

Openbaar eindrapport project HEATFLEX

Uitgangspunten - doelstellingen - project partners

De 4de generatie warmtenetten (4th Generation District Heating - 4GDH) heeft het potentieel om de energietransitie van de stedelijke thermische sector naar een aandeel van 100% hernieuwbare energie te brengen. Om dit mogelijk te maken zijn er computermodellen nodig waarmee ontwerprichtlijnen voor 4GDH-netwerken kunnen worden opgesteld. Toekomstige warmtenetten moeten gedecentraliseerde energievoorziening uit meerdere en intermitterende energiebronnen mogelijk maken. Cruciaal hiervoor is een flexibele en pro-actieve werking en regeling van warmtenetten op basis van input van consumenten. Om dat mogelijk te maken is een computermodel nodig dat compact en snel is en tegelijkertijd voldoende nauwkeurig om de relevante thermische dynamiek in het netwerk te voorspellen. Dit computermodel kan dan later worden gebruikt voor de ontwikkeling van regelingen op basis van Model Predictive Control (MPC).

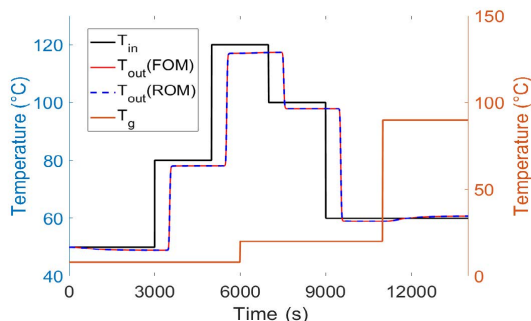
In dit project lag de nadruk op de ontwikkeling van een betrouwbaar computermodel voor warmtenetten, dat compact, snel en nauwkeurig is. Het project is uitgevoerd in samenwerking met twee industriële partners, Conico Valves BV en Ares RTB de Beijer. Tijdens het project was er ook intensief contact met Ennatuurlijk (exploitant van verschillende stadsverwarmingsnetten) voor de levering van meetgegevens waarmee het ontwikkelde numerieke model kon worden gevalideerd.

Behaalde resultaten

Voor de modellering van het temperatuurverloop in stadsverwarmingsnetten is gekozen voor de ontwikkeling van een data-driven thermisch model. Dit zogenaamde Reduced-Order Model (ROM) wordt verkregen door de wet van behoud van energie voor elk leidingsegment te herleiden tot een semi-analytische input-output relatie tussen de uitlaattemperatuur van het leidingsegment aan de ene kant en de inlaat- en grondtemperaturen aan de andere kant. Er kan worden aangetoond dat de volgende relatie geldt.

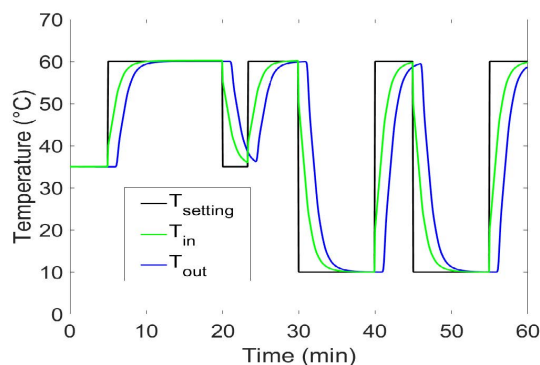
$$\tilde{T}_{out}(t) = \tilde{T}_{in}F_1(t) + \tilde{T}_gF_2(t) \quad (1)$$

De temperaturen \tilde{T} zijn temperaturen ten opzichte van een begintemperatuur T_0 . $F_{1,2}$ zijn de overdrachtsfuncties die de respons van het systeem beschrijven op stapsgewijze veranderingen in de inlaattemperatuur (F_1) en de bodemtemperatuur (F_2). De eenheidsstapresponsen kunnen worden bepaald aan de hand van training data (data-driven). In dit project zijn de training data gegenereerd met een fysisch-gebaseerd eindige-differentiëmodel voor de thermische dynamiek in de pijpsegmenten van een netwerk, gebaseerd op de energiebalansen van de waterstroming, de stalen pijp, de isolatielaag, de mantel en de omringende bodemstructuur.



Figuur 1: Respons van T_{out} (uitlaattemperatuur) op stapsgewijze veranderingen in zowel T_{in} (inlaattemperatuur) als T_g (grondtemperatuur) volgens ROM-voorspellingen versus FOM-simulaties. Het pijpsegment heeft een lengte $L = 600m$.

De uitgevoerde testen aan een enkel pijpsegment met een lengte van $L = 600m$, zie figuur 1, tonen aan dat de ROM (i) met succes kan worden opgesteld en (ii) de respons van de uitlaattemperatuur



Figuur 2: Prestaties van een goed ontworpen regelaar ($K_p = 0.211$ en $K_i = 0.0085$): referentietracking van een door de gebruiker gedefinieerd profiel $T_{setting}$.

op willekeurige invoerprofielen voor inlaat- en grondtemperaturen nauwkeurig kan beschrijven. De ROM is daarna toegepast op twee casestudies: de simulatie van een klein warmtenetwerk en het ontwerp van een regelaar voor een door de gebruiker gedefinieerde temperatuurregeling, zie figuur 2. Deze casestudies hebben het voorspellend vermogen en de efficiëntie van de de opgestelde ROM aangetoond.

Perspectief voor toepassing en spin-off

Tot dusver is de ROM gebruikt voor de PI-regeling van een eenvoudig en klein DH-netwerk. Een belangrijke volgende stap bestaat uit meer geavanceerde regelstrategieën die gebaseerd zijn op voorspelling van toekomstig gedrag, zoals bijvoorbeeld Model Predictive Control (MPC). MPC is een gevestigde en beproefde aanpak voor procesregeling in bijv. de chemische industrie en kan ook een veelbelovende aanpak zijn voor de regeling van (duurzame) energiesystemen zoals bijvoorbeeld DH-netwerken. De sleutel voor MPC is een snelle en nauwkeurige voorspelling van het toekomstige systeemgedrag en het hier ontwikkelde ROM is hiervoor zeer geschikt. In vervolgstudies zal de aandacht worden verlegd naar meer realistische DH-netwerken.

Onlangs zijn door de sectie Energy Technology & Fluid Dynamics nieuwe vervolgprojecten gestart op het gebied van DH-netwerken. Het hoofddoel van het FOM4HECONET project is het ontwikkelen van modelleringsmethoden voor het ontwerp en de controle van 5GDH netwerken. Het hoofddoel van het projectvoorstel RELI5E (dat op het moment van schrijven wordt beoordeeld voor EU-financiering) is de ontwikkeling van een gebruiksklare open-source modelleer- en analyseomgeving voor de technische, economische en maatschappelijke beoordeling van scenario's voor de overgang naar 5GDH-netwerken.

Conico Valves BV ontwikkelt een nieuw concept voor grote warmtepompsystemen, die fungeren als warmtebron voor warmtenetten zoals kleine stadsverwarmingssystemen. In dit nieuwe concept maakt het warmtepompstelsel gebruik van een slimme bufferstrategie (in combinatie met een goed gestratificeerd buffervat) om in te spelen op variaties in de elektriciteitsprijzen per uur, waardoor de exploitatiekosten van de warmtepomp en het warmtenet dalen.

Bijdrage van het project aan de doelstellingen van de TKI Urban Energy

Door de ingrijpende veranderingen in de toekomstige energiesystemen (meerdere injectiepunten, verschillende energiedragers, consumenten die prosumenten worden, gedecentraliseerde opslagtechnologieën, enz.) kunnen in de komende jaren verschillende mogelijke strategieën worden toegepast om het huidige energiesysteem te verbeteren. Het is de vaste overtuiging van de aanvragers dat warmtenetten een belangrijke rol zullen spelen in het energiesysteem van de toekomst. Belangrijke aandachtspunten daarbij zijn het toenemende belang van koeling en de beheersing van een steeds complexer systeem. Juist dit laatste punt heeft de volle aandacht gekregen in het HEATFLEX-project, de ontwikkeling van een betrouwbaar modelleringsinstrument voor een 4GDH-netwerk, dat na verdere ontwikkeling

kan worden gebruikt voor het optimale ontwerp en de optimale regeling van een dergelijk netwerk dat verbonden is met verschillende hernieuwbare energiebronnen en/of warmteopslagtechnologieën.

Het doel van het HEATFLEX project sluit volledig aan bij de ambities en doelstellingen van de TKI-missies 'Een CO_2 -vrije gebouwde omgeving in 2050' en 'Een volledig CO_2 -vrij elektriciteitssysteem in 2050'. Binnen deze missies zijn Meerjarige Missiegedreven Innovatieprogramma's (MMIP's) uitgewerkt. Het HEATFLEX project sluit heel goed aan bij de MMIP's 'Duurzame warmte en koude in de gebouwde omgeving' en 'Het nieuwe energiesysteem in de gebouwde omgeving in evenwicht'.

Overzicht van openbaar verkrijgbare publicaties van HEAT-FLEX resultaten

1. Jiang, M. (2023). *Reduced-order modelling of district heating systems* (Tentative title) [Unpublished PhD thesis, Eindhoven University of Technology].
2. Jiang, M., Rindt, C. C. M., Smeulders, D. M. J. (2022). Optimal Planning of Future District Heating Systems—A Review. *Energies*, 15(19), [7160]. <https://doi.org/10.3390/en15197160>.
3. Jiang, M., Speetjens, M.F.M., Rindt, C. C. M., Smeulders, D. M. J. (2022). A data-based reduced-order model for dynamic simulation and control of district-heating networks. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2211.14119>.
4. Jiang, M., Speetjens, M.F.M., Rindt, C. C. M., Smeulders, D. M. J. (2023). An interpolation-based approach for variable mass flux problem in district heating networks. To be submitted.
5. Koning, F.d. (2020). *Reducing Computational Cost in District Heating Network Simulations* [Master thesis, Eindhoven University of Technology]. [Thesis de Koning](#).
6. Lim, A. (2020). *A comparative study between TRNSYS and RC thermal* [Master thesis, Eindhoven University of Technology]. [Thesis Lim](#)
7. Kil, I. (2021). *Validation of a Numerical Model for District Heating Networks* [Master thesis, Eindhoven University of Technology]. [Thesis Kil](#).
8. Nieddu, S. (2022). *Performance assessment of Modelica in modelling and simulating the thermal dynamics of a district heating system* [Master thesis, Eindhoven University of Technology]. [Thesis Nieddu](#).
9. Afanador, A.M. (2022). *Data Driven Reduced Order Models for Thermochemical Energy Storage Systems* [Master thesis, Eindhoven University of Technology]. [Thesis Afanador](#).
10. Hartog, H.J.A.d. (2022). *Reduced Order Modeling of District Heating System with Thermal Storage* [Master thesis, Eindhoven University of Technology]. [Thesis den Hartog](#).
11. Lin, C.F. (2023). *Clustering algorithms for heat load patterns prediction* [Unpublished Master thesis, Eindhoven University of Technology].

Contactpersonen voor meer informatie

Camilo Rindt TU Eindhoven Postbus 513 5600MB Eindhoven Tel: 040 247 2978	David Smeulders TU Eindhoven Postbus 513 5600MB Eindhoven Tel: 040 247 3167
--	---

Meer exemplaren van dit rapport of de gepubliceerde artikelen binnen dit project zijn verkrijgbaar via het secretariaat van de sectie [Energy Technology & Fluid Dynamics](#)

Subsidieregeling

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.