

Análisis Termodinámico del proceso de compresión con enfriamiento y sin enfriamiento en un ciclo real de refrigeración R12 y 134a

Thermodynamic analysis of the compression process with cooling and without cooling in a real refrigeration cycle R12 and 134a

RANGEL-ROMERO, Carlos†*, ROJAS-GARNICA, Juan Carlos, MUÑOZ-MATA, José Lorenzo y BARCELATA-PINZÓN, Antonio

Universidad Tecnológica de Puebla

ID 1^{er} Autor: Carlos, Rangel-Romero / ORC ID: 0000-0003-4879-4228

ID 1^{er} Coautor: Juan Carlos, Rojas-Garnica / CVU CONACYT ID: 66417, ORC ID: 0000-0002-2261-587X

ID 2^{do} Coautor: José Lorenzo, Muñoz-Mata / CVU CONACYT ID: 177117, ORC ID: 0000-0001-7813-5579

ID 3^{er} Coautor: Antonio, Barcelata-Pinzón / CVU CONACYT ID: 160211

Recibido 08 Enero, 2018; Aceptado 12 Marzo, 2018

Resumen

En este trabajo se desarrolló una metodología para determinar el comportamiento del proceso de compresión con enfriamiento y sin enfriamiento en un ciclo real de refrigeración por compresión mecánica de vapor. La metodología desarrollada fue probada en un sistema de refrigeración experimental instalado en el Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada de la SEPIESIME-IPN. Para el análisis del proceso de compresión se efectuó la evaluación de las irreversibilidades para cada uno de los componentes del sistema de refrigeración, (evaporador, línea de succión, compresor, línea de descarga, condensador, línea de líquido y válvula de expansión). El análisis teórico se fundamenta en la primera y la segunda ley de la termodinámica. Comparando los procesos de compresión con enfriamiento y sin enfriamiento de un ciclo real de refrigeración, se observa que las mayores irreversibilidades se presentan cuando el proceso de compresión no cuenta con enfriamiento y, por ende, mayor consumo de energía.

COP, Ciclo real, Diagrama T-s, Entropía, Entalpía

Abstract

In this work a methodology was developed to determine the behavior of the compression process with cooling and without cooling in a real refrigeration cycle by mechanical vapor compression. The methodology developed was tested in an experimental refrigeration system installed in the Applied Thermal and Hydraulic Engineering Laboratory of the SEPIESIME-IPN. For the analysis of the compression process, the irreversibilities were evaluated for each of the components of the refrigeration system (evaporator, suction line, compressor, discharge line, condenser, liquid line and expansion valve). The theoretical analysis is based on the first and second law of thermodynamics. Comparing the compression processes with cooling and without cooling of a real refrigeration cycle, it is observed that the greatest irreversibilities occur when the compression process does not have cooling and, therefore, it has greater energy consumption than the compression process with cooling.

COP, real Cycle, T-s Diagram, Entropy, Enthalpy

Citación: RANGEL-ROMERO, Carlos, ROJAS-GARNICA, Juan Carlos, MUÑOZ-MATA, José Lorenzo y BARCELATA-PINZÓN, Antonio. Análisis Termodinámico del proceso de compresión con enfriamiento y sin enfriamiento en un ciclo real de refrigeración R12 y 134a. Revista de Ingeniería Mecánica. 2018. 2-5: 16-22.

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: carlos.rangel@utpuebla.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Los sistemas de refrigeración por compresión mecánica de vapor se aplican a los sectores industrial, comercial y doméstico. Para operar, estos sistemas de refrigeración necesitan consumir energía en forma de trabajo mecánico. Dicho sistema es el más empleado a nivel mundial y está compuesto por cuatro procesos fundamentales: evaporación, compresión, condensación y expansión. El uso de la energía se ve afectada por las irreversibilidades que se generan en los diferentes componentes en el sistema, lo que provoca un desperdicio en el consumo de la energía suministrada.

Aplicando la primera y la segunda ley de la termodinámica a cada componente del sistema de refrigeración se pueden cuantificar las irreversibilidades producidas y así determinar la potencia aprovechada por el sistema. Por esta razón es de gran importancia conocer la distribución de las irreversibilidades que se generan en el sistema de refrigeración para tener la información suficiente que permita tomar decisiones sobre las acciones que se deben tomar para que estos sistemas logren un buen aprovechamiento de la energía consumida.

Para cumplir con el propósito de evaluar el uso de la energía en los sistemas de refrigeración por compresión mecánica de vapor, en este trabajo se presenta el análisis que se realizó a un sistema experimental de refrigeración por compresión mecánica de vapor, instalado en el Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada (LABINTHAP) del Instituto Politécnico Nacional de México. Se evaluaron las irreversibilidades generadas en los diferentes componentes del sistema, así como la energía aprovechada. El fluido de trabajo de este sistema es el refrigerante R-134a y el R-12.

Los sistemas de refrigeración son importantes y ofrecen la oportunidad para mejorar la operación, en cuanto al consumo de energía, en el funcionamiento de los mismos y poder tomar decisiones sobre la posibilidad de donde se puede efectuar un mejoramiento al utilizar los principios de la termodinámica.

Para este estudio se realiza el análisis energético del sistema de refrigeración por compresión mecánica de vapor, con lo que al analizar la distribución de las irreversibilidades en el sistema de compresión con enfriamiento y sin enfriamiento se tendrá información que será de utilidad para la toma de decisiones sobre los cambios que sean necesarios en los componentes del sistema y en las condiciones de operación y se evalúa la energía adicional consumida por los componentes del sistema de refrigeración cuando el compresor no tiene enfriamiento, la cual es necesaria para superar la irreversibilidades que se producen en cada uno de los componentes. En este trabajo se ha logrado establecer una metodología de evaluación de las irreversibilidades originadas en los procesos de compresión con enfriamiento y sin enfriamiento.

Metodología

Los experimentos se realizaron para enfriar a un flujo de agua sobre el evaporador de 0.5 l/s. La duración de cada una de las pruebas experimentales fue de 2 horas. Cada experimento se repitió 3 veces para validar los resultados.

Durante el desarrollo de los experimentos se tomaron lecturas de temperaturas y presiones del refrigerante en cada entrada y salida de los diferentes elementos que componen el sistema experimental de refrigeración. Para el agua, se verificaron los flujos y sus temperaturas a la entrada y salida del evaporador, así como su temperatura en el depósito de agua. También se midieron los parámetros eléctricos necesarios para calcular la potencia suministrada al compresor, y que son: diferencia de potencial, corriente eléctrica, potencia activa y potencia aparente. Estos instrumentos de medición, tanto termopares y transductores de presión se encuentran ubicados a la entrada y salida del evaporador, compresor, condensador y válvula de expansión termostática.

Las características técnicas de la unidad condensadora son las siguientes: corresponde al modelo Friomold UF-300M que es enfriado por un ventilador accionado por un motor trifásico de 3 HP, cuenta con compresor MYCOM E-50, con presostato cuyo rango de operación -0.5 a 6 kg/cm² y, dos manómetros, uno de succión con rango de operación de 0 a 6 Bar y otro de descarga con rango de operación de 0 a 16 Bar.

Se colocaron termopares en la entrada y salida de cada uno de los componentes del sistema. Son de la marca Omega CO3-T de cobre constantan, con un rango de medición de temperatura de -185 a 298 °C. También se colocaron tres transductores de presión con sensor de cerámica para el lado de baja presión y otros tres para el lado de alta presión, todos de la marca Hauser con rango de operación de 0 a 6 Bar para los de baja presión y de 0 a 16 Bar para los de alta presión.

Con los datos obtenidos de temperatura y presión del refrigerante se obtienen diferentes variables termodinámicas, entre las cuales están la entropía, la entalpía y el volumen específico. Con estos se grafica el ciclo real de refrigeración en un diagrama T-s, como se muestra a continuación.

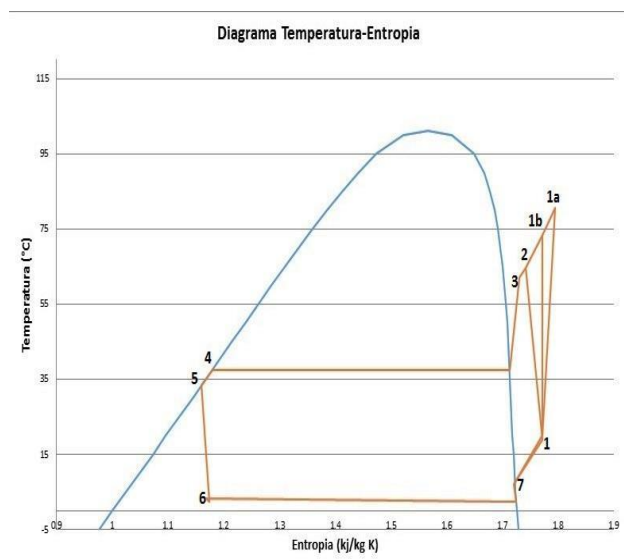


Gráfico 1 Diagrama de Temperatura-Entropía de un ciclo de refrigeración real

Fuente: Elaboración Propia

Análisis termodinámico del proceso de compresión con enfriamiento

El ciclo termodinámico de un sistema de refrigeración por compresión con enfriamiento, que se muestra en el Gráfico 1, está compuesto de los siguientes procesos (1-2-3-4-5-6-7): I) evaporación (6-7): el refrigerante absorbe calor del espacio a enfriar; II) absorción de calor en la tubería de succión (7-1); III) compresión con enfriamiento (1-2): se incrementa la temperatura y presión del refrigerante; IV) rechazo de calor en la tubería de descarga (2-3); V) condensación (3-4): el refrigerante rechaza calor al medio ambiente; VI) rechazo de calor en la tubería de líquido (4-5); VII) expansión (5-6): el refrigerante sufre una caída súbita de presión.

Las ecuaciones usadas para el cálculo de los procesos del ciclo de refrigeración son la primera y la segunda leyes de la termodinámica, las cuales se muestran en la tabla 1. Con estas ecuaciones se hace el análisis energético y el análisis de las irreversibilidades generadas en el sistema.

Proceso	1° Ley
I	$Q_{7-6} = m_r(h_7 - h_6)$
II	$Q_{1-7} = m_r(h_1 - h_7)$
III	$Q_{2-1} = m_r(h_2 - h_1) + w_{2-1}$
IV	$Q_{3-2} = m_r(h_3 - h_2)$
V	$Q_{4-3} = m_r(h_4 - h_3)$
VI	$Q_{5-4} = m_r(h_5 - h_4)$
VII	$h_6 = h_5$

Tabla 1 Primera Ley de la Termodinámica

Proceso	2° Ley
I	$I_{7-6} = \left[m_r(s_7 - s_6) - \frac{Q}{T_r} \right] T_{amb}$
II	$I_{1-7} = \left[m_r(s_1 - s_7) - \frac{Q}{T_0} \right] T_{amb}$
III	$I_{2-1} = \left[m_r(s_2 - s_1) - \frac{Q}{T_0} \right] T_{amb}$
IV	$I_{3-2} = \left[m_r(s_3 - s_2) - \frac{Q}{T_0} \right] T_{amb}$
V	$I_{4-3} = \left[m_r(s_4 - s_3) - \frac{Q}{T_0} \right] T_{amb}$
VI	$I_{5-4} = \left[m_r(s_5 - s_4) - \frac{Q}{T_0} \right] T_{amb}$
VII	$I_{6-5} = [m_r(s_6 - s_5)] T_{amb}$

Tabla 2 Segunda Ley de la Termodinámica

Análisis termodinámico del proceso de compresión sin enfriamiento

El ciclo termodinámico de un sistema de refrigeración por compresión sin enfriamiento se muestra en la tabla 3 y está compuesto de los siguientes procesos (1-1a-3-4-5-6-7)

Fase	Proceso	No.
I	Evaporación	6-7
II	Línea de succión	7-1
III	Compresión	1-1a
IV	Línea de descarga	1a-3
V	Condensación	3-4
VI	Línea de líquido	4-5
VII	Expansión	5-6

Tabla 3 Procesos del ciclo de refrigeración sin enfriamiento

Para el análisis de este proceso termodinámico sin enfriamiento, primeramente se necesitan calcular las variables termodinámicas del punto 1b, en la descarga del compresor.

Para este cálculo se considera el proceso de compresión como isentrópico, y con el dato de la presión del refrigerante, se obtienen las demás variables mediante tablas termodinámicas, como la entalpía, la temperatura, el volumen específico, entre otras. Con esto se obtienen todas las variables termodinámicas del estado 1b. Para ello, cuando no se tiene enfriamiento, se emplea la siguiente ecuación.

$$\eta_{ise} = \frac{h_a - h_1}{h_b - h_1} \quad (1)$$

Donde la diferencia entre h_a y h_b implica la desviación de un proceso politrópico reversible de un proceso isentrópico, y también la desviación de un proceso politrópico irreversible de un proceso reversible. Con esta ecuación se obtiene h_a y con el dato de la presión del refrigerante en la descarga del compresor se obtienen todos los puntos del estado 1b.

Con lo cual ya se puede iniciar el análisis de las irreversibilidades originadas en el ciclo de refrigeración, empleando las ecuaciones de la tabla 1 para su cálculo. Como se muestra en la figura de la unidad condensadora el sistema de compresión tiene un sistema en el cual el aire condensante va directamente al compresor para realizar el proceso de enfriamiento.

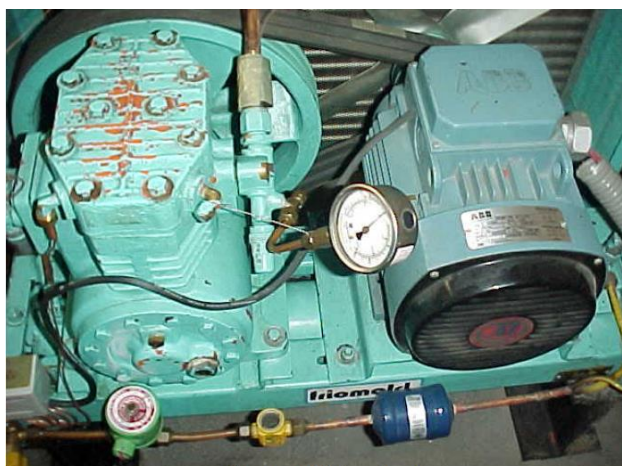


Figura 1 Unidad Condensadora
Fuente: Elaboración Propia

Análisis de resultados y discusión

En la tabla 4 se presentan los resultados obtenidos al aplicar las ecuaciones de la tabla 1, para los procesos de compresión con enfriamiento y sin enfriamiento. Con esta tabla se observa que la diferencia con respecto a las irreversibilidades originadas en un sistema de refrigeración entre un proceso de compresión con enfriamiento y sin enfriamiento están en el compresor y línea de descarga.

En el análisis de las irreversibilidades producidas en el compresor, se demuestra que cuando este componente cuenta con un proceso de enfriamiento se originan menores irreversibilidades, esto es debido a que en el compresor se produce un menor calentamiento, que es causado por la energía que transmite el refrigerante en forma de calor.

Con lo que respecta a la línea de descarga que conecta a la succión del compresor y a la entrada del compresor, se observa que en un proceso de compresión con enfriamiento, el calor que desprende el refrigerante hacia los alrededores, que es energía que se pierde o que no se puede emplear para producir el efecto de refrigeración, es menor y, por lo tanto, la energía consumida para producir el efecto de refrigeración aumenta, que se comprueba en la tabla 4.

Por lo tanto al tener mayor irreversibilidad en un ciclo de refrigeración, aumenta la energía consumida por el compresor y la energía eléctrica que es la que provoca el movimiento del compresor mediante un motor eléctrico también aumenta.

Componentes	Irreversibilidad Con enfriamiento	Irreversibilidad Sin enfriamiento	Unidades
Evaporador	0.00027		kW/K
Compresor	0.0067	0.0075	kW/K
Condensador	0.00081		kW/K
Válvula de Expansión	0.00009		kW/K
Línea de Succión	0.00017		kW/K
Lín. Des.	0.00002	0.00019	kW/K
Línea de líquida	0.00089		kW/K
Irreversibilidad Total	0.0089	0.0099	kW/K
Energía Utilizada	2.65	2.92	kW/K
Energía Real Consumida	2.76	2.76	kW/K
Potencia Compresor	0.30	0.63	kW/K

Tabla 4 Comparación de resultados entre el proceso de compresión con enfriamiento y sin enfriamiento

En el gráfico 2 se muestra claramente la diferencia entre un proceso de compresión con enfriamiento y sin enfriamiento, ya que cuando la temperatura en la descarga del compresor aumenta la irreversibilidad del compresor tiende a comportarse de la misma forma. Y como se ve en el gráfico 3 al aumentar la potencia consumida por el compresor cuando no cuenta con enfriamiento.

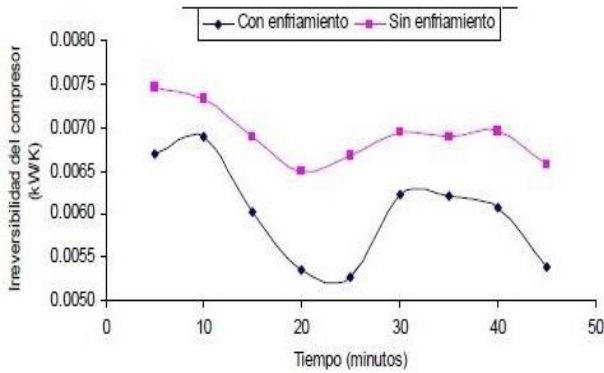


Gráfico 2 Comparación de las irreversibilidades del compresor con enfriamiento y sin enfriamiento
Fuente: Elaboración Propia

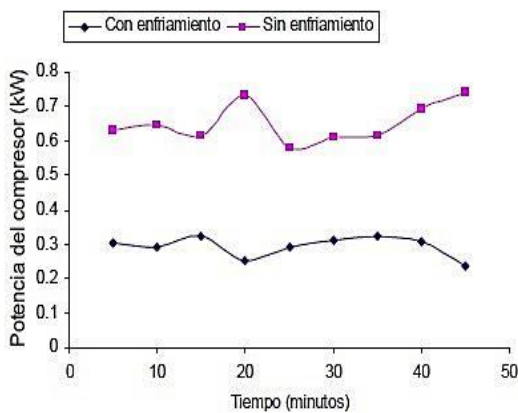


Gráfico 3 Comparación de la potencia consumida por el compresor con enfriamiento y sin enfriamiento
Fuente: Elaboración Propia

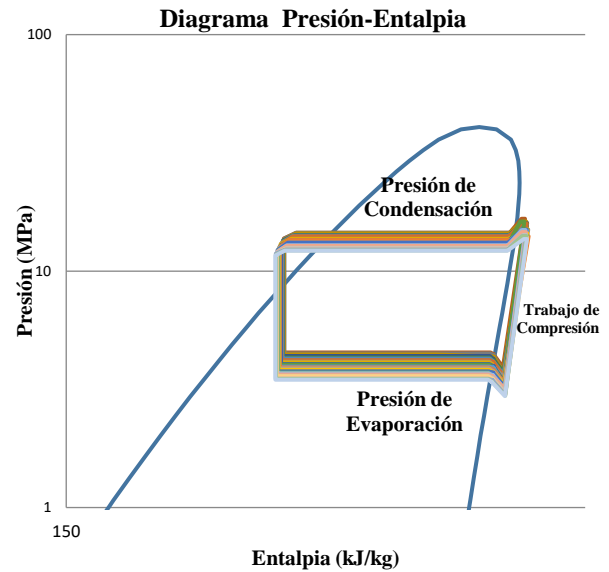


Gráfico 4 Diagrama del ciclo real de refrigeración.
Fuente: Elaboración Propia

En el diagrama P-h, del gráfico 4, muestra que el ciclo de refrigeración mantiene un proceso de evolución con respecto al tiempo, la presión de evaporación muestra más la tendencia con respecto a la presión de condensación.

En el gráfico de la Temperatura-Entropía, del gráfico 5, muestra como se realiza el trabajo de compresión, el cual se genera un menor consumo de energía y lo cual tiene como consecuencia una menor irreversibilidad.

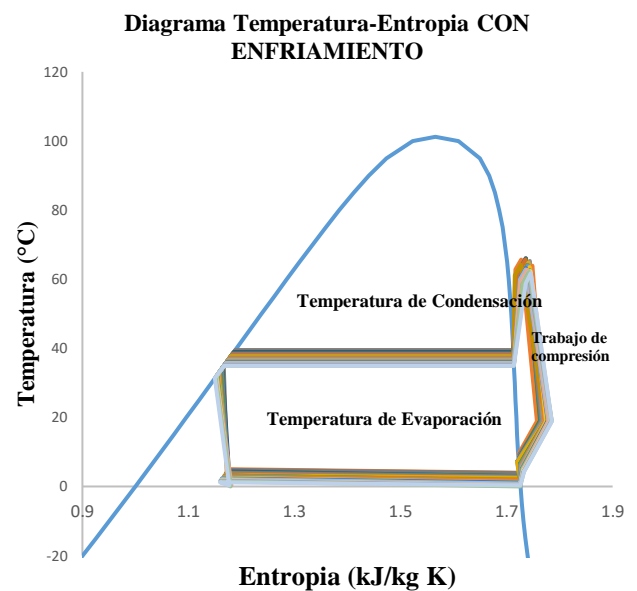


Gráfico 5 Diagrama Temperatura- Entropía de un ciclo real con enfriamiento
Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico 6, de Temperatura–Entropía sin enfriamiento, se observa que el trabajo de compresión aumenta lo que genera una mayor irreversibilidad.

Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos en el sistema de refrigeración por compresión de vapor se ha demostrado que el comportamiento energético de los ciclos de refrigeración es mejor cuando se utiliza un proceso de enfriamiento en el compresor.

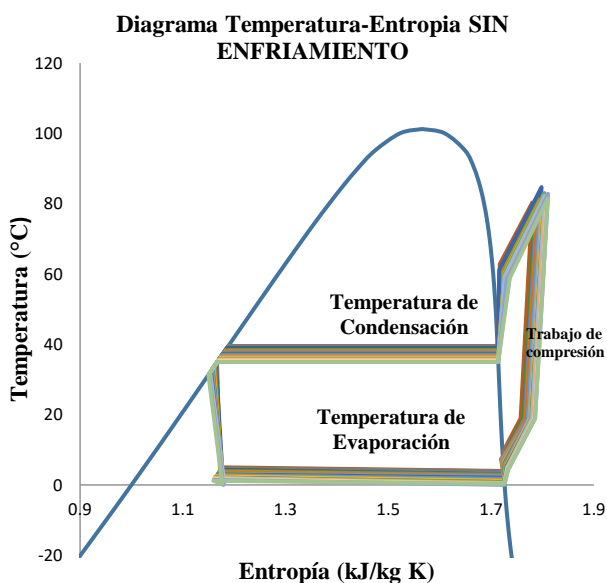


Gráfico 6 Temperatura-entropía de un ciclo real sin enfriamiento

Fuente: *Elaboración Propia*

En lo que respecta al análisis termodinámico se concluye que, en un ciclo real de refrigeración el calentamiento del fluido refrigerante, a causa del proceso de compresión, se acompaña de pérdidas de energía que dependen del proceso de enfriamiento o sin enfriamiento que se esté efectuando en el compresor, que aumentan o disminuyen el consumo de energía por parte del compresor.

De los resultados presentados se muestra que las pérdidas en el compresor son las más grandes, por lo que se pone mayor atención a la sección de este tipo de equipos, con la idea de diseñar o elegir elementos de mayor eficiencia, además que con un proceso de enfriamiento se aumenta la eficiencia de un ciclo de refrigeración.

Con este análisis del compresor se demuestra que se puede obtener un ahorro de energía en los ciclos de refrigeración, que tienen gran aplicación a nivel mundial, así mismo se disminuye de manera substancial una de las causas que provocan irreversibilidades en estos sistemas.

Por lo tanto antes de que el fluido refrigerante entre al compresor si resulta ventajoso su enfriamiento para reducir el trabajo de compresión, pero se tiene que tener en cuenta el modo de dicho enfriamiento debido a los costos económicos. Asimismo esta metodología desarrollada es de aplicación sencilla para los ciclos de refrigeración y por lo tanto se pueden aplicar a cualquier tipo de sistema.

Referencias

- Ahmadi P., Dincer I., Rosen M. A. (2013). Thermodynamic modeling and multi-objective evolutionary-based optimization of a new multigeneration energy system. *Energy Conversion and Management*, Vol. 76. pp. 282–300.
- Ahmed B., Zubair S.M. (2011). Performance degradation of a vapour compression refrigeration system under fouled conditions. *International Journal of Refrigeration*. Vol. 34. pp. 1016-1027l.
- Anand S., Tyagi S.K. (2012). Exergy analysis and experimental study of a vapor compression refrigeration cycle. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. Vol. 110. pp. 961–971.
- Ansari N., Yadav B., Kumar J. (2012). Theoretical exergy analysis of HFO-1234yf and HFO-1234ze as an alternative replacement of HFC-134a in simple vapour compression refrigeration system. *International Journal of Scientific Engineering Research*. Vol. 4 (8). pp. 137–144.
- Bahman A., Groll E. (2016). Second-law analysis to improve the energy efficiency of environmental control unit. 16th International refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, July 11-14 2016.

Chandrasekharan M. (2014). Exergy analysis of vapor compression refrigeration system using R12 and R134a as refrigerants. *International Journal of Students' Research in Technology & Management*. Vol. 2 (04). pp. 134-139.

Fenga H., Chena L., Suna F., Wu. Ch. (2011). Heating load and COP optimisations for a universal steady flow endoreversible heat pump model. *International Journal of Ambient Energy* Vol. 32 (2). pp. 70-77.

Nawaz Md., Mamoon Md., Ashar Md., Zafar A. (2015). Energy and exergy analysis of vapour compression refrigeration system with R12, R22, R134a. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* Volume 5, Issue 3 March 2015. pp. 210-216.

Yadav P., Sharma A. (2015). Exergy analysis of R134a based vapour compression refrigeration tutor. *Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*. National Conference on Advances in Engineering, Technology & Management (AETM'15). pp. 73- 77.

Yataganbaba A., Kilicarslan A., Kurtbas I. (2015). Exergy analysis of R1234yf and R1234ze as R134a replacements in a two evaporator vapour compression refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, 60:pp. 26-37.

Yataganbaba A., Kilicarslan A., Kurtbas I. (2015). Irreversibility analysis of a two-evaporator vapour compression refrigeration system. *International Journal of Exergy*. Vol. 18, No. 3. pp. 340-355.