



Experimental Study of the Effect of Nebulizer on the Performance Coefficient of Direct Expansion Air Conditioning Systems

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Jodat A.^{*1} PhD,
Najafian M.² MSc

How to cite this article

Jodat A, Najafian M. Experimental Study of the Effect of Nebulizer on the Performance Coefficient of Direct Expansion Air Conditioning Systems. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(8):2113-2120.

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Bojnord, Bojnord, Iran

²Department of Research and Development, Technology Development Company, University of Bojnord, Bojnord, Iran

*Correspondence

Address: University of Bojnord, 4/ km of Sfarayen Rowd, Bojnord, Iran.
Postal Code: 945319111.
Phone: +98 (58) 32223228
Fax: +98 (58)32284605
amin.jodat@yahoo.com

Article History

Received: December 01, 2019
Accepted: June 02, 2020
ePublished: August 15, 2020

ABSTRACT

In this experimental study, the condensed water in the evaporator coil was injected using the nebulizer technology into the condenser inlet air and its effect on the performance coefficient was studied. The testing equipment employed in the present study consisted of an air conditioner tunnel with the dimensions of 200×35×35cm, which had the compression refrigeration cycle of 1-ton refrigeration with R404a refrigerant. A data logger with pressure and temperature sensors installed at various points of the unit accurately recorded the measured data. The results indicated that the use of a nebulizer would reduce the compressor outlet pressure and compressor power consumption and also increase the performance coefficient. By increasing the air temperature to the condenser from 21 to 36°C, the use of a nebulizer reduced compressor outlet pressure by more than 27%, decreased compressor power consumption by more than 8%, and increased the performance coefficient more than 64%. The results demonstrate the nebulizer technology could be used on hot days of the year by recycling wastewater from air conditioning systems, as a practical and low-cost method to increase the efficiency of direct expansion air conditioning systems.

Keywords Experimental Setup; Coefficient of Performance; Nebulizer; Energy Recovery; Direct Expansion Air Condition Systems

CITATION LINKS

[1] Advances in heat pump systems: A review [2] An experimental study on a modified air conditioner with a domestic hot water supply (ACDHWS) [3] Experimental investigations on a conventional air-conditioner working as air-water heat pump [4] Hot water making potential using of a conventional air-conditioner as an air-water heat pump [5] Applying storage-enhanced heat recovery room air-conditioner (SEHRAC) for domestic water heating in residential buildings in Hong Kong [6] Heat recovery from refrigerator using water heater and hot box [7] Experimental study of split air conditioner with and without trombone coil condenser as air conditioning water heater [8] Modeling and simulation of vapor compression refrigeration cycle [9] Investigation of energy recovery with exhaust air evaporative cooling in ventilation system [10] Performance enhancement of vapour compression refrigeration system with utilization of condenser waste heat in water heater [11] A frost-free dedicated outdoor air system with exhaust air heat recovery [12] Application of the heat pipe to enhance the performance of the vapor compression refrigeration system [13] Performance analysis of a novel augmented desalination and cooling system using modified vapor compression refrigeration integrated with humidification-dehumidification desalination [14] The physical and biological effects of high-frequency sound-waves of great intensity [15] Evaluation and design of new piezoelectrical droplets generator [16] Ultrasonic-assisted convective drying of apple slices [17] Modeling ultrasonically assisted convective drying of eggplant [18] Air-borne ultrasound application in the convective drying of strawberry [19] Influence of high-intensity ultrasound on drying kinetics of persimmon [20] Experimental study of injecting water vapor and oil compounds by nebulizer on the efficiency and natural gas flame pollution [21] Ultrasonic gasoline evaporation transducer-reduction of internal combustion engine fuel consumption using axiomatic design [22] Using power ultrasound for the regeneration of dehumidizers in desiccant air-conditioning systems: A review of prospective studies and unexplored issues

بررسی تجربی تأثیر نبولایزر بر ضریب عملکرد سیستم‌های تهویه مطبوع انبساط مستقیم

امین جودت* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران

مجتبی نجفیان MSc

بخش تحقیق و توسعه، شرکت توسعه فناوری، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران

چکیده

در این پژوهش به صورت تجربی، با استفاده از تکنولوژی نبولایزر، اثر تزریق آب تقطیر شده در کویل تبخیرکننده، بر هوای ورودی چگالنده در جهت افزایش ضریب عملکرد سیستم‌های تهویه مطبوع انبساط مستقیم مطالعه شده است. دستگاه آزمایشگاهی از یک تونل تهویه مطبوع به ابعاد $35 \times 35 \times 20$ سانتی‌متر تشکیل شده است که دارای یک چرخه تبرید تراکمی به ظرفیت یک تن تبرید با مبرد R404a است. سیستم کنترلی و ثبت داده‌ها به همراه سنسورهای فشار و دمای نصب شده در نقاط مختلف این دستگاه، قابلیت ثبت داده‌های اندازه‌گیری را با دقت خوب تأمین نموده است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از نبولایزر سبب کاهش فشار خروجی و توان مصرفی کمپرسور شده و ضریب عملکرد چرخه تبرید را افزایش خواهد داد. با افزایش دمای هوای عبوری از سطح چگالنده، استفاده از نبولایزر اثربخشی بیشتری خواهد داشت. با افزایش دمای هوای عبوری چگالنده از ۲۱ به ۳۶ درجه سانتی‌گراد، استفاده از نبولایزر موجب کاهش فشار خروجی کمپرسور تا بیش از ۲۷٪، کاهش توان مصرفی کمپرسور بیش از ۸٪ و افزایش ضریب عملکرد چرخه تبرید بیش از ۶۴٪ خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد تکنولوژی نبولایزر در روزهای گرم سال می‌تواند با بازیافت آب اتلافی سیستم‌های تهویه مطبوع، به‌عنوان روشی عملی و کم‌هزینه جهت افزایش ضریب عملکرد سیستم‌های تهویه مطبوع انبساط مستقیم استفاده شود.

کلیدواژه‌ها: بستر آزمایش، ضریب عملکرد، نبولایزر، بازیافت انرژی، سیستم‌های تهویه مطبوع انبساط مستقیم

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۱۳

*نویسنده مسئول: amin.jodati@yahoo.com

مقدمه

با توجه به کاربرد گسترده سیستم‌های تهویه مطبوع انبساط مستقیم در مصارف خانگی و صنایع و سهم عمده این سیستم‌ها در مصرف انرژی الکتریکی، طراحی روش‌هایی که باعث کاهش و بهینه‌شدن مصرف شود یکی از اهداف مهندسی در این زمینه بوده است. ظرفیت مناسب آب تقطیر شده در کویل‌های برودتی و دفع میزان قابل توجهی از انرژی حرارتی چگالنده به محیط می‌تواند معیار قابل قبولی برای انتخاب روشی مناسب به‌منظور بازیابی انرژی اتلافی باشد [1]. در سال‌های اخیر با توجه به مشکلات زیست‌محیطی ناشی از گرمایش کره زمین و اهمیت صرفه‌جویی در مصرف انرژی، محققان بسیاری روش‌های متعددی برای بازیابی انرژی اتلافی و افزایش ضریب عملکرد چرخه‌های تبرید پیشنهاد داده‌اند. با توجه به متفاوت بودن موقعیت جغرافیایی و هزینه‌های تأمین انرژی، همواره صحبت در مورد کارآمد بودن این روش‌ها با شک و تردید همراه بوده است. جیانگ و همکاران [2]، بازیافت

انرژی حرارتی چگالنده‌های هوایی کولرهای گازی را به صورت آزمایشگاهی مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آنها مشاهده نمودند که با این روش می‌توان به صورت مداوم آب گرم مصرفی تولید نمود و ضریب عملکرد سیستم تبرید تا $38/6\%$ نسبت به حالت بدون مبدل افزایش خواهد یافت. وانگ و همکاران [3]، بازیافت انرژی برای سیستم تهویه مطبوع انبساط مستقیم یک ساختمان مسکونی را مطالعه کردند. جهت انجام این کار آزمایشگاهی از یک مخزن آب به همراه مبدل حرارتی استفاده نمودند به گونه‌ای که مبدل حرارتی و مخزن آب مرتبط با آن، در مسیر موازی با چگالنده هوایی قرار گرفت. آنها مشاهده نمودند که با این روش بازیافت حرارت چگالنده، علاوه بر تأمین آب گرم مصرفی، می‌توان ضریب عملکرد سیستم تهویه مطبوع انبساط مستقیم را تا 10% بهبود بخشید و همچنین نتایج آنها نشان داد دمای متوسط مخزن آب گرم بر ضریب عملکرد تأثیر دارد. چاونگسا و دانگتونگسوک [4]، امکان استفاده از یک پمپ حرارتی به ظرفیت یک تن تبرید را جهت تأمین آب گرم مصرفی مطالعه نموده و تأثیر آن را روی ضریب عملکرد چرخه تبرید بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که با استفاده از مخزن تأمین آب گرم مصرفی علاوه بر ذخیره انرژی می‌توان مصرف توان الکتریکی کمپرسور را کاهش داد. جیا و لی [5]، بازیافت انرژی سیستم‌های تهویه مطبوع در تولید آب گرم مصرفی را برای ساختمان‌های مسکونی شهر هنگ‌کنگ مطالعه نمودند. آنها دریافتند که این روش به‌عنوان روشی ارزشمند می‌تواند در تولید آب گرم مصرفی ساختمان‌های مسکونی استفاده شود و علاوه بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌تواند در حدود $9/3\%$ انرژی مصرفی ساختمان‌های مسکونی مورد مطالعه را کم کرده و مصرف سوخت را نیز تا 50% کاهش دهد. جادهاو و همکاران [6]، به بررسی آزمایشگاهی بازیافت انرژی حرارتی چگالنده یک یخچال به ظرفیت 90 لیتر پرداختند نتایج نشان داد که می‌توان از انرژی چگالنده جهت تأمین آب گرم مصرفی تا دمای 47 درجه سانتی‌گراد استفاده نمود و این روش ضریب عملکرد سیستم را افزایش خواهد داد. عزیز و همکاران [7]، در رابطه با بازیافت انرژی اتلافی چگالنده کولرهای گازی خانگی مطالعه کردند. آنها در دستگاه آزمایشگاهی یک کویل مستغرق در مخزن آب به ظرفیت 50 لیتر، بین کمپرسور و چگالنده یک دستگاه کولر گازی خانگی تعبیه نمودند. تحقیقات آزمایشگاهی آنها نشان داد با استفاده از این کویل مستغرق ضریب عملکرد چرخه تبرید و انرژی مصرفی کمپرسور به ترتیب در حدود 12 و 2% افزایش خواهد یافت و انرژی بازیافت شده را می‌توان برای تولید آب گرم با دمای 64 درجه سانتی‌گراد برای مصارف مسکونی استفاده کرد.

ویسی و حاجی‌داوولوا [8]، با مدل‌سازی چرخه تبرید تراکمی یک دستگاه کولر گازی دوتکه نشان دادند که افزایش دمای هوای محیط باعث افزایش کار مصرفی کمپرسور و کاهش ضریب عملکرد چرخه تبرید خواهد شد. در حالی که افزایش رطوبت نسبی محیط سبب بهبود انتقال حرارت از چگالنده می‌شود، طوری که افزایش

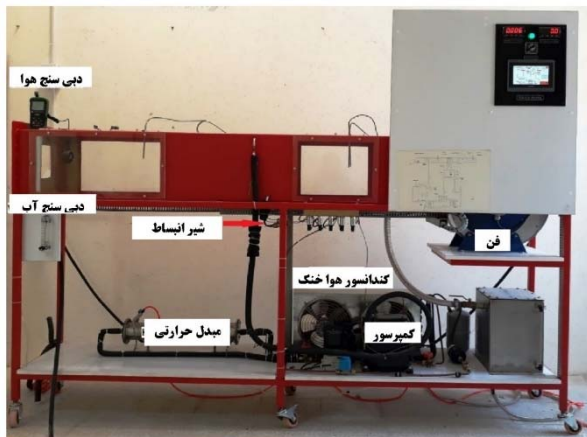
چگالنده یک سیستم تهویه مطبوع انبساط مستقیم پرداختند. در دستگاه پیشنهادی قطرات تزریق شده آب شور پس از تبخیر در سطح چگالنده، توسط جریان هوای برگشتی از سطح اوپراتور عبور نموده و وارد ساختمان می‌شود. مطالعات تئوری آنها نشان داد که این روش، فشار مبرد خروجی چگالنده را حدود ۱۶٪ کاهش داده و موجب کاهش ۲۲ درصدی کار کمپرسور می‌شود که در نتیجه آن ضریب عملکرد دستگاه نیز افزایش می‌یابد.

امروزه در بسیاری از صنایع روش‌های رطوبت‌زنی که با بازده بالاتر و دستگاه‌های کوچک‌تر انجام شود بسیار مورد علاقه است. استفاده از حوزه‌های مافوق صوت در تبخیر مایعات می‌تواند کاربردهای فراوانی در صنایع داشته باشد. یکی از اهداف استفاده از امواج مافوق صوت، افزایش نرخ تبخیر است که نقش کلیدی در فرآیندهای رطوبت‌زنی، احتراق سوخت‌های مایع، مصرف پزشکی و غیره دارد. پدیده تولید مه آب با استفاده از امواج مافوق صوت، اولین بار توسط وود و لامیس^[14] گزارش شد. این تکنولوژی امروزه به‌طور شایع برای انتقال داروهای افشانه‌ای در بیماران ریوی استفاده می‌شود^[15]. مزایای استفاده از تکنولوژی نپولایزر (Nebulizer) نظیر مصرف انرژی پایین، افزایش نرخ تبخیر، ابعاد کوچک دستگاه و قابلیت کنترل بهتر سبب شده است که در سال‌های اخیر محققان، تحقیقات گسترده‌ای را در زمینه استفاده از نپولایزر در صنایع تهویه مطبوع، خشک کردن میوه‌ها و سبزیجات^[16-19]، احتراق^[20, 21]، و غیره انجام دهند. یابو^[22] به‌صورت آزمایشگاهی، استفاده از سیستم نپولایزر و امواج مافوق صوت در دستگاه‌های تهویه مطبوع را مورد بررسی قرار داد. او توانست با استفاده از تکنولوژی مافوق صوت، سیستم تهویه تبخیری با بازدهی بالا بسازد. کارسل و همکاران^[19]، در مطالعات آزمایشگاهی نشان دادند که با استفاده از امواج مافوق صوت در فرآیند خشک کردن میوه‌ها می‌توان علاوه بر افزایش سرعت فرآیند، مصرف انرژی را هم کاهش داد. جودت و همکاران^[20]، در مطالعات آزمایشگاهی نشان دادند که با تزریق آب و ترکیبات نفتی با استفاده از دستگاه نپولایزر می‌توان علاوه بر افزایش راندمان مشعل‌های گازی مقدار آلاینده‌ها را نیز کاهش داد. جانسون و همکاران^[21]، کاربرد امواج مافوق صوت را در تزریق سوخت موتورهای گازوییل سوز به‌صورت آزمایشگاهی مطالعه نمودند و بیان کردند استفاده از این تکنولوژی می‌تواند افزایش راندمان و کاهش میزان آلاینده‌ها را برساند.

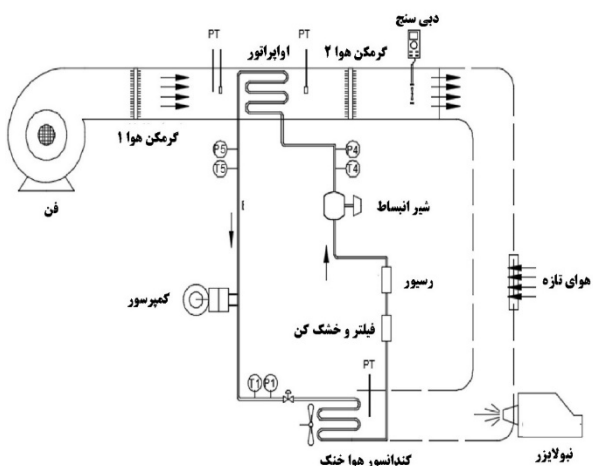
با وجود تمام تحقیقاتی که در زمینه بهینه‌سازی سیستم‌های تهویه مطبوع انجام گرفته است با توجه به استفاده روزافزون از سیستم‌های تبرید تراکمی، نیاز به تکمیل تحقیقات و یافتن روش‌های عملی جهت بازیابی انرژی و افزایش ضریب عملکرد چرخه‌های تبرید احساس می‌شود. هدف از انجام این پژوهش استفاده از تکنولوژی نپولایزر در سیستم‌های پرکاربرد تهویه مطبوع انبساط مستقیم است. لذا در این پژوهش با بازیافت آب اتلافی در کویل اوپراتور سیستم تبرید و تزریق آن بر جریان هوای ورودی

۱۰٪ رطوبت نسبی محیط سبب می‌شود ضریب عملکرد دستگاه تحت بررسی، به‌طور متوسط ۶/۵٪ افزایش یابد. جابر و عزت^[9]، اقدام به ساخت یک مدل بازیابی انرژی با مبدل هوا به هوا و خنک‌کننده تبخیری در مسیر هوای تخلیه نمودند و توانستند عملکرد حرارتی را به لحاظ نظری و آزمایشگاهی در آب و هوای مدیترانه بررسی نمایند. شبیه‌سازی انجام شده نشان داد که با استفاده از مبدل هوا به هوا، میزان سالیانه مصرف انرژی ۷/۹۷٪ در زمستان و ۴/۸۶٪ در تابستان نسبت به حالت بدون مبدل کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده نمودند که در اثر رطوبت‌زنی (واحد خنک‌کننده تبخیری) به جریان هوای خروجی، بار سرمایش نسبت به بار پایه ۱۳/۳۸٪، کاهش می‌یابد که این موضوع سبب کاهش انتشار ۵۹۰ کیلوگرم کربن دی‌اکسید در سال، برای سیستم مورد بررسی می‌شود. رام و سونی^[10]، به مطالعه یک چرخه تبرید آزمایشگاهی پرداختند که در آن از یک کمپرسور ۱۰۰ وات با چگالنده R134a، یک مبدل حرارتی با لوله‌های مسی به‌عنوان چگالنده، لوله مویین (منبسط‌کننده) و یک کویل مسی غوطه‌ور در ظرف آبی با حجم ۴/۲ لیتر به‌عنوان تبخیرکننده استفاده شده بود. آنها با اضافه کردن یک کویل مسی غوطه‌ور در ظرف آبی به حجم ۴/۲ لیتر بین کمپرسور و چگالنده تحت عنوان محفظه سرد، آن را در سه حالت خالی بودن محفظه سرد، پر بودن محفظه سرد با آب ساکن و پر بودن محفظه سرد در حالی که آب با دبی ۰/۱۶۶ لیتر بر ثانیه و سرعت ۲/۱۲ متر بر ثانیه در محفظه گردانده می‌شود، آزمایش کردند. بهترین نتایج در حالت پر بودن محفظه سرد با آب ساکن اتفاق افتاد. نتایج نشان داد کمترین دمای خروجی چگالنده، کمترین کار کمپرسور همچنین بیشترین مقدار ضریب عملکرد چرخه تبرید در حالت پر بودن محفظه سرد با آب ساکن اتفاق می‌افتد. همچنین مشاهده شد دمای آب در ظرف آبی که به‌عنوان تبخیرکننده استفاده شده بود حداکثر به ۴۴ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. ژانگ و همکاران^[11]، به مطالعه سیستمی پرداختند که به‌وسیله آن بتوانند انرژی اتلافی از هوای برگشتی را بازیابی نمایند. آنها با استفاده از یک چگالنده که یک بخش آن در مسیر هوای رفت، یک بخش در مسیر هوای برگشت و بخش اصلی در معرض فن در هوای آزاد قرار دارد، اتلاف انرژی در کانال هوای برگشتی را در چرخه سرمایش بازیابی کردند. با مدل‌سازی سیستم برای دمای حباب خشک ۳۰ تا ۳۸ درجه سانتی‌گراد و دمای حباب تر ۲۸ درجه سانتی‌گراد مشاهده کردند که ضریب عملکرد چرخه تبرید از ۳/۹ به ۳/۱ کاهش می‌یابد، این موضوع در نتیجه افزایش دمای سطح چگالنده در اثر افزایش دمای حباب خشک خارج است. تاکاوا و همکاران^[12]، به مطالعه آزمایشگاهی استفاده از لوله‌های حرارتی جهت افزایش ضریب عملکرد سیستم‌های تهویه مطبوع انبساط مستقیم پرداختند. نتایج آنها نشان داد که استفاده از لوله‌های حرارتی در این سیستم‌ها موجب افزایش ۳/۱۱ درصدی ضریب عملکرد خواهد شد. آتانند و موروگاوا^[13]، با استفاده از مدل‌سازی ریاضی به مطالعه اثر تزریق قطرات آب شور بر سطح

در کویل تبخیرکننده سیستم تهویه مطبوع، به هوای ورودی چگالنده از دستگاه نبولایزر استفاده شده است. سیستم پی‌ال‌سی (PLC) نصب شده بر روی دستگاه به همراه نمایشگر لمسی آن قابلیت کنترل و ثبت کلیه فرآیندهای تهویه و تبرید را دارا است. در جدول ۱ مشخصات لوازم اندازه‌گیری به‌کاررفته در بستر آزمون تهویه مطبوع به همراه دامنه کاربرد، تعداد و دقت آنها آمده است. قبل از شروع آزمایش کلیه سنسورهای اندازه‌گیری کالیبره شده‌اند. برای اطمینان از صحیح بودن نتایج به دست آمده، آزمایش‌ها در دو نوبت تکرار و عدم قطعیت توسعه‌یافته اندازه‌گیری هر پارامتر با سطح اطمینان ۹۰٪ محاسبه شده است.



شکل ۱) سیستم تهویه مطبوع مورد استفاده جهت انجام آزمایش



شکل ۲) جزئیات بستر آزمایشگاهی آزمون تهویه مطبوع

تقطیرکننده، به‌صورت تجربی تأثیر استفاده از نبولایزر بر ضریب عملکرد سیستم‌های تهویه مطبوع انبساط مستقیم بررسی می‌شود.

شرح دستگاه و روش انجام آزمایش

جهت انجام آزمایش، از یک بستر آزمون تهویه مطبوع شامل چرخه تبرید و تونل تهویه مطبوع به ابعاد ۳۵×۳۵×۲۰ سانتی‌متر استفاده شده است. تونل تهویه مطبوع مجهز به یک فن دمنده با قابلیت کنترل دور با دقت یک دور بر دقیقه و حداکثر ظرفیت اسمی ۶۰۰ متر مکعب در ساعت است که امکان انجام آزمایش برای دبی‌های هوای مختلف را فراهم می‌آورد. سرعت هوای درون محفظه آزمون با استفاده از بادسنج حرارتی اندازه‌گیری می‌شود. جهت تنظیم دمای هوا، از یک عدد تبخیرکننده با توان یک تن تبرید و دو عدد گرم‌کن به ظرفیت ۳۵۰ و ۲۵۰ وات که به‌ترتیب قبل و بعد از تبخیرکننده قرار گرفته‌اند، استفاده شده است. جهت کنترل دما از سیستم پی‌ای‌دی (PID) استفاده شده است. رطوبت نسبی هوا به‌وسیله دو عدد سنسور که در ورودی و خروجی تونل باد قرار گرفته و دمای هوا با دو عدد ترموکوپل نوع T با دقت ± 0.2 درجه سانتی‌گراد در ورودی و خروجی تونل باد اندازه‌گیری شده است. در شکل ۱ سیستم تهویه مطبوع مورد استفاده برای انجام آزمایش نمایش داده شده است.

جزئیات سیستم تهویه مطبوع دستگاه آزمایشگاهی مورد نظر در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این سیستم تهویه مطبوع دارای چرخه تبرید شامل تبخیرکننده، کمپرسور، چگالنده، شیر انبساط، صافی خشک‌کن و شیر برقی است.

برای اندازه‌گیری دبی آب عبوری از مبدل حرارتی، از یک دبی‌سنج آنالوگ با دقت ± 0.1 لیتر بر دقیقه استفاده شده است. جهت ثابت نگه‌داشتن دمای هوای ورودی به تبخیرکننده و تغییر دمای سطح چگالنده از دو عدد گرم‌کن هوا، به ظرفیت ۳۵۰ وات استفاده شده است که قبل و بعد از تبخیرکننده قرار گرفته‌اند. جهت کنترل دما از کنترل‌کننده پی‌ای‌دی استفاده شده است. جهت اندازه‌گیری دمای مبرد در نقاط مختلف چرخه از سه عدد ترموکوپل نوع تی (T) با دقت ± 0.2 درجه سانتی‌گراد استفاده شده است. همچنین فشار مبرد در نقاط مختلف چرخه توسط شش عدد فرستنده فشار با دقت ± 0.5 ٪ اندازه‌گیری می‌شود. جهت تزریق آب بازیافت‌شده

جدول ۱) مشخصات لوازم اندازه‌گیری به‌کاررفته در بستر آزمون تهویه مطبوع

دستگاه	دقت	تعداد	دامنه	کارخانه سازنده	نوع
سنسورهای دما	± 0.2 درجه سانتی‌گراد	۱۳	۰-۴۵ تا ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد	TC Ltd	ترموکوپل نوع تی (T)
سنسورهای فشار	۰/۵	۵	۰ تا ۱۸ بار	Hogller	HOTH018FGCK
فلومتر آب	۰/۱ لیتر بر دقیقه	۱	۰/۴ تا ۱۱ لیتر بر دقیقه	Yuo Kingtai	آی‌سی‌آی ۵ (ACA05)
بادسنج حرارتی	± 0.4 متر بر ثانیه	۱	۰ تا ۱۰ متر بر ثانیه	Testo	Testo 400
سنسورهای رطوبت	± 1 ٪ رطوبت نسبی	۲	۱ تا ۹۹٪	D W yer	سری HS
گرم‌کن‌های هوا	PID	۲	۰ تا ۳۵۰ وات	Dama Ettehad	پی‌تی‌اف‌ای (PTFE)

مصرفی کمپرسور و \dot{W}_{Fan} توان مصرفی به خاطر مصرف انرژی فن تبخیر کننده و کندانسور است.

$$\eta_{iso} = \frac{\Delta h_{iso}}{\Delta h_{real}} \quad (2)$$

$$\dot{W}_{Compressor} = \frac{\dot{m}\Delta h_{iso}}{\eta_{iso}} \quad (3)$$

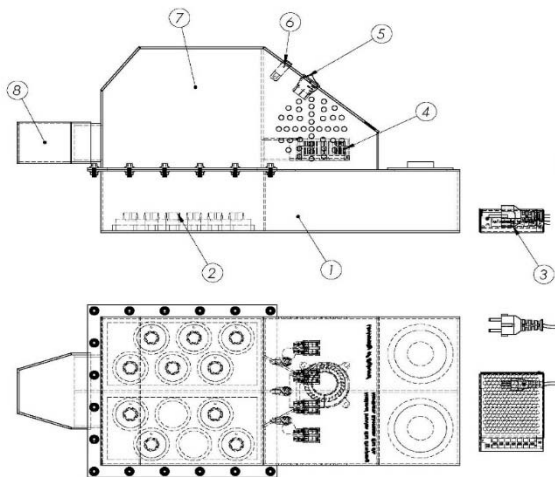
در رابطه‌های ۲ و ۳، η_{iso} بازده آیزنتروپیک، Δh_{iso} میزان آنتالپی آیزنتروپیک، Δh_{real} میزان آنتالپی واقعی در کمپرسور هستند.

$$\dot{Q}_{evaporator} = \dot{m}\Delta h_{evaporator} \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{condenser} = \dot{m}\Delta h_{condenser} \quad (5)$$

در روابط ۳، ۴ و ۵، \dot{m} میزان دبی جرمی مبرد در چرخه و $\Delta h_{evaporator}$ تغییرات آنتالپی در تبخیرکننده و $\Delta h_{condenser}$ تغییرات آنتالپی در چگالنده است. در رابطه ۶، $\dot{W}_{nebuliser}$ توان مصرفی دستگاه نبولایزر و \dot{W}_{fan} توان مصرفی به علت مصرف انرژی فن محوری، تبخیرکننده و چگالنده است.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evaporator}}{\dot{W}_{compressor} + \dot{W}_{nebuliser} + \dot{W}_{fan}} \quad (6)$$



شکل ۳) جزئیات دستگاه نبولایزر ساخته شده؛ ۱- مخازن سیال، ۲- پیژوهای آلتراسونیک، ۳- منبع تغذیه، ۴- فن، ۵- تجهیزات و کلیدهای کنترل، ۶- چراغ‌های سیگنال، ۷- قاب فوقانی



شکل ۴) دستگاه نبولایزر مورد استفاده جهت انجام آزمایش

نتایج

جهت امکان صحت‌سنجی، آزمایش‌ها در دو نوبت تکرار و نتایج عدم قطعیت توسعه‌یافته اندازه‌گیری هر پارامتر با سطح اطمینان

شرح دستگاه نبولایزر

نبولایزر مورد استفاده از نوع مافوق صوت بوده که برای ساخت ذرات افشانه‌ای از کریستال پیزوالکتریک با قابلیت ارتعاش در فرکانس‌های بالا، استفاده می‌کند. مبدل پیزوالکتریک، سیگنال الکتریکی اعمال‌شده را به نوسانات مکانیکی تبدیل می‌نماید. این نوسانات امواج صوتی با فرکانس یک تا ۲/۴ مگاهرتز در محفظه دستگاه ایجاد می‌کنند. امواج مافوق صوت ایجادشده توسط پیزوالکتریک‌ها موجب ایجاد نوسان‌هایی در سطح مایع می‌شود، این نوسان‌ها نیز عامل ایجاد امواج مویین و تشکیل حباب در اثر ایجاد تغییرات فشار در مایع هستند، اگر شدت نوسان‌ها به اندازه کافی زیاد باشد بر اثر شکست امواج مویین و ترکیدن حباب‌ها پاشش قطرات صورت می‌گیرد و پس از آنکه قطرات از فاز مایع وارد فاز گاز شدند با فرکانسی برابر منبع تولید امواج مافوق صوت در حال نوسان است که اگر این فرکانس برابر با فرکانس طبیعی نوسان قطره نیز باشد، فرآیند تشدید باعث فروپاشی قطره و ایجاد قطرات ریز از آن می‌شود. با توجه به آنکه در بسیاری از فرآیندها، بازده دستگاه با کاهش سایز قطرات افزایش می‌یابد عواملی که بتواند در این فرآیند قطراتی با سایز کوچک‌تر ایجاد نماید بسیار مورد توجه است. اندازه قطرات به فرکانس تشدید قطرات، روش تشدید، اندازه و دامنه غالب قطرات جداشده اولیه از فاز مایع و روش انتقال انرژی وابسته است. دستگاه نبولایزر مورد استفاده در این آزمایش در ابعاد ۳۰×۲۵×۵۵ سانتی‌متر در آزمایشگاه پژوهشی تهویه مطبوع دانشگاه بجنورد، ساخته شده است که قسمت زیرین آن دارای دو مخزن کاملاً مستقل بوده و دارای ۱۰ عدد پیزوالکتریک مافوق صوت با قابلیت تنظیم است. منبع تغذیه مقدار جریان و ولتاژ مورد نیاز قطعات برقی را تامین می‌نماید. قطرات ریز سیال توسط دمنده با قابلیت کنترل، از دستگاه خارج شده و توسط لوله خروجی دستگاه به جریان هوای ورودی به چگالنده تزریق می‌شود. جهت ثابت نگه‌داشتن تقریبی نرخ تزریق در مدت‌زمان آزمایش، در هر مرحله از آزمایش صرفاً یکی از مخازن دستگاه نبولایزر وارد آزمایش شده و مخزن دیگر در حالت آماده به‌کار قرار می‌گیرد، با استفاده از مدارهای برقی کنترل‌کننده سطح آب، روشن و خاموش شدن پیزوالکتریک‌های موجود در مخازن، جهت ثابت نگه‌داشتن نرخ تزریق تنظیم می‌شود. دستگاه نبولایزر مورد استفاده در این پژوهش در شکل‌های ۳ و ۴ نمایش داده شده است.

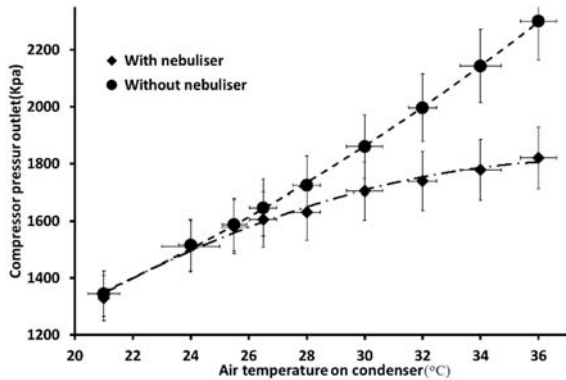
معادلات حاکم و روابط

در ادامه معادلات اصلی که در شبیه‌سازی چرخه تبرید مورد مطالعه در شکل ۲، به کار رفته است، معرفی شده‌اند.

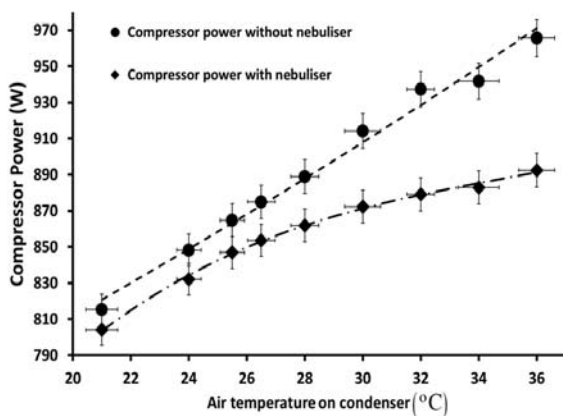
$$\frac{dQ_{condenser}}{dt} = \dot{W}_{Compressor} + \dot{W}_{fan} + \dot{Q}_{evaporator} \quad (1)$$

در رابطه (۱) $\dot{Q}_{evaporator}$ ظرفیت تبرید سیستم سرمایشی است که بر اساس بار برودتی مورد نیاز محاسبه شده است. همچنین $\dot{Q}_{condenser}$ حرارت دفع شده از تقطیر کننده، $\dot{W}_{Compressor}$ کار

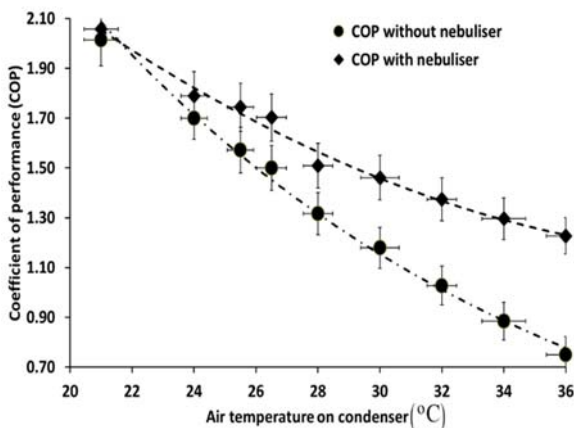
نمودار ۴ نشان داده شده است. نتایج بیان می‌کند که با افزایش دمای هوای عبوری از سطح تقطیرکننده شیب افزایش ضریب عملکرد افزایش خواهد یافت و استفاده از نبولایزر در دمای بالاتر هوای عبوری از سطح چگالنده، اثربخشی بیشتری خواهد داشت. به طوری که با تغییر دمای هوای عبوری از چگالنده از ۲۱ به ۳۶ درجه سانتی‌گراد ضریب عملکرد چرخه تبرید از ۲ تا ۶۴٪ افزایش می‌یابد.



نمودار ۱) اثر تغییرات دمای چگالنده بر فشار خروجی کمپرسور در حالت استفاده از نبولایزر و بدون آن



نمودار ۲) تغییرات توان مصرفی کمپرسور نسبت به دمای سطح تقطیرکننده در حالت وجود نبولایزر و بدون آن



نمودار ۳) تغییرات ضریب عملکرد چرخه تبرید نسبت به دمای سطح تقطیرکننده در حالت وجود نبولایزر و بدون آن

۹۰٪ محاسبه شده و در نمودارها نمایش داده شده است. جهت بررسی بهتر رفتار داده‌های آزمایشگاهی، نمودارهایی بر نتایج آزمایشگاهی منطبق شده‌اند، کلیه این نمودارها با استفاده از آنالیز رگرسیون غیرخطی به گونه‌ای ترسیم شده‌اند که انحراف معیار خطای تخمین برای هر نمودار به حداقل مقدار ممکن برسد. اثر تغییرات دمای هوای عبوری از چگالنده بر فشار خروجی کمپرسور در حالت استفاده از نبولایزر و بدون آن، در نمودار ۱ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش دمای هوای عبوری از چگالنده از ۲۱ به ۳۶ درجه سانتی‌گراد، فشار خروجی از کمپرسور در حالت بدون استفاده از نبولایزر حدود ۷۱٪ و در حالت استفاده از نبولایزر نزدیک به ۳۷٪ افزایش می‌یابد و در واقع استفاده از نبولایزر سبب کاهش فشار خروجی کمپرسور خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد در دمای هوای ۳۶ درجه سانتی‌گراد استفاده از نبولایزر باعث کاهش فشار خروجی کمپرسور تا ۲۷٪ خواهد شد. همچنین استفاده از نبولایزر باعث می‌شود که با افزایش دمای هوای عبوری از تقطیرکننده، فشار خروجی کمپرسور با شیب کمتری افزایش یابد.

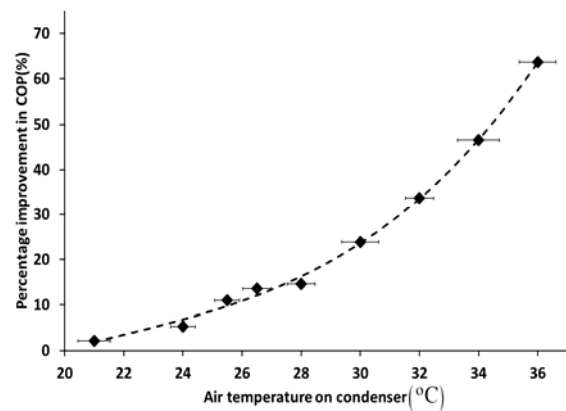
تغییرات دمای هوای عبوری از چگالنده بر توان مصرفی کمپرسور در حالت استفاده از نبولایزر و بدون آن، در نمودار ۲ نشان داده شده است. نتایج این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش دمای هوای ورودی به چگالنده توان مصرفی کمپرسور افزایش می‌یابد. زیرا افزایش دمای هوای ورودی به چگالنده موجب افزایش درجه حرارت متوسط مبرد عبوری از چگالنده می‌شود که در نتیجه آن دمای تقطیر افزایش یافته و این موضوع موجب کاهش راندمان حجمی کمپرسور و افزایش کار مصرفی آن می‌شود. همچنین این نمودار نشان می‌دهد که در حالت استفاده از نبولایزر توان مصرفی کمپرسور کاهش یافته و این توان با تغییرات دمای هوای عبوری از تقطیرکننده با شیب کمتری افزایش می‌یابد. در دمای هوای ۲۱ درجه سانتی‌گراد کاهش توان مصرفی کمپرسور حدود ۱/۵٪ بوده که با افزایش دمای هوای سطح تقطیرکننده به ۳۵ درجه سانتی‌گراد، کاهش توان مصرفی به بیش از ۸٪ افزایش می‌یابد.

اثر تغییرات دمای هوای عبوری از چگالنده بر ضریب عملکرد چرخه تبرید در حالت استفاده از نبولایزر و بدون آن، در نمودار ۳ نشان داده شده است. نتایج این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش دمای هوای ورودی به چگالنده ضریب عملکرد چرخه تبرید کاهش می‌یابد، به طوری که با افزایش دمای هوای عبوری از چگالنده از ۲۱ به ۳۶ درجه سانتی‌گراد ضریب عملکرد چرخه تبرید در حالت بدون استفاده از نبولایزر، در حدود ۶۳٪ کاهش می‌یابد که این موضوع را می‌توان در نتیجه افزایش درجه حرارت متوسط عامل تقطیر عبوری از تقطیرکننده و در نتیجه افزایش کار مصرفی کمپرسور دانست، اما استفاده از نبولایزر باعث افزایش ضریب عملکرد چرخه تبرید خواهد شد.

درصد بهبود ضریب عملکرد چرخه تبرید در حالت استفاده از نبولایزر، برای دماهای مختلف هوای عبوری از سطح چگالنده، در

فهرست علائم

ظرفیت تبرید سیستم سرمایشی	$\dot{Q}_{evaporator}$
حرارت دفع شده از تقطیرکننده	$\dot{Q}_{condenser}$
کار مصرفی کمپرسور	$\dot{W}_{compressor}$
بازده آیزنتروپیک	η_{iso}
آنتالپی آیزنتروپیک	Δh_{iso}
آنتالپی واقعی در کمپرسور	Δh_{real}
دبی جرمی مبرد	\dot{m}
تغییرات آنتالپی در تبخیرکننده	$\Delta h_{evaporator}$
تغییرات آنتالپی در کندانسور	$\Delta h_{condenser}$
توان مصرفی دستگاه نبولایزر	$\dot{W}_{nebuliser}$
توان مصرفی فن تبخیرکننده و چگالنده	\dot{W}_{fan}
ضریب عملکرد	COP



نمودار ۴) تاثیر استفاده از نبولایزر بر درصد بهبود ضریب عملکرد چرخه تبرید برای تغییرات دمای هوای عبوری از چگالنده

منابع

- 1- Chua KJ, Chou SK, Yang WM. Advances in heat pump systems: A review. *Applied Energy*. 2010;87(12):3611-3624.
- 2- Jiang H, Jiang Y, Wang Y, Ma Z, Yao Y. An experimental study on a modified air conditioner with a domestic hot water supply (ACDHSW). *Energy*. 2006;31(12):1789-1803.
- 3- Wang Y, You Y, Zhang Z. Experimental investigations on a conventional air-conditioner working as air-water heat pump. *Procedia Engineering*. 2011;23:493-497.
- 4- Chaiwongsa P, Duangthongsuk W. Hot water making potential using of a conventional air-conditioner as an air-water heat pump. *Procedia Engineering*. 2011;8:165-170.
- 5- Jia J, Lee WL. Applying storage-enhanced heat recovery room air-conditioner (SEHRAC) for domestic water heating in residential buildings in Hong Kong. *Energy and Buildings*. 2014;78:132-142.
- 6- Jadhav PJ, Sapkal ND, Kale MR, Bhandigare VV. Heat recovery from refrigerator using water heater and hot box. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2014;3(5):349-358.
- 7- Aziz A, Satria AB, Mainil RI. Experimental study of split air conditioner with and without trombone coil condenser as air conditioning water heater. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2015;12(1):2229-8649.
- 8- Vaisi F, Hajidavallo E. Modeling and simulation of vapor compression refrigeration cycle. *Modares Mechanical Engineering*. 2012;12(1):85-97. [Persian]
- 9- Jaber S, Ezzat AW. Investigation of energy recovery with exhaust air evaporative cooling in ventilation system. *Energy and Buildings*. 2017;139:439-448.
- 10- Ram NK, Soni N. Performance enhancement of vapour compression refrigeration system with utilization of condenser waste heat in water heater. *IJSRSET*. 2017;3(8):210-214.
- 11- Zhang ZY, Zhang CL, Ge MC, Yu Y. A frost-free dedicated outdoor air system with exhaust air heat recovery. *Applied Thermal Engineering*. 2018;128:1041-1050.
- 12- Nakkaew S, Chitipalungsri T, Ahn HS, Jerng DW, Asirvatham LG, Dalkılıç AS. Application of the heat pipe to enhance the performance of the vapor compression refrigeration system. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2019;15:100531.

نتیجه گیری

به صورت آزمایشگاهی، با استفاده از تکنولوژی نبولایزر، آب جمع‌آوری شده در کویل تبخیرکننده چرخه تبرید، در هوای عبوری از چگالنده، تزریق شده است و تغییرات فشار و توان مصرفی کمپرسور و ضریب عملکرد چرخه تبرید در حالت استفاده از نبولایزر و بدون آن، برای دماهای مختلف هوای عبوری از سطح چگالنده مطالعه شده است. خلاصه مهم‌ترین نتایج آزمایشگاهی به شرح ذیل بیان می‌شود:

- ۱- افزایش دمای هوای عبوری از سطح چگالنده، در حالت استفاده از نبولایزر و بدون آن، موجب افزایش فشار و توان مصرفی کمپرسور شده و ضریب عملکرد چرخه تبرید را کاهش می‌دهد.
- ۲- استفاده از نبولایزر سبب کاهش فشار خروجی و توان مصرفی کمپرسور شده و ضریب عملکرد چرخه تبرید را افزایش خواهد داد، همچنین سبب می‌شود فشار خروجی کمپرسور، توان مصرفی کمپرسور و ضریب عملکرد چرخه تبرید با افزایش دمای هوای عبوری از تقطیرکننده با شیب کمتری تغییر نماید.
- ۳- با افزایش دمای هوای عبوری از سطح چگالنده استفاده از نبولایزر اثر بخشی بیشتری خواهد داشت به طوری که در دمای هوای ۳۶ درجه سانتی‌گراد استفاده از نبولایزر باعث کاهش فشار خروجی کمپرسور تا ۲۷٪، کاهش توان مصرفی کمپرسور به بیش از ۸٪ و افزایش ضریب عملکرد چرخه تبرید بیش از ۶۴٪ خواهد شد.

تشکر و قدردانی: از شرکت توسعه و فناوری دانشگاه بجنورد به جهت

حمایت از پژوهش، تشکر و قدردانی می‌شود.

تأییدیه اخلاقی: با رعایت تمام اصول اخلاقی ثبت شده است.

تعارض منافع: هیچ تعارضی وجود ندارد.

سهم نویسندگان: امین جودت (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ مجتبی نجفیان (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی (۵۰٪).

منابع مالی: با حمایت‌های مالی نویسندگان و دانشگاه بجنورد، مقاله به ثبت رسیده است.

- García-Perez JV. Air-borne ultrasound application in the convective drying of strawberry. *Journal of Food Engineering*. 2014;128:132-139.
- 19- Cárcel J, García-Pérez J, Riera E, Mulet A. Influence of high-intensity ultrasound on drying kinetics of persimmon. *Drying Technology*. 2007;25(1):185-193.
- 20- Jodat A, Najafian M, Mohammadi A. Experimental study of injecting water vapor and oil compounds by nebulizer on the efficiency and natural gas flame pollution. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2019;52:11. [Persian]
- 21- Jónsson BL, Garðarsson GO, Petursson O, Hlynsson SB, Foley JT. Ultrasonic gasoline evaporation transducer-reduction of internal combustion engine fuel consumption using axiomatic design. *Procedia CIRP*. 2015;34:168-173
- 22- Yao Y. Using power ultrasound for the regeneration of dehumidizers in desiccant air-conditioning systems: A review of prospective studies and unexplored issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010;14(7):1860-1873.
- 13- Anand B, Murugavel S. Performance analysis of a novel augmented desalination and cooling system using modified vapor compression refrigeration integrated with humidification-dehumidification desalination. *Journal of Cleaner Production*. 2020;255:120224.
- 14- Wood RW, Loomis AL. The physical and biological effects of high-frequency sound-waves of great intensity. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. 1927;4(22):417-436.
- 15- Giovannini A, Guyomar D, Gschwind M, Fonze G. Evaluation and design of new piezoelectrical droplets generator. 1994 Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium, 31-3 October-November 1994, Cannes, France. Piscataway: IEEE; 1994.
- 16- Sabarez H, Gallego-Juarez J, Riera E. Ultrasonic-assisted convective drying of apple slices. *Drying Technology*. 2012;30(9):989-997.
- 17- García-Pérez JV, Ozuna C, Ortuño C, Cárcel JA, Mulet A. Modeling ultrasonically assisted convective drying of eggplant. *Drying Technology*. 2011;29(13):1499-1509.
- 18- Gamboa-Santos J, Montilla A, Cárcel JA, Villamiel M,