

SEPCOO

Simulationsbasierte Entwicklung füllmengenminimierter Propan-Module zur Performanceverbesserung von CO₂-Kälteanlagen

Programm / Ausschreibung	Energieforschung (e!MISSION), Energieforschung, Energieforschung 7. Ausschreibung	Status	abgeschlossen
Projektstart	01.12.2021	Projektende	31.05.2025
Zeitraum	2021 - 2025	Projektlaufzeit	42 Monate
Keywords	Dynamische Systemsimulation; R290-Modul; CO ₂ -Kälteanlagen; Füllmengenminimierung; Unterkühler		

Projektbeschreibung

Aufgrund der Bestimmungen der F-Gase Verordnung finden natürliche Kältemittel, wie Kohlenstoffdioxid (CO₂ bzw. R744) und Propan (R290) immer größeren Einsatz in der Kältetechnik. R744 als Kältemittel hat in Kühl- und Tiefkühlssystemen im industriellen Bereich, insbesondere in der Lebensmittelproduktion und -weiterverarbeitung Einkehr gefunden.

Veränderliche Lasten und das dynamische Verhalten des Gesamtsystems im Betrieb führen einerseits zu Herausforderungen bei der Regelung und der Auslegung der Komponenten, andererseits zu einer verringerten Effizienz. Vor allem aber das Abführen der Abwärme industrieller Kühl- und Tiefkühlssystemen bei kurzfristig ansteigender Kühlleistung und/oder höhere Außentemperaturen (ab ca. 27 °C), ab welcher eine transkritische Betriebsweise von R744-Kälteanlagen auftritt, führt zu einer deutlichen Erhöhung des Flashgases bei der Drosselung. Dies verursacht ein Absinken der R744-Kälteleistung bzw. einen Aufwand bei der Verdichtung und damit eine stark von der Außentemperatur abhängige Effizienz. Zur Erreichung der gewünschten Kälteleistung bei allen Betriebsbedingungen ist auf Grund der R744-Charakteristik eine relativ starke Überdimensionierung der Kälteanlage notwendig. Generell ist im Betrieb eine maximal mögliche Effizienz anzustreben, um damit die (indirekten) Treibhausgasemissionen durch den Stromverbrauch zu minimieren.

Um die Effizienz und Leistung von R744-Kälteanlagen bei subkritischer, aber vor allem bei transkritischer Betriebsweise bzw. höheren Außentemperaturen zu verbessern und somit deren Einsatzgebiete zu vergrößern bzw. Lastschwankungen zu glätten wurden in den letzten Jahren - vorwiegend theoretisch - diverse „Unterkühlmethoden“ zur Absenkung der R744-Temperatur vor der Drosselung untersucht. In der Lebensmittelindustrie werden i.d.R. Kälteleistungen von ca. 70 - 100 kW benötigt, wodurch sich eine notwendige „Unterkühlerleistung“ von ca. 10 - 30 kW ergibt, um eine ausreichend niedrige R744-Temperatur am Eintritt in den Verdampfer zu erreichen.

Im gegenständlichen Projekt soll die Unterkühlung mittels R290-Kältekreisläufen (R290-Module) simulationstechnisch und experimentell untersucht werden. Die damit mögliche Leistungssteigerung kann zum Abdecken von Lastspitzen genutzt werden, wodurch die R744-Kälteanlage besser auf die überwiegend auftretende Teillast ausgelegt werden kann. Dadurch kann die Anlage kompakter ausgeführt, kosteneffizienter errichtet und die Betriebssicherheit bei Lastschwankungen durch die von der Außentemperatur entkoppelte R744-Temperatur (vor der Drosselung) erhöht werden.

Zur Einhaltung aktueller Normen ist eine Begrenzung der R290 Füllmenge je Kältekreislauf mit 150 g anzustreben. Da ein optimiertes R290 Modul mit einer Füllmenge von 150 g eine Unterkühlerleistung von max. ca. 7 - 8 kW erwarten lässt,

erscheint der Einsatz mehrerer R290-Module („R290-Kälteaggregat“) zur Erreichung einer ausreichenden Unterkühlung als eine zielführende und zukunftsichere Methode.

Die Herausforderung in diesem Zusammenhang ist die notwendige simulationsbasierte Auslegung und Abbildung des Betriebsverhaltens der gekoppelten R744/R290-Kälteanlagen sowohl bei Teil- als auch bei Volllast, da sich die zeitlich veränderliche R744-Kälteleistung bzw. die Umgebungstemperatur sehr stark auf das Gesamtsystem auswirken. In diesem Zusammenhang ist es erforderlich, das „Zusammenspiel“ der R744/R290-Kälteanlagen zu optimieren. Mit Hilfe dynamischer Simulationsmodelle können unterschiedliche Regelungsstrategien des Gesamtsystems simulativ untersucht werden. Dadurch kann z.B. der zusätzliche Stromverbrauch der R290-Module der Effizienz- und Leistungssteigerung der R744-Kälteanlage gegenübergestellt und ein optimierter Betrieb sichergestellt werden. Bei Einsatz mehrerer kleiner R290-Kälteanlagen wird es durch das digitale Abbild des Systems auch möglich, situationsabhängig einzelne R290-Module hinzu- und wegzuschalten, sodass ein größtmöglicher Nutzen dieser zukunftsicheren Technologie erreicht werden kann. Im Rahmen dieses Projekts soll anhand eines detaillierten dynamischen Simulationsmodells das Verhalten des R744/R290-Systems abgebildet werden. Dazu sollen geeignete Komponentenmodelle entwickelt werden. Zur Entwicklung und Optimierung eines füllmengenminimierten R290-Moduls, welches anschließend im R290-Kälteaggregat im Gesamtsystem eingesetzt werden kann, wird ein Laborversuchsstand aufgebaut. Dieser dient u.a. auch zur Absicherung der Einzelmodelle des R290-Moduls. Basierend auf den vorgegebenen Randbedingungen wird ein mehrkreisiger R744/R290-Unterkühler (Wärmetauscher), in welchem die Verdampfer der R290-Module „zusammengefasst“, aber physisch getrennt sind, entwickelt und gebaut. Zur Optimierung des Gesamtsystems - bestehend aus R744-Kälteanlage, R744/R290-Wärmetauscher und R290-Module - sowie zur Validierung des dynamischen Simulationsmodells wird ein weiterer Versuchsstand aufgebaut. In einzelnen Betriebspunkten ist eine Steigerung des EER um 20 - 25 % zu erwarten. Unter Berücksichtigung klimatischer Bedingungen (Außentemperatur) führt dies zu einer möglichen Effizienzsteigerung des Gesamtsystems um bis zu 12 %. Dadurch kann bei einer Kälteanlage mit einer Nennkälteleistung von 100 kW der jährliche Stromverbrauch um ca. 7.500 kWh gesenkt und die CO₂-Emissionen um ca. 2.000 kg/a vermindert werden. Mittels umfangreicher simulativer Parameterstudien und einer Kostenschätzung wird eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt, um das Potential dieses Systems darzustellen. Das erfolgreich abgeschlossene Projekt soll schließlich zu einer deutlichen technologischen Verbesserung und damit einhergehenden Erweiterung des Einsatzbereichs sowie zur stärkeren Verbreitung von R744-Kälteanlagen führen.

Abstract

Due to the F-Gas Regulation, natural refrigerants such as carbon dioxide (CO₂ or R744) and propane (R290) are increasingly used in refrigeration technology. R744 as a refrigerant has found its way into refrigeration systems in the industrial sector, especially for food production and processing.

Variable loads and the dynamic behaviour of the overall system during operation lead on the one hand to challenges in the control and design of the components, and on the other hand to reduced efficiency. However, the dissipation of waste heat from industrial refrigeration systems in the event of a short-term increase in cooling capacity or higher outside temperatures (above approx. 27 °C), above which a transcritical mode of operation of R744 refrigeration systems occurs, leads to a significant increase in flash gas during throttling. This causes a drop in the R744 refrigeration capacity or an effort in compression due to the strongly dependent efficiency on the outside temperature. To achieve the desired refrigeration capacity at all operating conditions, a larger sizing of the refrigeration system is required.

To improve the efficiency of R744 refrigeration systems, especially in transcritical operation or at higher outdoor temperatures, and thus to increase their areas of application or to smooth load fluctuations, various "subcooling methods" for lowering the R744 temperature before throttling have been investigated in recent years - mainly theoretically. In the food

industry, cooling capacities of approx. 70 - 100 kW are usually required, resulting in a necessary "subcooler capacity" of approx. 10 - 30 kW to achieve a sufficiently low R744 temperature.

In this project, the subcooling by utilizing R290 refrigeration cycles (R290 modules) shall be investigated by means of simulation and experiment. The possible increase in capacity can be used to cover peak loads, which means that the R744 refrigeration system can be better designed for the predominantly occurring partial load. As a result, the plant can be designed more compactly, built more cost-efficiently and the operational reliability during load fluctuations can be increased due to the subcooling, which is independent of the outside temperature.

To comply with current standards, a limitation of the R290 filling quantity per refrigeration circuit with 150 g is aimed. Since an optimized R290 module with a filling quantity of 150 g can be expected to yield a capacity of approximately max. 7 - 8 kW, the use of several R290 modules ("R290 refrigeration unit") to achieve sufficient subcooling appears to be a target-oriented and future-proof method.

The challenge in this context is the necessary simulation-based design and mapping of the operating behaviour of the coupled R744/R290 refrigeration units at both partial and full load since the time-varying R744 refrigeration capacity or the ambient temperature have a very strong impact on the overall system. In this context, it is important to optimize the "interaction" of the R744/R290 refrigeration systems. With the help of a digital twin, different control strategies of the overall system can be investigated through simulation. Thus, for example, the additional power consumption of the R290 modules can be compared to the efficiency and performance increase of the R744 refrigeration system and an optimized operation can be ensured. If several small R290 refrigeration systems are used, the model of the system will also enable to add and remove individual R290 modules depending on the situation, so that the greatest possible benefit can be achieved from this promising technology.

Within the scope of this project, the behaviour of the R744/R290 system is to be mapped using a detailed dynamic simulation model. Suitable component models are to be developed for this purpose. A laboratory test rig will be set up for the development and optimization of an R290 module with a minimized filling quantity, which can then be used in the overall system. This will also serve to validate the individual models of the R290 module. Based on the given boundary conditions, a multi-circuit R744/R290 subcooler (heat exchanger), in which the evaporators of the R290 modules are "combined" but physically separated, will be developed and built. Another test rig will be set up to optimize the overall system - consisting of the R744 refrigeration system, R744/R290 heat exchanger and R290 modules - and to validate the dynamic simulation model. Under individual operating conditions, an increase in the EER of 20 - 25 % can be expected. Taking climatic conditions (outside temperature) into account, this leads to a possible efficiency increase of the overall system of up to 12 %. Thus, for a refrigeration system with a nominal cooling capacity of 100 kW, the annual electricity consumption can be reduced by approx. 7,500 kWh and the CO₂ emissions can be reduced by approx. 2,000 kg/a. Employing extensive simulative parameter studies and a cost estimate, an economic feasibility analysis will be performed to demonstrate the potential of this system.

The successfully completed project should ultimately lead to a significant technological improvement and the associated expansion of the range of applications, as well as to the greater dissemination of R744 refrigeration systems.

Endberichtkurzfassung

Das Projekt SEPCOO zielte darauf ab, die Effizienz von R744-Kälteanlagen durch die simulationsgestützte Entwicklung eines modularen R290-Unterkühlers zu steigern.

Die wichtigsten Ergebnisse sind:

Füllmengenminimiertes R290-Modul:

Ein zentrales Ergebnis war die Entwicklung eines R290-Moduls, das die angestrebte Funktionalität - die Wärmeabfuhr aus einem R744-Kältekreis nach dem Gaskühler - mit einer Füllmenge unter 150 g effizient und zuverlässig erfüllt. Dabei wurde das R290-Modul durch Simulationen und experimentelle Versuche schrittweise optimiert, um bei Füllmengen unter 150 g die Effizienz des Systems zu gewährleisten.

Entwicklung eines modularen R290-Unterkühlers:

Der Unterkühler ist flexibel aufgebaut (ein bis n-Module) und kann sowohl in neuen als auch in bestehenden Anlagen (Retrofit) integriert werden. Die entwickelte Betriebsstrategie zur Aktivierung und Deaktivierung einzelner R290-Module im Unterkühler ist skalierbar und erlaubt eine „einfache“ Integration des Unterkühlers in R744-Kälteanlagen.

Effizienzsteigerung der R744-Kälteanlagen:

Simulationen und experimentelle Tests einer gewerblichen R744-Kälteanlage zeigten, dass der Einsatz des Unterkühlers, den COP (Coefficient of Performance) um bis zu 17 % bei hohen Umgebungstemperaturen steigert und den elektrischen Jahresenergieverbrauch um bis zu 14 % reduziert.

Flexibilität

Die modulare Bauweise des R290-Unterkühlers ermöglicht eine Anpassung an verschiedene R744-Anlagenkonfigurationen, die durch unterschiedliche Anforderungen an die Kälteleistung oder den Aufstellungsort bedingt sind. So ermöglicht der Unterkühler den effizienten Einsatz von R744-Kälteanlagen auch bei hohen Umgebungstemperaturen.

Nachhaltigkeit:

Die Ergebnisse des Projekts „SEPCOO“ tragen durch den Einsatz der natürlichen Kältemittel R290 (Propan) und R744 (CO₂) zu einer nachhaltigen und umweltfreundlichen Kälteversorgung für Industrie und Gewerbe bei.

Downsizing und Standardisierung von R744-Anlagen:

Die Integration des Unterkühlers ermöglicht eine Anpassung der Auslegung von R744-Kälteanlagen, was bei einer möglichen kleineren Dimensionierung einiger Anlagenkomponenten zu Kostensenkungen für die Komponenten der R744-Kälteanlage führt. Aufgrund der höheren Effizienz des Systems - Unterkühler und R744-Kälteanlage - ist die Investition in einen Unterkühler eine wirtschaftlich und ökologisch sinnvolle Entscheidung.

Praktische Umsetzung:

Der Unterkühler wurde erfolgreich in einer Bestandsanlage getestet. Die Ergebnisse zeigten, dass die Integration technisch machbar ist und die Effizienz der Anlage verbessert.

Das Projekt demonstriert, dass die mechanische Unterkühlung mit R290 eine effektive und nachhaltige Lösung zur Leistungssteigerung von R744-Kälteanlagen darstellt.

Projektkoordinator

- Technische Universität Graz

Projektpartner

- HAUSER GmbH