

## Увод у енергетику

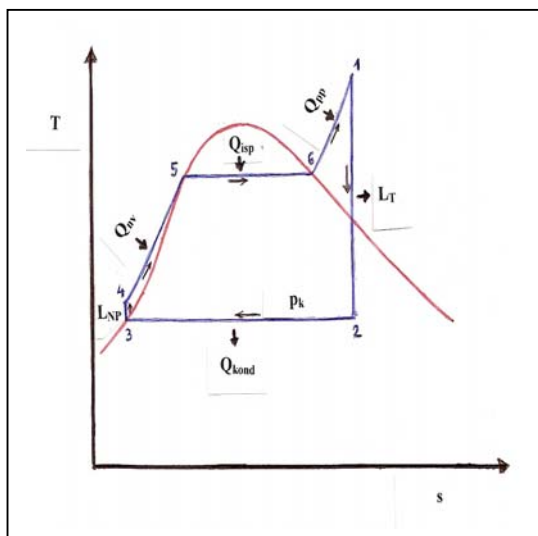
Проф. др Бранислав М. Савић  
Катедра за термоенергетику, каб. 132

### ТЕРМОЕЛЕКТРАНА

Термоелектрана је термоенергетски објекат за производњу електричне енергије на бази фосилног горива.

### ОСНОВНИ РАДНИ ЦИКЛУС

За добијање механичког рада из топлоте по I и II Закону термодинамике, поред погонске машине за трансформацију топлоте радног флуида у механички рад, мора постојати уређај који има функцију извора топлоте, у којем се енергија горива путем његовог сагоревања претворена у топлоту предаје радном флуиду, али и понор топлоте у који се топлота радног флуида која није могла бити претворена у механички рад у погонској машини одводи и предаје околина. Такође, мора да постоји уређај који ће обезбедити потребно подизање притиска у циклусу, с обзиром да се трансформација топлоте у механички рад у погонској машини одвија уз пад притиска и температуре радног флуида.



Основни радни циклус, који се користи у термоелектранама, је везан за воду као радно тело и за њено агрегатно стање водену пару, и односи се на њихова физичка, односно термодинамичка својства, а познат је као Клаузијус-Ранкинов циклус. На сл. 1 је приказан овај циклус у T-s дијаграму. У оквиру овог радног циклуса као погонска машина се користи парна турбина у којој се трансформише топлотна енергија паре у механички рад. Процес се одвија као изентропски од стања 1 до стања 2, ако се разматра као идеалан без губитака у парној турбини. Пошто се овај процес у парној турбини одвија са великим повећањем запремине паре, и због тога неопходним повећањем проточног пресека

турбине, то се он назива и процесом експанзије паре у турбини. Уређај са функцијом извора топлоте је парни котло који треба да обезбеди потребно стање паре на улазу у парну турбину. У њему се одвија процес загревања воде од стања 4 до стања 5, испаравање воде од стања 5 до стања 6, које одговара сувозасићеној пари, и прегревања паре од стања 6 до стања 1, које одговара задатом стању прегрејане паре на улазу у турбину. Цео процес довођења топлоте у парном котлу се одвија као изобарски процес у идеалном случају, односно са извесним губицима притиска у реалности. Отпадна топлота радног флуида која није могла бити претворена у механички рад предаје се околина преко хладњака, односно кондензатора у коме се врши кондензација издувне паре из парне турбине. Услови предаје отпадне топлоте кондензације су у великој мери одређени условима околине – топлотни понор. Одвођење топлоте кондензације се одвија од стања 2 до стања 3 при константном

притиску кондензације паре, односно константној температури кондензације, пошто се изобаре и изотерме поклапају у области влажне паре. Напојна пумпа служи за подизање притиска у кружном циклусу до нивоа који треба да обезбеди потребан притисак паре на улазу у парну турбину. У идеалном случају, ако се процес разматра без губитака у напојној пумпи, стање се мења од стања 3 до стања 4 у изентропском процесу компресије.

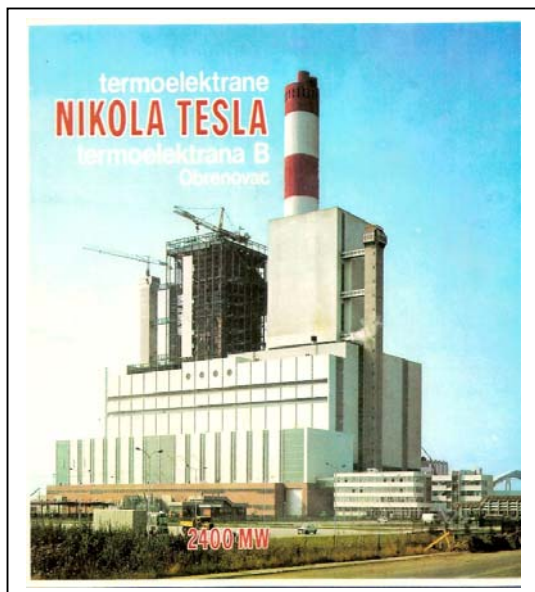
## ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ РАДНОГ ЦИКЛУСА И СТЕПЕН КОРИСНОСТИ САВРЕМЕНИХ ПАРНИХ БЛОКОВА ТЕРМОЕЛЕКТРАНА

Парна турбина, у склопу Клаузијус-Ранкиновог циклуса, има водеће место у производњи електричне енергије у термоелектранама због особина да се њеном применом може добити на најсигурнији и данас најекономичнији начин велика количина енергије, а да се при томе могу користити све врсте горива, па и најлошија. Савремени развој парних турбина (базиран на развоју нових материјала, успешном решавању струјних и конструктивних проблема и проблема напрезања) омогућио је са применом високих параметара паре на улазу у турбину у термоелектранама (притисци паре 18 до 20 МПа, па и надкритичних вредности изнад 23.5 МПа, а температуре паре 540 до 560°C, па и 600 до 620°C са применом специјалних челика), и са притиском на излазу из турбине у области високог вакуума у термоелектранама (око 0.05 bar или 5 кПа, коме одговара температура кондензације паре око 30°C), извођење јединичних капацитета парних турбоагрегата (турбоагрегат=парна турбина+генератор) и преко 1000 MW. Поред високих параметара на улазу у турбину и ниског притиска на излазу примењују се и додатна термодинамичка побољшања циклуса везана за регенеративно загревање главног кондензата и напојне воде и догревање паре после делимичне њене експанзије у турбини.

Но и поред примењених могућих побољшања парног циклуса код савремених парних блокова (високи параметри на улазу, висок вакуум на излазу – низак притисак кондензације, регенеративно загревање напојне воде и догревање паре) може се остварити максималан степен корисности термодинамичког циклуса нешто изнад 50%. Међутим, пошто се реални процеси у свим уређајима одигравају са губицима, то максимални степен корисности трансформације примарне енергије горива у електричну енергију износи 43 до 46% за најусавршенија постројења са данас реализованом највишом температуром паре на улазу у турбину од 600 до 620°C. При томе је за стандардне ниже параметре мањи и износи око и испод 40%. Остатак од 60% представља губитак у односу на укупно доведену енергију горивом.

Највећи губитак је у отпадној топлоти кондензације око 45%, и поред високог вакуума на излазу из турбине и према томе максималног искоришћења радне способности паре у парној турбини за добијање механичког рада. Преостали губици се највећим делом односе на губитке у парном котлу. За услове коришћења лигнита, као мање квалитетног горива у нашој земљи, губици у парном котлу су нешто већи у односу на услове за квалитетније угљеве и износе приближно 15%.

## МЕСТО И УЛОГА ТЕРМОЕЛЕКТРАНА У ОКВИРУ НАШЕГ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКОГ СИСТЕМА



Сходно расположивим резервама фосилних горива у многим државама производња електричне енергије у оквиру термоелектрана чини базу електроенергетског система. Таква је ситуација и у нашој земљи где термоелектране чине базу српског електроенергетског система са око 70% инсталисаног и производног капацитета. С обзиром на преовлађујућу распрострањеност лигнита у нашој земљи, који спада у категорију млађих угљева слабије топлотне моћи, он се превасходно користи у термоелектранама. Његове резерве су везане за колубарски, костолачки и косовски басен у чијој околини су и концентрисани највећи капацитети термоелектрана. То су термоелектрана «Никола Тесла А» укупног капацитета 1560 MW, термоелектрана «Никола Тесла Б» укупног капацитета 1260MW, термоелектрана «Колубара

А» укупног капацитета 250 MW у склопу колубарског угљоносног басена. У оквиру овог басена планирана је изградња још једне термоелектране «Колубара Б». У оквиру костолачког басена налазе се термоелектрана «Костолац А» укупног капацитета 310 MW и термоелектрана «Костолац Б» укупног капацитета око 700 MW. У склопу косовског басена налазе се термоелектрана «Косово А» укупног капацитета око 1000 MW и термоелектрана «Косово Б» укупног капацитета 620 MW. Једино се термоелектрана «Морава» снаге 120 MW не налази су у близини неког угљоносног басена већ у центру потрошње енергије одређеног региона.

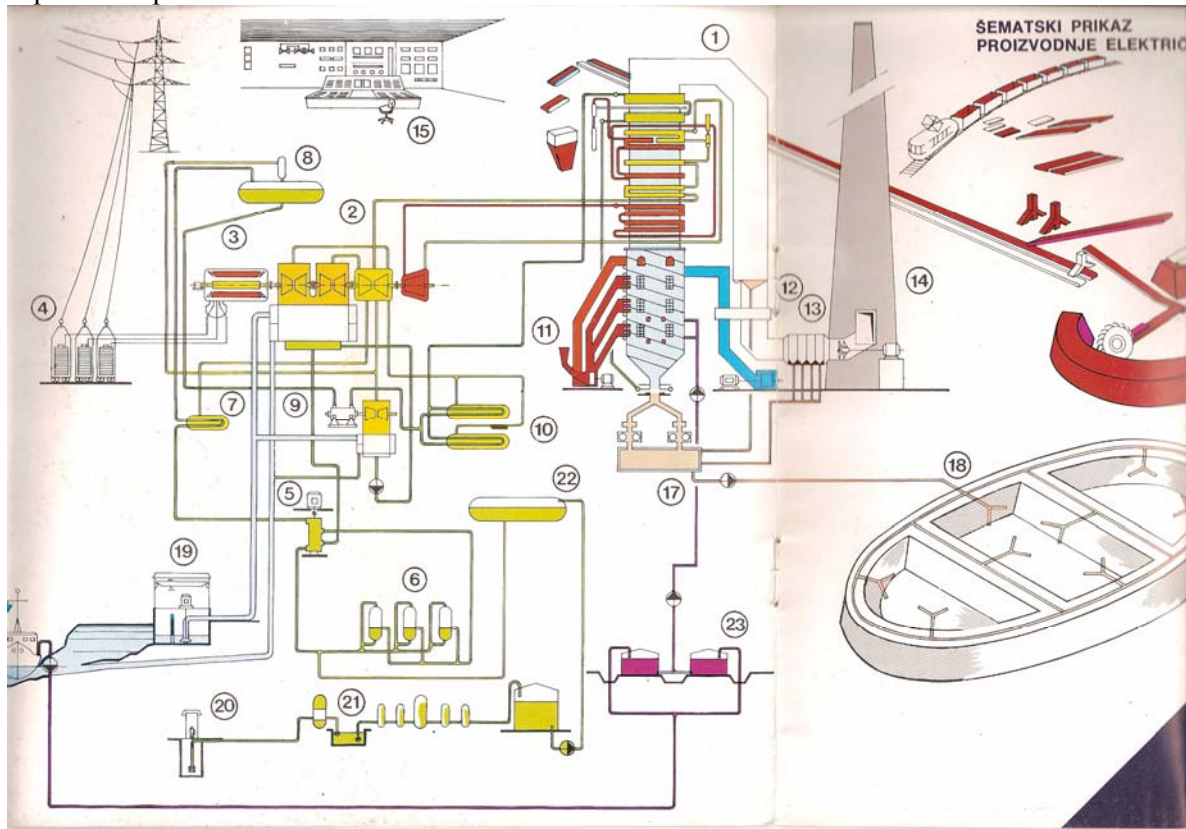
У оквиру термоелектране «Никола Тесла Б» - сл. 3 изграђени су највећи јединични капацитети - 2 блока снаге по 630 MW – сл. 2.

### ТЕХНОЛОШКИ СИСТЕМ ТЕРМОЕЛЕКТРАНЕ

Термоелектрана је сложени технолошки систем који обухвата поред главног технолошког система за производњу електричне енергије и одговарајуће помоћне технолошке системе који су неопходни за функционисање главног технолошког система и чине заједно са њим термоенергетски објекат.

Главни технолошки систем за производњу електричне енергије укључује све уређаје који учествују у процесу добијања електричне енергије из топлоте у оквиру основног радног циклуса (парни котло, парна турбина као погонска машина, генератор као радна машина за производњу електричне енергије, кондензатор или хладњак за одвођење отпадне топлоте кондензације, регенеративни загрејачи главног кондензата и напојне воде, пумпе, и све њихове цевне везе преко припадајућих цевовода и арматуре). Такође, укључује и посебне цевне везе, арматуру и уређаје који обезбеђују безбедне функције режима стартовања и заустављања парног блока.

Помоћни технолошки системи опслужују главни технолошки систем и без њих није могућ рад главног технолошког система. Помоћне технолошке системе чине: систем допреме основног горива, систем припреме основног горива, систем припреме и снабдевања помоћним горивом, систем за довод и припрему ваздуха за сагоревање, систем одвођења гасовитих продуката сагоревања, системи за издвајање штетних материја из гасовитих продуката сагоревања, систем за одвођење и одлагање чврстих продуката сагоревања, систем хемијске припреме радних флуида, циркулациони систем расхладне воде са кондензаторским системом, системи техничких хлађења, системи подмазивања, системи снабдевања неопходним техничким гасовима, електроенергетски систем за повезивање са електричном мрежом, електрични системи напајања различитих потрошача електричне енергије у оквиру термоелектране, систем одржавања, системи контроле и управљања термоелектраном.



Сл. 3. 1. Парни котло; 2. Парна турбина; 3. Генератор; 4. Главни трансформатор; 5. Пумпа главног кондензата; 6. Пречишћавање главног кондензата; 7. Регенеративни загрејачи гл. кондензата; 8. Напојни резервоар са деаератором; 9. Напојна пумпа; 10. Регенеративни загрејачи напојне воде; 11. Довод и припрема основног горива; 12. Довод и припрема ваздуха за сагоревање; 13. Електростатички филтри за издвајање летећег пепела; 14. Димњак; 15. Термокоманда; 16. Складиште угља; 17. Базен хидрауличке мешавине пепела и шљаке са багер пумпама за њихов транспорт до депоније; 18. Депонија пепела; 19. пумпна станица расхладне воде; 20. Бунар за допуњавање губитка воде у процесу; 21. Хемијска припрема воде; 22. Резервоар додатне деми-воде; 23. Резервоар мазута.

На сл. 3 је приказана принципијелна технолошка шема процеса у термоелектрани, у оквиру које се могу сагледати визуелно на најједноставнији начин основни уређаји главног технолошког система за трансформацију топлоте у електричну енергију и делови неких од поменутих помоћних система.

Један од најважнијих помоћних система је систем контроле и управљања парним блоком. То је сложен систем који укључује у себи: најшире базиран систем мерења за контролу процеса, систем командовања са блокадама, систем аутоматске регулације и систем

сигнализације и заштите. Овај систем омогућује контролу и безбедно вођење процеса уз истовремено одржавање процесних параметара на њиховим предвиђеним задатим вредностима. Он такође обезбеђује заштиту термоенергетског блока од оштећења и штета у случају непредвиђеног прекорачења појединих параметара процеса у акцидентним ситуацијама. Контрола и управљање блоком су централизовани, вођењем постројења парног блока из централне просторије, односно термокоманде. Управљање појединим технолошким целинама је максимално аутоматизовано и сведено је на управљање функционалним групама.

Систем снабдевања основним горивом дели се на спољашњи и унутрашњи транспорт. Под спољашњим транспортом се подразумева допрема горива до истоварног места у кругу термоелектране. Систем унутрашњег транспорта је повезан са системом спољашњег транспорта преко истоварних бункера у истоварној станици, одакле се угаљ транспортује тракастим транспортерима преко претоварних станица на депонију угља или у котловске бункере.

Систем за снабдевање и припрему основног горива укључује систем за контролисано снабдевање угљем према захтеваној производњи из котловских бункера и преко тракастих дозатора и додавача. Угаљ се шаље у спусне канале ка вентилаторским млиновима где се претходно суши пре млевења, а затим из вентилаторских млинова шаље ка горионцима у котловско ложиште.

За потребе стартовања и за подршку ватре, када је температура у ложишту недовољна за самопаљење угљеног праха, користи се систем са мазутом као помоћним горивом. Систем припреме и снабдевања помоћним горивом треба да обезбеди његову непрекидну расположивост, а он обухвата пријемно-грејне уређаје, резервоаре са грејним уређајима, пумпе, загрејаче, филтере, циркулационе мазутне цевоводе и горионике мазуте.

Систем довода и припреме ваздуха укључује одговарајуће филтере за свеж ваздух који се узима из околине, вентилаторе свежег ваздуха, загрејаче ваздуха и цевне канале са одговарајућом арматуром за његову примену у примарном и секундарном процесу сагоревања, као и за припрему самог горива пре млевења.

Систем димних гасова укључује тракт димних гасова од излаза из котла до улаза у димњак. Вентилатори димних гасова смештени непосредно испред димњака треба да обезбеде одговарајући подпритисак у ложишту котла и потребне губитке притиска на путу у димним каналима и уређајима до улаза у димњак.

Систем за одвођење и одлагање чврстих продуката сагоревања, односно пепела и шљаке је веома значајан с обзиром на велику количину пепела присутну у саставу наших лигнита око 20%. Мањи део овог садржаја пепела се издваја испод котловског ложишта у облику шљаке, док се највећи део издваја у облику летећег пепела у отпрашивачима са високом ефикасношћу. Систем за одвођење и одлагање чврстих продуката сагоревања дели се на унутрашњи и спољашњи систем. Унутрашњи систем обухвата механички и хидраулички систем за транспорт шљаке до базена мешавине и пнеуматски и хидраулички систем за транспорт издвојеног летећег пепела у отпрашивачу и левковима димних канала до базена мешавине. Пепео и шљака у хидрауличној мешавини се помоћу тзв. багер пумпи транспортује од базена мешавине до депоније пепела и шљаке у оквиру спољашњег система.

Циљ помоћног система за хемијску припрему воде је у обезбеђењу квалитетног радног тела ради спречавања могућег негативног утицаја неодговарајућих карактеристика воде, односно паре, на стање различитих уређаја у оквиру термоенергетског постројења, на њихове радне карактеристике и поузданост, као и на њихов радни век.

Термоелектране имају потребу за великом количином воде при чему је највећа количина потребна као расхладна вода за кондензацију издувне паре из парне турбине у кондензатору, затим за потребе различитих техничких хлађења, хидраулички транспорт пепела и шљаке и за надокнаду губитака паре и воде у оквиру главног циклуса. Циркулациони систем расхладне воде обезбеђује потребну расхладну воду за кондензацију издувне паре на излазу из парне турбине у кондензатору и за одвођење овако реализоване отпадне топлоте и њену предају околини. Овај циркулациони систем може бити отворен – «проточно хлађење», када се свежа расхладна вода узима из околине (река, језеро или море) и загрејана у кондензатору враћа у исти извор одакле је узета. Затворен циркулациони систем се примењује у условима када нема довољно воде која би се могла узети као проточна из водозавода претходно наведених извора и он је познат још као тзв. систем са «повратним хлађењем». Загрејана расхладна вода са излаза из кондензатора се у оквиру оваквог затвореног система хлади распршивањем у посебним уређајима помоћу околног ваздуха који струји у њима (расхладни торњеви са природном промајом или расхладне куле са вештачком промајом), а затим се тако охлађена користи поново за одвођење отпадне топлоте кондензације издувне паре из парне турбине.

Систем снабдевања уљем и подмазивања је веома важан за нормалан рад турбоагрегата и система регулисања. Поузданост рада овог система је битна, а она се обезбеђује праћењем и испитивањем свих уређаја система: резервоара уља, филтера уља, уљних пумпи и њихових уређаја за аутоматско укључивање, хладњака уља, затим лабораторијским испитивањем квалитета уља, као и праћењем параметара, односно притисака и температура уља.

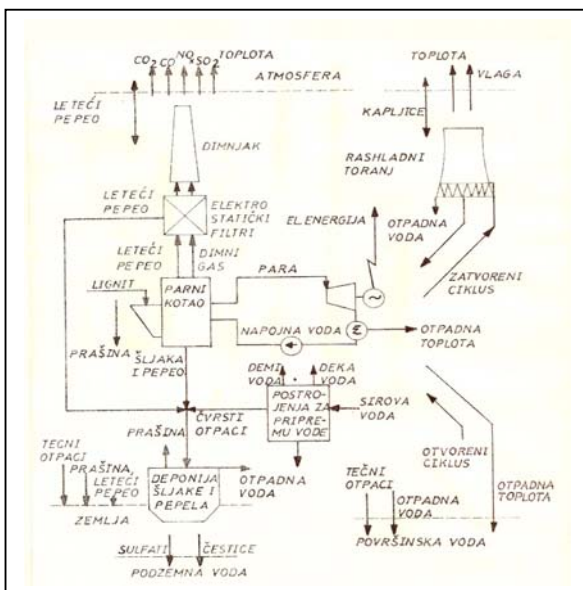
Систем техничких гасова подразумева првенствено систем хлађења генератора водоником, који истовремено за пуњење и пражњење генератора водоником користи и угљендиоксид.

Електрични системи напајања различитих потрошача електричне енергије у оквиру термоелектране се реализују са два извора преко трансформаторских јединица блока и са мреже преко трансформатора електране за «ургентне» уређаје приликом стартовања.

Систем одржавања обухвата текуће одржавање у току рада, планско одржавање везано за планске ремонте (годишње и главне ремонте на 4 до 5 година), као и ванпланско одржавање према ванредним непредвиђеним ситуацијама које су се десиле у погону.

## УТИЦАЈ ТЕРМОЕЛЕКТРАНЕ НА ОКОЛИНУ

Термоенергетска постројења имају значајан утицај на стање у њиховој околини, на већој удаљености, па и у глобалним размерама. На сл. 4 су приказани извори штетних утицаја термоелектране у односу на околину.



Потенцијални загађивачи који се носе са димним гасовима из парног котла су сумподиоксид, азотни оксиди и fine честице летећег пепела које су прошле отпашивач. Угљенмоноксид је токсична компонента која се јавља у незнатним количинама као продукт непотпуног сагоревања у парном котлу. Применом савремених технологија везаних за промену услова у процесу сагоревања у самом парном котлу ради смањења стварања азотних оксида, отпашивача за издвајање честица летећег пепела из димних гасова са веома високим степеном отпашивања (преко 99,8 %) и система за издвајање сумпорних оксида из димних гасова, могуће је њихову емисију свести на најмању могућу меру безбедну за околину.

У новије време се посебна пажња обраћа емисији угљендиоксида који се по количини највише налази у димним гасовима. Он се иначе не убраја у токсичне материје, али по најновијим сазнањима утиче на остваривање феномена «стаклене баште» и глобално загревање, односно на промену климатских услова. Због могућих тежих последица предузета је међународна акција да се у наредном периоду ограничи и смањи емисија угљендиоксида (међународни уговор донесен у Кјоту – Јапан, и други споразуми).

Поред емисија штетних материја са димним гасовима који се испуштају преко димњака у околину, летећи пепео се може потенцијално подићи површински помоћу ветра и са депоније пепела и шљаке или у облику угљене прашине са депоније угља. Да би се то спречило активна депонија пепела и шљаке мора бити стално потопљена, док се насута депонија рекултивише насипањем слоја земље и одговарајућим засадима. Спирање штетних материја са депонија и њихов продор кроз пропусне слојеве тла у подземне воде, а одатле евентуално у изворе или речне токове, се спречава извођењем одговарајућих непропусних изолационих слојева при градњи депонија.

Термоелектране су велики извор топлоте за околину. Око 45% од укупно доведене горивом се реализује и емитује као отпадна топлота кондензације у околину: испуштањем загрејане расхладне воде у водоток код проточног хлађења или преко загрејаног и засићеног ваздуха испуштеног из расхладног торња или расхладних кула у околину. Са аспекта утицаја на околину код проточног хлађења, врши се посебна анализа утицаја овако велике количине отпадне топлоте на биолошки услове и свет водотока. Око 15 % се додатно реализује испуштањем топлоте са димним гасовима у околину.

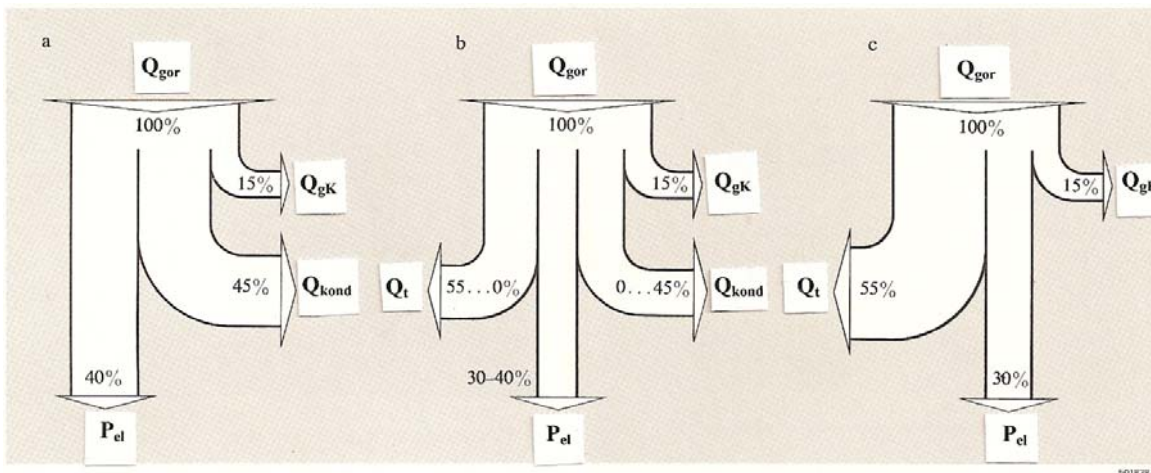
## КОМБИНОВАНА ПРОИЗВОДЊА ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ И ТОПЛОТЕ

Комбинована производња енергије подразумева интегрисану производњу електричне енергије и топлоте потребног квалитета за потрошача топлоте у оквиру једног термоенергетског постројења. За овакву производњу у свету је у широкој употреби нови термин «когенерација» изведен као кованица из две речи енглеског језика за комбиновану производњу (Cogeneration = COmbined GENERATION).

Топлотни капацитет, облик и квалитет захтеване топлоте дефинише релевантни потрошач топлоте. За комуналне потребе у урбаним центрима топлота се користи у облику грејне воде за потребе централизованог грејања и у знатно мањој мери у облику потрошне санитарне воде. У индустрији топлота се најчешће користи у облику технолошке паре за потребе индустријских процеса. У пољопривреди топлота се може користити за потребе грејања стакленика или сушења у сушарама.

Концепт комбиноване производње енергије у термоенергетским постројењима је заснован на принципу термичке каскаде према захтеваном квалитету потрошача топлотне енергије. На тај начин се може искористити максимално радна способност паре у парној турбини њеним одузимањем из турбине на нивоу потребног квалитета топлоте за потрошача, а смањити отпадна топлота кондензације на рачун одузете количине паре из турбине која се сада користи за потребе задовољења потрошача топлоте.

Код парних блокова термоелектрана за производњу електричне енергије само око 40% од унете енергије горивом се трансформише у електричну енергију, а остатак се губи у околину. Највећи губитак је у отпадној топлоти кондензације око 45%. Значајно побољшање укупног степена корисности парних блокова се остварује применом комбиноване производње енергије на рачун смањења губитка енергије у отпадној топлоти кондензације. Зависно од пројектованог капацитета овај губитак се може свести до вредности нула у тзв. противпритисном режиму када се сва пара из турбине користи за потребе потрошача топлоте. На сл. 5 је преко тзв. Сенкијевог дијаграма, графички пријемчиво, представљена трансформација примарне енергије горива у оквиру постројења термоелектране – а, постројења термоелектране-топлане са потенцијално различитим капацитетима производње топлоте и према томе искоришћења отпадне топлоте кондензације – б, и постројења термоелектране-топлане са максимално могућим искоришћењем отпадне топлоте у противпритисном режиму, када се сва пара из турбине на притиску који одговара захтеваном квалитету топлоте за потрошача шаље потрошачу топлоте – ц. Због одузете количине паре на вишем притиску од притиска кондензације са излаза из турбине, у турбини ће сразмерно доћи до умањења произведеног механичког рада, односно у генератору произведене електричне енергије. Међутим, ово умањење је само око 10% – ц у најповољнијем противпритисном режиму када не постоји отпадна топлота кондензације.



Укупна ефикасност искоришћења примарне енергије горива у комбинованој производњи може да износи и 80%, па и више у противпритисном режиму. Са друге стране добијена већа ефикасност у комбинованој производњи, на рачун смањења отпадне топлоте кондензације, реализује се у билансу кроз уштеду у гориву у односу на одвојену производњу исте количине електричне енергије у термоелектрани и топлоте у топлани, која може да износи и до 30%. Због тога комбинована производња енергије постаје данас најважнији плански чинилац повећања ефикасности искоришћења примарне енергије у свету. Многе државе су промовисале различите стимулативне мере и извршиле промене у домену правне регулативе за повећање учешћа постројења за комбиновану производњу енергије.

Због немогућности транспорта топлоте на већа растојања, комбинована производња енергије је везана за концепт енергетике региона. Са њом може да се на најбољи начин integriше производња и потрошња енергије уз највећи степен искоришћења примарне енергије горива.