

Examensarbete, Högskolan på Åland, Utbildningsprogrammet för Maskinteknik

# MANUAL TILL GASTURBINANLÄGGNING

Christopher Kjellbing



<38:2019>

Datum för godkännande: <18.11.2019>  
Handledare: Göran Henriksson

# EXAMENSARBETE

## Högskolan på Åland

<b>Utbildningsprogram:</b>	Maskinteknik
<b>Författare:</b>	Christopher Kjellbing
<b>Arbetets namn:</b>	Manual till gasturbinanläggning
<b>Handledare:</b>	Göran Henriksson
<b>Uppdragsgivare:</b>	Ove Westerlund

<b>Abstrakt</b>
<p>Jag fick i uppdrag att ta fram en manual och laborationsförelägg till Högskolan på Ålands gasturbinanläggning, bestående av gasturbinen Caterpillar GT-553 samt Froude 292 vattenbroms.</p> <p>Syftet var att ta fram ett dokument som skall användas av framtida studeranden vid laborationer med gasturbinanläggningen. Manualen skall vara så utförlig att läsaren utifrån den skall ges en grundläggande förståelse för gasturbiner i allmänhet och Caterpillar GT-553 i synnerhet.</p> <p>Manualen och tillhörande checklista för idrifttagande, drift och stopp av anläggningen har testats genom att ta anläggningen i drift genom att följa instruktionerna däri.</p>

<b>Nyckelord (sökord)</b>
Gasturbin, vattenbroms, Caterpillar GT-553, Froude, Manual

<b>Högskolans serienummer:</b>	<b>ISSN:</b>	<b>Språk:</b>	<b>Sidantal:</b>
<38:2019>	1458-1531	Svenska	56 sidor

<b>Inlämningsdatum:</b>	<b>Presentationsdatum:</b>	<b>Datum för godkännande:</b>
30.04.2017	12.05.2017	<18.11.2019>

# DEGREE THESIS

## Åland University of Applied Sciences

<b>Study program:</b>	Mechanical Engineering
<b>Author:</b>	Christopher Kjellbing
<b>Title:</b>	Manual for a Gas Turbine Plant
<b>Academic Supervisor:</b>	Göran Henriksson
<b>Technical Supervisor:</b>	Ove Westerlund

### Abstract

I was commissioned by Åland University of Applied Sciences to write a manual and a lab instruction for a Caterpillar GT-553 gas turbine and a Froude 292 water brake.

The manual and lab instruction is intended to be used by future students when doing lab experiments on the gas turbine plant. The manual is written to be detailed enough to give a basic understanding of gas turbine theory as well as being used as a standalone document when operating the plant.

The manual and the appurtenant checklist for start, operation and stop of the plant has been tested by starting, operating and stopping the plant in accordance with the instructions therein.

### Keywords

Gas turbine, water brake, Caterpillar GT-553, Froude, Manual

<b>Serial number:</b>	<b>ISSN:</b>	<b>Language:</b>	<b>Number of pages:</b>
<38:2019>	1458-1531	Swedish	56 pages

<b>Handed in:</b>	<b>Date of presentation:</b>	<b>Approved on:</b>
30.04.2017	12.05.2017	<18.11.2019>

# Innehållsförteckning

1. Inledning.....	5
1.1 Bakgrund .....	5
1.2 Syfte.....	6
1.3 Avgränsningar .....	6
2. Manualens disposition.....	7
3. Metod .....	8
4. Slutsats .....	9
Källor.....	10

## Bilagor

1. Caterpillar GT-553: Manual och funktionsbeskrivning
2. Checklista
3. Kladd för gasturbinanläggning
4. Laborationsförelägg

# 1. INLEDNING

Högskolan på Åland skänktes år 2015 en gasturbin, Caterpillar GT 553, ämnad att användas i utbildningssyfte för elever vid Högskolan på Åland. Året därpå införskaffades en vattenbroms, Froude 292, som utgör belastning för gasturbinen.

Ove Westerlund, som är laboratorieassistent på högskolan, meddelade att han önskade en ny driftmanual till gasturbinanläggningen. Detta eftersom betydande ändringar gjorts på främst styrsystemen för både gasturbinen och vattenbromsen, samt att det inte fanns någon manual som beskrev de två systemens samverkan.

## 1.1 Bakgrund

Då gasturbinen kom i Högskolans ägo var den inte driftduglig och saknade vissa givare, som exempelvis bränsleflödesgivare och tryckgivare. För att kunna utföra meningsfulla laborationer var det nödvändigt att dessa givare monterades.

Större delen av gasturbinens elsystem har, sedan den kom till Högskolan, antingen byggts om eller bytts delar på. En låda som innehåller större delen av styrsystemet för gasturbinens elsystem har byggts och monterats på kompressorsidan av gasturbinen. En flyttbar kontrollpulpet som styr och övervakar hela anläggningen har tillverkats och installerats i gasturbinrummet.

Rör och slangar för gasturbinens bränsle- och smörjoljesystem har bytts ut och smörjoljesystemet har försetts med snabbkopplingar till en ny oljekylare. Avgasrör och avgasspjäll har tillverkats på plats och installerats.

Sammanfattningsvis har alla de utförda ändringarna och tilläggen till gasturbinen och vattenbromsen skapat behovet att ta fram en ny manual som beskriver det nya systemet.

Då gasturbinen är tänkt att användas i utbildningssyfte fanns även ett önskemål från Högskolans sida att ta fram ett laborationsförelägg som skall användas vid framtida laborationer.

## 1.2 Syfte

Syftet med arbetet är att skapa en utförlig manual som skall kunna användas av framtida studeranden. Manualen skall beskriva gasturbinanläggningens funktion och dess komponenter. Vidare skall även rutiner för idrifttagande, drift och stopp av anläggningen beskrivas. Nya bilder och figurer skall tas fram för att beskriva anläggningen som den är beskaffad nu.

En checklista som beskriver alla moment som måste utföras innan anläggning tas i drift har tagits fram för att minska risken för handhavandefel. Vidare skall även underhållsrutiner för anläggningen tas fram.

## 1.3 Avgränsningar

Då högskolans gasturbin är modifierad från originalskicket samt har ett egenhändigt framtaget styrsystem så berör detta arbete endast Högskolan på Ålands gasturbin och vattenbroms.

Den teoretiska beskrivningen av den verkliga processen för gasturbiner berör endast typen friaxelturbin då högskolans gasturbin är av denna typ.

## 2. MANUALENS DISPOSITION

Manualen inleds med en sammanställning av övergripande teknisk data för gasturbinen. Det är tänkt att man vid drift av gasturbinen snabbt skall kunna kontrollera att aktuell driftdata ligger inom tillverkarens specificerade värden.

I nästa avsnitt ges en kort historik av bakgrunden till Caterpillar GT 553. Avsnittet är tänkt att ge läsaren insikt i hur gasturbiner utvecklats och utvecklingen gått framåt sedan just denna gasturbin tillverkades.

Gasturbinens teori tas upp i nästa avsnitt. Då de tänkta läsarna bör ha kunskap om detta från tidigare kurser vid Högskolan är avsnittet tänkt att fungera som en påminnelse om huvuddragen för gasturbinens teoretiska funktion. Avsnittet ger även den teoretiska referensramen för detta examensarbete.

I nästkommande del beskrivs gasturbinens och vattenbromsens olika delar och system i bild och text, även styrsystemen för anläggningen behandlas här.

Manualen avslutas med ett avsnitt om underhåll och ett ännu inte förverkligat system för proaktiv övervakning av anläggningens kondition.

### 3. METOD

Arbetsmetoden för framtagandet av manualen har i huvudsak bestått utav först läsa in mig på de primärkällor som fanns tillgängliga, det vill säga, manualerna för gasturbin respektive vattenbroms. Sedan har jag utfört en litteraturgenomgång för att finna sekundärkällor delvis för att på ett tydligt sätt förklara gasturbinanläggningens funktion. Men också, genom att läsa ett flertal manualer, själv kunna skriva en lättförståelig manual.

De flesta bilderna i manualen har ritats i AutoCAD eller bildbehandlats i Adobe Photoshop.

För att verifiera att checklisten för gasturbinanläggningen har med alla de moment som måste utföras innan start har jag utfört punkterna på checklisten innan idrifttagande av turbinen.



## 4. SLUTSATS

En stor del av arbetsbördan har varit att ta fram nya bilder och figurer till manualen. Avsikten har varit att manualen skall upplevas professionell och tillförlitlig. Huruvida manualen till fullo fyller sitt syfte är svårt att bedöma i det här läget då inga studeranden ännu använt den.

Manualen beskriver anläggningen som den är idag och den kommer sannolikt behöva revideras något eftersom anläggningen ännu inte är helt färdigställd.

Manualens omfång blev i slutändan betydligt större än vad jag från början hade trott och jag anser att den uppfyller kraven på en utförlig manual som är lättförståelig.

Checklistan som bifogas till manualen har testats både utav mig själv och andra och har fått med alla de moment som är nödvändiga för idrifttagande, drift och stopp av anläggningen.

Kalendern för schemalagt underhåll innehåller förhållandevis få rutiner. Istället lades fokus på en proaktiv övervakning, vilket i relevant litteratur framstår som en branschstandard.

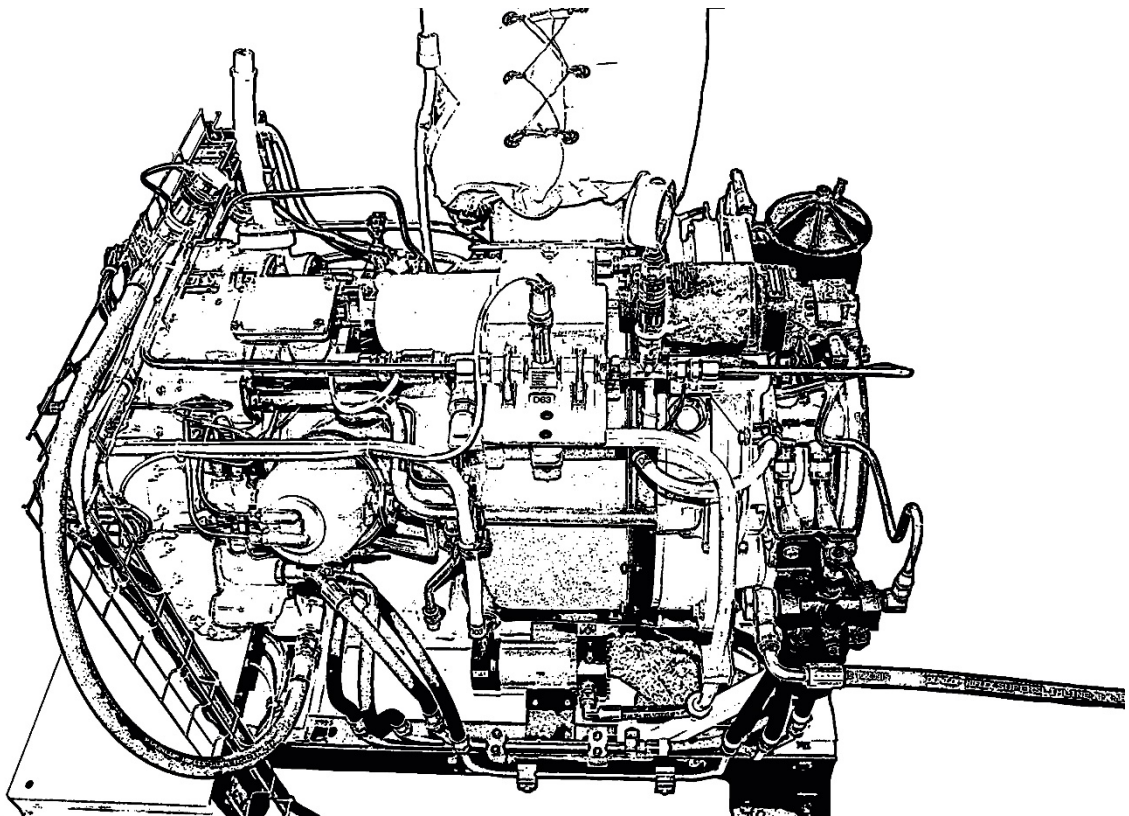
Den största svårigheten under arbetet har varit att det utförts förändringar på systemet under arbetets gång som gjort att vissa delar i manualen har behövt ritas/skrivas om.

# KÄLLOR

- Alvarez, H. (2003). *Energiteknik Del 2*. Lund: Studentlitteratur.
- Alvarez, H. (2006). *Energiteknik del 2*. Lund: Studentlitteratur AB.
- Boeing. (2017). *Historical snapshot*. Hämtat från Boeing:  
<http://www.boeing.com/history/products/model-502-gas-turbine-engine.page> den 21 02 2017
- Boyce, M. P. (2012). *Gas turbine engineering handbook fourth edition*. Waltham: Butterworth-Heinemann.
- Dallaire, G. (den 17 11 2015). *Maintainings gas turbine systems: What you need to know- Part 1*. Hämtat från Forester Daily News:  
<http://foresternetwork.com/daily/energy/energy-management/maintaining-gas-turbine-systems-what-you-need-to-know-part-1/>
- Eklund, G., & Runcrantz, N. (2016). *Styrsystem för gasturbin*. Mariehamn: Högskolan på Åland.
- Froude Engineering Limited. (1975). *Instruction manual 776/2*. Worcester: Froude.
- Försvarets materielverk. (1970). *Strv 103 Motoranläggning*. Sundbyberg: Armematerieförvaltningen.
- Giampaolo, T. (2014). *Gas turbine handbook: Principles and practices-Fifth edition*. Lilburn: The Fairmont Press.
- Huang, M., & Gramoll, K. (den 21 01 2017). *Thermodynamics - Theory*. Hämtat från eCourses: [https://ecourses.ou.edu/cgi-bin/ebook.cgi?doc&topic=th&chap\\_sec=09.1&page=theory](https://ecourses.ou.edu/cgi-bin/ebook.cgi?doc&topic=th&chap_sec=09.1&page=theory)
- Kurz, R., & Brun, K. (2007). Maintenance and operating practices effects on degradation and life. *Gas turbine tutorial* (ss. 173-185). Texas: Texas A&M University.
- Lindström, R. o. (den 26 01 2012). *Historien bakom Strv 103 "S"*. Hämtat från ointres:  
[http://ointres.se/strv\\_103.htm](http://ointres.se/strv_103.htm) den 21 02 2017
- Richar A. Leyes, W. A. (1999). *The history of North American small Gas Turbine Aircraft Engines*. Smithsonian Institution.

# CATERPILLAR GT

## 553



Manual och funktionsbeskrivning

## Innehåll

Teknisk data .....	2
1. Historik.....	3
1.1 Stridsvagn 103 .....	3
1.2 Caterpillar 553/Boeing 502 .....	3
2. Gasturbinens teori .....	6
2.1 Den ideala processen .....	6
2.2 Den verkliga processen.....	9
2.3 Tryckkvot Caterpillar GT 553 .....	11
3. Översiktbilder Gasturbin .....	13
3.1 Oljepumpsida.....	13
3.2 Avgassida.....	14
3.3 Gasgeneratorsida .....	15
3.4 Längdsnitt .....	16
4. Funktionsprincip .....	17
5. Bränslesystem .....	19
6. Bränslereglersystem.....	21
7. Smörjoljesystem.....	23
8. Gasturbinens styrsystem .....	25
9. Froude vattenbroms .....	27
9.1 Vattenbromsens funktion.....	28
9.2 Vattenbromsens frontpanel.....	29
10. Kontrollpulpet .....	31
11. Elsystemet .....	32
12. Underhåll.....	33
12.1 Proaktiv övervakning.....	35
12.2 Schemalagda underhållsåtgärder .....	37
Nomenklatur.....	38
Källor.....	39

## Teknisk data

<b>Caterpillar 553-2-1</b>	
Effekt, max kontinuerlig, normaleffekt	298 kW
Max momentant, högeffekt	365 kW
Reduktionsväxelns utväxling	7,94:1
Utgående axelns varvtal	4190 ±20 rpm
Accelerationstid (från tomgång till max varv normaleffekt)	Max 12 sekunder
<b>Gasgeneratorns varvtal</b>	
Max varvtal vid normaleffekt	39700 rpm
Max varvtal vid högeffekt	41000 rpm
Tomgångsvarvtal	18000-19000 rpm
<b>Avgastemperatur</b>	
Vid max varvtal högeffekt (gäller ej stallning)	Max 629° C
Under start	Max 538° C
<b>Oljetryck, vid oljetemp 82-93° C (Utgående axeln 1500 rpm)</b>	
Gasgenerator Vid tomgång Vid max varv	Min 1,76 bar Min 2,06 bar
Arbets turbin Vid tomgång Vid max varvtal	Min 1,37 bar Min 2,6 bar
<b>Oljetemperaturer</b>	
Normalt kontinuerlig drift	49-82,5° C
Max vid oljekylarens utlopp	105° C
<b>Olja</b>	
Gasturbin, systemolja	Jet Oil 254 (Mobil)
Vattenbroms, dimsmörjning	Q8 Holst

# 1. Historik

Högskolan på Ålands gasturbin är av fabrikatet Caterpillar 553. Ursprungligen kommer den från den svenska stridsvagnen Stridsvagn 103. Stridsvagnen utvecklades på 1950-talet och var den första stridsvagnen som använde sig av en turbinmotor (Lindström, 2012).

## 1.1 Stridsvagn 103

Arbetet med att ta fram en ny stridsvagn för det svenska försvaret inleddes i början på 1950-talet. Man hade som mål att ta fram en stridsvagn med god rörlighet, stor vapenverkan, liten silhuett och ett starkt frontalskydd (Lindström, 2012). Stridsvagnens vapen riktades genom att manövrera stridsvagnen. För att traversera vapnet svängde man fordonet och för att justera vapnet i höjddedd justerades stötdämparna.

Den första serietillverkningen av stridsvagn 103 började levereras till det svenska försvaret 1967. Man upptäckte snabbt att gasturbinen som stridsvagnen var utrustad med inte producerade tillräckligt med effekt. Den hade då en Boeing 502 turbin som producerade 300 hästkrafter. (Lindström, 2012)

Det föranledde att man bytte ut gasturbinen i den nästkommande serien (Strv 103B), som började levereras 1972. Den nya gasturbinen var en Caterpillar 553 med en effekt på 490 hästkrafter. Det är denna typ av turbin som idag finns på högskolan.

Förutom gasturbinen fanns ombord också en Rolls-Royce dieselmotor, med en effekt på 240 hästkrafter, som var sammankopplad med gasturbinen. Maskineriet valdes med hänsyn till de krav som ställdes på att stridsvagnen skulle ha en liten silhuett och låg vikt (Lindström, 2012).

## 1.2 Caterpillar 553/Boeing 502

Företaget Boeing började under tidigt 1940-tal att undersöka möjligheterna kring att använda gasturbiner för framdrift av flygplan efter att det amerikanska flygvapnet visat intresse för en sådan konstruktion (Leyes, 1999).

Då kunskaperna kring gasturbiner var begränsade vid den här tiden påbörjade Boeings ingenjörer arbetet med att tillverka och testa egenbyggda komponenter till gasturbiner. Ett nytt labb byggdes i

Seattle i USA för ingenjörerna att utföra sina experiment. Så småningom utvecklades verksamheten till att bygga och testa kompletta gasturbiner.

De två första turbinerna som togs fram var modell 500 turbojet och modell 502 turbopropeller. Dessa stod klara redan 1947, endast fyra år efter det att arbetet med att ta fram gasturbiner hade påbörjats. Den första modellen av Boeing 502 producerade 120 hästkrafter och hade en specifik bränsleförbrukning på  $1,8 \frac{g}{s \cdot kN}$ . (Leyes, 1999)

Modell 502 var avsedd att användas som motor i lätta flygplan, helikoptrar som landbaserade kraftstationer. Den kom främst att användas av den amerikanska militären i deras drönarhelikopter Gyrodyne QH-50 DASH, avsedd att bekämpa ubåtar. Men en snarlik turbin kom alltså att användas av den svenska militären i Stridsvagn 103. Den version som användes av den svenska militären hade utvecklats till en turbin som producerade 300 hästkrafter med en specifik bränsleförbrukning på  $0,98 \frac{g}{s \cdot kN}$ . (Leyes, 1999)

I mitten av 1960-talet bestämde Boeing att man skulle börja fasa ut sin gasturbinavdelning. Lite mindre än ett år efter att man påbörjat utfasningen så köptes delar av gasturbinproduktionen av Caterpillar (Leyes, 1999). Bland de gasturbiner man köpte rättigheterna att producera fanns Boeing 553, som var en vidareutveckling av den tidigare modell 502.

Den vidareutvecklade turbinmodellen är den som sitter i Stridsvagn 103 från 1970 och framåt. Den producerade då 490 hästkrafter. Att jämföra med de ursprungliga 120 hästkrafterna som producerades av Boeing 502 då den först började produceras.

## 2. Gasturbinens teori

Termodynamiska cykler kan delas in i två generella huvudgrupper:

1. Kraftcykler som producerar en uteffekt.
2. Kylnings och värmepumps cykler som konsumerar en ineffekt.

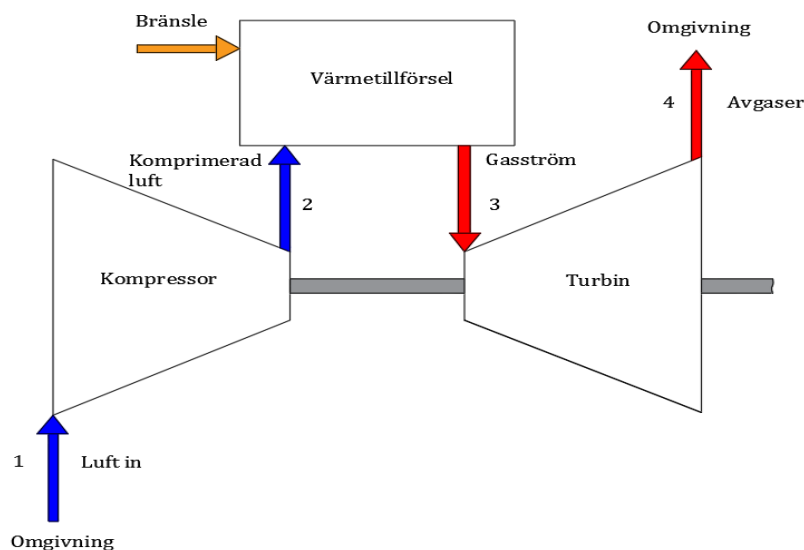
De termodynamiska kraftcyklerna kan kategoriseras som gascykler och ångcykler. I gascykler så är arbetsmediet i gasform under hela processen. I ångcykler så genomgår arbetsmediet en tillståndsförändring då det går från ångtillstånd till vätsketillstånd (Huang & Gramoll, 2017).

Såväl gasturbiner som vanliga kolv-förbränningsmotorer tillhör den gascykliska processen.

Dom vanligaste användningsområdena för gasturbiner är för framdrift av flygplan samt för kraftgeneration (Huang & Gramoll, 2017). I det här avsnittet ska vi gå igenom teorin för den ideala och verkliga cykeln för en gasturbin, Braytoncykeln.

### 2.1 Den ideala processen

Gasturbiner arbetar vanligtvis i en öppen cykel. Detta eftersom omgivningens luft går in i processens början och de resulterande avgaserna leds ut till omgivningen i slutet på processen, se figur 1.



Figur 1. Öppen cykel.

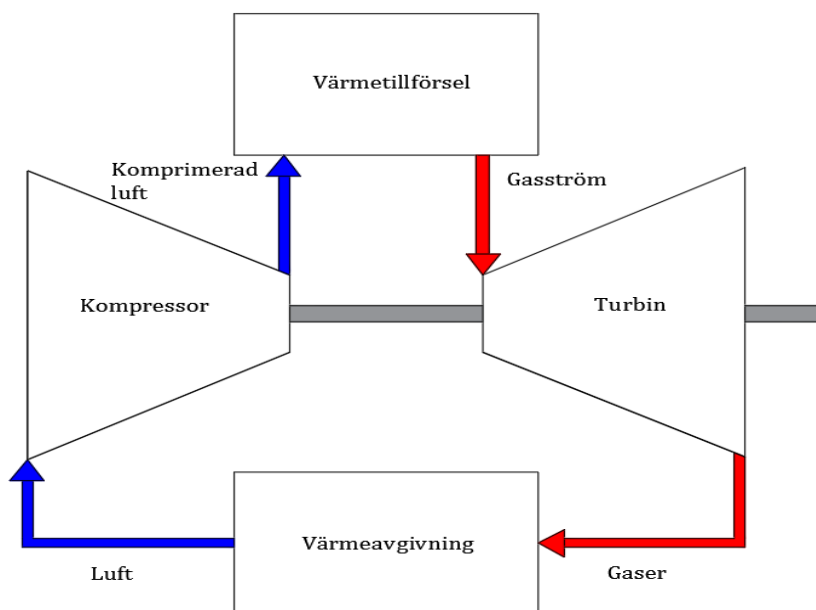


Stegvis sker följande i gasturbinen:

- Kompressorn suger in frisk luft med samma tryck som råder utanför turbinen (1). Den komprimerar luften till en högre temperatur och högre tryck (2)
- Bränslet och den komprimerade luften blandas i en förbränningskammare där förbränning sker under konstant tryck. Den resulterande varma gasströmmen leds till turbinens skovelhjul (3).
- Den varma gasen expanderar ned till omgivningens tryck (4) mot skovlarna och producerar kraft.

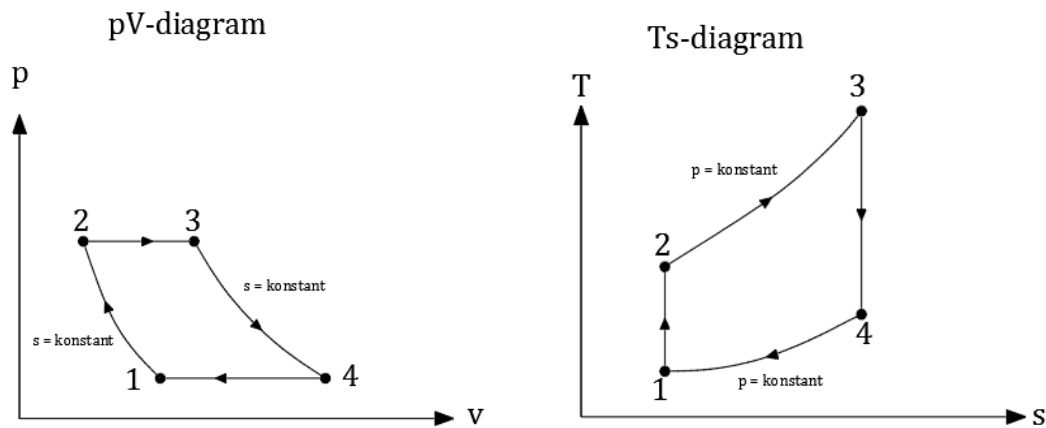
Genom att använda sig av luft-standard antagandena, där vi ersätter den verkliga processen som inte är ideal, med en ideal process kan vi utföra beräkningar på den ideala processen.

I den ideala Braytoncykeln sker kompressionen i kompressorn adiabatiskt, det sker ingen värmeöverföring till omgivningen. Förbränningen sker isobart, det vill säga den sker under konstant tryck. Expansionen efter förbränningen är adiabatisk och nedkylningen av avgaserna sker isobart. Istället för en öppen cykel får vi då en stängd cykel, ingen energi avges till omgivningen, vilket kallas ideal Braytoncykel. En schematisk bild av den ideala Braytoncykeln ges i figur 2.



Figur 2. Den ideala Braytoncykelns process

Den ideala Braytoncykelns pV- och Ts-diagram, figur 3, visar processen då det inte sker några energiförluster till omgivningen:



Figur 3. pV- & Ts-diagram för den ideala Braytoncykel

En förenklad applicering av termodynamikens första lag till den ideala Braytoncykeln, där det antas att det inte förekommer några förändringar i kinetisk eller potentiell energi, har följande förhållanden (Boyce, 2012, s. 89):

Ideal kompressoreffekt:

$$P_k = \dot{m}_{luft} * (i_2 - i_1)$$

Ideal turbineffekt:

$$P_T = (\dot{m}_{luft} + \dot{m}_{bränsle}) * (i_3 - i_4)$$

Ideal total effekt:

$$P_{tot} = P_t - P_k$$

Värme som adderas:

$$\dot{Q}_{2,3} = (\dot{m}_{luft} + \dot{m}_{bränsle}) * i_3 - (\dot{m}_{luft} * i_2)$$

Turbinens termiska verkningsgrad i Braytonprocessen:

$$\eta_b = \frac{P_{tot}}{\dot{Q}_{2,3}}$$

Genom att öka tryckkvoten ( $r_p = \frac{p_2}{p_1}$ ) och turbinens förbränningstemperatur så förbättras Braytoncykelns termiska verkningsgrad (Boyce, 2012, s. 90). Den adiabatiska termiska verkningsgraden baserar sig på vissa antaganden och förenklingar:

1.  $\dot{m}_{luft} \gg \dot{m}_{bränsle}$
2. Den specifika värmekapaciteten vid konstant tryck ( $c_p$ ) och den specifika värmekapaciteten vid konstant volym ( $c_v$ ) är konstanta. Därmed är också isentropexponenten ( $\kappa$ ) konstant genom hela cykeln.
3. Tryckkvoten ( $r_p$ ) är samma för både kompressor och turbin.
4. Alla delar av turbinen arbetar med 100% verkningsgrad.

Om vi gör dessa antaganden för den ideala Braytoncykeln, som arbetar mellan omgivningens lufttemperatur och temperaturen vid förbränning, kan verkningsgraden för den skrivas som:  $\eta_{ideal} =$

$$1 - \frac{1}{r_p^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \quad (\text{Boyce, 2012, s. 90})$$

Eftersom vi antar att tryckkvoten ( $r_p$ ) är samma för kompressor och turbin kan vi förenkla formeln ytterligare genom att använda oss av temperaturen före och efter kompressorn:

$$\eta_{ideal} = 1 - \left(\frac{T_1}{T_2}\right)$$

(Boyce, 2012, s. 91)

Eller genom att använda temperaturen före och efter turbinen:

$$\eta_{ideal} = 1 - \left(\frac{T_4}{T_3}\right)$$

(Boyce, 2012, s. 91)

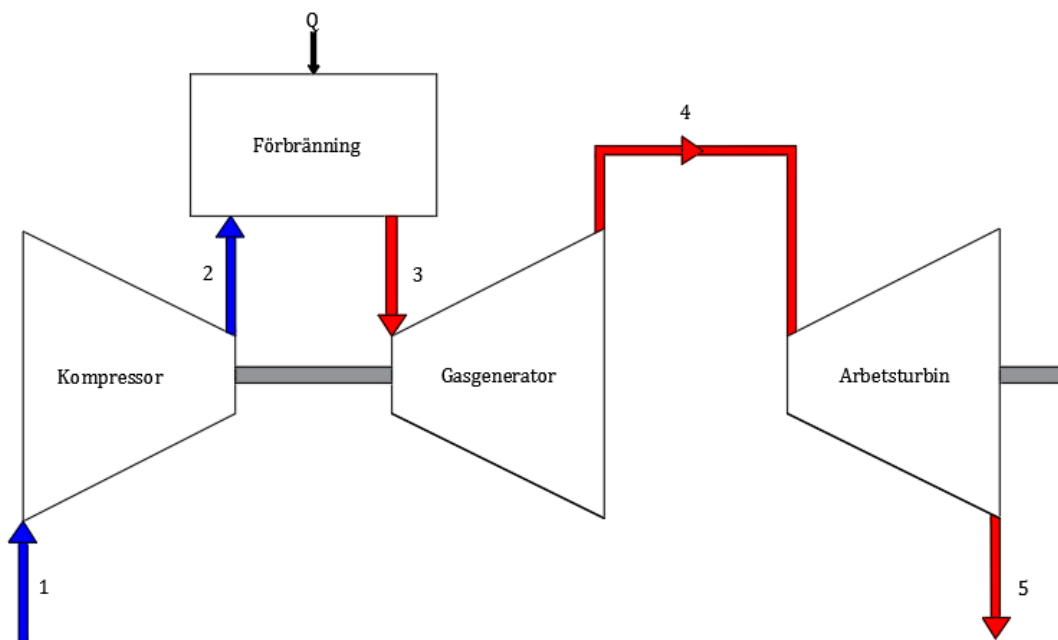
## 2.2 Den verkliga processen

Den termiska effektiviteten och det producerade arbetet för verkliga cykler är avsevärt lägre än motsvarande ideala cykler. Vilket beror på förluster i systemet i form av tryck och värme.

Då Caterpillar GT 553 är av typen tvåaxlig friaxel turbin tar vi här upp processen för denna typ av turbin. Vilken skiljer sig något från enkelaxliga turbiner.

Tvåaxliga turbiner används främst för applikationer som kräver högt moment och har stora förändringar i belastning (Boyce, 2012, s. 100). Vilket är ett av skälen till att just denna typ av turbin valdes till stridsvagn 103.

I figur 4 ser vi en schematisk bild av den tvåaxliga arbetscykeln. Den första turbinen, gasgenerator turbinen, driver kompressorn genom att de är kopplade till samma axel. Den andra turbinen, arbetsturbinen, används för kraftgenerering.



Figur 4. Verklig process för friaxelturbin

Om vi antar att kompressorns isentropiska verkningsgrad är  $\eta_K$  och gasgenerator turbinens isentropiska verkningsgrad är  $\eta_T$ , så ges den verkliga kompressoreffekten av:

$$P_{K.verklig} = \frac{\dot{m}_{luft}(i_{2s} - i_1)}{\eta_K}$$

(Boyce, 2012, s. 98)

Och den verkliga turbineffekten för gasgeneratoren ges av:

$$P_{T.verklig} = (\dot{m}_{luft} + \dot{m}_{bränsle}) * (i_3 - i_{4s}) * \eta_T$$

(Boyce, 2012, s. 98) Den verkliga effekten för arbetsturbinen, med den isentropiska verkningsgraden  $\eta_{Ta}$  beräknas enligt formeln:

$$P_{Ta.verklig} = (\dot{m}_{luft} + \dot{m}_{bränsle}) * (i_4 - i_{5s}) * \eta_{Ta}$$

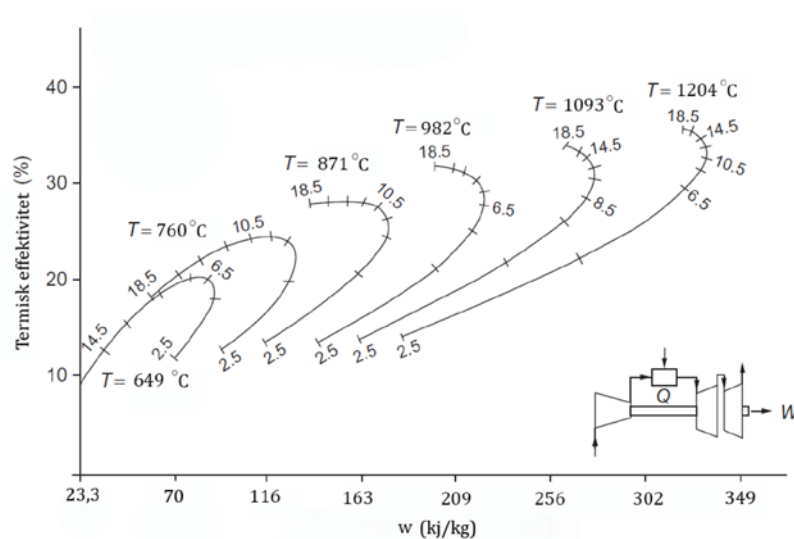
(Boyce, 2012, s. 101)

Således ges den termiska verkningsgraden för hela cykeln av:

$$\eta_c = \frac{P_{Ta.verklig}}{\dot{m}_{bränsle} * H_i}$$

(Boyce, 2012, s. 99)

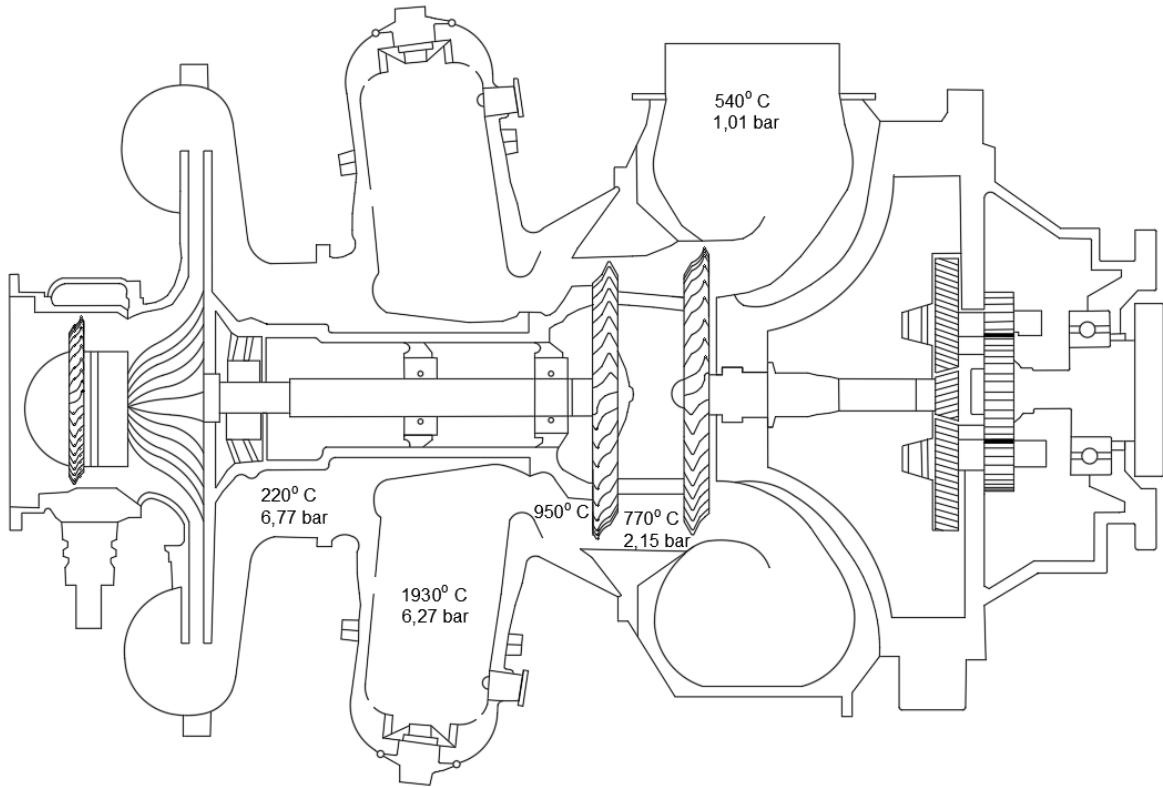
Vid en analys av processen ser vi att en ökning av temperaturen före turbinen tillsammans med en ökning av tryckkvoten ökar den termiska verkningsgraden. Den optimala tryckkvoten är beroende av temperaturen före turbinen, således har varje temperatur en optimal tryckkvot. I figur 5 visas ett diagram som synliggör hur den totala verkningsgraden och mängden arbete påverkas av temperatur och tryckkvot för friaxelturbiner.



Figur 5. Termisk effektivitet & specifikt arbete som funktion av tryckkvot och temperatur (Boyce, 2012, s. 101)

## 2.3 Tryckkvot Caterpillar GT 553

I figur 6 visas de tryck och temperaturer som uppnås i gasturbinen enligt tillverkarens specifikationer.

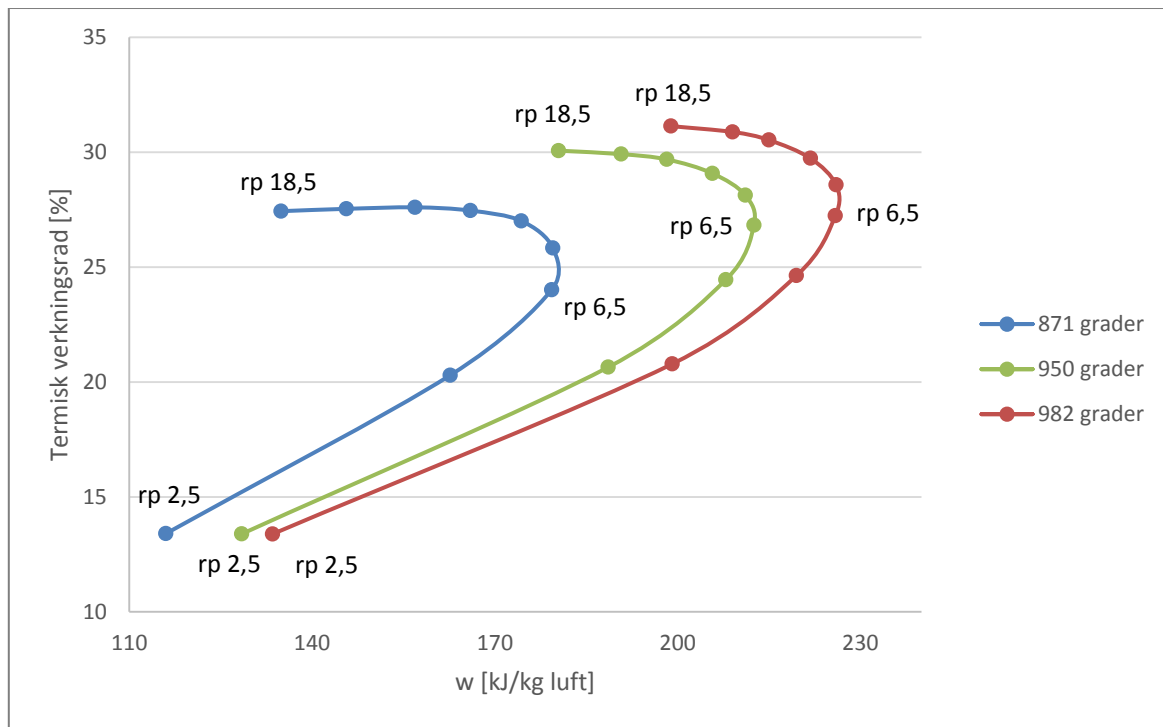


Figur 6. Tryck och temperaturer vid normaldrift

Tryckkvoten för gasturbinen vid ett antaget atmosfärstryck av 1 atm (1.01325 bar) blir då enligt tillverkarens data:

$$r_p = \frac{6,77 \text{ bar absolut}}{1,01325 \text{ bar absolut}} = 6,68$$

Genom linjär interpolation erhålls kurvan för temperaturen 950° C (figur 7), vilket är den temperatur som råder före gasgeneratorns turbinhjul enligt specifikationerna. På så vis kan vi avgöra hur väl turbinen är designad i avseende på dess optimala verkningsgrad.



Figur 7. Som visar  $r_p$  & temperaturkurva för Caterpillar 553

Utifrån kurvan för temperaturen 950° C kan vi konstatera att gasturbinen är designad för ett maximalt effektuttag snarare än för en optimal verkningsgrad.

### 3. Översiktsbilder Gasturbin

#### 3.1 Oljepumpsida

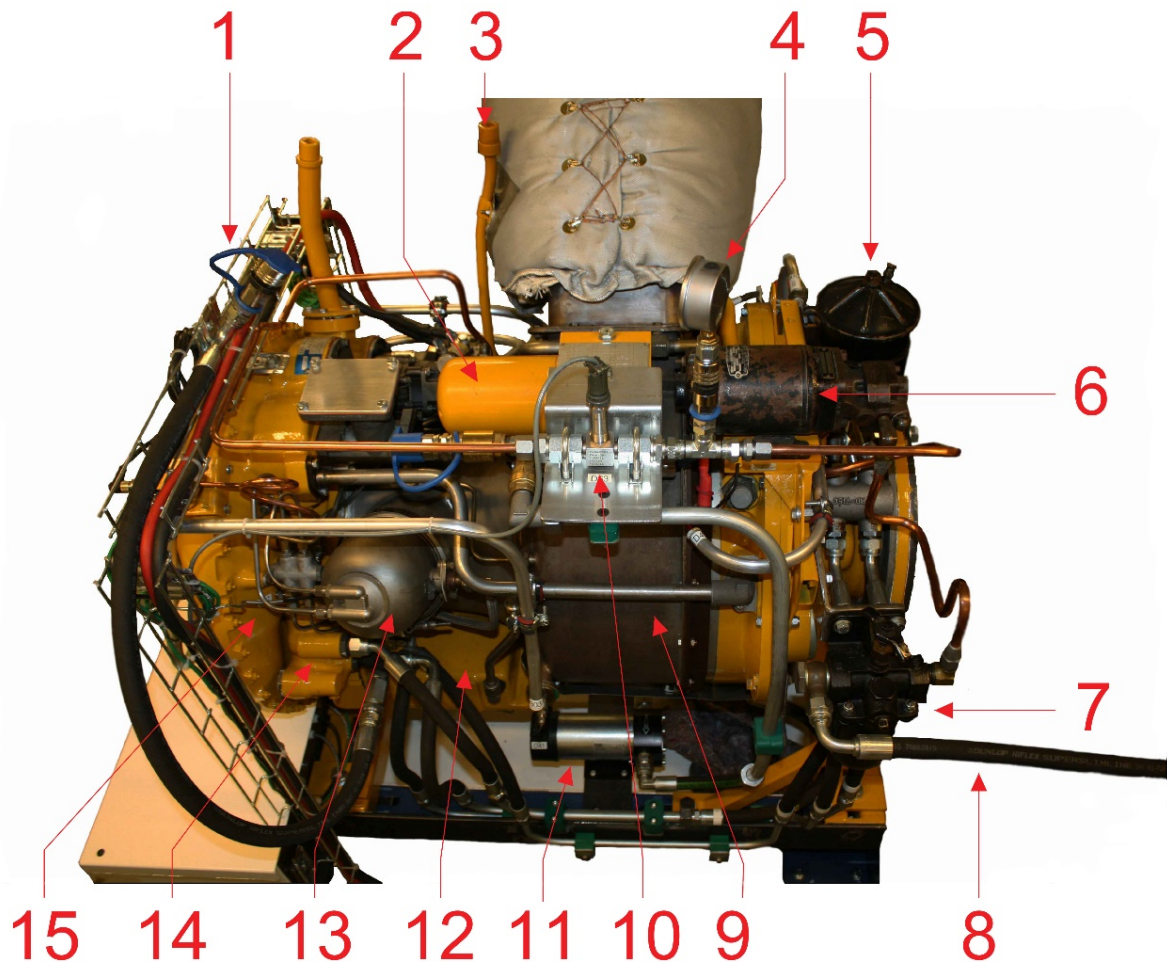


Bild 1. Gasturbin oljepumpsida

- |                              |  |
|------------------------------|--|
| 1. Snabbkoppling oljekylning | 9. Avgashus                              |
| 2. Oljefilter                | 10. Bränsleflödesgivare                  |
| 3. Oljemätsticka             | 11. Försmörjningspump                    |
| 4. Bränsletrycksmanometer    | 12. Oljetråg                             |
| 5. Finfilter, bränsle        | 13. Brännkammare                         |
| 6. Matarpump, bränsle        | 14. Oljepump, gasgenerator               |
| 7. Spaltfilter, bränsle      | 15. Avgastemperaturgivare, kompressorhus |
| 8. Bränsleledning            |  |



### 3.2 Avgassida

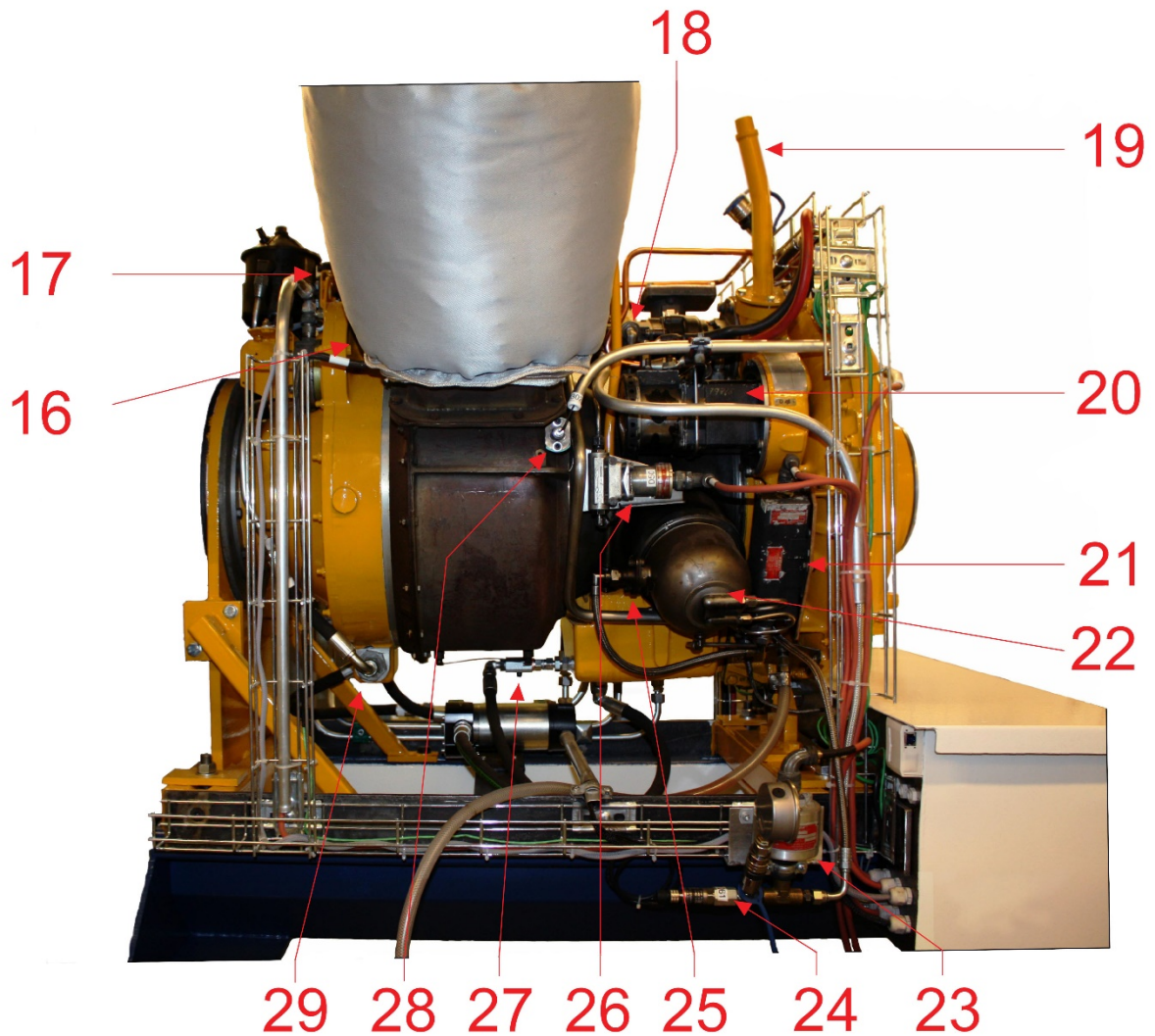
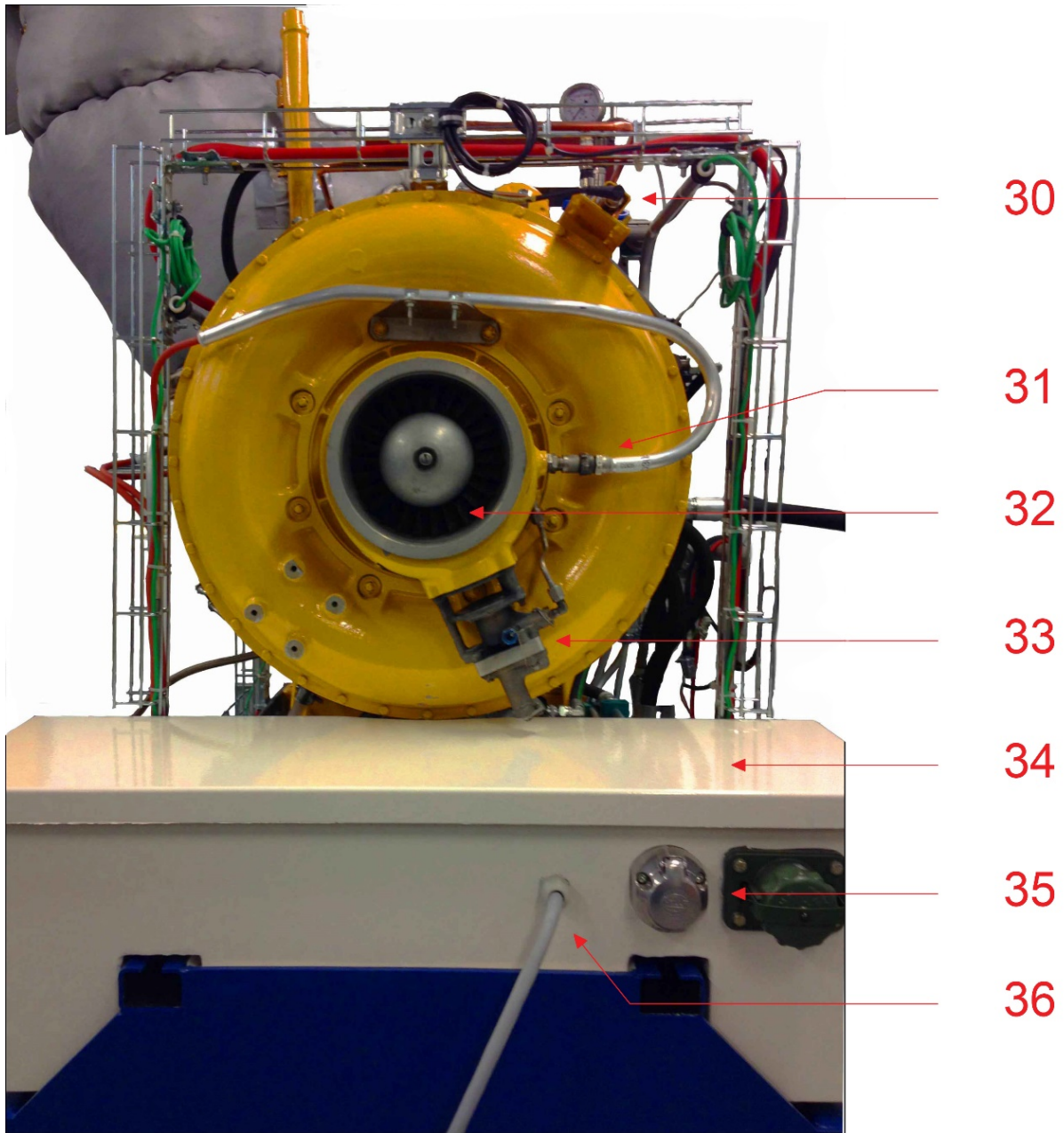


Bild 2. Gasturbin, avgassida

- |  |                                  |
|--|----------------------------------|
| 16. Avgastempgivare 4 st (D307)          | 23. Oljetrycksvakt (D70)         |
| 17. Varvtalsgivare (D306)                | 24. Oljetrycksgivare (D61)       |
| 18. Högtryckspump med regulator, bränsle | 25. Tändstift                    |
| 19. Oljepåfyllningsrör                   | 26. Bränslemagnetventil (D50)    |
| 20. Startgenerator (D48)                 | 27. Avtappningsventil systemolja |
| 21. Tändenhet (D53)                      | 28. Avgashustemp. Givare (D302)  |
| 22. Brännkammare                         | 29. Torrsump, arbetsturbin       |

### 3.3 Gasgeneratorsida

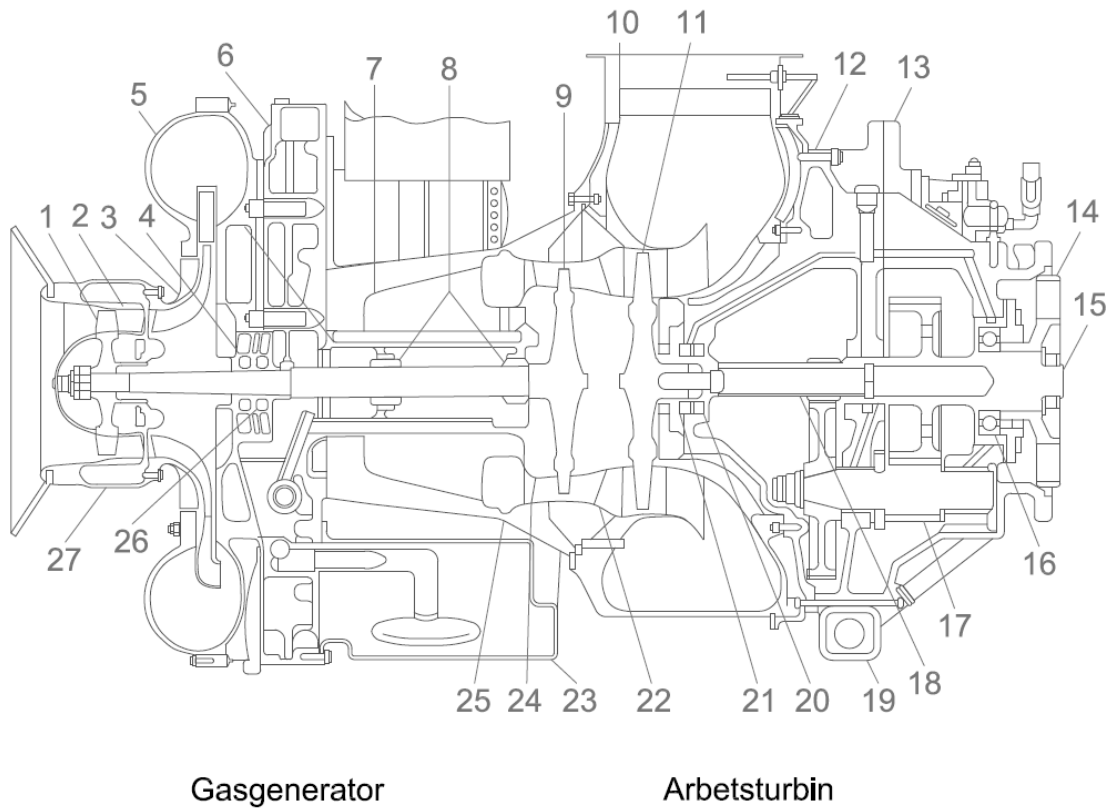


*Bild 3. Gasturbin, gasgeneratorsida*

- 30. Tryckgivare, kompressor(D62)
- 31. Varvtalsgivare (D305)
- 32. Luftintag kompressor
- 33. Luftavtappningsventil

- 34. Kopplingslåda
- 35. El-inkoppling (24V DC)
- 36. Kabel till styrenhet.

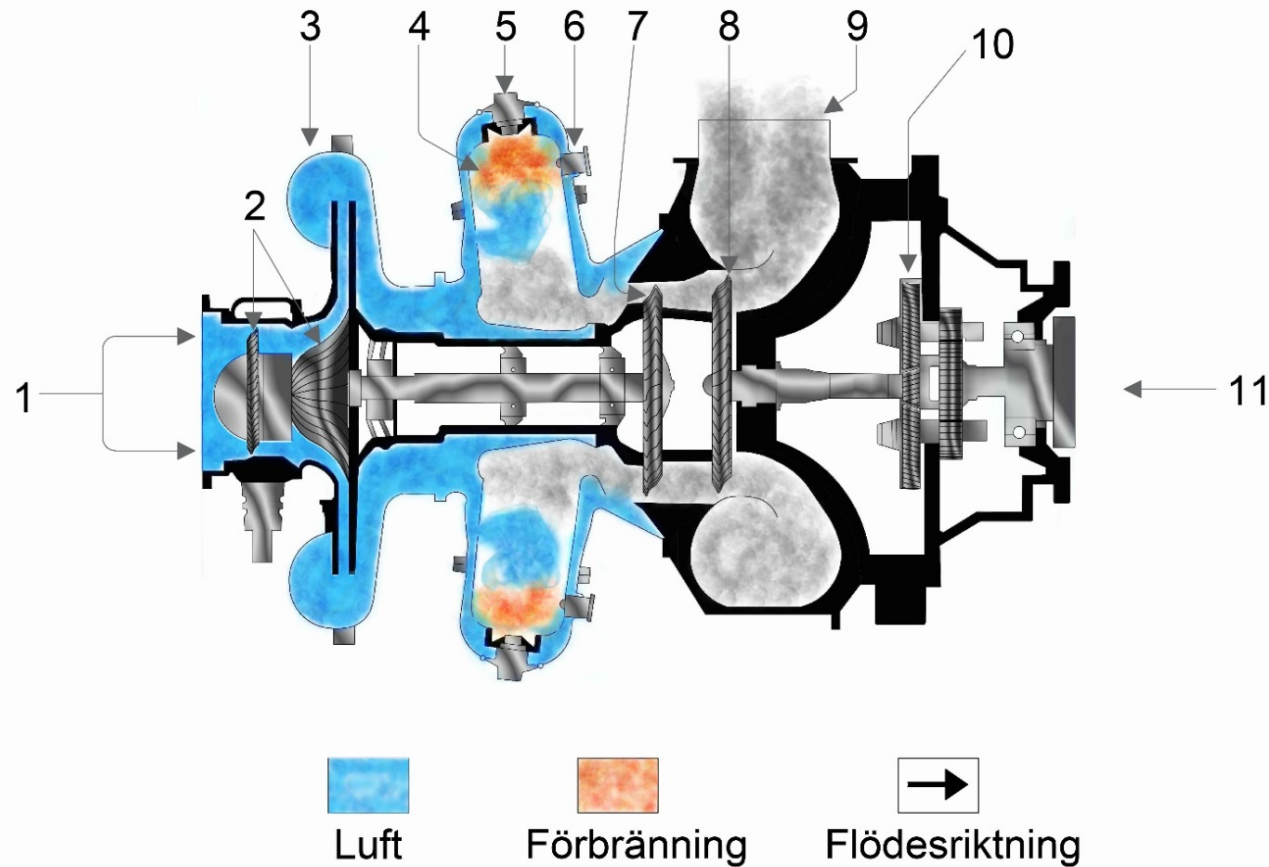
### 3.4 Längdsnitt



Figur 8. Visar gasturbinen i genomskärning på längden

- |                              |                                |
|------------------------------|--------------------------------|
| 1. Kompressorhjul            | 15. Utgående axel              |
| 2. Ledskenering, kompressor  | 16. Lager, utgående axel       |
| 3. Diffusor                  | 17. Reduktionsväxel            |
| 4. Radiallager               | 18. Rotoraxel, arbetsturbin    |
| 5. Kompressorhus             | 19. Mellanhus, arbetsturbin    |
| 6. Hjälpapparatus            | 20. Radiallager                |
| 7. Inre brännkammare         | 21. Axiallager                 |
| 8. Lager                     | 22. Ledskenering, arbetsturbin |
| 9. Turbinhjul, gasgenerator  | 23. Oljesump, gasgenerator     |
| 10. Avgassamlare             | 24. Ledskenering, gasgenerator |
| 11. Turbinhjul, arbetsturbin | 25. Mellanhus                  |
| 12. Främre hus, arbetsturbin | 26. Axiallager                 |
| 13. Bakre hus, arbetsturbin  | 27. Luftkammare                |
| 14. Medbringarskiva          |                                |

## 4. Funktionsprincip



Figur 9. Funktionsprincipen för en gasturbin

Caterpillar GT 553 är av typen friaxelturbin med två axlar. Det innebär att gasturbinens axlar inte har någon mekanisk förbindelse med varandra.

Längst till vänster finns luftinloppet (1) där kompressorhjulen suger in luft från omgivningen. Kompressionen sker i två steg: ett axialsteg och ett centrifugalsteg. Då luften komprimeras efter kompressorn, till cirka 6,8 bar, stiger temperaturen till cirka 220° C. Luften leds vidare till brännkammarna (4) via kompressorhuset (3). Ungefär en fjärdedel av luften åtgår till förbränningen. Resterande luft passerar runt brännkammarna och flamrören för att kyla dem.

I brännkammarna sprutar bränslespridaren (5) in finfördelat bränsle som blandas med den komprimerade luften. Ett tändstift (6) antänder bränslet som förbränns. Temperaturen i brännkammarna är då runt 1930° C och trycket ungefär 6,3 bar.

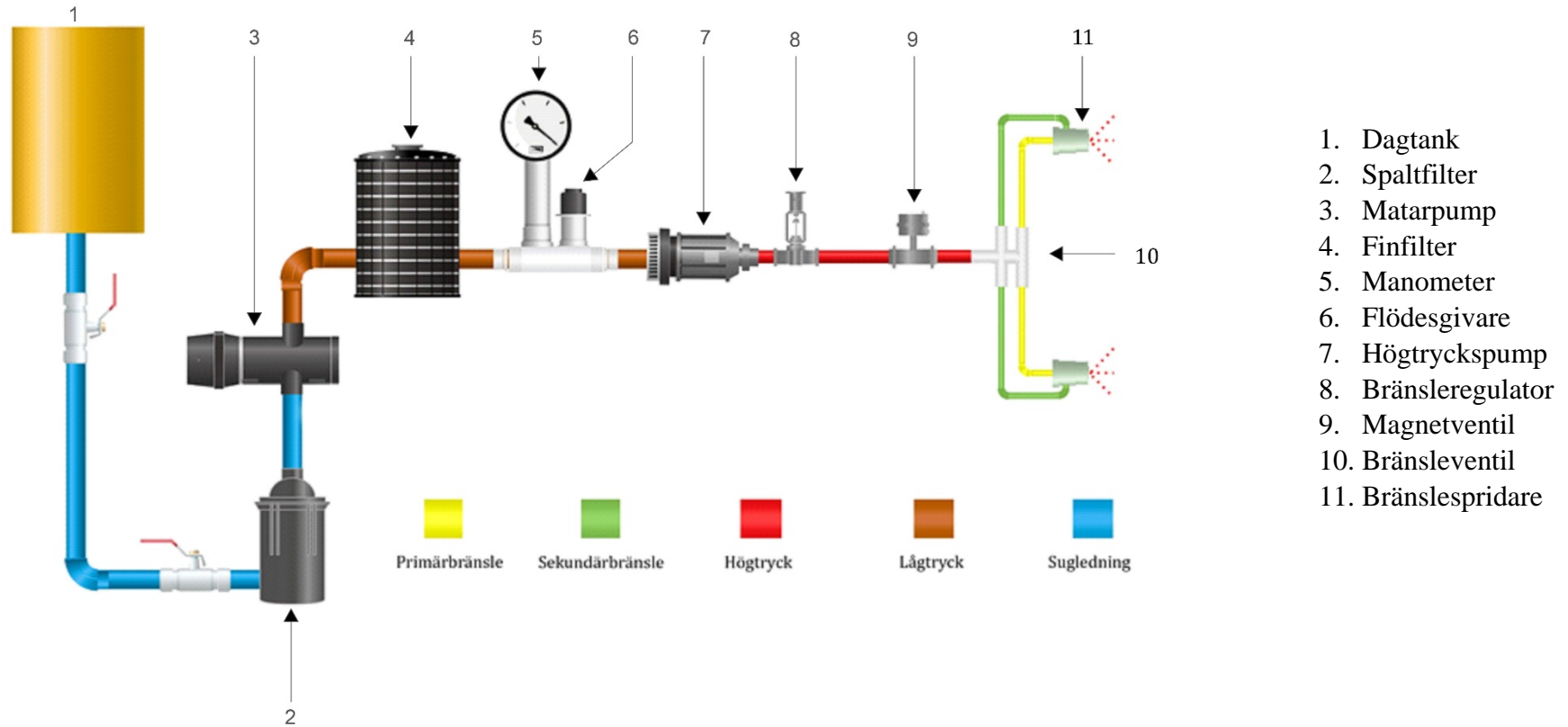
När de heta gaserna lämnar brännkammaren blandas de med kylsluften och temperaturen före gasgeneratorns turbinhjul (7) blir då runt 950° C. Gasen expanderar snabbt och bildar en gasström som leds genom en ring av fasta ledskenor. Ledskenorna riktar gasströmmen mot turbinhjulet (7) och får detta att rotera. På så vis drivs kompressorn och de hjälppapparater som är monterade på gasgeneratoren.

Gasströmen passerar sedan genom ett mellanhus till en andra uppsättning fasta ledskenor. Dessa riktar gasströmmen mot arbetsturbinens skovelhjul (8) och får detta att rotera. När gasströmmen passerat skovelhjulet leds avgaserna till avgashuset och vidare ut till avgasutloppet (9).

Då arbetsturbinens axel roterar driver den över en reduktionsväxel (10) som sänker varvtalet på den utgående axeln. Reduktionsväxeln har en utväxling på 7,94:1.

Arbetsturbinen driver även de hjälppapparater som är placerade på arbetsturbinen. (Försvarets materielverk, 1970, s. 46)

## 5. Bränslesystem



Figur 10. Schematisk bild av bränslesystemet

Bränslesystemet är uppbyggt enligt figur 10. Bränslets matarpump suger bränslet från dagtanken (1) genom spaltfiltret (2). Bränslets pumpas vid lågt tryck genom finfiltret (4) vidare till en manometer 5) och flödesgivare (6) . Flödesgivaren ger signal till styrsystemet och flödet visas i kg/minut i styrsystemets frontpanel.

Tryckindikatorn avläses okulärt och skall före start ha ett värde på cirka 1,8 bar. Högtryckspumpen (7) drivs av gasgeneratoren och har en inbyggd överströmningventil som leder bränslet från tryck- till sugside då trycket blir för högt. Högtryckspumpen är hopbyggd med bränsleregulatorn (8) som styrs av elektroniska signaler från styrsystemet.

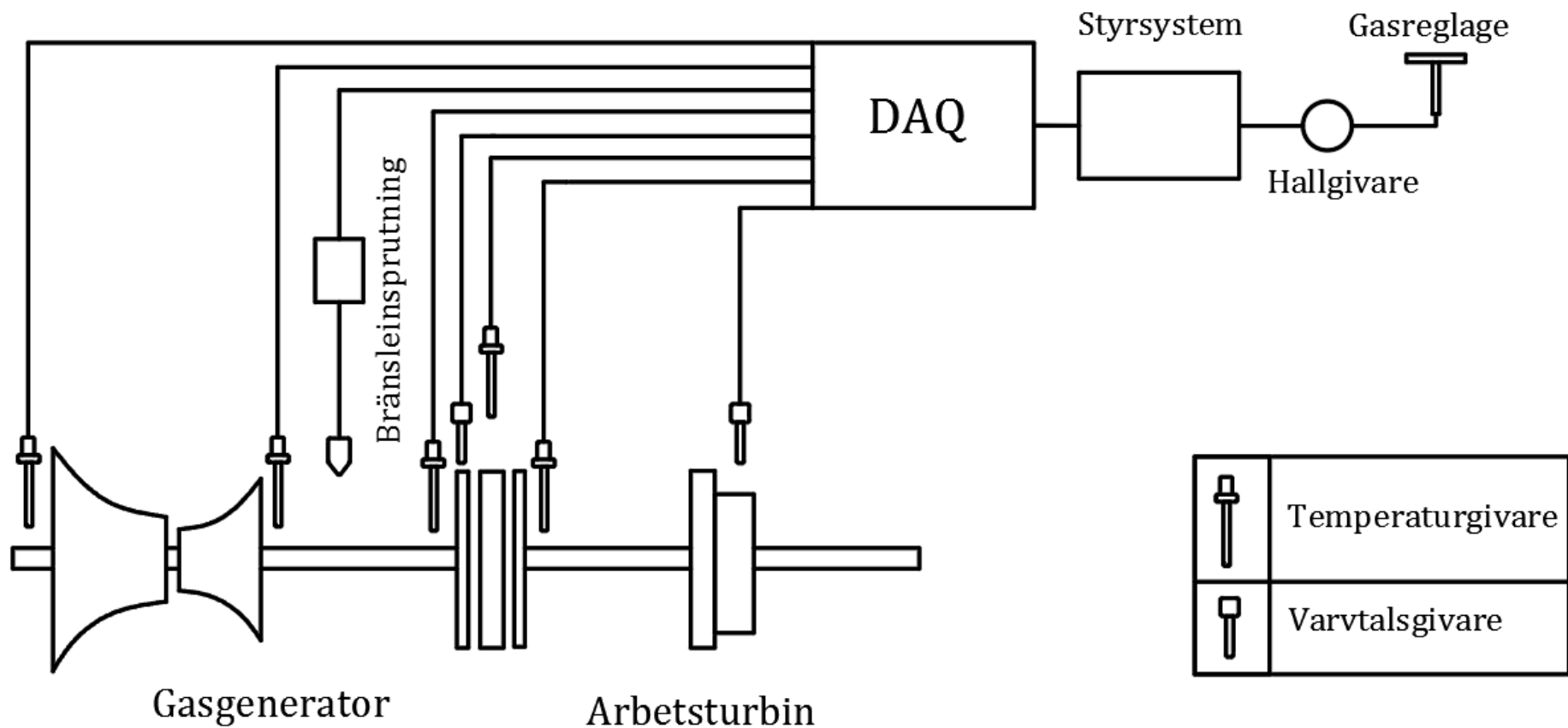
Styrsystemet reglerar matningen av bränsle genom regulatorn så att gasturbinens temperaturer och varvtal hålls inom tillåtna värden. Från bränsleregulatorn pumpas bränslet till en magnetventil vilken öppnas under startförloppet då gasgeneratoren uppnått ett varvtal på cirka 3500 rpm (8,5 % av maximalt varvtal).

När magnetventilen öppnar flödar bränslet vidare till fördelningsventilen (10). Då trycket före fördelarventilen är mindre än 10,3 bar är endast primärledningarna öppna. När gaspådraget ökar, och trycket stiger över 10,3 bar, öppnas ledningarna för sekunderbränslet. En större mängd bränsle sprutas då in i brännkamrarna.

Då varvtalet på gasgeneratoren är under 3000 rpm, cirkulerar bränslet under lågt tryck via magnetventilen och finfiltret. Eventuellt läckbränsle från högtryckspumpens tätningar avleds genom ett rör till en extern behållare.

Då gasturbinen stoppas dräneras oförbränt bränsle från den nedre brännkammaren genom en dräneringsventil. Detta förhindrar okontrollerad förbränning vid en omstart. Ventilen stängs av övertrycket inuti brännkammaren när turbinen startas på nytt. (Försvarets materielverk, 1970, s. 47)

## 6. Bränslereglersystem



Figur 11. Bränslereglersystem



Arbetsturbinens axeleffekt är direkt beroende av temperaturen och flödet på den gasströmsmängd som ges av gasgeneratoren. Gasströmmen ges av gasgeneratorns varvtal, varvtalet i gasgeneratoren beror i sin tur på mängden bränsle som flödar till brännkamrarna.

Gasturbinen har ett elektroniskt bränsleregulatorsystem som består av följande komponenter:

- Hallgivare
- Digitalt styrsystem (PI-regulator)
- DAQ
- Bränslereglerventil
- Varvtalsgivare
- Temperaturgivare

Signalerna från givarna tas emot av DAQ:en och skickas vidare till styrsystemet. Styrsystemet jämför signalen från gasgeneratorns varvtal med pådraget på gasreglaget, vilket ges av en elektronisk signal från hallgivaren. Då gaspådraget ökas eller minskas skickas en signal till

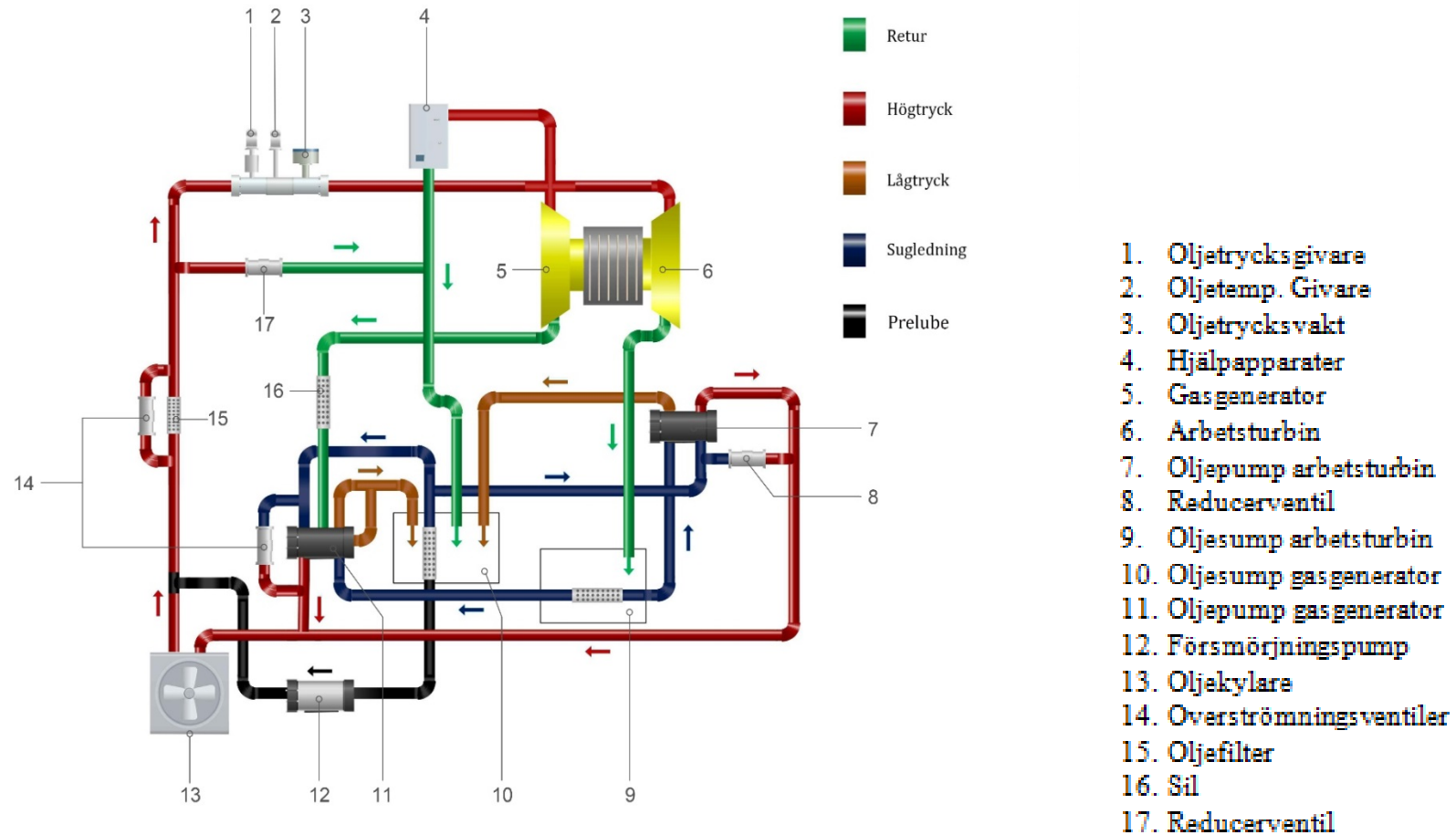
bränslereglerventilen som styr bränslemängden som sprutas in i brännkamrarna. (Eklund & Runcrantz, 2016)

Eftersom flödet av bränsle till brännkamrarna primärt regleras av pådraget från styrsystemet så kommer varvtalet på den utgående axeln från arbetsturbinen att variera med den belastning den utsätts för. Det vill säga: vid ett visst pådrag från styrsystemet så kommer arbetsturbinens utgående axel ha ett konstant varvtal vid en konstant belastning.

Om belastningen minskar på den utgående axeln så kommer varvtalet på arbetsturbinen att öka. Ökningen begränsas av en varvtalsbegränsare och således kan varvtalet endast öka till det inställda maximala varvtalet för arbetsturbinen.

Om belastningen på den utgående axeln istället ökar måste pådraget ökas i styrsystemet för att bibehålla samma varvtal som innan belastningsökningen. (Försvarets materielverk, 1970, s. 48)

## 7. Smörjoljesystem



Figur 12. Smörjoljesystemet för gasturbinen

Gasturbinens smörjoljesystem är uppbyggt enligt figur 12. Gasgenerator och arbetsturbin har separata oljesumpar, silar, oljepumpar och överströmningsventiler. Systemen är dock sammankopplade via rörledningarna.

Försmörjningspumpen, som skall köras före start då systemet stått stilla en längre tid, aktiveras på kontrollpanelen. Den pumpar då olja genom systemet i cirka 6-7 sekunder och stängs av via ett tidrelä.

Gasgeneratorns oljepump (11) består utav ett tryckelement och två stycken länspumpelement, oljepumpen drivs av kompressoraxeln på gasgeneratorn. Tryckelementet suger olja från gasgeneratorns oljesump (10) och pumpar oljan via högtrycksledningen till oljekylaren (13). Överströmningsventilen (14) öppnar om tryckfallet över oljekylaren stiger över ca. 1,71 bar. Via kylaren pumpas oljan till oljefiltret (16).

Oljefiltret är av typen fullflödesfilter, vilket innebär att all olja går genom filtret. Om tryckfallet över oljefiltret stiger över  $3,43 \pm 0,29$  bar öppnar överströmningsventilen (15) så att oljeflödet går förbi filtret. En reducerventil (18) är monterad mellan högtrycksledningen och returledningen, efter oljefiltret och begränsar trycket ut till smörjställena.

Innan smörjställena är även monterat oljetrycksgivare (1), oljetemperaturgivare (2) samt oljetrycksvakt (3). Givarna ger signal till

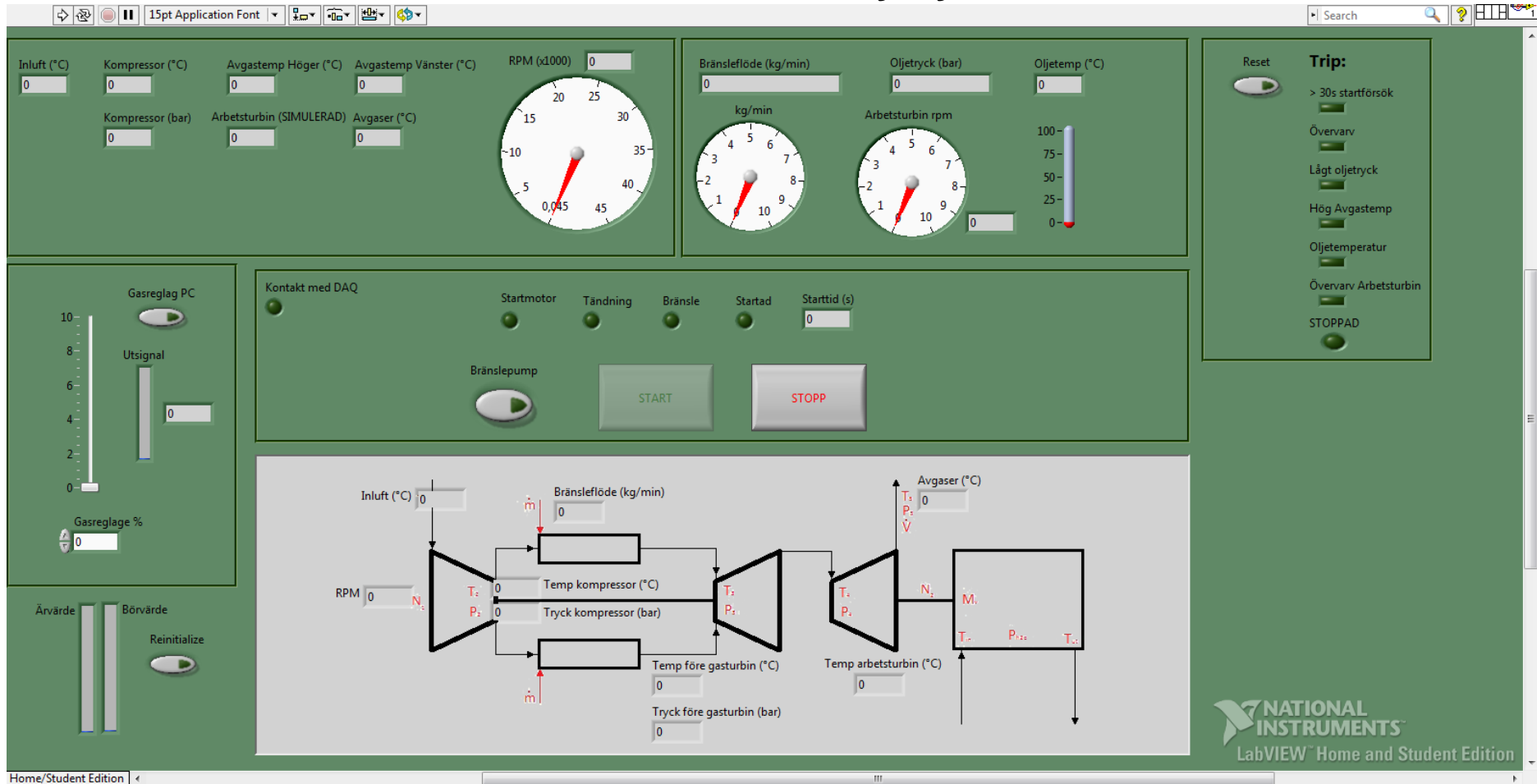
gasturbinens styrsystem och ger en trip vid för hög/låg temperatur och/eller tryck.

När oljan pumpats ut till smörjställena i hjälppapparatus (4), gasgenerator (5) och arbetsturbin (6) rinner oljan från hjälppapparatus och arbetsturbin tillbaka till gasgeneratorns- respektive arbetsturbinens oljesump. Oljan från gasgeneratorns rotorhus sugs genom en sil (17) av det ena av gasgeneratorns länspumpelement. Det andra länspumpelementet suger olja från arbetsturbinens oljesump, som är av typen torrsump. Bägge länspumpelementen pumpar sedan oljan till gasgeneratorns oljesump (10).

Gasgeneratorns oljesump har tillräcklig kapacitet för att ensam smörja hela gasturbinen. Arbetsturbinens oljepump (7) och oljesump är monterade vid turbinen för det driftfall då gasgeneratorn inte är i drift. Arbetsturbinens oljepump är en tvåelementspump, bestående av länspumpelement och tryckelement. Länspumpelementet pumpar olja från arbetsturbinens oljesump till gasgeneratorns oljesump via lågtrycksledningen. Tryckelementet pumpar olja från gasgeneratorns oljesump via högtrycksledningen parallellt med gasgeneratorns oljepump. Efter arbetsturbinens oljepump, på högtrycksledningen, finns en reducerventil (8) som leder olja tillbaka till pumpens sugledning om trycket är för högt.

Om gasgeneratorns oljepump havererar har arbetsturbinens oljepump tillräcklig kapacitet att själv smörja hela gasturbinen. (Försvarets materielverk, 1970, s. 49)

## 8. Gasturbinens styrsystem



Figur 13. Frontpanel för gasturbinens styrsystem

Frontpanelen visar aktuella värden från gasturbinens givare. Givarsignalerna insamlas av en DAQ-enhet med en *watchdog*-funktion. Watchdogfunktionen är en timer som säkerställer att vissa villkor uppfylls. När villkoren är uppfyllda får timern en resetsignal och timern börjar räkna igen. Om något krav inte uppfylls ges ingen resetsignal, watchdog-funktionen nollställer då utsignalerna och stänger gasturbinens drift. Watchdog-funktionen säkerställer även att alla trippar måste åtgärdas innan systemet kan startas. (Eklund & Runcrantz, 2016)

På frontpanelen kan man avläsa följande värden:

- Temperatur på luft in till kompressorn
- Tryck och temperatur efter kompressorn
- Bränsleflödet till brännkammarna
- Tryck och temperatur för gasgeneratoren (simulerade)
- Temperaturen i arbetsturbinen
- Temperatur på höger och vänster sida i avgashuset
- Avgasernas temperatur vid utloppet
- Gasgeneratorns varvtal (stora indikatorn)
- Arbetsturbinens varvtal
- Tryck och temperatur på smörjolja

Till höger på panelen finns tripindikeringslampor som lyser grönt då någon trip är utlöst, samt en reset knapp för tripparna, tripparna kan även återställas via manöverlådan.

Längst till vänster i panelen finns gasreglaget som styrs antingen via gasreglagespak på kontrollenheten eller genom att skriva in önskat värde i rutan *Gasreglage %*. Under gasreglaget finns staplar som visar ärvärdet och börvärdet för gasturbinens varvtal.

Gaspådraget styrs av en PI-regulator som utifrån är- och börvärdet för kompressorns varvtal styr utsignalen till bränslereglatorn.

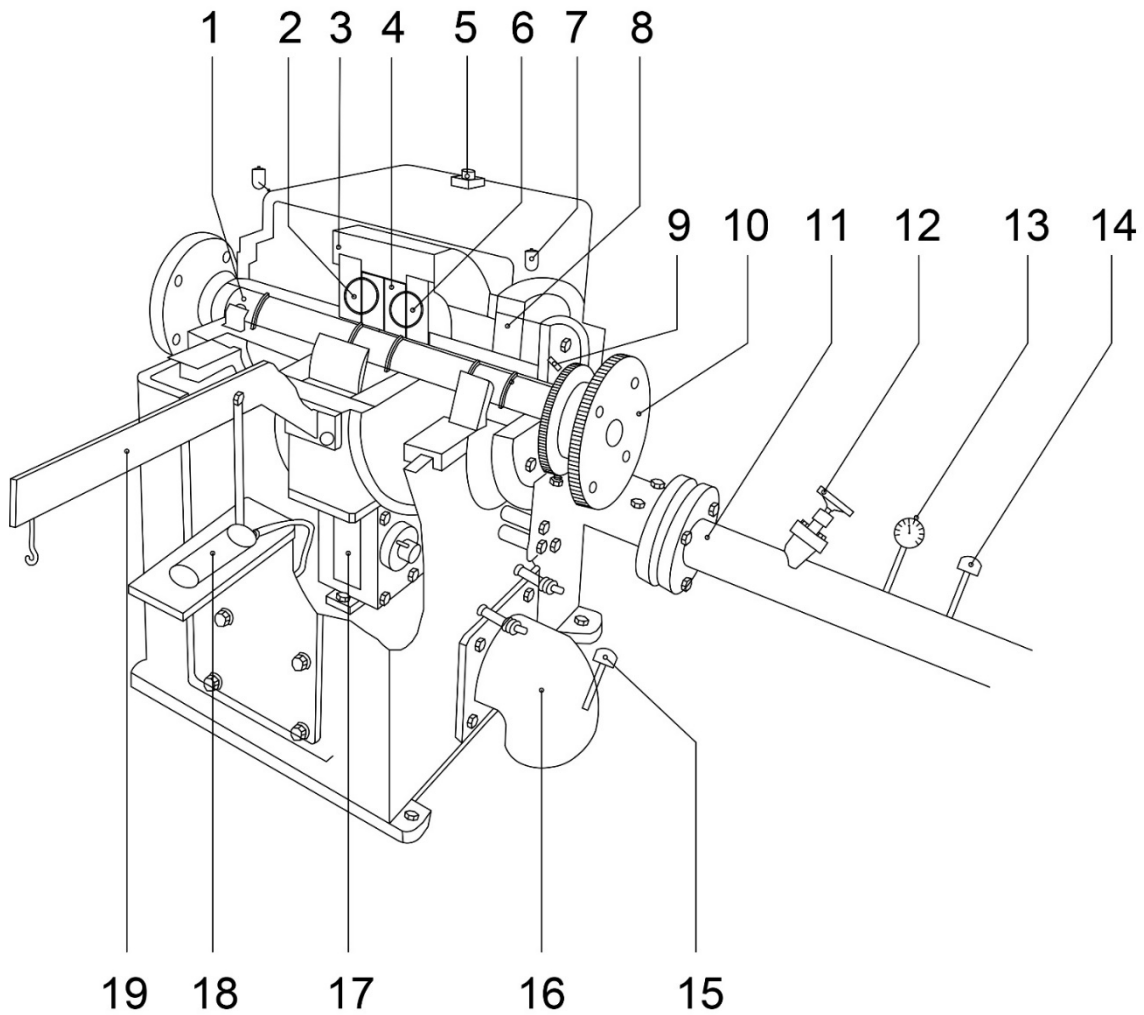
I mitten av panelen finns lampor som indikerar:

- Att det finns kontakt med DAQ:en
- Startmotor aktiv
- Tändning i brännkammarna
- Att det flödar bränsle
- Gasturbin startad

Under dessa indikeringslampor finns en knapp för att starta bränslepumpen. Samt knappar för start och stopp av gasturbinen.

Skissen av gasturbinen visar utvalda värden i gasturbinen på ett överskådligt sätt.

## 9. Froude vattenbroms



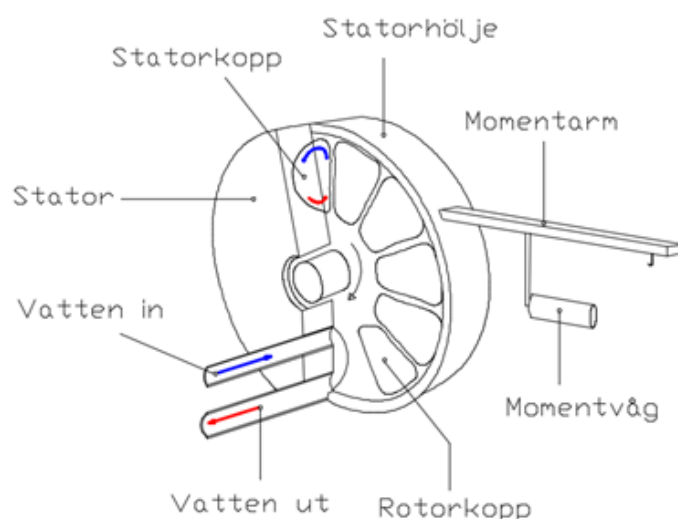
Figur 14. Översiktsbild av vattenbroms

- |                               |                             |                             |
|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1. Huvudaxel                  | 8. Statorsvängtapplager     | 15. Temperaturgivare PT-100 |
| 2. Statorkopp                 | 9. Varvtalsgivare           | 16. Vattenutlopp            |
| 3. Statorhölje                | 10. Axelhjul                | 17. Pneumatisk reglerventil |
| 4. Rotor                      | 11. Vatteninlopp            | 18. Lastcell                |
| 5. Regulator pneumatik        | 12. Kägventil               | 19. Momentarm               |
| 6. Rotorkopp                  | 13. Manometer               |                             |
| 7. Oljebhållare, dimsmörjning | 14. Temperaturgivare PT-100 |                             |

## 9.1 Vattenbromsens funktion

Vattenbromsens axel (1) är kopplad till arbetsturbinens utgående axel och tar därmed upp kraften som genereras utav turbinen. På vattenbromsens axel finns det en dubbelsidig rotor (4) som på var sida har rotorkoppar längs dess periferi. På vardera sida om rotorhjulerna finns en stator (3), statorerna har statorkoppar (2) som är utformade på samma sätt som rotorkopparna.

När vatten pumpas till vattenbromsens inlopp (11) och arbetsturbinen sätter vattenbromsens axel i rörelse tar vattenbromsen upp den tillförda rörelseenergin (Froude Engineering Limited, 1975, s. 1.2). Detta sker genom att vattnet leds genom statorkopparna och flödar mellan statorkopparna och rotorkopparna. Vattnet cirkuleras sedan mellan rotor och stator genom axelns och rotorns rotation, på så vis uppstår ett hydrauliskt motstånd. En schematisk bild av vattenbromsens funktion ges i figur 15.



Figur 15. Schematisk bild av vattenbromsens funktion

Rörelseenergin som roterar axeln övergår på så vis till värmeenergi genom den friktion och det motstånd som vattenbromsen utgör. Statorhöljet (3) kan röra sig då det bärs upp av svängtappslager som vilar mot ett stativ. Rörelseenergin i vattenflödet får rotorn att rotera vilket leder till att det utvecklas en kraft statorhöljet.

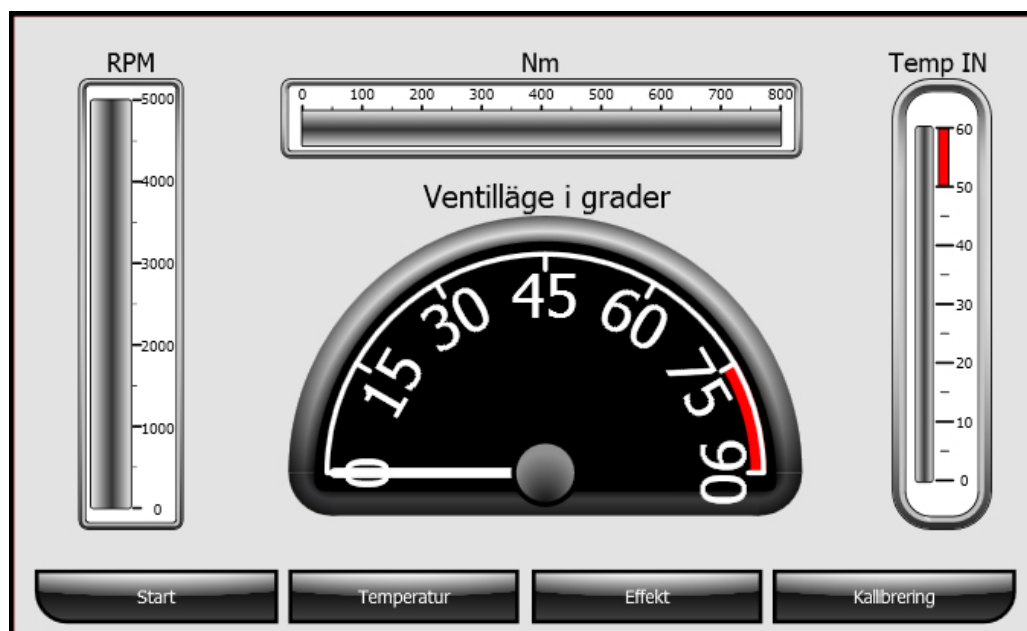
På statorhöljet är fästad en momentarm (19) till vilken är kopplat en lastcell (18). Då rotorn sätts i rörelse utvecklas en kraft som trycker momentarmen nedåt och på så vis uppmäts av lastcellen. Således uppmäts det utvecklade momentet.

Inflödet utav vatten till vattenbromsen regleras via en manuell ventil (12). Utflödet regleras av en elektro-pneumatiskt styrd vridspjällsventil (17). Mängden energi som upptas av vattenbromsen går att bestämma genom flödet utav vatten i stator- och rotorkopparna samt temperaturskillnaden på in- och utgående vatten. På såväl in- som utgående rör finns det temperaturgivare (14 & 15) (Froude Engineering Limited, 1975, s. 1.2).

## 9.2 Vattenbromsens frontpanel

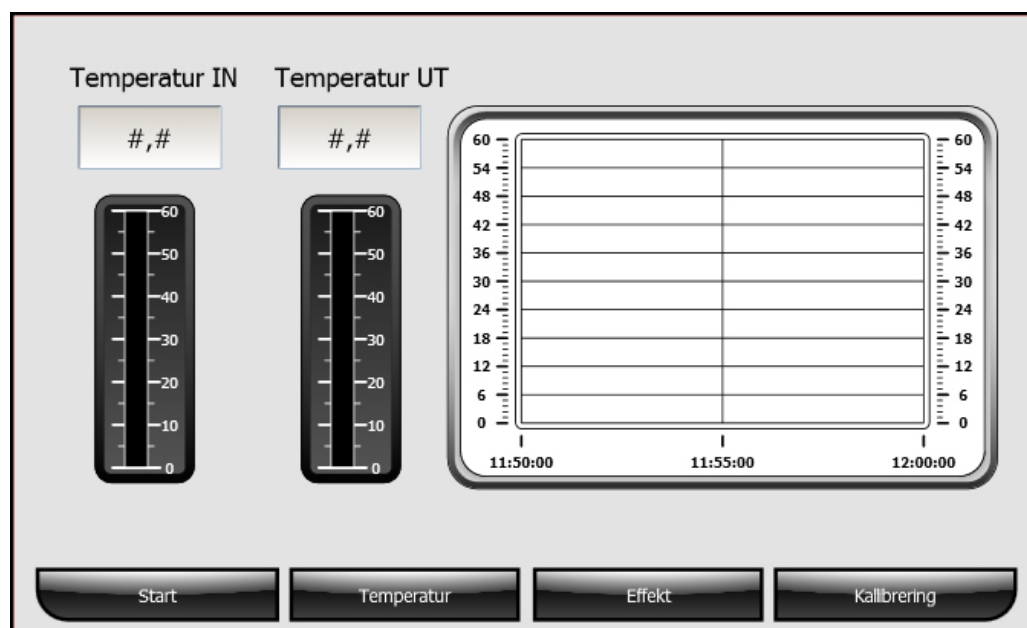
För vattenbromsen finns en separat frontpanel med touchscreen som sitter på kontrolpulpeten. Frontpanelen har fyra olika sidor, figur 16 till 19 visar de olika sidorna på frontpanelen.

På startsidan kan man avläsa vattenbromsens varvtal, det utvecklade vridmomentet i Nm, den elektropneumatiskt styrda vridspjällsventilens läge samt temperaturen på vattnet in till vattenbromsen.



Figur 16. Startsidan för vattenbromsens frontpanel

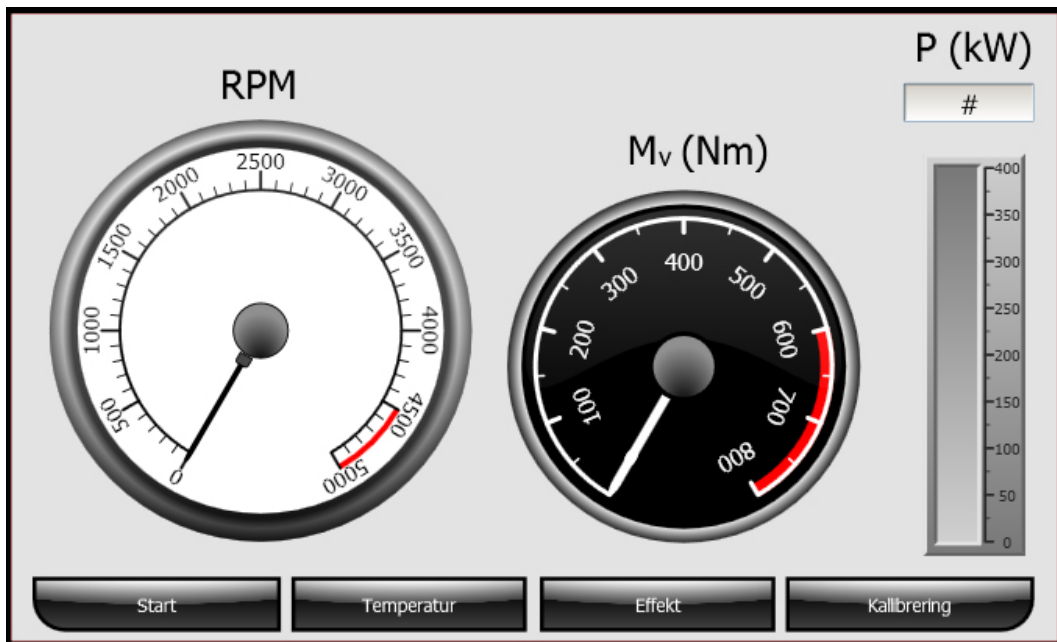
Nästa sida i frontpanelen, figur 17, visar aktuell temperatur på vattnet in och ut ur vattenbromsen, samt en grafisk logg över temperaturerna.



Figur 17. Temperatur på in- och utgående vatten som visas på frontpanelen.

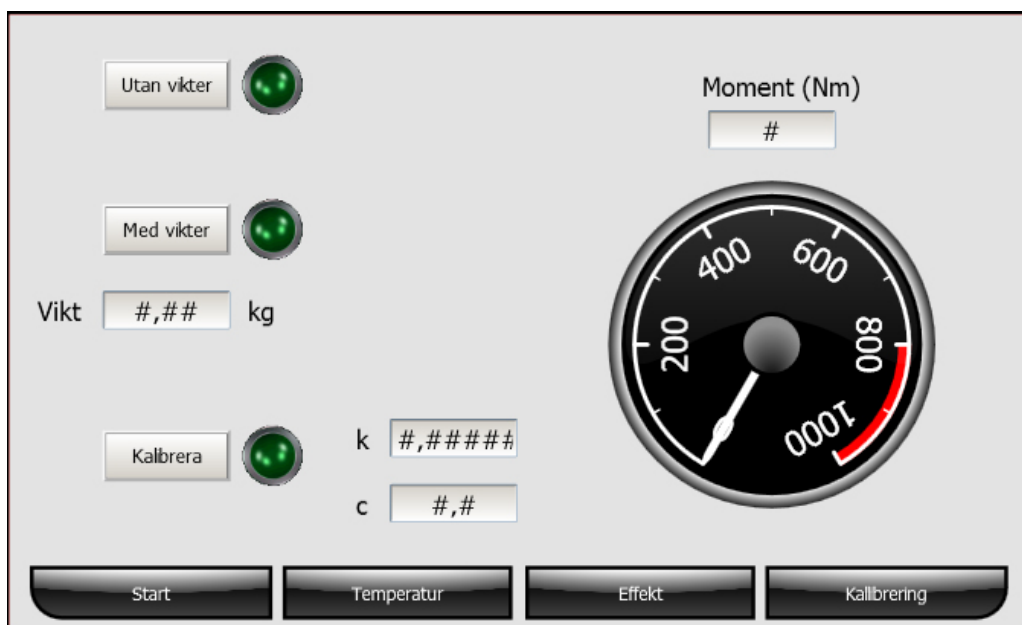


Effektsidan, figur 18, i frontpanelen visar vattenbromsens varvtal, det utvecklade vridmomentet ( $M_v$ ) i Newtonmeter samt den utvecklade effekten ( $P$ ) i kW.



Figur 18. Effekt-sidan i vattenbromsens styrpanel

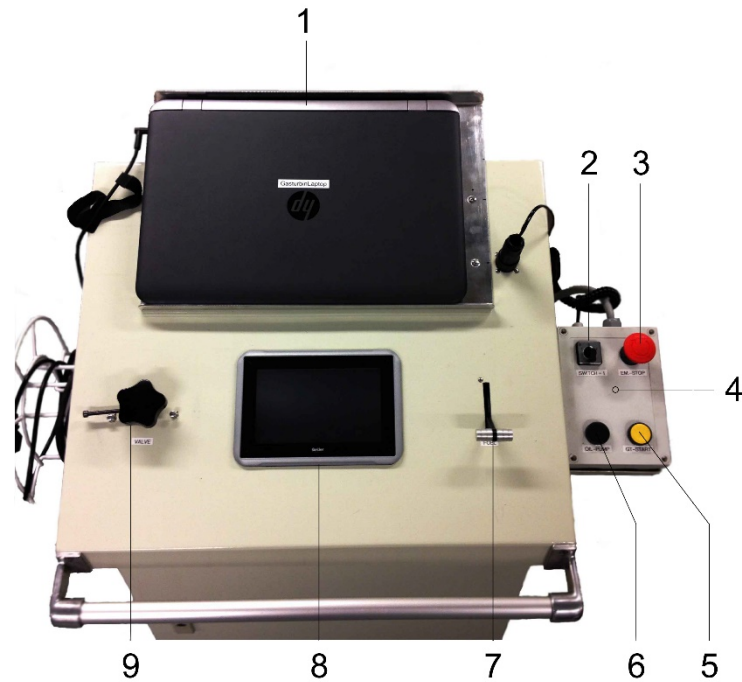
Den sista sidan på frontpanelen, figur 19, används för att kalibrera vattenbromsen. För att kalibrera vattenbromsen kontrollerar man först att inga vikter är fästa vid momentarmen. Sedan trycker man på knappen "Utan vikter" och inväntar att lampan bredvid börjar lysa grönt. Sedan hänger man på de 3 vikterna på momentarmen och skriver in den totala massan man hängt på i rutan "Vikt... kg". Tryck sedan på knappen "Med vikter", när lampan intill lyser grönt trycker man på knappen "kalibrera". Tag bort vikterna från momentarmen och kontrollera att Momentet visar noll. Rutan "k" ger information om lutningen på kalibreringskurvan och c är konstanten i ekvationen för den linjära kurvan.



Figur 19. Kalibreringssidan för vattenbromsen.

## 10. Kontrollpulpet

Från kontrollpanelen styrs alla huvudfunktioner för gasturbinen och vattenbromsen. Figur 20 visar kontrollpulpetens och dess delar:



Figur 20. Kontrollpulpet för gasturbinen och vattenbromsen

- |                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| 1. Laptop med gasturbinens frontpanel | 6. Start av försmörjningspump                |
| 2. Vred för drift och reset           | 7. Gasreglage för gasturbinen                |
| 3. Nödstopp                           | 8. Frontpanel, vattenbroms                   |
| 4. Manöverlåda                        | 9. Vred för vattenbromsens vridspjällsventil |
| 5. Startknapp för gasturbin           |  |

# 11. Elsystemet

Gasturbinens elsystem är ett 12 volts likströms system som drivs av två stycken startbatterier. Strömmen leds delvis direkt till startmotor via ett relä (100) och delvis till DAQ och manöverlåda via två stycken dvärgbrytare (20 respektive 10 ampere).

Till DAQ:en är följande givare inkopplade:

- Bränsleflödesgivare (D63)
- Tryckgivare kompressorhus (D62)
- Oljetrycksgivare (D61)
- Temperatur kompressorhus (D67)
- Oljetemperaturgivare (D64)
- Temperatur kompressorintag (D301)
- Temperatur på startgeneratorsida (D302)
- Temperatur på oljepumpsida (D303)
- Temperatur avgasutlopp (D307), 4 stycken
- Varvtalsgivare arbetsturbin (D306)
- Varvtalsgivare gasgenerator (D305)

Utsignalerna från DAQ:en styr följande enheter:

- Bränslematarpump (D49)
- Bränslemagnetventil (D50)
- Tändenhet (D53)
- Bränsleregulator (D304)
- Startmotor

Vid start av gastubinen ges en signal till startmotorns relä, som ger spänning till startmotorn varvid den börjar rotera, och till tändenheten. När gasgeneratorns varvtal uppnått 3500 rpm skickas en signal som öppnar bränslemagnetventilen. Således strömmar bränsle in till brännkamrarna där det antänds av tändstiften vilka ges ström av tändenheten. När förbränningen är startad ökar turbinens varvtal hastigt, då turbinen uppnår 10 000 rpm skickas en signal till styrprogrammet att turbinen är startad och startmotor och tändning stängs av.

Om turbinen inte uppnått ett varvtal på 10 000 rpm inom 30 sekunder från det att startsignal givits så utlöses en trip om för lång starttid. Man måste då återställa trippen innan ett nytt startförsök kan göras.

Under drift så skickas kontinuerligt signaler från givarna via DAQ:en till gasturbinens styrsystem. Värdena loggas och kan sedan avläsas grafiskt eller i tabellform. Om en tripp utlöses under drift skickas en nollsignal till startmotor, tändning och bränslemagnetventil. Således stoppas bränsleflödet till brännkamrarna och signalen för gasreglaget ställs till noll.

## 12. Underhåll

Underhållsfilosofin för gasturbinanläggningen utgår ifrån ett proaktivt förhållningssätt. Korrekt skötsel och drifthandhavande har en signifikant påverkan på anläggningens prestanda och därmed på reparations- och serviceintervaller.

Förutsättningen för turbinoperatören att ta intelligenta beslut om serviceåtgärder ökar då man utför proaktiv övervakning av systemets kondition. Då besluten kan basera sig på anläggningens faktiska skick, snarare än på fasta och kalenderbaserade underhållsintervaller. Upprätthållande av kvaliteten på inloppsluften, bränsle och smörjolja är aspekter som ytterligare minskar slitage och försämring av anläggningens kondition. (Kurz & Brun, 2007, s. 173)

Eftersom en gasturbins funktion är resultatet av noggrant inställt samarbete mellan många olika komponenter bör underhålls skötseln utgå från ett helhetsperspektiv snarare än på separata komponenter i anläggningen (Boyce, 2012, s. 803). Genom att behandla gasturbinen som en helhet kan man åskådliggöra slitage på anläggningen och matcha detta mot olika komponenter i anläggningen.

De mekanismer som orsakar slitage på anläggningen är i huvudsak följande:

### **Nedsmutsning**

Nedsmutsning orsakas av vidhäftning av partiklar till vingprofiler. Vidhäftning orsakas av olje- eller vattendimma och orsakar uppbyggnad av material som ökar strävheten på ytorna och till viss del ändrar formen på vingprofilerna. De partiklar som orsakar nedsmutsning är vanligtvis mindre än 2 till 10  $\mu\text{m}$  (Kurz & Brun, 2007, s. 174). Typiska exempel på nedsmutsande partiklar är rök, oljedimma och havssalter.

Den effektivaste åtgärden mot nedsmutsning och dess effekter är ett effektivt luftfiltreringssystem som är utformad att reducera inflödet av små partiklar. Kontroll och rengöring av luftfilter på regelbunden basis är en viktig del av det löpande underhållsarbetet.

### **Högtemperaturkorrosion**

Högtemperaturkorrosion är en accelererad oxidation av legeringar som orsakas av utfällning av  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Utfällningarna är ett resultat av inflödet av svavel från förbränning och salter i luften. Korrosionen inträffar vid temperaturer mellan  $816^\circ\text{C}$  och  $927^\circ\text{C}$  då det finns tillgång till natriumsulfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) (Boyce, 2012, s. 501). Högtemperaturkorrosion orsakar nedbrytning av skovelbladens material och minskar komponenternas livstid.

Förebyggande åtgärder är att använda sig utav lågsvavligt bränsle och god luftfiltrering samt regelbunden rengöring av luftfilter.

### **Korrosion**

Korrosion orsakas av såväl föroreningar i inloppsluften och av föroreningar som härrör sig från bränsle och förbränningen. Korrosion orsakas ofta av salter som natrium och kalium, men även förekomsten av bly och vanadin är orsakar korrosion (Kurz & Brun, 2007, s. 176).

Förebyggande åtgärder mot korrosion är samma som för högtemperaturkorrosion.

### **Erosion**

Erosion innebär att material på mekanisk väg slipas bort i flödesvägarna i turbinen. Detta sker då hårda eller inkompressibla partiklar kolliderar mot material i flödesvägen. Sådana partiklar måste vanligtvis vara större än 10 µm i diameter för att ha en inverkan på materialet (Kurz & Brun, 2007, s. 176).

Partiklarna härstammar vanligtvis från föroreningar i inloppsluften samt från beläggningar i brännkammaren som lossnar och följer med gasströmen.

Förebyggande åtgärder mot erosion är inspektion av brännkammarna och rengöring från eventuella beläggningar, samt filtrering av inloppsluften och rengöring av luftfilter.

### **Skador**

Fysiska skador på anläggningen är ofta ett resultat av att ett främmande föremål kolliderar med komponenter i flödesvägen. Föremålen kan nå anläggningen genom inloppsluften eller vara ett resultat av att en del inuti gasturbinen lossnat.

Förebyggande åtgärder är att okulärt besikta de delar av anläggningen som nås utan att behöva ta isär komponenter samt försäkra sig om att inga föremål befinner sig så att de kan sugas in med inloppsluften.

### **Avskavning**

Avskavning orsakas då en roterande del gnider mot en stationär del. Då material nöts bort ökar spelet i delarna, vanligtvis leder detta till bristfälliga tätningar och bortnötning av material från exempelvis skovelspetsar.

Förebyggande åtgärder är att kontrollera smörjoljan, eventuella tecken på läckage från smörjoljesystemet samt kontrollera spelet mellan rörliga och stationära delar.

## 12.1 Proaktiv övervakning

För att bestämma gasturbinens kondition och därmed dess behov av underhållsåtgärder utgår vi från en proaktiv övervakning av systemets kondition.

Detta görs genom att monitorera gasturbinens verkningsgrader. Då det saknas en givare för temperaturen före gasgeneratorns skovelhjul kan inte en helt tillförlitlig beräkning göras enbart utifrån de värden som ges av tryck och temperaturer i gasturbinen. Istället använder vi oss av bränslemassflödet till turbinen samt den utvecklade effekten som ges av vattenbromsen.

Uträkningarna blir då följande:

För hela systemet:

$$P_{bränsle} = \dot{m}_{bränsle} * H_i$$

$$\eta_{anläggning} = P_{vattenbroms} / P_{bränsle}$$

För kompressorn:

$$\eta_k = \frac{c_p * (T_{2s} - T_1)}{c_p * (T_2 - T_1)}$$

(Alvarez, Energiteknik del 2, 2006, s. 970)

För arbetsturbin:

$$\eta_{Ta} = \frac{c_p * (T_4 - T_5)}{c_p * (T_4 - T_{5s})}$$

(Alvarez, Energiteknik del 2, 2006, s. 970)

Således kan verkningsgraden för turbinens olika delar, utom gasgeneratorn, beräknas. Om påtagliga och permanenta ändringar i systemets verkningsgrad visar sig är det möjligt att utröna i vilken del av gasturbinen problemet härrör sig ifrån. Bristfälligheten i detta övervakningssystem är att det inte tar hänsyn till mekaniska förluster.

Tack vare att både kompressor och arbetsturbin går att övervaka med relativt god noggrannhet är det även möjligt att utröna om problemet ligger hos gasgeneratoren eller i ökning mekaniska förluster. Genom att eventuella förändringar i verkningsgraderna för kompressor och arbetsturbin inte motsvarar förändringen i hela systemets verkningsgrad. På så vis begränsas de områden som måste felsökas vid eventuella förändringar i anläggningens verkningsgrad.

## 12.2 Schemalagda underhållsåtgärder

<b>Intervall</b>	<b>Åtgärd</b>	<b>Utfört den</b>
<b>24 månader</b>	Byte av olja och oljefilter på gasturbinen	
<b>12 månader</b>	Kontroll av flamrör	
<b>12 månader</b>	Okulär besiktning av turbinernas skovlar	
<b>6 månader</b>	Okulär besiktning av kompressorns vingprofiler	
<b>12 månader</b>	Okulär besiktning av förbränningskammarna	
<b>12 månader</b>	Kontrollera tändstiftens kondition.	
<b>6 månader</b>	Kontroll av anläggningens verkningsgrad.	



## Nomenklatur

$P_k$  = Ideal kompressoreffekt

$P_t$  = Ideal turbineffekt

$P_{tot}$  = Ideal total effekt

$Q_{2,3}$  = värmefflöde mellan kompressor och gasgenerator turbin

$\eta_b$  = Termisk verkningsgrad för turbin i Braytonprocess

$r_p$  = tryckkvot för kompressor

$i_1$  = entalpi för luft in till kompressor

$i_2$  = entalpi för luft efter kompressor

$i_{2s}$  = isentrop entalpi för luft efter kompressor

$i_3$  = entalpi för gaser efter förbränning

$i_{3s}$  = isentrop entalpi för gaser efter förbränning

$i_4$  = entalpi för gaser efter gasgenerator turbin

$i_{4s}$  = isentrop entalpi för gaser efter gasgenerator turbin

$i_5$  = entalpi för gaser efter arbetsturbin

$i_{5s}$  = isentrop entalpi för gaser efter arbetsturbin

$\eta_{ideal}$  = ideal termisk verkningsgrad för Braytoncykeln

$P_{Ta.verklig}$  = verklig effekt för arbetsturbin

$\eta_c$  = termisk verkningsgrad för en arbetscykel

$\dot{m}$  = massflöde

$H_i$  = effektivt värmevärde

$c_p$  = specifik värmekapacitet

$P_{vattenbroms}$  = uppmätt i effekt i vattenbromsen

$T$  = temperatur

## Källor

- Alvarez, H. (2003). *Energiteknik Del 2*. Lund: Studentlitteratur.
- Alvarez, H. (2006). *Energiteknik del 2*. Lund: Studentlitteratur AB.
- Boeing. (2017). (den 21 02 2017 *Historical snapshot*. Hämtat från Boeing:  
<http://www.boeing.com/history/products/model-502-gas-turbine-engine.page>
- Boyce, M. P. (2012). *Gas turbine engineering handbook fourth edition*. Waltham: Butterworth-Heinemann.
- Dallaire, G. (den 17 11 2015). *Maintaining gas turbine systems: What you need to know- Part 1*. Hämtat från Forester Daily News: <http://foresternetwork.com/daily/energy/energy-management/maintaining-gas-turbine-systems-what-you-need-to-know-part-1/>
- Eklund, G., & Runcrantz, N. (2016). *Styrssystem för gasturbin*. Mariehamn: Högskolan på Åland.
- Froude Engineering Limited. (1975). *Instruction manual 776/2*. Worcester: Froude.
- Försvarets materielverk. (1970). *Strv 103 Motoranläggning*. Sundbyberg: Armematerieförvaltningen.
- Giampaolo, T. (2014). *Gas turbine handbook: Principles and practices-Fifth edition*. Lilburn: The Fairmont Press.
- Huang, M., & Gramoll, K. (den 21 01 2017). *Thermodynamics - Theory*. Hämtat från eCourses: [https://ecourses.ou.edu/cgi-bin/ebook.cgi?doc&topic=th&chap\\_sec=09.1&page=theory](https://ecourses.ou.edu/cgi-bin/ebook.cgi?doc&topic=th&chap_sec=09.1&page=theory)
- Kurz, R., & Brun, K. (2007). Maintenance and operating practices effects on degradation and life. *Gas turbine tutorial* (ss. 173-185). Texas: Texas A&M University.
- Lindström, R. O. (den 26 01 2012). *Historien bakom Strv 103 "S"*. Hämtat från ointres: [http://ointres.se/strv\\_103.htm](http://ointres.se/strv_103.htm) den 21 02 2017
- Richar A. Leyes, W. A. (1999). *The history of North American small Gas Turbine Aircraft Engines*. Smithsonian Institution.

# Checklista för gasturbinanläggning

Det är av yttersta vikt för driftens och driftoperatörens säkerhet att checklistan följs noggrant.

Sätt kryss i rutorna för varje åtgärd ni utför.

## Förberedelser för start:

- Avlägsna kompressorskydd
- Öppna avgasspjäll
- Kontrollera att slanganslutningarna till oljekylaren sitter som de ska
- Kontrollera oljenivån i gasturbinen
- Öppna bränsleventiler (2 st.) vid bränsletank nr. 9 och vid DG 2.
- Kontrollera oljenivån i bägge dimsmörjebehållarna. Vid låg nivå: fyll på med "Q8 HOLST 68"
- Koppla in utluftslangen (blå) i kontrollpulpeten (luft ut)
- Koppla in inluftslangen (svart) i kontrollpulpeten (luft in)
- Öppna processluftens ventil till vattenbromsen
- Öppna ventilen till vattenbromsens smörjsystem
- Kontrollera att trycket i dimsmörjningens regulator är 1-1,5 bar
- Kontrollera att dimsmörjarna ger cirka 20 droppar/min
- Baxa vattenbromsen och kontrollera att den löper smidigt
- Kontrollera infästningarna för kardanaxeln mellan vattenbroms och arbetsturbin
- Smörj kardanaxeln vid behov (då inget smörjfett syns vid infästningarna)
- Fäst ultraljudsmätare för flöde på röret på pumpens trycksida
- Öppna ventil på vattenpumpens sug sida
- Starta vattenpump
- Öppna långsamt ventilen på pumpens trycksida
- Koppla in kabelhandsken för vattenbromsen i kontrollpulpeten
- Koppla in strömkabeln för kontrollpulpeten
- Koppla in strömkabeln för laptop

- Vrid på reglaget "main switch" till kontrollpulpeten (på höger sida; skall lysa grönt)
- Koppla in nätverkskabeln från laptop till gasturbin
- Koppla in gasturbinens gasreglagekontakt
- Avlägsna locket för gasturbinens ellåda (2 tumskruvar, främre hörn)
- Koppla i batterikablar till gasturbinens ellåda (2 st)
- Slå till dvärgsäkringar i gasturbinens ellåda (2 st)
- Vänta tills laptops nätverkssymbol har en gul triangel med utropstecken
- Starta gasturbinens styrsystem genom att klicka på genvägen "gasturbin" på skrivbordet
- Klicka på "Run" i styrsystemet
- Vänta tills lampan "kontakt med DAQ" lyser
- Kontrollera att PLC-skärmen är startad och ger värden
- Öppna tilluftspjäll på östra väggen
- Se till att utventilen för vattnet på vattenbromsen är fullt öppen (både fysiskt på vattenbromsen och på styrsystemets frontpanel)
- Kontrollera att vridmomentet visar rätt på vattenbromsens frontpanel (skall visa noll då turbinen inte är i drift). Om vridmomentet inte visar noll skall bromsen kalibreras innan denna checklista följs ytterligare (se separat checklista för kalibrering av bromsen)
- Justera gasreglaget för gasturbinen till lägsta läget, när gasturbinen startas kommer den automatiskt gå upp till tomgångsvarvtal ( ca. 20 00 rpm)
- Kontrollera att nödstoppen för gasturbinen inte är aktiverad.

### **Start av gastubinen:**

- Inhämta starttillstånd av handledaren
- Efter längre stillestånd (flera dagar), starta "OIL-PUMP" (tryck ner knappen och släpp) pumpen bör gå i ca. 6-7 sekunder via tidrelä
- Vrid "SWITCH" på kontrollpanelen till 1, bränslepumpen bör starta
- Kontrollera bränsletrycket på bränsletrycksmanometern, skall stabiliseras till ca. 1,8 bar
- Tag på hörselskydd!
- Tryck på knappen "start"

### **Drift av gastubinen:**

- Kontrollera att alla temperaturer och tryck är normala enligt tillverkarens specifikationer (se manual)
- I långsam takt: öka gaspådrag och belastning simultant

### **Driftstopp:**

- Sänk varvtalet på gasturbinen genom att dra ner gasreglaget
- Då gasturbinen når cirka 19000-2000 rpm stängs turbinen av antingen via stoppknapp på frontpanelen eller via nödstoppet på manöverlådan.
- Stäng av vattenpumpen och tillhörande ventiler
- Låt dimsmörjningen gå 2-3 minuter och stäng sedan av lufttillförseln
- Stäng bränsleventilerna

## Vaktrapport för maskinhallen



Namn:

Datum:                    /                    / 20

Klass / Grupp:

Vakttid / Laboration:

### Start / Stopp Tid

Starttid

Stopptid

Körtimmar

### Caterpillar GT-553

Tag	Varvtal [rpm]	Not. 1	Not. 2	Not. 3	Not. 4	Not.5
	Varvtal gasgenerator					
	Varvtal arbetsturbin					
	Varvtal vattenbroms					
Tag	Tryck (bar)	Not. 1	Not. 2	Not. 3	Not. 4	Not.5
	Kompressor					
	Före gasgenerator					
	Bränsletryck					
Tag	Temperaturer (°C)	Not. 1	Not. 2	Not. 3	Not. 4	Not.5
	Temperatur i rummet					
	Kompressor					
	Före gasgenerator					
	Avgas, höger					
	Avgas, vänster					
	Avgas, uttlopp					
	Vatteninlopp, vattenbroms					
	Vattenutlopp, vattenbroms					
Tag	Flöde	Not. 1	Not. 2	Not. 3	Not. 4	Not.5
	Bränsleflöde					
	Vattenflöde, vattenbroms					
Tag	Effekt	Not. 1	Not. 2	Not. 3	Not. 4	Not.5
	Vridmoment, vattenbroms					
	Effekt (kW), vattenbroms					

Kontroller ; Nivåer		Namn	Enhet
Systemolja gasturbin			$\frac{x}{4}$
Dimsmörjarolja, vattenbroms			$\frac{x}{4}$
Vattennivå, vattentank			$\frac{x}{4}$

Vidtagna serviceåtgärder; Anmärkningar

# Maskinlaboration X.X

## Gasturbinkörning

### Avsikt

Laborationen skall ge insikt i drift och effektivitet hos gasturbiner beroende på belastning och varvtal.

### Utförande

- Inled med att gå igenom manualen och förvissa er om att ni har förstått hur gasturbinen är uppbyggd och hur styrsystemet fungerar.
- Förbered gasturbinen för uppstart genom att följa checklistan för gasturbinen. Kryssa i på checklistan efter att ni utfört en åtgärd så att ni försäkrar er om att alla åtgärder har utförts innan start.
- Starta gasturbinen.
- Då gasturbinen uppnått tomgångsvarvtal fylls kladden för gasturbinen i. Öka sedan succesivt varvtal och belastning i steg om: 4000 rpm för gasturbin och  $18^\circ$  för vattenbromsens vridspjällsventil. Fyll i kladden då alla värden stabiliserat sig efter vardera ökning av varvtal och belastning.
- Då gasturbinen körts med 39 000 rpm vid fullt stängd ( $90^\circ$ ) pneumatisk reglerventil på vattenbromsens utlopp, körs gasturbinen succesivt ner till tomgångsvarvtal samtidigt som belastningen minskas succesivt.
- Följ checklistan för driftstopp och stäng ner anläggningen.

### Behandling

1. Beräkna följande som funktion av belastningen:
  - Kompressorns, gasgenerator turbinens och arbetsturbinens isentropiska verkningsgrader.
  - Beräkna effekten för kompressorn, gasgenerator turbinen samt arbetsturbinen. Utgå från massflödet luft in till kompressorn.
  - Turbinarbete som åtgår för att driva kompressorn och de hjälpapparater som är kopplade till gasgeneratorns axel. Utgå ifrån att de mekaniska förlusterna är 1%.
  - Det specifika arbetet för arbetsturbinen.
  - Den specifika bränsleförbrukning (SFC) samt gasturbinens termiska verkningsgrad.
  - Redovisa anläggningens förluster i ett Sankey-diagram med avseende på avgasförluster, drift av kompressor och hjälpapparater samt mekaniska förluster.

Beräkningarna utförs i Microsoft excel och redovisas i diagramform.

2. Redovisa hur effekten på den utgående axelns beräknas via vattenbromsen. Beräkna även effekten som tas upp av vattenbromsen utgående ifrån massflödet vatten in till bromsen samt temperaturdifferensen mellan ingående- och utgående vatten.