

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGY INSTITUTE

ROZVOJ TEPLÁRENSKÉ SOUSTAVY V BRNĚ

AN ADVANCEMENT OF HEATING PLANTS SYSTEM IN BRNO

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VÍT BRABEC

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL JAROŠ, Dr.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Vít Brabec

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Rozvoj teplárenské soustavy v Brně

v anglickém jazyce:

An advancement of heating plants system in Brno

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Požadavkem současné doby je maximální využití energetických zdrojů, zejména fosilních paliv. Tomu odpovídá souběžná výroba elektrické energie a tepla, která je podstatou teplárenství. Brněnské teplárenství, které patřilo ve svých počátcích ke světové špičce, zvyšuje v posledních letech v důsledku nových investic opět svou úroveň. Teoretický základ oboru teplárenství vytváří termodynamika, zejména její 1. a 2. zákon.

Cíle bakalářské práce:

Zhodnoťte rozvoj brněnské teplárenské soustavy z pohledu historického i současného. Posuďte jej po věcné stránce i z hlediska základních zákonů termodynamiky. Na základě zjištěných údajů vypočítejte hodnoty základních parametrů vybraných prvků teplárenské soustavy.

Seznam odborné literatury:

Pavelek, M. a kol.: Termomechanika. Skripta FSI VUT. Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2003.

Cengel, Y. A., Boles, M. A.: Thermodynamics: an engineering approach. 6th ed. McGraw-Hill, New York, 2008.

Kadrnožka, J., Ochrana, L.: Teplárenství. Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2001.

Firemní literatura Tepláren Brno a.s.

Internetové a jiné zdroje dle vlastního výběru studenta.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Michal Jaroš, Dr.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 13.11.2008

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Obsahem bakalářské práce je posouzení rozvoje teplárenské soustavy v Brně. První část práce uvádí stručný průřez osmdesátiletou historií brněnského teplárenství od prvních myšlenek až po současnou podobu. Další část obsahuje bližší popis jednotlivých provozů a soustavy centralizovaného zásobování teplem. Poslední část porovnává dodávku tepla parovodem a horkovodem a její vliv na kombinovanou výrobu tepla a elektrické energie.

Abstract

The content of this bachelor's thesis is the examination of the advancement of heating plants system in Brno. The first part of the thesis introduces a brief overview of an eighty-year history of heating industry in Brno from the first ideas up to the current state. Next part closely describes the individual plants and the system of centralized heat supply. The last section compares heat supply through steam and hydrothermal pipe-line and its influence on the combined production of heat and electrical energy.

Klíčová slova

teplárenství, teplárna, horkovodní potrubí, parovodní potrubí

Keywords

heating plants system, heating plant, hydrothermal pipe-line, steam pipe-line

Bibliografická citace

BRABEC, V. *Rozvoj teplotní soustavy v Brně*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Jaroš, Dr.

Čestné prohlášení

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 28. 5. 2009

.....

Vít Brabec

Poděkování

Tímto děkuji Ing. Michalu Jarošovi, Dr. za cenné připomínky a rady při zpracování bakalářské práce, Ing. Václavu Klíčnickovi, výrobnímu řediteli společnosti Teplárny Brno, a.s. a Bc. Lilianě Geisselreiterové, tiskové mluvčí společnosti Teplárny Brno, a.s. za poskytnuté materiály pro zpracování bakalářské práce.

Obsah

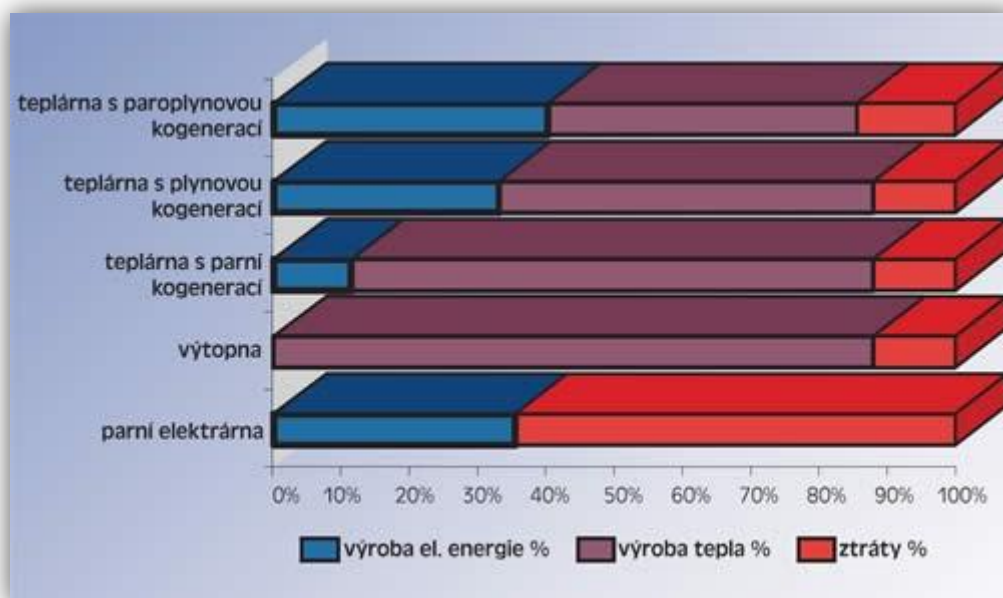
1 Úvod	15
2 Historie teplárenství v Brně	17
2.1 Myšlenka	17
2.2 Před výstavbou	17
2.3 Výstavba	18
2.4 Brněnské teplárenství v letech 1939-1980	19
2.5 Teplárenství v Brně od roku 1980 do současnosti	20
3 Provozy teplárenské soustavy v Brně	21
3.1 Provoz Špitálka	21
3.2 Provoz Staré Brno	24
3.3 Provoz Brno - sever	24
3.4 Provoz Kamenný vrch	25
3.5 Provoz Bystřice	26
3.6 Provoz Červený mlýn	26
4 Tepelná síť	29
4.1 Historie tepelné sítě v Brně	29
4.2 Současná podoba tepelné sítě	30
4.2.1 Parní soustava	30
4.2.2 Kondenzátní soustava	31
4.2.3 Horkovodní soustava	31
5 Porovnání dodávky tepla parovodem a horkovodem a její vliv na kombinovanou výrobu tepla a elektřiny	32
5.1 Teplota okolního prostředí pro výpočet ztrát v potrubí	32
5.2 Parovod	32
5.2.1 Zadané parametry	32
5.2.2 Tepelný výkon přenášený parovodem	33
5.2.3 Tepelný tok stěnou parovodu	33
5.2.4 Výkon turbíny a teplárenský modul	35
5.3 Horkovod	37
5.3.1 Zadané parametry	37
5.3.2 Volba horkovodu a tepelný výkon přenášený horkovodem	37
5.3.3 Tepelný tok stěnou horkovodu	39
5.3.4 Výkon turbíny a teplárenský modul	40
6 Závěr	43
Seznam použité literatury	44
Seznam použitých symbolů	47

1 Úvod

Teorii teplárenství se zabývají [2] [12].

Teplárenství je obecně známo jako obor energetiky, který se zabývá výrobou a distribucí tepla ke spotřebitelům. V současné době se pod pojmem teplárenství stále častěji uvádí kombinovaná výroba tepla a elektrické energie, označovaná také jako kogenerace, která může být centralizovaná nebo decentralizovaná. Centralizované zásobování využívají např. brněnské teplárny při distribuci tepla a elektřiny. V případě decentralizované výroby je teplo a elektrická energie vyráběna v místě jejich spotřeby.

Teplo a elektrická energie mohou být vyráběny odděleně ve výtopnách a elektrárnách nebo společně v jednom cyklu v teplárnách, mezi které patří teplárny parní, které jsou klasickým a nejvíce využívaným typem. Dalšími typy jsou teplárny plynové a v současné době nejmodernější teplárny paroplynové, v nichž jsou teplo a elektřina vyráběny v paroplynovém cyklu. Výše uvedené typy tepláren jsou používány v rámci centralizovaného zásobování. Pro decentralizovanou výrobu jsou v posledních letech hojně využívány teplárny se spalovacími motory, dodávající teplo především pro menší odběratele. Nevyžadují proto zdaleka tak rozsáhlou distribuční síť. Na obr. 1.1 je uvedeno srovnání využití paliva při výrobě tepla a elektřiny v různých typech provozů.



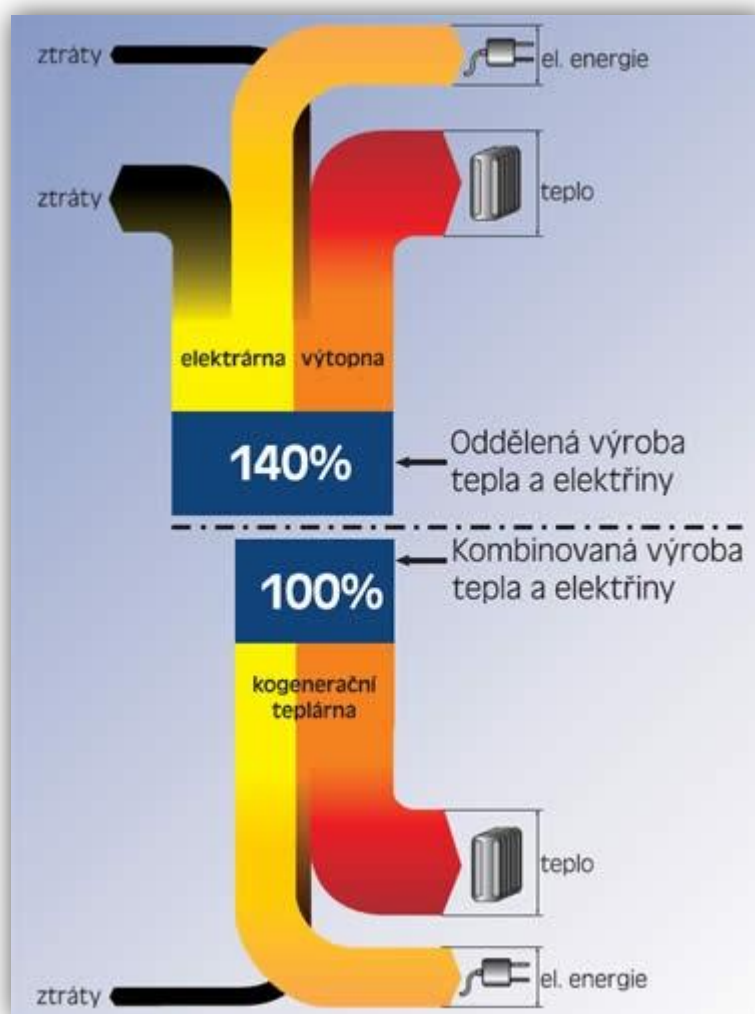
Obr. 1.1 - Rozdělení využití paliva podle typu provozu [12]

Rozvoj teplárenství v českých zemích začíná na přelomu 19. a 20. století v Praze, kde pražské elektrárny začínají dodávat páru pro okolní spotřebitele [2]. V průběhu 20. let 20. století dochází ke vzniku menších tepláren v různých městech Československa, např. v Ústí nad Labem, Krnovu a dalších [2]. Velkým zlomem ve vývoji bylo vybudování teplárenského provozu Špitálka v Brně, který byl v době spuštění velmi moderním zdrojem tepla a elektrické energie [5].

Po 2. světové válce rozvoj teplárenství v Československu stále pokračoval především kvůli výstavbě komerčních a obytných staveb panelového typu, které byly ve většině případů zásobovány teplem centralizovaně z tepláren a výtopen [2].

V posledních letech je v teplárenství snaha o větší úsporu paliva a vyšší ekologičnost provozů. Budují se moderní teplárny s vyšším podílem výroby elektrické energie, např. paroplynová teplárna Červený mlýn v Brně, ve kterých je úspora energie v palivu i 40 %

oproti oddělené výrobě při stejném množství vyrobené elektrické energie a tepla, jak je patrné z obr. 1.2 [12].



Obr. 1.2 - Srovnání množství paliva, potřebného pro výrobu stejného množství tepla a elektřiny při oddělené a kombinované výrobě [12]

2 Historie teplárenství v Brně

Historií brněnského teplárenství se zabývají [3] [5] [7] [9].

2.1 Myšlenka

Historie brněnského teplárenství nezačíná v prosinci roku 1930, kdy byla do provozu uvedena první teplárna města Brna, provoz Špitálka, ale ještě o několik let dříve [3]. Psal se rok 1923, když Ing. Vladimír List, pobýval na studijní cestě v USA [3]. Při návštěvě New Yorku se všimnul páry, vystupující z chodníku. Při hlubším zkoumání zjistil, že se jedná o páru, dodávanou do města ze staré elektrárny, která zásobuje části New Yorku teplem. Zprvu nechtěl věřit výhodnosti tohoto řešení, ale po prozkoumání výroční zprávy společnosti, která New York zásobovala elektřinou a teplem, zjistil opak [3]. Právě zde se nejspíše v hlavě prof. Ing. Dr. h. c. Vladimíra Lista, DrSc. zrodila myšlenka na vybudování teplárenského systému v Brně a díky jeho následné usilovné práci se celé dílo podařilo zrealizovat.

Prof. Ing. Dr. h. c. Vladimír List, DrSc. (obr. 2.1) se narodil 4. 6. 1877 v Praze [6]. Roku 1895 ukončil maturitou své studium na Akademickém gymnáziu v Praze [6]. V dalším studiu pokračoval na České vysoké škole technické v Praze (obor elektrotechnika) a v letech 1900-1901 postgraduálním studiem na Univerzitě v Lutychu (Belgie) [6].

V letech 1902–1909 pracoval v továrně Fr. Křížika v Praze jako šéfinženýr [6]. Od roku 1908 působil jako profesor a později také jako rektor a děkan odboru strojního a elektrotechnického inženýrství na České vysoké škole technické v Brně a to až do roku 1947 [6].

Svojí činností pomohl k elektrifikaci Československa a k vybudování teplárenského systému v Brně. Stál u zrodu Československé normalizační společnosti. Navrhnul projekt pražského metra, který nebyl později realizován.

Byl držitelem několika ocenění, např. Řádu práce (1967), zlaté medaile VUT v Brně (1967) nebo francouzského řádu Officier de L'Instruction Publique [6].

Prof. Vladimír List se dožil úctyhodného věku 94 let a zemřel 27. 6. 1971 v Brně [6].



Obr. 2.1 - Prof. Ing. Dr. h. c. Vladimír List, DrSc. [6]

2.2 Před výstavbou

Ve 20. letech minulého století bylo Brno významným centrem textilního průmyslu [9]. Ke kvalitní výrobě bylo také potřeba dodávat dostatek elektrické energie a tepla ve formě páry. Prof. List se po návratu z cesty po USA stále více zabýval myšlenkou zavedení kombinované výroby tepla a elektrické energie v Brně. Zjistil, že použití této technologie by pro Brno bylo velmi přínosné [3]. Po prošetření roční spotřeby páry průmyslových závodů v Brně, kdy mimo jiné zjistil, že spotřeba páry v určitých částech Brna, např. Dornych či Radlas, je na 1 km větší než v New Yorku [3]. Toto zjištění bylo hlavním impulzem pro zahájení jednání se společností Západomoravské elektrárny a.s., která dodávala elektřinu

do Brna. Velmi důležité bylo také přesvědčit továrny v Brně a samotné vedení města o výhodnosti tohoto řešení. Prof. List svými výpočty zjistil, že při kombinované výrobě elektřiny a tepla lze energii paliva využít s účinností až 80 %, což je velký rozdíl oproti 30% účinnosti při klasické oddělené výrobě elektřiny a tepla [5]. Jednání s elektrárenskou společností tedy nakonec dopadla úspěšně a byl tedy vytvořen projekt, na základě kterého byla započata výstavba teplárny Špitálka.

Před započítím samotné výstavby bylo nutno vyřešit několik důležitých otázek, především jaký výkon bude teplárna mít a s jakými hodnotami tlaku a teploty páry budou kotle a turbíny pracovat. Po posouzení různých možností řešení, z nichž některé byly i velmi netradiční, se poté ve druhém kole výběrového řízení rozhodlo o dodavateli, který vystaví teplárnu s kotli a turbínami, pracujícími s parou o parametrech 6,5 MPa a teplotě 450 °C [3]. Velkou roli při výběru dodavatele sehrálo hledisko bezpečnosti a spolehlivosti.

Před započítím stavby bylo nutné zajistit požadované množství finančních prostředků. Západomoravské elektrárny a.s. nedisponovaly částkou řádově v desítkách milionů Kčs, které byly pro stavbu zapotřebí. Díky dobře vypracovanému projektu se podařilo získat výhodný úvěr ve výši 50 milionů Kčs, který velkou měrou pomohl k realizaci stavby, která v tehdejší Československu neměla obdoby a jejíž konečná cena byla 70 milionů Kčs [9].

Výstavba teplárny měla být pro Brno přínosná nejen po stránce ekonomické, ale také po stránce ekologické. Jak se později ukázalo, vyřazení 68 kouřících továrních komínů z provozu a také menší zatížení brněnských komunikací, které byly před výstavbou využívány na svoz paliva a odvoz popelu, mělo za následek zlepšení kvality ovzduší [5].

2.3 Výstavba

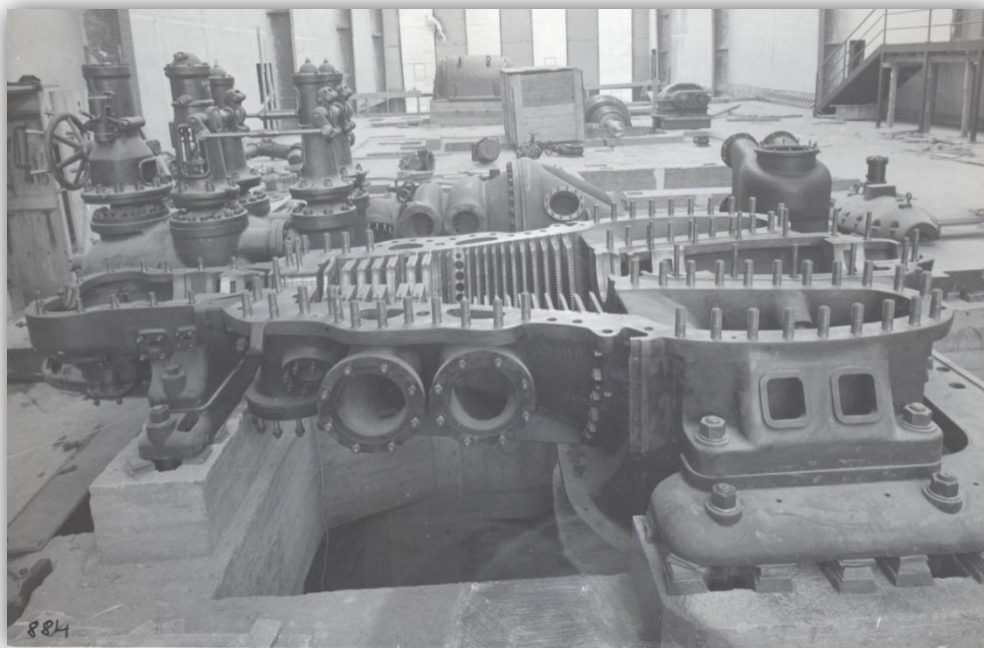
Dne 1. 4. 1929 začaly výkopové práce na ulici Špitálka a tím se začal plnit sen prof. Lista o první brněnské teplárně [3]. Místo vybrané pro výstavbu se vyznačovalo



Obr. 2.2 - Výstavba teplárny, 17. leden 1930 [7]

nekvalitním podloží, ani to ale výstavbě nezabránilo. Půda byla před samotnou stavbou zpevněna piloty o délce 7 m a průměru 25 cm [7]. Jedna z fází výstavby je vidět na obr. 2.2.

Za pouhých 20 měsíců od započetí byla dokončena první etapa výstavby teplárny, včetně stavby 100 m vysokého komína a montáže strojního zařízení, mezi které patřily především 4 kotle, 2 protitlaké a 1 kondenzační turbína (její montáž na obr. 2.3), které byly dodány společně s dalším vybavením teplárny generálním projektantem celé stavby, Škodovými závody [3].



Obr. 2.3 - Montáž kondenzační turbíny [13]

Při uvedení do provozu dne 4. 12. 1930 byla oficiálně zahájena dodávka páry z provozu Špitálka do 8 textilních továren novým parovodem, jehož délka byla v době spuštění 5,6 km [7]. Postupem času se množství odběratelů několikanásobně zvětšuje a v příštích dvou letech jejich počet vzroste již na 29 továren [7]. Spotřebiteli ale nejsou jen továrny, ale také domácnosti.

2.4 Brněnské teplárenství v letech 1939-1980

Během 2. světové války byl rozvoj teplárenství v Brně nuceně zastaven, a to jak na straně dodavatele, tedy tepláren, tak na straně spotřebitelů. Navíc v letech 1944-1945 dochází při bombardování a osvobození města Brna k poškození budov teplárny, které jsou ale po konci války v krátké době opraveny [7]. Během válečných let probíhají analýzy, týkající se dalšího rozšiřování teplárenské soustavy v Brně. Na základě těchto analýz se dospělo k závěru, že kapacitu teplárny je nutno nejméně zdvojnásobit [3].

Tak se také stalo a v letech 1949-1955 byly v provozu Špitálka instalovány další 2 protitlaké a 2 kondenzační turbíny [3]. Další skutečností, která přispěla ke zvýšení výkonu teplárny, bylo to, že se v teplárně začal spalovat zemní plyn namísto uhlí. V několika následujících letech tak byla uspokojena poptávka po teple a elektřině, které teplárna vyráběla.

Na začátku 60. let je ovšem dodávka plynu přerušena a výroba tepla a elektřiny je tak opět vyráběna spalováním uhelného prachu [3]. Tímto vznikl velký problém, jelikož mlýnice

na uhlí byla zastaralá a nebyla schopna pracovat s takovým výkonem, jaký byl požadován pro kvalitní dodávku tepla a elektřiny [3].

Ve stejném období začíná ve Starém Brně, na Lesné a také v Žabovřeskách a Králově Poli výstavba nových sídlišť, která vyžaduje výstavbu nových teplárenských zařízení. Ve Starém Brně je v letech 1963-1964 uvedena do provozu špičková parní výtopna Staré Brno [3]. V severní části města měla být budovaná sídliště zásobována teplem z horkovodní výtopny Červený mlýn, která byla uvedena do provozu v roce 1966, ale požadovaného tepelného výkonu dosáhla až v letech 1968-1969 spuštěním dalších kotlů s vyšším výkonem [14].

Teplárenská soustava v Brně tak již obsahovala tři provozy vynikající kvality, ale tlak ze strany nových odběratelů tepla neustával. Tato situaci si vynutila další úvahy o rozšíření soustavy. Dalším provozem, který měl být vystaven, byl provoz Brno - Maloměřice, dnes označovaný jako provoz Brno - sever. Ačkoliv byl projekt této teplárny schválen již v roce 1970, byl termín vedoucími orgány odsunut na pozdější dobu [3]. Stále se zvyšující poptávku bylo nutno nějakým způsobem řešit a tak byl v roce 1969 v teplárně Špitálka uveden do provozu nový kotel a v roce 1972 ještě další 2 kotle na těžký topný olej, které měly aspoň částečně snížit schodek mezi poptávkou a nabídkou tepla [3]. Toto řešení mělo pouze dočasný charakter. V roce 1971 tak byla zahájena výstavba nové, dlouho očekávané teplárny Brno - sever, která měla vyřešit problémy s nedostatkem zdrojů tepla pro odběratele [3]. Na přelomu let 1974 a 1975 byly uvedeny do provozu 2 parní mazutové kotle, což mělo pro brněnské teplárenství ohromný význam [3].

28. 2. 1975 došlo k tragické havárii v provozu Špitálka, při němž zahynuli 4 lidé, a mnoho dalších bylo zraněno [8]. Důvodem havárie byl výbuch uhelného prachu v prostoru staré mlýnice. Požár, který při výbuchu vznikl, se poté rozšířil na další části teplárny, mimo jiné novou mlýnici a starou i novou kotelnu. Škoda byla odhadnuta na 50 mil. Kčs [8].

Nastalá situace vyžadovala radikální řešení. Jedním z prvních rozhodnutí bylo, že po obnovení provozu bude v teplárně spalován pouze zemní plyn. Dále mělo dojít k dalšímu rozšíření provozu Brno - sever o tři středotlaké parní kotle, které byly uvedeny do provozu v roce 1979 [3]. Jako náhrada za neobnovitelně zničený kotel K26 v provozu Špitálka měl být vybudován ve výtopně Červený mlýn nový parní kotel [3].

2.5 Teplárenství v Brně od roku 1980 do současnosti

Od roku 1980 prošla brněnská teplárenská soustava radikální obměnou [14]. Mezi tyto obměny patří instalace nového vybavení stávajících tepláren, např. nové kotle v provozu Špitálka či ekologizace stávajících kotlů. Dále pak rekonstrukce výtopny na Starém Brně a její převedení na spalování zemního plynu namísto černouhelného prachu. Na přelomu 80. a 90. let byly uvedeny do provozu nové výtopny na Kamenném vrchu a v Brně - Bystřici. Nejdůležitějším milníkem v tomto období byla výstavba nové moderní paroplynové teplárny Červený mlýn na místě bývalé výtopny, která byla uvedena do provozu v roce 1999 [14].

3 Provozy teplárenské soustavy v Brně

V roce 2010 oslaví brněnské teplárenství 80 let své existence. Po celou tuto dobu se teplárenská společnost snaží dodávat kvalitně teplo a elektrickou energii svým zákazníkům. To by nebylo možné, nebýt aplikace nejmodernějších systémů ve svých provozech. V současné době je ve vlastnictví společnosti Teplárny Brno, a.s. 6 provozů [15]. 3 z nich jsou určeny ke kombinované výrobě tepla a elektřiny a další 3 fungují jako výtopny. V kapitolách 3.1 až 3.6 budou jednotlivé provozy podrobněji popsány.

3.1 Provoz Špitálka

Popisem provozu Špitálka se zabývají [3] [4] [7] [10] [16]. Základní informace o provozu Špitálka (obr. 3.1) jsou popsány v tab. 3.1.



Obr. 3.1 - Pohled na teplárnu Špitálka [16]

Nejstarší teplárna v Brně, provoz Špitálka se nachází nedaleko centra města Brna, blízko hlavního vlakového nádraží. Dominantami celé stavby jsou 2 komíny o výškách 101 m a 100 m (v současné době se nevyužívá) a chladicí věž o výšce 58,75 m (nevyužívá se) [16].

Tab. 3.1 - Informace o provozu Špitálka [16]

Instalovaný tepelný výkon P_t	411 MW _t
Instalovaný elektrický výkon P_{ei}	80,6 MW _e
Dosažitelný elektrický výkon P_{ed}	70 MW _e
Palivo	zemní plyn
Výroba	teplo a elektřina kombinovaným způsobem
Zásobované lokality	sídliště Juliánov

Jak již bylo napsáno dříve, provoz Špitálka byl spuštěn 4. 12. 1930 jako první provoz teplárenského systému v Brně [3]. Podoba teplárny v roce 1931 je vidět na obr. 3.2. Od svého zprovoznění až do současnosti prošla teplárna celou řadou především doplňujících úprav,

při kterých se postupně zvětšoval počet provozovaných kotlů a turbín, či docházelo k výměnám zastaralého a nevyhovujícího vybavení za nové a moderní.



Obr. 3.2 - Celkový pohled na nově postavenou teplárnu, r. 1931 [7]

Při spuštění bylo v teplárně nainstalováno následující zařízení [3]:

1) Kotelna

- 4 strmotrubnaté kotle s práškovým topením, granulační komorou na tlak 6,5 MPa, 435 °C, tepelný výkon 3x33 MW_t, 3x45 t/h, 1x36,5 MW_t, 1x50 t/h

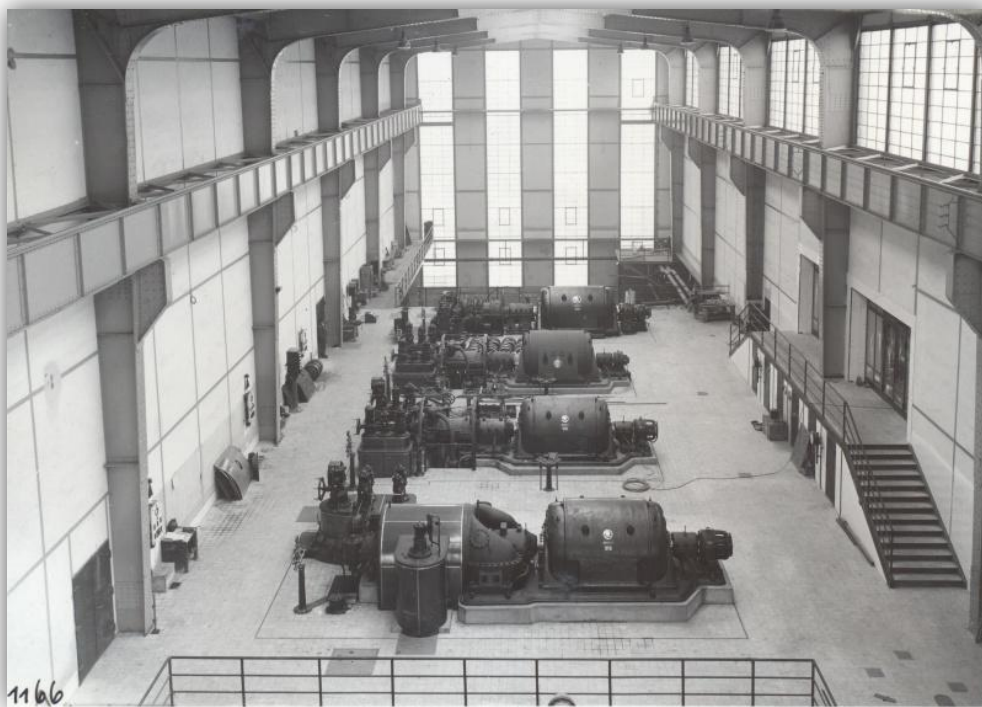
2) Strojovna

- 3 protitlaké turbíny na výstupní tlak 9 MPa o výkonu 2x4,5 MW_e, 1x9 MW_e
- 1 kondenzační turbína na výstupní parametry páry 9 MPa, 220 °C a výkon 6 MW_e
- podobu strojovny v roce 1930 lze vidět na obr. 3.3

Toto základní zařízení teplárny dávalo celkový tepelný výkon 135 MW_t (185 t/h) a stačilo pokrýt poptávku odběratelů až do roku 1938, kdy byl ke stávajícím kotlům přistaven další kotel, s výkonem 55 MW_t (75 t/h) a stejnými parametry, což zvýšilo výkon kotelny na 190 MW_t (260 t/h) [3]. Strojovna byla rozšířena o 1 protitlakou turbínu o výkonu 9 MW_e, kondenzační turbínu 6 MW_e a tzv. domácí turbínku 0,8 MW_e, takže teplárna dosáhla elektrického výkonu 39,8 MW_e [3].

V letech 1945-1955 došlo k rozšíření stávajícího provozu o 2 protitlaké turbíny 2x22,5 MW_e a 2 kondenzační turbíny 1x22,8 MW_e a 1x5 MW_e.

V několika dalších desetiletích dochází postupně k výměnám stávajícího zařízení, za novější, více ekologické. V roce 1995 je spuštěn nový moderní dvoupárametrový kotel K1 s výkonem 250 t/h a roku 1997 je dokončena ekologizace stávajících plynových kotlů K28 a K29 s výkonem 100 t/h za účelem snížení emisí NO_x.



Obr. 3.3 - Strojovna provozu Špitálka při spuštění v roce 1930 [13]

V současné době je v teplárně Špitálka v provozu následující zařízení [4]:

1) **Kotelna 10 MPa** s parametry 9,25 MPa, 510 °C

- **Kotel K1** - 198 MW_t, 250 t/h je vysokotlaký, parní, jednobubnový kotel s přirozenou cirkulací a se 6 plynovými dvouparametrovými nízkotlakými hořáky, navrženými tak, aby minimalizovaly tvorbu oxidů dusíku [10]. Spaliny jsou odváděny do společného komína č. 2 o výšce 101 m [10].
- **Kotel K28** a **Kotel K29** - 79 MW_t, 100 t/h jsou vysokotlaké, parní, strmotrubnaté kotle se 6 plynovými hořáky, které jsou konstrukčně navrženy pro použití v kotlích rekonstruovaných z uhlénného na plynné palivo. Spaliny ústí do společného komína č. 2 [10].

2) **Kotelna 6,4 MPa**¹ s parametry 6,4 MPa, 420 °C

- **Kotel K25** - 55 MW_t, 75 t/h je vysokotlaký, parní, tříbubnový, strmotrubnatý kotel s 5 plynovými hořáky stejného typu jako u kotlů K28 a K29 [10]. Spaliny jsou odváděny do komína č. 1 o výšce 100 m [10].

3) **Strojovna 10 MPa**

- **Protitlaký turbogenerátor TG 27** - 29,1 MW_e, 220 t/h
- **Protitlaký turbogenerátor TG 28** - 29,1 MW_e, 220 t/h
- **Odběrový stroj TG 20**² - max. 5 MW_e, 40 t/h

4) **Strojovna 6,4 MPa**

- **Protitlaký turbogenerátor TG 26** - 9 MW_e, 100 t/h

¹ Provozována max. 700 h/rok [4].

² Dle Ing. Václava Klíčníka se jedná o protitlakou turbínu, sloužící k pokrytí vlastní spotřeby provozu Špitálka.

- **Protitlaký turbogenerátor TG 22** - 6,6 MW_e (dosažitelný 5,2 MW_e), 60 t/h

Kotle spalují zemní plyn z vysokotlaké přípojky JMP a.s. o parametrech 0,4/0,084 MPa s max. špičkovým odběrem 50000 m³/h v době zimního provozu [4].

3.2 Provoz Staré Brno

Základní informace o výtopně Staré Brno jsou popsány v tab. 3.2.

Výtopna Staré Brno se nachází v samém středu města Brna, nedaleko brněnského výstaviště. Její dominantou je komín vysoký 70 m [17].

Tab. 3.2 - Informace o provozu Staré Brno [17]

Instalovaný tepelný výkon P_t	34 MW _t
Instalovaný elektrický výkon P_{ei}	-
Dosažitelný elektrický výkon P_{ed}	-
Palivo	zemní plyn
Výroba	teplo v parních kotlích
Zásobované lokality	Staré Brno, oblast ulic Vídeňská a Heršpická

Provoz Staré Brno byl spuštěn v letech 1963-1964 a byl vybaven 4 parními hnědouhelnými kotli s parametry 1,4 MPa, 235 °C a výkonu 4x12 t/h [3].

V roce 1993 proběhla rekonstrukce výtopny a palivo bylo změněno z uhlí na zemní plyn [7].

V současné době jsou ve výtopně Staré Brno v provozu 2 středotlaké parní kotle, každý s výkonem 17 MW_t, 25 t/h [4].

3.3 Provoz Brno - sever

Provoz Brno - sever (obr. 3.4) leží v severní části města, v městské části Maloměřice. Nepřehlédnutelnou dominantou teplárny je komín, vysoký 217,5 m [18]. V tab. 3.3 jsou popsány základní informace o provozu Brno - sever.

Tab. 3.3 - Informace o provozu Brno - sever [18]

Instalovaný tepelný výkon P_t	225 MW _t
Instalovaný elektrický výkon P_{ei}	4 MW _e
Dosažitelný elektrický výkon P_{ed}	3,5 MW _e
Palivo	zemní plyn a těžké topné oleje
Výroba	teplo a elektřina kombinovaným způsobem
Zásobované lokality	sídliště Lesná, Líšeň a Vinohrady, případně Žabovřesky, Královo Pole

Teplárna v Maloměřicích byla uvedena do provozu koncem roku 1974 spuštěním prvního mazutového kotle [3]. Spuštění druhého kotle následovalo počátkem roku 1975 [3]. Oba kotle měly výkon 55 MW_t, 75 t/h a parametry výstupní páry 1,3 MPa, 230 °C [3].

V roce 1979 je předána do užívání další část provozu, kterou tvořily 3 středotlaké parní kotle, každý o tepelném výkonu 84 MW_t, 115 t/h s parametry výstupní páry 1,3 MPa, 240 °C [3].



Obr. 3.4 - Pohled na provoz Brno - sever [18]

Současné zařízení provozu Brno - sever [4]:

Kotelna

- **Kotel K13** - 75 MW_t, 115 t/h, palivo - zemní plyn nebo pyrolýzní topný olej³
- **Kotel K14 a Kotel K15** - 75 MW_t, 115 t/h, palivo - zemní plyn nebo mazut

Výroba elektřiny je v provozu realizována pomocí protitlakého turbosoustrojí. Protitlaká turbína o hltnosti 40 t/h má dosažitelný elektrický výkon 3,5 MW_e [4]. Turbína je vřazena na parní vstup pro výměníkovou stanici horkovodu Líšeň - Vinohrady, kde redukuje páru 240 °C z přetlaku 1,2 MPa na 0,11 MPa [4]. Výroba elektrické energie je proměnná podle zatížení výměníkové stanice.

3.4 Provoz Kamenný vrch

Provoz Kamenný vrch je třetím nejmladším provozem společnosti Teplárny Brno, a.s. Nachází se v jihozápadní části města, v městské části Nový Lískovec. Bližší informace o výtopně jsou uvedeny v tab. 3.4.

Výtopna Kamenný vrch byla uvedena do provozu v letech 1989-1990 [20]. Nainstalovány byly 4 parní kotle, každý o tepelném výkonu 8 MW_t [20]. V roce 1993 byly kotle parní upraveny na kotle horkovodní [20].

V létě roku 2008 začala rozsáhlá rekonstrukce provozu Kamenný vrch [21]. V důsledku revitalizace panelových domů, které jsou zásobovány teplem z výtopny, se stal instalovaný tepelný výkon nadbytečný [21]. Stávající kotle s výkonem 32 MW_t byly nahrazeny novými kotli o celkovém výkonu 17 MW_t, které ale mají vyšší účinnost [21]. Další částí rekonstrukce byla výstavba nového komína, který má výšku 43 m a proti původnímu komínu snižuje emise oxidu dusičitého NO₂ téměř trojnásobně [21].

³ Pyrolýzní topný olej (PTO) je směs výševroucích aromatických uhlovodíků, vznikajících při pyrolyzním štěpení ropných produktů. PTO je tmavá, viskózní kapalina s bodem tuhnutí cca 15 °C. Používá se jako nízkosíraté palivo a jako surovina pro výrobu gumárenských sazí [19].

Tab. 3.4 - Informace o provozu Kamenný vrch [20]

Instalovaný tepelný výkon P_t	17 MW _t [21]
Instalovaný elektrický výkon P_{ei}	-
Dosažitelný elektrický výkon P_{ed}	-
Palivo	zemní plyn
Výroba	teplo
Zásobované lokality	sídliště Nový Lískovec, Kamenný vrch

Zajímavostí je, že provoz Kamenný vrch byl vystavěn jako špičkový zdroj pro připojení plánovaného horkovodu z jaderné elektrárny Dukovany, který ale dosud nebyl realizován [21].

3.5 Provoz Bystrc

Výtopna Brno - Bystrc byla uvedena do provozu v letech 1990-1991 [22]. Původní zdroj spaloval zemní plyn. V letech 2003-2005 proběhla v tomto provozu rozsáhlá rekonstrukce a výsledkem byla instalace 2 kotlů s tepelným výkonem 1,1 a 1,5 MW_t, spalujících dřevní štěpku, kterou dodávají Lesy města Brna, a.s [22]. Pro dosažení požadovaného tepelného výkonu pro vytápění části sídliště v Bysterci jsou dále nainstalovány 4 plynové kotle s celkovým výkonem 18,6 MW_t [22]. Souhrnné informace o provozu Brno Bystrc jsou uvedeny v tabulce 3.5.

Tab. 3.5 - Informace o provozu Bystrc [22]

Instalovaný tepelný výkon P_t	21,2 MW _t
Instalovaný elektrický výkon P_{ei}	-
Dosažitelný elektrický výkon P_{ed}	-
Palivo	zemní plyn a dřevní štěpka
Výroba	teplo
Zásobované lokality	část sídliště Brno Bystrc

3.6 Provoz Červený mlýn

Největší chloubou společnosti Teplárny Brno, a.s. je bezpochyby moderní paroplynová teplárna Červený mlýn (obr. 3.5), ležící na místě původní výtopny v městské části Ponava. Základní informace o provozu se nachází v tab. 3.6.

Tab. 3.6 - Informace o provozu Červený mlýn [23]

Instalovaný tepelný výkon P_t	140 MW _t
Instalovaný elektrický výkon P_{ei}	95 MW _e
Dosažitelný elektrický výkon P_{ed}	95 MW _e
Palivo	zemní plyn
Výroba	teplo a elektřina kombinovaným způsobem
Zásobované lokality	sídliště Žabovřesky, Královo Pole a v přechodných obdobích sídliště Lesná, Líšeň a Vinohrady



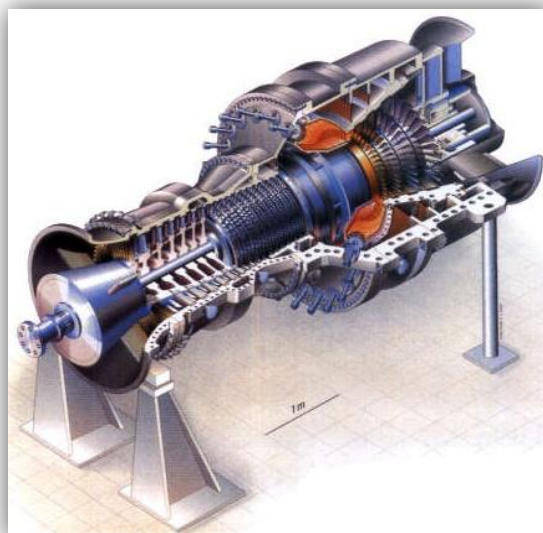
Obr. 3.5 - Paroplynová teplárna Červený mlýn [24]

Jak již bylo řečeno, teplárna Červený mlýn stojí na místě původní výtopny, která byla uvedena do provozu v roce 1966 spuštěním 2 kotlů, každý s tepelným výkonem $11,6 \text{ MW}_t$ [3]. Na přelomu let 1968 a 1969 byly do provozu uvedeny další 2 kotle, každý o výkonu $58,1 \text{ MW}_t$ [3]. V roce 1979 byl spuštěn další parní kotel 73 MW_t (100 t/h) s parametry výstupní páry $1,3 \text{ MPa}$, $240 \text{ }^\circ\text{C}$ [3].

V roce 1996 dochází k ukončení provozu výtopny Červený mlýn, která byla posledním zdrojem brněnských tepláren, spalující uhlí [14]. V listopadu roku 1999 je na jejím místě spuštěna paroplynová teplárna [14].

V teplárně Červený mlýn je instalována spalovací turbína (obr. 3.6) na zemní plyn s výkonem 71 MW_e [4]. Turbína má kruhovou spalovací komoru, zabezpečující stejnoměrné teplotní pole horkého plynu před lopatkami a je opatřena dvoupalivovými hořáky na zemní plyn a lehké topné oleje, které dosahují při běžném provozu nízkých emisí oxidů dusíku [11]. Ze strany turbíny, na které se nachází kompresor, je připojen dvoupólový generátor a na straně druhé proudí spaliny axiálním difuzorem do spalínového kotle [11].

Spaliny jsou z plynové turbíny vedeny do by-passového komína⁴ o výšce $42,5 \text{ m}$ nebo do horizontálního spalínového kotle, který je vyroben jako třítlakový s parametry $6,84 \text{ MPa}$ (100 t/h), $500 \text{ }^\circ\text{C}$ / $0,92 \text{ MPa}$ (19 t/h), $220 \text{ }^\circ\text{C}$ /



Obr. 3.6 - Plynová turbína V64.3A, Siemens [11]

⁴ By-passový komín umožňuje provoz spalovací turbíny nezávisle na spalínovém kotli [11].

0,3 MPa, 120 °C [11]. Z kotle je parou napájeno parní turbosoustrojí. Spaliny z kotle jsou odváděny do komína o výšce 45 m [23].

Turbosoustrojí je tvořeno parní protitlakou turbínou Alstom Power GE 40 a generátorem. Celé turbosoustrojí dosahuje maximálního elektrického výkonu 24 MW_e [11]. Turbína je dvojitlaká, protitlaká a je provozována s parametry vstupní páry 3,0 - 6,4 MPa, 420 - 495 °C v případě vysokotlaké páry a 0,9 MPa, 295 °C v případě nízkotlaké páry, která je do turbíny v případě potřeby dodávána v místě regulovaného odběru páry, který je také možné využít k dodávce tepla v páře [11]. Druhým odběrovým místem proudí pára neregulovaně do ohříváků oběhové vody.

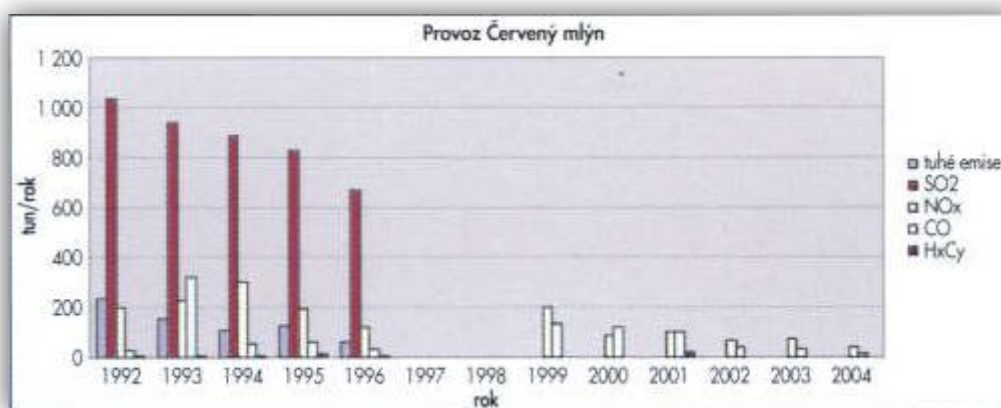
V teplárně je dále pro lepší využití spalovací turbíny nainstalován beztlaký akumulátor tepla se zásobou 5600 m³ horké vody o teplotách 95/55°C, který umožňuje řešit proměnné doby denních špiček spotřeby elektřiny a dodávek tepla a dosáhnout lepší ekonomie provozu a zvýšení životnosti turbíny [4].

Pro dohřívání horké vody mimo špičku a provoz v přechodných obdobích jsou v provozu instalovány 2 plynové horkovodní kotle, každý s výkonem 27 MW_t [4].

Důležitou částí teplárny je výměníková stanice, tvořená 2 vodorovnými trubkovými výměníky pára - voda, každý o výkonu 43 MW_t [4].

Dodávku elektřiny do elektrické sítě zajišťuje rozvodna 110 kV, do které jsou přes transformátory napojeny vývody generátorů spalovací a parní turbíny [11].

Původní výtopna, spalující uhlí a fungující do roku 1996, patřila k hlavním zdrojům prašného znečištění a znečištění oxidem siřičitým v městě Brně [11]. Z grafu na obr. 3.7 je možno vidět, jak významný vliv na emise do ovzduší mělo spuštění nového provozu Červený mlýn [11]. Největší pokles nastal v emisích oxidu siřičitého [11].



Obr. 3.7 - Emise do ovzduší v provozu Červený mlýn v letech 1994-2004 [11]

4 Tepelná síť

Historií tepelné sítě se zabývá [3], její současnou podobou [4].

4.1 Historie tepelné sítě v Brně

Důležitou součástí každé teplárenské soustavy je tepelná síť, sloužící k dopravě tepla v páře, horké či teplé vodě ke spotřebitelům.

Tepelná síť v Brně se začala budovat společně s teplárnou Špitálka v roce 1929 a koncem roku 1930 byla zprovozněna její první část, zásobující parou průmyslové podniky na ulicích Cejl (obr. 4.1), Špitálka, Nádražní, Dornych a Hybešova [3]. K tomuto účelu byly vybudovány 2 parovody, každý o průměru $D_N = 500$ mm, které byly později označeny dnes stále užívanými názvy Sever a Jih [3]. Původním předpokladem bylo, že parovod Sever bude dodávat teplo do středu města a proto bylo k parovodu vybudováno také kondenzátní potrubí. Naproti tomu parovod Jih měl dodávat páru především do průmyslových podniků, kde měla být pára přímo spotřebována a kondenzátní potrubí nebylo třeba.

V dalších letech bylo parní potrubí postupně prodlužováno a síť se rozrůstala a to až do počátku 2. světové války, během které se rozvoj tepelné sítě stejně jako rozvoj celého teplárenství v Brně zastavil.

Po 2. světové válce byla tepelná síť v Brně rozšířena o další parovody. Konkrétně to byl parovod Tábor o $D_N = 500$ mm, zásobující dnešní lokality Tábor a Královo Pole [3]. Jako čtvrtá napájecí větev z teplárny Špitálka bylo zřízeno první horkovodní potrubí Líšeň s průměrem $2 \times D_N = 300$ mm, zásobující v té době největší průmyslový závod v Brně, firma Zetor [3].

Stávající rozvodná síť nebyla dostačující, proto byl v roce 1958 vybudován čtvrtý parovod Město také o $D_N = 500$ mm, který zajišťoval dodávku tepla do středu města [3].

Důležitou částí rozvodné sítě se staly akumulární stanice, např. akumulární tepelná stanice v Táboře, která byla vybudována v roce 1956 na konci parovodu Tábor a byla tvořena 3 kaskádovými akumulátory na horkou vodu [3].

Po vybudování výtopny Staré Brno byla tato propojena parním potrubím o $D_N = 350$ mm s parovodem Jih [3]. Výtopna Staré Brno dodávala teplo do sídliště Rybářská teplovodním potrubím s parametry vody $90/70$ °C⁵ a do sídliště Koněvova horkovodním potrubím $2 \times D_N = 300$ mm o parametrech $150/70$ °C [3].

Pro zásobování teplem nově vybudovaných sídlišť v severní části města (Lesná, Žabovřesky, Královo Pole) byly z nově vybudované výtopny Červený mlýn vyvedeny horkovodní potrubí $2 \times D_N = 500$ mm pro sídliště Lesná a $2 \times D_N = 600$ mm pro sídliště Žabovřesky a Královo Pole včetně areálu VUT [3].

Společně se stavbou teplárny Brno - sever došlo k propojení tohoto provozu s teplárnou Špitálka a to 2 parními potrubími o $D_N = 800$ a 650 mm [3].



Obr. 4.1 - Pokládání potrubí v ulici Cejl [13]

⁵ Označení např. $90/70$ °C obecně znamená: teplota přívodní vody/ teplota vratné vody v °C.

4.2 Současná podoba tepelné sítě

V roce 2008 tvořilo brněnskou tepelnou síť 2x 83 km horkovodů, 2x 0,4 km teplovodů, 95 km parovodů a 65 km kondenzátního potrubí [4]. Parní a kondenzátní potrubí je uloženo ve společném podpovrchovém neprůlezném železobetonovém kanále. Horkovodní potrubí je uloženo v hlubinném kolektoru. V některých místech jsou potrubí vedena i bezkanálově, přímo v zemi nebo na nízkých podpěrách či sloupech v nadzemním provedení.

V rámci soustavy centralizovaného zásobování teplem v Brně je dodávka tepla ke spotřebitelům uskutečňována [4]:

1) Parovody

- jmenovitý provozní tlak páry 0,9 MPa
- skutečný tlak dle provozních podmínek 0,5 až 1,0 MPa
- teplota páry u spotřebitele v závislosti na skutečném tlaku, max. 230 °C

2) Horkovody

- provozovány s teplotním spádem 130/70 °C, dle venkovní teploty
- jmenovitý tlak soustavy je 2,5 MPa

3) Teplovody

- teplota přívodu teplé vody je regulována v závislosti na venkovní teplotě
- rozmezí pro přívodní vodu je 90 až 70 °C
- rozmezí pro vratnou vodu je 70 až 50 °C.

4.2.1 Parní soustava

Parní soustava je tvořena 6 parovody, vystupujícími z provozu Špitálka a to [4]:

1) parovod Maloměřice

- $D_N = 800/ 600/ 500$ mm
- propojuje provozy Špitálka a Brno - sever

2) parovod Jih

- $D_N = 500$ mm
- propojuje provozy Špitálka a Staré Brno
- dodávky tepla do Starého Brna a jihu města

3) parovod Sever

- $D_N = 500$ mm
- dodávky tepla do severní části města

4) parovod Červený mlýn

- $D_N = 500$ mm
- propojuje provozy Špitálka a Červený mlýn

5) parovod Tábor

- $D_N = 500$ mm
- dodávky tepla do částí Tábor a Královo Pole

6) parovod Město

- $D_N = 500$ mm
- dodávky tepla do středu města

4.2.2 Kondenzátní soustava

Kondenzátní soustava je tvořena systémem sběrných potrubí o průměru $D_N = 150$ mm, případně $D_N = 200$ mm [4]:

- 1) **kondenzátní potrubí do provozu Špitálka**
 - sběr kondenzátu z parovodů Sever, Tábor, Město, Jih, Maloměřice
- 2) **kondenzátní potrubí do provozu Červený mlýn**
 - sběr kondenzátu z parovodu Tábor
- 3) **kondenzátní potrubí do provozu Staré Brno**
 - sběr kondenzátu z parovodu Jih

4.2.3 Horkovodní soustava

Horkovodní soustava je členěna do 7 větví, které na rozdíl od sítě parovodů tvoří samostatné celky. V případě potřeby je možné 5 z nich, kromě horkovodu Juliánov a Staré Brno, propojit do velké soustavy, napájené jedním nebo dvěma zdroji. Soustava je tvořena horkovody [4]:

- 1) **horkovod Juliánov**
 - $2 \times D_N = 300$ mm z provozu Špitálka, $P_t = 17,8$ MW_t
- 2) **horkovod Líšeň + Vinohrady**
 - $2 \times D_N = 350$ mm do vzdálenosti 200 m od zdroje, dále $2 \times D_N = 700$ mm z provozu Brno - sever, $P_t = 52,4 + 33,6$ MW_t
- 3) **horkovod Lesná**
 - $2 \times D_N = 600$ mm z provozu Brno - Sever
 - $2 \times D_N = 500$ mm z provozu Červený mlýn
 - $P_t = 54,5$ MW_t
- 4) **horkovod Žabovřesky + Královo Pole**
 - $2 \times D_N = 600$ mm z provozu Červený mlýn, $P_t = 115$ MW_t
- 5) **horkovod Staré Brno**
 - $2 \times D_N = 300$ mm z provozu Staré Brno, $P_t = 21,8$ MW_t

5 Porovnání dodávky tepla parovodem a horkovodem a její vliv na kombinovanou výrobu tepla a elektřiny

Pro výpočty a následné porovnání je použito informací od Ing. Ericha Hekery a Ing. Jakuba Zrůna, zaměstnanců společnosti Teplárny Brno, a.s. Známými hodnotami jsou rozměry parovodu a druh izolace, parametry páry při výstupu z parovodu a hmotnostní tok parovodem. V horkovodním potrubí je znám tepelný spád a rychlost proudění vody v potrubí. Pro závěr výpočtu jsou známy termodynamická parní turbíny a mechanická účinnost turbíny a elektrického generátoru.

Samotný výpočet má několik částí. První z nich je určení tepelných ztrát v potrubí pro oba typy média. Výpočet je proveden na potrubí délky 5 km bez odběru média mezi vstupní a výstupní stranou za předpokladu, že oběma potrubími je přenášén stejný tepelný výkon.

Následuje určení tlakových ztrát v potrubí a měrné entalpie za turbínou.

Posledním krokem bude výpočet výkonu turbíny ze známého entalpickém spádu a hmotnostního toku turbínou a určení teplárenského modulu. Termodynamická účinnost turbíny je $\eta_{tdi} = 0,85$, mechanická účinnost turbíny a elektrického generátoru je $\eta_{mel} = 0,95$ a hmotnostní průtok páry turbínou je $Q_{tm} = 30 \text{ kg/s}$.

5.1 Teplota okolního prostředí pro výpočet ztrát v potrubí

Pro výpočet tepelných ztrát v potrubí je zvolena jako okolní teplota průměrná teplota za měsíce říjen až prosinec 2008 [25] a leden až březen 2009 [26] podle ČHMÚ v Brně - Tuřanech.

$$t_v = \frac{9,9 + 6,5 + 2,1 + (-3,0) + 0,3 + 4,8}{6} = 3,4 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

5.2 Parovod

5.2.1 Zadané parametry

Zadané parametry páry na výstupní straně parovodu

Tlak: $p_{p1} = 0,9 \text{ MPa}$
Teplota: $t_{p1} = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Hmotnostní průtok: $Q_{pm} = 30 \text{ kg/s}$

Zadané parametry kondenzátu

Tlak: $p_{p2} = 0,9 \text{ MPa}$
Teplota: $t_{p2} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Zadané parametry páry na vstupu do turbíny (parametry páry v provozu Špitálka)

Tlak: $p_t = 9,25 \text{ MPa}$
Teplota: $t_t = 510 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Hmotnostní průtok: $Q_{tm} = 30 \text{ kg/s}$

Zadané parametry potrubí

Materiál: *ocel*
Jmenovitý průměr: $D_{pN} = 500 \text{ mm}$
Vnitřní průměr: $D_{p1} = 514 \text{ mm}$
Vnější průměr: $D_{p2} = 530 \text{ mm}$

Izolace: *minerální vlna*
Tloušťka izolace: $s_{pi} = 200 \text{ mm}$

5.2.2 Tepelný výkon přenášený parovodem

Měrná tepelná kapacita páry a kondenzátu

Měrná tepelná kapacita páry pro zadané parametry dle [27]:

$$c_{p1} = 1,9825 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (2)$$

Měrná tepelná kapacita kondenzátu pro zadané parametry dle [28]:

$$\begin{aligned} c_{p2} &= (4210 - 1,363 \cdot t_{p2} + 0,014 \cdot t_{p2}^2) = (4210 - 1,363 \cdot 80 + 0,014 \cdot 80) \\ &= 4,1964 \text{ kJ/kg} \cdot K \end{aligned} \quad (3)$$

Měrná entalpie páry a kondenzátu

Měrná entalpie páry pro zadané parametry dle programu pára:

$$i_{p1} = 2832,7 \text{ kJ/kg} \quad (4)$$

Měrná entalpie kondenzátu pro zadané parametry dle [1]:

$$i_{p2} = c_{p2} \cdot t_{p2} = 4,1964 \cdot 80 = 335,71 \text{ kJ/kg} \quad (5)$$

Tepelný výkon přenášený parovodem

Pro výpočet dle [1] je použito entalpického spádu mezi párou a kondenzátem (4) - (5):

$$P_{pt} = Q_{pm} \cdot (i_{p1} - i_{p2}) = 30 \cdot (2832,7 - 335,712) \cdot 10^3 = 74,91 \text{ MW} \quad (6)$$

5.2.3 Tepelný tok stěnou parovodu

Měrný objem

Dle programu pára pro zadané parametry:

$$v_p = 0,23 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (7)$$

Hustota páry

Dle [1] je dána hustota jako převrácená hodnota měrného objemu (7):

$$\rho_p = \frac{1}{v_p} = \frac{1}{0,23} = 4,34 \text{ kg/m}^3 \quad (8)$$

Objemový průtok potrubím

Dle [29] je objemový průtok dán podílem hmotnostního průtoku a hustoty (8):

$$Q_{pv} = \frac{Q_{pm}}{\rho_p} = \frac{30}{4,34} = 6,91 \text{ m}^3/\text{s} \quad (9)$$

Průřez parovodu

$$S_p = \frac{\pi \cdot D_{p1}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,514^2}{4} = 0,207 \text{ m}^2 \quad (10)$$

Rychlost proudění páry v potrubí

Dle [29] je rychlost proudění dána podílem objemového průtoku (9) a průřezu parovodu (10):

$$v_1 = \frac{Q_{pv}}{S_p} = \frac{6,91}{0,207} = 33,3 \text{ m/s} \quad (11)$$

Dynamická viskozita páry

Dle [27] pro zadanou teplotu:

$$\mu_p = 160,35 \cdot 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad (12)$$

Kinematická viskozita páry

Dle [29] dána podílem dynamické viskozity páry (12) a hustoty páry (8):

$$\nu_p = \frac{\mu_p}{\rho_p} = \frac{160,35 \cdot 10^{-7}}{4,34} = 3,693 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad (13)$$

Reynoldsovo číslo

Dle [29] dáno vztahem s využitím (11) a (13):

$$Re_p = \frac{v_1 \cdot D_{p1}}{\nu_p} = \frac{33,3 \cdot 0,514}{3,693 \cdot 10^{-6}} = 4,63 \cdot 10^6 \quad (14)$$

Z výsledku je patrné, že se jedná o turbulentní proudění, jelikož $Re_p > Re_{krit} = 2320$.

Tepelná vodivost páry

Dle [27] pro zadané parametry:

$$\lambda_p = 0,0319 \text{ W/m} \cdot \text{K} \quad (15)$$

Teplotní vodivost páry

Dle [1] dáno vztahem s využitím (2), (8) a (15):

$$a_p = \frac{\lambda_p}{\rho_p \cdot c_{p1}} = \frac{0,0319}{4,34 \cdot 1,9825 \cdot 10^3} = 3,71 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad (16)$$

Prandtlovo číslo

Dle [1] dáno podílem kinematické viskozity (13) a teplotní vodivosti páry (16):

$$Pr_p = \frac{\nu_p}{a_p} = \frac{3,693 \cdot 10^{-6}}{3,71 \cdot 10^{-6}} = 0,996 \quad (17)$$

Nusseltovo číslo

Dle [1] dáno následujícím vztahem s využitím (14) a (17):

$$Nu_p = 0,023 \cdot Re_p^{0,8} \cdot Pr_p^{0,3} = 0,023 \cdot (4,63 \cdot 10^6)^{0,8} \cdot 0,996^{0,3} = 4944 \quad (18)$$

Součinitel přestupu tepla z páry na potrubí

Dle [1] dáno následujícím vztahem pro potrubí délky $l = 1$ m s využitím (15) a (18):

$$\alpha_{p1} = \frac{Nu_p \cdot \lambda_p}{l} = \frac{4944 \cdot 0,0319}{1} = 157,7 \text{ W/m}^2 \cdot K \quad (19)$$

Součinitel přestupu tepla z izolace potrubí do okolí

Dle [30] pro neprůlezný kanál:

$$\alpha_{p2} = 8,14 \text{ W/m}^2 \cdot K \quad (20)$$

Tepelná vodivost materiálu potrubí

Dle [31] pro ocelové potrubí:

$$\lambda_{po} = 42 \text{ W/m} \cdot K \quad (21)$$

Tepelná vodivost materiálu izolace

Dle [31] pro minerální vlnu:

$$\lambda_{pi} = 0,038 \text{ W/m} \cdot K \quad (22)$$

Průměr parovodu včetně izolace

$$D_{p3} = D_{p2} + 2 \cdot s_{pi} = 0,530 + 2 \cdot 200 = 0,930 \text{ m} \quad (23)$$

Tepelný tok stěnou parovodu

Dle [1] pro délku parovodu $L = 5$ km (např. vzdálenost provoz Špitálka - Brno - Bohunice):

$$\begin{aligned} Q_p &= \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (t_{p1} - t_v)}{\frac{1}{\frac{D_{p1}}{2} \cdot \alpha_{p1}} + \frac{1}{\lambda_{po}} \cdot \ln \left(\frac{D_{p2}}{D_{p1}} \right) + \frac{1}{\lambda_{pi}} \cdot \ln \left(\frac{D_{p3}}{D_{p2}} \right) + \frac{1}{\frac{D_{p3}}{2} \cdot \alpha_{p2}}} = \\ &= \frac{2 \cdot \pi \cdot 5000 \cdot (200 - 3,4)}{\frac{1}{\frac{0,514}{2} \cdot 157,7} + \frac{1}{42} \cdot \ln \left(\frac{0,530}{0,514} \right) + \frac{1}{0,038} \cdot \ln \left(\frac{0,930}{0,530} \right) + \frac{1}{\frac{0,930}{2} \cdot 8,14}} = \\ &= 409379,219 \text{ W} \end{aligned} \quad (24)$$

5.2.4 Výkon turbíny a teplotní modul

Potřebný tepelný výkon na vstupu do parovodu

Dán součtem tepelného výkonu na konci parovodu a tepelných ztrát po délce parovodu:

$$P_{ptz} = P_{pt} + Q_p = 74,91 \cdot 10^6 + 409379,219 = 75,139 \text{ MW} \quad (25)$$

Měrná entalpie páry na vstupu do parovodu

Dána součtem měrné entalpie ztrát a páry na konci parovodu:

$$i_{pz} = i_{p1} + \frac{Q_p}{Q_{pm}} = 2832,7 + \frac{409379,219 \cdot 10^{-3}}{30} = 2846,35 \text{ kJ/kg} \quad (26)$$

Relativní drsnost potrubí parovodu

Pro absolutní drsnost potrubí $k = 0,5 \text{ mm}$ dle [29] dána vztahem:

$$k_{pr} = \frac{k}{D_{p1}} = \frac{0,0005}{0,514} = 0,001 \quad (27)$$

Součinitel tření

Dle [29] pro turbulentní proudění dán vztahem:

$$\lambda_{z1} = \left(-\log(1,8) \cdot \left(\frac{k_{pr}}{10} + \frac{7}{Re_p} \right) \right)^{-2} = \left(-\log(1,8) \cdot \left(\frac{0,001}{10} + \frac{7}{4,63 \cdot 10^6} \right) \right)^{-2} \\ = 0,01924 \quad (28)$$

Tlakové ztráty v parovodu

Dle [29] pro délku $L = 5 \text{ km}$ a s využitím (8), (11) a (28) dány vztahem:

$$p_{z1} = \rho_p \cdot \lambda_{z1} \cdot \frac{L}{D_{p1}} \cdot \frac{v_1^2}{2} = 4,34 \cdot 0,01924 \cdot \frac{5000}{0,514} \cdot \frac{33,3^2}{2} = 450486,6 \text{ Pa} \quad (29)$$

Tlak páry na vstupu do parovodu

Dán součtem tlaku páry na konci parovodu a tlakovými ztrátami v parovodu:

$$p_{pz} = p_{p1} + p_{z1} = 0,9 \cdot 10^6 + 450486,6 = 13450486,6 \text{ Pa} \quad (30)$$

Teplota páry na vstupu do parovodu

Dle programu pára na základě známých hodnot entalpie (26) a tlaku (30):

$$t_{pz} = 215,75 \text{ °C} \quad (31)$$

Měrná entalpie páry před turbínou

Pro zadané parametry dle programu pára:

$$i_t = 3408,7 \text{ kJ/kg} \quad (32)$$

Elektrický výkon turbíny

Dle [1] dán vztahem:

$$P_{pe} = Q_{tm} \cdot (i_t - i_{pz}) \cdot 10^3 \cdot \eta_{tdi} \cdot \eta_{mel} = 30 \cdot (3408,7 - 2846,35) \cdot 10^3 \cdot 0,85 \cdot 0,95 \\ = 13,623 \text{ MW} \quad (33)$$

Teplárenský modul

Dle [2] dán vztahem:

$$e_p = \frac{P_{pe}}{P_{pt}} = \frac{13,623}{74,91} = 0,182 \quad (34)$$

5.3 Horkovod

5.3.1 Zadané parametry

Zadané parametry přívodní vody

Tlak: $p_{h1} = 2,5 \text{ MPa}$
Teplota: $t_{h1} = 130 \text{ °C}$
Rychlost proudění: $v_2 = 2 \text{ m/s}$

Zadané parametry vratné vody

Tlak: $p_{h2} = 2,5 \text{ MPa}$
Teplota: $t_{p2} = 70 \text{ °C}$

Zadané parametry páry na vstupu do turbíny (parametry páry v provozu Špitálka)

Tlak: $p_t = 9,25 \text{ MPa}$
Teplota: $t_t = 510 \text{ °C}$
Hmotnostní průtok: $Q_{tm} = 30 \text{ kg/s}$

5.3.2 Volba horkovodu a tepelný výkon přenášený horkovodem

Měrná tepelná kapacita přívodní a vratné vody

Měrná tepelná kapacita přívodní vody pro zadané parametry dle [28]:

$$\begin{aligned} c_{h1} &= (4210 - 1,363 \cdot t_{h1} + 0,014 \cdot t_{h1}^2) = (4210 - 1,363 \cdot 130 + 0,014 \cdot 130) \\ &= 4,269 \text{ kJ/kg} \cdot K \end{aligned} \quad (35)$$

Měrná tepelná kapacita vratné vody pro zadané parametry dle [28]:

$$\begin{aligned} c_{h2} &= (4210 - 1,363 \cdot t_{h2} + 0,014 \cdot t_{h2}^2) = (4210 - 1,363 \cdot 70 + 0,014 \cdot 70) \\ &= 4,183 \text{ kJ/kg} \cdot K \end{aligned} \quad (36)$$

Měrná entalpie přívodní a vratné vody

Měrná entalpie přívodní vody pro zadané parametry dle [1]:

$$i_{h1} = c_{h1} \cdot t_{h1} = 4,269 \cdot 130 = 554,97 \text{ kJ/kg} \quad (37)$$

Měrná entalpie vratné vody pro zadané parametry dle [1]:

$$i_{h2} = c_{h2} \cdot t_{h2} = 4,183 \cdot 70 = 292,81 \text{ kJ/kg} \quad (38)$$

Hustota přívodní vody

Dle [28] dána vztahem:

$$\rho_h = 1006 - 0,26 \cdot t_{h1} - 0,0022 \cdot t_{h1}^2 = 1006 - 0,26 \cdot 130 - 0,0022 \cdot 130^2 = 935,02 \text{ kg/m}^3 \quad (39)$$

Průřezu horkovodu

Uvažován stejný přenášený tepelný výkon jako v případě parovodu:

$$S_{hx} = \frac{P_{pt}}{\rho_h \cdot v_2 \cdot (i_{h1} - i_{h2})} = \frac{74,91 \cdot 10^6}{935,02 \cdot 2 \cdot (554,97 - 292,81)} = 0,153 \text{ m}^2 \quad (40)$$

Průměr horkovodu

Určí se z průřezu horkovodu (40):

$$D_{hx} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{hx}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,153}{\pi}} = 0,441 \text{ m} \quad (41)$$

Výběr potrubí pro horkovod

Výběr z katalogu společnosti IZO spol. s.r.o. na základě určeného průměr horkovodu (41). Zvoleno potrubí PIP 130 - provedení B s těmito parametry [32]:

Materiál:	<i>ocel</i>
Jmenovitý průměr:	$D_{hN} = 450 \text{ mm}$
Vnitřní průměr:	$D_{h1} = 445,2 \text{ mm}$
Vnější průměr:	$D_{h2} = 457,8 \text{ mm}$
Izolace:	<i>Tvrdá polyuretanová pěna (PUR)</i> [34]
Tloušťka izolace:	$s_{hi} = 115 \text{ mm}$
Chránička potrubí:	<i>Plastová trubka z HD-PE</i> [35]
Tloušťka chráničky:	$s_{ch} = 11,1 \text{ mm}$ [35]

Průřezu horkovodu z katalogu

$$S_h = \frac{\pi \cdot D_{h1}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,4452^2}{4} = 0,156 \text{ m}^2 \quad (42)$$

Objemový průtok horkovodem

Dle [29] dán součinem rychlosti proudění a průřezu horkovodu (42):

$$Q_{hV} = S_h \cdot v_2 = 0,164 \cdot 2 = 0,312 \text{ m}^3/\text{s} \quad (43)$$

Hmotnostní průtok horkovodem

Dle [29] dán součinem objemového průtoku (43) a hustoty vody (39):

$$Q_{hm} = \rho_h \cdot Q_{hV} = 935,02 \cdot 0,328 = 291,7 \text{ kg/s} \quad (44)$$

Tepelný výkon přenášený horkovodem

Pro výpočet dle [1] je použito entalpického spádu mezi přívodní a vratnou vodou (37) - (38):

$$P_{ht} = Q_{hm} \cdot (i_{h1} - i_{h2}) = 291,7 \cdot (554,97 - 292,81) \cdot 10^3 = 76,32 \text{ MW} \quad (45)$$

5.3.3 Tepelný tok stěnou horkovodu

Dynamická viskozita přívodní vody

Dle [28] dána vztahem:

$$\mu_h = \frac{0,027415}{t_{h1}} = \frac{0,027415}{130} = 2,109 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad (46)$$

Kinematická viskozita přívodní vody

Dle [29] dána podílem dynamické viskozity vody (46) a hustoty vody (39):

$$\nu_h = \frac{\mu_h}{\rho_h} = \frac{2,109 \cdot 10^{-4}}{935,02} = 2,256 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \quad (47)$$

Reynoldsovo číslo

Dle [29] dáno vztahem s využitím (47):

$$Re_h = \frac{v_2 \cdot D_{h1}}{\nu_h} = \frac{2 \cdot 0,4452}{2,256 \cdot 10^{-7}} = 3,947 \cdot 10^6 \quad (48)$$

Stejně jako u proudění páry se jedná o turbulentní proudění, jelikož $Re_h > Re_{krit} = 2320$.

Tepelná vodivost přívodní vody

Dle [29] dáno vztahem s využitím (47):

$$\begin{aligned} \lambda_h &= 0,571 + 0,00166 \cdot t_{h1} - 0,0000059 \cdot t_{h1}^2 \\ &= 0,571 + 0,00166 \cdot 130 - 0,0000059 \cdot 130^2 = 0,687 \text{ W/m} \cdot \text{K} \end{aligned} \quad (49)$$

Prandtlovo číslo

Dle [28] dáno vztahem:

$$Pr_h = \frac{178}{t_{h1}} = \frac{178}{130} = 1,369 \quad (50)$$

Nusseltovo číslo

Dle [1] dáno následujícím vztahem s využitím (48) a (50):

$$Nu_h = 0,023 \cdot Re_h^{0,8} \cdot Pr_h^{0,3} = 0,023 \cdot (3,947 \cdot 10^6)^{0,8} \cdot 1,369^{0,3} = 4782,6 \quad (51)$$

Součinitel přestupu tepla z vody na potrubí

Dle [1] dáno následujícím vztahem pro potrubí délky $l = 1 \text{ m}$ s využitím (49) a (51):

$$\alpha_{h1} = \frac{Nu_h \cdot \lambda_h}{l} = \frac{4782,6 \cdot 0,687}{1} = 3286,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (52)$$

Součinitel přestupu tepla z chráničky potrubí do okolí

Dle [30] pro průchozí kanál:

$$\alpha_{h2} = 10,47 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (53)$$

Tepelná vodivost materiálu potrubí

Dle [33] pro ocelové potrubí:

$$\lambda_{ho} = 75 \text{ W/m} \cdot \text{K} \quad (54)$$

Tepelná vodivost materiálu izolace

Dle [34] pro PUR:

$$\lambda_{hi} = 0,03 \text{ W/m} \cdot \text{K} \quad (55)$$

Tepelná vodivost materiálu chráničky

Dle [35] pro HD-PE:

$$\lambda_{hch} = 0,43 \text{ W/m} \cdot \text{K} \quad (56)$$

Průměr horkovodu včetně izolace

$$D_{h3} = D_{h2} + 2 \cdot s_{hi} = 0,4578 + 2 \cdot 115 = 0,6878 \text{ m} \quad (57)$$

Průměr horkovodu včetně izolace a chráničky

$$D_{h4} = D_{h2} + 2 \cdot s_{hi} + 2 \cdot s_{ch} = 0,4578 + 2 \cdot 115 + 2 \cdot 11,1 = 0,710 \text{ m} \quad (58)$$

Tepelný tok stěnou horkovodu

Dle [1] pro délku parovodu $L = 5 \text{ km}$ (např. vzdálenost provoz Špitálka - Brno - Bohunice):

$$\begin{aligned} Q_h &= \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (t_{h1} - t_v)}{\frac{1}{\frac{D_{h1}}{2} \cdot \alpha_{h1}} + \frac{1}{\lambda_{po}} \cdot \ln\left(\frac{D_{h2}}{D_{h1}}\right) + \frac{1}{\lambda_{hi}} \cdot \ln\left(\frac{D_{h3}}{D_{h2}}\right) + \frac{1}{\lambda_{hch}} \cdot \ln\left(\frac{D_{h4}}{D_{h3}}\right) + \frac{1}{\frac{D_{h4}}{2} \cdot \alpha_{h2}}} = \\ &= \frac{2 \cdot \pi \cdot 5000 \cdot (130 - 3,4)}{\frac{1}{\frac{0,4452}{2} \cdot 0,687} + \frac{1}{75} \cdot \ln\left(\frac{0,4578}{0,4452}\right) + \frac{1}{0,03} \cdot \ln\left(\frac{0,6878}{0,4578}\right) + \frac{1}{0,43} \cdot \ln\left(\frac{0,71}{0,6878}\right) + \frac{1}{\frac{0,71}{2} \cdot 10,47}} = \\ &= 285855,6 \text{ W} \end{aligned} \quad (59)$$

5.3.4 Výkon turbíny a teplotní modul

Potřebný tepelný výkon na vstupu do horkovodu

Dán součtem tepelného výkonu na konci horkovodu a tepelných ztrát po délce horkovodu:

$$P_{htz} = P_{ht} + Q_h = 76,32 \cdot 10^6 + 285855,6 = 76,61 \text{ MW} \quad (60)$$

Měrná entalpie přívodní vody na vstupu do horkovodu

Dána součtem měrné entalpie ztrát a vody na konci horkovodu:

$$i_{hz} = i_{h1} + \frac{Q_h}{Q_{hm}} = 554,97 + \frac{285855,6 \cdot 10^{-3}}{291,7} = 555,95 \text{ kJ/kg} \quad (61)$$

Relativní drsnost potrubí horkovodu

Pro absolutní drsnost potrubí $k = 0,5$ mm dle [29] dáno vztahem:

$$k_{hr} = \frac{k}{D_{h1}} = \frac{0,0005}{0,4452} = 0,001 \quad (62)$$

Součinitel tření

Dle [29] pro turbulentní proudění dán vztahem:

$$\lambda_{z2} = \left(-\log(1,8) \cdot \left(\frac{k_{hr}}{10} + \frac{7}{Re_h} \right) \right)^{-2} = \left(-\log(1,8) \cdot \left(\frac{0,001}{10} + \frac{7}{3,947 \cdot 10^6} \right) \right)^{-2} \quad (63)$$
$$= 0,01985$$

Tlakové ztráty v horkovodu

Dle [29] pro délku $L = 5$ km a s využitím (39) a (63) dáno vztahem:

$$p_{z2} = \rho_h \cdot \lambda_{z2} \cdot \frac{L}{D_{h1}} \cdot \frac{v_h^2}{2} = 935,02 \cdot 0,01985 \cdot \frac{5000}{0,4452} \cdot \frac{2^2}{2} = 416980,3 \text{ Pa} \quad (64)$$

Tlak vody na vstupu do horkovodu

Dán součtem tlaku vody na konci horkovodu a tlakovými ztrátami v horkovodu:

$$p_{hz} = p_{h1} + p_{z2} = 2,5 \cdot 10^6 + 416980,3 = 2916980 \text{ Pa} \quad (65)$$

Teplota vody ve výměníku na vstupu do horkovodu

Dle vypočítané hodnoty entalpie vody ve výměníku (61) bude teplota vody ve výměníku přibližně rovna teplotě vody na konci horkovodu:

$$t_{hz} = 130 \text{ °C} \quad (66)$$

Teplota páry vstupující do výměníku

Zvolena dle rady vedoucího práce tak, aby byl teplotní spád ve výměníku 5-10 °C.

$$t_{hp} = 140 \text{ °C} \quad (67)$$

Tlak páry vstupující do výměníku

Dle [36] pro teplotu páry (67):

$$p_{hp} = 361320 \text{ Pa} \quad (67)$$

Měrná entalpie páry vstupující do výměníku

Pro parametry (66) a (67) dle programu pára:

$$i_{hp} = 2733,1 \text{ kJ/kg} \quad (68)$$

Měrná entalpie páry před turbínou

Pro zadané parametry dle programu pára:

$$i_t = 3408,7 \text{ kJ/kg} \quad (69)$$

Elektrický výkon turbíny

Dle [1] dán vztahem:

$$\begin{aligned} P_{he} &= Q_{tm} \cdot (i_t - i_{hp}) \cdot 10^3 \cdot \eta_{tdí} \cdot \eta_{mel} = 30 \cdot (3408,7 - 2733,1) \cdot 10^3 \cdot 0,85 \cdot 0,95 \\ &= 16,366 \text{ MW} \end{aligned} \quad (70)$$

Příkon čerpadel pro čerpání horké vody do horkovodu

Dle [29] pro účinnost čerpadel $\eta_c = 0,7$ dán vztahem:

$$P_c = \frac{Q_{hv} \cdot p_{z2}}{\eta_{mel}} = \frac{0,312 \cdot 416980,3}{0,7} = 185,5 \text{ kW} \quad (71)$$

Teplárenský modul

Dle [2] dán vztahem:

$$e_h = \frac{P_{he} - P_c}{P_{ht}} = \frac{16,366 - 185,5 \cdot 10^{-3}}{76,32} = 0,215 \quad (72)$$

6 Závěr

Práce se zabývá zhodnocením rozvoje brněnské teplárenské soustavy z pohledu historického i současného.

V první části práce je popsán historický vývoj brněnské teplárenské soustavy od r. 1930 až po současný stav. Další kapitoly jsou věnovány popisu jednotlivých provozů. U každého provozu jsou uvedeny souhrnné informace, jako např. tepelný a elektrický výkon či zásobovaná lokalita, a poté je podrobněji popsáno zařízení každého provozu v rozsahu podle získaných informací.

Rovněž soustava centralizovaného zásobování teplem je popsána nejprve z hlediska historického. Následně je uvedena její současná podoba a rozdělení tepelné sítě na parovody a kondenzátní potrubí, horkovody a teplovody, včetně bližšího popisu jednotlivých větví.

Poslední část práce je věnována porovnání distribuce tepla parovodem a horkovodem a vlivu zvoleného způsobu na kombinovanou výrobu tepla a elektřiny. Porovnán je existující parovod se známými parametry páry a fiktivní horkovod se stejným přenášeným tepelným výkonem. Délka obou potrubí je zvolena stejná, a to 5 km, bez odběru média mezi vstupní a výstupní stranou. Pro výpočet tepelných ztrát byly použity průměrné denní teploty podle údajů ČHMÚ v Brně-Tuřanech za období říjen až prosinec 2008 a leden až březen 2009.

Vliv skutečnosti, zda teplo dodáváme v páře či horké vodě, se nejvíce projeví na parametrech výstupní páry z parní turbíny. V případě horkovodu je možno využít většího entalpického spádu na turbíně, protože pára na výstupu z turbíny, která je ve výměníku využita pro ohřev horké vody, má nižší tlak i teplotu než pára, která je použita pro distribuci tepla parovodem. Nevýhodou dodávky tepla v horké vodě je nutnost použití čerpadel pro dopravu vody potrubím, čímž se část vyrobené elektřiny opět spotřebuje, kdežto pára proudí parovodem samovolně.

Tzv. teplárenský modul, který je dán podílem vyrobené elektrické a tepelné energie (případně elektrického výkonu turbíny a tepelného výkonu přeneseného v potrubí), vychází při zadaných parametrech vyšší v případě dopravy tepla horkou vodou. Z celkového porovnání pak vyplývá, že tento způsob distribuce tepla je výhodnější - přestože pro dopravu horké vody je nutno použít čerpadla s příkonem řádu stovek kW, využitím vyššího entalpického spádu se zvýší výkon turbíny o několik MW.

Seznam použité literatury

- [1] PAVELEK, M., et al. *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2003. 284 s. ISBN 80-214-2409-5.
- [2] KADRNOŽKA, J., OCHRANA, L. *Teplárenství*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001. 178 s. ISBN 80-7204-222-X.
- [3] Kolektiv pracovníků podnikového ředitelství EJM k. p. a Teplárny Brno. *50 let brněnského teplárenství 1930-1980*. Brno: Propagační podnik ČSSD, odštěpný závod, 1980. 27 s.
- [4] ČERNÝ, A., KLÍČNÍK, V. *Pracovní předpis pro provoz, opravy a údržbu zařízení v a.s. TB*. 2007.
- [5] HORÁK, K. *Teplárny Brno, a.s.* Brno: Grafex s.r.o., 1995.
- [6] *Encyklopedie dějin města Brna: Osobnosti: Vladimír List* [online]. [cit. 2009-05-26]. <http://www.encyklopedie.brna.cz/home-mmb/?acc=profil_osobnosti&load=2093>.
- [7] *Encyklopedie dějin města Brna: Události: Zahájení provozu brněnské teplárny* [online]. [cit. 2009-05-26]. <http://www.encyklopedie.brna.cz/home-mmb/?acc=profil_udalosti&load=1196&q=&qy=1930&qb=&qs=>>.
- [8] *Hasičský záchranný sbor Jihomoravského kraje, územní odbor Brno: Historie hsičů z povolání města Brna: Největší požáry a statistika* [online]. [cit. 2009-05-26]. <<http://www.hasicbm.cz/historie/hist16/nejvetsi.html>>.
- [9] *Teplárny Brno: Historie společnosti* [online]. [cit. 2009-05-26]. <<http://www.teplarny.cz/?page=historie>>.
- [10] *Teplárny Brno, a.s.: Firemní prospekt: Paroplynová teplárna Červený mlýn*. 6 s.
- [11] *Ministerstvo životního prostředí České republiky: IPPC: Integrovaná povolení: Žádost (MZPXXFBMU119): Rozhodnutí (MZPXXFEZ6PNN): Integrované povolení k provozu zařízení Teplárny Brno provoz Špitálka* [online]. 2006 [cit. 2009-05-26]. <[www.env.cz/www/ippc.nsf/0/20FA62658F25043DC125716400417F97/\\$FILE/11-TeplárnyPŠ-rozhodnutí.doc](http://www.env.cz/www/ippc.nsf/0/20FA62658F25043DC125716400417F97/$FILE/11-TeplárnyPŠ-rozhodnutí.doc)>.
- [12] BERANOVSKÝ, J., et al. *EkoWATT: Úspory energie: Kombinovaná výroba elektřiny a tepla* [online]. 2007 [cit. 2009-05-26]. <<http://www.ekowatt.cz/cz/informace/uspory-energie/kombinovana-vyroba-elekriny-a-tepla>>.
- [13] *Teplárny Brno: Tiskové centrum: Fotobanka: Historie* [online]. [cit. 2009-05-26]. <<http://www.teplarny.cz/?page=foto-historie>>.
- [14] *Teplárny Brno: Historie společnosti: Přehled historických milníků* [online]. [cit. 2009-05-26]. <<http://www.teplarny.cz/?page=milniky>>.

- [15] *Teplárny Brno: Provozy společnosti* [online]. [cit. 2009-05-26].
<<http://www.teplarny.cz/?page=provozy>>.
- [16] *Teplárny Brno: Provozy společnosti: Špitálka* [online]. [cit. 2009-05-26].
<<http://www.teplarny.cz/?page=spitalka>>.
- [17] *Teplárny Brno: Provozy společnosti: Staré Brno* [online]. [cit. 2009-05-26].
<<http://www.teplarny.cz/?page=stare-brno>>.
- [18] *Teplárny Brno: Provozy společnosti: Brno - sever* [online]. [cit. 2009-05-26].
<<http://www.teplarny.cz/?page=brno-sever>>.
- [19] *Unipetrol RPA: Nabídka produktů: Petrochemické produkty: Ostatní petrochemické produkty: Pyrolýzní oleje* [online]. [cit. 2009-05-26].
<<http://www.unipetrolrpa.cz/cs/nabidka-produktu/petrochemicke-produkty/pyrolyzni-olej.html>>.
- [20] *Teplárny Brno: Provozy společnosti: Kamenný vrch* [online]. [cit. 2009-05-26].
<<http://www.teplarny.cz/?page=kamenny-vrch>>.
- [21] *Teplárny Brno: Tiskové centrum: Tiskové zprávy: Teplárny Brno snižují emise na Kamenném Vrchu* [online]. 2009 [cit. 2009-05-26].
<<http://www.teplarny.cz/?page=38>>.
- [22] *Teplárny Brno: Provozy společnosti: Bystrc* [online]. [cit. 2009-05-26].
<<http://www.teplarny.cz/?page=bystrc>>.
- [23] *Teplárny Brno: Provozy společnosti: Červený mlýn* [online]. [cit. 2009-05-26].
<<http://www.teplarny.cz/?page=cerveny-mlyn>>.
- [24] *Teplárny Brno: Tiskové centrum: Fotobanka: Provoz Červený mlýn* [online]. [cit. 2009-05-26].
<<http://www.teplarny.cz/?page=foto-provozy>>.
- [25] *Český hydrometeorologický ústav: Informace o klimatu: Jak bylo v roce 2008: Měsíční hodnoty* [online]. 2009 [cit. 2009-05-26].
<<http://www.chmu.cz/meteo/ok/okdat81.html>>.
- [26] *Český hydrometeorologický ústav: Informace o klimatu: Jak je letos: Měsíční hodnoty* [online]. 2009 [cit. 2009-05-26].
<<http://www.chmu.cz/meteo/ok/okdat091.html>>.
- [27] INCROPERA, F., DEWITT, D. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 1990. 919 s.
- [28] LABOUTKA, K., SUCHÁNEK, T. *TZB-info: Tabulky a výpočty: Vybrané výpočetní vztahy pro vlastnosti vody* [online]. 2001 [cit. 2009-05-26].
<<http://www.tzb-info.cz/t.py?t=16&i=41&h=38&obor=1>>.
- [29] ŠOB, F. *Hyromechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2002. 238 s. ISBN 80-214-2037-5.

- [30] *Tepelné sítě. Strojní a stavební část - projektování: ČSN 38 33 60.*
- [31] JÍCHA, M. *Přenos tepla a látky.* Brno: CERM, 2001. 160 s. ISBN 80-214-2029-4.
- [32] *IZO tepelné izolace: Předizolované potrubní systémy: Potrubí a tvarovky: PIP 130 A, B, C* [online]. [cit. 2009-05-26].
<<http://www.izo.cz/index.php?program=131><=cz>.
- [33] *IZO tepelné izolace: Předizolované potrubní systémy: Použité materiály: Médiovodné potrubí* [online]. [cit. 2009-05-26].
<<http://www.izo.cz/index.php?program=121&lang=cz>>.
- [34] *IZO tepelné izolace: Předizolované potrubní systémy: Použité materiály: Izolační vrstvy* [online]. [cit. 2009-05-26].
<<http://www.izo.cz/index.php?program=122&lang=cz>>.
- [35] *IZO tepelné izolace: Předizolované potrubní systémy: Použité materiály: Vnější ochranné vrstvy* [online]. [cit. 2009-05-26].
<<http://www.izo.cz/index.php?program=123&lang=cz>>.
- [36] *Odbor termomechaniky a techniky prostředí: Výuka: Studijní materiály: Vlastnosti syté kapaliny a syté páry H₂O dle teplot* [online]. [cit. 2009-05-26].
<<http://ottp.fme.vutbr.cz/vyuka/para-t.htm>>.

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
P_t	MW_t	tepelný výkon
P_{ei}	MW_e	instalovaný elektrický výkon
P_{ed}	MW_e	dosažitelný elektrický výkon
D_N	mm	jmenovitý průměr potrubí
η_{tdi}	-	termodynamická účinnost parní turbíny
η_{mel}	-	mechanická účinnost turbíny a elektrického generátoru
Q_{tm}	kg/s	hmotnostní průtok páry turbínou
t_v	$^{\circ}C$	průměrná okolní teplota za dané období
p_{p1}	MPa	tlak páry na výstupu z parovodu
t_{p1}	$^{\circ}C$	teplota páry na výstupu z parovodu
Q_{pm}	kg/s	hmotnostní průtok páry parovodem
p_{p2}	MPa	tlak kondenzátu
t_{p2}	$^{\circ}C$	teplota kondenzátu
p_t	MPa	tlak páry na vstupu do turbíny
t_t	$^{\circ}C$	teplota páry na vstupu do turbíny
D_{pN}	mm	jmenovitý průměr parovodu
D_{p1}	mm	vnitřní průměr parovodu
D_{p2}	mm	vnější průměr parovodu
D_{p3}	mm	průměr parovodu včetně izolace
s_{pi}	mm	tloušťka izolace parovodu
c_{p1}	$kJ/kg \cdot K$	měrná tepelná kapacita páry na výstupu z parovodu
c_{p2}	$kJ/kg \cdot K$	měrná tepelná kapacita kondenzátu
i_{p1}	kJ/kg	měrná entalpie páry na výstupu z parovodu
i_{p2}	kJ/kg	měrná entalpie kondenzátu
P_{pt}	MW	tepelný výkon přenášený parovodem
v_p	m^3/kg	měrný objem páry na výstupu z parovodu
ρ_p	kg/m^3	hustota páry na výstupu z parovodu
Q_{pv}	m^3/s	objemový průtok parovodem
S_p	m^2	průřez parovodu
v_1	m/s	rychlost proudění páry v potrubí
μ_p	Pa·s	dynamická viskozita páry
ν_p	m^2/s	kinematická viskozita páry
Re_p	-	Reynoldsovo číslo pro páru
Re_{krit}	-	kritická hodnota Reynoldsova čísla
λ_p	$W/m \cdot K$	tepelná vodivost páry
a_p	m^2/s	teplotní vodivost páry
Pr_p	-	Prandtlovo číslo pro páru
Nu_p	-	Nusseltovo číslo pro páru
α_{p1}	$W/m^2 \cdot K$	součinitel přestupu tepla z páry na potrubí
α_{p2}	$W/m^2 \cdot K$	součinitel přestupu tepla z izolace potrubí do okolí
λ_{po}	$W/m \cdot K$	tepelná vodivost materiálu potrubí parovodu

λ_{pi}	W/m·K	tepelná vodivost materiálu izolace parovodu
Q_p	W	tepelný tok stěnou parovodu
P_{ptz}	MW	potřebný tepelný výkon na vstupu do parovodu
i_{pz}	kJ/kg	měrná entalpie páry na vstupu do parovodu
k	mm	absolutní drsnost potrubí
k_{pr}	-	relativní drsnost potrubí parovodu
λ_{z1}	-	součinitel tření na stěně parovodu
p_{z1}	Pa	tlakové ztráty v parovodu
p_{pz}	Pa	tlak páry na vstupu do parovodu
t_{pz}	°C	teplota páry na vstupu do parovodu
i_t	kJ/kg	měrná entalpie páry před turbínou
P_{pe}	MW	elektrický výkon turbíny pro páru
e_p	-	teplárenský modul pro páru
p_{h1}	MPa	tlak přívodní vody
t_{h1}	°C	teplota přívodní vody
v_2	m/s	rychlost proudění vody v horkovodu
p_{h2}	MPa	tlak vratné vody
t_{h2}	°C	teplota vratné vody
c_{h1}	kJ/kg·K	měrná tepelná kapacita přívodní vody
c_{h2}	kJ/kg·K	měrná tepelná kapacita vratné vody
i_{h1}	kJ/kg	měrná entalpie přívodní vody
i_{h2}	kJ/kg	měrná entalpie vratné vody
ρ_h	kg/ m ³	hustota přívodní vody
S_{hx}	m ²	průřez horkovodu při stejném tepelném výkonu
D_{hx}	m	průměr horkovodu při stejném tepelném výkonu
D_{hN}	mm	jmenovitý průměr horkovodu
D_{h1}	mm	vnitřní průměr horkovodu
D_{h2}	mm	vnější průměr horkovodu
D_{h3}	mm	průměr horkovodu včetně izolace
D_{h4}	mm	průměr horkovodu včetně izolace a chráničky
s_{hi}	mm	tloušťka izolace horkovodu
s_{ch}	mm	tloušťka chráničky
S_h	m ²	průřez horkovodu
Q_{hV}	m ³ /s	objemový průtok horkovodem
Q_{hm}	kg/s	hmotnostní průtok horkovodem
P_{ht}	MW	tepelný výkon přenášený horkovodem
μ_h	Pa·s	dynamická viskozita vody
ν_h	m ² /s	kinematická viskozita vody
Re_h	-	Reynoldsovo číslo pro vodu
λ_h	W/m·K	tepelná vodivost vody
Pr_h	-	Prandtlovo číslo pro vodu
Nu_h	-	Nusseltovo číslo pro vodu
α_{h1}	W/m ² ·K	součinitel přestupu tepla z vody na potrubí
α_{h2}	W/m ² ·K	součinitel přestupu tepla z chráničky potrubí do okolí

λ_{ho}	W/m·K	tepelná vodivost materiálu potrubí horkovodu
λ_{hi}	W/m·K	tepelná vodivost materiálu izolace horkovodu
λ_{hi}	W/m·K	tepelná vodivost materiálu chráničky horkovodu
Q_h	W	tepelný tok stěnou horkovodu
P_{htz}	MW	potřebný tepelný výkon na vstupu do horkovodu
i_{hz}	kJ/kg	měrná entalpie vody na vstupu do horkovodu
k	mm	absolutní drsnost potrubí
k_{hr}	-	relativní drsnost potrubí horkovodu
λ_{z2}	-	součinitel tření na stěně horkovodu
p_{z2}	Pa	tlakové ztráty v horkovodu
p_{hz}	Pa	tlak páry na vstupu do horkovodu
t_{hz}	°C	teplota vody ve výměníku
t_{hp}	°C	teplota páry na vstupu do výměníku
p_{hp}	Pa	tlak páry na vstupu do výměníku
i_{hp}	kJ/kg	měrná entalpie páry na vstupu do výměníku
P_{he}	MW	elektrický výkon turbíny pro vodu
$\eta_{\check{c}}$	-	účinnost čerpadel
$P_{\check{c}}$	kW	příkon čerpadel
e_h	-	teplárenský modul pro vodu