سال ۲۹، شماره ۱۳۵، صفحات ۳۶-۴۳، نوع مقاله: ترویجی

مجله علمی مهندسی مکانیک

ISSN: 1605-9719

DOI: 10.30506/mmep.2020.127658.1827

مقایسه تجربی مصرف انرژی فریزر خانگی با کمپرسور سرعت ثابت و کمپرسور سرعت متغیر

نادر علی‌حسینی[۱ و *]، غلامرضا صالحی[۲]، حسین فلاح‌سهی[۳]

[۱] کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

[۲] استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

[۳] استادیار گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران

*مسئول مکاتبات: nader_alihosseini@yahoo.com

◄ چکیده

در این مقاله مصرف انرژی فریزر خانگی با کمپرسور سرعت ثابت و کمپرسور سرعت متغیر به صورت تجربی مقایسه می‌شود. بالاترین گرید مصرف انرژی در فریزرهای خانگی مربوط به فریزر خانگی با کمپرسورهای سرعت متغیر است. برای مقایسه مصرف انرژی در فریزرهای خانگی از کمپرسور تک‌سرعته با ظرفیت سرمایشی ۱۸۵ وات و ضریب عملکرد ۱/۹۲ و کمپرسور چندسرعته با سرعت‌های مختلف بر حسب دور بر دقیقه: ۱۳۰۰، ۱۶۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۴۵۰۰ و با ظرفیت سرمایشی به ترتیب: ۸۵، ۱۰۸، ۱۳۰، ۲۰۰، ۲۶۰ وات و ضریب عملکرد به ترتیب: ۱/۸۰، ۱/۸۸، ۱/۹۰، ۱/۸۰، ۱/۶۰ استفاده شده است. در هر دو کمپرسور از یک نوع گاز هیدروکربنی استفاده شده و میزان مبرد در هر دو نوع تقریبا برابر است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که سیستم‌های سرعت متغیر علاوه بر دمای پایدارتر و کاهش مصرف انرژی، به علت داشتن سرعت‌های مختلف باعث انجماد سریع نیز می‌شوند. کمپرسور با سرعت متغیر در مقایسه با کمپرسور سرعت ثابت میزان مصرف انرژی را ۲۴ درصد در روز کاهش می‌دهد.

◄ واژگان کلیدی

کمپرسور سرعت متغیر
کمپرسور سرعت ثابت
مصرف انرژی
آزمایش فریزر
گاز R-600a
فریزر خانگی

◄ تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۳۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۲

Experimental comparison of energy consumption of household freezer with constant speed compressor and variable speed compressor

Nader Alihosseini[1], Gholamreza Salehi[2], Hossein Fallahsohi[3]

[1] *M.Sc. in Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran*

[2] *Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran*

[3] *Assistant Professor, Department of energy System Engineering, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran*

► Abstract

In this paper, the energy consumption of a household freezer is compared with a constant speed compressor and a variable speed compressor. The highest grade of energy consumption in household freezers is related to household freezers with variable speed compressors. To compare energy consumption in household freezers, a single speed compressor with a cooling capacity of 185 watts and a performance factor of 1.92, and a multi speed compressor with different speeds in terms of revolutions per minute 1300, 1600, 2000, 3000, 4500 and with a cooling capacity of 85, respectively., 108, 130, 200, 260 watts and performance coefficients of 1.80, 1.88, 1.90, 1.80, 1.60 were used respectively. In both compressors, one type of hydrocarbon gas is used and the amount of refrigerant in both types is almost equal. The experimental results showed that variable speed systems, in addition to more stable temperatures and reduced energy consumption, also cause rapid freezing due to their different speeds. A variable speed compressor reduces energy consumption by 24% per day compared to a constant speed compressor.

► Keywords

Variable speed compressor
Constant speed compressor
Energy consumption
Freezer testing
R-600a gas
Household freezer

► Article history

Received: *20 Jun 2020*
Accepted: *02 Nov 2020*

۱ مقدمه

در صنعت تبرید از سه نوع کمپرسور رفت و برگشتی، دوار و گریز از مرکز استفاده می‌شود. امروزه استفاده از کمپرسورهای رفت و برگشتی با ویژگی سرعت متغیر به دلیل پتانسیل بالقوه افزایش یافته است که باعث افزایش راندمان انرژی و حفظ رطوبت نسبی محفظه‌های مواد غذایی می‌شود [۱].

کمپرسورهای سرعت متغیر ۲۰ الی ۳۰ درصد راندمان بالاتری نسبت به کمپرسورهای سرعت ثابت دارند [۲].از دهه ۱۹۵۰ به بعد کمپرسورهای سرعت متغیر در حال توسعه هستند و در مرحله‌ی اولیه در سال ۱۹۹۶ یک کمپرسور سرعت متغیر توسط کارمن و کومن مورد بررسی قرار گرفت [۳]. تحت برخی شرایط مشخص در یخچال فریزرهای خانگی، با کمپرسورهای سرعت متغیر بیش از ۳۵ درصد بهبود بهره‌وری انرژی نسبت به یخچال فریزر خانگی با کمپرسور سرعت ثابت به دست آمده است [۴].

تا سال ۲۰۱۵ تقریبا ۱/۵ میلیارد یخچال خانگی در جهان فعال بودند که در این زمینه باعث افزایش نگرانی‌های مربوط به مطالبات زیست محیطی و انرژی شده و منجر به تحقیقات متمرکز روی یخچال گردیده است [۵]. برای اینکه یک کمپرسور سرعت متغیر راندمان بالاتری داشته باشد بایستی عملکرد پیستون تلفات جریان و اهمی درایو را به حداقل رساند. به دلیل تغذیه با جریان مستقیم در کمپرسور سرعت متغیر به جای آهنربای القایی که با جریان برق کار می‌کند از نوع مغناطیس دائمی استفاده می‌گردد که باعث کاهش مصرف برق و کوچک شدن اندازه فیزیکی کمپرسور می‌گردد [۶]. ظرفیت سیستم تبرید را با استفاده از کمپرسورهای سرعت متغیر می‌توان به‌سادگی با تغییر ولتاژ تغییر داد. کمپرسورهای سرعت متغیر برای سیکل قدرت استرلینگ، سیکل تبرید تراکمی بخار طراحی شده‌اند و همچنین پتانسیل استفاده از آمونیاک را نیز دارد [۷]. در مقایسه مصرف انرژی، ویژگی‌های یک کمپرسور سرعت متغیر نسبت به کمپرسورهای سرعت ثابت نشان می‌دهد که می‌تواند در طیف گسترده‌تری به کار گرفته شود، و کاربردی‌تر باشد [۸].

اندازه‌گیری عملکرد یک کمپرسور سرعت متغیر نسبت به عملکرد کمپرسور معمولی ۱۰ درصد کاهش مصرف برق را نشان می‌دهد [۹]. کمپرسور سرعت متغیر را می‌توان در سیکل تبرید تراکمی بخار با مبدل‌های حرارتی (تبخیرکننده و چگالنده) استفاده کرد. همچنین، کمپرسور سرعت متغیر می‌تواند در یخچال فریزرهای خانگی و سیستم‌های تهویه مطبوع استفاده شود. کمپرسورهای سرعت متغیر توانایی استفاده از مبدل‌های حرارتی بسیار فشرده را امکان‌پذیر می‌سازند [۱۰]. با تجزیه و تحلیل عددی تجربی یک کمپرسور سرعت متغیر مشخص می‌شود که کمپرسور سرعت متغیر به دلیل عدم وجود میل‌لنگ و عدم اصطکاک، بهره‌وری بالاتری دارد [۱۱]. مبرد مورد استفاده در سیکل تبرید تراکمی بخار فریزر خانگی مبرد ایزوبوتان است. این مبرد دارای خواص تبرید عالی بوده و اثرات نامطلوب زیست محیطی بسیار جزئی دارد اما ایرادی که این مبردها دارند اشتعال‌پذیر بودن آنها است که مستلزم این هست که موارد ایمنی مربوطه به دقت رعایت شوند.

بررسی‌هایی که توسط کیم و جئونگ در آزمایشگاه تست محصول الجی الکترونیک انجام شده بود مشخص کرد که کمپرسور بیشترین مصرف انرژی را دارد و ۸۰ درصد مصرف انرژی مربوط به کمپرسور است و در نتیجه، استفاده از کمپرسور سرعت متغیر که یکی از کارآمدترین کمپرسورها است، به دلیل اصطکاک کم و مسیر جریان مبرد ساده مورد توجه واقع گردید [۱۲].

در این تحقیق با آزمایش فریزر خانگی تولیدشده با کمپرسور سرعت متغیر و مقایسه آن با آزمایش همان فریزر خانگی تولیدشده با کمپرسور سرعت ثابت، نتیجه گرفته شد که فریزر خانگی با کمپرسور سرعت متغیر مصرف انرژی پایین‌تری نسبت به کمپرسور سرعت ثابت را نشان می‌دهد. تمامی آزمایش‌های فریزر خانگی مطابق استاندارد بین المللی ویژگی‌ها و روش‌های آزمون وسایل برودتی خانگی [۱۳] و استاندارد تعیین معیار مصرف انرژی و دستورالعمل برچسب انرژی [۱۴] است که گویای مطابقت محصول با مقررات جامعه اروپا در خصوص ایمنی، سلامت، حفاظت مصرف کننده و محیط زیست است. هدف اصلی استاندارد، مطابقت محصول با الزامات اساسی مقررات جامعه اروپاست و مجوزی برای عرضه محصولات به طور آزاد در بازار اتحادیه اروپا است.

۲ معرفی دو نوع سیستم مورد بررسی

فریزر خانگی که برای آزمایش انتخاب شده است دارای کلاس آب و هوایی نیمه گرمسیری است. در یکی از فریزرهای خانگی از کمپرسور سرعت متغیر و در دیگری از کمپرسور سرعت ثابت استفاده شده است. کمپرسور سرعت ثابت استفاده شده در فریزر خانگی دارای مشخصات فنی ارائه شده مطابق جدول ۱ است.

جدول ۱: مشخصات فنی کمپرسور سرعت ثابت [۱۵].

Displacement	cm^3	۱۱/۱
Motor Type	ESCR	
Cooling Capacity	W	۱۸۵
	kcal	۱۵۹
COP	W/W	۱/۹۲
Run Capacitor	μF	۴

نوع دیگری از کمپرسور، که سرعت متغیر است و در فریزر خانگی استفاده شده است دارای مشخصات فنی ارایه شده مطابق جدول ۲ است.

جدول ۲: مشخصات فنی کمپرسور سرعت متغیر [۱۵].

Displacement	cm^3	۱۱		
Motor Type	BLDC			
Rotate Speed	rpm	۱۳۰۰	۱۶۰۰	۲۰۰۰
		۳۰۰۰	۴۵۰۰	
Cooling Capacity	w	۸۵	۱۰۸	۱۳۰
		۲۰۰	۲۶۰	
	kcal/h	۷۳	۹۳	۱۱۲
		۱۷۲	۲۱۹	
COP	w/w	۱/۸۰	۱/۸۸	۱/۹۰
		۱/۸۰	۱/۶۰	

قطعاتی که به صورت پایه در فریزر خانگی استفاده شده است عبارتند از: کمپرسور، چگالنده، تبخیرکننده، گاز، موتور فن، سوئیچ درب، رله، اورلود، لامپ، المنت حرارتی برای یخزدایی، ترموفیوز، بردهای الکترونیکی و میکروکنترلر. در هر دو مدل از فریزرهای خانگی از سنسورهای NTC[1]

[1] negative thermal coefficient

برای نظارت بر دمای محیط، میزان رطوبت در داخل فریزر استفاده می‌شود. تفاوت الکتریکی فریزر خانگی با موتور سرعت متغیر در نوع موتور و بردهای الکترونیکی و دستورالعمل کنترلی دما است. کدهای کنترلی برای هر دو فریزر خانگی به جهت کنترل موتور و کنترل دما از قبل در حافظه‌ی بردهای الکترونیکی وارد شده است.

قابلیت تبرید یک فریزر خانگی با کمپرسور سرعت متغیر را می‌توان با سرعت کمپرسور تنظیم کرد. اما در فریزر خانگی با کمپرسور سرعت ثابت، نمی‌توان سرعت را تغییر داد. در فریزر خانگی با کمپرسور سرعت متغیر با تغییر فرکانس بر حسب شرایط محیطی و داخلی کابین فریزر، مصرف انرژی الکتریکی کاهش یافته و راندمان در چرخه‌ی فریزر خانگی افزایش می‌یابد. برخی از نتایج مهم فریزر خانگی که توسط نویسنده این مقاله در آزمایشگاه به دست آمده در جدول ۳ آورده شده است. با هر دو کمپرسور سرعت متغیر و سرعت ثابت چندین بار اصلاحاتی در چگالنده، تبخیرکننده، کمپرسور و مقدار شارژ گاز انجام گرفته تا در نهایت به عملکرد بهینه دست یافته شده است.

جدول ۳: مشخصات فریزر خانگی.

عنوان	FFHF[2]	VFHF[3]
نوع گاز	R-600a	R-600a
کمپرسور	FFAC[4]	VFDC[5]
توان ورودی (دمای محیط ۲۵ °C)	۶۳/۵ W	۴۸ W
حداکثر ظرفیت تبرید کمپرسور مطابق جدول‌های ۱ و ۲	۱۸۵ W	۲۶۰ W
بیشینه دمای فریزر	−۱۸/۳ °C	−۱۸/۵ °C
مصرف انرژی	۱/۱۱۶ kwh/day	۰/۸۴۳ kwh/day

در سیکل تبرید تراکمی بخار فریزرهای خانگی از مبرد R-600a استفاده شده که مشخصات آن در جدول ۴ ارائه گردیده است. هم‌اکنون این مبردها جایگاه خود را در صنایع تبرید پیدا کرده و شرکت‌های مختلفی اقدام به تولید یخچال و فریزر خانگی با آن‌ها نموده‌اند.

جدول ۴: مشخصات گاز R-600a [۱۶].

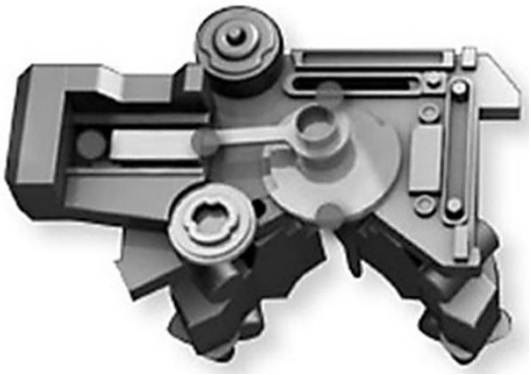
مبرد	R-600a
فرمول شیمیایی	C_4H_{10}
نام شیمیایی	ایزوبوتان
وزن مولکولی (g/mol)	۵۸/۱۲
ظرفیت گرمایی ویژه (J/K · mol)	۹۶/۶۵
نقطه ذوب (°C)	−۱۵۹/۴۲
نقطه جوش (°C)	−۱۱/۷
GWP[6]	۱

شرکت آلمانی FORON از سال ۱۹۹۳ اقدام به تولید یخچال و فریزر با مبردهای هیدروکربنی ایزوبوتان، بوتان نرمال، پروپان و ال پی جی نموده است [۱۷].

۳ روند آزمایش

دو نمونه فریزر خانگی که یکی با کمپرسور سرعت متغیر شکل ۱ و دیگری با کمپرسور سرعت ثابت شکل ۲ تولید شده و در هر دو فریزر از گاز R-600a به عنوان مبرد استفاده شده است. یخچال فریزرهای خانگی قبل از شارژ گاز نیاز به تخلیه هوای داخل سیکل دارند. سیکل با تخلیه فرایند نامناسب باعث می‌شود هوا در داخل مدار تبرید بماند و باعث نوسانات جریان می‌شود [۱۸].

شکل ۱: کمپرسور سرعت متغیر [۱۵].



شکل ۲: کمپرسور سرعت ثابت [۱۵].

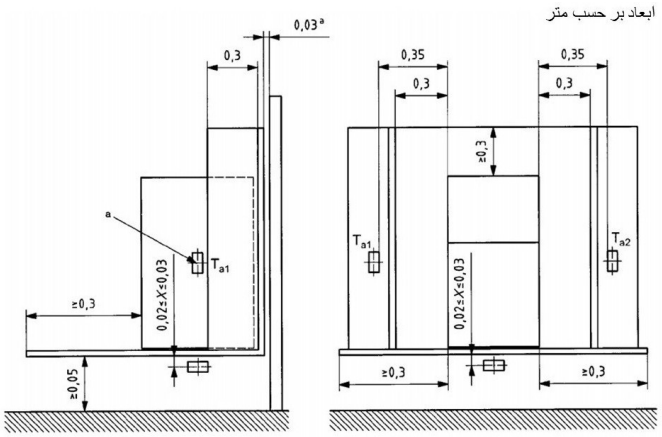
هر دو فریزر خانگی دارای کابین با ابعاد یکسانی هستند و مطابق استاندارد بین المللی ویژگی‌ها و روش‌های آزمون وسایل برودتی خانگی [۱۳] دارای حجم کل ۳۳۰ لیتر است و پس از بررسی و کنترل نشتی گاز از سیکل تبرید با دستگاه‌های مجهز و قابل اطمینان در داخل اتاق تست که مطابق استاندارد بین المللی ویژگی‌ها و روش‌های آزمون وسایل برودتی خانگی [۱۳] است قرار داده شدند. شکل کامل متعلقات داخلی مؤثر در مصرف انرژی محصول در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

برای انجام آزمایش‌ها از آزمایشگاه شرکت نیکسان صنعت ساوه استفاده شده است. آزمایشگاه دارای اتاق تست شکل ۵ است. اتاق تست سکویی دارد که قسمت فوقانی‌اش از چوب محکم ساخته شده و به رنگ سیاه مات است و قسمت زیرین آن برای گردش هوای آزاد باز است. قسمت تحتانی سکو نباید کمتر از ۰/۰۵ متر بالای کف اتاق آزمون بوده و باید حداقل ۰/۳ متر از اطراف وسیله برودتی امتداد یابد، به جز در قسمت پشت که باید به دیواره عمودی ختم شود. وسیله برودتی تحت آزمون باید از تأثیر جریان‌های هوای با سرعت بیش از ۰/۲۵ متر بر ثانیه محافظت شوند.

[2]fixed frequency household freezer [3]variable frequency household freezer [4]alternating current [5]direct current [6]global warming potential

شکل ۳: تبخیرکننده.

شکل ۴: کاور تبخیرکننده.



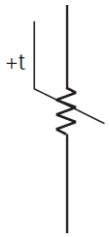
شکل ۵: اتاق تست [۱۳].

ابعاد خارجی کابین فریزر خانگی عبارتند از: عرض ۵۹۲ میلی‌متر و ارتفاع ۱۸۵۰ میلی‌متر و عمق ۶۰۰ میلی‌متر. این فریزر مطابق استاندارد بین المللی ویژگی‌ها و روش‌های آزمون وسایل برودتی خانگی [۱۳] دارای حجم مفید چهار ستاره ۳۰۳ لیتر است که برای دستیابی به این محفظه‌ها، فریزر تنها دارای یک درب است.

برای عایق‌بندی و ایزوله کردن بدنه از عایق فوم با گاز انبساط دهنده سیکلوپنتان استفاده شده است. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است تبخیرکننده فریزر در قسمت پایین کابین به همراه سیستم یخ زدایی اتوماتیک با استفاده از المنت ۲۲۰ V/۵۰ Hz قرار داده شده است. سیستم یخ زدایی دارای توان مصرفی برابر با ۱۸۷ وات است. در این مدل از فریزرها گردش هوا در داخل کابینت به وسیله‌ی فن با موتور DC است که سرمای ایجاد شده در قسمت تبخیرکننده را در داخل کابین به حرکت در می‌آورد. همچنین برای هر دو فریزر خانگی از فن موتور برای چگالنده نیز استفاده شده که باعث کاهش مصرف انرژی می‌شود [۱۹].

اتاق تست مصرف انرژی برای هر دو فریزر خانگی با هر دو کمپرسور یک اتاق است و در مدت زمان آزمایش درب فریزر به مدت معینی بسته می‌ماند و اصلا باز نمی‌شود.

فریزرهای تولیدشده در یک اتاق تحت کنترل که متصل به سیستم‌های جمع‌آوری داده‌ها است قرار داده شده و آزمایش می‌شوند. برای مشاهده تغییرات دمایی داخل کابین و محیط اتاق کنترل از ترموکوپل‌های PTC[۷] استفاده شده است. مقاومت حرارتی PTC ترمیستوری هست که در اثر افزایش دما، مقدار مقاومت آن افزایش می‌یابد، علامت اختصاری این مقاومت در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: علامت اختصاری ترموکوپل PTC [۲۰].

این ترموکوپل‌ها در داخل کابین فریزر داخل بسته‌های M که مطابق استاندارد بین المللی ویژگی‌ها و روش‌های آزمون وسایل برودتی خانگی [۱۳] ساخته می‌شوند قرار می‌گیرند. بسته‌های M، ۵۰۰ گرم با ابعاد ۱۰۰ × ۱۰۰ × ۵۰ میلی‌متر است که ترموکوپل‌ها در مرکز هندسی این بسته‌ها و در تماس مستقیم با ماده پرکننده قرار دارند.

۱.۳ نتیجه آزمایش‌ها و آنالیز نتایج

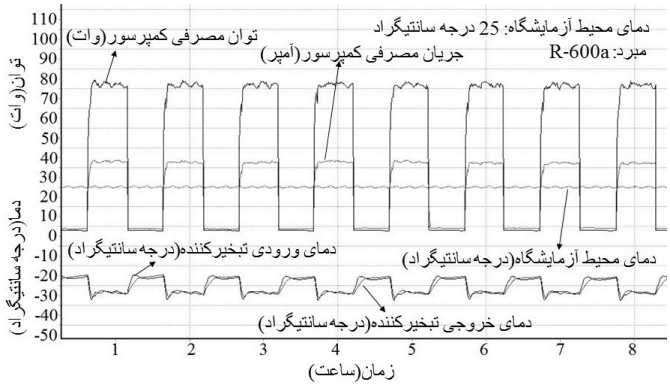
برای تایید عملکرد فریزرهای خانگی و تجاری سازی آن با کمپرسور سرعت متغیر تست‌های مختلفی در زمان‌های طولانی مدت گرفته شده است. مطابق استاندارد تعیین معیار مصرف انرژی و دستورالعمل برچسب انرژی [۱۴]، برای تعیین مصرف انرژی سالیانه یک وسیله برودتی، باید مصرف انرژی وسیله برودتی در طول مدت زمان ۲۴ ساعت محاسبه شود. هر دو فریزر خانگی

[7] positive thermal coefficient

برای رسیدن به وضعیت اولیه پایدار دمای یکسان، به مدت ۱۲ ساعت درها باز می‌مانند. و سپس قبل از شروع آزمون درب فریزرها بسته شده و آزمون شروع می‌شود. در حین آزمون وقتی دمای محیط ۲۵ درجه سانتیگراد است فریزر با کمپرسور سرعت متغیر بعد از اینکه به شرایط کارکرد پایدار رسید دارای حداقل توان مصرفی ۴۸ وات است. و وقتی که هنوز به دمای حداکثر مجاز مطابق استاندارد تعیین معیار مصرف انرژی و دستورالعمل برچسب انرژی [۱۴] تنظیم نشده است و دمای داخل کابین سردتر است، حداکثر توان مصرفی ۹۸ وات است.

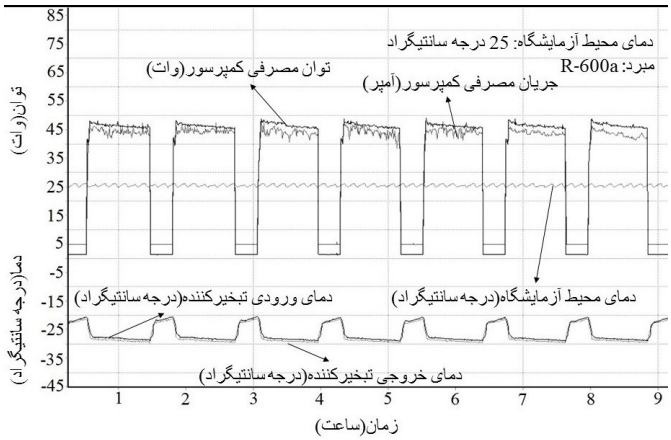
دمای محفظه فریزر با هر دو کمپرسور مطابق استاندارد بین المللی ویژگی‌ها و روش‌های آزمون وسایل برودتی خانگی [۱۳] می‌تواند حداکثر تا ۳ درجه سانتیگراد در حین چرخه برفک زدایی بالاتر برود. در همین حال دمای لوله تخلیه کمپرسور سرعت متغیر پس از پایدار شدن به دمای ۴۲ درجه سانتیگراد می‌رسد. و دمای لوله تخلیه کمپرسور سرعت ثابت پس از پایدار شدن به دمای ۳۸ درجه سانتیگراد می‌رسد.

مصرف انرژی به شدت تحت تأثیر دمای تبخیرکننده است. برای بار حرارتی یکسان در تبخیرکننده، در دمای بالاتر تبخیرکننده مصرف انرژی پایین‌تر خواهد بود [۲۱]. افزایش ضریب جذب سطح تبخیرکننده باعث افزایش انتقال حرارت تشعشع به آن سطح می‌شود که از آن می‌توان برای بهبود طراحی استفاده کرد. حداقل و حداکثر دمای لوله‌های ورودی و خروجی تبخیرکننده در فریزر خانگی با کمپرسور ثابت، وقتی که کمپرسور در حال کار کردن باشد، حداکثر دمای داخل کابین ۱۸– درجه سانتیگراد است و مطابق گراف ارایه شده شکل ۷ به ترتیب دارای حداقل دمای ورودی ۳۱– درجه سانتیگراد و حداکثر دمای ۲۰– درجه سانتیگراد زمانی که کمپرسور خاموش می‌شود است و در خروجی لوله تبخیرکننده دارای حداقل دما ۳۱– درجه سانتیگراد و حداکثر دما ۲۰– درجه سانتیگراد زمانی که کمپرسور خاموش می‌شود، است.



شکل ۷: گراف دمای لوله‌های ورودی و خروجی تبخیرکننده با کمپرسور سرعت ثابت.

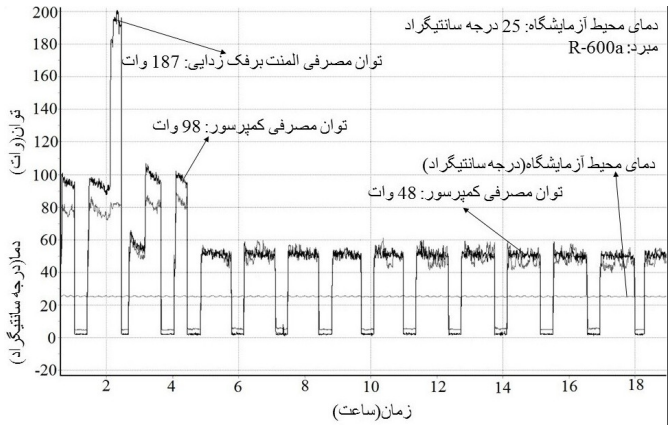
دمای لوله‌های ورودی و خروجی تبخیرکننده در فریزر خانگی با کمپرسور سرعت متغیر نیز در شرایط مشابه با فریزر با کمپرسور سرعت ثابت مطابق گراف ارائه‌شده در شکل ۸ است و دارای حداکثر دمای ورودی ۲۰– درجه سانتیگراد زمانی که کمپرسور خاموش می‌شود، و حداقل دمای ورودی ۲۸– درجه سانتیگراد زمانی که کمپرسور روشن می‌شود و در خروجی لوله تبخیرکننده حداکثر دما ۲۱– درجه سانتیگراد زمانی که کمپرسور خاموش می‌شود و حداقل دما ۲۹– درجه سانتیگراد زمانی که کمپرسور روشن می‌شود، است.



شکل ۸: گراف دمای لوله‌های ورودی و خروجی تبخیرکننده با کمپرسور سرعت متغیر.

گراف شکل ۹ که عملکرد فریزر خانگی با کمپرسور سرعت متغیر را نشان می‌دهد، در ابتدای گراف، تنظیمات کاربر برای داخل کابین فریزر سردتر است و با توجه به روش‌های کنترل سیکل، کمپرسور برای اینکه سریعتر بتواند دمای فریزر را تامین کند از سرعت‌های بالاتر استفاده کرده است و توان مصرفی آن برابر با ۹۸ وات است. سپس دمای داخل کابین برای آزمون مصرف انرژی در کمتر یا مساوی ۱۸– درجه سانتیگراد تنظیم شده است و چون نسبت به دمای تنظیم شده قبلی، دمای بالاتری برای داخل کابین فریزر انتخاب شده است در کمپرسور به جهت کاهش مصرف انرژی از سرعت‌های پایین‌تری استفاده می‌شود و توان مصرفی آن برابر با ۴۸ وات است.

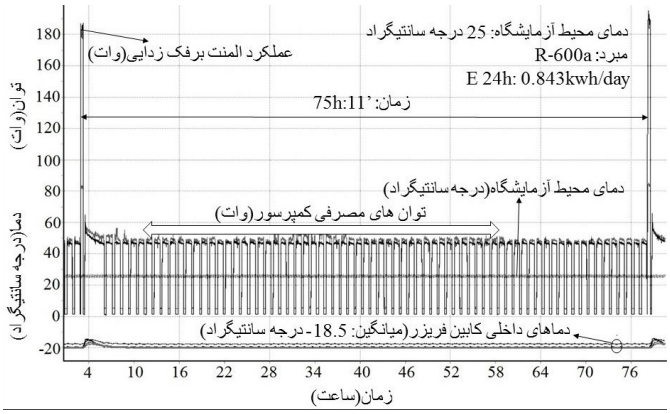
مدت زمان چرخه کاری که در شکل ۹ نشان داده می‌شود ۷۵ ساعت و ۱۱ دقیقه است و حداکثر دمای داخلی کابین فریزر در دمای محیط ۲۵ درجه سانتیگراد برابر با ۱۸/۵– درجه سانتیگراد است و این دمای داخل فریزر بالاترین دمایی است که برای آزمون مصرف انرژی می‌توان در نظر گرفت. در این چرخه کاری میزان مصرف انرژی فریزر با کمپرسور سرعت متغیر برابر با ۰/۸۴۳ کیلووات بر روز است و این مصرف انرژی، شاخصی[8] برابر با EEI = ۳۹/۵ را به همراه دارد.



شکل ۹: گراف کمپرسور سرعت متغیر با دو توان متفاوت.

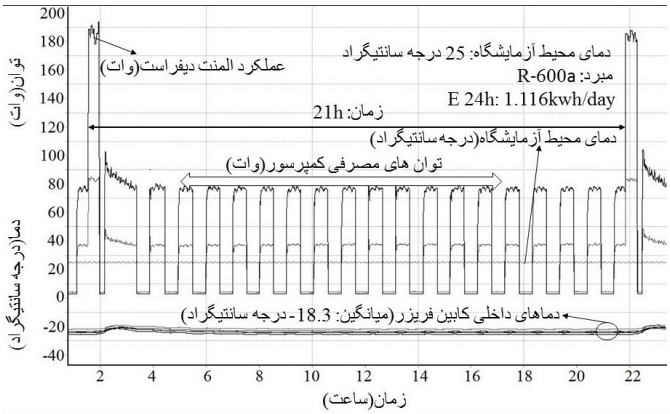
[8]energy efficiency index

شکل ۱۰ گراف دمایی داخل کابین فریزر خانگی با کمپرسور سرعت متغیر را نشان می‌دهد که به تعادل دمایی رسیده است.



شکل ۱۰: گراف فریزر خانگی با کمپرسور سرعت متغیر.

و همچنین شکل ۱۱ گراف دمایی داخل کابین فریزر خانگی با کمپرسور سرعت ثابت را نشان می‌دهد که به تعادل دمایی رسیده است. مدت زمان چرخه کاری که در شکل ۱۱ نشان داده شده ۲۱ ساعت است و بالاترین دمای داخلی کابین فریزر در دمای محیط ۲۵ درجه سانتیگراد برابر با ۱۸/۳– درجه سانتیگراد بوده و این دمای داخل فریزر بالاترین دمای قابل قبول برای تست مصرف انرژی است.

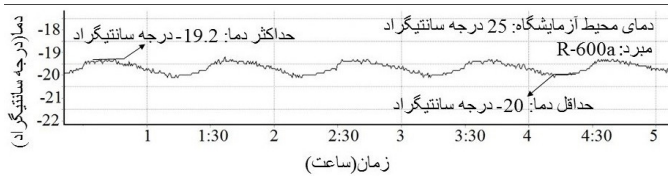


شکل ۱۱: گراف فریزر خانگی با کمپرسور سرعت ثابت.

در این چرخه کاری میزان مصرف انرژی فریزر با کمپرسور سرعت ثابت برابر با ۱/۱۱۶ کیلووات ساعت بر روز است و این مصرف انرژی شاخصی برابر با EEI = ۵۲/۳ را به همراه دارد.

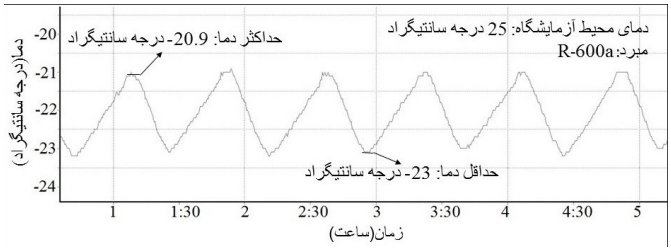
کمپرسور سرعت متغیر برق ورودی AC متناوب را به DC مستقیم تبدیل می‌کند و با کنترل فرکانس دور کمپرسور تنظیم می‌شود و دیگر برای استارت اولیه و همچنین کارکرد نیازی به خازن ندارد، زیرا یکی از مشکلات و عوامل مصرف زیاد انرژی استفاده از خازن مخصوصاً در هنگام استارت، است که ولتاژ زیادی از شبکه برق می‌گیرد. از خازن در کمپرسورهای سرعت ثابت استفاده می‌شود. خازن به صورت دائم کار ذخیره و تامین ولتاژ را برای کمپرسور به عهده دارد. به دلیل تغذیه با جریان مستقیم DC در کمپرسورهای سرعت متغیر، به جای آهنربای القایی که با جریان برق کار می‌کند، از نوع مغناطیس دایمی استفاده می‌شود که باعث کاهش مصرف برق می‌شود و همچنین نیاز به راه اندازی اولیه ندارد، کمپرسورهای سرعت متغیر با حداقل توان و سرعت کم راه‌اندازی شده و به مرور و متناسب با نیاز، سرعت و توان آن بالا می‌رود.

شکل ۱۲ حداقل و حداکثر دمای داخلی کابین فریزر خانگی با کمپرسور سرعت متغیر را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: دمای داخل کابین فریزر با کمپرسور سرعت متغیر.

شکل ۱۳ حداقل و حداکثر دمای داخل کابین فریزر خانگی با کمپرسور سرعت ثابت را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳: دمای داخل کابین فریزر با کمپرسور سرعت ثابت.

گراف‌های ارایه شده در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ که نتایج آزمایش‌های انجام شده در رابطه با دمای داخل کابین فریزر خانگی است مشخص شده که فریزر خانگی با کمپرسور سرعت متغیر از ثبات دمایی بهتری نسبت به کمپرسور سرعت ثابت برخوردار است. فریزر خانگی، با کمپرسور سرعت متغیر دارای تغییرات دما در یکی از طبقات بین ۱۹/۲– درجه سانتیگراد الی ۲۰– درجه سانتیگراد است و در فریزر خانگی، با کمپرسور سرعت ثابت تغییرات دما در همان طبقه بین ۲۰/۹– درجه سانتیگراد الی ۲۳– درجه سانتیگراد است.

به دلیل سرعت‌های مختلف در کمپرسورهای سرعت متغیر، همانطور که مشاهده می‌گردد، در دمای محیط ۲۵ درجه سانتیگراد برای صرفه جویی در مصرف انرژی از یک سرعت کمپرسور سرعت متغیر استفاده شده است. با توجه به شرایط محیطی و کارکردی فریزر خانگی سرعت متناسب انتخاب و تنظیم می‌گردد. فریزر خانگی با فرکانس‌های متغیر برای دستیابی به عملکرد مناسب دارای روش‌های کنترل متفاوتی نسبت به فریزر با فرکانس ثابت است.

پس با توجه به نتایج آزمایش‌ها عمده‌ترین مزایای کمپرسورهای سرعت متغیر نسبت به کمپرسورهای سرعت ثابت عبارتند از:

۱. در فریزر با کمپرسور سرعت ثابت، دمای داخلی فریزر دارای نوسانات زیادی است اما با استفاده از کمپرسورهای سرعت متغیر دما پایدارتر می‌شود.

۲. میزان سر و صدای ایجاد شده به وسیله فریزرهایی که از تکنولوژی سرعت متغیر استفاده کرده‌اند، در مقایسه با فریزرهایی که از کمپرسورهای سرعت ثابت استفاده کرده‌اند، کمتر است.

۳. هنگامی که دما به حالت پایدار می‌رسد مصرف انرژی بسیار کمتر می‌شود.
۴. اگر چه قیمت فریزرهای خانگی که با کمپرسور سرعت متغیر عرضه می‌شوند بیشتر است، اما از آنجایی که مقدار قابل توجهی در مصرف برق و انرژی صرفه‌جویی می‌کنند، از نظر اقتصادی بسیار به‌صرفه‌تر هستند.
۵. در کمپرسورهای سرعت ثابت، استارت کمپرسور با لرزش و صدای موتور همراه است و همچنین مصرف برق در هنگام استارت بسیار بالا است. اما در کمپرسورهای سرعت متغیر دوران موتور با دور متغیر صورت می‌گیرد و می‌توان گفت کمپرسور خاموش نمی‌شود و فقط با توجه به میزان سرمای مورد نیاز میزان دور موتور زیاد و کم می‌شود که استفاده از این تکنولوژی سبب افزایش عمر کمپرسور می‌شود.

در این مقاله، مصرف انرژی کمپرسور سرعت متغیر با کمپرسور سرعت ثابت مقایسه شد و برخی از مزایای کمپرسور سرعت متغیر نسبت به کمپرسور سرعت ثابت بیان شد. کمپرسورهای سرعت متغیر ظرفیت‌های تبرید مختلفی دارد و راندمان انرژی سرعت متغیرها بالاتر از نوع سرعت ثابت‌ها است. با توجه به آزمایش‌های مختلفی که انجام شد فریزر خانگی با کمپرسور سرعت متغیر دارای ثبات دمایی بهتری نسبت به کمپرسور سرعت ثابت است.

۲.۳ روش تعیین شاخص بازده انرژی [۱۴]

شاخص بازده انرژی براساس رابطه زیر محاسبه و تا یک رقم اعشار گرد می‌شود:

$$\mathrm{EEI}=\frac{\mathrm{AE}_c}{\mathrm{SAE}_c}\times ۱۰۰ \qquad (۱)$$

که در آن AE_c مصرف انرژی سالیانه وسیله برودتی خانگی[۹] و SAE_c مصرف انرژی سالیانه استاندارد وسیله برودتی خانگی[۱۰] است.

برای تعیین مصرف انرژی سالیانه یک وسیله برودتی، مصرف انرژی وسیله برودتی برای مدت ۲۴ ساعت اندازه‌گیری می‌شود و سپس مصرف انرژی سالیانه آن از رابطه زیر محاسبه و تا ۲ رقم اعشار گرد می‌شود:

$$\mathrm{AE}_c=E_{۲۴h}\times ۳۶۵\,. \qquad (۲)$$

$E_{۲۴h}$ مصرف انرژی وسیله برودتی خانگی برحسب کیلو وات ساعت بر روز است که تا ۳ رقم اعشار گرد شده است.

برای تعیین مصرف انرژی سالیانه استاندارد از رابطه‌ی زیراستفاده شده و بر حسب کیلووات بر سال محاسبه و تا ۲ رقم اعشار گرد می‌شود.

$$\mathrm{SAE}_c=V_{eq}M+N+\mathrm{CH} \qquad (۳)$$

که در آن V_{eq} حجم معادل[۱۱] وسیله برودتی خانگی است. CH برای وسیله برودتی خانگی که در آن حجم مفید محفظه دما پایین حداقل ۱۵ لیتر است، برابر با ۵۰ کیلووات ساعت بر سال بوده و در سایر موارد صفر در نظر گرفته می‌شود.

به علت اینکه در این مدل، فریزر خانگی دارای حجم مفید محفظه دما پایین نیست بنابراین، CH برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. مقادیر M و N برای هر گروه از وسایل برودتی خانگی متفاوت است. مقادیر M و N برای فریزر خانگی ایستاده به ترتیب برابر با ۰٫۵۳۹ و ۳۱۵ در نظر گرفته می‌شود.

حجم معادل یک وسیله برودتی خانگی، مجموعه‌ای از حجم‌های معادل همه محفظه‌ها است که بر حسب لیتر محاسبه و تا نزدیک‌ترین عدد صحیح گرد می‌شود و رابطه آن به صورت زیر است.

$$V_{eq}=\left[\sum_{c=۱}^{c=n}V_c\times\frac{۲۵-T_c}{۲۰}\times \mathrm{FF}_c\right]\times \mathrm{CC}\times \mathrm{BI} \qquad (۴)$$

که در آن: n تعداد محفظه‌ها، V_c حجم مفید هر محفظه/محفظه‌ها، T_c دمای اسمی هر محفظه، $\frac{۲۵-T_c}{۲۰}$ ضریب ترمودینامیکی، FF_c ضریب تصحیح حجم هر محفظه/محفظه‌ها، CC و BI ضرایب تصحیح[۱۲] هستند

حجم مفید محفظه‌ها برای فریزر خانگی ۳۰۳ لیتر است. دمای اسمی برای محفظه فریزر خانگی ۴ ستاره ۱۸− درجه سانتیگراد و مقدار ضریب تصحیح حجم محفظه فریزر خانگی برابر با ۱٫۲ است.

ضرایب تصحیح حجم برای CC برابر با ۱٫۲ و برای BI برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود.

نتایج محاسبه شاخص مصرف انرژی و تعیین گرید آن برای فریزر خانگی با کمپرسور سرعت متغیر به شرح ذیل است:

$$\mathrm{EEI}=\frac{\mathrm{AE}_c}{\mathrm{SAE}_c}\times ۱۰۰=\frac{۳۰۷/۶۹۵}{۷۷۸/۴۹۳}\times ۱۰۰=۳۹/۵\,,$$
$$\mathrm{AE}_c=E_{۲۴h}\times ۳۶۵=۰/۸۴۳\times ۳۶۵=۳۰۷/۶۹۵\,\mathrm{kWh/year}\,,$$
$$\mathrm{SAE}_c=V_{eq}\times M+N+\mathrm{CH}$$
$$=۸۱۵/۹۱۴\times ۰/۵۳۹+۳۱۵+۰=۷۷۸/۴۹۳\,\mathrm{kWh/year}\,,$$
$$V_{eq}=\left[\sum_{c=۱}^{c=n}V_c\times\frac{۲۵-T_c}{۲۰}\times \mathrm{FF}_c\right]\times \mathrm{CC}\times \mathrm{BI}$$
$$=[۳۰۳\times ۲/۱۵\times ۱/۲]\times ۱/۱\times ۱=۸۵۹/۹۱۴\,\mathrm{lit}\,,$$

و نتایج محاسبه شاخص مصرف انرژی و تعیین گرید آن برای فریزر خانگی با کمپرسور سرعت ثابت به شرح ذیل است:

$$\mathrm{EEI}=\frac{\mathrm{AE}_c}{\mathrm{SAE}_c}\times ۱۰۰=\frac{۴۰۷/۶۹۵}{۷۷۸/۴۹۳}\times ۱۰۰=۵۲/۳\,,$$
$$\mathrm{AE}_c=E_{۲۴h}\times ۳۶۵=۱/۱۱۶\times ۳۶۵=۴۰۷/۳۴\,\mathrm{kWh/year}\,,$$
$$\mathrm{SAE}_c=V_{eq}\times M+N+\mathrm{CH}$$
$$=۸۱۵/۹۱۴\times ۰/۵۳۹+۳۱۵+۰=۷۷۸/۴۹۳\,\mathrm{kWh/year}\,,$$
$$V_{eq}=\left[\sum_{c=۱}^{c=n}V_c\times\frac{۲۵-T_c}{۲۰}\times \mathrm{FF}_c\right]\times \mathrm{CC}\times \mathrm{BI}$$
$$=[۳۰۳\times ۲/۱۵\times ۱/۲]\times ۱/۱\times ۱=۸۵۹/۹۱۴\,\mathrm{lit}\,.$$

[9] annual energy consumption [10] standard annual energy consumption [11] equivalent volume [12] volume correction factor

۳.۳ گروه بازده انرژی

گروه بازده انرژی یک وسیله برودتی خانگی براساس شاخص بازدهی انرژی (EEI) که در جدول ۵ نشان داده شده است، مشخص می‌شود.

جدول ۵: گروه بازده مصرف انرژی [۱۴].

شاخص بازده انرژی	گروه بازده مصرف انرژی
$۳۳ \leq \text{EEI} < ۴۲$	A^+
$۴۲ \leq \text{EEI} < ۵۵$	A

۴ نتیجه‌گیری

با آزمایش‌هایی که انجام داده شد، نتیجه گرفته می‌شود، که می‌توان استفاده از کمپرسورهای سرعت متغیر را مورد توجه قرار داد. سیستم‌های سرعت متغیر علاوه بر دمای پایدارتر و کاهش مصرف انرژی با دارا بودن سرعت‌های مختلف باعث انجماد سریع نیز می‌شود. سرعت‌های مختلف کمپرسور با توجه به تغییرات دمای محیط و دمای تنظیمی فریزر خانگی تغییر می‌کنند. در فریزر خانگی با کمپرسور سرعت متغیر به علت دارا بودن فرکانس متغیر با برخی روش‌های کنترل مناسب می‌توان به عملکرد مناسب دست یافت. تست مصرف انرژی فریزر خانگی در شرایطی که درب فریزر خانگی در طول تست کاملا بسته می‌ماند انجام می‌شود. راندمان و مصرف انرژی فریزر خانگی با کمپرسور سرعت متغیر با توجه به نتایج آزمایش‌ها بهتر از کمپرسور سرعت ثابت است. مصرف انرژی فریزر خانگی با کمپرسور سرعت متغیر ۲۴ درصد کاهش یافته و تغییرات دمایی محفظه فریزر خانگی با کمپرسور سرعت متغیر نیز کاهش می‌یابد.

سپاسگزاری

از استادان گرامی که با راهنمایی‌های ارزنده و دلسوزانه خود، ما را در ارائه این مقاله یاری نمودند، و همچنین از مسئولین محترم شرکت نیکسان صنعت ساوه که در انجام این تحقیق همکاری و مساعدت مالی نمودند، کمال تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

[1] Liang, Kun. A review of linear compressors for refrigeration. *International Journal of Refrigeration*, 84:253–273, 2017.

[2] Park, K, Hong, E, and Lee, HK. Linear motor for linear compressor. 2002.

[3] Cadman, RV and Cohen, R. Electrodynamic oscillating compressors: Part 1—design based on linearized loads. 1969.

[4] Chang, Wenruey, Shaut, Tsongse, Lin, Chiangho, and Lin, Kueitien. Implementation of inverter-driven household refrigerator/freezer using hydrocarbon isobutane for refrigeration. 2008.

[5] Janke, Isabel, dos Santos Silveira, Alexsandro, and Melo, Cláudio. A design approach for liquid separators applied to household refrigerators. *International Journal of Refrigeration*, 98:354–361, 2019.

[6] Bradshaw, Craig R. A miniature-scale linear compressor for electronics cooling. 2012.

[7] Liang, Kun. *A novel linear electromagnetic-drive oil-free refrigeration compressor*. Ph.D. thesis, University of Oxford, 2014.

[8] Bradshaw, Craig R, Groll, Eckhard A, and Garimella, Suresh V. A comprehensive model of a miniature-scale linear compressor for electronics cooling. *International journal of refrigeration*, 34(1):63–73, 2011.

[9] Ku, Boncheol, Park, Junghoon, Hwang, Yujin, and Lee, Jaekeun. Performance evaluation of the energy efficiency of crank-driven compressor and linear compressor for a household refrigerator. 2010.

[10] Bailey, P. B., Dadd, M. W., and Stone, C. R. Cool and straight: linear compressors for refrigeration. *Proceedings of Institute of Refrigeration*, pp. 1–4, 2011.

[11] Lamantia, M, Contarini, A, and Giovanni, S. Numerical and experimental analysis of a linear compressor. 2002.

[12] Kim, Jong Kwon and Jeong, Ji Hwan. Performance characteristics of a capacity-modulated linear compressor for home refrigerators. *International Journal of Refrigeration*, 36(3):776–785, 2013.

[13] IEC. Household refrigerating appliances – characteristics and test methods, 2015.

[14] delegated regulation (EU), Commission. Energy labeling of household refrigerating appliances, 2010.

[15] Samsung (2017)-products. https://www.samsung.com/global/business/compressor/recipro-compressor/all-recipro- compressor.

[16] AHRC 700. Standard specification for refrigerants, 2015.

[17] Rasti, M, Hatamipour, MS, Aghamiri, SF, and Tavakoli, M. Enhancement of domestic refrigerator's energy efficiency index using a hydrocarbon mixture refrigerant. *Measurement*, 45(7):1807–1813, 2012.

[18] Espíndola, Rodolfo S, Knabben, Fernando T, Melo, Cláudio, and Hermes, Christian JL. Performance evaluation of household refrigerators running with r600a contaminated with non-condensable gases. *International Journal of Refrigeration*, 111:86–93, 2020.

[19] Visek, Matej, Joppolo, Cesare Maria, Molinaroli, Luca, and Olivani, Andrea. Advanced sequential dual evaporator domestic refrigerator/freezer: System energy optimization. *International journal of refrigeration*, 43:71–79, 2014.

[20] IEC 60417-1. Graphical symbols for use on equipment, 1998.

[21] Sarntichartsak, Pongsakorn and Thepa, Sirichai. Modeling and experimental study on the performance of an inverter air conditioner using r-410a with evaporatively cooled condenser. *Applied Thermal Engineering*, 51(1-2):597–610, 2013.