



# IPARI LÉTESÍTMÉNYEKBŐL SZÁRMAZÓ HULLADÉKHŐ KIAKNÁZÁSÁNAK HATÉKONYSÁGA ÉS ENNEK LEHETSÉGES FELHASZNÁLÁSA

## REVIEW OF POSSIBLE WASTE HEAT SOURCES FROM INDUSTRIAL FACILITIES AND THEIR POTENTIAL USE

Dósa János

Petrozsényi Egyetem, Gép és Villamosmérnöki Kar, Gépészeti, Ipari és Közlekedésmérnöki Tanszék,  
Petrozsény, Románia, [iondosa@upet.ro](mailto:iondosa@upet.ro)

### Abstract

The aim of the paper was to review the main reusable sources of heat from industrial facilities and to analyze the most efficient way in which they can be exploited. In order to carry out some case studies, examples were chosen from fields of industry in which energy consumption is very high, namely the energy and mining industries. It was shown that although there are large amounts of energy that can be recovered, they are generally low temperature heat sources. Their efficient recovery can be achieved with the help of heat pumps, but due to the final temperature of the heat source, which is around 70 °C, they can be used mainly as heat sources for heating or hot water. This use greatly limits the research and projects for the reuse of these secondary energy resources, therefore future research should focus on obtaining higher temperatures, but also on the production of steam from these sources. The production of steam would facilitate an increase in projects for the recovery of these secondary energy resources for industrial use, which would lead to a superior valorization of them.

**Keywords:** waste heat, secondary energy resources, heat recovery, primary energy source savings.

### Összefoglalás

A dolgozat célja az, hogy áttekintse az ipari létesítményekből származó főbb, újra felhasználható hőforrásokat, és elemezze azok főbb hasznosítási módjait. Néhány esettanulmány elkészítéséhez pár szemléltető példa lett kiválasztva az ipar azon területeiről, ahol nagyon magas az energiafelhasználás, nevezetesen az energiaiparból és a bányászatból. Kimutatták, hogy bár nagy mennyiségű energia nyerhető vissza, általában ezek alacsony hőmérsékletű hőforrások. Hatékony visszanyerésüket hőszivattyúk segítségével lehet elérni, de a hőforrás 70 °C körüli vég hőmérséklete miatt főként fűtés- vagy melegvíz-szolgáltatásra használható. Ez a felhasználás nagymértékben korlátozza ezen másodlagos energiaforrások újra felhasználásával kapcsolatos kutatásokat és projekteket, ezért a jövőbeni kutatásoknak a magasabb hőmérséklet elérésére, illetve az ezekből a forrásokból származó gőz előállítására kell összpontosítani. A gőztermelés elősegíti ezen másodlagos energiaforrások ipari felhasználásra történő visszanyerését célzó projektek számának növekedését, ami ezen hőforrások magasabb szintű felhasználását eredményezné.

**Kulcsszavak:** hulladékhő, másodlagos energiaforrás, hővisszanyerés, elsődlegesenergiaforrás-megtakarítás.

### 1. Bevezetés

Az EU által a fenntartható fejlődés szempontjából megfogalmazott irányvonalat konkretizálja az Európai Green Deal, amely kimondta, hogy az

első klímasemleges kontinens megvalósítására törekszünk.

A stratégia kiindulópontja, hogy a klímaváltozás és a környezetromlás egzisztenciális veszélyt jelent Európára és a világra.

E kihívások leküzdése érdekében az európai Green Deal megállapodás modern, erőforrás-hatékony és versenyképes gazdasággá alakítja az EU-t. A Green Deal főbb céljai a következőkben foglalhatók össze: 2050-re üvegházhatású gázok nettó kibocsátásának nullára való csökkentése; az erőforrás-felhasználástól független gazdasági növekedés; nem marad hátra egyetlen ember vagy közösség sem.

A cselekvési terv fontos részét képezi azon javaslatok sora, amelyek célja, hogy az EU éghajlat-, energia-, közlekedés- és adópolitikáját alkalmassá tegyék arra, hogy 2030-ra az 1990-es szinthez képest legalább 55%-kal csökkentsék az üvegházhatást okozó gázok nettó kibocsátását.

Az sem véletlen, hogy a kiemelt kezdeményezések közül kettő energiával kapcsolatos: a REPowerEU és az EU fellépése az energiaválság kezelésére.

Alapvetően ezek azok a feltételek, amelyek között Európa ipara a jövőben működni fog.

## 2. Az ipar és energia igénye

Az Európai Unió jelenlegi helyzetét energetikai szempontból elemezzük a következő részben.

Az **1. ábrán** [1] látható, hogy az EU primerenergia-fogyasztása 2005-höz képest csökkent. Ugyanakkor a COVID-járvány hatása is egyértelműen észrevehető.

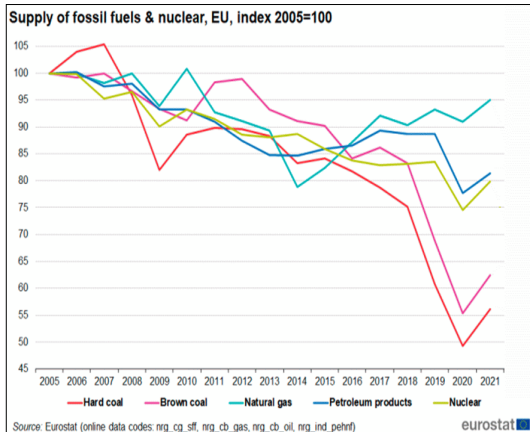
További fontos szempont, hogy a kőszén és a barnaszén felhasználása folyamatosan visszaesett, ennek következtében az energiaigény kielégítése érdekében nőtt a földgáz, a kőolaj és az atomenergia felhasználása. Általános tendencia a primerenergia-fogyasztás csökkenése.

A **2. ábrán** a bruttó villamosenergia-termelés van feltüntetve, és az adatok kiemelik azt, hogy a fosszilis tüzelőanyagok ismét a legfontosabb villamosenergia-termelési források voltak. A második helyen az atomenergia áll, de a vízenergia és a zöldenergia is az élen van.

A **3. ábrán** megjelenő adatok kiemelten fontosak a hővisszanyerés szempontjából. Ezen adatok elemzésével fel lehet mérni a megújuló energiaforrások felhasználásának jelenlegi állapotát.

Az első helyen az elsődleges szilárd bioüzemanyag-fogyasztás áll, ezt követik a biogázok.

Fontos megjegyezni, hogy a hőszivattyúk használata is jelentős szerepet játszik az elfogyasztott megújuló energiaforrások között, és részesedése idővel növekszik. Fontos szerepük van a megújuló és nem megújuló települési, illetve a nem megújuló ipari hulladékoknak, de van mit javítani ezek felhasználásán.



1. ábra. Primerenergia-ellátás [1]

|                                       | 2017      | 2018      | 2019      | 2020      | 2021      |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Anthracite                            | 4 103     | 4 013     | 680       | 715       | 636       |
| Coking coal                           | 11 164    | 8 805     | 13        | 81        | 64        |
| Other bituminous coal                 | 316 143   | 286 535   | 205 613   | 154 218   | 190 144   |
| Sub-bituminous coal                   | 3 170     | 2 394     | 1 554     | 572       | 389       |
| Lignite                               | 301 921   | 291 618   | 241 259   | 195 292   | 226 128   |
| Brown coal briquettes                 | 2 329     | 2 132     | 1 799     | 1 510     | 1 663     |
| Coke oven gas                         | 7 770     | 7 204     | 7 166     | 6 237     | 6 117     |
| Gas works gas                         | 1 939     | 1 803     | 1 734     | 1 250     | 1 42      |
| Blast furnace gas                     | 20 844    | 20 866    | 19 455    | 16 343    | 20 053    |
| Peat                                  | 5 243     | 5 922     | 5 161     | 3 137     | 2 502     |
| Oil shale and oil sands               | 9 912     | 9 380     | 4 318     | 2 247     | 3 444     |
| Natural gas                           | 525 178   | 491 689   | 569 312   | 560 997   | 551 794   |
| Refinery gas                          | 6 550     | 7 158     | 6 955     | 6 622     | 6 310     |
| Liquefied petroleum gases             | 452       | 237       | 232       | 147       | 145       |
| Gas oil and diesel oil                | 10 516    | 9 704     | 10 274    | 10 087    | 10 481    |
| Fuel oil                              | 28 737    | 25 614    | 24 894    | 21 345    | 23 389    |
| Petroleum coke                        | 2 280     | 1 577     | 621       | 517       | 465       |
| Solid biofuels                        | 74 261    | 76 252    | 80 560    | 82 959    | 92 752    |
| Biogases                              | 55 648    | 55 096    | 54 991    | 55 766    | 52 603    |
| Industrial waste (non-renewable)      | 2 750     | 2 925     | 2 942     | 2 639     | 2 573     |
| Renewable municipal waste             | 18 739    | 19 335    | 19 011    | 18 873    | 19 573    |
| Non-renewable municipal waste         | 18 218    | 18 838    | 18 584    | 18 334    | 18 797    |
| Hydro                                 | 322 463   | 370 234   | 345 643   | 375 487   | 374 849   |
| Pure hydro power                      | 281 813   | 326 819   | 306 478   | 331 709   | 330 758   |
| Mixed hydro power                     | 22 720    | 27 044    | 23 276    | 25 838    | 27 915    |
| Mixed hydro power - pumping           | 10 187    | 9 981     | 9 494     | 10 367    | 10 355    |
| Pumped hydro power                    | 17 931    | 16 372    | 15 889    | 17 940    | 16 177    |
| Geothermal                            | 6 715     | 6 655     | 6 726     | 6 717     | 6 538     |
| Wind                                  | 312 313   | 320 616   | 367 116   | 387 799   | 386 896   |
| Solar thermal                         | 5 883     | 4 867     | 5 683     | 4 992     | 5 176     |
| Solar photovoltaic                    | 102 052   | 108 200   | 118 202   | 140 125   | 158 598   |
| Tide, wave, ocean                     | 522       | 480       | 499       | 509       | 503       |
| Nuclear                               | 759 383   | 761 943   | 765 338   | 683 512   | 731 701   |
| Heat from chemical sources            | 1 172     | 1 099     | 1 038     | 1 089     | 1 105     |
| Other fuels (including non-specified) | 22 551    | 20 860    | 19 848    | 19 560    | 16 081    |
| Total (excluding pumped hydro)        | 2 932 807 | 2 916 698 | 2 881 840 | 2 761 371 | 2 885 010 |

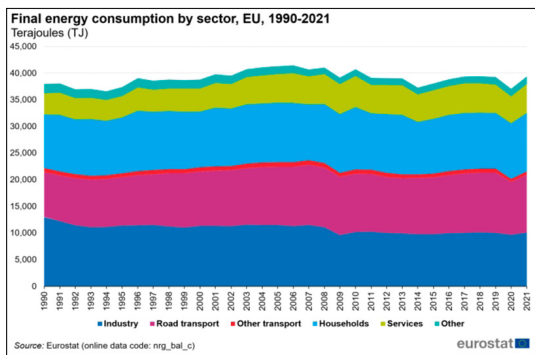
Source: Eurostat (online data codes: nrg\_ind\_pehn, nrg\_ind\_pehn)

2. ábra. Bruttó villamosenergia-termelés [1]

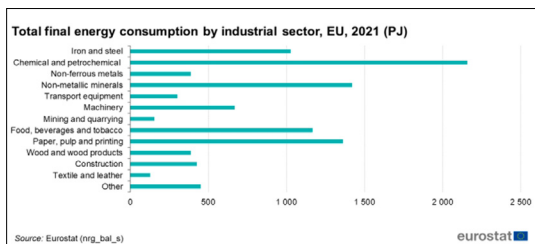
|                                     | 2017      | 2018      | 2019      | 2020      | 2021      |
|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| TJ Geothermal                       | 283 521   | 284 082   | 288 813   | 288 822   | 284 292   |
| TJ Solar thermal                    | 190 137   | 179 916   | 194 623   | 197 563   | 190 553   |
| TJ Ambient heat (heat pumps)        | 456 113   | 488 381   | 520 765   | 553 193   | 630 597   |
| TJ Biogases                         | 581 985   | 580 258   | 592 251   | 614 908   | 625 835   |
| kt Biogasoline                      | 3 839     | 4 118     | 4 356     | 4 339     | 4 411     |
| kt Biodiesels                       | 12 951    | 14 532    | 14 731    | 15 072    | 15 718    |
| kt Bio jet kerosene                 | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| kt Other liquid biofuels            | 1 350     | 1 382     | 1 499     | 1 484     | 1 362     |
| TJ Primary solid biofuels           | 3 889 241 | 3 984 029 | 4 057 549 | 4 025 668 | 4 359 881 |
| kt Charcoal                         | 517       | 528       | 500       | 444       | 437       |
| TJ Renewable municipal waste        | 397 656   | 390 913   | 395 136   | 399 661   | 409 465   |
| TJ Non-renewable municipal waste    | 393 219   | 386 537   | 390 248   | 395 068   | 399 305   |
| TJ Industrial waste (non-renewable) | 185 722   | 195 742   | 202 075   | 206 295   | 207 573   |

Source: Eurostat (online data code: nrg\_cb\_w)

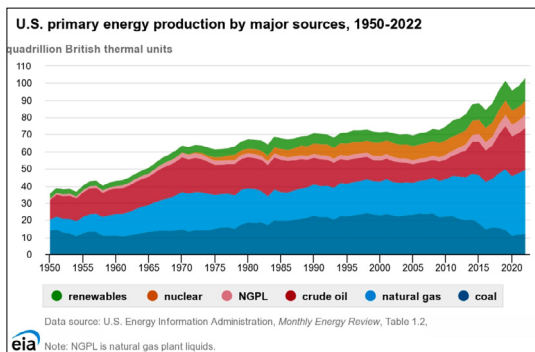
3. ábra. Megújuló energiaforrások fogyasztása [1]



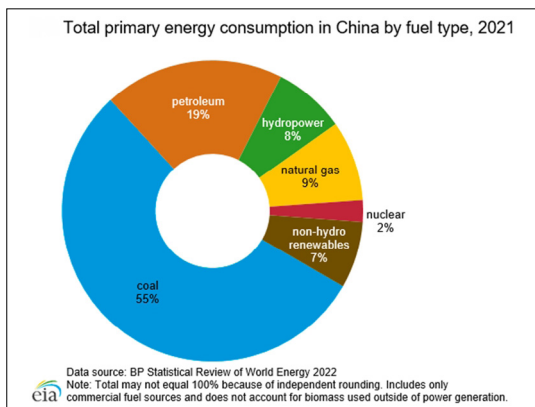
4. ábra. Végső energiafogyasztás ágazonként [2]



5. ábra. Végső energiafogyasztás ágazonként [3]



6. ábra. Az Egyesült Államok primerenergia-fogyasztása [4]



7. ábra. Kína primerenergia-fogyasztása [5]

A 4. ábra a végső energia felhasználásával kapcsolatos. Az adatok azt mutatják, hogy a három legnagyobb energiafogyasztó az ipar, a közúti közlekedés és a háztartások.

Míg a közúti közlekedésben a hőviszanyerés műszakilag nagy kihívást jelenthet, addig a háztartások nagy részaránya a nagy számukból adódik (ami miatt a hőviszanyerés itt általában nem gazdaságos), tehát az iparra kell koncentrálnunk.

Az energiaigényes iparágak skálája nagyon széles, idetartoznak például: a vegyipar, az acél, papír, műanyag, bányászat, kitermelés és köfejtés, finomítók, cement-, fa-, gumi-, színesfém-, üveg- és kerámiaipar.

Részeseződésüket a végső energiafogyasztásban az 5. ábra mutatja be [3].

Az 5. ábrán bemutatott adatokkal kapcsolatban néhány dolgot tisztázni kell. Mivel a bemutatott számok abszolút értékkel bírnak, és ezeket az iparágakat energiatenzitási szempontból kívánjuk elemezni, figyelembe kell venni egy adott iparág részeseződését a teljes fogyasztásban.

Például a bányászat sokkal energiaigényesebb, mint ahogy arra következtetni lehetne az 5. ábra alapján.

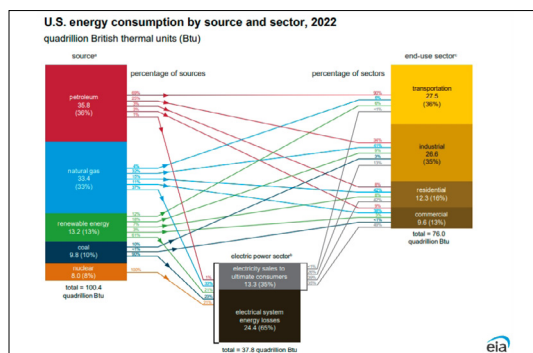
A jelenlegi helyezést annak köszönheti, hogy Európában szinte már nem létezik bányászat a bányák többségének bezárása miatt.

A teljes kép érdekében a továbbiakban az USA és Kína energiatermelési és -fogyasztási adatai kerülnek bemutatásra.

Ha összehasonlítjuk a 6. ábrát az 1. ábrával, jól lehet látni, hogy az adatok általában egyeznek.

A 7. ábrán viszont, a Kína primerenergia-fogyasztásában a szén az első helyen áll, és ez a felismerés nem elhanyagolható, mivel Kína energiapolitikáját nagyon jól szemlélteti.

Egy összetettebb képet mutat a 8. ábra [6], az energiafogyasztás forrásonkénti és ágazonkénti bontására vonatkozóan az USA esetében.



8. ábra. Energiafogyasztás forrás és ágazat szerint [6]

A **8. ábrán** látható adatok összhangban vannak a **4. ábra** adataival, mivel mindkét ábrán a fő végfelhasználói ágazatok a szállítás, az ipar és a lakossági (háztartás-) szektor.

Az **5. ábra** adatainak összehasonlítása a **9. ábrán** látható adatokkal azt emeli ki, hogy Kínában a bányászat részesedése a teljes energiafelhasználásból nagyobb, mint az EU esetében (**5. ábra**). Az is jól látható, hogy az elmúlt években részesedése az energiafogyasztásban meglehetősen állandó, mivel Kínának még mindig megvan a bányászata.

Ráadásul a bányászat energiafogyasztása a harmadik helyen áll, ami azt mutatja, hogy a bányászat energiaigényes iparág.

Egy másik fontos szempont az, amit a **10. ábra** szemléltet, ugyanis itt az energiaipar is jelentős fogyasztóként szerepel, mi több, a teljes energiafogyasztás arányát tekintve az első helyen áll.

Az EU és az USA esetében az energiaipar részesedése nincs feltüntetve a statisztikában.

Következésképpen az ipari fogyasztás fent bemutatott súlya, ezen belül az energia- és bányászat részesedése miatt a következőkben az ezeken belül hasznosítható hőforrások azonosításával foglalkozunk. Ugyanakkor a hőforrások értékelésre kerülnek nagyságrendjük és a hasznosításuk hatékonysága szempontjából.

### 3. Ipari hulladékhőforrások

A hulladékhő visszanyerése nem új keletű téma, így az ilyen hőforrásokat már feltérképezték különböző kutatók, illetve érdekelt intézmények [8].

Egy rövid felsorolás segítséget nyújt a hővisszanyerés szempontjából legjobb perspektívával

rendelkező hőforrás felfedezésének folyamatában.

A legjellemzőbb hulladékhőforrások és energiahasznosítási lehetőségeik a következők [8]:

- a 30% és 90% közötti technológiai kilépő levegő (füstgáz) használható fel;
- a hűtőrendszerekből származó hulladékhő – 35% és 95% között hasznosítható folyamatfűtés-ként;
- légkompressziós berendezések – az elektromos kapacitás akár 90%-a is visszanyerhető;
- szellőztetési technológia – 35–90% friss levegő előmelegítésre használható.

#### 3.1. Hulladékhő az energiaiparban

A fent felsorolt hulladékhőforrások minden ipari szektorban megtalálhatók.

Mint fentebb említettük, az energiaszektor és a bányászat lett kiválasztva a hulladékhő-hasznosítás lehetőségeinek értékelésére.

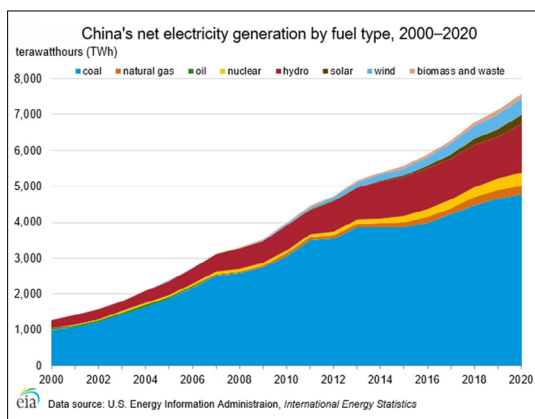
Az ipari hulladékhő hővisszanyerési szempontból igen magas potenciáljának kiemelésére kétféle hulladékhőforrás lett figyelembe véve:

- hűtőrendszerekből származó hulladékhő;
- a levegő sűrítéséből származó hulladékhő.

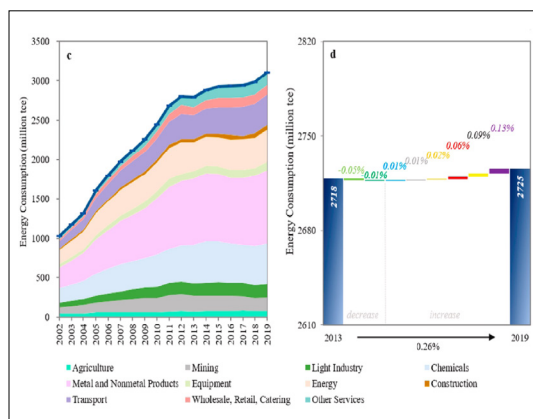
##### 3.1.1. A kondenzátorhűtésből származó hulladékhő mennyisége

A szakirodalomban számos tanulmány található a hőerőmű működésével kapcsolatban.

A kondenzátoros hűtéssel a környezetbe kibocsátott hőmennyiség Gajendra [9] szerint 66%, míg Kale [10] szerint a veszteség 34%. Más munkák során a kondenzátor által kibocsátott hő 39,11% és 42,87% között [11], illetve 45,02% és 45,98% között [12] volt, a terheléstől függően.



**9. ábra.** Nettó villamosenergia-termelés tüzelőanyag-típusonként (Kína) [5]



**10. ábra.** Energiafogyasztás ipari szektoronként (Kína) [7]

Ezek a számok magasak, és abszolút értékben 200 MW körüliek a [11] [12]-ben felsorolt adatok esetében.

A kondenzátorhűtés hulladékhőjéből visszanyerhető hőmennyiség felmérése a veszteségfeltárás során gyűjtött adatok felhasználásával végezhető el.

A 11. ábrán egy 200 MW-os hőerőmű egyszerűsített hőkapcsolását mutatjuk be.

Az ebben az erőműben működő gőzturbina egy kondenzációs típusú turbina és 3000 ford/perc, 13 MPa nyomás és 545 °C-on történő működésre tervezték, míg az újrahevített (reheat) gőz hőmérséklete 545 °C, 2,44 MPa nyomáson. A turbínából kilepő gőz nyomása (kipufogónyomás) 0,0034 MPa.

A turbina hét előmelegítő megcsapolással rendelkezik a tápvíz regeneratív fűtéséhez. A tápvíz maximális hőmérséklete 242 °C. A nagynyomású turbínából (HPT) 2,89 MPa nyomáson és 350 °C hőmérsékleten kilepő gőzt újrahevítik. A felhevített gőzt a középnyomású turbinarészbe (Reheat Turbine – RT) vezetik vissza. A kisnyomású turbinarész (LPT) kettős kiömlésű.

A turbínában használt gőzt egy Pp-330/140-P55-típusú, kényszeráramlású, széntüzelésű kazán biztosítja [13].

Ennél az erőműnél energetikai auditálás volt elvégezve. A veszteségfeltárás-számításokhoz a szabályozásoknak megfelelően legalább 3 különböző terhelésen kell méréseket végezni. A terhelési szintek a következőképpen voltak meghatározva: 460 t·h<sup>-1</sup> – 70%, 560 t·h<sup>-1</sup> – 85% és 640 t·h<sup>-1</sup> – 94% (gőztömegáram).

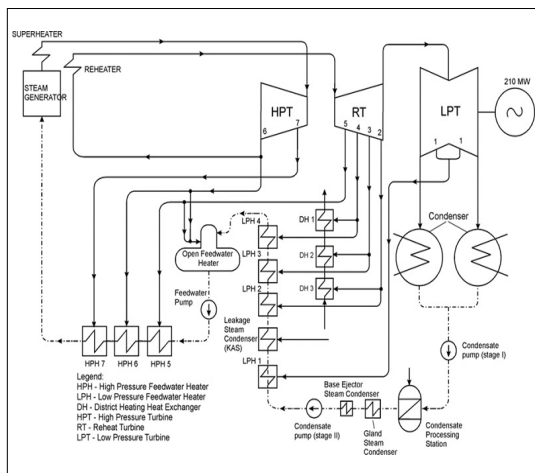
Az 1. táblázat adatai a kondenzátor által a környezetben leadott hőt, a hulladékhőként rendelkezésünkre álló hatalmas hőmennyiséget mutatja be. A megfelelő hővisszanyerési mód kiválasztásához a rendelkezésre álló hő mennyisége mellett a hőforrás hőmérséklete is fontos, ezért a 2. táblázat a hűtővíz belépési és kilépési hőmérsékleteit mutatja be.

A másik esettanulmány tárgya egy 150 MW névleges teljesítményű erőmű lesz.

A 150 MW-os hőerőmű egyszerűsített hőkapcsolása a 12. ábrán van bemutatva.

Ez az erőmű K 160-130-2PR-2-típusú gőzturbinával van felszerelve, amely a 150 MW-os hőerőmű egyszerűsített hőkapcsolási diagramján (12. ábra) van feltüntetve.

Ez a turbina egy kondenzációs típusú, szabályozatlan lecsapolású turbina, amelyet 12,8 MPa nyomáson és 540 °C hőmérsékleten való működésre



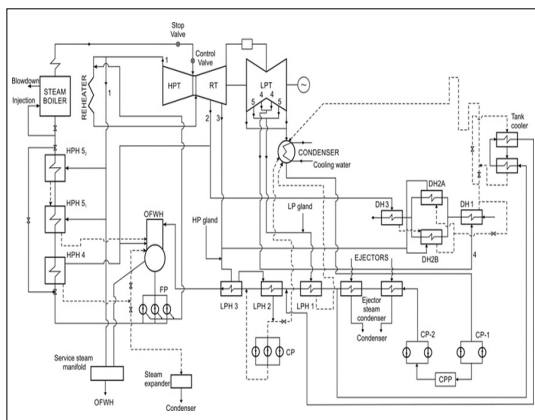
11. ábra. A 200 MW-os hőerőmű egyszerűsített hőkapcsolása [11]

1. táblázat. A kondenzátor vesztesége

| Terhelés          | A kondenzátor által a környezetben leadott hő $P_{cd}$ , MW |
|-------------------|-------------------------------------------------------------|
| 70%               | 209,291                                                     |
| 85%               | 259,989                                                     |
| 94%               | 261,675                                                     |
| Átlagos veszteség | 243,652                                                     |

2. táblázat. Hűtővíz-hőmérséklet

| Terhelés | Belépő hűtővíz hőmérséklete, °C | Kilépő hűtővíz hőmérséklete, °C |
|----------|---------------------------------|---------------------------------|
| 70%      | 26,00                           | 32,74                           |
| 85%      | 27,93                           | 36,43                           |
| 94%      | 26,19                           | 35,15                           |



12. ábra. A 150 MW-os hőerőmű egyszerűsített hőkapcsolása [12]

terveztek, míg az újrahevített (reheat) gőz hőmérséklete 540 °C, 3,41 MPa nyomáson.

A turbinából kilepő gőz nyomása (kipufogónyomás) 0,0038 MPa.

A felsorolt paraméterek mellett, 12 °C-os hűtővíz-hőmérsékleten a turbina teljesítménye elérheti akár a 170 MW-ot. Ezenkívül akár 175 MW (150 Gcal·h<sup>-1</sup>) hőenergiát is képes szállítani a távhőhálózatban a szabályozatlan lecsapolóból 150/70 °C vagy 130/70 °C hőmérsékleten.

A 12. ábrán használt rövidítések a következők: HPT – nagynyomású turbinarész; RT – középnyomású (reheat) turbinarész; LPT – kisnyomású turbinarész; CP, CP-1, CP-2 – kondenzátumszivattyúk; LPH – kisnyomású tápvízmelegítő; HPH – nagynyomású tápvízmelegítő; FP – tápvízszivattyú; DH – távhőcserélő; CPP – kondenzátumkezelő.

A turbina öt előmelegítő megcsapolással rendelkezik a tápvíz regeneratív fűtéséhez. A tápvíz maximális hőmérséklete 235,4 °C. A nagynyomású turbinából (HPT) a 3,12 MPa nyomáson és 350,7 °C hőmérsékleten kilepő gőzt újrahevítik. A felhevített gőzt a középnyomású turbinarészbe (Reheat Turbine – RT) vezetik vissza. A kisnyomású turbinarész (LPT) kettős kiömlésű.

A gőzturbina működéséhez szükséges gőzt egy széntüzelésű kazán állítja elő. A frissgőz névleges tömegárama 540 t·h<sup>-1</sup>, 13,85 MPa nyomáson és 541 °C hőmérsékleten, míg az újrahevített gőz tömegárama 471,4 t·h<sup>-1</sup>, 2,96 MPa-on és 541 °C gőzhőmérsékleten. A tápvíz paraméterei a gőzkazán névleges terhelésekor: nyomás 18,8 MPa, hőmérséklet 235,4 °C.

3. táblázat. A kondenzátor vesztesége

| Terhelés, MW      | A kondenzátor által a környezetben leadott hő $P_{cd}$ , MW |
|-------------------|-------------------------------------------------------------|
| 115               | 185,380                                                     |
| 130               | 216,480                                                     |
| 150               | 262,759                                                     |
| Átlagos veszteség | 221,540                                                     |

4. táblázat. Hűtővíz-hőmérséklet

| Terhelés | Belépő hűtővíz hőmérséklete, °C | Kilépő hűtővíz hőmérséklete, °C |
|----------|---------------------------------|---------------------------------|
| 115      | 19,2                            | 30,84                           |
| 130      | 21,44                           | 34,62                           |
| 150      | 24,69                           | 40,32                           |

A veszteségfeltáráshoz szükséges adatok meghatározása érdekében a mérések a következő terhelési szinteken lettek elvégezve: 115 MW, 130 MW és 150 MW (gőzturbina-teljesítmény).

A 3. táblázat adatai a 150 MW-os erőmű kondenzátora által a környezetben leadott hőmennyiséget mutatják, amely hulladékhő, és bizonyos fokig visszanyerhető, különböző technológiák alkalmazásával. A hőmennyiség közel áll az 1. táblázatban szereplő értékhez.

A 150 MW-os erőmű hűtővizének hőmérsékletét a 4. táblázat mutatja be.

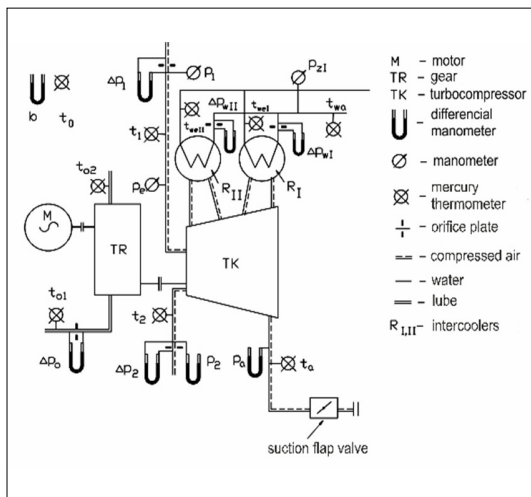
### 3.1.2. A turbókompresszor hűtéséből származó hulladékhő mennyisége

A bányászatban manapság használt modern kompresszorok csavarkompresszorok, de nagy levegőigény és a folyamatos sűrített levegő-előállítás szükségessége esetén turbókompresszorokat alkalmaznak.

A csavarkompresszor helyett a turbókompresszor választása a nagy sűrített levegő-hozamnak köszönhető, ráadásul a turbókompresszor jól alkalmazkodik a változó sűrített levegő-igényhez, mivel a turbókompresszor munkapontja elmozdul, mint minden ilyen áramlástechnikai örvénygép esetében, így nincs szükség szabályozásra, ha nincs jelentős változás a sűrített levegő-igényben.

A bányászat fénykorában a Zsil-völgyi bányák mind turbókompresszorokkal voltak felszerelve, néha akár három turbókompresszor is működött egy-egy bányában.

Ez a típusú turbókompresszor hét járókerékből áll, amelyek három testben vannak elrendezve,



13. ábra. A turbókompresszor felépítése [15]

az első két testnek két rotorja van, az utolsónak három. A hűtés két köztes hűtő (13. ábra) és egy végső hűtő segítségével történik, amelyek mindegyike cserélhető.

A műszaki könyv szerinti névleges jellemzők [14]:

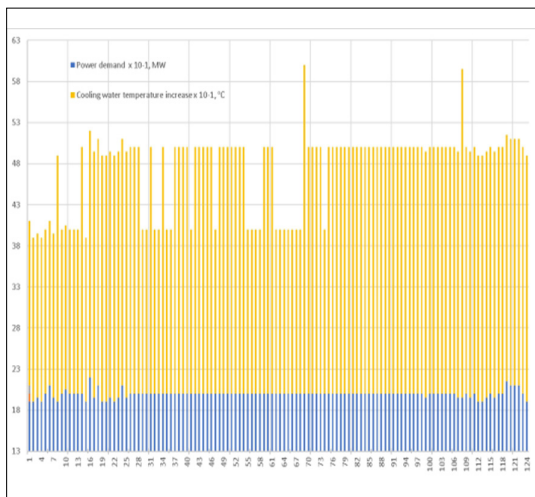
|                                        |                                         |
|----------------------------------------|-----------------------------------------|
| Beszívott levegő mennyiség             | 16000 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ; |
| Szívónyomás                            | 1 bar;                                  |
| Szívási hőmérséklet                    | 20 °C;                                  |
| A kimeneti nyomás                      | 8 bar;                                  |
| Turbókompresszor fordulatszáma         | 9980 f/perc;                            |
| Motor fordulatszáma                    | 1500 f/perc;                            |
| Levegő hőmérséklete a végső hűtők után | 40 °C;                                  |
| Hűtővíz bemeneti hőmérséklete          | 25 °C;                                  |
| Hűtővíz áramlása:                      |                                         |
| – a végső hűtőben                      | 55 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ;    |
| – közbelső hűtőkben                    | 95 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ;    |
| – az olajhűtőben                       | 20 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ;    |
| A hajtómotor névleges teljesítménye    | 1800 kW;                                |
| Motor hatékonysága                     | 0,9;                                    |
| Átvitel hatékonysága                   | 0,95.                                   |

A hulladékhő mennyiségének pontos kiszámítása érdekében 124 mérés lett elvégezve [15].

A mérési adatokat a 14. ábra mutatja be.

A hűtővíz belépő hőmérséklete változhat, hidegebb hónapokban (március) 15 °C lehet, sőt télen hidegebb, míg a nyári hónapokban elérheti a 28 °C-ot.

A hűtővíz hőmérséklet-emelkedése 2–4 °C között van (átlagosan 2,75 °C), és összhangban van a motor teljesítményével, ami egyenesen arányos a sűrítettlevegő-igény változásával.



14. ábra. Mért adatok [15]

A hűtővíz-tömegáram 170 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> áramlási sebességénél a belépő hőmérséklet a hűtőtorony kimeneténél, míg a hűtővíz kilépő hőmérséklete a hűtő bemeneténél volt mérve.

A hűtővíz által felvett hőmennyiség:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t = \rho \cdot V \cdot c \cdot \Delta t = \frac{997.05 \cdot 170 \cdot 4.186 \cdot 2.75}{3600} = 541,99 \text{ kW} \quad (1)$$

A hőmennyiség Q-val van jelölve, kW; V – térfogatáram, m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>; Δt – a hőmérséklet-változás; c – a víz fajlagos hőkapacitása 25 °C-on, kJ·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>; ρ – a víz fajsúlya, kg·m<sup>-3</sup>.

Mint látható, a hulladékhő mennyisége igen magas, 542 kW, és mindez a környezetbe kerül.

Arról nem is beszélve, hogy a magas hűtővíz-hőmérséklet a turbókompresszor nem megfelelő hűtését eredményezi, ami negatívan befolyásolja a hatékonyságát. A nem megfelelő hűtés másik hátránya, hogy a forró sűrített levegő megemeli a hőmérsékletet a bányában, ami negatívan hat az emberekre.

Alapvetően, ha megoldjuk a hulladékhő viszszeresítését, akkor a megfelelő kompresszorhűtést is meg tudjuk oldani, valamint kinyerhetjük a kívánt mennyiségű hőt, ezzel biztosítva a turbókompresszor megfelelő hűtését. E problémák megoldása óriási energiamegtakarítást eredményezhet.

A legnagyobb kihívás a hulladékhő-felhasználás szempontjából ebben az esetben az, hogy a víz hőmérséklete nagyon alacsony, így más technológiai folyamatokban nem használható fel úgy, ahogyan az van.

### 3. A hőviszszeresés hatékonysága

A rendelkezésre álló hulladékhő mennyiségének jobb értékelése érdekében néhány számítást el kell végezni.

Egy átlagos háztartás hőigényét fűtésre és melegvíz-előállításra általában 28 kW-os kazán beépítésével lehet kielégíteni

Feltételezve, hogy a kondenzátor által a környezetben leadott hőt visszaszerezjük, ami elméletileg 221.540,0 kW, ezzel 7912 háztartás fűtését tudjuk biztosítani, ha pedig a turbókompresszoros hűtővízből visszaszernénk a hőt, akkor 19 háztartás fűtését tudnánk biztosítani.

A hulladékhő visszaszerése többféle hulladékhő-viszszeresési technológiával történhet, de ezek alkalmazhatósága a forrás hőmérsékletétől függ.

A fent felsorolt példákban a hőforrás hőmérséklete mindenhol 10 °C télen és nyáron 40 °C között van. Ez azt jelenti, hogy a fent elemzett hulladékhő alacsony hőmérsékletű hőforrás.

Alacsony hőmérsékletű hőforrások hasznosítására a mechanikus gőzkompressziós, víz-víz típusú [16] hőszivattyúk (15. ábra) alkalmasak. Ezek visszanyerhetik a 40 °C alatti hőmérsékletű víz hulladékhőjét, és 50 és 80 °C közötti hőmérsékleten szállítják a felhasználónak, mindez 2,5 és 5,0 közötti COP-értékkel (teljesítménytényezővel).

Általában a hőszivattyú egy hőforrásból hőt von ki, például a környező levegőből, a talajban tárolt geotermikus energiából vagy a közeli tavakból, talajvízből vagy rétegvízből.

A hővisszanyerés hatékonyságának értékeléséhez tegyük fel, hogy a 150 MW-os erőmű kondenzátorának hűtővizéből nyerjük vissza a hőt.

Mivel a meleg víz szállítása általában csöveken keresztül történik, jelentős veszteségek fordulnak elő, ezért a hőszivattyú szükséges hőszállítását  $Q_i = 700$  kW-ra határozzuk meg, ami a ma alkalmazott hőszivattyúk maximális teljesítményéhez közeli érték.

További szükséges adatok a számítások elvégzésére:  $T_i = 70$  °C – a szállított meleg víz hőmérséklete,  $T_a = 5$  °C – környezeti hőmérséklet,  $\Delta T_c = 5$  °C – a kondenzátorban történő hőátadáshoz szükséges hőmérséklet-különbség (hőszállítás),  $\Delta T_o = 5$  °C – az elpárologatatóban a hőátadáshoz szükséges hőmérséklet-különbség,  $\Delta T_{sr} = 10$  °C – hőmérséklet-különbség az utóhűtéshez, mechanikai hatásfok  $\neq 0,9$ , alkalmazott R717-hűtőközeg (ammónia).

Meg kell jegyezni, hogy a környezeti hőmérséklet az elpárologatató átlagos hőmérséklete, figyelembe véve, hogy az elpárologatató kimeneténél a víz hőmérsékletének legkevesebb 5 °C-nak kell lennie a fagyás elkerülése érdekében, a bemeneti

hőmérséklet pedig a kondenzátor kimeneti hőmérséklete. A hulladékhő hőforrásként történő felhasználása hatásfokának összehasonlításához először egy vízhőforrást használó hőszivattyút számolunk ki, 5 °C hőforrás-hőmérsékletet figyelembe véve, ez lesz az összehasonlítási alap.

A 4. táblázatban a hűtővíz hőmérsékletére vonatkozó adatokat nyáron mértük.

Az eredményeket az 5. táblázat és a 16. ábra mutatja be.

Ezenkívül a hőszivattyú által elért primerenergiaforrás-megtakarítás kiszámítható a következő egyenlettel [17]:

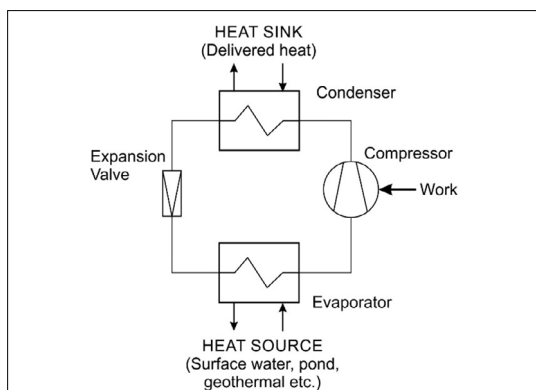
$$\Delta E = \left(1 - \frac{\eta_{CT}}{\mu_e \cdot \eta_{sis}}\right) 100, (\%) \quad (2)$$

A gyakorlati COP (teljesítménytényező)  $\mu_e$ -val van jelölve;  $\eta_{sis} = 0,35$  – a villamosenergia-termelés hatásfoka az országos villamosenergia-hálózatban;  $\eta_{CT} = 0,85$  – a melegvíz-termelés energiahatékonysága kizárólag melegvizet előállító kazántelepeken.

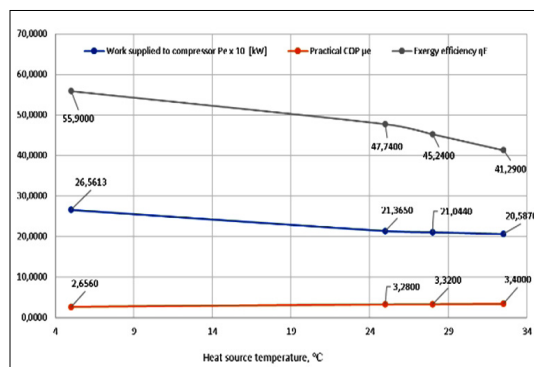
A 16. ábrában bemutatott adatok azt mutatják, hogy a hőszivattyú hatásfoka 55,90% és 41,29% között változik a vizsgált hőmérsékleti tartományban.

5. táblázat. A hőszivattyú hatásfoka

| Hőforrás hőmérséklete, °C | Kompresszor teljesítmény $P_e$ , kW | Tényleges COP $\mu_e$ | Exergia-hatásfok $\eta_E$ |
|---------------------------|-------------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| 5                         | 265,613                             | 2,656                 | 55,90                     |
| 25                        | 213,648                             | 3,28                  | 47,74                     |
| 28                        | 210,437                             | 3,32                  | 45,24                     |
| 32,5                      | 205,870                             | 3,40                  | 41,29                     |



15. ábra. Gőzkompressziós hőszivattyú



16. ábra. Kompresszorteljesítmény, tényleges COP és a hőszivattyú exergia-hatásfoka.

A hőszivattyú COP-ja a hőforrás hőmérsékletével 3,40-ig növekszik, míg a kompresszor teljesítménye 265,613 kW-ról 205,87 kW-ra csökken. A (2) egyenlettel számított primerenergiaforrás-megtakarítás 8,56% és 28,57% között változik, a nagyobb érték magasabb hőforrás-hőmérsékletnek felel meg.

A melegvíz helyben előállítható 85% körüli energiahatékonyságú kis kazánokkal, vagy akár 80% energiahatékonyságú kapcsolt energiatermelő erőművekből.

Ahhoz, hogy ezeket az értékeket össze lehessen hasonlítani a hőszivattyú exergia-hatásfokával, meg kell határozni a kazánok és a kapcsolt energiatermelő erőművek exergia-hatásfokát. A szakirodalom olyan adatokat közöl a kapcsolt energiatermelő erőművekről, amelyek azt mutatják, hogy az exergia-hatásfok 23% és 30,7% között változhat [18] [19], míg a kazánok exergia-hatásfoka 16% és 25% között található [20].

#### 4. Következtetések

Az iparban nagy mennyiségű hulladékhő áll rendelkezésre, hiszen a bemutatott példákon látható, hogy az erőművi kondenzátor által visszavezetett hő értéke a 200 MW-os erőműnél 243,652 MW, a 150 MW-os erőműnél 221,540 MW, míg a turbókompresszoros hűtésből visszanyerhető hő 542 kW.

Az elemzett hulladékhőhöz kapcsolódó fő probléma az, hogy alacsony hőmérsékletű hőforrás.

A hőszivattyús technológia alkalmazása a hulladékhő visszanyerésére nagyon jó megoldás, hiszen a hőszivattyú COP-értéke 2,65 és 3,40 között található, míg az exergia hatásfoka 55,90% és 41,29% között van.

A hőszivattyús technológia alkalmazása jelentős primerenergia-megtakarítást eredményez, 8,56% és 28,57% között.

Sajnos a visszanyert hő hőmérséklete 70 °C körül van, ami korlátozza a felhasználását fűtésre vagy melegvíz-ellátásra. Mivel az ipari létesítmények általában távol helyezkednek el az emberi településektől, hőszállításra van szükség. Így a visszanyerés általános hatékonysága a távolságtól függően drámaian csökkenhet.

Ez a hiányosság kiküszöbölhető néhány ipari park kialakításával ezen másodlagos hőforrások közelében.

Egy másik megoldás az lehet, hogy a kutatást a visszanyert hőforrás hőmérsékletének növelése irányába kell fejleszteni (hulladékhőből gőz), nö-

velve annak különböző irányú felhasználási lehetőségét az ipari létesítmények keretében.

#### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy\\_production\\_and\\_imports](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_production_and_imports) (letöltve: 2023. március 3.)
- [2] [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy\\_statistics\\_-\\_an\\_overview#Final\\_energy\\_consumption](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview#Final_energy_consumption) (letöltve: 2023. március 3.)
- [3] [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Final\\_energy\\_consumption\\_in\\_industry\\_-\\_detailed\\_statistics#The\\_largest\\_industrial\\_energy\\_consumers\\_in\\_the\\_EU](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Final_energy_consumption_in_industry_-_detailed_statistics#The_largest_industrial_energy_consumers_in_the_EU) (letöltve: 2023. március 3.)
- [4] <https://www.eia.gov/energyexplained/us-energy-facts/> (letöltve: 2023. március 3.)
- [5] <https://www.eia.gov/international/analysis/country/CHN> (letöltve: 2023. március 3.)
- [6] <https://www.eia.gov/energyexplained/us-energy-facts/images/consumption-by-source-and-sector.pdf> (letöltve: 2023. március 3.)
- [7] Jiali Zheng, Gengzhong Feng, Zhuanzhuan Ren, Nengxi Qi, D'Maris Coffman, Yunlai Zhou, Shouyang Wang: *China's Energy Consumption and Economic Activity at the Regional Level*. Energy, 259. (2022) 124948. <https://www.doi.org/10.1016/j.energy.2022.124948>
- [8] <https://www.waste-heat.eu/about-waste-heat/waste-heat-sources> (letöltve: 2023. március 10.)
- [9] Gajendra Kumar Gaurav, Nitu Singh, Bijo Francis: *Exergy Analysis of a Thermal Power Plant*. Proceedings of Recent Advances in Interdisciplinary Trends in Engineering & Applications (RAITEA) 2019. <https://www.doi.org/10.2139/ssrn.3366867>
- [10] Rajesh Kale, Krishnakumar Dipak Pilankar: *Energy and Exergy Analysis of Steam and Power Generation Plant*. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 5/6. (2016) <https://www.ijert.org/research/energy-and-exergy-analysis-of-steam-and-power-generation-plant-IJERTV5IS060478.pdf>
- [11] Dosa Ion, Petrilean Dan Codrut: *Efficiency Assessment of Condensing Steam Turbine*. Journal Advances in Environment, Ecosystems and Sustainable Tourism, 2013, 203–208. <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2013/Brasov/STAED/STAED-00.pdf>
- [12] Sorina Anutoiu, Ion Dosa, Dan Codrut Petrilean: *Steam Turbine Efficiency Assessment, First Step towards Sustainable Electricity Production*, MATEC Web Conf. 342 04007 (2021), <https://www.doi.org/10.1051/mateco-nf/202134204007>

- [13] Technical Instructions and Operation Manual for K 200-130-1 turbine.
- [14] Operation Manual of TK-R 16/8 turbocompressor.
- [15] Dosa I.: *Research on Energetics of Thermal and Fluid Dynamic Processes in Mining Pneumatic Installations*. Ph. D. thesis in Engineering; Specialty: Mining machines and installations; University of Petrosani, 1999.
- [16] Radcenco, V. et. al.: *Processes in Refrigeration Equipment*. Didactică și Pedagogică Publishing House, Bucharest, 1983, 372–390.
- [17] Berinde, T., Berinde, M.: *Energy Audits in Industrial Processes*. Tehnica Publishing House, Bucharest, 1985.
- [18] Mehmet Kanoglu, Ibrahim Dincer: *Performance Assessment of Cogeneration Plants, Energy Conversion and Management*. 50/1. (2009) 76–81.  
<https://www.doi.org/10.1016/j.enconman.2008.08.029>.
- [19] S.C. Kamate, P.B. Gangavati: *Exergy Analysis of Cogeneration Power Plants in Sugar Industries*. Applied Thermal Engineering, 29/5–6. (2009) 1187–  
<https://www.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.06.016>.
- [20] R. Saidur, J. U. Ahamed, H. H. Masjuki: *Energy, Exergy and Economic Analysis of Industrial Boilers*. Energy Policy, 38/5. (2010) 2188–2197.  
<https://www.doi.org/10.1016/j.enpol.2009.11.087>.