

توسعه چرخه‌های تبرید تراکمی ساده با استفاده از مبردهای هیدروکربنی سازگار با محیط‌زیست

مصطفی مافی^۱، مرتضی شمالی^۲

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، m.mafi@eng.ikiu.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، mshomali47@gmail.com

چکیده

در دهه اخیر، مسائل زیست محیطی مرتبط با گازهای گلخانه‌ای و تخریب لایه‌ی ازن سبب شده است تا تلاش‌های گسترده‌ای به منظور یافتن جایگزین‌های مناسب برای مبردهای مصنوعی فعلی صورت پذیرد. امروزه، مبردهای طبیعی به علت سازگار بودن با محیط زیست، مورد توجه محققین قرار گرفته است. در میان مواد طبیعی موجود، هیدروکربن‌ها به علت فراوانی، ارزان بودن و خواص مناسب ترموفیزیکی، بیش از سایر مواد طبیعی، شانس مطرح شدن در آینده صنعت تبرید را دارند. در این تحقیق، خواص ترمودینامیکی مبردهای هیدروکربنی متداول شامل R۲۹۰ (پروپان)، R۶۰۰a (ایزوبوتان) و R۱۲۷۰ (پروپیلن) و عملکرد آن‌ها در یک چرخه‌ی تبرید تراکمی ساده، مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج حاصله با خواص و عملکرد مبردهای مصنوعی رایج کنونی و همچنین مبرد طبیعی R۷۱۷ (آمونیاک) مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که در یک چرخه‌ی تبرید تراکمی ساده که دمای تبخیر مبرد در اواپراتور آن بین صفر تا ۳۰- درجه سانتیگراد است، مبرد R۱۲۷۰ بهترین عملکرد را در میان مبردهای هیدروکربنی داراست و دارای وضعیت بهتری نسبت به مبردهای مصنوعی می‌باشد. مبرد R۲۹۰ تقریباً هم‌ردیف مبردهای مصنوعی است و در اولویت بعدی قرار می‌گیرد. مبرد R۶۰۰a (ایزوبوتان) در گستره دمایی تبخیر فوق، عملکرد مناسبی ندارد و به همین دلیل استفاده از آن توصیه نمی‌گردد.

واژه‌گان کلیدی: مبرد هیدروکربنی، چرخه‌ی تبرید تراکمی ساده، عملکرد ترمودینامیکی، مبرد جایگزین

۱-مقدمه

در دهه اخیر، مسائل زیست محیطی مرتبط با انتشار گازهای گلخانه‌ای و تخریب لایه‌ی ازن سبب شده است که توسعه‌ی سیستم‌های سرمازا با مبردهای طبیعی سازگار با محیط زیست، مورد توجه ویژه‌ای قرار گیرند. در سال ۱۹۸۵ در قرارداد وین، نقش اتم‌های کلر در تخریب لایه‌ی ازن مطرح شد. پس از آن در سال ۱۹۸۷ پروتکل مونترال، تولید مبردهای مخرب لایه‌ی ازن را ممنوع کرد. در اواخر قرن گذشته نیز مطرح شدن مواد با پتانسیل گرمایش جهانی^۱ بالا و نقش آن‌ها در گرمایش روزافزون کره زمین سبب شد تا کشورهای جهان طی قراردادی که بعدها به پروتکل کیوتو معروف شد، ممنوعیت‌هایی را در استفاده از این مواد اعمال نمایند.

امروزه مبردهای R۱۲، R۲۲ و R۱۳۴a به دلیل خواص ترمودینامیکی مناسب و غیر قابل اشتعال بودن، کاربردهای بسیاری در صنایع برودتی، چیلرها و یخچال‌های خانگی دارند. متأسفانه این مبردها، نقش مهمی را در تخریب لایه ازن و گرمایش جهانی کره دارند و طبق آن چه که گفته شد باید طبق یک زمان‌بندی مشخص، در آینده‌ی نزدیک به تدریج از چرخه‌های صنایع برودتی خارج شود و مبردهای طبیعی جایگزین آن‌ها شوند. لذا در ابتدای قرن حاضر، تحقیقات بسیاری بر روی توسعه سیستم‌های برودتی با مبردهای طبیعی نظیر هیدروکربن‌ها و آمونیاک متمرکز شده‌اند.

گرانرید (Granryd) [۱] ضمن مقایسه‌ی خواص ترمودینامیکی مبردهای هیدروکربنی با مبردهای R۱۲ و R۲۲ نتیجه گرفت که این مبردهای طبیعی از لحاظ بازدهی انرژی و سازگاری با محیط زیست می‌توانند جایگزین مناسبی برای مبردهای R۱۲ و R۲۲ در تجهیزات برودتی و پمپ‌های گرمایی باشند. در عین حال باید مباحث امنیتی در ارتباط با قابلیت اشتعال این مبردها نیز در نظر گرفته شود.

توکلی و امانی [۲] با معرفی مبرد R۶۰۰a (ایزوبوتان) به عنوان جایگزین R۱۳۴a در یخچال‌ها و فریزرها، به بررسی و مقایسه‌ی ترمودینامیکی این دو مبرد پرداختند. نتایج آزمایش تجربی نشان می‌داد که R۶۰۰a به دلیل کاهش مصرف انرژی در چرخه‌ی سرمایش یخچال‌ها، می‌تواند جایگزین مناسبی برای R۱۳۴a باشد. همچنین، Su و Lee [۳] یک مطالعه‌ی تجربی بر روی عملکرد سیستم‌های برودتی با مبرد R۶۰۰a انجام داده و نتایج را با R۱۲ و R۲۲ مقایسه کردند که حاصل آن، افزایش ظرفیت خنک‌کنندگی با مبرد R۶۰۰a نسبت به مبردهای مصنوعی پیشین بود.

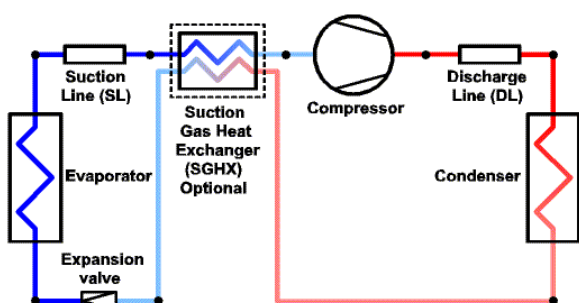
نقاش‌زادگان و همکاران [۴] با مطالعه و مقایسه‌ی ترموفیزیکی و ترمودینامیکی مبردهای R۱۳۴a، R۷۱۷، R۶۰۰a، R۵۰۷، R۴۰۴a، R۱۵۲a، R۴۱۰a و R۲۹۰، مبرد R۴۰۷c را عنوان مبرد جایگزین مناسب برای R۲۲ معرفی کردند.

غالب تحقیقات قبلی، بر روی عملکرد سیستم‌های تبرید با مبرد R۶۰۰a متمرکز شده‌اند و تحقیقی جامع بر یک پایه یکسان بر روی سایر مواد هیدروکربنی نظیر پروپان یا پروپیلن نشده است. در این تحقیق، مبردهای هیدروکربنی R۱۲۷۰، R۲۹۰، R۶۰۰a، همراه با

R۷۰۷ (آمونیاک) مورد مطالعه قرار گرفته و عملکرد ترمودینامیکی آن‌ها در یک چرخه‌ی تبرید تراکمی ساده با مبردهای R۱۲، R۲۲ و R۱۳۴a که در صنعت تبرید کاربرد زیادی دارند، مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. مبردهای R۴۰۷c و R۴۱۰a نیز به خاطر خواص ترمودینامیکی مناسب در این مقایسه لحاظ شده است.

۲- مشخصات چرخه‌ی تبرید تراکمی مورد مطالعه

شکل زیر، طرحواره چرخه‌ی تبرید تراکمی ساده در نظر گرفته در تحقیق حاضر را برای مطالعه خواص مبردها و مقایسه عملکرد ترمودینامیکی آن‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۱: طرحواره چرخه تبرید تراکمی ساده مورد مطالعه

مشخصات پایه چرخه‌ی تبرید فوق عبارتست از [۵]:

- دمای تبخیر اواپراتور: 20°C -
- میزان مافوق داغ شدن مبرد بعد از اواپراتور: 8°C
- افت فشار در اواپراتور: ۰٫۲ bar
- افت فشار در خط مکش: ۰٫۱ bar
- افت فشار در خط تخلیه: ۰٫۲ bar
- دمای تقطیر کندانسور: 35°C
- میزان مادون سرد شدن: 2°C
- افت فشار در کندانسور: ۰٫۱ bar
- افت فشار در خط مایع: ۰٫۰۱ bar
- بازده ایزونتروپیک کمپرسور: ۰٫۷
- تلفات حرارتی در کمپرسور: ۱۵٪ توان مصرفی آن
- ظرفیت برودتی: ۱۰۰ kW

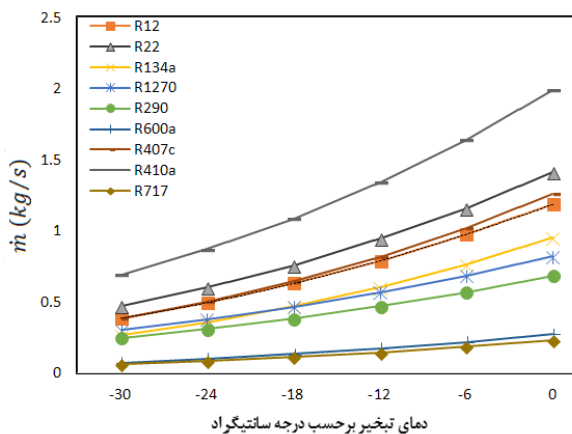
این مشخصات، داده‌های واقعی یک چرخه موجود می‌باشند [۵].

۳- معرفی نرم‌افزار استفاده شده

در تحقیق حاضر، جهت مقایسه‌ی خواص ترموفیزیکی مبردهای مختلف از نرم‌افزار کول‌پک^۲ [۶] استفاده شده است. نرم‌افزار کول‌پک در سال ۱۹۸۸ با حمایت دپارتمان انرژی دانمارک توسعه یافت. این نرم‌افزار شامل مجموعه ابزارهای سودمندی است که به کمک آن می‌توان سیستم‌های برودتی را شبیه‌سازی و تحلیل کرد. همچنین

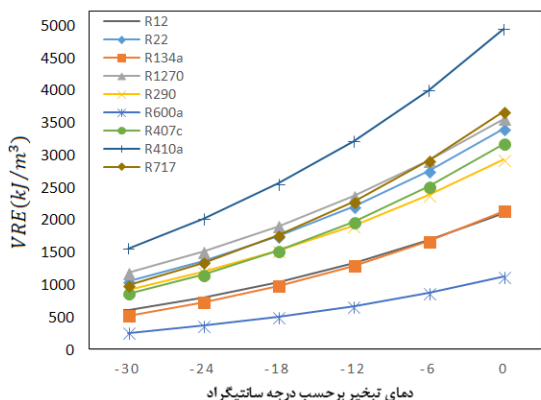
^۲ CoolPack

^۱ Global Warming Potential



شکل ۳: تغییرات دبی جرمی بر حسب دمای اواپراتور

شکل ۴ ظرفیت تبرید حجمی میردهای مختلف را بر حسب دمای اواپراتور نشان می‌دهد. ظرفیت تبرید حجمی (VRE)، از تقسیم ظرفیت برودتی بر حجم مخصوص گاز مبرد ورودی به کمپرسور به دست می‌آید. هر قدر مقدار این پارامتر بیشتر باشد، حجم جابجایی مورد نیاز کمپرسور برای ظرفیت برودت یکسان، کوچک‌تر خواهد شد که امری مطلوب است. میردهای R۶۰۰a و R۴۱۰A به ترتیب بیشترین و کمترین ظرفیت تبرید حجمی را دارا می‌باشند. میرد R۷۱۷ و سپس R۱۲۷۰ بلافاصله بعد از میرد R۲۲ قرار دارند.



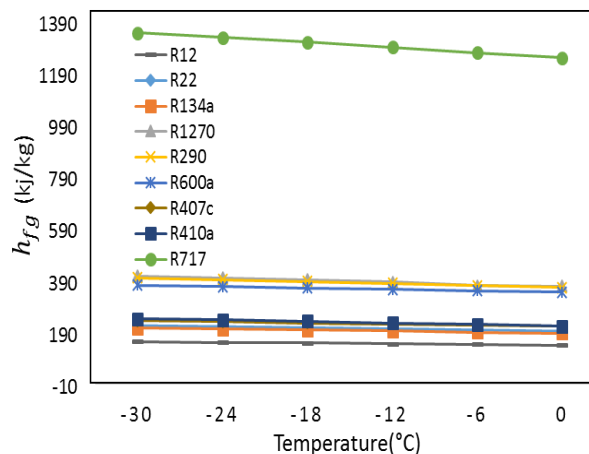
شکل ۴: تغییرات ظرفیت تبرید حجمی بر حسب دمای تبخیرکننده

شکل ۵ نشان دهنده‌ی توان مصرفی کمپرسور بر حسب دمای اواپراتور می‌باشد. توان کمپرسور یکی از پارامترهای اصلی و تعیین کننده در سیستم‌های برودتی می‌باشد که کمتر بودن آن بیانگر مصرف کمتر انرژی در سیستم می‌باشد که بسیار مطلوب است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که بیشترین و کمترین کار مصرفی به ترتیب متعلق به R۶۰۰a و R۴۱۰a است که این یک امتیاز برای میرد R۶۰۰a می‌باشد. R۲۹۰ نیز پایین‌تر از میردهای R۲۲ و بالاتر از میردهای R۱۲ و R۱۳۴a قرار گرفته است.

این نرم‌افزار با دارا بودن یک بانک اطلاعاتی مناسب، قادر به محاسبه‌ی خواص ترمودینامیکی میردهای مختلفی می‌باشد.

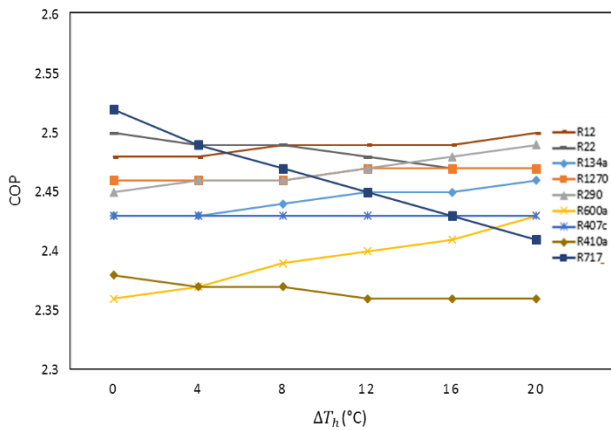
۴- نتایج شبیه‌سازی و بحث

شکل ۲، تغییرات گرمای نهان تبخیر را بر حسب دما برای میردهای مختلف نشان می‌دهد. این خاصیت ترموفیزیکی برابر با تفاوت آنتالپی فاز مایع و بخار می‌باشد. همان‌طور که در این نمودار مشخص است، گرمای نهان تبخیر میرد R۷۱۷ اختلاف چشمگیری با سایر میردها دارد و به همین علت است که در سیستم‌های تبرید صنعتی با ظرفیت بالا، اغلب از آمونیاک به عنوان مبرد استفاده می‌شود. میرد R۱۲ نیز پایین‌ترین گرمای نهان تبخیر را داراست. تمامی میردهای هیدروکربنی در مقایسه با میردهای مصنوعی رایج از این حیث دارای برتری نسبی هستند. نزدیک‌ترین مبرد طبیعی به میردهای مصنوعی، R۶۰۰a می‌باشد.

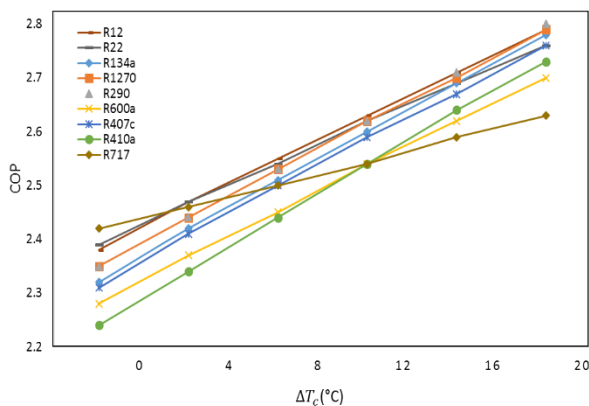


شکل ۲: تغییرات گرمای نهان تبخیر بر حسب دمای اواپراتور

شکل ۳، تغییرات دبی جرمی مورد نیاز مبرد در سیکل تبرید تراکمی ساده فوق‌الذکر را بر حسب دماهای تبخیر مختلف، با هم مقایسه می‌کند. دبی جرمی کمتر مبرد در چرخه یک امتیاز محسوب می‌شود که می‌تواند منجر به کاهش سطوح حرارتی شود. بیشترین و کمترین دبی جرمی به ترتیب متعلق به R۴۱۰a و آمونیاک می‌باشد. میردهای هیدروکربنی دبی جرمی کمتری نسبت به میردهای R۱۲، R۲۲، و R۱۳۴a دارند.



شکل ۵: تغییرات ضریب عملکرد بر حسب میزان مافوق گرم شدن

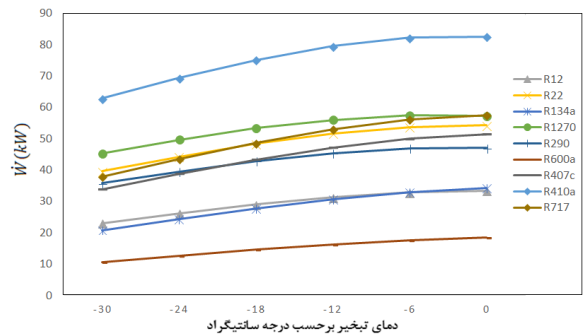


شکل ۷: تغییرات ضریب عملکرد بر حسب میزان مادون سرد شدن

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

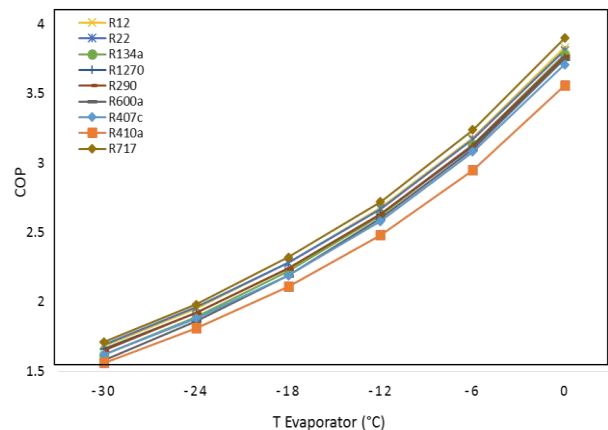
در تحقیق حاضر، عملکرد ترمودینامیکی مبردهای هیدروکربنی در مقایسه با سایر مبردهای مصنوعی در یک چرخه‌ی تبرید تراکمی یک‌مرحله‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. تفسیرهای نمودارهای به‌دست آمده در این تحقیق بیانگر این مهم است که در گستره دمایی بین صفر تا ۳۰- درجه سانتیگراد در اواپراتور، مبرد R۱۲۷۰ (پروپیلن) در غالب موارد، تقریباً بهترین عملکرد را در میان مبردهای فوق‌دارا می‌باشد و بنابراین دارای وضعیت بهتری نسبت به مبردهای مصنوعی می‌باشد. مبرد R۲۹۰ (پروپان) تقریباً هم‌ردیف مبردهای مصنوعی است و در اولویت بعدی قرار می‌گیرد. مبرد R۶۰۰a (ایزوبوتان) از لحاظ خصوصیات فوق‌عملکرد خوبی ندارد و به این دلیل در اولویت آخر قرار می‌گیرد. در نهایت با توجه به آن‌چه گفته شد، مبرد R۱۲۷۰ (پروپیلن) به خاطر خواص مناسب ترمودینامیکی به عنوان مبرد جایگزین مناسب مبردهای مصنوعی معرفی می‌گردد. فراوانی و در دسترس بودن مبردهای هیدروکربنی فوق‌الذکر در ایران به علت وجود واحدهای فعال اولفین در سراسر کشور، جایگاه ممتاز این مبردها را در صنعت تبرید کشور بیش از پیش نمایان نموده و لزوم تحقیقات بیشتر در این مورد را متذکر می‌گردد.

۶- تشکر و قدردانی



شکل ۶: تغییرات توان مصرفی کمپرسور بر حسب دمای اواپراتور

شکل ۶ تغییرات ضریب عملکرد سیستم (COP) را بر حسب دمای اواپراتور نشان می‌دهد. ضریب عملکرد بیشتر به معنای تولید سرمای بیشتر به ازای مصرف کار یکسان کمپرسور است. همان‌طور که از این نمودار مشخص است، ضریب عملکرد مبردها بسیار به هم نزدیک می‌باشد و با کاهش دما کاهش می‌یابد. مبرد R۷۱۷ بیشترین و R۴۱۰a کمترین ضریب عملکرد را دارا می‌باشند. مبردهای هیدروکربنی ضریب عملکرد کمتری نسبت به R۲۲، R۱۲، R۱۳۴a و دارا می‌باشند. مبرد R۲۹۰ بلافاصله پایین‌تر از مبردهای فوق‌قرار گرفته است.



شکل ۷: تغییرات ضریب عملکرد بر حسب دمای اواپراتور

شکل ۷ تغییرات ضریب عملکرد چرخه تبرید تراکمی شکل ۱ را بر حسب میزان مافوق داغ شدن مبرد پس از اواپراتور نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند در صورت استفاده از مبردهای هیدروکربنی، ضریب عملکرد چرخه با افزایش میزان مافوق داغ شدن، تغییر محسوسی نمی‌کند.

شکل ۸ تغییرات ضریب عملکرد (COP) را بر حسب میزان مادون سرد شدن مبرد نشان می‌دهد. با افزایش میزان مادون سرد، ضریب عملکرد تمامی مبردها افزایش می‌یابد. مبرد R۱۲ بیشترین و R۴۱۰a کمترین ضریب عملکرد را دارا می‌باشند. تغییرات ضریب عملکرد چرخه با مبردهای طبیعی با افزایش میزان مادون سرد شدن کمتر از R۲۲ و R۱۲ می‌باشد.

[۴] نقاش زادگان، محمود، غلامی، مینو و غلامی، میترا، ۱۳۸۲، "مطالعه و مقایسه ترموفیزیکی و ترمودینامیکی مبردهای R۱۳۴a، R۲۹۰، R۴۱۰a، R۱۵۲a، R۴۰۴a، R۵۰۷، R۶۰۰a، R۷۱۷، R۴۰۷c و R۴۰۷c به عنوان جایگزین R۲۲"، دوازدهمین کنفرانس سالانه و هشتمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مکانیک.

[۵] موسوی نائینیان، سید مجتبی و مافی، مصطفی، ۱۳۹۱، "مجموعه ابزارهای شبیه سازی سیستم‌های سرمازا CoolPack"، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.

[۶] CoolPack Software, ۲۰۱۲, IPU & Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark. See also URL www.et.dtu.dk/coolpack

نگارنده مقاله مراتب تشکر و قدرانی خود را از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) به علت حمایت مالی از تحقیق حاضر را اعلام می‌دارد.

۷-مراجع

[۱] Granryd, E., ۲۰۰۱, "Hydrocarbons as refrigerants - an overview", *International Journal of Refrigeration*, ۲۴, June, pp. ۱۵-۲۴.

[۲] توکلی، احمدرضا و امانی، سعید، ۱۳۹۱، "مطالعه و بررسی فنی، اقتصادی و تجربی استفاده از مبرد R۶۰۰a به جای R۱۳۴a در سیکل تبرید یخچال و یخچال فریزر"، بیست و هفتمین کنفرانس بین‌المللی برق.

[۳] Lee, Y.S. and Su, C.C., ۲۰۰۲, "Experimental studies of isobutane (R۶۰۰a) as the refrigerant in domestic refrigeration system", *Applied Thermal Engineering*, ۲۲.