SHaKE
Sharing Knowledge on Energy Communities

Co-funded by the European Union

5. modul
Fejlett rendszerek a távfűtésben és-hűtésben

SHaKE távfűtési és -hűtési rendszerekről szóló oktatási csomag része

Útmutató

Oktatási segédanyag felsőoktatás és szakképzés számára

Verzió: 1.0
Dátum: 2026. március

https://www.shakeproject-dhc.eu/

Projekt

Sharing Heat and Knowledge on Energy Communities (SHaKE)
Erasmus+ KA220-HED Együttműködési Partnerségek a felsőoktatásban
Projekt szám: 2023-1-HU01-KA220-HED-000160219

Szerzők

Dr. Antoine Fabre, Dr. Pascal Stabat (Mines Paris – PSL)

Szerkesztők

Szalma Éva, Dr. Antoine Fabre, Dr. Pascal Stabat, Ghad Alarnaot Alarnaout

EU-finanszírozási nyilatkozat és felelősségkizárás

Az Európai Unió által finanszírozott. A kifejezett nézetek és vélemények azonban kizárólag a szerző(k) véleményei, és nem feltétlenül tükrözik az Európai Unió vagy a Tempus Public Foundation véleményét. sem az Európai Unió, sem a támogató hatóság nem vonható felelősségre ezekért.

Koordinátor

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Magyarország

Partnerintézmények

Universitat Jaume I de Castellón, Spanyolország
Mines Paris – PSL, Franciaország

Elismerés

Ez a kiadvány a SHaKE projekt részeként készült. A konzorcium köszönetet mond minden oktatónak, kutatónak, szakembernek és érintettnek, akik hozzájárultak az oktatási anyagok fejlesztéséhez, áttekintéséhez és fejlesztéséhez.

Engedély

Amennyiben másképp nincs feltüntetve, az anyag a Creative Commons Attribution 4.0 International Licence (CC BY 4.0) alatt érhető el. A felhasználók megoszthatják és átdolgozhatják az anyagot, amennyiben megfelelően feltüntetik a SHaKE projektet és a szerzőket, megadják a licencre mutató linket, valamint jelzik az esetleges változtatásokat.
Javasolt hivatkozás:
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem. 1. modul: Bevezetés a távhőrendszerekbe. SHaKE projekt, 2026.
https://www.shakeproject-dhc.eu/

Útmutató az 5. modul használatához

Ez a modul a SHaKE oktatási csomag része, amelyet a távhő- és távhűtési (DHC) rendszerek felsőoktatási és szakmai képzési keretek közötti oktatásának támogatására fejlesztettek ki.

Az 5. modul a DHC-hálózatok teljesítményének javítását célzó fejlett megközelítésekre összpontosít. Ismerteti a meglévő hálózatok üzemeltetési kihívásait, valamint bemutatja a hatékonyság, a megbízhatóság és a fenntarthatóság növelését szolgáló módszereket. Kiemelt figyelmet fordít a visszatérő hőmérséklet csökkentésére, az épületoldali hidraulikai rendszerek szerepére, a meghibásodások diagnosztizálására, valamint az üzemeltetési adatok hálózatoptimalizálásban betöltött szerepére.

A modul feltárja a nem optimális működés gyakori okait, beleértve a szivárgásokat, a szekunder oldali meghibásodásokat, a szabályozószelepekkel és működtetőelemekkel kapcsolatos problémákat, a vezérlőrendszer hibáit és a hőcserélőkkel kapcsolatos gondokat. Kitér továbbá a szekunder oldali tervezési döntések, a használati melegvíz-ellátási konfigurációk és a hődíjazási modellek DHC-hálózatok általános teljesítményére gyakorolt hatására is.

Emellett a modul bemutatja azokat az eszközöket és mutatókat, amelyekkel rendellenességek és hibák azonosíthatók a DHC-hőközpontokban és -hálózatokban. A tananyagok esettanulmányok, műszaki feladatok és numerikus modellezési tevékenységek révén támogatják mind az elvi megértést, mind a mérnöki gyakorlati munkát.

Az útmutató elsősorban oktatók, előadók és képzők számára készült, újrafelhasználható oktatási segédanyagként. Használható előadások, vegyes (blended) oktatási tevékenységek, tantermi megbeszélések, gyakorlati feladatok, esettanulmányok és szakmai továbbképzések támogatására. A mellékelt prezentációs diák, kérdésgyűjtemény, önellenőrző kvíz és gyakorlati feladat célja, hogy segítse az oktatókat a tartalom saját oktatási környezetükhöz való igazításában.

A modult hallgatók és szakemberek is használhatják önálló tanulásra, különösen akkor, ha már rendelkeznek alapvető ismeretekkel a távhő- és távhűtési rendszerekről, a hőközpontokról, a hidraulikai rendszerekről, a hőcserélőkről és az alapvető adatelemzésről.

A modulban tárgyalt főbb témák

- A távfűtés és -hűtés jelenlegi helyzete Európában
- Távfűtési és hűtési politikák, fejlesztési trendek és megújuló energia integrációja
- DHC hálózatok teljesítményének javítása
- Visszatérő hőmérsékletek csökkentése és annak hatása a hálózat hatékonyságára
- Gyakori hibák és működési zavarok a DHC hálózatokban
- Szivárgások, szekunder oldali meghibásodások, szabályozószelep- és működtetőproblémák
- Vezérlőrendszer és hőcserélő hibák
- Épületoldali hidraulikai rendszerek és azok hatása a távfűtés/hűtés teljesítményére
- Használati melegvíz konfigurációk és azok hatása a visszatérő hőmérsékletre
- Hőtarifa modellek és ösztönzők az ügyféloldali teljesítmény javítására
- Anomáliaészlelési és hibaészlelési módszerek
- A DHC üzemeltetők által használt gyakorlati indikátorok
- Üzemeltetési adatok felhasználása a meghibásodás észlelésének támogatására

- A DHC hálózat teljesítményének egyszerű modellezése és elemzése
- Szabályozási módszerek és optimalizálási megközelítések fejlett DHC-működéshez

Az 5. modul tanulási eredményei

A modul a következő készségek és kompetenciák fejlesztését hivatott támogatni.

A modul elvégzése után a tanulóknak képesnek kell lenniük a következőkre:

- Elmagyarázni, miért fontos a távfűtési- és hűtési-hálózat teljesítményének javítása a dekarbonizáció és a megújuló energia integrációja szempontjából.
- Meghatároznia nem optimális távfűtési- és hűtésihálózat működésének következményeit
- A távfűtési- és hűtési-hálózatok alulteljesítményének és meghibásodásának fő okainak azonosítása
- Felismerni a szivárgásokkal, szekunder rendszerekkel, szabályozószelepekkel, működtetőkkel, vezérlőkkel és hőcserélőkkel kapcsolatos gyakori hibákat
- Elmagyarázni, hogyan befolyásolják a szekunder oldali hidraulikus rendszerek a primer hálózat visszatérő hőmérsékletét
- Összehasonlítani az épületoldali és az hőközponti teljesítmény javítására szolgáló műszaki megoldásokat
- A távfűtési- és hűtési-hálózat teljesítményének javítására szolgáló megfelelő üzemeltetési és tervezési intézkedések azonosítása
- Elmagyarázni a hőtarifa-modellek szerepét az ügyféloldali teljesítményjavítás ösztönzésében.
- Különbség a rendellenesség-észlelési és a hibaészlelési megközelítések között
- Alkalmazni egyszerű hibaészlelési indikátorokat kiválasztott távfűtési- és hűtésiműködési problémákratávfűtési- és hűtésiA távfűtési- és hűtésihőközpontokkal és hálózatokkal kapcsolatos alapvető üzemi adatok értelmezése
- Egyszerű távfűtési- és hűtési-modellt lértehozni és vagy értelmezni teljesítményelemzés vagy optimalizálás kontextusában

Becsült óraszám

Ez a modul körülbelül 9,5 tanulási órát jelent, beleértve az előadásokat, esettanulmányokat, önálló tanulást és értékelést.

Az oktatók a kurzus szintjétől, a kiválasztott anyagoktól és az oktatási formátumtól függően módosíthatják a óraszámot. A modul a következőképpen használható:

- egy komplett oktatási egység,
- válogatott előadásanyagok gyűjteménye,
- egy kevert tanulási komponens,

- egy gyakorlati gyakorlatcsomag,
- egy esettanulmány-csomag,
- vagy kiegészítő forrásként a meglévő kurzusokhoz.

Tevékenységek és tanulási órák

Tevékenység típusa	**Időbeosztás (órák)**	**Leírás**
Előadások	5 óra	1. szekvencia: A távhő- és hűtésszolgáltatás jelenlegi állapotának leírása az EU-ban és a távhő- és hűtés-politikák 2. szekvencia: A távhő- és hűtésteljesítményének javítására szolgáló lehetőségek leírása 3. szekvencia: Az épületoldali hidraulikai rendszerek teljesítményének javítására szolgáló módszerek leírása 4. szekvencia: A meghibásodások észlelésére szolgáló eszközök és jelzőfények leírása 5. szekvencia: Módszertan a távhő- és hűtés-hálózatok és a távhő- és hűtéshez kapcsolódó adatok modellezésére 6. szekvencia: Szabályozási módszerek és alternatív optimalizálási megközelítések leírása
Esettanulmányok	2 óra	2. szekvencia: Különböző távhő rendszer szabályozási és meghibásodási hatások elemzése numerikus modell alapján 3. szekvencia: Különböző távhő rendszer architektúrák elemzése numerikus modell alapján
Önálló tanulás	2 óra	Felkészülés a projekt értékelésére és kutatására
Értékelés	30 perc	Kvíz, projekt
Teljes tanulási óraszám	9:30	

Célcsoportok

Ez az útmutató elsősorban olyan oktatóknak, előadóknak és trénereknek szól, akik a SHaKE anyagokat saját oktatási vagy képzési tevékenységeikben szeretnék használni vagy adaptálni.

Az elsődleges célcsoportok a következők:

- felsőoktatási előadók mérnöki, épületgépészeti, energetikai és kapcsolódó területeken,
- távfűtéssel és -hűtéssel kapcsolatos szakmai vagy továbbképzésben részt vevő oktatók,
- kevert, moduláris vagy gyakorlatorientált tanulási tevékenységeket kidolgozó oktatók,

- akadémiai személyzet, akik újrafelhasználható oktatási anyagokat keresnek a fenntartható távenergia-rendszerekről,
- távhő- és hőszivattyú üzemeltetésével, optimalizálásával, hőközpontokkal és energiahatékonysággal kapcsolatos témákkal foglalkozó oktatók és előadók

Az anyagokat diákok, szakemberek és önálló tanulók is használhatják, akik egyénileg kívánnak kiválasztott témákat tanulmányozni. Önálló használathoz alapvető előzetes ismeretek ajánlottak a vonatkozó mérnöki területeken.

Oktatók és trénerek által ajánlott használat

Az 5. modul rugalmasan használható teljes oktatási egységként vagy kiválasztott oktatási segédanyagok gyűjteményeként. Az oktatók a kurzus szintje, a rendelkezésre álló tanítási idő és a kívánt tanulási eredmények szerint kombinálhatják az anyagokat.

Tanítási igény	Javasolt 5. modul forrásanyag
A téma bemutatása	A modul áttekintése és a bevezető diák segítségével mutassa be a fejlett távhő- és hűtés-rendszerek jelentőségét, a hálózati teljesítmény javítását és az alacsony visszatérő hőmérsékletek szerepét.
A tanulók felkészítése az óra előtt	Jelölje ki a kiválasztott kalauzrészleteket előolvasásként a fordított osztálytermi vagy kevert tanulási tevékenységekhez.
Előadások vagy szemináriumok támogatása	A prezentációs diák segítségével ismertesse a távhő- és hőszivattyú teljesítményével kapcsolatos kihívásokat, a szekunder oldali hidraulikai rendszereket, a meghibásodási típusokat, a hibaészlelési módszereket és az optimalizálási megközelítéseket.
A megértés ellenőrzése	Használj a kérdésbankból kiválasztott kérdéseket megbeszélésre, rövid órai ellenőrzésekre, formatív értékelésre vagy LMS-alapú kvízekre.
Alkalmazott mérnöki készségek fejlesztése	Használja a gyakorlati feladatokat és esettanulmányokat csoportmunkához, házi feladathoz, projektalapú tanuláshoz, numerikus elemzéshez vagy irányított modellezési foglalkozásokhoz.
Adatalapú párbeszéd támogatása	Használja fel az anomáliaészleléssel, a hibaészlelési jelzőkkel és az üzemi adatokkal foglalkozó részeket a távhő- és hűtés-hálózatok monitorozásáról és diagnosztizálásáról szóló tantermi beszélgetés kezdeményezéséhez.
Független felülvizsgálat támogatása	Miután a tanulók áttanulmányozták a vonatkozó anyagokat, irányítsd őket a modulszintű önellenőrző teszthez.
Alkalmazkodás a helyi tanítási környezethez	Válassza ki, kombinálja vagy módosítsa a kalauz részeit, diákat, kérdéseket és gyakorlatokat a tananyagnak, a résztvevők szintjének és a szakmai kontextusnak megfelelően.

Ajánlott tanulási útvonal önálló tanulók számára

A modult önállóan használó diákok és szakemberek az alábbi sorrendet követhetik.

Lépés	Javasolt tevékenység
Tekintse át a bevezető prezentációt	Ismerkedjen meg a modul főbb fogalmaival, terminológiájával és felépítésével.
Tanulmányozd az útmutató anyagait	Olvassa el a kézikönyvben bemutatott részletes magyarázatokat, mérnöki alapelveket és működési koncepciókat.

Lépés	Javasolt tevékenység
Nézd meg a modul videóját	A modulvideó és a hozzá tartozó értékelő kérdések segítségével vizsgálja meg a modul egy kiválasztott témáját, koncepcióját vagy gyakorlati aspektusát.
Töltsd ki az önellenőrző kvízt	Teszteld a modulban tárgyalt főbb fogalmak és technikai alapelvek megértését.
Próbáld meg a gyakorlati feladatot	A megszerzett tudás alkalmazása mérnöki orientációjú elemzés, modellezés vagy esettanulmány-alapú feladatok révén, amelyek a DHC hálózat teljesítményéhez kapcsolódnak.
Tekintse át a kérdésbankot	Használd a kérdéseket átismétlésre, megbeszélésre vagy az értékelésre való felkészülésre.

Elérhető segédanyagok

Az elérhető tanulási források és értékelési anyagok a következők:

- a modul altémáihoz tartozó prezentációs diák,
- egy újrafelhasználható kérdésbank,
- egy modul szintű önellenőrző kvíz,
- egy modulvideó csatolt értékelési kérdésekkel,
- egy letölthető gyakorlati feladatcsomag, amely tartalmazza a Python és Jupyter Notebook fájlokat, valamint a szükséges bemeneti, modell-, kép- és kimeneti mappákat,
- Az hőközponti és hálózati szintű DHC teljesítményének numerikus elemzésén alapuló esettanulmányok és mini-projekt feladatok, amelyek csoportmunkához, házi feladatokhoz, rövid műszaki jelentésekhez vagy szóbeli prezentációkhoz használhatók.

Tartalomjegyzék

Szerzők 2

Szerkesztők 2

1. A távfűtési és távhűtési hálózat teljesítményének javítása 10

1.1. A DHC hálózatok hibáinak áttekintése 10

1.1.1. Szivárgások 11

1.1.2. Szekunder rendszer meghibásodásai 12

1.1.3. Szabályozószelepek és aktuátorok 13

1.1.4. Vezérlőrendszerek és szabályozók 14

1.1.5. Hőcserélő 14

1.1.6. Következtetés 15

1.2. A szekunder oldali hidraulikus rendszerek tervezése 15

1.2.1. A hőleadók típusának és a szekunder áramlásszabályozásnak a hatása 19

1.2.2. A HMV hidraulikai konfigurációjának hatása 23

1.2.3. Következtetés a legjobb hidraulikai konfigurációról 24

1.2.4. Hőtarifa modellek 25

1.3. Hibaészlelés 27

1.3.1. Hibaészlelési kihívások 27

1.3.2. Mi a meghibásodás észlelése? 28

1.3.3. Anomáliaészlelés 28

1.3.3.1. Vizualizáció és manuális elemzés 28

1.3.3.2. Küszöbértékek 30

1.3.3.3. Regresszió 31

1.3.3.4. Osztályozás 32

1.3.3.5. Klaszterezés 33

1.3.4. A DHC üzemeltetői által használt közös indikátorok 34

1.3.5. Hibaészlelés 37

Referenciák 44

1. A távfűtési és távhűtési hálózat teljesítményének javítása

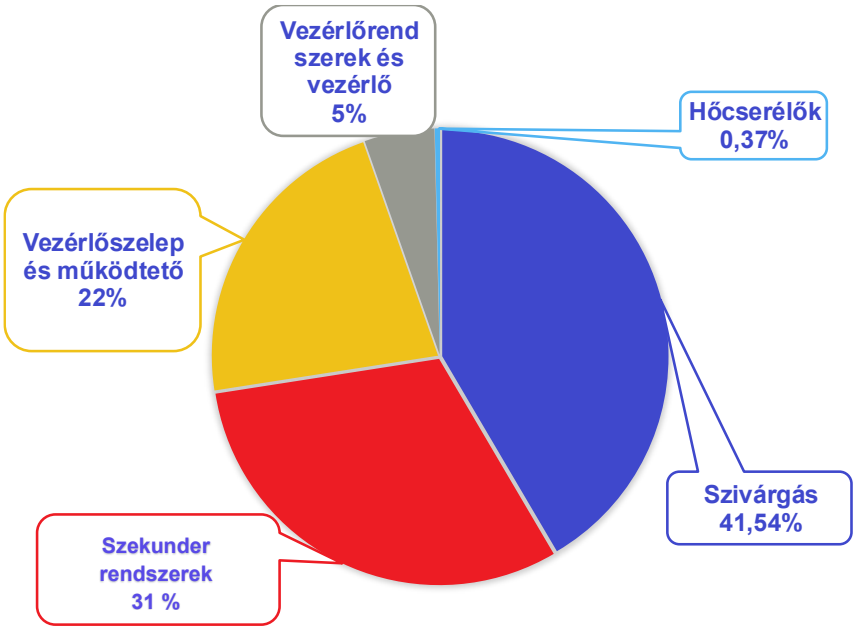
A távfűtési és távhűtési (DHC) hálózatokra vonatkozó európai célkitűzések teljesítése érdekében javítani kell a meglévő hálózatok teljesítményét. A fűtési hálózatok esetében a teljesítmény javítása elsősorban a megújuló energia arányának növelését jelenti az energiamixben. A gyakorlatban ez általában a hálózat összesített visszatérő hőmérsékletének csökkentését igényli; ez lehetővé teszi az alacsony hőmérsékletű megújuló energiaforrások – például a geotermikus energia és a hulladékhő – fokozottabb hasznosítását, miközben csökkennek a csővezetékek hőveszteségei és az primer szivattyúk energiafogyasztásai.

Ennek megfelelően a DHC-hálózatok üzemeltetői arra törekszenek, hogy a lehető legalacsonyabb összesített visszatérő hőmérsékletet érjék el. E cél megvalósítása megköveteli a hálózat működésének alapos ismeretét. A DHC-üzemeltetők feladata elsősorban a hőtermelő létesítmények, a primer hálózat és a hőközpontok primer oldalának kezelése. Tekintettel a DHC-hálózatok összetettségére, valamint a jellemzően szakértői tudáson alapuló, viszonylag egyszerű szabályozási stratégiákra, jelentős lehetőségek rejlenek az optimalizálásban.

Mivel azonban a DHC-hálózatok hőellátása számos szabályozási, mechanikai és hidraulikai komponenstől függ, előfordulhatnak üzemzavarok. A hálózat bármely pontján található nem megfelelő vagy hibás berendezés negatívan befolyásolhatja az összesített visszatérő hőmérsékletet. Ezért a szabályozás optimalizálásának mérlegelése előtt elengedhetetlen a hálózat megfelelő működésének biztosítása. Az [1] hivatkozás szerinti, két svéd hálózaton végzett vizsgálat tanúsága szerint azonban a hőközpontoknak mindössze 26%-a működött megfelelően. A hőközpontokban fellépő üzemzavarok nem feltétlenül szakítják meg a hőellátást, ugyanakkor jelentős hatással lehetnek a DHC-hálózat általános teljesítményére. Emiatt kulcsfontosságú ismerni a leggyakoribb üzemzavarokat, valamint azokat a hibákat, amelyek a legnagyobb hatást gyakorolják a teljesítményre.

1.1. A DHC hálózatok hibáinak áttekintése

A DHC hálózat működésének összetettsége miatt a meghibásodások okai nagyon sokrétűek lehetnek. Egy, több svéd hálózaton végzett tanulmány [2] azonosította a hálózati meghibásodások különböző lehetséges okait és azok ismétlődését (lásd az **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**ábrát).



*1. **Hiba! Érvénytelen könyvjelző-hivatkozás.**ábra 2ábra részletesebb hibaeloszlást mutat be.**Hiba! Érvénytelen könyvjelző-hivatkozás.**ábra 3ábra 4ábra mutatja **Hiba! Érvénytelen könyvjelző-hivatkozás.**ábra 5ábra 6ábra 7ábra 8ábra 9ábra 10ábra 11ábra 12ábra 13ábra 14ábra 15ábra 16ábra 17ábra 18ábra 19ábra 20ábra 21ábra 22ábra 23ábra 24ábra 25ábra 26ábra 27ábra 28ábra 29ábra 30ábra 31ábra 32ábra 33ábra 34ábra 35ábra 36ábra 37 **Hiba! Érvénytelen könyvjelző-hivatkozás.**ábra 38ábra 39ábra Túl magas HMV visszatérő hőmérséklet érzékelésének jelzője*

A referencia eseteket az állandó hatásfok vonalak ábrázolják. Ezen vonalak felépítéséhez 3 feltételezésre van szükség: a városi hidegvíz hőmérsékletére, a recirkulációs kör visszatérő hőmérsékletére és az F arányra vonatkozóan. Ezeket a következő egyenletek segítségével határozzuk meg:

$$E = \frac{T_{p,be} - T_{p,ki}}{T_{p,be} - T_{s,be}}$$

$$\left(m_{cirk} + m_{igény}\right) \cdot T_{s,be} = m_{cirk} \cdot T_{cirk} + m_{igény} \cdot T_{hidegvíz}$$

$$T_{p,ki} = (1 - E) \cdot T_{p,be} + E \cdot \frac{F \cdot T_{cirk} + T_{hidegvíz}}{F + 1}$$

A primer oldali hőmérséklet mérésével meghatározható a HMV-cserélő hatásfoka bizonyos feltételezések mellett. Valójában, ahogy a **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**, a hibás rendszernek megfelelő mérési pontok (narancssárga pont) a 0,5-ös hatásfokú vonal közelében vannak. Általában egy távfűtéses rendszer HMV-hőcserélőjének hatásfoka 0,8 és 0,95 között van. Ezért a kijelző a HMV-rendszerben észlel hibát. Ezzel szemben a nem hibás rendszernek megfelelő mérési pontok (kék pont) az 1-es hatásfokú vonal alatt vannak. Ez csak azt jelenti, hogy a kijelző felépítéséhez használt hipotézisek túl erősek. Tehát a HMV-ellátás a vártnál jobban működik.

Referenciák

[1] H. Gadd et S. Werner, «Fault detection in district heating substation,» *Applied energy,* vol. 157, pp. 51-59, 2015.

[2] S. Mansson, P.-O. Johansson Kallioniemi, M. Thern et T. Van Oevelen, «Faults in district heating customer installations and ways to approach them: Experiences from Swedish utilities,» *Energy,* vol. 180, pp. 163-174, 2019.

[3] S. Frederiksen et S. Werner, District heating and cooling, Studentlitteratur, 2013.

[4] A. Fabre, C. Duchayne, T. Nyberg, V. Gavan, K. Lygnerud et P. Stabat, «Cost benefit study on the building secondary network for improving DH performance,» IEA DHC/CHP, 2023.

[5] P.-O. Johansson, P. Lauenburg et J. Wollerstrand, «Improved cooling of district heating water in substations by using alternative connection schemes,» *22nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization Simulation and Environmental Impact of Energy Systems,* pp. 843-852, 2009.

[6] S. Buffa, M. Fouladfar, G. Franchini, I. Lozano Gabarre et M. Andrés Chicote, «Advanced Control and Fault Detection Strategies for District Heating and Cooling Systems—A Review,» *Applied sciences,* vol. 11, n° %11, p. 455, 2021.

[7] A. Rafati et H. R. Shaker, «Predictive maintenance of district heating networks: A comprehensive review of methods and challenges,» *Thermal Science and Engineering Progress,* vol. 53, p. 102722, 2024.

[8] M. Neumayer, D. Stecher, S. Grimm, A. Maier, D. Bücker et J. Schmidt, «Fault and anomaly detection in district heating substations: A survey on methodology and data sets,» *Energy,* vol. 276, p. 127569, 2023.

[9] R. Kim, Y. Hong, Y. Choi et S. Yoon, «System-level fouling detection of district heating substations using virtual-sensor-assisted building automation system,» *Energy,* vol. 227, p. 120515, 2021.

[10] E. Guelpa et V. Verda, «Automatic fouling detection in district heating substations: Methodology and tests,» *Applied energy,* vol. 258, p. 114059, 2020.

[11] N. Zimmerman, E. Dahlquist et K. Kyprianidis, «Towards On-line Fault Detection and Diagnostics in District Heating Systems,» *Energy procedia,* vol. 105, pp. 1960-1966, 2017.

[12] P. Xue, Z. Zhou, X. Fang, X. Chen, L. Liu, Y. Liu et J. Liu, «Fault detection and operation optimization in district heating substations based on data mining techniques,» *Applied energy,* vol. 205, pp. 926-940, 2017.

[13] H. Gadd et S. Werner, «Achieving low return temperatures from district heating substations,» *Applied energy,* vol. 136, pp. 59-67, 2014.

[14] S. Mansson, K. Davidsson, P. Lauenburg et M. Thern, «Automated Statistical Methods for Fault Detection in District Heating Customer Installations,» *Energies,* vol. 12, n° %11, p. 113, 2018.

[15] A. Fabre, «Développement d'indicateur de performance et de détection de défauts sur les réseaux de chaleur dans une démarche d'optimisation de leur pilotage,» PhD thesis, MINES ParisTech, 2020.

[16] F. Theusch, P. Klein, R. Bergmann, W. Wilke, W. Bock et A. Weber, «Fault Detection and Condition Monitoring in District Heating Using Smart Meter Data,» *PHM Society European Conference,* vol. 6, n° %11, p. 11, 2021.

[17] S. Farouq, S. Byttner, M.-R. Bouguelia, N. Nord et H. Gadd, «Large-scale monitoring of operationally diverse district heating substations: A reference-group based approach,» *Engineering Applications of Artificial Intelligence,* vol. 90, p. 103492, 2020.