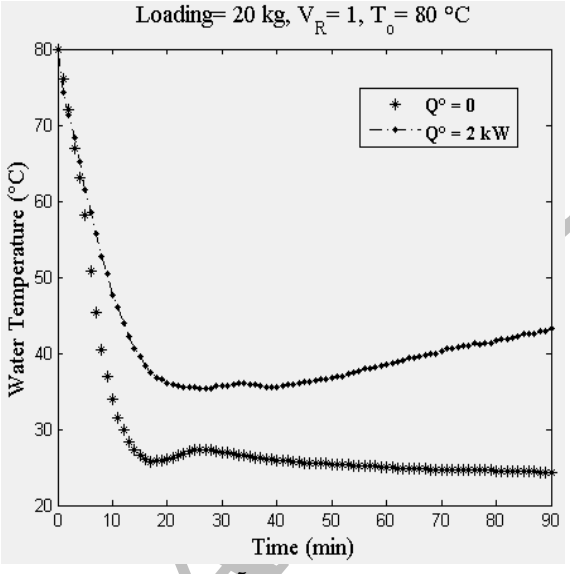
شکل۵: کمینه دمای ماده مبرد با دماهای اولیه متفاوت در نسبت حجمی ثابت ۱/۳ وبارگذاری متغیر ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵kg.

می‌بایست مقدار بارگذاری در دماهای اولیه مختلف به‌گونه‌ای باشد تا آب در لوله چرخش به نقطه انجماد نرسد. با برون‌یابی نقاط در شکل، مقدار حدی آستانه انجماد آب در بارگذاری‌های ۱۲/۵ kg و ۱۵ kg به ترتیب در دماهای اولیه ۳۰ °C و ۵۰ °C رخ خواهد داد. لذا شکل (۵) شرایط بهینه برای تأمین و حفظ دمای دلخواه را برحسب میزان بارگذاری نشان می‌دهد.

در یک نیروگاه هسته‌ای، هسته راکتور به صورت یک منبع حرارتی عمل می‌کند که با انتقال انرژی گرمایی، بتدریج دمای سیال پیرامون خود را گرم و گرمتر می‌نماید. لذا مدل پیشنهاد شده بدون درنظر گرفتن منبع حرارتی $\dot{Q}$ کامل نیست.

بدین منظور، یک مدل تجربی کامل‌تر با سیال خنک شونده در دمای اولیه ۸۰ °C و فشار اتمسفر پیشنهاد می‌شود. با این تفاوت که در مراحل قبلی انرژی گرمایی $\dot{Q}$ به سیال داده نمی‌شد، حال آنکه در این مرحله $\dot{Q}$ ثابت و برابر ۲ kW است که به طور پیوسته از یک هیتر الکتریکی با جریان ۹/۲ آمپر و ولتاژ ۲۲۰ ولت تأمین می‌شود.

این چرخه در نسبت حجمی برابر (V_R=1) برای بارگذاری ۲۰ kg اجرا شد و نتایج آن با حالت $\dot{Q} = 0$ مورد مقایسه قرار گرفت (شکل ۶). حضور هیتر در سیستم، کمینه دمای آب را تا ۱۰°C بالا برده و تغییر چشمگیری در نرخ فروافت دما (۳/۷ °C/min) در مقایسه با حالت $\dot{Q} = 0$ (۴/۶ °C/min) ایجاد می‌کند.

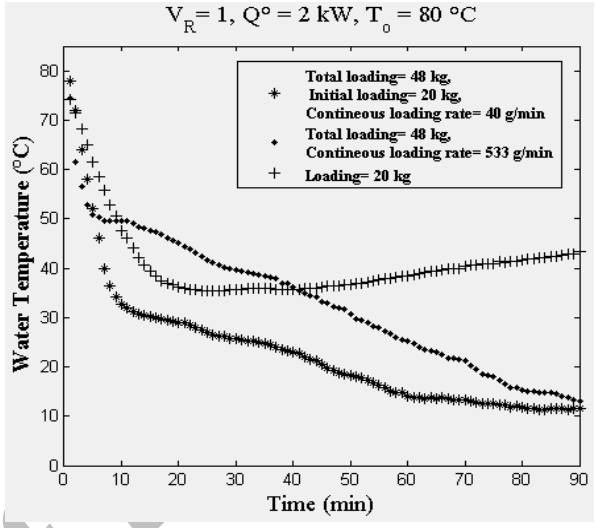


شکل ۶. تغییرات زمانی دمای آب بدون حضور منبع گرمایی در مقایسه با حضور منبع گرمایی ثابت.

با گذشت زمان، دمای آب در شرایط $\dot{Q} = 0$ به کمینه مقدار خود در بارگذاری ثابت ۲۰ kg می‌رسد. اما از آنجا که این نقطه کمینه از دمای محیط ($23^{\circ}C$) بیشتر است، پس از مدتی دمای آب به جای افزایش در تبادل با محیط بصورت فروافت خودبخودی کاهش می‌یابد. حال آنکه نرخ رشد دما در حالت $\dot{Q}$ ثابت به ۰/۱۶ °C/min می‌رسد. به نظر می‌رسد که نتایج

www.SID.ir

آزمون در شرایط بارگذاری ثابت در حضور $\dot{Q}$ مورد رضایت نیست و پایداری زمانی حالت‌های قبلی مشاهده نمی‌شود.



شکل ۷. منحنی تغییرات زمانی دمای آب با دمای اولیه ۸۰°C در حالت بارگذاری پیوسته در V_R=1.

بنابراین، بایستی طراحی‌های جدیدتری در سیستم لحاظ کرد. بدین منظور از شیوه بارگذاری پیوسته استفاده می‌کنیم. بدین ترتیب که یخ‌خشک با نرخ زمانی ثابت در مدت زمان آزمایش که در حدود ۹۰ دقیقه درنظر گرفته شده، به دو شیوه به درون محلول گلیکول افزوده می‌شود:

الف) نخست بلافاصله پس از شروع آزمایش، بارگذاری اولیه ثابت ۲۰kg در حضور هیتر صورت گرفته و پس از سپری شدن ۲۰ دقیقه که مدت زمان لازم به منظور کمینه شدن دمای آب است، بلوک‌های یخ‌خشک با آهنگ (g/min)۴۰ به‌طور پیوسته تا پایان مدت زمان آزمایش به سیستم افزوده می‌شود.

ب) در این آرایش از لحظه راه اندازی سیستم در ابتدای آزمایش، یخ با نرخ ثابت (g/min)۵۳۳ در مدت ۹۰ دقیقه در حضور هیتر در مخزن آب، به مبرد ضدیخ افزوده می‌شود. نرخ g/min ۵۳۳ معادل افزایش یک بلوک یخ‌خشک (۸۰۰g) در ۱/۵ دقیقه است که توسط دستگاه تولید یخ‌خشک ساخت شرکت Messer آلمان آماده‌سازی می‌شود.

بدین ترتیب، مقدار کل بارگذاری در هر دو حالت برابر kg ۴۸ خواهد بود. با ملاحظه نتایج (شکل ۷) در شرایط بارگذاری یکسان درمی‌یابیم که تنها مقدار بارگذاری برای رسیدن به شرایط دلخواه کافی نیست. بلکه نحوه بارگذاری نیز از جمله فاکتورهای درخور توجه است که بهینه شرایط سیستم را تعیین می‌نماید. در شرایطی که با بارگذاری اولیه ثابت یک شوک حرارتی در سیستم ایجاد شود، کمینه دمای آب نیز کوچکتر خواهد بود.

۵. نتیجه گیری

در این مقاله، بهره‌گیری از روش خنک‌سازی سریع با بکارگیری مبدل حرارتی یخ‌خشک در راکتورهای پرتابل هسته‌ای پیشنهاد می‌گردد. از جمله مزایای این طرح می‌توان به قابلیت خنک‌سازی سریع با راندمان بالا، بی‌نیازی به تأمین انرژی الکتریکی، پایداری فوق العاده بالای دمای سیال در طول زمان، حذف تجهیزات جانبی شامل سیستم آب افشان (برج خنک‌کننده) در سیستم‌های متداول و سهولت و سادگی سیستم اشاره کرد. این سیستم خنک‌ساز نوین بویژه برای خنک‌سازی مدار دوم در راکتورهای قدرت پرتابل با توان ۱۰۰kW و نیز سیستم‌های ایمنی برداشت گرما در راکتورهای نیروگاه‌های PWR پیشنهاد می‌شود.

مراجع

[1] Lamarsh J. R., *Introduction to Nuclear Engineering*, Addison-Wesley Publishing Company, 1983, ISBN 0-201-14200-7.

[2] Parvin P., Jaleh B., Shaban-Jahanian F., *Dry Ice Chiller*, Registration No. 52992, Patent date; 1387/6/31.

[3] Parvin P., Ilchi-Ghazaani M., Shaban-Jahanian F., Jaleh B., *Dry Ice Chiller for Fluid Fast Cooling*, U.S. Patent provisional submission No. 61287890 filed in 18 Dec 2009.

Archive of SID

www.SID.ir

[4] Shakhashiri B. Z., *Carbon Dioxide, CO_2*, http://scifun.chem.wisc.edu/chemweek/PDF/Carbon Dioxide. pdf, 2008.

[5] Lee D. W., Jensen C. M., *Dry-Ice Bath Based on Ethylene Glycol Mixtures*, Journal of Chemical Education, vol. 77, No. 5, May 2000.

Archive of SID

www.SID.ir