

EBOB - Fasadar med solceller eller planter

Ekspérimentell studie av brannsikkerheit i fasadar med solceller (del 1) eller planter (del 2)

RISE RAPPORT 2024:98

Janne Siren Fjærestad, RISE Fire Research

Reidar Stølen, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet og RISE Fire Research

Jens Steemann Kristensen (del 1), Dansk Brand- og sikringsteknisk Institut

EBOB - Fasadar med planter eller solceller: Eksperimentell studie av brannspreiing i fasadar med solceller (del 1) eller planter (del 2)

Janne Siren Fjærestad, RISE Fire Research
Reidar Stølen, NTNU og RISE Fire Research
Jens Steemann Kristensen (del 1), DBI

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE-rapport 2024:98

ISBN: 978-91-89971-64-6

Prosjektnummer: 20798-1

Kvalitetssikring: Ragni Fjellgaard Mikalsen

Finansiert av: Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) og Direktoratet for Byggkvalitet (DiBK)

Forsidebilde: RISE Fire Research

Trondheim 2024

Innhald

Innhald	2
Executive Summary	4
Samandrag.....	6
Forord.....	8
1 Introduksjon	9
1.1 Bakgrunn	9
1.2 Målsetjing og forskingsspørsmål	10
1.3 Omfang og avgrensingar	10
1.4 Metodeskildring	10
1.5 Etiske vurderingar	11
1.6 Ordliste	11
2 Kartlegging	13
2.1 Del 1: Solceller.....	13
2.1.1 Bruk av solcellemodular på fasadar i Noreg	14
2.2 Del 2: Grøne fasadar med planter	15
2.2.1 Bruk av grønne planteveggar i Noreg.....	17
2.3 Regelverk	19
2.3.1 Del 1: Solceller.....	19
2.3.2 Del 2: Grøne fasadar.....	20
2.4 Litteratur.....	21
2.4.1 Holrom og fasadar	21
2.4.2 Del 1: Solceller.....	22
2.4.3 Del 2: Grøne fasadar.....	22
3 Brannforsøk.....	24
3.1 Forsøksoppsett.....	24
3.1.1 Instrumentering	24
3.1.2 Brannkjelde	26
3.2 Material	27
3.2.1 Del 1: Solceller.....	27
3.2.2 Del 2: Grøne plantesystem	28
3.3 Utførde forsøk	32
3.3.1 Del 1: Solceller.....	32
3.3.2 Del 2: Grøne plantesystem	33
4 Resultat.....	35
4.1 Del 1: Solceller.....	35
4.1.1 Skildring av typiske brannforløp.....	35

4.1.2	Typisk forløp for varmeavgivingsrate	37
4.1.3	Forløp for varmeavgivingsrate for ulike kombinasjonar	38
4.1.4	Total varmeavgiving.....	41
4.1.5	Nøkkelresultat frå alle forsøk med solcellemodular.....	43
4.1.6	Statistikk.....	45
4.2	Del 2: Grøne plantesystem	46
4.2.1	Ekstern brannkjelde - ubrennbart plantesystem med planter.....	47
4.2.2	Brann i plantene i veggen – ubrennbart plantesystem.....	49
4.2.3	Brann i holrom – ubrennbart plantesystem.....	51
4.2.4	Ekstern brannkjelde – brennbart plantesystem med planter.....	51
4.2.5	Ekstern brannkjelde – brennbart plantesystem utan planter.....	55
4.2.6	Brann i plantene i veggen – brennbart plantesystem.....	57
4.2.7	Brann midt i plantene i veggen – brennbart plantesystem.....	61
5	Diskusjon.....	66
5.1	Del 1: Solceller.....	66
5.1.1	Kva parameter kan tilpassast ved bygging av fasadar med solcellemodular?.....	66
5.1.2	Kva parameter gir størst utslag på faren for brann?	67
5.1.3	Korleis kan fasadar med solcellemodular utformast med minst mogleg fare for brann? 68	
5.2	Del 2: Grøne plantesystem	69
5.2.1	Kva parameter kan tilpassast ved etablering av grønne planteveggar?	69
5.2.2	Kva parameter gir størst utslag på faren for brann?	70
5.2.3	Korleis kan fasadar med planteveggar utformast med minst mogleg fare for brann? 71	
6	Konklusjonar	72
6.1	Del 1: Solceller.....	72
6.2	Del 2: Grøne plantesystem	73
7	Referansar.....	75
	Vedlegg A - Oversikt over planter	78
	Vedlegg B – Planter som tilfredsstillir minimum B-s3,d2.....	80

Executive Summary

EBOB - Facades with Plants or Photovoltaic Installations: Experimental Study of Fire Safety in Facades with Photovoltaic Installations (Part 1) or Plants (Part 2)

This study is funded by the Norwegian Directorate for Civil Protection (DSB) and the Norwegian Building Authority (DiBK) as part of the project portfolio under the research agreement between DSB and RISE Fire Research. Part 1 of the study on photovoltaics was carried out in collaboration with the Fire Research and Innovation Centre (FRIC) and the Danish Institute of Fire and Security Technology (DBI).

The aim of the study has been to shed light on the three research questions:

1. What parameters can be adjusted when constructing facades with photovoltaic modules or living plants?
2. Which parameters have the greatest impact on the fire hazard:
 - a. On the ignition hazard?
 - b. On the hazard of vertical fire spread along the facade?
 - c. On the heat exposure to the building and neighboring buildings in the event of a fire?
3. How can facades with photovoltaic modules or living plants be designed with the least possible fire hazard?

To gain knowledge about the available solutions, and thus also which parameters can be adjusted, we have been in contact with suppliers of both photovoltaic modules and systems for green facades, as well as other relevant actors, such as building owners and researchers working with such systems. A mapping of Norwegian regulations relevant to fire safety in buildings with photovoltaic installations or green facades has also been carried out.

Furthermore, a literature study and a series of medium-scale fire experiments have been conducted to answer research questions 2 and 3. A total of 35 experiments were carried out, 25 with photovoltaic modules and 10 with green plant systems.

Part 1 Photovoltaic Installations: It was found that three important factors for how a fire can develop in a facade with photovoltaic installations are:

- the distance between the wall and the photovoltaic modules,
- whether the photovoltaic modules are built with glass on one or both sides, and
- what other combustible materials are in the cavity.

Experiments with modules with monofacial glass (with exposed plastic on the back) and the smallest cavity (6 cm) produced the most intense fires. With increasing distance, the modules tolerated more heat from the initial fire and released less heat when they ignited. The same effect was found when switching from modules with monofacial glass to modules with bifacial glass (glass on both sides). It was found that increasing the cavity distance by 4-5 cm has the same effect as switching from monofacial glass modules to bifacial glass modules.

Part 2 Plants: When establishing green facade systems on the facade, one can choose between different products and solutions. Some of the systems are designed to be mounted on the existing facade, while others can be used as a replacement for the facade and thus function as the building's climate shell. On the market, there are both systems that meet class A1 or A2,s2,d0 according to EN 13501-1 and systems that have no fire classification at all. In addition, the plants and the physical extent of the greenery system can affect fire safety.

Experiments with the combustible green facade system showed both falling burning parts and burning droplets. The fall of entire modules from the plant system helped limit the upward spread of fire in the plant wall. However, the building wall was directly exposed to flames when the modules fell, and if the wall had been combustible and caught fire, this could contribute to further fire spread upwards in the cavity. Both falling burning parts and burning droplets can be a possible mechanism for downward fire spread. Additionally, this could cause problems for firefighting efforts or for evacuation and rescue from the building if burning debris falls near doors or other escape routes. Therefore, the placement of green facade systems should be planned so that potential falling debris does not cause the mentioned problems.

In the conducted experiments with the non-combustible green facade system, the measured temperatures on the wall surface were not high enough to pose a risk of ignition there. Nor would there be a risk of ignition for a neighboring building under the conditions used in this experimental series. However, fire in the plants in a plant wall has been shown to give short bursts of intense fire (high heat release rate), and we cannot therefore rule out fire spread to neighboring buildings under the right conditions.

Testing and classification for both systems: For both photovoltaic installations and green facade systems, it is challenging to conduct the necessary tests for classification according to EN 13501-1 in a relevant manner. Especially for green facade systems, the living plants mean that the fire properties change over time. For the classification to be relevant for the facade's properties throughout its lifespan, it is important that the tests are conducted with the systems in a condition that covers the variations that may occur. It is also important that the plants are followed up and maintained so that their condition remains within what the classification covers. Examples of parameters that can define this include moisture level in the plant substrate, amount of living and moist or withered and dry plant material, and type of plants. Photovoltaic modules can also be challenging to test in a good way to provide a relevant classification since the test methods are not adapted to the unique properties of a photovoltaic installation. Testing and classification of facade systems with living plants or photovoltaic modules is a significant basis for assessing properties under fire impact, and it is important to consider whether the tests underlying the classification are relevant for the intended use.

Key words: Photovoltaics, solar cells, PV, living walls, energy efficient buildings, green facades, green walls, green buildings, green facade systems

Samandrag

Denne studien er finansiert av Direktoratet for samfunnstryggleik og beredskap (DSB) og Direktoratet for byggkvalitet (DiBK) som ein del av prosjektportefølgja under forskningsavtalen mellom DSB og RISE Fire Research. Del 1 av studien om solceller er utført i samarbeid med Fire Research and Innovation Centre (FRIC) og Dansk Brand- og sikringsteknisk Institut (DBI).

Målet med studien har vore å belyse dei tre forskingsspørsmåla:

1. Kva parameterar er det mogeleg å tilpassa ved bygging av fasadar med solcellemodular eller levande planter?
2. Kva parameterar gir størst utslag på faren for brann
 - a. På faren for tenning?
 - b. På faren for vertikal brannspreiing langs fasaden?
 - c. På varmeeksponeringa mot bygget og nabobygget ved brann?
3. Korleis kan fasadar med solcellemodular eller levande planter utformast med minst mogeleg fare for brann?

For å få kunnskap om kva som finns av løysingar, og dermed også kva parameter som kan tilpassast, har me vore i kontakt med leverandørar av både solcellemodular og plantesystem i tillegg til andre relevante aktørar slik som bygningseigarar og forskarar som jobbar med slike system. Det er også utført kartlegging av norsk regelverk som er relevant for brannsikkerheita i bygningar med solcellemodular eller plantesystem montert på fasaden.

Vidare er det utført litteraturstudium og mellomskala brannforsøk for å kunne svare på forskingsspørsmål 2 og 3. Det vart i alt utført 35 forsøk, 25 med solcellemodular og 10 med grøne plantesystem.

Del 1 Solceller: Det er funne at tre viktige faktorar for korleis ein brann kan utvikle seg i ein fasade med solcellemodular er:

- avstanden mellom vegg og solcellemodul,
- om solcellemodulane har einsidig eller tosidig glas og
- kva for andre brennbare material som er i holrommet.

Forsøka med modular med einsidig glas (med eksponert plast på baksida) og det minste holrommet (6 cm) gav dei kraftigaste brannane. Med aukande avstand tolte modulane meir varme frå startbrannen og gav frå seg mindre varme når dei tok fyr. Same effekt vart funne ved å bytte frå modular med einsidig glas til modular med tosidig glas. Det vart funne at å auke holromsavstanden med 4-5 cm har same effekt som å bytte frå modulen med einsidig glas til tosidig glas.

Del 2 Planter: Ved etablering av grøne plantesystem på fasaden kan ein velja mellom ulike produkt og løysingar. Nokre av systema er laga for å monterast utanpå den eksisterande fasaden, medan andre kan brukast som erstatning for fasaden og dermed fungere som klimaskalet til bygningen. På marknaden finns det både system som etter EN 13501-1 tilfredsstillar klasse A1 eller A2,s2,d0 og også system som ikkje har noko brannklassifisering i det heile. I tillegg vil plantene og den fysiske utstrekkinga av plantesystemet kunne påverke brannsikkerheita.

Forsøka med det brennbare plantesystemet viste både nedfall av brennande delar og brennande dråpar. Nedfall av heile modular frå plantesystemet bidrog til å begrensa brannspreiinga oppover i planteveggen. Bygningsveggen vart likevel direkte eksponert for flammer når modulane fall ned, og dersom veggen hadde vore brennbar og teke fyr, kunne dette bidrege til brannspreiing vidare oppover i holrommet. Både nedfall av brennande delar og brennande dråpar vil vera ein mogleg mekanisme for brannspreiing nedover. I tillegg vil dette kunne medføre problem for sløkkeinnsats, eller for evakuering og redning frå bygget dersom brennande nedfall rammar ned ved dører eller andre rømmingsvegar. Plassering av plantesystema bør difor planleggast slik at mogleg nedfall ikkje vil medføre nemnde problem.

I dei utførde forsøka med det ubrennbare plantesystemet vart det ikkje målt høge nok temperaturar på veggoverflata til at det var fare for tenning der. Heller ikkje for eit nabobygg ville det vore fare for tenning ved forholda brukt i denne forsøksserien. Likevel, brann i plantene i ein plantevegg har vist å gi korte blaff med ein intens brann (høg varmeavgivingsrate), og vi kan derfor ikkje utelukka brannspreiing til nabobygg under dei rette forholda.

Testing og klassifisering, for begge systema: Både for solcellemodular og planteveggar er det utfordrande å gjennomføre nødvendige testar for klassifisering etter EN 13501-1 på ein relevant måte. Spesielt for grøne planteveggar gjeld også at dei levande plantene medfører at branneegenskapane endrar seg over tid. For at klassifiseringa skal vera relevant for fasaden sine eigenskapar gjennom levetida er det viktig at testane blir gjennomført med systema i ein tilstand som dekkjer variasjonane som vil kunne oppstå. Det er også viktig at plantene vert følgde opp og vedlikehaldne slik at tilstanden held seg innanfor det som klassifiseringa dekkjer. Døme på parametarar som kan definera dette kan vera fuktnivå i plantesubstratet, mengde levande og fuktig eller visna og tørt plantemateriale og type planter. Også solcellemodular kan vera utfordrande å teste på ein god måte for å kunne gi ein relevant klassifisering sidan testmetodane ikkje er tilpassa dei særigne eigenskapane til ein solcelleinstallasjon. Testing og klassifisering av fasadesystem med levande planter eller solcellemodular er eit vesentleg grunnlag for å kunne vurdere eigenskapane ved brannpåverknad, og det er viktig å vurdere om testane som ligg til grunn for klassifiseringa er relevant for den aktuelle bruken.

Stikkord: Solceller, PV, planteveggar, energieffektive bygg, grøne fasadar, grøne bygg

Nøkkelord: Photovoltaics, solar cells, PV, living walls, energy efficient buildings, green facades, green walls, green buildings, green facade systems

Forord

RISE Fire Research har dei siste åra gjennomført fleire studiar på brannsikkerheit i solcelleinstallasjonar, som ein del av ein prosjektserie om energieffektive bygg og brannsikkerheit (EBOB). Denne studien inngår som ein del av denne serien og ser på brannsikkerheit i fasadar med solcellemodular eller planter.

Denne studien er finansiert av Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) og Direktoratet for byggkvalitet (DiBK) som ein del av prosjektportefølgja under forskningsavtalen mellom DSB og RISE Fire Research. Del 1 av studien som omhandlar brannsikkerheit i fasadar med solcellemodular er utført i samarbeid med Fire Research and Innovation Centre (FRIC) som ein del av PhD arbeidet til Reidar Stølen. FRIC er finansiert av alle partnerne og en betydelig gave donert av Gjensidigestiftelsen gjennom Norges Forskningsråd (program BRANNSIKKERHET, prosjektnummer 294649). Del 1 av studien er også utført i samarbeid med DBI - Dansk Brand- og sikringsteknisk Institut og vi vil takke DBI for å ha stilt Jens Steemann Kristensen til disposisjon i samband med utforming av forsøka, analysearbeid og diskusjonar av resultata.

Me vil gjerne takke representantar frå solcellebransjen, ulike aktørar som arbeider med grønne planteveggar og forskarar i Noreg og Europa som har delt av sin kunnskap, bidrege med innspel, casar og bilete til studien.

Me vil og takke BG Byggros som bidrog med støtte til plantesystema og plantene, og som gjennom deltaking i forsøka sikra realistisk bruk av plantesystema.

Janne Siren Fjærestad, prosjektleiar

Trondheim desember, 2024



1 Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Dei siste åra har det skjedd ei rask utvikling av ulike typar bygningsfasadar. Fasaden til ein bygning avgjer korleis bygningen ser ut, men den påverkar også komforten til personar inne i bygningen ved å regulera lysinnslepp og temperatur, og ikkje minst påverkar den kor mykje energi som trengst for oppvarming, avkjøling og ventilasjon i bygningen. I tillegg kan fasaden produsera elektrisk energi ved å integrera solcellemodular eller bidra til å fange CO₂, fordrye vatn og reinse lufta ved å ha planter veksande oppover fasaden. Alle desse omsyna til ein fasade er med på å auke kompleksiteten til fasadekonstruksjonen og kan medføra endringar i brannsikkerheita [2].

Solcellemodular kan vera godt eigna til montering på fasadar, og dette kan vera spesielt godt egna for norske tilhøve der straumforbruket er størst om vinteren medan sola står lågt og det kan liggja snø på takmonterte solcellemodular. Gjennom eit år kan faktisk veggmonterte solcellemodular i enkelte tilhøve produsera meir straum enn takmonterte solcellemodular [3]. Solcelleinstallasjonar er elektriske installasjonar som kan føra til brann dersom det oppstår ein elektrisk feil. I tillegg er solcellemodular på fasadar oftast monterte med ventilerte holrom bak solcellene, noko som kan føra til at ein brann kan spreie seg oppover til store delar av bygningen på kort tid. Solcellemodular er i stor grad laga av ubrennbare materiale, men dei inneheld også ein del brennbare plastmateriale som kan vera tilstrekkeleg til å oppretthalda ein brann som kan spreie seg i holrommet. Solcellemodular er stort sett produserte med glas på framsida og enten ein plastfilm eller eit lag med glas på baksida. Dersom komponentar i holrommet tek fyr, kan det føre til svekking av innfestingssystema, og føre til nedfall av solcellemodular, som demonstrert i eit storskala brannforsøk ved RISE Fire Research / FRIC [4].

Det finst ulike tekniske løysingar for å dekkje ei fasade med levande planter. Plantene kan enten vekse i bakken ved sidan av bygningen og klatre oppover langs fasaden, eller dei kan vekse i eit vekstmedium som er montert i lommer eller hyller oppover fasaden. Slike system er i mange høve laga av plast, betong, stål eller aluminium, og kan ha svært ulike branneegenskapar. I tillegg til materiala som plantene er festa til fasaden med vil det vera ulike typar og mengder av vekstmedium plantene veks i. Vekstmediet må tilførast vatn for at plantene skal kunna veksa. Mengda vatn som til ei kvar tid er i vekstmediet vil også kunna påverka eigenskapane til systemet ved ein brann. For norske forhold må ein ta omsyn til korleis slike system kan fungere om vinteren ved lengre periodar med kuldegrader. Til sist vil sjølve plantemateriale i ulike typar planter ha ulike eigenskapar ved brann. Branneegenskapane vil kunne vera påverka av både plantart, storleik, alder på planta, tid på året og fuktinnhald. For norske tilhøve må det også veljast planter som toler dei klimatiske tilhøva der bygningen er.

Fasadar med plantesystem og solcellemodular har ein del fellestrekk der brennbare materiale og brannspreiing i holrommet i begge tilhøve kan bidra til rask brannspreiing over fasaden og fare for at brannen kan spreie seg inn i store delar av bygningen på kort tid. Denne rapporten omhandlar begge systema samla, på grunn av fleire fellestrekk i utforming og i dei relevante gjeldande regelverka og standardane. Utviklinga av desse fasadane skjer raskt, og det er viktig

at bygga og regelverket vert tilpassa for å sikre at slike fasadar blir bygde med tilstrekkeleg brannsikkerheit.

1.2 Målsetjing og forskingsspørsmål

Målet med prosjektet er å bidra til meir kunnskap om brannsikkerheit i energieffektive bygg med fasadar med solcellemodular og/eller planter.

Prosjektet skal kartleggja ulike tekniske løysingar for å installera solcellemodular eller levande planter på fasadar, og å finna ut kva val som kan gjerast i desse konstruksjonane for å sikra best mogeleg brannsikkerheit i bygningen.

Studien skal kasta lys på fylgjande forskingsspørsmål:

1. Kva parameterar er det mogeleg å tilpassa ved bygging av fasadar med solcellemodular eller levande planter?
2. Kva parameterar gir størst utslag på faren for brann
 - a. På faren for tenning?
 - b. På faren for vertikal brannspreiing langs fasaden?
 - c. På varmeeksponeringa mot bygget og nabobygget ved brann?
3. Korleis kan fasadar med solcellemodular eller levande planter utformast med minst mogeleg fare for brann?

1.3 Omfang og avgrensingar

Prosjektet omhandlar brannsikkerheit for fasadar med solcellemodular eller grøne plantesystem. Brannsikkerheita for fasadar med ein kombinasjon av begge desse typane installasjonar er ikkje vurdert.

Det finst mange typar både solcellemodular og ikkje minst ferdige plantesystem med plantar. For den eksperimentelle delen av denne studien er det for solceller valt å studere to hovudtypar, ein type einsidige solcellemodular og ein type tosidige solcellemodular. Begge typane er frå same leverandør. For plantesystema er det også valt å studere to ulike system frå same leverandør, det eine er eit ubrennbart system og det andre er eit brennbart system. Det er valt både solcellemodular og plantesystem som er tilgjengelege på den norske marknaden.

Studien fokuserer på kva val som kan gjerast kring dei nemnde systema av solcellemodular og plantevegger. Val som kan gjerast når det gjeld sjølve bygningen er ikkje ein del av studien.

1.4 Metodeskildring

Det er utført kartlegging av norsk regelverk som er relevant for brannsikkerheita i bygningar med solcellemodular eller plantesystem montert på fasaden.

For å få kunnskap om kva som finst av løysingar og omfanget av bruken av grøne plantevegger i Noreg har vi vore i kontakt med fleire ulike aktørar i bransjen, slik som produsentar og leverandørar av ulike plantesystem, bygningseigarar og forskarar som jobbar med bruk av grøne

tak og fasadar for å handtera overvatn. Også for solcelleinstallasjonar har vi vore i kontakt med forskarar og leverandørar for å få eit overblikk over kva for løysingar som er i bruk.

Det er i tillegg til kartleggingsarbeidet valt ein eksperimentell tilnærming i studien. I mellomstor skala er det utført brannforsøk med både solcellemodular og planteveggar. Forsøksserien med solcellemodular vart utforma med repetisjonar og systematisk variasjon av nokre variablar slik at ein i ettertid kunne analysere resultatane med statistisk analyse. For forsøka med plantesystem vart det valt ei utforskande tilnærming for å sjå på korleis slike system vert påverka av ein brann og korleis dei påverkar brannforløpet.

1.5 Etiske vurderingar

I brannforsøka med solcellemodular var det ønska å studere to ulike typar solcellemodular, ein type med tosidig glas og ein type var med einsidig glas. Det vart valt to typar solcellemodular frå same produsent slik at desse elles hadde ganske like fysiske eigenskapar. Begge produkta er tilgjengelege på den norske marknaden. Modulane vart ikkje valt for å vera spesielt gode eller dårlege, men dei er tilfeldig valde ut i frå det som var tilgjengeleg på marknaden. Det har ikkje vore ei målsetning å framprovosere ekstreme brannfarer knytta til solcelleinstallasjonar, men å illustrere at brannfaren i ein solcelleinstallasjon på ein fasade kan variere ganske mykje etter korleis installasjonen er bygd opp. Innanfor rammene av prosjektet har det ikkje vore mogeleg å undersøke alle mogeleg variantar av solcelleinstallasjonar, dei vala som er gjort i forsøka er basert på tidlegare forskning, innspel frå ekspertar i bransjen og praktiske avgrensingar i prosjektet.

I brannforsøka med grøne planteveggar var det ønska å studere to plantesystem med ulike branneigenskapar. Forsøka er meint å vise korleis slike system kan påverke brannforløpet, og systema er valde som to døme på plantesystem som vert levert til den norske marknaden. Det vart valt ein leverandør som kunne lever både eit ubrennbart system og eit system laga av plastmateriale. Plantesystema med planter og vekstsubstrat vart kjøpte direkte frå leverandøren til ein noko redusert pris. I fasadar med plantesystem er det truleg endå fleire mogeleg variantar enn for fasadar med solcellemodular. Også her er det gjort utval basert på tidlegare forskning, innspel frå ekspertar i fagfeltet og praktiske avgrensingar.

1.6 Ordliste

Tabell 1-1 syner ei oversikt over ord og uttrykk brukt i denne rapporten.

Tabell 1-1: Oversikt over ord og uttrykk brukt i rapporten.

Ord/uttrykk	Tyding	Engelsk
BAPV	Utanpåmontert solcelleinstallasjon	Building attached photovoltaics
BIPV	Bygningsintegrert solcelleinstallasjon	Building integrated photovoltaics

Ord/uttrykk	Tyding	Engelsk
Blågrøn factor	Eit verktøy som vert brukt for å kvantifisera krav til ein utbyggjar med omsyn til uterom når det gjeld vatnhandtering, vegetasjon og biodiversitet [23]	
EBOB	Energieffektive bygg og brannsikkerheit, serie med studier hjå RISE Fire Research	
Einsidig glas	Solcellemodular med glas berre på framsida	Monofacial, glass-plastic
Grøne tak og fasadar	Grønne tak og fasader er bygningsflater som heilt eller delvis er dekkja av vegetasjon [5].	
Grøne veggar med klatreplanter	Veggar med faste planteartar som veks frå medium på bakken, tak- eller terrassekant (hengeplanter) [5]. Også gjerne kalla grønne fasadar [21].	Green facades
HRR	Varmeavgivingsrate (varmeavgivelseshastighet): Varmemengda som vert avgitt per tidseining ved forbrenning av eit materiale under angitte prøvingsbetingelsar, eining: watt (W) [6].	Heat release rate
Planteveggar	Veggar som er dekkja med modular som inneheld vekstmedium for moglege vekslende utvalg av planter [5]. Også gjerne kalla levande veggar eller grønne veggar [7,8].	Living walls, green walls
PV	Fotovoltaisk	Photovoltaic
Solcelleinstallasjon	Montert utstyr til eit solcellestraumforsyningssystem [9]. Vert her brukt om det komplette anlegget, inkludert solcellemodul og alt nødvendig tilleggsutstyr.	PV installation
Solcellemodul	Minste komplette samannstilling av samankobla solceller som er beskytta mot omgivingane [9].	PV module
Solcelle	Mest elementære eining som utviser den fotovoltaiske effekta, dvs. den direkte ikkje-termiske omdanninga av stråleenergi til elektrisk energi [9].	Solar cell, PV cell, Photovoltaic cell, Solar photovoltaic cell
THR	Varmeavgiving (varmeavgivelse): Varmemengda eit materiale avgir under forbrenning, eining: joule (J) [6].	Total heat release
Tosidig glas	Solcellemodular med glas bade på framsida og baksida.	Bifacial, glass-glass
Ubrennbart materiale	Materiale som ved prøving fyller kravet til ubrennbarheit [6].	Non-combustible

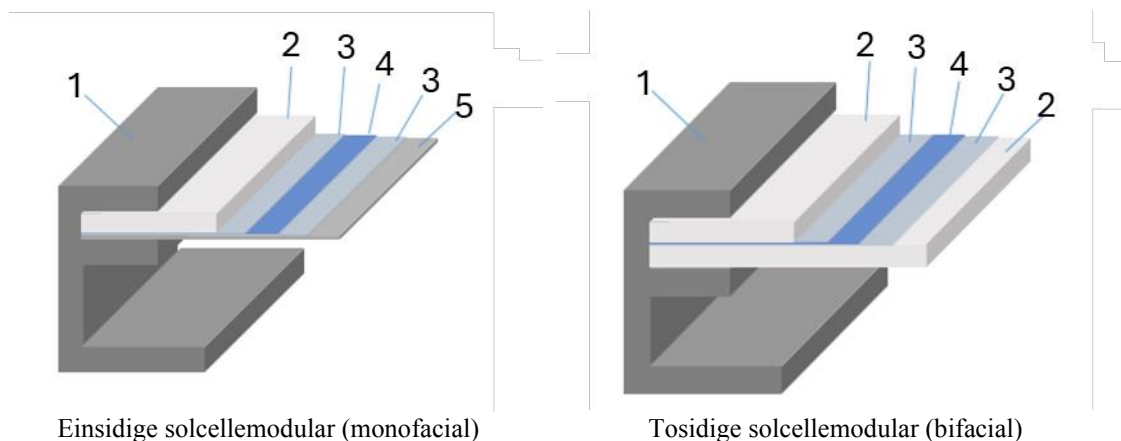
2 Kartlegging

I dette kapittelet vert funna frå kartleggingsarbeidet presentert. Det vert fyrst gitt ein introduksjon til solcellemodular på fasadar og grøne plantesystem på fasadar. Vidare vert det presentert kva regelverk som er relevant for brannsikkerheita i bygningar med solcellemodular eller plantesystem på fasadane. Avslutningsvis vert relevante funn i forskingslitteraturen presentert.

2.1 Del 1: Solceller

Solcellemodular på bygningar blir grovt sett delt inn i kategoriane BIPV eller BAPV. BIPV står for «Building Integrated Photovoltaics» og betyr at solcellene har ein bygningsteknisk funksjon og må erstattast med eit anna byggemateriale dersom dei blir fjerna [10]. For fasadar med solcellemodular vil dette oftast bety at solcellemodulane fungerer som ytterkledning [11]. BAPV står for «Building Attached Photovoltaics» og betyr at solcellemodulane er montert utanpå ein komplett bygning. For fasadar betyr dette at solcellemodulane er montert utanpå ein eksisterande ytterkledning og kan fjernast utan at ein må erstatte dei med andre byggemateriale.

Dei fleste solceller blir laga av silisium og desse er svært tynne og sprø. Desse blir innkapsla mellom to lag av plast og festa på baksida av ei glasplate. To ulike typar oppbygging av solcellemodular blir brukt til det som blir kalla «monofacial» med glas på framsida eller «bifacial» med glas på begge sider. Vidare i rapporten vil desse typane bli nemnd som einsidig glas eller tosidig glas. Figur 2-1 viser oppbygginga av dei ulike laga i ein solcellemodul der skilnaden mellom einsidige og tosidige ligg i at baksidefolien er bytta ut med ei glasplate i tosidige modular. Dette gjer at solcellene også kan produsere straum av lys som kjem inn frå baksida av solcellemodulen. Den sveitsiske bransjeforeninga Swissolar har utarbeidd ei retningslinje for solcellemodular på fasadar der dei hevdar at modular med tosidig glas kan oppnå klassen B-s1,d0 og modular med einsidig glas kan oppnå klassen D-s1,d0 etter EN 13501-1, men påpeikar at dette må dokumenterast for kvart enkelt produkt [12]. Tradisjonelle modular har som oftast ei ramme av aluminium rundt glaset, men det blir også laga modular utan ramme. Totalt innhald av plast i solcellemodular er omkring 10% av vekta [4,13].



Figur 2-1: Samansetning av dei ulike laga i einsidige og tosidige solcellemodular. 1. Ramme, 2. Glas, 3. Innkapslingsmateriale, 4. Solceller, 5. Baksidefolie. Figuren er omarbeidd frå brukarmanual til solcellene som vart brukte i forsøka [14].

For BIPV-installasjonar er det mange ulike alternativ, der det er mest vanleg å bruke tosidige solcellemodular med relativt tjukke glas utan ramme [15,16]. Det finst mange ulike teststandardar for testing av solcellemodular. Solar Energy Application Lab ved universitetet i Melbourne har kartlagt 218 ulike BIPV-produkt frå 34 leverandørar på den globale marknaden der dei aller fleste oppgir teststandarden IEC 61730 [17] og berre ein leverandør oppgav EN 13501-1[1] som relevant for testing av eigenskapar ved brann [18].

For BAPV-installasjonar er det meir vanleg å bruke tradisjonelle modular, blant desse er det mange ulike leverandørar. Desse er laga med solceller av silisium, glas, ulike lag med plast og har ei ramme av aluminium. Vanlege mål på ein modul er om lag 1 x 1,7 meter, men det eksisterer også både større og mindre modular. Modulane blir montert på fasaden ved hjelp av ulike typar festesystem, dette er ofte basert på skinner av aluminium og ulike typar festebrakettar.

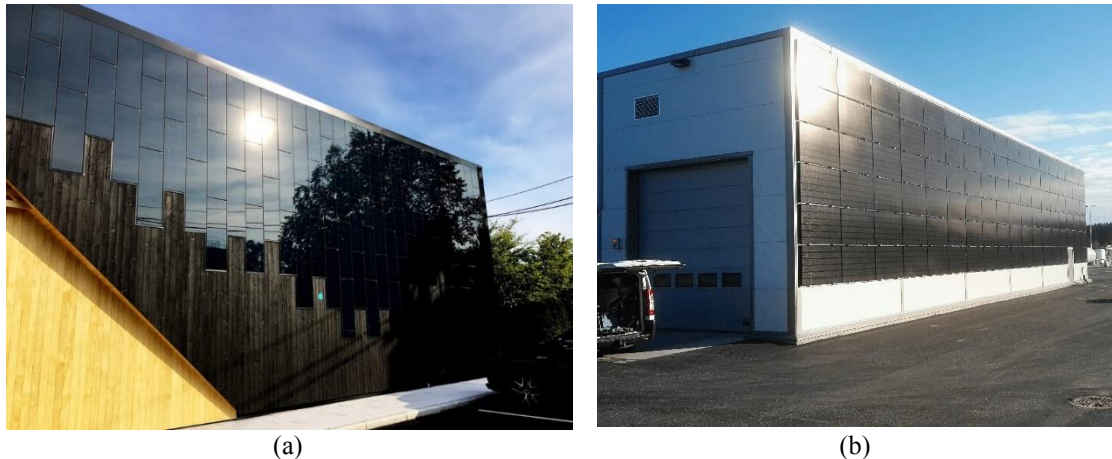
For solcelleinstallasjonar er holrommet bak solcellemodulane viktig for å sikre kjøling av solcellene og blir brukt til å montere dei elektriske kablane til solcelleinstallasjonen. Som for andre typar ventilert ytterkledning skal holrommet sikre at fukt blir tørka opp og lufta ut. På innsida av holrommet blir det montert ei form for vindsperre for å hindre at det bles inn i isolasjonen i veggen. Denne vindsperra kan vera laga av gipsplater, trefiberplater eller ulike typar vindsperreduk på rull. Gipsplater har typisk brannklasse A1 eller A2, trefiberplater kan ha klasse F og vindsperredukar kan ifølgje SINTEF¹ ha klasse B eller E etter klassifiseringsstandarden EN 13501-1 der A1 er minst brennbart og klasse F er mest brennbart [1].

2.1.1 Bruk av solcellemodular på fasadar i Noreg

Solcellemodular kan monterast på eksisterande bygningsfasadar, eller integrerast som ein del av kledninga. Døme på bygningar med solcellemodular på fasaden er vist i Figur 2-2. Andre døme på integrering av solcellemodular som fasadekledning er ZEB Lab i Trondheim, her er det montert solcellemodular som ytterkledning med eit holrom på omkring 18 cm med festesystem av aluminium og brannimpregnerte trelekter [19]. Andre bygg med integrerte solcellemodular i fasaden er Powerhouse Brattøra i Trondheim, Spar Snarøya i Bærum, Kiwi Dalgård i Trondheim. Alle desse er bygd med solcellemodular som ventilert fasadekledning [20].

I prinsippet kan både BIPV- og BAPV-installasjonar vera relativt like, der skilnaden i hovudsak ligg i at overflata bak holrommet i bygningsintegrerte solcelleinstallasjonar er ein form for vindsperre medan det i utanpåmonterte installasjonar er ytterkledninga som er bak holrommet. Overflata bak BIPV-modular kan vera til dømes gipsplater eller ein form for vindsperreduk. Bak BAPV-modular vil overflata vera det som er kledninga på bygget, til dømes sandwichelement på typiske industribygg og lagerhallar, eller kledning av tre på låveveggar.

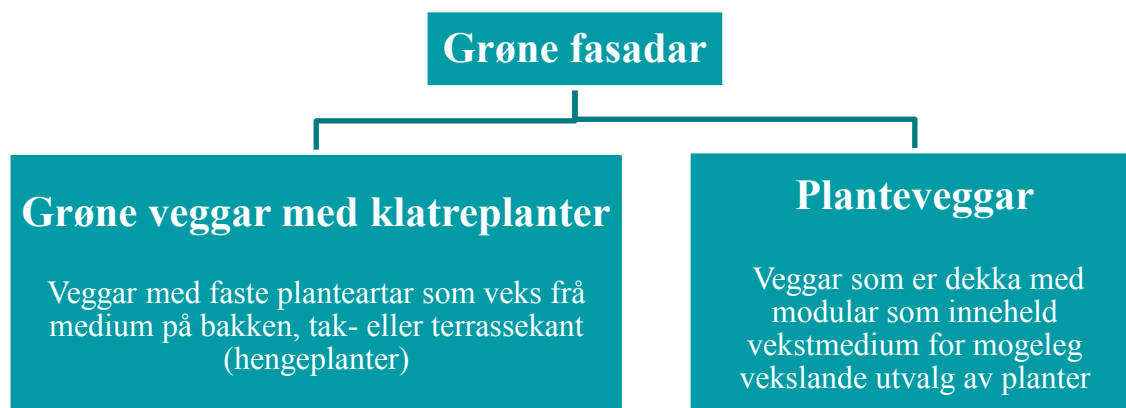
¹ <https://www.sintefcertification.no/Search?q=vindsperre>



Figur 2-2: (a) Bygningsintegrerte solcellemodular (BIPV) i kombinasjon med kledning av tre og (b) utanpåmonterte solcellemodular (BAPV) montert på eit industribygg. Foto: Solenergi FUSen.

2.2 Del 2: Grøne fasadar med planter

Plantekledde veggjar kan etablerast ved bruk av fleire ulike tekniske løysningar. Plantene kan enten vekse i bakken ved sidan av bygningen og klatre oppover langs fasaden, eller dei kan vekse i eit vekstmedium som er montert oppover fasaden, enten i lommer, hyller eller andre typar element. Den fyrste typen, der planta veks i bakken og klatrar oppover fasaden eller eit støttesystem, vert i litteraturen gjerne kalla *grøne fasadar* (green facades, GF) [21]. Den andre typen der plantene veks i eit vekstmedium montert oppover fasaden vert kalla *levande veggjar* (living walls, LW) eller *grøne veggjar* (green walls) [7,8]. I Norsk Standard for blågrøn faktor (NS 3845:2020) [22] vert *grøne veggjar* derimot nytta som samlebegrep for dei to undergruppene *slyng- og klatreplanter* og *planteveggjar*. Oslo Kommune tek utgangspunkt i inndelinga til Norsk Standard, men nyttar begrepet *grøne fasadar* som eit samlebegrep for dei to typane som dei kallar *grøne veggjar med klatreplanter* og *planteveggjar* [5]. I denne rapporten vel vi å fylgje Oslo Kommune sin bruk av begrepa, som illustrert i Figur 2-3.



Figur 2-3 Ulike begrep nytta for fasadar dekkja med planter i denne rapporten basert på Oslo kommune sin definisjon.

Det er også moglege å kombinere grønne veggar med energiproduksjon i form av solcelleinstallasjonar eller solfangarar. Dette vert av Oslo kommune kalla *biosolare veggar* [5].

Bruk av grønne fasadar har fleire fordelar, og kan desse kan delast i to hovudkategoriar: private og offentlege fordelar [8,23]. Dei private fordelane inkluderer t.d. redusert energiforbruk og auka temperaturkontroll, støyisolering, beskyttelse av bygningsfasaden og auka marknadspris. Dei offentlege fordelane inkluderer t.d. redusert luftforureining, betra vasshandtering og reinsing, betra folkehelse, moglegheit for urbant landbruk og auka biologisk mangfald.

Ei kartlegging av markanden utført i utvalde land i både Asia, Nord- og Sør-Amerika, Europa og Australia i 2022 [24] fann 142 ulike produkt, av desse var om lag 17 % for grønne veggar med klatreplanter og dei resterande 83 % var for planteveggar.

Ulike leverandørar av system for planteveggar har ulike løysingar med bruk av ulike material og design. Dei består likevel av fylgjande hovudelement, iføljje ein gjennomgang av Kotzen mfl. [7]:

- Planter av ulik art, storleik og i ulike mengder per areal.
- Vekstmedium som t.d. mineralull, filt eller lett organisk jord.
- Systemstruktur som inneheld modulære panel eller kassetar for planting, eit opphengssystem og i nokre tilfelle vass tett membran for å beskytte bygningen mot fuktinntrenging.
- System for vatning og gjødsling.
- Vedlikehaldsregime.

Som for solcellemodular kan også plantesystema delast i to grupper, der den eine typen kan monterast utanpå eksisterande fasade og den andre typen kan monterast som ein del av fasaden og dermed erstatte det tradisjonelle klimaskalet. Begge typene består ofte av modular som vert hengde opp på eit skinnesystem slik at det dannar seg eit holrom bak. For plantesystema som vert montert utanpå eksisterande fasade vert det då to holrom dersom opphaveleg veggkonstruksjon også hadde holrom bak kledninga.

I sum vil det for slike plantesystem vere ei rekkje faktorar som kan påverke brannutviklinga, slik som kva planter og materialar som vert brukt, geometri på systemet (t.d. holrom og avstandar), fasadedesign, fuktnivå i vekstmediet, grad av vedlikehald (t.d. fjerne tørre deler) og miljøfaktorar som vind og temperatur [7]. Funn frå studiar som er utførde innan brannsikkerheit for ulike delar av slike plantesystem vert presentert i kapittel 2.4.

2.2.1 Bruk av grønne planteveggar i Noreg

Det finst ikkje noko nasjonal statistikk på kor utbreidd bruken av verken grønne fasadar generelt, eller meir spesifikt planteveggar er i Noreg. I forbindelse med arbeid med ei masteroppgåve vart det i 2014 berre funne 4 ulike anlegg med planteveggar i Noreg [23]. Også forprosjektet Green Sponge Buildings (GSB) in Scandinavia som vart gjennomført i 2022 rapporterer om at det er etablert få grønne veggjar og også gjort lite forskning innan dette [16]. Eit av funna i dette forprosjektet er også at dagens lovverk i stor grad er tilpassa tradisjonelle byggemåtar, og at det difor er få stimuli på nasjonalt nivå som fremmer bruken av grønne bygningsoverflater.

Lovendringar tek tid, men på lokalt nivå kan det stillast spesifikke krav til t.d. blågrøn faktor, slik blant anna Oslo og Bærum kommune gjer. Oslo kommune vedtok vidare i 2022 ein strategi for grønne tak og fasadar der målet er at Oslo skal ha 2030 grønne tak og fasadar i 2030 [25]. Strategien omfattar også støyskjermer, støttemurar, brufundament og liknande som samla sett også har eit stort areal som potensielt kan nyttast for å auke omfanget av grønne fasadar. Strategien til Oslo kommune vart i 2024 fult opp av ein handlingsplan som beskriv kva tiltak som skal gjennomførast fram til 2030 [26].

Sjølv om det ikkje er mange anlegg med planteveggar i Noreg, er det gjennom arbeidet med dette prosjektet funne nokre bygg med planteveggar og nokre av desse er vist under. I Stavanger fekk Oransjeriet allereie i 2014 Stavanger kommunes byggeskikkpris [27] for sitt bygg med grøn plantevegg, sjå Figur 2-4.



Figur 2-4: Grøn plantevegg på Oransjeriet i Stavanger. Foto: Bergknapp.

I Bergen har renovasjonsselskapet BIR brukt grønne planteveggar både på den nye Bossnetterminalen i Jegteviken og på det nye kontorbygget på Nygårdstangen, sjå Figur 2-5.



(a)



(b)



(c)

Figur 2-5: Renovasjonsselskapet BIR i Bergen har nytta grøne planteveggar. (a) Bossnetterterminalen i Jegteviken. (b) Hovedkontoret på Nygårdstangen. Foto: (a) Anleggsgartnermester Wikholm AS, (b) og (c) BIR.

I Oslo pågår det renovering av fasaden på Oslo City som når den er ferdig vil ha ein av Nord-Europas største grøne veggjar med ei høgd på 28 meter. Deler av bygget har allereie fått grøne planteveggjar som vist i Figur 2-6.



Figur 2-6: Grøne plantevegger på Oslo City, både på sjøve fasaden i (a) og på veggar på takterrassen i (b). Foto: Knut Neerland / magent.no.

2.3 Regelverk

I dette avsnittet vert regelverk relevant for brannsikkerheit i fasadar med solcellemodular eller grønne plantesystem presentert.

2.3.1 Del 1: Solceller

Solcelleinstallasjonar er både ein elektrisk installasjon og ein byggt teknisk installasjon. Krav til elektriske installasjonar er gitt i forskrift om elektriske lavspenningsanlegg [28]. I rettleiinga til denne forskrifta er det vist vidare til NEK 400 som ein metode til å oppfylle krav i forskrifta [29]. I NEK 400 skildrar kapittel 712 løysingar for solcelleinstallasjonar. Meir om desse løysingane kan finnast i rapporten Solcelleteknologi og brannsikkerheit frå 2018 [30]. DSB sendte ut brev med presisering av kven som kan installere solcellemodular og kva for regelverk som gjeld for dette i 2023 der det vart presisert at berre registrerte elektroforetak med rett kompetanse kan tilby og utføre elektrisk installasjon av solcelleanlegg [31].

Som byggt teknisk installasjon er solcelleinstallasjonar i utgangspunktet søknadspliktig etter plan og bygningslova §20-1 [32]. I rettleiinga til byggesaksforskrifta (SAK10) §4-1 er det spesifisert at solcelleinstallasjonar på eksisterande byggverk, innanfor ei brukseining eller branncelle er vurdert til å vera ein enkel installasjon og er unntatt kravet om søknadsplikt [33].

Når det gjeld krav til materiale eigenskapar ved påverknad av brann for solcelleinstallasjonar på fasadar er det ikkje nokon spesielle reglar for dette, så ein må vurdere solcelleinstallasjonen på

same måte som andre bygningsmaterial. Byggteknisk forskrift (TEK17) §11-9 stiller to krav til eigenskapar ved material og produkt ved brann [34]:

1. *Byggverk skal prosjekteres og utføres slik at det er liten sannsynlighet for at brann skal oppstå, utvikle og spre seg. Det skal tas hensyn til byggverkets bruk og den nødvendige tiden for rømning og redning.*
2. *Materialer og produkter skal ha egenskaper som ikke gir uakseptable bidrag til brannutviklingen. Det skal legges vekt på muligheten for antennelse, hastigheten av varmeavgiving, røykproduksjon, utvikling av brennende dråper og tid til overtenning.*

I rettleiinga til punkt 2 er det lista opp preaksepterte krav for ulike overflater og kledningar der ytterkledning på byggverk i brannklasse 1 kan ha D-s3,d0 og i brannklasse 2 og 3 kan ha B-s3,d0 etter den harmoniserte europeiske klassifiseringsstandarden EN 13501-1[1]. Der solcellene er integrert i fasaden som ytterkledning kan dette kravet brukast direkte som for alle andre typar ytterkledning, men også der solcellene er montert utanpå kledningen og ikkje har nokon direkte funksjon som byggemateriale vil kravet i forskrifta om å unngå uakseptable bidrag til brannspreiinga vera relevant. I prinsippet er det liten forskjell på integrerte og utanpåmonterte solcellemodular og begge kan føre til fare for at brann oppstår, utvikle og spreie seg ut over bygningsoverflata.

Klassifiseringa B-s3,d0 eller D-s3,d0 kan ein oppnå ved å teste solcellemodulane etter teststandarden EN 13823 (SBI) [35] og EN ISO 11925 (small-flame) [36]. Merk at klassifiseringsstandarden EN 13501-1 spesifiserer i kapittel 6.3 at produkta skal testast på ein måte som representerer endeleg montering inkludert holrom mot eit bakanforliggende materiale. Det betyr i praksis at solcellemodulane må testast med eit relevant holrom og eit relevant materiale bak. Testoppsettet er begrensa til å teste flater med ytre dimensjonar på 1000 mm × 1500 mm og 500 mm × 1500 mm, slik at modular som er større enn dette må tilpassast, eller spesialproduserast for å passe inn i testoppsettet. Dei fleste solcellemodular har utvendig overflate av glas og kan forsinke tenninga frå startbrannen med minst 10 minutt og oppnå gode resultat i denne testen, og ein modul kan oppnå ulike resultat avhengig av korleis ulike detaljar blir gjort i testoppsettet [37]. I prosjektet Seamless-PV pågår det arbeid for å definere korleis solcellemodular kan testast etter SBI-metoden på best mogeleg måte for å sikre reproduserbare testresultat og ei tydeleg tolking av korleis resultata kan brukast [38]. Også gjennom arbeidet med revisjon av standarden EN 50583 pågår det arbeid med å spesifisere korleis bygningsintegreerte solcelleinstallasjonar kan testast på ein relevant, repeterbar og representativ måte i SBI-testen [10].

Overflatene i holrommet skal ha minst like gode branntekniske eigenskapar som utvendig overflate i følge rettleiinga til TEK 17. SBI-testmetoden er ikkje godt egna til å teste materialeigenskapar på innsida av eit holrom sidan brennaren er plassert på utsida av testoverflata. Baksida av solcellemodular kan bli testa frittstående, men dette gir ikkje fullgode resultat for korleis overflata blir påverka av brann i eit holrom. Forsøka i dette prosjektet er difor utforma på ein måte som minner om testing etter SBI-metoden, men med eksponering direkte i holrommet bak solcellemodulane.

2.3.2 Del 2: Grøne fasadar

Det er ikkje noko eige regelverk som omhandlar brannsikkerheit ved bruk av grønne fasadar. Planteveggar med ekstra innretningar for tilføring av vatn og næring kan reknast som ein

teknisk installasjon [5]. Slike installasjonar skal i fylgje Byggteknisk forskrift (TEK17) §11-10 *prosjekterast og utførast slik at installasjonen ikkje aukar faren vesentleg for at brann oppstår eller at brann og røyk sprer seg* [34].

Ettersom plantesystema vert monterte på fasadar, vert Byggteknisk forskrift (TEK17) §11-9 om krav til eigenskapar ved material og produkt ved brann [34] relevant slik som for solcellemodular. Dersom ein legg til grunn at desse krava til eigenskapar ved material og produkt ved brann skal gjelda for plantesystema som vert monterte på fasadar, finn ein i rettleiinga preaksepterte ytingar.

Ein viktig skilnad mellom grøne fasadar og solcellemodular er at dei grøne fasadane er levande. Dette medfører at over tid vil dei branntekniske eigenskapane endre seg t.d. ved at plantene veks og fuktinnhaldet vil variera, både gjennom året og gjennom plantenes levetid. Dette gjer det utfordrande når det gjeld klassifisering av dei branntekniske eigenskapane til planteveggane.

I Forskrift om brannforebygging [39] vert det stilt krav til både eigar og brukar av bygget. Eigaren av bygget skal etter §4 *kjenne kravene til brannsikkerhet som gjelder for byggverket*. Vidare skal eigaren etter same paragraf *gjøre den som har rett til å bruke byggverket kjent med kravene som gjelder for bruken av byggverket, og med alle eigenskapene ved byggverket som har betydning for brannsikkerheten*. Brukar av bygget skal mellom anna etter §11 *unngå unødig risiko for brann, og sørge for at rømningsveiene opprettholder sin funksjon, herunder at fremkommeligheten ikke reduseres og informere eieren om endringer, forfall og skader i byggverket eller sikkerhetsinnretningene som kan påvirke sikkerheten mot brann*. Vedlikehald av planteveggar for å holde dei levande og for å unngå at dei veks utover tiltenkt areal vil kunne vera tiltak som er viktig for å oppfylle desse krava som fell på eigar og brukar.

2.4 Litteratur

2.4.1 Holrom og fasadar

Djupna på holrommet, luftstraumane og materialeigenskapane på overflatene i holrommet er trekt fram som dei viktigaste faktorane for korleis brannen utviklar seg i ei kartlegging av forskning på brannar i holrom av Godakandage mfl. [40].

Mendez mfl. har studert brannspreiing i ventilerte holrom i mellom parallelle plater og fann at varmeeksponeringa mot overflatene auka når avstanden mellom dei minka i området 150 til 50 mm [41]. Dette er også i tråd med resultat frå tidlegare publiserte eksperiment frå blant andre Livkiss m.fl [42] og Foley og Drysdale [43]. Liknande effektar er også tidlegare observert av mellom andre Karlson mfl. og Ingason mfl. i forsøk med reolar der avstanden mellom stablane og varmeavgivinga frå startbrannen er avgjerande for kor høge flammene blir og kor kraftig varmpåkjenning overflatene får [44,45].

Brannutvikling i fasadar med brennbare material og ventilerte holrom har vore undersøkt mykje dei seinare åra, og særleg etter brannen i Grenfell Tower i London i 2017. Bonner mfl. har studert resultat frå 252 ulike fasadetestar og sett at materialet brukt i kledninga er avgjerande for brannforløpet [46]. Bonner og Rein har også konkludert med at talet på brannar i fasadar har auka dei seinare åra på grunn av at fasadane har vorte meir kompliserte og inneheld fleire brennbare material [47]. Også brannen i Valencia i februar 2024 som spreidde seg til ein heil bustadblokk illustrerar at brannar i fasadar kan få store konsekvensar [48]. Ventilerte holrom og

brennbare material er altså faktorar som er viktige ved fasadebrannar og dette er også relevant for fasadar med solcellemodular eller levande planter.

2.4.2 Del 1: Solceller

Risiko knytta til brann i bygningar med solcellemodular har vore undersøkt av fleire dei seinare åra. Mykje av forskinga har handla om brannspreiing under solcellemodular på flate tak, der Kristensen mfl. gjennom fleire publikasjonar har vist at når avstanden mellom solcellemodulen og takoverflata minkar spreier brannen seg raskare og gir kraftigare brannpåkjenning mot taket [49–52]. I eit prosjekt av RISE Fire Research for DSB og DiBK vart tilsvarande resultat også vist for solcellemodular montert på skråtak [53,54]. Eit storskalaeksperiment med bygningsintegreerte solcellemodular på ein fasade vart gjennomført av RISE Fire Research i samarbeid med FRIC, OBOS og partnerar viste at solcellemodulane inneheld nok brennbar materiale til å oppretthalde og spreie ein brann oppover i holrommet. Eksperimentet synte også utfordringar for brannvesenet og for rømming ved at ein brann kan svekkje innfestinga til modulane, noko som kan føre til at tunge glasplater ramlar ned frå fasaden [4]. Desse studiane viser at også solcelleinstallasjonar har forutsetningar for å bidra til at ein brann kan spreie seg utover ein fasade på same måte som andre typar brennbar fasadekledning. Solcelleinstallasjonane inneheld også elektriske komponentar som gjer at dei utgjer ein fare for tenning som ikkje er aktuell for passive fasadematerial.

2.4.3 Del 2: Grøne fasadar

Planter er brennbare, og systemstrukturen som held plantene kan vera enten brennbar eller ubrennbar. Ein plantevegg som tek fyr kan difor ha ein brann som spreier seg i sjølve plantane, eller i strukturen som held plantane oppe, eller i begge delane.

Ein studie utført av Kotzen mfl. [7] har funne at det ikkje er spesifikke brannforskrifter eller teststandardar retta mot planteveggar i England. Dei peikar også på at branntesting av slike planteveggar er utfordrande bl.a. fordi viktige parameter som fuktinnhald og mengde brennbar materiale naturleg vil variere over tid, og også avhenge av korleis veggens vert halden ved like. Testresultata av slike plantesystem vil difor avhenge av kva som vert gjort kring val av planter, plantestorleik, fuktinnhald osv., det vil krevje vedlikehald av planteveggen etter gitte vedlikehaldsplanar for å sikre at nødvendig brannnytting vert beholden gjennom veggens levetid. Det vert også stilt spørsmål ved om levande produkt, slik som ein planteart, i det heile kan klassifisere sine materiale eigenskapar etter EN 13501-1. Studien anbefalar at grunna planteveggar sin kompleksitet bør dei testast i full skala. For å redusere kostnadane kan bruk av CFD modellering eller ein modifisert SBI test vera nyttig i innleiande fasar for å finna løysingar som truleg vil kunne bli godkjente i full skala. Viktigheita av å teste plantesystem i full skala inkludert alle tilhøyrande materialar vert også understreka av Bielawski og Wegrzynski [55].

Det er utvikla ein guide for beste praksis for brannsikkerheit og bruk av levande vegg som kledning i England [56]. Innhaldet i guiden vert summert i desse fire punkta:

1. Heile systemet inkludert planter må testast og overhalda dei relevante krava i Tabell 10.1 i «Approved Document B» [57].
2. Berre materialar og planter som er testa som eit system eller som har dokumentert tilsvarande materiale eigenskapar ved påverking av brann kan brukast.
3. Den levande veggens bør i sluttbruken ha eit vatningssystem som er designa, installert og operert i samsvar med denne guiden [56]

4. Det bør etablerast vedlikehaldskontrakt med ein leverandør som kan dokumentere erfaring med å sikre at krava til brannsikkerheit vert haldne gjennom veggens levetid.

Eitt av systema som er vurdert etter denne guiden har fått gjennomført ei vurdering av at det sannsynlegvis kunne ha oppnådd klassifiseringa B-s3,d2 etter EN 13501-1 dersom det kunne ha vorte testa innanfor standarden. Denne vurderinga var basert på testar etter EN ISO 11925 (small-flame) [36] og tilpassa testar basert på EN 13823 [35] der vekstsubstratet var fukta til eit nivå som skulle vera representativt for ein system med fungerande vatningssystem [58].

I Tyskland er det også utarbeida anbefalingar for brannsikring av storskala grøne fasadar [59]. Ettersom brannlasta avheng av korleis plantene vert ivaretekne skal derfor type vedlikehald og omfanget av det beskrivast i byggesøknaden. Dette inkluderer både vatning, gjødsling og beskjæring. Det vert og anbefalt å redusere vertikal brannspreiing ved å enten installere brannbarrierar mellom etasjane, eller ved å la felt stå uplanta. Desse felta kan ha ulik utforming slik som t.d. eit 3 m høgt uplanta felt for annakvar etasje, eller ved å la 0,5 m til sides for kvar opening i fasaden (vindauga, dører eller liknande) vera utan planter. Storskala testar av det fullstendige systemet vert anbefalt for å verifisera brannsikkerheita.

Gjennom ei rekkje mellomskala testar ved bruk av SBI metoden [35] er det i ein nyleg publisert studie undersøkt korleis 25 ulike planteartar, både friske og tørre, bidreg til brannutviklinga. Basert på SBI testane vart plantene klassifiserte etter EN 13501-1. Den beste klassifiseringa som vart oppnådd for dei testa plantene var B-s1,d0 og den dårlegaste var D-s1,d1. For dei friske, velhalde plantene vart det observert korte toppar i varmeavgivingsrata, HRR, (opp mot 65 kW) akkurat når ulike plantedelar tørka ut og tok fyr. Det var liten grad av horisontal brannspreiing og brannen i dei friske plantene slokna av seg sjølv når brennaren vart slått av. Det vart ikkje funne at type planteart, alder på plantene eller ulik sesongpåvirking ga vesentleg påverknad på brannutviklinga. Å tørke plantene ga derimot ei vesentleg endring, plantene brann over ein kortare tidsperiode og hadde toppar i HRR på opp mot 340 kW. Studien konkluderer med at stell og vedlikehald for å holde plantene friske og å redusera mengda dødt materiale i fasaden er den viktigaste faktoren for å oppretthalde brannsikkerheita i grøne fasadar [60]. Viktigheita av å holde plantene friske med høgt fuktinnhald vert også støtta av studiar ved bruk av konkalorimetri-metoden [61] på planter med ulikt fuktinnhald [62,63]. Med fallande fuktinnhald blei tid til tenning redusert og både gjennomsnittleg og maksimal HRR auka. Biealawski mfl. [63] gjorde også storskalaforøk og fann at høgt fuktinnhald likevel ikkje kan garantere god brannsikkerheit då brannen i storskalaforøka spreidde seg også i dei fuktige plantene. Dei fann også at vind auke farten på brannspreiinga, både for fuktige og tørre planter.

I den engelske guiden for beste praksis ved bruk av levande veggjar som kledning er det gitt ei liste på 33 planter som vert rapportert å minimum tilfredsstille klasse B-s3, d2 etter EN 13501-1. Lista er gitt i Appendix B.

Fleire produsentar av plantesystem har allereie starta å teste systema sine med SBI testar for å kunne klassifisera branneigenskapane. Dette kjem fram bl.a. i ein studie av Kotzen mfl. [7] der dei har samla testresultat av 5 ulike produkt frå 5 ulike produsentar og funne at etter EN 13501-1 oppnådde tre av produkta B-s2,d0, eitt oppnådde B-s3,d2 og eitt oppnådde C-s3,d0. For to av produkta med høvesvis B-s2,d0 og B-s3,d2 var det utført testar både med og utan planter utan at det ga endring i oppnådd klassifisering. Kartlegginga som blir presentert i studien til Engel og Werther [60] viser at eit av systema som fekk klassifiseringa B-s2,d0 med ulik grad av

beplantning produserte mindre røyk og fekk klassifiseringa B-s1,d0 når plantene vart kutta ned til vekstmediet.

3 Brannforsøk

For å undersøkje korleis grøne fasadar med enten solcellemodular eller plantesystem påverkar brannsikkerheita vart det gjennomført ei rekkje brannforsøk i mellomstor skala. Dette kapitlet beskriv fyrst sjølve forsøksoppsettet med instrumentering og brannkjelde. Vidare vert materiala nytta i forsøka beskrivne i kapittel 3.2 og dei utførde forsøka beskrivne i kapittel 3.3.

3.1 Forsøksoppsett

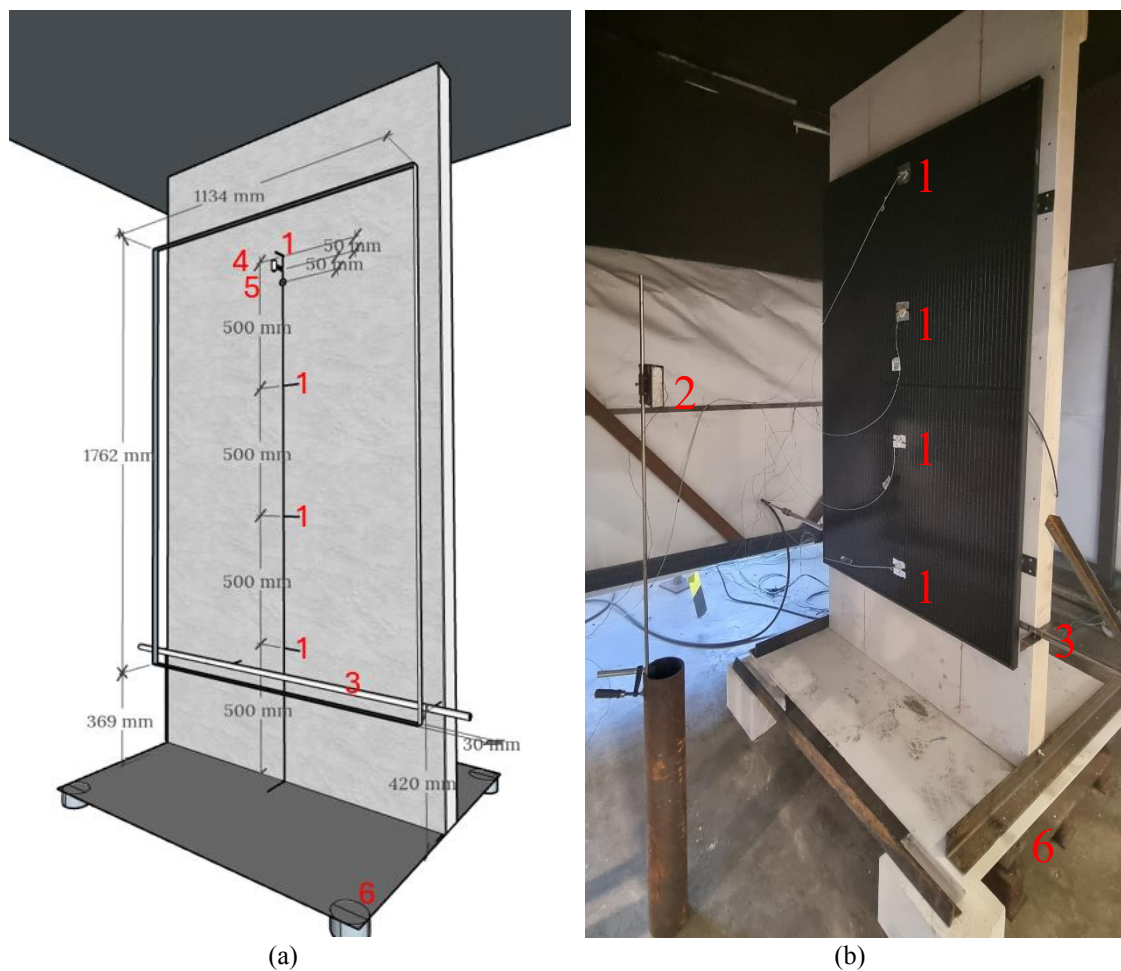
Fasaden som vart brukt i desse forsøka var 1,2 meter brei og 2,5 m høg og representarar ein liten del av ein fullskala fasade. Overflata på fasaden var laga av ei ubrennbar kalsiumsilikatplate med dimensjonar 12 x 1200 x 2500 mm. Denne var montert på stendarar av ubehandla tre med dimensjonane 48 x 98 mm og senteravstand 600 mm. Mellom stendarane var det lagt inn 100 mm mineralull til isolasjon. Denne oppbygginga gjer at veggen har liknande termiske eigenskapar som veggen som vart bygd opp til storskalaforsøk av bygningsintegreerte solcellemodular [4].

Ei skisse av oppsettet er vist i Figur 3-1 (a). Det vart brukt same forsøksoppsettet for både solcellemodulane og dei grøne plantesystema. Figur 3-1 (b) viser oppsettet med ein solcellemodul ferdig montert og i Figur 3-2 er forsøksoppsettet med planteveggjar er vist.

3.1.1 Instrumentering

Forsøksveggen var montert på ei vekt som registrerte tyngda av heile forsøksriggen gjennom forsøka. Over veggen vart røyken samla opp i ei hette og trekt gjennom ein kanal der det vart målt mengda av røyk og konsentrasjonen av oksygen (O_2), karbonmonoksid (CO) og karbondioksid (CO_2) for å kunne rekne ut varmeavgivingsraten frå brannen basert på metoden skildra i standarden ISO 9705 [64].

Det var montert termoelement i 4 høgder både på framsida av solcellemodulen, i holrommet mellom modulen og veggen, på overflata av veggen i holrommet og på baksida av kalsiumsilikatplata. Plasseringa av desse termoelementa er vist med talet «1» i Figur 3-1. Desse termoelementa var plasserte langs den loddrette senterlina av solcellemodulen med 50 cm mellom kvart målepunkt, og dei nedste termoelementa var plasserte 50 cm over golvplata. Talet «2» i Figur 3-1 (b) viser platetermoelementet med 0,4 mm stålplate og isolasjon på baksida som var montert 1 m frå solcellemodulen på høgde med senter av modulen. Talet «3» viser gassbrennaren som var plassert i holrommet mellom solcellemodulen og veggen. Meir detaljar om gassbrennaren kjem i kapittel 3.1.2. Talet «4» viser ein bidireksjonal probe som måler hastigheita på gassen som stig oppover i holrommet. Talet «5» viser eit Huxeflux SBG01 totalfluksmeter som var montert i flukt med veggen bak holrommet. Talet «6» viser vekta som heile forsøksoppsettet var montert oppå. Instrumenteringa var den same i forsøka med dei grøne plantesystema bortsett frå at gassbrennaren var plassert i ulike posisjonar på framsida av fasaden og dei fire termoelementa frå fronten av solcellemodulen var plassert på fronten av plantesystema som vist i Figur 3-2.



Figur 3-1 Skisse av forsøksoppsettet i (a) som viser dimensjoner og plassering av ulike sensorar. I (b) er det vist ferdig montert solcellemodul og sensorar klare til forsøksstart. Raude tal markerer posisjonen til ulike delar av forsøksoppsettet: «1» termoelement, «2» platetermoelement, «3» gassbrennar, «4» bidireksjonal probe, «5» fluksmeter og «6» vekt.



Figur 3-2 (a) Bilete av planteveggane i forsøka GV1 (a), GV5 (b) og GV9 (c) som viser plassering av termoelement bak fronten av plantesystema («1»), brennaren («3») og vekta («6») i dei ulike konfigurasjonane. I tillegg var platetermoelement, bidireksjonal probe og fluksmeter plassert på same måte som for oppsettet med solcellemodul i Figur 3-1.

3.1.2 Brannkjelde

Ved overtenning i ei branncelle kan brannen som kjem ut av ei opning i denne branncella utsetje fasaden for ei brannpåkjenning på fleire megawatt. Dette scenarioet ligg til grunn for fullskala testmetodar av fasadar som til dømes SP Fire 105 [65].

Som vist i fullskalaforsøk av ein BIPV-fasade kan denne påkjenninga gi store skader på glas og aluminium i området på fasaden over opninga, men ein langt mindre brann kan spreie seg vidare oppover i solcelleinstallasjonen [4]. Ein brann som startar som følge av ein elektrisk feil i sjølve solcelleinstallasjonen vil også vera relativt liten i starten og den vil vera avgrensa av kor stor elektrisk effekt som blir utløyst i feilpunktet og kor mykje brennbart materiale som tek fyr samtidig med den elektriske oppvarminga. Utgangspunktet for brannforsøka med

solcellemodular var difor å undersøke korleis små brannar i holrommet kan spreie og utvikle seg. For solcellemodulane vart effekten variert frå 5 kW til 20 kW som tilsvara flammehøgder frå 25 til 75 cm i holrommet på 6 cm. Brennaren var plassert i midten av holrommet 5 cm over nedre kant av solcellemodulen som vist i Figur 3-1.

I forsøka med grøne veggar vart brennaren plassert i framkant av plantesystemet og det vart gjort forsøk med effekt på 30 kW over ein periode på 21 minutt for å gi liknande varmpåkjening som i ein SBI-test etter EN 13823 [35] som er brukt til å teste plantesystem og andre typar byggematerial. Forsøk av veggar med større mengder tørre planter har vist at dei kan avgi større effekt over ein relativt kort periode [60] og det vart difor også utført forsøk med 200 kW effekt på brennaren over 3 minutt for å etterlikne dette. I tillegg er det gjort forsøk med 15 kW effekt i holrommet og eitt forsøk med 200 kW effekt over 20 minutt for å simulere ein større ekstern brann på det ubrennbare plantesystemet. I forsøka med plantesystem vart brennaren plassert i ulike posisjonar som vist i Figur 3-2.

Gassbrennaren var laga av eit røyr med ytre diameter 20 mm som det var hol i over ein lengde på 500 mm med diameter 2 mm og senteravstand 15 mm. Denne brennaren var kopla til ein Bronkhorst In-Flow F-203-AI massestrømskontroller som styrte mengda propan til brennaren og hadde ein maksimal kapasitet på omkring 300 kW.

3.2 Material

3.2.1 Del 1: Solceller

To ulike typar solcellemodular vart brukt i dei utførte forsøka. Ein type var med tosidig glas og ein type var med einsidig glas med elles ganske like fysiske eigenskapar. Begge typane var produsert av den same produsenten og var tilgjengeleg på markanden i Noreg. Detaljar om dei to typane solcellemodular er henta frå produktdatabladet og er summert opp i Tabell 3-1

Tabell 3-1: Produktdata henta frå datablad frå produsenten.

	Einsidig glas	Tosidig glas
Produsent	Trina solar	Trina solar
Modell	Vertex S	Vertex S+
Type	Backsheet	Bifacial dual glass
Celletepe	Monokrystallinsk half-cut	Monokrystallinsk half-cut
Produktnamn	TSM-DE09R.05	TSM-NEG9RC.27
Nomiell effekt	425 W	435 W
Dimensjonar	1762 x 1134 x 30 mm	1762 x 1134 x 30 mm
Vekt	21,8 kg	21,1 kg
Innkapslingsmateriale	EVA/POE (Ethylene-Vinyl Acetate /	EVA/POE

	Einsidig glas	Tosidig glas
	Thermoplastic Polyolefin Elastomer)	
Tjukkuleik glas	3,2 mm	1,6 mm + 1,6 mm
Sertifisert etter	IEC 61215, IEC 61730, IEC 61701, IEC 62716	IEC 61215, IEC 61730, IEC 61701, IEC 62716, UL 61730

Det vart gjort konkalorimetertestar av bitar som var skåre ut av dei to ulike typane solcellemodular, desse viste at modulane med einsidig glas gav frå seg ein total varmeavgiving (total heat release, THR) på 42 MJ/m² og modulane med tosidig glas gav frå seg 31 MJ/m² med eit massetap på 1539 g/m² og 1007 g/m² ved eksponering for 50 kW/m². Modulane med einsidig glas er samanliknbare med modulane som vart brukt i den store fasadetesten [4] og modular som vart undersøkt av Ju mfl.[66], medan modulane med tosidig glas gir frå seg litt mindre varme. I to av forsøka vart det også montert ein vindsperrereduk av typen Isola Tyvek Soft Xtra for å undersøke om ein brennbar vindsperrereduk ville påverke brannutviklinga samanlikna med ei ubrennbar vindsperre. Denne duken hadde brannklasse E etter EN 13501-1 [1] og ei flatevekt på om lag 70 g/m² i følgje teknisk godkjenning².

3.2.2 Del 2: Grøne plantesystem

To ulike plantesystem frå same leverandør vart nytta i dei utførte forsøka. Det eine systemet (BGreen-it® Vertical³) bestod av komplette element beståande eit formstøyt spesiallaga vekstmedium for plantene og eit ytre skal av skifer slik at desse elementa kan erstatta det tradisjonelle klimaskalet på bygningen. Elementa er vist i Figur 3-3 med det ytre skalet i (a) og utan det ytre skalet i (b). Kvart av elementa har plass til 3 planter. Størrelsen på elementa var 50 cm x 30 cm (b x h). Tjukkelsen på vekstmediet var 8 cm og tjukkelsen på skalet var 0,5 cm. Både vekstmediet og det ytre skalet bestod av ubrennbare naturmateriale. Dette plantesystemet har etter EN 13501-1 oppnådd klasse A1.

For å bestemme fuktinnhaldet vart materiala vege både før og etter at dei vart tørka ved ein temperatur på 105 °C til stabil vekt var nådd (<0,1 g). Fuktinnhaldet, MC (*moisture content*), kan då reknast ut slik:

$$MC = \left(\frac{m_{v\hat{a}t} - m_{t\hat{o}rr}}{m_{t\hat{o}rr}} \right) \times 100$$

Sjølve vekstmediet (delen som vist i Figur 3-3 (b)) hadde ei tørrvekt på 8,409 kg og det ytre skalet (den svarte delen i Figur 3-3 (a)) hadde ei tørrvekt på 1,673 kg. Fuktinnhaldet i vekstmediet var 12,1% og fuktinnhaldet i skalet på framsida var 0,1%. Plantene vart monterte ved å dytte dei rett inn i hola på elementa.

² <https://www.sintefcertification.no/Product/Index/41>

³ <https://www.byggros.com/produkter/gronne-vaegge/bgreen-it-vertical>



Figur 3-3 Elementa i det ubrennbare plantesystemet. (a) Element med ytre skal av skifer og (b) element utan det ytre skalet.

Elementa vert festa til vegg ved hjelp av eit skinneresystem laga i stål, sjå Figur 3-4 (a). Ferdig montert vart djupna på holrommet mellom baksida av planteelementa og veggoverflata omtrent 3,5 cm. Det ferdige vegg bestod av 14 element og var 100 cm brei og 210 cm høg, sjå Figur 3-4 (b).



Figur 3-4 (a) Montering av elementa i det ubrennbare plantesystemet på vegg og (b) ferdig montert vegg med planter.

Det andre plantesystemet som vart nytta (BGreen-it Living Wall⁴) var eit modulsistem laga i hardplast av polyetylen (high denisty polyethylene, HDPE). Dette plantesystemet er ikkje klassifisert etter EN 13501-1. Nedre del av dette systemet er vist i Figur 3-5 utan planter i (a) og med planter i (b). Modulane har plass til vekstsubstrat og planter i fremre del og i bakkant er det for kvar modul eit reservoar for vatn. Modulane har ei lengd på 59 cm, ei høgd på 14,5 cm og ei

⁴ <https://www.byggros.com/produkter/gronne-vaegge/bggreen-it-living-wall>

djupn på 23 cm. I kvar av modulane er det plass til 4 planter og 8 liter vekstsubstrat. Planteveggen i forsøksoppsettet bestod av 16 element og hadde ei total høgd på 232 cm og inneholdt 64 planter i forsøket med planter. Også desse modulane vert festa til veggen via eit skinnesystem, i dette tilfellet skinner laga i aluminium. Det gav eit langsgående holrom med 1,5 cm djupn i bakkant av systemet.



Figur 3-5: Nedre del av modulsystem i hardplast av polyetylen. (a) utan planter, (b) med planter.

Det vart gjort to konkalorimetertestar med varmefluks 50 kW/m^2 av flate bitar som var skåre ut frå plantesystemet i plast. Desse viste at platen gav frå seg 37 MJ/kg total varme (THR). Kvar modul inneheld 1 kg plast og det gjekk om lag 11 modular for kvar kvadratmeter. Dette gjer at plastsystemet totalt kan avgi 411 MJ/m^2 slik det er installert på veggen.

I det plastbaserte plantesystemet vart det nytta eit vekstmedium bestående av pimpsteinbasert substratjord, sjå Figur 3-6. Pimpstein er eit vulkansk materiale med mange små hol som held på både vatn og luft. Vekstsubstratet hadde ein tettleik på 794 kg/m^3 og eit fuktinnhald på 60,7%. Fuktinnhaldet er rekna ut på same måte som beskrive for det ubrennbare plantesystemet. I det ubrennbare plantesystemet var det ikkje vekstsubstrat, utover jorda som følgde med plantene i plastpottene dei kom med.



Figur 3-6: Pimpsteinbasert vekstsubstrat nytta i det plastbaserte plantesystemet.

I to av forsøka vart det planta planter i plantesystema. 7 ulike planter vart nytta og desse er vist i Figur 3-7. Omtrentleg høgd, vekt av grønt material for kvar plante og målt fuktinnhald er presentert i Tabell 3-2. Fuktinnhaldet er rekna ut på same måte som beskrive for sjølv plantesystema. Oversikt over plasseringa av dei ulike plantartane i forsøka med planter er vist i Vedlegg A.

Tabell 3-2: Omtrentleg høgd, vekt av grønt material for kvar plante og målt fuktinnhald for dei ulike plantetypane nytta i forsøka.

Plantenamn	Omtrentleg høgd (cm)	Vekt grønt materiale kvar plante (g)	Fuktinnhald grønt materiale (%)
Sesleria heufleriana	30	7,5	275
Hosta «Blue Angel»	16	25,6	1180
Juniperus comm. «Suecica»	30	33,9	175,6
Geranium Sang. «Max Frei»	10	7	250
Heucera micr. «Palace Purple»	8	6,9	331,2
Alchemilla mollis	10	5,4	237,5
Geranium cantabrig. «Biokovo»	13	12	215,8



Sesleria heufleriana



Hosta «Blue Angel»

Juniperus comm.
«Suecica»Geranium Sang. «Max
Frei»Heucera micr. «Palace
Purple»

Alchemilla mollis

Geranium cantabrig.
«Biokovo»

Figur 3-7: Bilete av dei sju plantartane som vart brukte i forsøka.

3.3 Utførde forsøk

Det vart i alt utført 35 forsøk, 25 med solcellemodul og 10 med grøne plantesystem.

3.3.1 Del 1: Solceller

Med utgangspunkt i brannutviklinga i storskalaforsøket der brannen spreidde seg oppover heile fasaden i eit 6 cm holrom bak solcellemodular med einsidig glas [4] var det interessant å studere om tilsvarende brannspreiing kunne gjenskapast i mindre skala. Utgangspunktet for forsøksserien var dermed å installere ein solcellemodul med einsidig glas, eit holrom på 6 cm mot ein ubrennbar, isolert vegg og startbrannar i holrommet som kunne representere ein liten brann mellom 5 kW og 20 kW. Vidare vart holromsavstanden auka til 9 cm og til 12 cm for å undersøke korleis dette påverka brannutviklinga med ulike startbrannar. Eit utval av desse forsøka vart også repetert med ein solcellemodul med tosidig glas. I tillegg vart det gjort nokre forsøk med kortare varigheit på startbrannen og med ein vindspærredek i bakkant av holrommet.

Tabell 3-3 viser korleis dei ulike parameterane varierte i dei ulike forsøka, tala i parentes viser forsøksnummeret til dei ulike kombinasjonane.

Tabell 3-3 Oversikt over utførte forsøk med solcellemodular. Tala i parentes viser forsøksnummeret for dei ulike kombinasjonane.

Effekt gassbrennar	Einsidig glas	Tosidig glas
	Holromsavstandar brukt i forsøk	
5 kW	6 cm (7)	
10 kW	6 cm (6A, 6B)	6 cm (14)
15 kW	6 cm (2A, 2B, 3*, 4*, 5A**, 5B**) 9 cm (9A, 9B) 12 cm (11A, 11B)	6 cm (13A, 13B)
20 kW	6 cm (1A, 1B) 9 cm (8A, 8B) 12 cm (10A, 10B)	6 cm (12A, 12B) 9 cm (15)

* Gassbrennar stengt etter 5-6 minutt.

** Forsøk med vindspærreduk bak holrommet og gassbrennar stengt etter 6 minutt.

3.3.2 Del 2: Grøne plantesystem

Som beskrive i kapittel 3.2 vart det nytta to ulike plantesystem i dei utførte forsøka, eit som var laga av plastmateriale og eit som var laga av ubrennbart materiale. Oversikt over viktige parametarar og korleis dei vart variert er vist i Tabell 3-4.

Det vart utført 4 forsøk med det ubrennbare plantesystemet. I første forsøk (GV1) var 42 friske planter montert i plantesystemet. Ei oversikt over kva planter som var planta kvar i dette forsøket er vist i Vedlegg A. Brennaren var plassert nede i front av planteveggen som vist i Figur 3-2 (b) og brann i 21 minutt med ein effekt på 30 kW. Dette er same effekt som vert nytta i SBI metoden som vert brukt for klassifisering av byggjevarer [35], og vart her nytta for å undersøkje korleis ein liten ekstern brann vil spreie seg i planteveggen. Det ubrennbare plantesystemet vart ikkje bytta ut mellom dei ulike forsøka, og det som var att av planter i plantesystemet etter eit forsøk stod att i veggen til det påfølgjande forsøket. I forsøk 2 og 3 (GV2 og GV3) var effekten på brennaren auka til 200 kW og brennetida redusert til 3 minutt for å etterlikna at det brenn i plantene i ein veletablert plantevegg. Forsøk har vist at brann i tørre planter i ein planevegg gir ein kortvarig brann med varmeavgivingsrate > 100 kW i mindre enn eitt minutt og med ein maksimal varmeavgivingsrate på opp omtrent 340 kW [60]. I forsøk 4 (GV4) var brennaren plassert i holrommet med ein effekt på 15 kW, tilsvarande som for forsøka med solcellemodul.

For plantesystemet laga av plastmateriale vart det utført 6 forsøk. Fyrste forsøk (GV5) vart, slik som for det ubrennbare plantesystemet, utført med friske planter. I dette forsøket vart det nytta våt jord ved at det vart fylt på 2 liter vatn i reservoaret i bakkant av alle dei 16 elementa. I tillegg vart det totalt 67 planter i elementa, 5 planter i 3 av elementa og 4 i dei resterande 13 elementa. Ei oversikt over kva planter som var planta kvar i dette forsøket er vist i Vedlegg A. Brennaren var som for forsøk GV1 plassert nede i front av planteveggen og den brann i 21 minutt med ein effekt på 30 kW. Brennaren var plassert slik at flammen trefte den skrå

ytterkanten av den nedste plastmodulen som vist i Figur 3-2 (b). For dette plantesystemet vart alle modulane skifta mellom kvart forsøk, og i kvart påfølgjande forsøk vart kassane fylte med ny jord, men utan planter eller ekstra vatn. GV6 vart utført med same startbrann som GV5. Dei fire siste forsøka med dette plantesystemet vart alle utførde med 200 kW effekt på brannkjelde for å simulere ein brann i sjølve planteveggen, men plasseringa av brennaren var ulik i desse forsøka. I forsøk GV7 var brennaren plassert likt som for dei føregåande forsøka med dette systemet, medan den i forsøk GV8 vart plassert litt lenger unna vegg, slik at flammen ikkje treffe den skrå ytterkanten av den nedste plastmodulen. For dei to siste forsøka, GV9 og GV10 vart modul nr 8 og 9 nedanifrå fjerna slik at brennaren kunne plasserast midt på planteveggen som vist i Figur 3-2 (c). Dette vart gjort for å sjå om brannen kunne spreie seg også nedover dette plantesystemet. I GV9 vart brennande nedfall som fall utanfor plata på vekta og ned på golvet sløkt, medan i GV10 fekk dette nedfallet brenne fritt.

Tabell 3-4 Forsøksmatrise for plantesystema som gir oversikt over type plantesystem, plassering av brennaren, effekt på brennaren, brenntid for brennaren og informasjon om brenselet.

Forsøk nr	Plantesystem	Plassering av brennar	Effekt på brennar (kW)	Brenntid brennar (min)	Informasjon
GV1	Ubrennbart	I front, nede	30	21	Friske planter, tørt substrat
GV2	Ubrennbart	I front, nede	200	3	Planterestar frå førre forsøk behaldne, men ingen nye planter montert, tørt substrat
GV3	Ubrennbart	I front, nede	200	20	Planterestar frå førre forsøk behaldne, men ingen nye planter montert, tørt substrat
GV4	Ubrennbart	I holrom	15	15	Planterestar frå førre forsøk behaldne, men ingen nye planter montert, tørt substrat
GV5	Plast	I front, nede	30	21	Friske planter, fuktig jord
GV6	Plast	I front, nede	30	21	Utan planter, tørr jord
GV7	Plast	I front, nede	200	3	Utan planter, tørr jord
GV8	Plast	I front, nede	200	3	Utan planter, tørr jord
GV9	Plast	I front, midt på vegg	200	3	Utan planter, tørr jord
GV10	Plast	I front, midt på vegg	200	3	Utan planter, tørr jord

4 Resultat

Resultata frå dei utførde forsøka vert beskrive i dette kapittelet, fyrst for forsøka med solcellemodular og så forsøka med plantevegg.

4.1 Del 1: Solceller

Det er gjennomført totalt 25 forsøk med solcellemodular. Resultata frå desse er presentert i dette kapittelet med følgande delar: Gjennom ei skildring av typiske brannforløp for modular med einssidig og tosidig glas, eit typisk forløp for varmeavgivingsrate, oppsummerte nøkkelresultat for alle forsøk, kurver for varmeavgivingsrate for ulike kombinasjonar av parametarar, ei samling av data for total varmeavgiving og til sist ei statistisk analyse av korleis dei ulike parametranne påverka resultata.

4.1.1 Skildring av typiske brannforløp

Dei ulike forsøka med solcellemodular følgde for det meste eit ganske likt forløp. Gassbrennaren vart tent i holrommet før plasten tok til å smelte og tok fyr etter to til sju minutt. Tida til tenning, og kor mykje av plasten som brann varierte for dei ulike solcellemodultypane, avstand til vegg og effekt på gassbrennaren. Når plasten hadde tatt fyr spreidde brannen seg oppover i ei stripe på midten av solcellemodulen, nådde eit maksimalt nivå på varmeavgivingsraten før det brann ut og berre bidraget frå gassbrennaren var tilbake. Etter 15 minutt vart gasstilførselen stengt og forsøket avslutta. Det vart ikkje gjort nokon aktiv sløkking i forsøka. I tre av forsøka tok ikkje solcellemodulen fyr, dette var forsøk nummer 7 med einssidig glas, 6 cm holrom og 5 kW gassbrennar, forsøk nummer 14 med tosidig glas, 6 cm holrom og 10 kW gassbrennar og forsøk 15 med tosidig glas, 9 cm holrom og 20 kW gassbrennar.

Bileta i Figur 4-1 viser forløpet i to forsøk der øvre rekke bilde er med ein modul med tosidig glas og nedre rekke bilde er ein modul med einssidig glas.

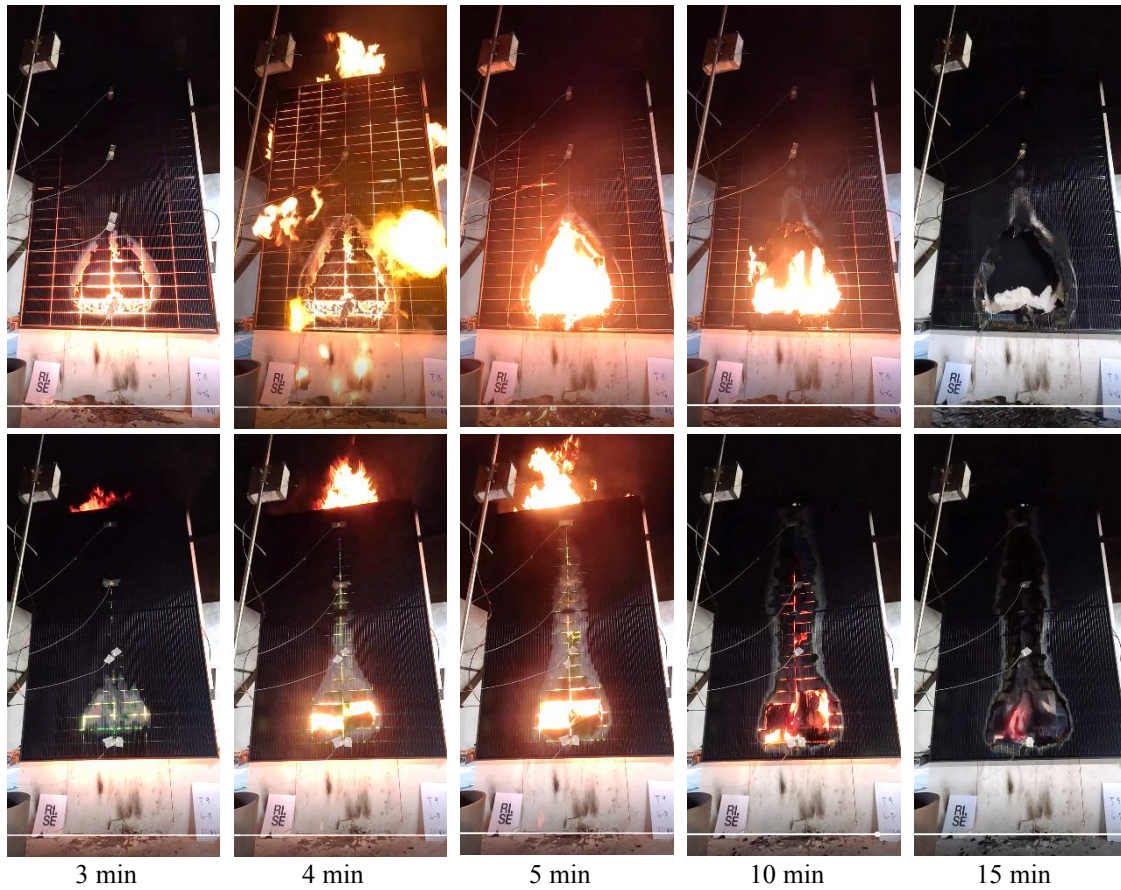
Etter 3 minutt kan ein sjå at innkapslingsmaterialet av plast rundt solcellene har starta å smelte i begge modulane. Modulen med tosidig glas har starta å bule slik at dei to laga med glas blir pressa frå kvarandre. Modulen med einssidig glas har starta å brenne og ein kan sjå flammer over toppen av modulen.

Etter 4 minutt knuser glaset på modulen med tosidig glas og flamar er synlege framfor modulen og i frå holrommet bak, medan modulen med einssidig glas brenn vidare og fleire av solcellene sig nedover slik at flammen i holrommet blir meir synleg gjennom glaset.

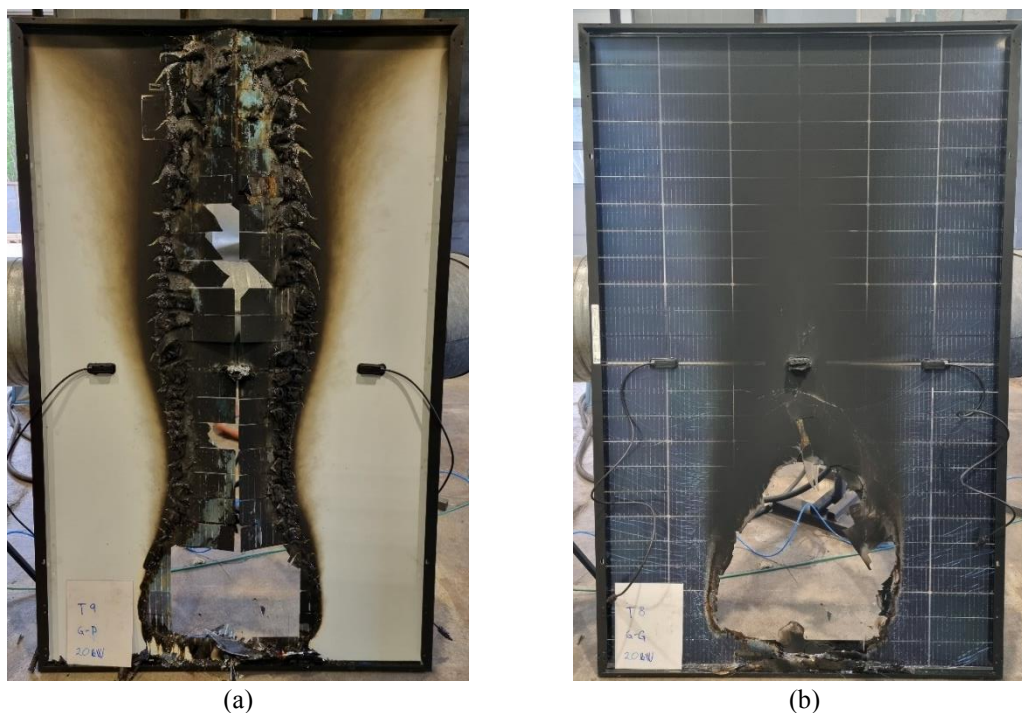
Etter 5 minutt har glaset framfor gassbrennaren ramla ut frå modulen med tosidig glas og bitar brenn vidare på bakken framfor modulen. Glaset i modulen med einssidig glas er framleis intakt, og flammen er synleg over toppen av modulen.

Etter 10 minutt har plasten i modulen med tosidig glas for det meste sløkkt og flammen frå gassbrennaren er synleg gjennom opninga i glaset. Modulen med einssidig glas brenn framleis, men ikkje over toppen av modulen.

Etter 15 minutt vart gassbrennaren slått av og brannen i begge modulane sløkkte. Glaset på modulen med einssidig glas vart ikkje knust i løpet av brannen, men knuste nokre minutt etter at gassbrennaren var slått av. Figur 4-2 viser baksida av dei to modulane etter forsøka. Her har glaset knust og ein kan sjå kor mykje av arealet som er brent.



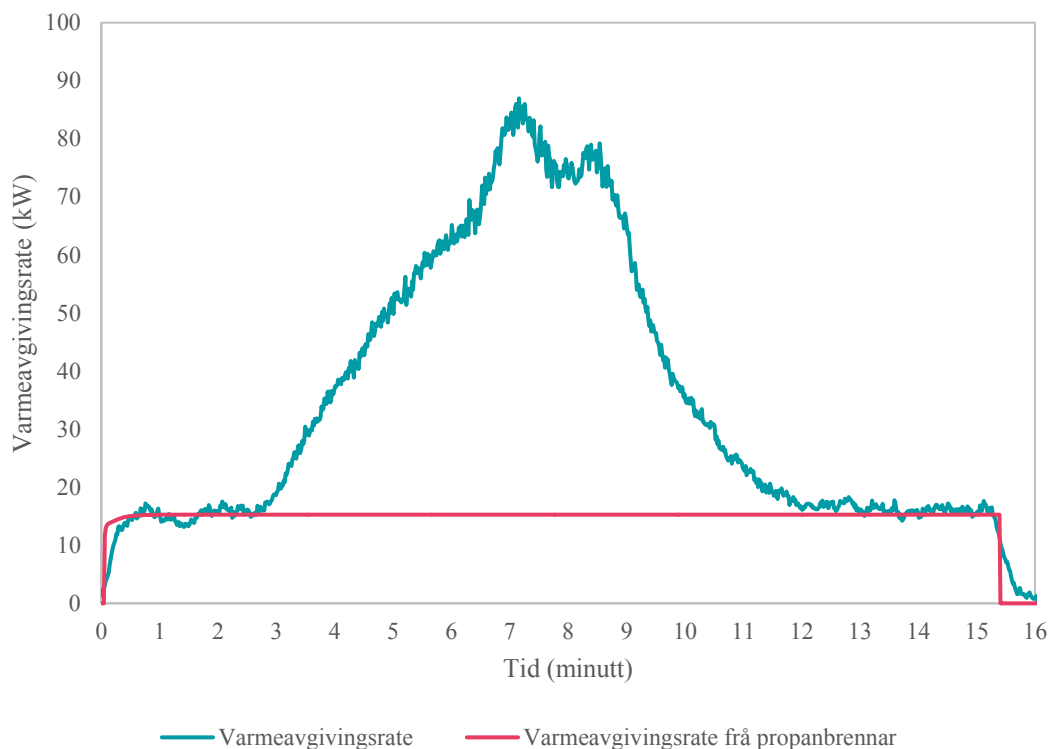
Figur 4-1: Bilete frå to forsøk med 6 cm holrom og 20 kW effekt på brennaren. I øvre rekke er forsøk 12B med tosidig glas og i nedre rekke forsøk 1B med einsidig glas.



Figur 4-2: Baksida av solcellemodulane etter forsøk med 20 kW effekt på brennaren og 6 cm avstand. (a) forsøk 1B med einsidig glas og (b) forsøk 12B med tosidig glas.

4.1.2 Typisk forløp for varmeavgivingsrate

Varmeavgivingsraten frå eit typisk forsøk med 15 kW effekt på gassbrennaren og ein solcellemodul med einssidig glas montert 6 cm frå veggen er vist i Figur 4-3. Figuren viser at i dei fyrste minutta er det berre gassbrennaren som bidreg til varmeavgivingsraten. Litt før 3 minutt tek solcellemodulen fyr som ein kan sjå av at varmeavgivingsraten aukar ut over bidraget frå gassbrennaren. Litt etter 7 minutt inn i forsøket når varmeavgivingsraten ein topp før den blir redusert og går tilbake til å vise bidraget frå gassbrennaren. Frå omkring 12 minutt er det ikkje lenger noko bidrag frå solcellemodulen. Etter litt over 15 minutt vart gassbrennaren slått av og varmeavgivingsraten gjekk mot null.



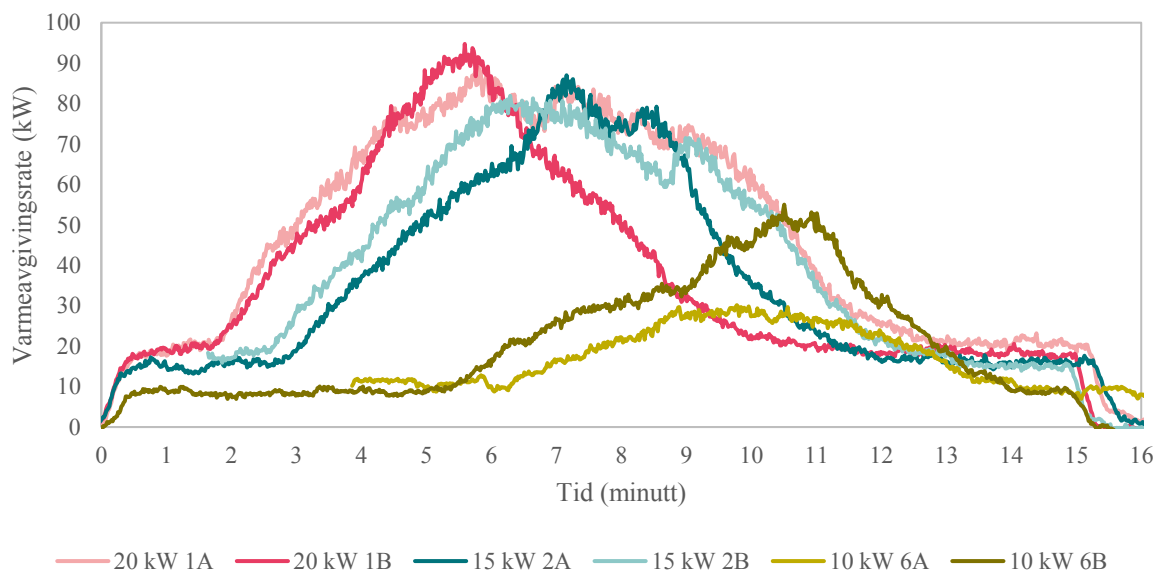
Figur 4-3: Forsøk nummer 2A representerer eit typisk brannforløp med einssidig solcellemodul. Varmeavgivingsrate frå forsøket er rekna ut basert på målingar av røyken og inkluderar både propanbrennaren og solcellemodulen. Tilført varmeavgivingsrate frå propanbrennaren er rekna ut frå mengda tilført propan.

Dei fleste forsøka følgde i grove trekk same utviklinga som vist i Figur 4-3, med varierende tidsforløp og mengde avgitt varme. Unntak frå dette er forsøk 7, 14 og 15 der solcellemodulen ikkje tok fyr. Repeterte forsøk viste generelt godt samsvar, men også nokre variasjonar som ein kan sjå i figurane i kapittel 4.1.3 og i Tabell 4-1.

4.1.3 Forløp for varmeavgivingsrate for ulike kombinasjonar

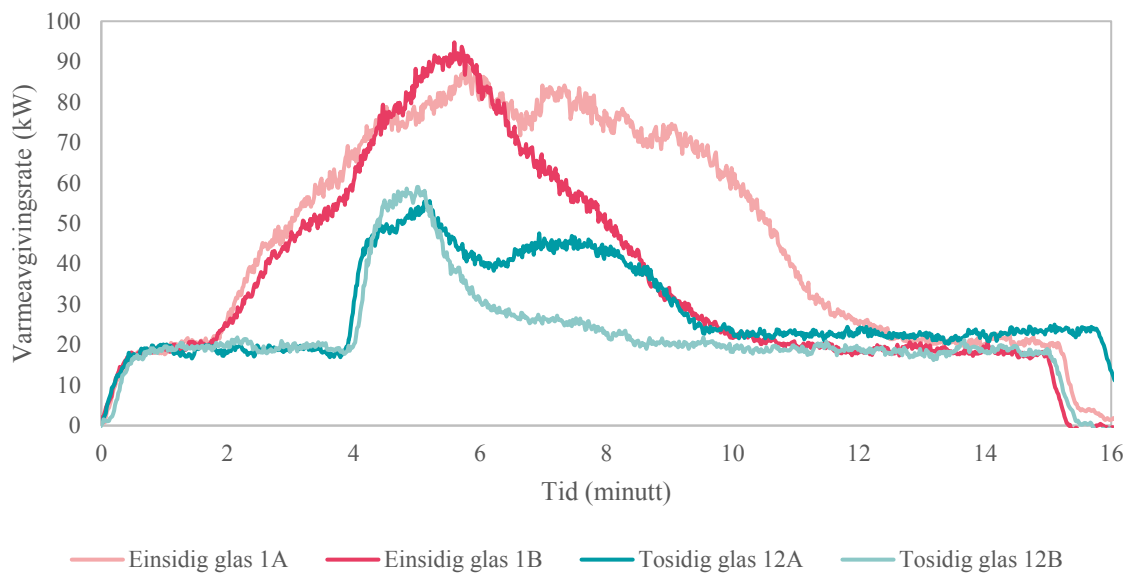
Varmeavgivingsraten for fire ulike sett av forsøk er vist i Figur 4-4, Figur 4-5, Figur 4-6 og Figur 4-7. Dei viser korleis effekten i startbrannen, typen solcellemodul, avstanden til vegg, tida brennaren var aktivert og vindsperra påverkar brannforløpet.

Figur 4-4 viser resultat for 6 forsøk der alle hadde modular med einssidig glas og 6 cm avstand til vegg. Forsøk 1A og 1B hadde 20 kW effekt på gassbrennaren, forsøk 2A og 2B hadde 15 kW effekt på gassbrennaren og forsøk 6A og 6B hadde 10 kW effekt på brennaren. Av figuren kan ein sjå at modulane tek fyr seinare med lågare effekt på brennaren og at med 10 kW startbrann blir varmeavgivingsraten frå modulane tydeleg lågare. Modulen i forsøk nummer 7 med 5 kW effekt på gassbrennaren fok ikkje fyr sjølv etter 60 minutt eksponering og er ikkje med i figuren. Tid til tenning for dei ulike forsøka, maksimal varmeavgivingsrate og den totale varmeavgivinga er også oppgitt i Tabell 4-1. Redusert effekt på gassbrennaren gir også statistisk signifikante reduksjonar av både maksimal varmeavgivingsrate og integrert varmefluks mot bygningen som vist i Tabell 4-2.



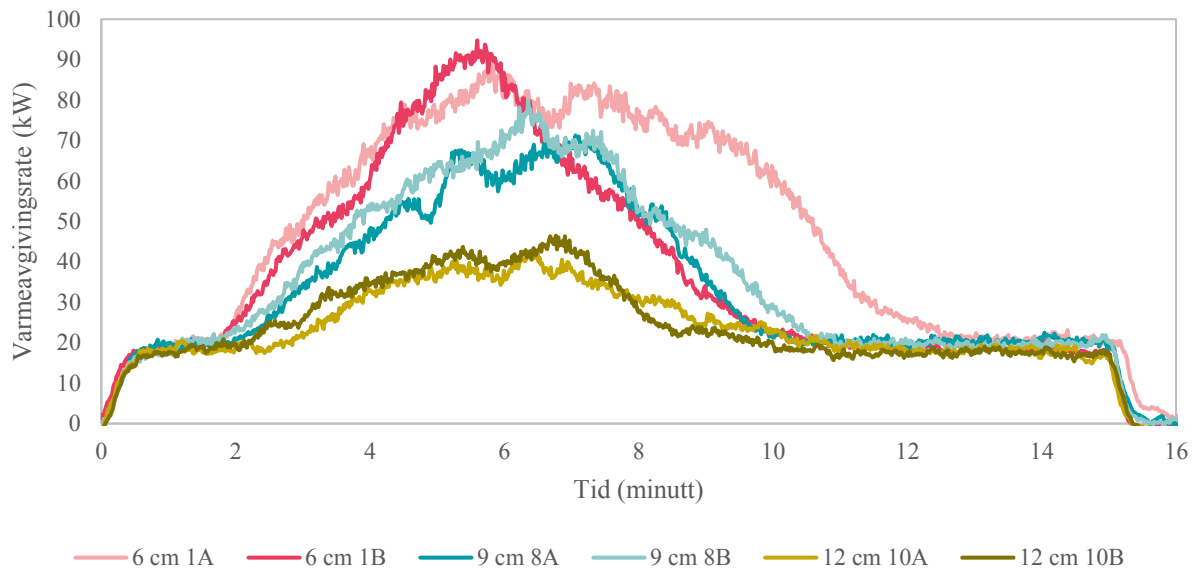
Figur 4-4: Varmeavgivingsrate for forsøka med 6 cm holrom og einssidige solcellemodular med ulik effekt på propanbrennaren i holrommet. Forsøka 2B og 6A manglar måledata frå dei fyrste minutta, men propanbrennaren starta samtidig ($t=0$) i alle forsøka. Forsøket med 5 kW propanbrennar (forsøk 7) er ikkje vist, sidan det ikkje tok fyr.

I Figur 4-5 er det vist resultat for 4 forsøk der alle hadde 20 kW effekt på gassbrennaren og 6 cm avstand til vegg. Forsøk 1A og 1B hadde solcellemodular med einssidig glas og forsøk 12A og 12B hadde solcellemodular med tosidig glas. Figuren viser korleis modulane med tosidig glas brukar lenger tid før dei tek fyr og avgir mindre varme enn modulane med einssidig glas. Modular med tosidig glas gir også statistisk signifikante reduksjonar av både maksimal varmeavgivingsrate og integrert varmefluks mot bygningen som vist i Tabell 4-2.



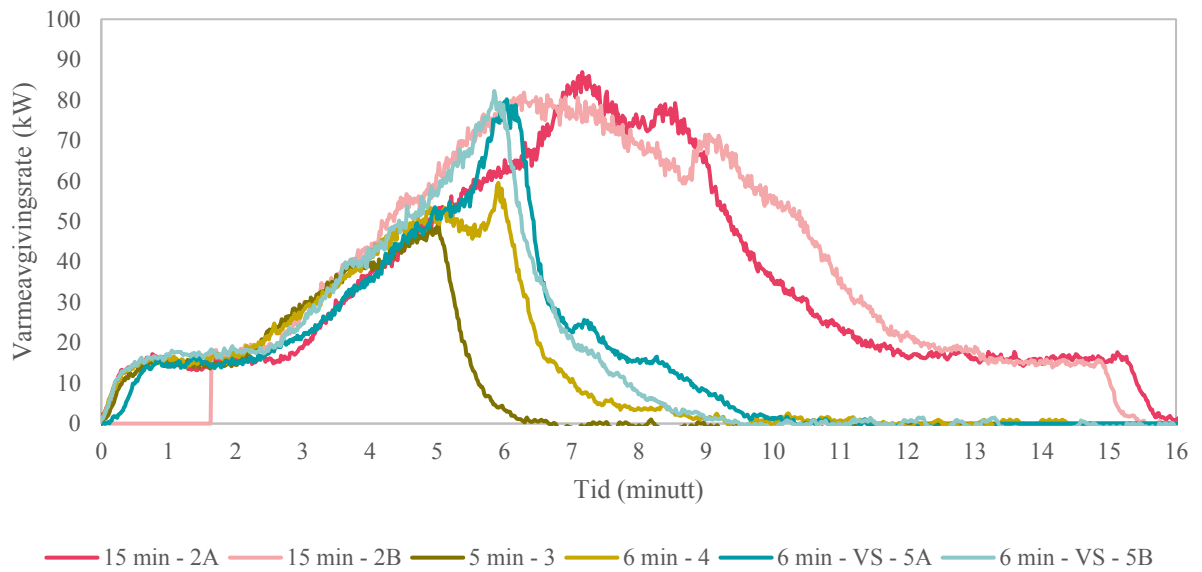
Figur 4-5: Varmeavgivingsrate for forsøka med 20 kW effekt på brennaren og 6 cm holrom med modular med einsidig og tosidig glas.

Figur 4-6 viser resultat frå seks forsøk der alle hadde einsidig glas og 20 kW effekt på startbrannen. Forsøk 1A og 1B hadde 6 cm avstand til veggen, forsøk 8A og 8B hadde 9 cm avstand og forsøk 10A og 10B hadde 12 cm avstand. Denne figuren viser at aukande avstand reduserer varmeavgivingsraten. Også den statistiske analysen viser at aukande avstand gir signifikante reduksjonar av både maksimal varmeavgivingsrate og integrert varmefluks mot bygningen som vist i Tabell 4-2.



Figur 4-6: Varmeavgivingsrate for forsøka med einsidig glas og 20 kW effekt på brennaren med ulike holromsavstanadar.

Figur 4-7 viser 6 forsøk med einsidig glas, 6 cm holrom og 15 kW effekt på brennaren. I 4 av forsøka vart gassbrennaren skrudd av etter 5-6 minutt og i 2 av desse var det montert ein vindsperrereduk montert utanpå kalsiumsilikatplata bak holrommet. I forsøk 3, utan vindsperre, vart gasstilførselen stengt etter 5 minutt og ein kan sjå at varmeavgivingsraten fell raskt mot null etter dette. I forsøk 4, 5A og 5B vart gasstilførselen stengt etter 6 minutt og også her fell varmeavgivingsraten raskt mot null etter dette. Forsøk 5A og 5B hadde i tillegg montert ein vindsperrereduk i holrommet, men varmeavgivingsraten fell også i desse forsøka raskt mot null på same måte som forsøk 4 der det ikkje var montert vindsperre. Den statistiske analysen viser at vindsperra har ein viss signifikant effekt på den maksimale varmeavgivingsraten, men ikkje på integrert varmefluks mot bygningen som vist i Tabell 4-2. Frå Tabell 4-1 kan ein sjå at forsøk 4 utan vindsperre nådde ein maksimal varmeavgivingsrate på 45 kW medan forsøk 5A og 5B nådde 65 og 67 kW. I Figur 4-7 ser ein at dette skjedde etter 6 minutt då gasstilførselen vart stengt. Merk at i figuren viser varmeavgivingsraten inkludert 15 kW frå gassbrennaren. På dette tidspunktet er varmeavgivingsraten frå dei to forsøka med vindsperre omtrent det same som i forsøk 2B utan vindsperre og omkring 20 kW høgare enn forsøk 2A og 4 utan vindsperre.

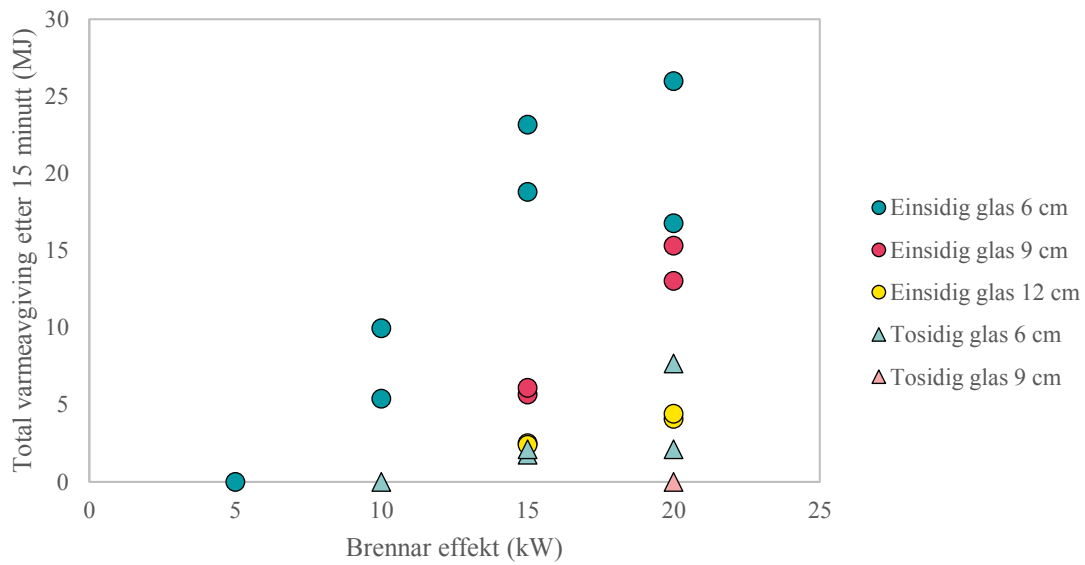


Figur 4-7: Varmeavgivingsrate for forsøk med einsidig glas, 6 cm holrom, 15 kW effekt på brennaren og ulik tid til brennaren vart slått av og to forsøk med vindsperre (VS 5A og 5B) vist med blå kurver.

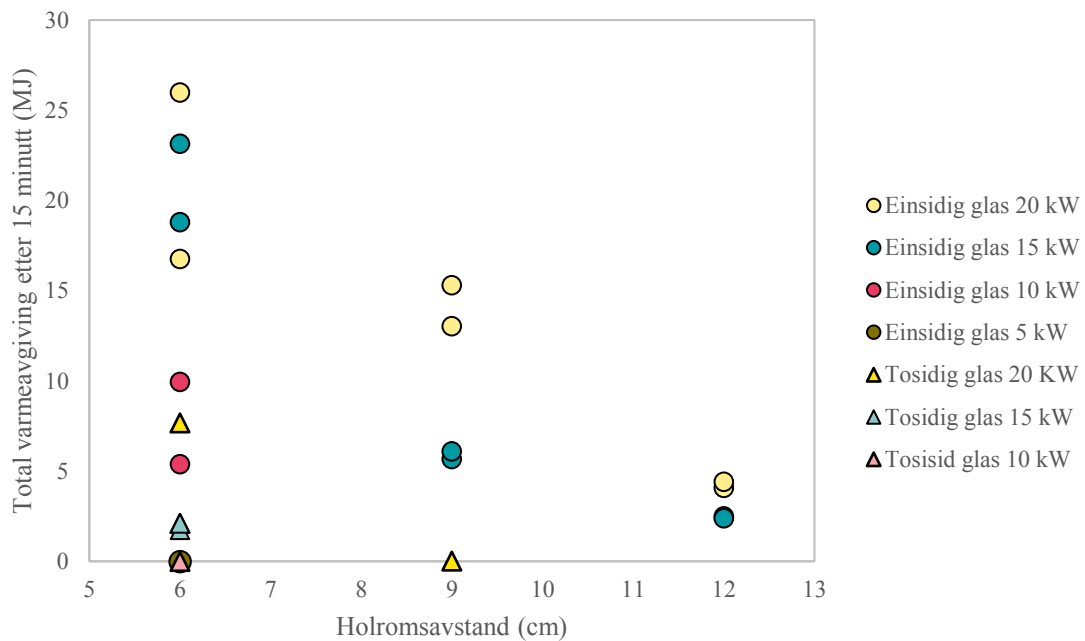
4.1.4 Total varmeavgiving

Den totale varmeenergien som er avgitt frå solcellemodulen er integrert opp til 15 minutt og vist for ulike kombinasjonar av modultypar og holromsavstandar i Figur 4-8. Denne viser at det totalt sett blir avgitt meir varme med aukande effekt på gassbrennaren og med mindre avstand til veggen for modulane med einsidig glas. Resultata frå modulane med tosidig glas monterte 6 cm frå veggen legg seg i same område som modulane med einsidig glas monterte 12 cm frå veggen. I forsøka der solcellemodulen ikkje tok fyr er denne energien 0.

Den same varmeenergien er også plotta for ulike modultypar og brennareffekt i Figur 4-9 med holromsavstanden på X-aksen. Her vises korleis aukande holromsavstand gir lågare varmeavgiving.



Figur 4-8: Total varmeavgivning frå solcellemodulane i løpet av 15 minutt plotta mot effekt på gassbrennaren. Kvart av dei 21 punkta på figuren representerar eitt forsøk. Forsøk der brennaren vart slått av før 15 minutt er ikkje med i figuren.



Figur 4-9: Total varmeavgivning frå solcellemodulane i løpet av 15 minutt plotta mot holromsavstand. Kvart av dei 21 punkta på figuren representerar eitt forsøk. Forsøk der brennaren vart slått av før 15 minutt er ikkje med i figuren.

4.1.5 Nøkkresultat frå alle forsøk med solcellemodular

Ei oversikt over alle forsøka med solcellemodular med dei ulike parametervariasjonane, repetisjonane og tilhøyrande nøkkresultat er vist i Tabell 4-1. Fyrste kolonne er forsøksnummer der A og B indikerer repeterte forsøk med same oppsett. Dei 5 neste kolonnane er inngangsparametrane som er skildra i kapittel 3.3.1. Vidare kjem 5 kolonner med resultat som er relevant for brannspreiinga oppover i fasaden, 2 kolonner med resultat som skildrar varmpåkjeninga mot bygningen som solcellene er montert på og ei kolonne med resultat for varmpåkjeninga mot nabobygg. Inngangsparametrane er fargekoda med raude, kvite og blå celler for å skilje dei ulike variasjonane og resultatata er fargekoda frå grønt til raudt der grøne celler er dei mest gunstige resultat og raude celler er mest ugunstige resultat. Ei forklaring på kvar av kolonnene med resultat kjem etter tabellen.

Tabell 4-1: Oversikt over resultat frå alle forsøk med solcellemodular.

Forsøk nummer	Solcellemodul (0= ein-sidig glas, 1= to-sidig glas)					Brannspreiing oppover					Varme mot bygget		Varme mot nabobygg
	Holromsavstand (cm)	Brennareffekt (kW)	Vindsperre (0= nei, 1= ja)	Brennar tid (min)	Tid til tenning (min)	Tid til maksimal varmeavgivingsrate (min)	Maksimal varmeavgivingsrate (kW)	Total varmeavgivning frå 0 til 15 min (MJ)	Netto varme frå 0 til 15 minutt (MJ)	Integrert varmeflukt etter 15 min (MJ/m ²)	Maksimal temperatur bak CaSi-plata alle (°C)	Maksimal platetermoelementtemperatur (°C)	
1A	0	6	20	0	15,3	2,0	5,8	69	26,0	8,0	29,5	478	136
1B	0	6	20	0	15,0	2,0	5,6	75	16,8	-1,2	19,4	484	99
2A	0	6	15	0	15,4	3,0	7,2	72	18,8	5,3	18,9	469	98
2B	0	6	15	0	15,0	2,7	6,3	67	23,2	9,7	18,3	496	112
3	0	6	15	0	5,0	2,4	5,0	34	3,9	-0,6	3,1	179	41
4	0	6	15	0	6,0	2,4	5,9	45	7,7	2,3	6,0	212	51
5A	0	6	15	1	6,0	2,7	6,0	65	10,0	4,6	8,2	203	57
5B	0	6	15	1	6,0	2,7	5,9	67	10,2	4,8	6,7	230	56
6A	0	6	10	0	19,9	6,9	9,8	20	5,4	-3,6	5,0	417	57
6B	0	6	10	0	15,0	5,8	10,5	45	10,0	1,0	10,2	342	69
7	0	6	5	0	60,0	n/a	n/a	0	0,0	-4,5	1,6	103	33
8A	0	9	20	0	15,0	2,5	7,1	51	13,0	-5,0	8,8	374	79
8B	0	9	20	0	15,0	2,2	6,4	60	15,3	-2,7	9,3	290	88
9A	0	9	15	0	15,0	3,7	5,8	24	5,7	-7,8	3,3	256	60
9B	0	9	15	0	15,0	3,6	5,7	23	6,1	-7,4	4,9	279	62
10A	0	12	20	0	15,0	3,2	6,5	22	4,1	-13,9	2,5	280	56
10B	0	12	20	0	15,0	2,6	6,8	26	4,4	-13,6	2,9	272	58
11A	0	12	15	0	15,0	4,7	7,1	13	2,5	-11,0	2,5	282	45
11B	0	12	15	0	15,0	4,3	6,6	14	2,4	-11,1	2,3	272	47
12A	1	6	20	0	16,2	4,0	5,2	36	7,7	-11,5	12,2	409	93
12B	1	6	20	0	15,0	4,1	5,0	39	2,1	-15,9	3,8	284	72
13A	1	6	15	0	15,0	6,4	9,1	9	1,7	-11,8	3,6	270	64
13B	1	6	15	0	15,0	6,1	7,1	32	2,1	-11	5,7	350	53
14	1	6	10	0	15,2	n/a	n/a	1	0,0	-9	1,8	258	36
15	1	9	20	0	15,0	n/a	n/a	2	0,0	-18	2,5	238	42

Tid til tenning er definert som tida frå gassbrennaren vart tent til varmeavgivingsraten hadde auka med minst 5 kW ikkje medrekna effekten frå gassbrennaren.

Tid til maksimal varmeavgivingsrate er tida frå gassbrennaren vart tent til den maksimale varmeavgivingsraten vart målt.

Maksimal varmeavgivingsrate er den høgaste varmeavgivingsraten som vart målt ikkje medrekna effekten frå gassbrennaren.

Total varmeavgiving frå 0 til 15 minutt er den totale varmeenergien som er avgitt frå prøvestykket i løpet av 15 minutt, målt i MJ. Energien frå gassbrennaren er ikkje med her.

Netto varme frå 0 til 15 minutt er den totale varmeenergien frå prøvestykket minus energien som er tilført frå gassbrennaren, målt i MJ. Positive verdiar vil seie at fasadeoppbygginga har gitt frå seg meir energi enn den har blitt tilført frå gassbrennaren. Negative verdiar betyr at gassbrennaren har tilført meir energi enn fasadeoppbygginga har gitt frå seg.

Integrert varmefluks etter 15 minutt er integralet av den målte totalvarmefluksen som vart målt mot veggjen bak holrommet, målt i MJ/m². Dette representarar den totale varmeenergien som er overført per kvadratmeter mot ei overflate som held konstant låg temperatur.

Maksimal temperatur bak CaSi-plata er den høgaste målte temperaturen som vart målt på baksida av kalsiumsilikatplata bak holrommet.

Maksimal platetermoelementtemperatur er den høgaste målte temperaturen på eit platetermoelement som var montert 1 m frå veggjen og var eksponert for varmestråling frå brannen.

4.1.6 Statistikk

Dei ulike parametrane som vart variert i forsøka er brukt som uavhengige variablar og analysert mot to ulike avhengige variablar som representarar brannspreiinga. Programvara Rstudio versjon 2024.04.2 vart brukt til å gjere ein ANOVA type III analyse sidan datasettet ikkje er balansert. Dei to avhengige variablane som vart vald var maksimal varmeavgivingsrate og integrert varmefluks mot bygningen etter 15 minutt. Resultata frå analysen er vist i Tabell 4-2 der signifikansnivået for dei 5 uavhengige variablane og koeffisienten for verknaden på dei to avhengige resultatvariablane er lagt inn. Lågare signifikansnivå, eller P-verdi, betyr at det er mindre truleg at verknaden skuldast tilfeldig variasjon mellom forsøka. Dei mest signifikante skilnadane i resultat skuldast om solcellemodulen hadde ein-sidig eller to-sidig glas, holromsavstanden og effekten i gassbrennaren. Mindre signifikant er effekten av tida gassbrennaren var aktiv og aller minst signifikant var effekten av vindsperra. Dette heng saman med at det berre vart gjort 4 forsøk der gassbrennaren vart stengt før 15 minutt og berre 2 forsøk med vindsperra. Dersom det hadde vorte gjort fleire forsøk med desse variantane kunne ein vente å finne meir signifikante resultat.

Denne statistiske modellen gjer det mogeleg å samanlikne kor stor påverknad dei ulike variablane har på resultatet. Til dømes kan ein sjå at den maksimale varmeavgivingsraten er venta å bli redusert med 40 kW ved å bytte frå ein modul med ein-sidig glas til ein modul med to-sidig glas. Til samanlikning vil varmeavgivingsraten bli redusert med 8,4 kW per cm auka

avstand og at 5 cm auka avstand vil ha tilsvarande effekt. På same måte kan ein samanlikne med effekten på gassbrennaren og seie at ein redusert effekt på 9 kW også gir tilsvarande reduksjon i den maksimale varmeavgivingsraten.

Resultata for tida brennaren var aktiv og vindsperra er basert på færre forsøk og gir ikkje like tydelege svar. Eitt minutt kortare brennetid skal gi 1,8 kW lågare maksimal varmeavgivingsrate og 1,1 MJ lågare integrert varmekraft. Vindsperra skal auke maksimal varmeavgivingsrate med 26 kW, men resultata viser ikkje nokon signifikant effekt på den integrerte varmekraften.

Tabell 4-2: Resultat av ANOVA for dei ulike uavhengige variablane som er analysert mot dei to nøkkelresultata maksimal varmeavgivingsrate og integrert varmekraft mot bygningen.

Uavhengige variablar	Maksimal varmeavgivingsrate (kW)		Integrert varmekraft mot bygningen etter 15 minutt (MJ)	
	Signifikansnivå (P-verdi)	Verknad	Signifikansnivå (P-verdi)	Verknad
Einsidig eller tosidig solcellemodul	< 0,001	-40 kW ved å skifte frå einsidig til tosidig glas	< 0,001	-10,9 MJ ved å skifte frå einsidig til tosidig glas
Holromsavstand	< 0,001	-8,4 kW per cm auka holrom	< 0,001	-2,9 MJ per cm auka holrom
Effekt brennar	< 0,001	-4,3 kW per kW redusert brennareffekt	< 0,001	-1,1 MJ per kW redusert brennareffekt
Tid brennar	< 0,05	-1,8 kW per minutt kortare brennetid	< 0,01	-1,1 MJ per minutt kortare brennetid
Vindsperre	< 0,05*	26 kW høgare med vindsperre	>0,5 (ikkje signifikant)	

* Dette resultatet kan skuldast variasjonar i forløpet til varmeavgivingsraten til dei forsøka der dette vart variert. Sjå Figur 4-7 for detaljar om dette.

4.2 Del 2: Grøne plantesystem

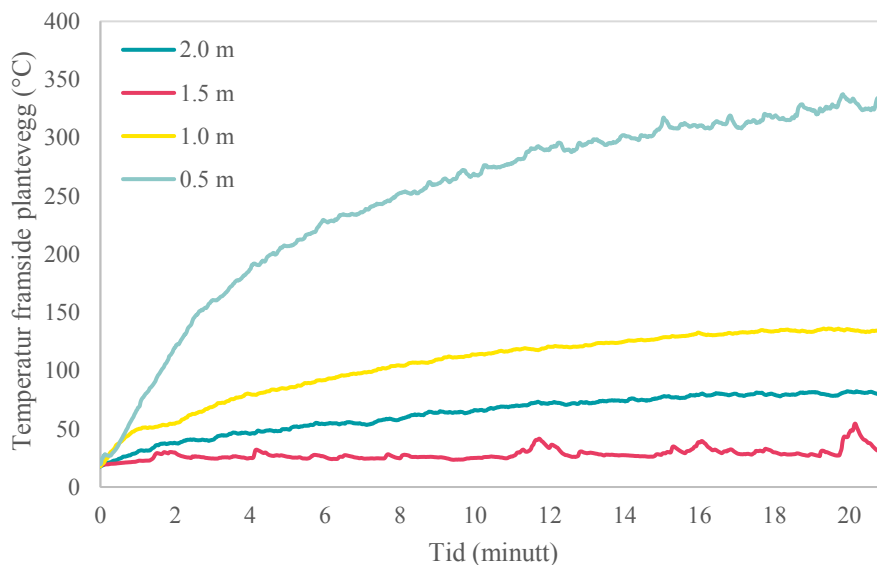
Det er utført totalt 10 forsøk med to ulike typar grønne fasadar, eit ubrennbart og eit brennbart. For begge systema vart dei utførte forsøk med to ulike størrelsar på brannkjelda, 30 kW for i etterlikna ein liten ekstern brann ved planteveggen og 200 kW for å etterlikna at det brenn i plantene i ein veletablert plantevegg. Resultata frå forsøka med det ubrennbare systemet vart presentert i avsnitt 4.2.1 - 4.2.3 og resultata frå forsøka med det brennbare plantesystemet vart presentert i avsnitt 4.2.4 - 4.2.7. Forsøka i denne undersøkinga er utforskande, det er difor ikkje

lagt fram statistikk for resultatene, sidan det ikkje er gjennomført nok repetisjonar eller systematisk variasjon av variablar til at statistisk analyse kan utførast.

4.2.1 Ekstern brannkjelde - ubrennbart plantesystem med planter

Forsøk GV1 vart utført med planter monterte i det ubrennbare plantesystemet som vist i Figur 4-11 (a) før forsøksstart. Brennaren hadde ei effekt på 30 kW som er det same som vert nytta i SBI metoden. Bildet i Figur 4-11 (b) er teke 10 sekund etter forsøksstart og viser utstrekninga av startbrannen. Plantene som var i direkte kontakt med flammene tok raskt fyr og brann fort opp. Plantene rett over vart tørka av varmen og nokre av dei tok også fyr etter kvart. Figur 4-11 (c) er teke 144 sekund etter forsøksstart og viser at det har teke fyr i ein plante (*Juniperus comm.*) plassert heilt i ytre rekkevidde av startbrannen, då denne planta tok fyr bidrog den til brannspreiing vidare oppover i vegg. I Figur 4-11 (d) ser ein planteveggen etter forsøket vart avslutta. Dei raude ringane viser kva planter som brann heilt opp og dei gule ringane viser kva planter som brann delvis opp. Fleire av plantene over dei som brann opp vart heilt eller delvis uttørka.

Det vart ikkje registrert noko tydeleg auke i varmeavgivingsraten som følgje av at plantene tok fyr i forsøket. Den høgste temperaturen som vart målt på framsida av sjølve planteveggen var opp mot 330 °C på slutten av forsøket og denne temperaturen vart målt i det nedste målepunktet, 50 cm over golvet, sjå Figur 4-10 som viser målt temperatur på framsida av planteveggen. I holrommet vart det derimot ikkje målt stor temperaturouke, og høgste temperatur målt i lufta i holrommet var 39 °C medan høgste temperatur målt på veggoverflata i holrommet var 30 °C. Det var liten skilnad mellom temperaturmålingane gjort ved ulike høgder for desse målepunkta i holrommet.



Figur 4-10: Målte temperaturar ved ulike høgder i avstand målt frå golv på framsida av den ubrennbare planteveggen for forsøk GV1.



Figur 4-11: Plantevegg med friske planter (a) før brannforsøk, (b) 10 sekund etter brannstart, (c) 144 sekund etter brannstart og (d) etter avslutta forsøk. Dei raude ringane viser kva planter som brann heilt opp og dei gule ringane viser kva planter som brann delvis opp.

4.2.2 Brann i plantene i veggen – ubrennbart plantesystem

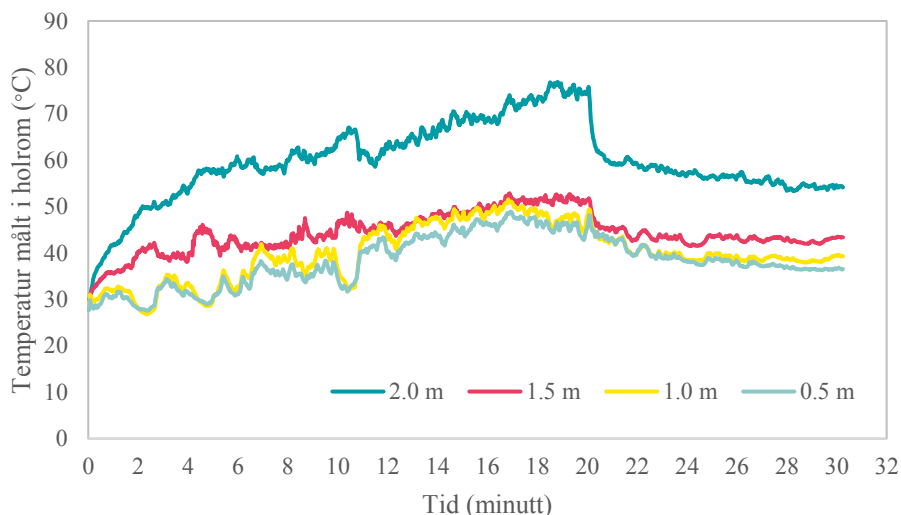
I forsøk GV2 vart effekta på propanbrennaren auka til 200 kW og varigheita redusert til 3 minutt, dette for å simulera at det er plantene i ein veletablert plantevegg som brenn. Plantene som var att i veggen etter forsøk GV1 vart beholdne i dei vidare forsøka, og basert på resultata frå GV1 blei det vurdert at dette ikkje ville gi vesentleg bidrag til brannen i dei etterfylgjande forsøka då dei ikkje ga tydeleg auke i varmeavgivingstraten i forsøk GV1.

Figur 4-12 (a) viser korleis det såg ut rett etter at startbrannen var etablert i forsøk GV2. I tillegg til propanbrennaren brenn det då i nokre av dei øvste plantene. Figur 4-12 (b) viser korleis det brann etter 90 sekund, då har plantene brent opp og det er berre brannkjelda som brenn. Figur 4-12 (c) viser korleis et såg ut 5 sekund etter at brannkjelda var slått av, då gløder det framleis i nokre av planterestane/gropene med vekstsubstrat. På framsida av planteveggen vart temperaturar på opp mot 300 °C rett før forsøksslutt målt i punktet 1,0 m over bakken. Den høgaste målte lufttemperaturen i holrommet var 47 °C og den høgaste målte overflatetemperaturen på veggen i holrommet var 34 °C. Begge desse temperaturane vart målte i dei øvste målepunkta 2,0 m over bakken.

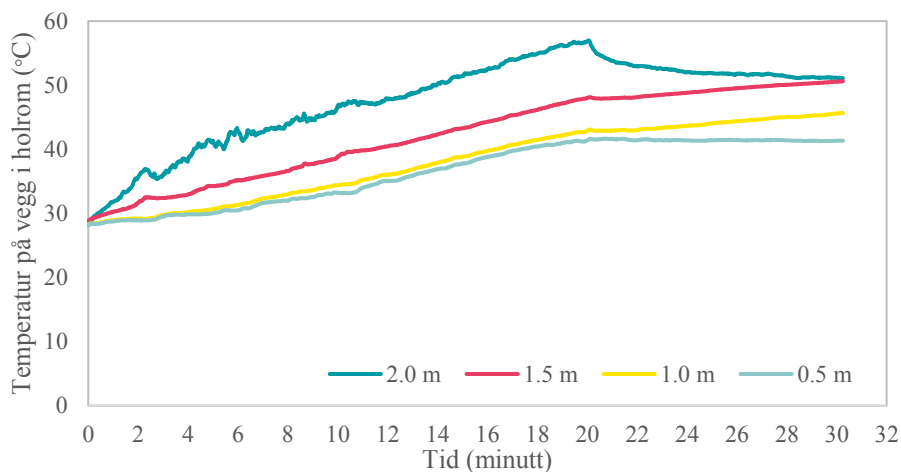


Figur 4-12 (a) Plantevegg i forsøk GV2 (a) ved brannstart, ein etablert 200 kW brann rett under planteveggen, (b) 90 sekund etter brannstart og (c) 5 sekund etter at startbrannen var sløkt ved 3 min.

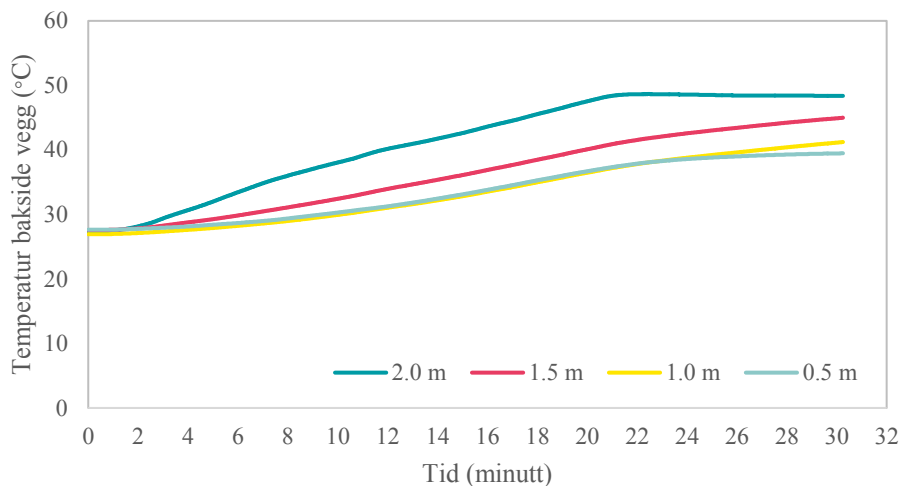
Effekten på brennaren var 200 kW også i forsøk GV3, men i dette forsøket brann den i 20 minutt. Figur 4-13 - Figur 4-15 viser målte temperaturar i holrommet, på framsida av veggen i holrommet og på baksida av veggen dette forsøket. Den høgste temperaturen som vart målt i holrommet var i underkant av 80 °C, den høgste veggtemperaturen i holrommet var omtrent 55 °C og den høgste temperaturen målt på baksida av veggen var omtrent 50 °C. Dei høgste temperaturane vart for alle tre temperaturmålingane målt i målepunkta 2,0 m over bakken.



Figur 4-13: Målt lufttemperatur i holrommet mellom plantesystem og vegg for målepunkt i ulike avstandar frå golv.



Figur 4-14: Målt temperatur på veggoverflata i holrommet for målepunkt i ulike avstandar frå golv.



Figur 4-15: Målt temperatur på baksida av vegg for målepunkt i ulike avstandar frå golv.

4.2.3 Brann i holrom – ubrennbart plantesystem

I forsøk GV4 var brennaren plassert i midten av holrommet og effekten frå brennaren var 15 kW i 15 minutt, som for forsøka med solcellemodular. Med brennaren plassert i holrommet vart dei høgste temperaturane både i lufta i holrommet og på veggoverflata i holrommet målt i det nedste punktet 0,5 m over bakken. I lufta i holrommet var høgste målte temperatur omlag 580 °C og på veggoverflata i holrommet var høgste målte temperatur omlag 520 °C.

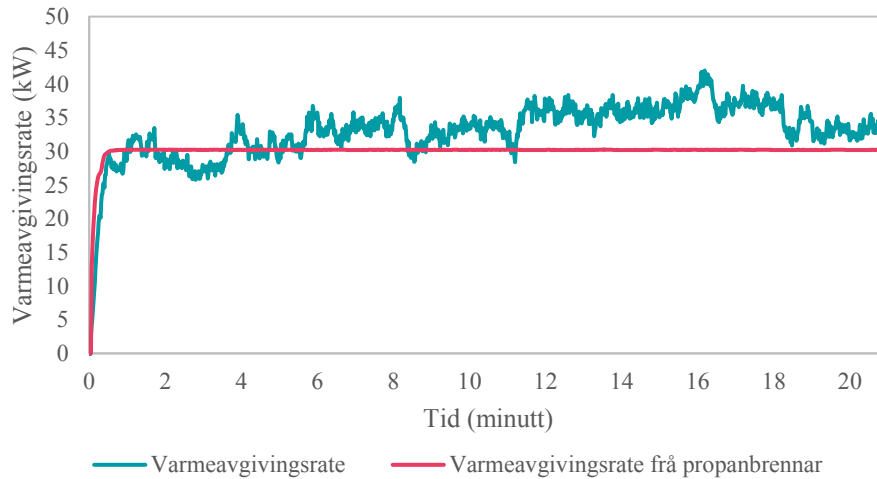
4.2.4 Ekstern brannkjelde – brennbart plantesystem med planter

På same måte som for det ubrennbare plantesystemet vart fyrste forsøk med det brennbare plantesystemet (GV5) utført med modulane fylte opp med friske planter. Propanbrennaren hadde ein effekt på 30 kW og ei varigheit på 21 minutt. Figur 4-16 (a) viser planteveggen før forsøksstart. I Figur 4-16 (b) er brennaren akkurat tent og ein ser at flammene treff rett på den nedste modulen der den skråar utover. Figur 4-16 (c) viser forsøket etter 2 minutt. Då kan ein sjå at nokre av plantene har brent opp, at det er byrja å brenne i plastmodulane og at den nedste modulen held på å falle saman på grunn av brannpåverknaden. Som vist i Figur 4-16 (d) og (e) fortset brannen å spreie seg frå modul til modul oppover slik at dei lausnar og fell ned. I (d) er forsøket vist etter 5 minutt og i (e) er det vist etter 20 minutt når propanbrennaren akkurat er slått av. I Figur 4-16 (f) er det vist korleis planteveggen såg ut 35 minutt etter forsøksstart, dvs. 14 minutt etter at propanbrennaren vart slegen av. Brannen hadde då slutta å spreie seg vidare oppover sjølv om det framleis brann i modulane som hadde falle ned. Det var totalt 5 modular som fall ned i dette forsøket.



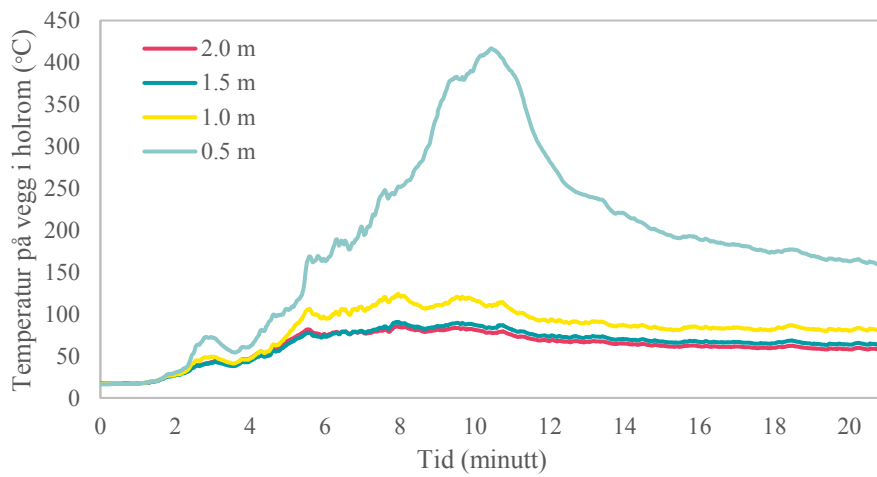
Figur 4-16 Forsøk GV5 med ekstern brannkilde og brennbart plantesystem med planter. (a) før forsøksstart, (b) propanbrennar akkurat tent, (c) 2 minutt etter forsøksstart, (d) 5 minutt etter forsøksstart, (e) 21 minutt etter forsøksstart då propanbrennaren akkurat var slökka, (f) 35 minutt etter forsøksstart, dvs 14 minutt etter at propanbrennaren var slegen av.

Det vart registrert ei lita, men gradvis aukande varmeavgivingsrate fram til 16 minutt ut i forsøket. Den høgste varmeavgivingsrate som vart målt var då 40 kW (det vil seie at bidraget frå plantesystemet med plantar var omtrent 10 kW), etter dette gjekk varmeavgivingsrata ned att til mellom 30 og 35 kW som vist i Figur 4-17.

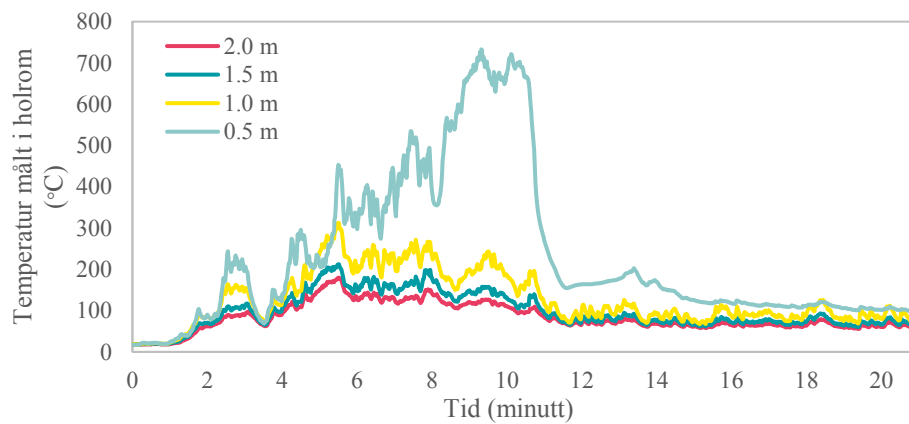


Figur 4-17: Målt varmeavgivingsrate (propanbrennar og plantesystem) i turkis og berekna effekt frå propanbrennar i raudt for forsøk GV5. Effekta frå propanbrennaren er rekna ut frå mengda tilført propan.

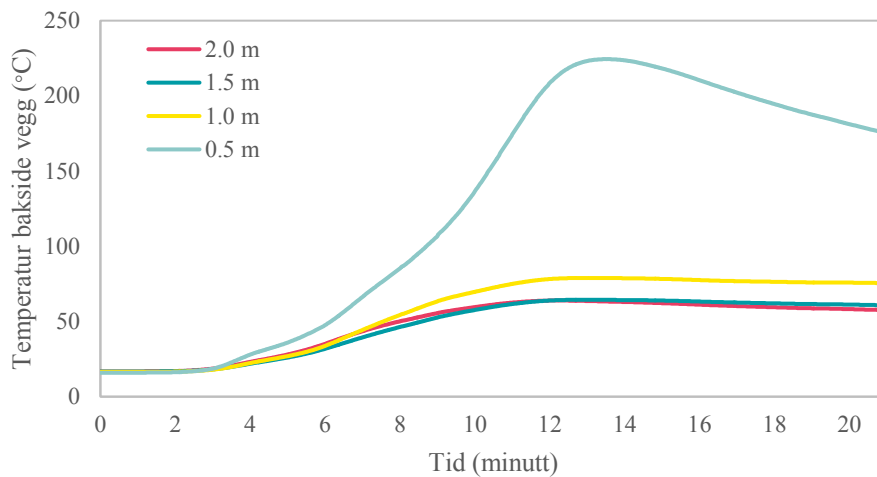
Figur 4-18 - Figur 4-20 viser dei målte temperaturane i lufta i holrommet, på veggoverflata i holrommet og på baksida av veggen gjennom forsøket. Dei høgste temperaturane vart målt i dei lågaste målepunkta som var plassert 0,5 meter over bakken. Desse målepunkta var dermed plassert nær brennaren og når kassane byrja å falle ned fekk flammene direkte tilgang til området som danna det opphavelige holrommet bak plantemodulane. Den høgste temperaturen målt i holrommet var i overkant av 700 °C, medan den høgste målte veggtemperaturen var rett over 400 °C. På baksida av veggen vart det målt opp til 225 °C.



Figur 4-18: Målt lufttemperatur i holrommet mellom plantesystem og vegg for målepunkt i ulike avstandar frå golv.



Figur 4-19: Målt temperatur på veggoverflata i holrommet for målepunkt i ulike avstandar frå golv.



Figur 4-20: Målt temperatur på baksida av vegg for målepunkt i ulike avstandar frå golv.

4.2.5 Ekstern brannkjelde – brennbart plantesystem utan planter

For dette plantesystemet vart det også gjennomført eit forsøk utan planter, men med same brannstørrelse og varigheit som for førre forsøk, 30 kW i 21 minutt. Brannforløpet er vist i Figur 4-21. Biletet i (a) viser veggjen før forsøket starta og (b) viser forsøket rett etter at brannen er starta. (c) viser etter 2 minutt, då har allereie den nedste modulen falle frå kvarandre og vekstsubstratet har falle ut og ned på brennaren. (d) viser forsøket etter 5 minutt, då har dei tre nedste modulane falle ned og nummer fire er i ferd med å falle ned. (e) viser etter 20 minutt og i (f) er vist rett etter at gassbrannen vart sløkt. Målt varmeavgivingsrate kom i dette forsøket opp i 43 kW (det vil seie at bidraget frå plantesystemet var ca 13 kW), det skjedde etter 5,5 minutt.



Figur 4-21: Forsøk GV6 med ekstern brannkjelde og brennbart plantesystem utan planter. (a) før forsøksstart, (b) propanbrennar akkurat tent, (c) 2 minutt etter forsøksstart, (d) 5 minutt etter forsøksstart, (e) 20 minutt etter forsøksstart, (f) 21 minutt etter forsøksstart, rett etter gassbrannen vart sløkt.

4.2.6 Brann i plantene i veggen – brennbart plantesystem

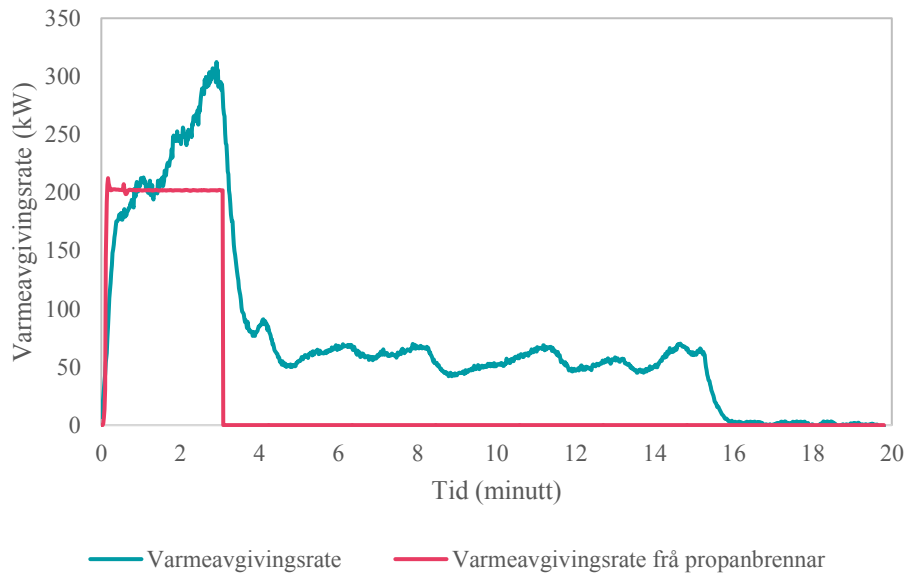
I Forsøka GV7 og GV8 vart det undersøkt korleis det brennbare plantesystemet ville bli påverka av ein brann i sjølve plantene i ein veletablert plantevegg. Dette vart gjort på same måte som for forsøk GV2 for det ubrennbare plantesystemet ved å la propanbrennaren brenna med ein effekt på 200 kW i 3 minutt. Måledata av varmeavgivingsraten er dessverre ikkje tilgjengeleg frå forsøk GV7 og videodokumentasjon er dessverre ikkje tilgjengeleg frå GV8. Dei to forsøka hadde tilsynelatande like brannforløp og dei 4 øvste modulane hang igjen på plass etter forsøket var avslutta for begge desse forsøka. Difor vert bildedokumentasjon vist frå GV7, medan måledata vert vist frå GV8.

Brannforløpet er vist i Figur 4-22. (a) viser forsøket rett etter at brannen er starta. (b) viser etter 2 minutt, då har allereie dei 8 nedste modulane lausna i eine sida eller falle heilt ned, (c) viser forsøket etter 3 minutt då brennaren akkurat var sløkka, (d) viser etter 5 minutt, (e) viser etter 20 minutt og i (f) er vist etter 23 minutt, rett etter at brannen er sløkka. I dette forsøket var det 12 modular som heilt eller delvis fall ned, og endå ein modul som fekk tydelege skader som fylgje av brannpåkjenninga dei vart utsette for.



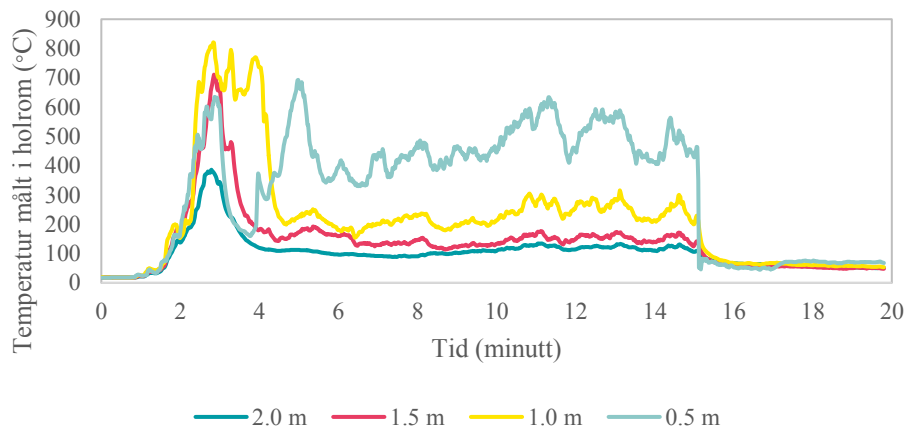
Figur 4-22: Forsøk GV7. (a) Propanbrennar akkurat tent, (b) 2 minutt etter forsøksstart, (c) etter 3 minutt då propanbrennaren akkurat var sløkt, (d) 5 minutt etter forsøksstart, (e) 20 minutt etter forsøksstart, (f) 23 minutt etter forsøksstart då brannen vart sløkt med vatn.

Figur 4-23 viser den målte varmeavgivingsraten fra brannen (propanbrennar og plantesystem) i turkis og den berekna effekten fra propanbrennaren i raudt. Den målte varmeavgivingsraten stig jamt i løpet av dei tre minutta propanbrennaren brenn, og er etter tre minutt rett over 300 kW (det vil seie at bidraget fra plantesystemet var ca 100 kW). Etter at propanbrennaren er sløkt fell den total varmeavgivingsraten brått og det brenn vidare i plantesystemet med ei varmeavgivingsrate på mellom 50 og 70 kW dei neste 11 minutta.

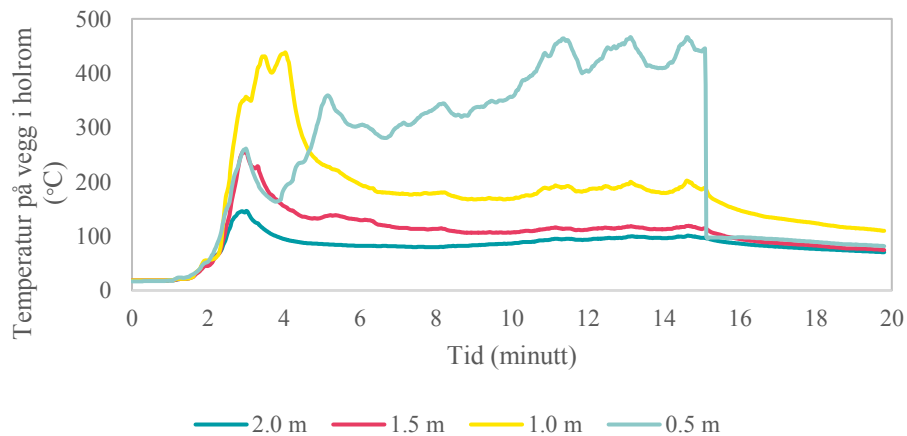


Figur 4-23: Målt varmeavgivingsrate i turkis (propanbrennar og plantesystem) og berekna effekt fra propanbrennar i raudt for forsøk GV8. Effekta fra propanbrennaren er rekna ut fra mengda tilført propan.

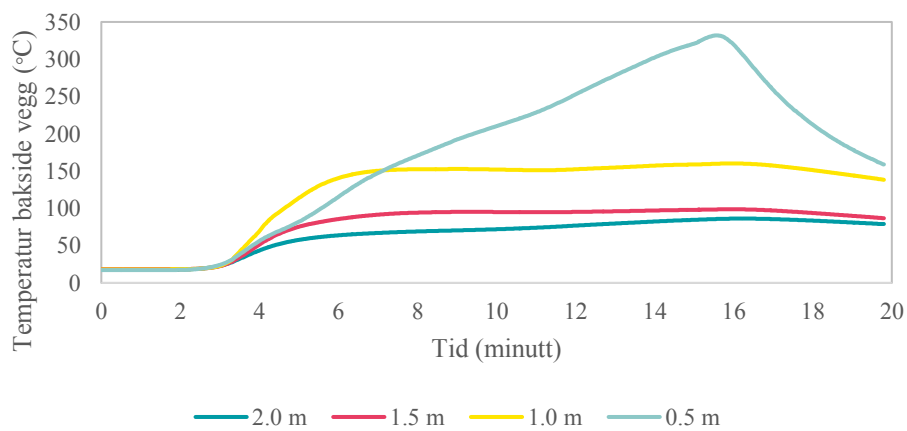
Figur 4-24 - Figur 4-26 viser dei målte temperaturane i lufta i holrommet, på veggoverflata i holrommet og på baksida av veggen gjennom forsøk GV8. For alle dei tre målingane steig temperaturen fortast i målepunkta 1,0 m over bakken. I lufta i holrommet og på veggoverflata i holrommet fall temperaturane målt 1,0 m over bakken etter 4 minutt, samstundes steig desse temperaturane i målepunkta 0,5 m over bakken. Same effekt vart observert på baksida av veggen, men med ei tidsforseinking på om lag 2 minutt samanlikna med målingane gjort i holrommet. I lufta i holrommet var høgste målte temperatur rett over 800 °C, på veggen i holrommet var høgste målte temperatur om lag 450 °C og på baksida av veggen var høgste målte temperatur om lag 330 °C.



Figur 4-24: Målt lufttemperatur i holrommet mellom plantesystem og vegg for målepunkt i ulike avstandar frå golv i forsøk GV8.



Figur 4-25: Målt temperatur på veggoverflata i holrommet for målepunkt i ulike avstandar frå golv i GV8.



Figur 4-26: Målt temperatur på baksida av vegg for målepunkt i ulike avstandar frå golv i GV8.

4.2.7 Brann midt i plantene i veggen – brennbart plantesystem

For å undersøkje korleis nedfall av brennande plastmateriale potensielt vil kunne bidra til brannspreiing nedover ved brann i ein slik plantevegg vart dei to siste forsøka, GV9 og GV10, utførde med brennaren plassert midt på planteveggen. Dette vart gjort ved å fjerne modul nr 8 og 9 nedanifrå, slik at det totalt var to modular færre i desse forsøka. Figur 4-27 (a) viser oppsettet og Figur 4-27 (b) – (k) korleis brannen utvikla seg for forsøk GV9. Bilete (b) er teke rett etter brannstart og bileta (c) – (g) er tekne høvesvis 2, 3, 4 og 5 minutt etter brannstart. Allereie etter 2 minutt har modulane byrja å falle saman og det har ramla jord ned på bakken. Dei neste minuttane brenn det i alle modulane som er over brennaren, dei sig saman og fell nedover i veggen. Biletet i (f) viser godt korleis brennande plast renn nedover. Som vist i (g) har alle modulane over brennaren falle ned etter 5 minutt, då brenn det berre i restar av plast langs innfestingsskinnene. Bileta i (h) – (j) er tekne etter høvesvis 10, 15 og 20 minutt og viser korleis også modulane under brennaren delvis brenn, smeltar, sig saman og fel nedover. Bilete i (k) er vist etter 25 minutt og då vart brannen sløkt.





(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



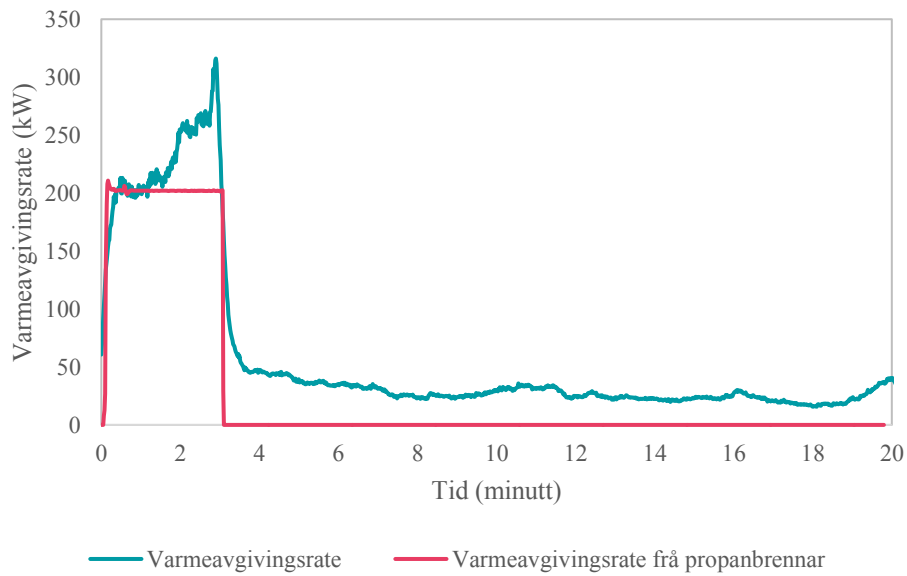
(i)



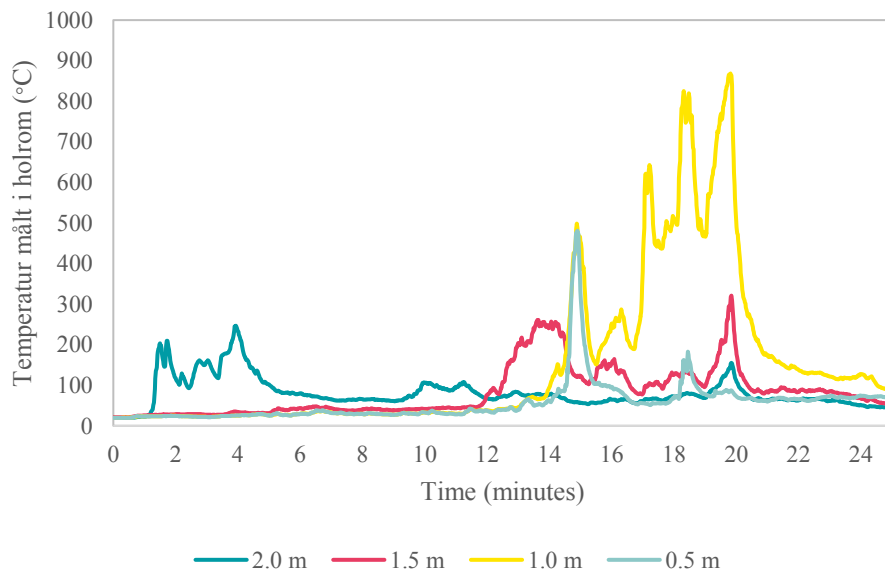
Figur 4-27 (j) (k)
 Forsøk 9 (a) før forsøksstart, (b) rett etter brannstart, (c) etter 1 minutt, (d) etter 2 minutt, (e) etter 3 minutt, (f) etter 4 minutt, (g) etter 5 minutt, (h) etter 10 min, (i) etter 15 minutt, (j) etter 20 minutt og (k) etter 25 minutt.

Figur 4-28 viser den målte varmeavgivingsraten fra brannen (propanbrennar og plantesystem) i turkis og den beregna effekten fra propanbrennaren i raudt. Den målte totale varmeavgivingsraten stig jamnt i løpet av dei tre minuttane propanbrennaren brenn, og er etter tre minutt rett over 300 kW. Etter at propanbrennaren er sløkt fell varmeavgivingsraten brått og det brenn vidare med ein varmeavgivingsrate under 50 dei neste 21 minutta fram til brannen vart sløkt.

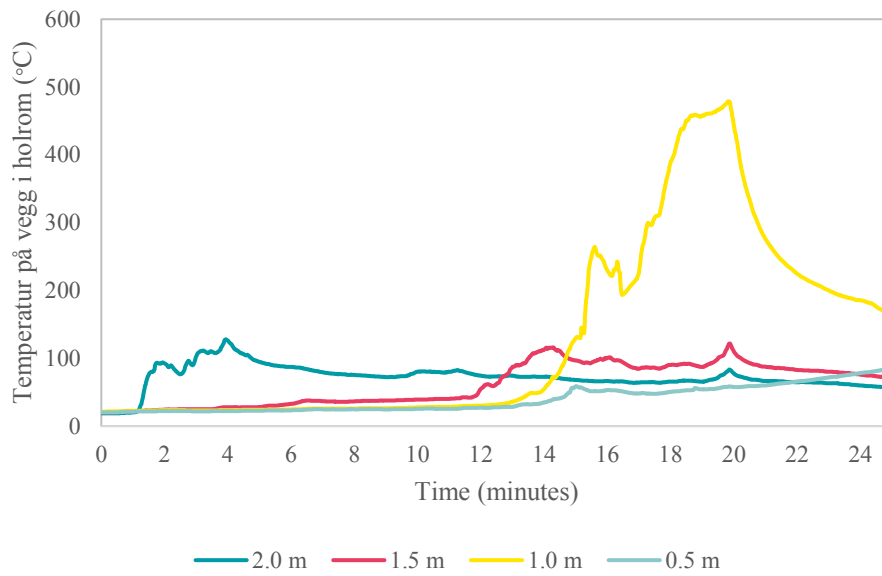
Figur 4-29 - Figur 4-31 viser dei målte temperaturane i lufta i holrommet, på veggoverflata i holrommet og på baksida av veggen gjennom forsøk GV9. Høgste temperatur målt i lufta i holrommet var 840 °C, på veggen i holrommet vart det målt opp til 470 °C og på baksida av veggen vart det målt rett i overkant av 200 °C på det meste.



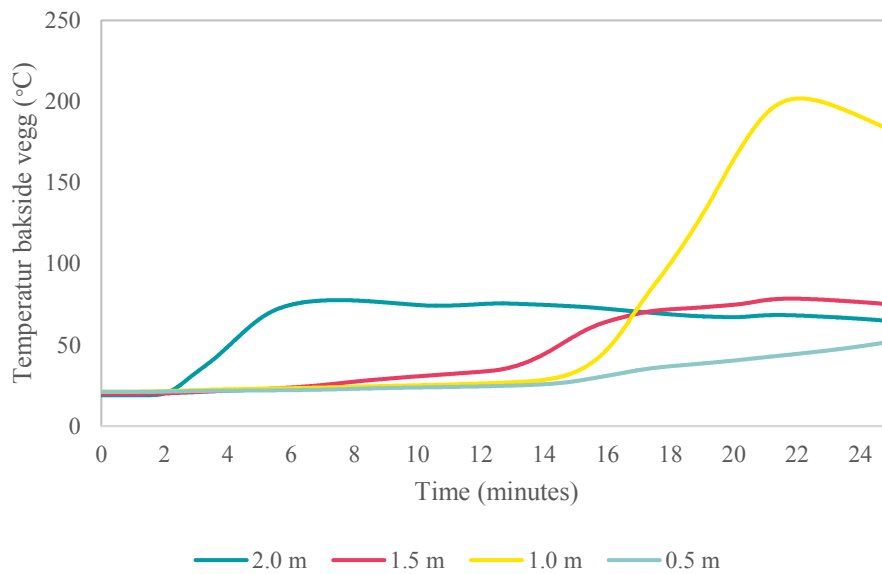
Figur 4-28: Målt varmeavgivingsrate i turkis (propanbrennar og plantesystem) og berekna effekt frå propanbrennar i raudt for forsøk GV9. Effekta frå propanbrennaren er rekna ut frå mengda tilført propan.



Figur 4-29: Målt lufttemperatur i holrommet mellom plantesystem og vegg for målepunkt i ulike avstandar frå golv i forsøk GV9.



Figur 4-30: Målt temperatur på veggoverflata i holrommet for målepunkt i ulike avstandar frå golv i GV9.



Figur 4-31: Målt temperatur på baksida av vegg for målepunkt i ulike avstandar frå golv i GV9.

5 Diskusjon

I dette kapitlet vert funna frå både kartleggingsarbeidet og brannforsøka diskutert med tanke på svara ut forskingsspørsmåla i prosjektet (sjå avsnitt 1.2). Som nemnt i innleiinga er det fleire fellestrekk i utforminga av systema, og nokre fellestrekk i dei relevante gjeldande regelverka og standardane. Generelt for energieffektive, så vel som for alle andre typar bygg, er det viktig med ei heilskapleg tankegang når det gjeld branntryggleik. Det er vidare nokre utfordringar knytt til holrommet mellom desse objekta og fasaden som er felles. Men utover det, har vi i arbeidet med denne studien funne at systema og læringspunktka ikkje har så mange overlappende punkt som vi kanskje først trudde, og vi har derfor valt å dele diskusjonen inn i to delar, først solcellemodular og så planteveggar.

5.1 Del 1: Solceller

5.1.1 Kva parameter kan tilpassast ved bygging av fasadar med solcellemodular?

Solcellemodular kan installerast på fasadar enten utanpå ytterkledningen som BAPV eller så kan solcellene monterast som ytterkledning og definerast som BIPV. Det er mange omsyn å ta for å sikre at solcellene skal fungere godt, produsere mest mogeleg straum, sikre tilgang til kontroll og vedlikehald, føring av kablar, tilpassing til vindauge eller andre bygningsdelar på fasaden og at fasaden skal sjå bra ut.

Val av type solcellemodul har mykje å seie for både produksjon, kostnad og estetikk. Mange solcellemodular er testa etter IEC 61730 [17], men denne er ikkje dekkande for korleis solcellemodulen vil oppføre seg i ein brann. Dersom solcellemodulane er klassifisert etter EN 13501-1 [1] og har oppnådd til dømes klasse B,s3-d0 eller D,s3-d0 seier det meir om eigenskapane som er relevant for brannrisiko i fasaden, men det kan vera store forskjellar i resultat avhengig av korleis solcellemodulane er montert under testen. Det mest representative alternativet vil vera ein standardisert fullskala fasadetest som til dømes SP Fire 105 der heile fasaden blir bygd opp på same måte som den skal brukast og eksponert for ein større brann [65]. Slike storskala testar er relativt kostbare og må gjennomførast på den aktuelle kombinasjonen av veggmateriale, innfesting og solcellemodular slik at dette i mange tilfelle vil måtte dekkast inn av kvart prosjekt dersom det ikkje er gjennomført ein relevant test av modulane med aktuell innfesting og veggmateriale.

Modulane som vart brukt i denne forsøksserien har berre vore testa med ein liten flamme for å passere krava i IEC 61730 [17] og det var ikkje tilgjengeleg dokumentasjon på klassifisering etter EN 13501-1 [1] eller storskala testing i fasade. Dei to ulike typane var relativt like, hadde same dimensjonar, men hadde ulik oppbygging med einsidig eller tosidig glas, som igjen gav utslag på resultatata i brannforsøka (meir om det nedanfor).

Festesystemet som blir brukt til å montere solcellemodulane på fasaden må passe til modulane og vil saman med utforminga av ramma på solcellemodulane bestemme kor lite luftrommet bak solcellene kan bli. Det gjeld for både BAPV og BIPV. Dersom luftinga skal vera større går det an å montere festesystemet i ein avstand til veggen bak. Dette kan gjerast med klossar eller lekter i tre, aluminium eller andre material. For å sikre tilstrekkeleg lufting til kjøling av solcellene og plass til føring av kablane til modulane er det viktig at ikkje luftrommet blir for

lite. Dersom avstanden mellom vegg og solcellemodular skal aukast vil det føre til at veggen blir tjukkare og det kan gå ut over ytre dimensjonar til bygningen, eller redusere arealet innvendig. Det kan igjen ha store økonomiske konsekvensar for eiar av bygget.

Materialet bak solcellene vil i BIPV-installasjonar vera ein form for vindsperre og i BAPV-installasjonar ytterkledninga til bygningen. Ved ettermontering av solcellemodular på ein eksisterande fasade kan ein vurdere om materialet som er brukt er egna som det er, om det kan skiftast ut med noko anna. Dersom det må gjerast store endringar med den eksisterande fasaden vil det kunne auke kostnadane med installasjonen. Dersom solcellemodulane skal installerast på nybygg vil det vera enklare å gjere val av material bak solcellemodulane utan at det treng å få store ekstrakostnader. Ved å velje vindsperre av gips i klasse A1 eller A2 i staden for vindsperreduk i klasse D, eller trefiberplater i klasse E vil mengda brennbart materiale i holrommet reduserast. Lekter av tre som blir brukt til å auke luftrommet kan vera ubehandla i klasse D, eller brannimpregnert og ha klasse B. Det er med andre ord fleire val ein kan gjera for å auke branntryggleiken i holrommet.

Inndeling og seksjonering av holrommet er mogeleg ved å installere brannsikre holromsventilar som sikrar fri flyt av luft under normal drift og som stenger ved brann. Dette kan bidra til å redusere brannspreinga i fasaden, men det kan vera utfordrande å sikre at denne tettinga verkar i ein brann når også materiala i solcellemodulane blir svekka [4]. Eit anna alternativ er å dele inn solcelleinstallasjonen i felt som ikkje dekkjer heile fasaden og bruke andre material i fasaden mellom felta med solcellemodular som til dømes forslag frå den sveitsiske bransjenormen [12].

For å summera opp er det mange parametarar å velje ved installasjon av solcellemodular på fasadar, og det er mange andre omsyn enn branntryggleik som bestemmer dei fleste. Ut frå gjennomgangen i denne studien har vi funne at det er tre parameter som er særskild viktige for korleis ein brann kan utvikle seg i ein fasade med solcellemodular. Vi tilrår at desse er i fokus ved bygging av fasadar:

- Avstanden mellom vegg og solcellemodul.
- Om solcellemodulane har einsidig eller tosidig glas.
- Kva for andre brennbare materiale som er i holrommet.

5.1.2 Kva parameter gir størst utslag på faren for brann?

Ut i frå dei gjennomførte forsøka er det ikkje funne nokon vesentleg forskjell i kva for parametarar som påverkar faren for tenning, brannspreiing langs fasaden og varmeeeksponeringa mot bygningen og nabobygningen. Ein kan dermed seie at dei kombinasjonane som lettast tek fyr også brenn kraftigast og gir størst varmpåkjening både mot bygningen og mot nabobygningen. I forsøka med solcellemodular vart det målt lågare temperaturar i platetermoelementet som sett frå nabobygningen enn temperaturane som vart målt innover i veggen bak holrommet. Dette betyr at faren for brannspreiing er større inn i bygningen enn til nabobygningen i desse forsøka.

Dei forsøksoppsetta som gav dei kraftigaste brannane var forsøka med solcellemodular med einsidig glas og liten avstand til veggen. Dette tilsvarar oppbygginga av solcellefasaden som vart testa i full skala og førte til brannspreiing opp langs heile fasaden [4]. Resultata frå denne forsøksserien viser at fasaden truleg kunne greidd seg betre dersom det hadde vore større holromsavstand eller modulane hadde hatt glas på begge sider eller begge delar.

Med 6 cm holrom tok modulane med einsidig glas fyr ved ein brennareffekt på 10 kW etter omkring 6 minutt medan modulane med tosidig glas ikkje tok fyr ved 10 kW, men måtte ha 15 kW effekt på brennaren før dei tok fyr etter 6 minutt. Med aukande avstand tolte også modulane meir varme frå startbrannen og gav frå seg mindre varme når dei tok fyr. Den statistiske analysen av effekten av desse parametranne viser at å auke holromsavstanden med 4-5 cm har same effekt som å bytte frå modulen med einsidig glas til tosidig glas.

I dei fleste forsøka har det ikkje vore andre brennbare material i holrommet enn solcellemodulane med unntak av to forsøk der det vart lagt til ein vindsperrereduk. Denne vindsperrereduken hadde brannklasse E og ei flatevekt på omkring 68 g/m². Til samanlikning inneheld solcellemodulane omkring 1000 - 1500 g/m² med brennbart materiale slik at mengda brennbart materiale i vindsperra er relativt liten samanlikna med solcellemodulane. Med så få forsøk har det ikkje vore mogeleg å sjå nokon tydeleg effekt verken på tid til tenning eller kor kraftig det brann på grunn av vindsperra. Statistikkanalysen viser ein signifikant auke i maksimal varmeavgivingsrate med vindsperra, men dette kan skuldast at varmeavgivingsraten i forsøk 4 gjorde ein dupp etter 5 minutt som ikkje vart registrert i forsøk 2A og 2B. Dette gjorde at varmeavgivingsraten i forsøk 4 var lågare på det tidspunktet at brennaren vart slått av enn forsøka 5A og 5B med vindsperre og forsøk 2A og 2B som ein kan sjå i Figur 4-7.

Effekten av startbrannen er også vesentleg for å avgjere om solcellemodulane tek fyr og kor kraftig varmeutviklinga frå brannen i solcellemodulane blir. Her vil også andre material som vindsperre, kablar og koplingsboksar, eller anna rusk og rask som har samla seg i området ved arnestaden ha noko å seie for kor mykje effekt og energi som skal til for å starte ein sjølvgåande brann i solcellemodulane. Som ein kan sjå av Figur 4-7 sløkte brannen i holrommet relativt raskt så snart gasstilførselen til brennaren vart stengt. Dette indikerer at brannen ikkje er sjølvgåande og treng ekstra energi frå andre brennbare material enn solcellemodulen eller den tynne vindsperrereduken. Dette står i motsetning til brannen som vart observert i storskalaforsøket av fasaden med BIPV-modular der brannen i holrommet spreidde seg utan andre varmekjelder enn dei brennbare materiala i holrommet [4]. Det er usikkert kva som gjorde at brannen i desse forsøka sløkte av seg sjølv då startbrannen stoppa medan den held fram oppover fasaden i storskalaforsøket. Om det hadde vore montert ein modul ovanfor den modulen som brann i desse forsøka ville modulen over vorte eksponert for varmen som stig både frå startbrannen og frå brannen i solcellemodulen under. Kor stor del av denne varmen som blir overført andre stader, og kor stor del som når modulen over vil vera avhengig av korleis fasaden og holrommet er utforma og på vêt og vind og dette kan variere mellom forsøka i redusert og i full skala. Skilnaden er viktig å merkje seg, fordi det viser kor viktig skala og storleik er i brannforsøk, ein kan ikkje sjå alle dei same resultatane i mellomskala som ein kan i større eller full skala.

5.1.3 Korleis kan fasadar med solcellemodular utformast med minst mogeleg fare for brann?

Forsøka viser at solcellemodulane kan brenne ganske kraftig og avgi vesentleg meir varme enn det som vart tilført i startbrannen. I ein større installasjon med fleire solcellemodular oppover fasaden vil denne varmen bli leia vidare oppover i holrommet bak neste modul dersom holrommet er samanhengande. For at ein brann skal kunne spreie seg i eit materiale må varmen frå flammen bli overført til nytt materiale slik at også dette materialet kan ta fyr. Når varmen blir leia inn i eit trangt holrom med brennbare overflater vil denne overføringa kunne skje meir effektivt enn på eit ope område. For å redusere faren for at brannen kan spreie seg i fasaden kan

ein enten redusere varmpåverknaden mot dei brennbare overflatene eller gjere at overflatene toler meir oppvarming før dei tek fyr.

Variasjonen av effekt på startbrannen viser at dersom denne er for liten vil ikkje solcellemodulane ta fyr. Her ser ein at modulane toler større effekt dersom avstanden til veggen blir større og at modulane med glas på baksida toler meir enn modulane med plast på baksida. Dette viser at dersom ein installerer solcellene med større avstand til veggen eller brukar modulane med glas på baksida kan dei tole ein kraftigare startbrann utan at brannen vil spreie seg vidare.

Ved å montere solcellemodulane med større avstand, og å bruke modular med glas på baksida viser resultatane også at dei avgir mindre varme når dei tek fyr. På same måte som faren for at solcellemodulen tok fyr auka ved aukande varme frå startbrannen vil også faren for at neste modul tek fyr auke med aukande varme frå brannen i modulen.

Andre brennbare material i holrommet vil også bli varme og kan ta fyr. Desse vil avgi varme til holrommet og auke påkjenninga på materiala oppover i holrommet. Forsøka der det vart lagt til ein vindsperrereduk i klasse E viste derimot liten effekt av dette og det vart ikkje målt nokon tydeleg auke i varmeavgivingsrate eller brannspreinga i solcellemodulen trass i at vindsperrereduken brann. Dette kan skuldast at mengda materiale i vindsperrereduken berre utgjorde om lag 70 g/m^2 , medan mengda brennbart materiale i solcellemodulane til samanlikning var omkring $1,5 \text{ kg/m}^2$.

Oppsummert viser desse forsøka at både auka avstand mellom veggen og solcellemodulane og å bruke solcellemodular med tosidig glas bidreg til å redusere faren for at ein brann skal kunne spreie seg i ein fasade med solcellemodular. Dersom ein også kan redusere varmeavgivingsraten frå ein startbrann eller ein elektrisk feil blir sjansen for tenning redusert. Forsøka viser ikkje nokon vesentleg effekt av å installere ein tynn vindsperrereduk, men her er det ikkje gjort så mange forsøk, slik at bruken av resultatane til utforming av fasadar bør gjerast med varsemd. Andre brennbare material i holrommet, som trelekter eller større elektriske komponentar vil kunne bidra med vesentleg meir energi enn vindsperrereduken som vart brukt og kan ha ein større effekt.

5.2 Del 2: Grøne plantesystem

5.2.1 Kva parameter kan tilpassast ved etablering av grønne planteveggar?

Grønne planteveggar er veggjar der plantene veks i modular eller andre løysingar som gjer at dei har eit vertikalt rotsystem. Det kan veljast ulike løysingar for slike planteveggar, typisk i form av modular eller filtflommer. Produkta er laga i ulike materiale og når det gjeld brannklassifisering av produkta (utan planter) er det i dette prosjektet funne eit bredt spekter av produkt, frå dei som etter EN 13501-1 tilfredsstillar klasse A1 eller A2,s2,d0 til produkt som ikkje oppgitt på ha noko brannklassifisering i det heile. Nokre av systema er laga for å monterast utanpå den eksisterande fasaden, medan andre kan brukast som erstatning for fasaden og dermed fungere som klimaskalet til bygningen. Det vil også vera mogeleg å tilpasse korleis dei ulike plantesystema vert festa på veggen, både når det gjeld bruk av materialar og geometri.

I tillegg til sjølv produkta plantene skal vekse i, er også plantene i seg sjølv viktige for brannsikkerheita. Det kan veljast planter med ulike branneegenskapar [35]. Det er viktig med stell og vedlikehald for å holda plantene friske og å redusere mengda dødt materiale i fasaden [60]. For å sikre dette må det etablerast eit vatningssystem, og ein plan for vedlikehald må utarbeidast.

Det kan også tas ulike val når det gjeld utforminga av det grønne plantesystemet på fasaden. Dette kan gjerast ved å begrensa det totale arealet, ved å seksjonera planteveggen i fleire separate deler eller ved å unngå etablering av plantevegg i områder t.d. rundt vindauga og dører, eller ved utgangar.

5.2.2 Kva parameter gir størst utslag på faren for brann?

Forsøka utført i denne studien er av utforskande art og det er ikkje gjort tilstrekkeleg med repetisjonar og systematisk variasjon av variablar til å kunne sei kva parameter som gir størst utslag for faren for brann. Forsøka viser likevel korleis to ulike system vil kunne bli påverka av brann ulikt, og gir også viktige observasjonar av mogelege mekanismar for brannspreiing som fylgje av brann i ein plantevegg.

Kor lett planter vil ta fyr er i litteraturen funne å avhenga av om plantene er friske og om det er mykje dødt plantemateriale i fasaden [54]. Både tid til tenning og varmeavgivingsrata aukar når fuktinnhaldet i plantene fell [62,63]. I to av dei utførde forsøka i denne studien var det montert friske, nokså små planter i planteveggane. I begge desse forsøka med planter vart det observert at plantene tok fyr med ei ganske moderat brannkjelde på 30 kW. Det kan difor forventast at dersom forsøka hadde inkludert tørre eller døde planter, så ville dei også ha teke fyr ganske rask, og avhengig av brannen ville vorte kraftigare enn i dei utførde forsøka.

For det ubrennbare plantesystemet var propanbrennaren nesten like brei som planteveggen, men det var likevel ei kolonne med planter ytst på kvar side som var plassert utafor rekkjevidda til flammene frå propanbrennaren. Det vart i forsøket ikkje observert noko horisontal brannspreiing, og plantene i desse to radene brann ikkje, sjå Figur 4-11(d). I forsøka var det nytta forholdsvis små planter, dette grunna praktiske begrensingar knytt til tilgjengeleg tid i prosjektet. Større planter vil kunne henga meir saman og også utvikle ein kraftigare brann, det kan altså ikkje frå dette forsøket utelukkast at brannen kan spreie seg horisontal i plantene i eit ubrennbart plantesystem. Observasjonen av at brannen ikkje spreier seg horisontalt i plantene frå forsøket vert likevel støtta av litteraturen, der det er funne liten grad av horisontal brannspreiing [35]. Også den vertikale brannspreiinga var begrensa i det utførde forsøket med planter i det ubrennbare systemet. Sjølv om fleire planter oppover veggen vart turka ut av varmen, var det berre plantene på nedre halvdel som brann opp. Det vart observert at når det tok fyr i planta av type *Juniperus communis* «*Suecica*» førte det til ei oppblussing av brannen. Det samsvarar med litteratur om brennbarheit i plantar frå norsk natur, kor einebær (*Juniperus communis*) har vorte identifisert som ei plante som bidreg til brannspreiing med heftig brannforløp [67]. Fleire og større slike planter kan tenkjast vera ein mogeleg mekanisme for vertikal spreieing av brannen oppover i plantene. Også andre og større planter vil potensielt kunne bidra til kraftigare brann og raskare brannspreiing.

Det blei i alt gjort seks forsøk med det brennbare plantesystemet, og i alle desse forsøka såg ein at brannen spreidde seg i sjølv plantesystemet ved at det byrja å brenne i plasten. Dette utvikla tilstrekkeleg med varme til at plasten blei mjuk, byrja å siga saman og etter kvart fall ned. Dette medførte at ein og ein modul fall ned ettersom nye modular vert eksponerte for flammene og

varmen frå brannen når den til ein kvar tid nedste modulen fall med. For alle forsøka med brennaren plassert ved golvet såg ein at denne mekanismen for brannspreiing stoppe av seg sjølv når avstanden mellom brannen og den nedste modulen vart stor nok (om lag 0,7 – 1,5 m). Det vart ikkje observert brannspreiing oppover i holrommet bak plantemodulane.

Bielawski og Wegrzynski [55] har også funne at brennande plantesystem fell saman og at det derfor vil redusera risikoen for brannspreiing til og innover i sjølv bygningsveggen. Dei dreg fram at dette derimot vil kunne bidra til brannspreiing nedover, ved at brennande nedfall samlar seg framfor bygningen eller på t.d. balkongar. Dette vil også kunne ha negativ innverknad på evakuering og redning. Det vart i forsøket med propanbrennaren plassert midt i planteveggen også observert at nedfall av brennande plastmodular førte til at brannen spredte seg vidare nedover under brannkjelda. I dei utførde forsøka var det berre ei kolonne med plastmodular, det var difor ikkje mogeleg å sjå på korleis brannen evt kunne spreie seg horisontalt, verken i sjølv plantane eller i plastmodulane.

Det vart målt temperatur både på framsida av veggen i holrommet og på ein avstand på 1 m frå veggen. I forsøk GV3 var det brukt ein effekt på propanbrennaren på 200 kW i ei varigheit på 20 minutt. Dette var det forsøket som ga høgst temperatur på målepunktet 1 m unna veggen. Etter om lag 10 minutt nådde temperaturen sin høgste målte verdi på om lag 280 °C, som vil seie ei vesentleg varmeeksponering på nabobygget om det var plassert her. Denne varmeeksponeringa vil avta med avstand frå brannen. Forsøk frå litteraturen har vist at brann i tørre planter i ein plantevegg gir ein kortvarig brann med HRR > 100 kW i mindre enn eitt minutt og ein maksimal varmeavgivingsrate på opp omtrent 340 kW [60]. Basert på det vil truleg ikkje ei hending der det er sjølv plantene som brenn utan at verken plantesystem eller andre bygningsdelar er involverte føre til brannspreiing til nabobygningen.

For det ubrennbare plantesystemet var den høgste temperaturen målt på veggen i holrommet i same forsøk, GV3, under 60 °C. Det vil seie at plantesystemet som er plassert mellom propanbrennaren og holrommet har god isolasjonsevne og beskyttar bygningsveggen godt mot varmpåkjeninga frå ein kraftig brann i plantene i planteveggen. For det brennbare plantesystemet fall dei brennande delane av plantesystemet ned. Dette påverkar korleis bygningsveggen vert påverka av brannen. Høgare oppe i veggen der dei brennande delane fall av vil dette kunne redusere varmeeksponeringa, medan nedanfor, t.d. på bakken eller på ein balkong der det brennande nedfallet samlar seg vil varmpåkjeninga bli større. Det vart målte veggtemperaturar å tett oppunder 500 °C i løpet av forsøka med det brennbare plantesystemet. Dette er ein vesentleg varmpåverking, og ein kan ikkje utelukke at det kan føra til konsekvensar for bygningskroppen.

5.2.3 Korleis kan fasadar med planteveggar utformast med minst mogeleg fare for brann?

Kva val ein bør gjere i forbindelse med etablering av ein plantevegg vil i stor grad avhenge av kva slags fasade veggen skal etablerast på. Planteveggar kan brukast på alt frå store høghus til mindre einebustadar, leveggar eller mindre frittstående bygg som t.d. sykkelskur. Bygningane kan i tillegg ha ulik funksjon og omgivningar som stiller ulike krav til brannsikkerheit.

For høge bygningar vil det vera naturleg å støtte seg på guiden for beste praksis frå England [56] og den tyske anbefalinga for brannsikring av storskala grønne fasadar [59]. Begge desse anbefalar testing av heile systema inkludert planter, og i den tyske vert det spesifisert at det vert

anbefalt storskala testing. I tillegg beskriv begge viktigheita av å dokumentere nødvendig vedlikehald slik at ein kan sikre at tilstrekkeleg brannsikkerheit også vert halden over tid. Dei tyske anbefalingane beskriv også korleis plantesystemet bør seksjonrast, enten med brannbarrierar eller ved å la delar av fasaden vera utan plantesystem.

Basert på dei utførde forsøka bør ein også vera klar over at ved bruk av brennande plantesystem vil brennande nedfall kunna føre til vertikal brannspreiing nedover langs fasaden. Ein bør difor vera forsiktig med å etablere plantesystem som kan medføre brennande nedfall over svakheiter i bygningen, slik som vindauga, balkongar og dørar. Brennande nedfall vil også kunne vera til hinder både for evakuering og redning ved ein brann og bør derfor unngå bruk av slike plantesystem over nødutgangar eller områder som er viktige for rømning eller redning. Med ein kraftig brann som spreier seg raskt oppover ein fasade med planter vil det oppstå kraftig oppdrift. Denne oppdrifta i kombinasjon med brennande og glødande plantedelar kan også danne flygebrannar som kan spreie seg til nabobygg. Storleiken og omfanget av desse flygebrannane er ikkje undersøkt i desse forsøka. Kva slags planter, kor store dei er og korleis dei ulike plantedelane brenn vil kunne variere mykje og påverke omfanget av desse flygebrannane.

For mindre og frittstående bygningar slik som einebustadar, levegger og skur vil det ikkje stillast same krav til brannsikkerheit som for større bygg. I slike tilfelle vil nok brennbare plantesystem kunne brukast utan at der er uheldig for brannsikkerheita. Det er likevel ein fordel om det er ubrennbart materiale i områder der eventuelt brennande nedfall kan hamna.

6 Konklusjonar

Fasadar med solcellemodular eller grøne plantesystem har mange fordelar. Solcellemodular produserer fornybar energi og grøne plantesystem kan bidra til redusert energiforbruk, CO₂ fangst, reduksjon av støy og luftforureining, handtering av overvatn og meir attraktive bymiljø. Når bruken av slike system aukar er det viktig å sikre at brannsikkerheita vert teken hand om. I dette prosjektet er det gjennom kartlegging, litteratursøk og brannforsøk undersøkt korleis desse installasjonane kan påverke brannsikkerheita og korleis ein kan tilpasse bruken av dei best mogeleg. Konklusjonane frå studien er presentert i dette kapittelet.

6.1 Del 1: Solceller

Solcellemodular på ein fasade kan bidra til at ein brann oppstår, utviklar og spreier seg, så det er viktig å sikre at solcelleinstallasjonen ikkje gir uakseptable bidrag til brannutviklinga slik kravet i TEK17 §11-9 er formulert [34]. Dei preaksepterte løysingane som er skildra i rettleiinga til denne paragrafen viser at overflater på ytterkledningar tilfredsstillar dette kravet dersom dei oppnår klassifiseringa D-s3,d0 eller B-s3,d0 for ulike typar bygningar. Desse klassifiseringane etter EN 13501-1 [1] inneber testing etter blant anna SBI-metoden EN 13823 [35] med definerte krav til resultat. Desse resultatata skal vera mogeleg å oppnå for solcelleinstallasjonar, men det er av oss og andre stilt ein del spørsmål ved korleis SBI-metoden kan brukast til å teste ein solcelleinstallasjon på ein fasade på ein relevant måte. Det pågår for tida fleire initiativ som arbeidar med å avklare korleis solcelleinstallasjonar kan testast og klassifiserast for bruk på bygningsfasadar.

Det er funne at tre viktige faktorar for korleis ein brann kan utvikle seg i ein fasade med solcellemodular er: avstanden mellom vegg og solcellemodul, om solcellemodulane har einssidig eller tosidig glas og kva for andre brennbare material som er i holrommet. Dei same parametrane påverka både kor lett solcellemodulen tok fyr, brannspreiinga langs fasaden og varmeeksponeringa mot bygningen og nabobygningen.

Forsøka med modular med einssidig glas (med eksponert plast på baksida) og det minste holrommet (6 cm) gav dei kraftigaste brannane. Med aukande avstand tolte modulane meir varme frå startbrannen og gav frå seg mindre varme når dei tok fyr. Same effekt vart funne ved å bytte frå modular med einssidig glas til modular med tosidig glas. Det vart funne at å auke holromsavstanden med 4-5 cm har same effekt som å bytte frå modulen med einssidig glas til tosidig glas.

Det vart ikkje funne noko vesentleg effekt av å installere ein tynn, brennbar vindsperreduk, men her er det berre gjort to forsøk slik at resultatet må brukast med varsemnd. Andre brennbare material i holrommet, som trelekter eller større elektriske komponentar vil kunne bidra med vesentleg meir energi enn vindsperreduken som vart brukt og kan ha ein større effekt på brannspreiinga.

Vidare arbeid kan gjerast for å undersøke andre typar solcellemodular, spesielt modular for bygningsintegrering med tjukkare glas vil vera interessant å samanlikne med dei to typane som er brukt i forsøka. Også andre material, som brennbar isolasjon, lekter av brannimpregnert eller ubehandla tre kan vera tilstades i holrom bak solcellemodular på fasadar. Desse materiala kan vera med på å endre brannforløpet i holrommet og bør undersøkast nøyare i vidare arbeid. For å kunne forutsjå brannspreiinga i holrommet generelt kan det utarbeidast ein modell der varmetransport, tenning og forbrenning av ulike material og overflater i holrommet blir inkludert.

6.2 Del 2: Grøne plantesystem

Grøne plantesystem eller andre former for planting langs fasadar vert ikkje nemnd spesifikt i lover og forskrifter som er relevante for brannsikkerheita for byggverk. Dersom ein legg til grunn at Byggteknisk forskrift (TEK17) §11-9 om krav til eigenskapar ved material og produkt ved brann [34] skal gjelda for plantesystema som vert monterte på fasadar, finn ein i rettleiinga preaksepterte ytingar. For grønne plantesystem er det likevel ikkje klart korleis systema skal testast for å oppnå ønska brannklassifisering, t.d. kva fuktigheit systemet skal ha, skal plantene vera ein de av testen, kva planter som skal nyttast og kor store skal desse vera? I tillegg vil det vera utfordrande å sikre at ein vegg med plantesystem vil oppretthalda tilstrekkeleg brannklassifisering gjennom heile si levetid. For at klassifiseringa skal vera relevant for fasaden sine eigenskapar gjennom levetida er det viktig at testane blir gjennomført med systema i ein tilstand som dekkjer variasjonane som vil kunne oppstå. Sidan dei levande plantene vil utvikle seg over tid er det også viktig at dei blir følgde opp og vedlikehaldne slik at tilstanden held seg innanfor det som klassifiseringa dekkjer. Døme på parametarar som kan definera dette kan vera fuktnivå i plantesubstratet, mengde levande og fuktig eller visna og tørt plantemateriale og type planter.

Ved etablering av grønne plantesystem på fasaden kan ein velja mellom ulike produkt og løysingar. Nokre av systema er laga for å monterast utanpå den eksisterande fasaden, medan

andre kan brukast som erstatning for fasaden og dermed fungere som klimaskalet til bygningen. På marknaden finns det både system som etter EN 13501-1 tilfredsstillir klasse A1 eller A2,s2,d0 og også system som ikkje har noko brannklassifisering i det heile. I tillegg vil plantene og den fysiske utstrekkinga av plantesystemet kunne påverke brannsikkerheita. Val av material og løysingar vil avhenge av kvar plantesystema skal installerast, for mindre bygg, sykkelskur, leveggjar og liknande vil mindre brannsikre løysingar kunne brukast enn for store, høge bygningar.

Det er funne to utanlandske rettleiingar til bruk av grøne plantesystem på fasadar. Begge anbefalar testing av heile systemet inkludert planter og alle materialar når plantesystema skal branntestast. I den eine rettleiinga vert det også anbefalt for høge bygningar å utforme plantesystemet med brannbarrierar mellom etasjane eller med opne felt for å begrense brannspreiinga. I tillegg anbefalar dei fungerande system for vatning og gjødsling, og dokumentasjon av korleis vedlikehaldet skal utførast for å sikre tilstrekkeleg brannsikkerheit også framover i tid. Vi vurderer veiledarane som gode utgangspunkt når det skal planleggast og etablerast grøne plantesystem, også i Norge. Dei peiker på at det er viktig å sikre at vatningssystemet til planteveggane fungerer som det skal. Dersom dette stoppar opp vil planteveggen tørke ut slik at både plantemateriale og vekstsubstratet kan brenne betre enn systemet gjorde slik det vart testa og klassifisert.

For det brennbare plantesystemet fall dei brennande modulane ned i dei utførde forsøka. Dette begrensa brannspreiinga oppover i dei utførde forsøka. Det vart heller ikkje observert brannspreiing i holrommet i desse forsøka. Bygningsveggen vart likevel direkte eksponert for flammer når modulane fall ned, og dersom veggen hadde vore brennbar og teke fyr, kunne dette bidrege til brannspreiing vidare oppover i holrommet. Både nedfall av brennande delar og brennande dråpar vil vera ein mogleg mekanisme for brannspreiing nedover. I tillegg vil dette kunne medføre problem for sløkkeinnsats, eller for evakuering og redning frå bygget dersom brennande nedfall rammar ned ved dører. Plassering av plantesystema bør difor planleggast slik at mogleg nedfall ikkje vil medføre nemnde problem.

I dei utførde forsøka med det ubrennbare plantesystemet vart det ikkje målt høge nok temperaturar på veggoverflata til at det var fare for tenning der. Heller ikkje for eit nabobygg ville det vore fare for tenning ved forholda brukt i denne forsøksserien, sjølv med den største brannkjelda på 200 kW. Likevel, brann i plantene i ein plantevegg har vist å gi korte blaff med ein intens brann (høg varmeavgivingsrate), og vi kan derfor ikkje utelukka brannspreiing til nabobygg under dei rette forholda.

Vidare arbeid på fasadar med levande planter kan gjerast for å undersøke korleis plantene kan vedlikehaldast over tid på ein måte som sikrar at branneigenskapane held seg på eit akseptabelt nivå.

7 Referansar

- [1] CEN, “EN 13501-1:2018 Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using data from reaction to fire tests,” European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2018.
- [2] E. Gasparri, A. Brambilla, G. Lobaccaro, F. Goia, A. Andaloro, and A. Sangiorgio, *Rethinking Building Skins Transformative Technologies and Research Trajectories*. Duxford, United Kingdom: Woodhead Publishing, 2022.
- [3] C. Kunøe, “Fasaden har mer energi enn taket,” *Byggmesteren*, 01 Feb. 2021. [Online]. Available: <https://byggmesteren.as/2021/02/01/fasaden-har-mer-energi-enn-taket/>. [Accessed: 30 Jan. 2023].
- [4] R. Stølen, T. Li, T. Wingdahl, and A. Steen-Hansen, “Large- and small-scale fire test of a building integrated photovoltaic (BIPV) façade system,” *Fire Saf. J.*, vol. 144, p. 104083, Mar. 2024.
- [5] “Vedlegg til strategi for grønne tak og fasader - 2030 grønne tak og fasader i 2030, Bakgrunnsdel – faglig grunnlag.” Oslo Kommune, 25 May. 2022.
- [6] “Kollegiet for brannfaglig terminologi,” 2024. [Online]. Available: <http://www.kbt.no>.
- [7] B. Kotzen, E. R. Galea, S. Mosco, Z. Wang, J. Ewer, and F. Jia, “Fire safety risks of external living walls and implications for regulatory guidance in England,” *Fire Saf. J.*, vol. 139, p. 103816, Aug. 2023.
- [8] G. Hopkins and C. Goodwin, *Living Architecture: Green Roofs and Walls*. Australia: Csiro Publishing, 2011.
- [9] “NEK 400:2018 Elektriske lavspenningsinstallasjoner,” Norsk Elektroteknisk Komité, Norwegian electrotechnical norm, 2018.
- [10] “EN 50583-1:2016 Photovoltaics in buildings - Part 1: BIPV modules.” CENELEC, Jan. 2016.
- [11] H. R. Wilson *et al.*, “International definitions of ‘BIPV,’” IEA PVPS, IEA-PVPS T15-04: 2018, Aug. 2018.
- [12] “Brandschutz für hinterlüftete Photovoltaikanlagen an Fassaden. Übergangsdokument für Planung und Brandschutznachweis.” Swissolar, 26 Oct. 2023.
- [13] N. van Veen, M. Mennen, P. Bos, T. Engering, A. Gerssen, and J. Lasaroms, “Schadelijke stoffen bij branden met zonnepanelen,” Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM, 2022.
- [14] “Triana Solar User Manual - Vertex series modules.” Trina Solar, Apr. 2024.
- [15] A. C. Chagas, “Email thread with Ana Chagas in Solenergi FUSen,” 10 Apr. 2024.
- [16] T. Giombattista and F. Parolini, “Email thread with Giombattista Traina, Istituto Giordano and Fabio Parolini, Supsi,” 23 Apr. 2024.
- [17] “IEC 61730-1:2016, Photovoltaic (PV) module safety qualification - Part 1: Requirements for construction, 2.edition.” International electrotechnical commission (IEC), Aug. 2016.
- [18] R. Yang *et al.*, “Fire safety requirements for building integrated photovoltaics (BIPV): A cross-country comparison,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 173, p. 113112, Mar. 2023.
- [19] N. S. Bunkholt, B. Time, L. Gullbrekken, S. Grynning, and T. Kvande, “Bruk av bygningsintegrerte solceller BIPV i Norge.pdf,” SINTEF, Kunnskapsstatus SINTEF Fag 82, Jun. 2021.
- [20] B. G. Olsø, R. Stølen, R. F. Mikalsen, N. S. Bunkholt, K. L. Friquin, and J. Hjertnes, “Factors Affecting the Fire Safety Design of Photovoltaic Installations Under Performance-Based Regulations in Norway,” *Fire Technol.*, vol. 59, pp. 2055–2088, May. 2023.
- [21] R. A. Francis and J. Lorimer, “Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls,” *J. Environ. Manage.*, vol. 92, no. 6, pp. 1429–1437, Jun. 2011.
- [22] Norsk Standard, “NS 3845:2020+AC:2020 Blågrønn faktor - Beregningsmetode og vektingsfaktorer.” Standard Norge, 2020.
- [23] M. Hjerpaasen, “Vertikal beplantning/grønne vegger - en kunnskapsbank for videre utvikling i Norge (Masteroppgave).” Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, 2014.

- [24] O. Ogut, N. J. Tzortzi, and C. Bertolin, “Vertical Green Structures to Establish Sustainable Built Environment: A Systematic Market Review,” *Sustainability*, vol. 14, no. 19, p. 12349, Sep. 2022.
- [25] “Strategi for grønne tak og fasader - 2030 grønne tak og fasader i 2030.” Oslo Kommune, 25 May. 2022.
- [26] “Handlingsplan for grønne tak og fasader.” Oslo kommune, 2024.
- [27] “Oransjeriet får byggeskikkpris,” *NRK Rogaland*, oktober. 2014.
- [28] Justis- og beredskapsdepartementet, *Forskrift 6.november 1998 nr. 1060 om elektriske lavspenningsanlegg (FEL)*. 1999.
- [29] “NEK 400:2022 Elektriske lavspenningsinstallasjoner.” Norsk Elektroteknisk Komité, 2022.
- [30] R. Stølen, R. F. Mikalsen, and J. P. Stensaas, “Solcelleteknologi og brannsikkerhet,” RISE Fire Research, Trondheim, Norge, RISE-rapport 2018:31, ISBN:978-91-88695-68-0, Sep. 2018.
- [31] T. E. Jonberg and R. Krahl, “Fra DSB. Til deg som bygger solcelleanlegg,” 23 Jun. 2023.
- [32] Kommunal og distriktsdepartementet, *Lov 27. juni 2008 nr. 71 om planlegging og byggesaksbehandling (plan- og bygningsloven)*. 2008.
- [33] Kommunal- og moderniseringsdepartementet, *Forskrift 26. mars 2010 nr. 488 om byggesak (byggesaksforskriften SAK10)*. 2013.
- [34] Kommunal- og moderniseringsdepartementet, *Forskrift 19. juni 2017 nr. 840 om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift, TEK17)*. 2017.
- [35] CEN, “EN 13823:2020+A1:2022 Reaction to fire test for building products - Building products excluding flooring exposed to the thermal attack by a single burning item.” European Committee for Standardization, 2022.
- [36] CEN, “EN ISO 11925-2:2020 Reaction to fire tests -Ignitability of products subjected to direct impingement of flame - Part 2: Single-flame source test.” European Committee for Standardization, 2020.
- [37] T. Giombattista, “Fire Safety of BAPV and BIPV – from Testing to Implementation in Standards,” presented at the Engineering Solutions Symposium for Fire Safety and Sustainable Building Design, Ljubljana, Slovenia, 29 Nov. 2023.
- [38] A. Odriozola-Alberdi, F. Parolini, X. Olano-Azkune, O. Aurrekoetxea-Arratibel, N. Otaño-Aramendi, and F. Frontini, “Fire Safety Testing: Tailoring the SBI test for BIPV Products,” presented at the 4th European Symposium on Fire Safety Science (ESFSS 2024), Barcelona, Spain, 2024.
- [39] Justis- og beredskapsdeparementet, *Forskrift om brannforebygging*. 2015.
- [40] R. Godakandage, P. Weerasinghe, K. Gamage, H. Adnan, and K. Nguyen, “A Systematic Review on Cavity Fires in Buildings: Flame Spread Characteristics, Fire Risks, and Safety Measures,” *Fire*, vol. 7, no. 1, p. 12, Jan. 2024.
- [41] J. E. Mendez, D. Lange, J. P. Hidalgo, and M. S. McLaggan, “Effect of cavity parameters on the fire dynamics of ventilated façades,” *Fire Saf. J.*, vol. 133, p. 103671, Oct. 2022.
- [42] K. Livkiss, S. Svensson, B. Husted, and P. van Hees, “Flame Heights and Heat Transfer in Façade System Ventilation Cavities,” *Fire Technol.*, vol. 54, no. 3, pp. 689–713, May. 2018.
- [43] M. Foley and D. D. Drysdale, “Heat transfer from flames between vertical parallel walls,” *Fire Saf. J.*, vol. 24, no. 1, pp. 53–73, Jan. 1995.
- [44] B. Karlsson, P. H. Thomas, and Holmstedt, Göran, “Flame Sizes in a Small Scale Stack: Pilot Experiments,” Lund University, 1995.
- [45] H. Ingason and J. de Ris, “Flame heat transfer in storage geometries,” *Fire Saf. J.*, vol. 31, no. 1, pp. 39–60, Jul. 1998.
- [46] M. Bonner, W. Wegrzynski, B. K. Papis, and G. Rein, “KRESNIK: A top-down, statistical approach to understand the fire performance of building facades using standard test data,” *Buuld. Environ.*, vol. 169, p. 106540, Feb. 2020.
- [47] M. Bonner and G. Rein, “Flammability and Multi-objective Performance of Building Façades: Towards Optimum Design,” *Int. J. High-Rise Build.*, vol. 7, no. 4, p. 13, Dec. 2018.

- [48] E. Pinedo, “Valencia fire: What we know about Spain’s apartment block blaze,” *Reuters*, 23 Feb. 2024.
- [49] J. S. Kristensen and G. Jomaas, “Experimental study of the fire behaviour on flat roof constructions with multiple photovoltaic (PV) panels,” *Fire Technol.*, vol. 54, no. 6, pp. 1807–1828, 2018.
- [50] J. S. Kristensen, B. Merci, and G. Jomaas, “Fire-induced reradiation underneath photovoltaic arrays on flat roofs,” *Fire Mater.*, vol. 42, no. 3, pp. 316–323, Apr. 2018.
- [51] J. S. Kristensen, F. B. M. Faudzi, and G. Jomaas, “Experimental study of flame spread underneath photovoltaic (PV) modules,” *Fire Saf. J.*, vol. 120, p. 103027, May. 2020.
- [52] J. S. Kristensen, B. Jacobs, and G. Jomaas, “Experimental Study of the Fire Dynamics in a Semi-enclosure Formed by Photovoltaic (PV) Installations on Flat Roof Constructions,” *Fire Technol.*, vol. 58, pp. 2017–2054, Mar. 2022.
- [53] R. F. Mikalsen, J. S. Fjærestad, R. Stølen, and O. A. Holmvaag, “EBOB – Solcelleinstallasjoner på bygg. Brannspredning og sikkerhet for brannvesen. Del 1: Hovedrapport.,” RISE Fire Research, RISE Rapport 2022:82, 2022.
- [54] R. Stølen, J. S. Fjærestad, and R. F. Mikalsen, “EBOB – Solcelleinstallasjoner på bygg. Eksperimentell studie av brannspreiing i holrom bak solcellemodular på skrå takflater. Del 2: Teknisk rapport.,” RISE Fire Research, RISE Rapport 2022:83, 2022.
- [55] J. Bielawski and W. Węgrzyński, “Fire Safety Considerations For Vertical Greenery Systems On Building Facades,” *Fire protection engineering*, no. 100, pp. 40–47, 2023.
- [56] “External Cladding: Living Walls and Fire Safety - Best practice guide.” Viriopia, 07 Dec. 2022.
- [57] Ministry of Housing, Communities and Local Government and Department for Levelling Up, Housing and Communities, *The Building Regulations 2010, Fire safety, Approved Document B*. 2010.
- [58] RA, “Engineering Assessment of Biotechure Living Wall System With Respect to Reaction to Fire Classification,” International Fire Consultants Limited, Buckinghamshire, England, PAR/16691/01, Jun. 2017.
- [59] P. Bachmeier, “Brandschutz großflächig begrünter Fassaden.” Fachausschuss Vorbeugender Brand- und Gefahrenschutz der deutschen Feuerwehren, 2020.
- [60] T. Engel and N. Werther, “Fire Safety for Green Façades: Part 1: Basics, State-of-the-Art Research and Experimental Investigation of Plant Flammability,” *Fire Technol.*, vol. 60, pp. 177–2230, Apr. 2024.
- [61] ISO, “ISO 5660-1:2015 Reaction-to-fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement).” International Organization for Standardization, 2015.
- [62] K. C. Dahanayake and C. L. Chow, “Moisture Content, Ignitability, and Fire Risk of Vegetation in Vertical Greenery Systems,” *Fire Ecol.*, vol. 14, no. 1, pp. 125–142, Feb. 2018.
- [63] J. Bielawski, B. K. Papis, G. Krajewski, and W. Węgrzyński, “An exploratory investigation into moisture content and wind impact on the fire behaviour of modular living walls,” *Fire Saf. J.*, vol. 142, p. 104024, 2024.
- [64] “ISO 9705-1:2016. Reaction to fire tests - Room corner test for wall and ceiling lining products - Part 1: Test method for a small room configuration.” International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2016.
- [65] “SP FIRE 105. External wall assemblies and façade claddings. Reaction to fire.” Swedish National Testing and Research Institute, Fire Technology, Borås, Sweden, 09 Sep. 1994.
- [66] X. Ju *et al.*, “Correlation analysis of heat flux and fire behaviour and hazards of polycrystalline silicon photovoltaic panels,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 201, p. 012036, May. 2017.
- [67] M. Rosnes, E. Skilbred, E. Aamodt, and I. Ertesvåg, “Study of fire characteristics of forest vegetation in the Atlantic coastal region of Norway (poster presentation),” presented at the 4th European Symposium on Fire Safety Science (ESFSS 2024), 2024.

Vedlegg A - Oversikt over planter

Dette vedlegget gir en oversikt over plasseringa av dei ulike planteartane i plantesystema i dei ulike forsøka.



- 1 Geranium Sang. «Max Frei»
- 2 Juniperus comm. «Suecica»
- 3 Geranium cantabrig. «Biokovo»
- 4 Alchemilla mollis
- 5 Heucera micr. «Palace Purple»
- 6 Sesleria heufleriana

Figur 7-1: Plassering av dei ulike planteartane i forsøk GV1.



- 1 Geranium Sang. «Max Frei»
- 2 Juniperus comm. «Suecica»
- 3 Geranium cantabrig. «Biokovo»
- 4 Alchemilla mollis
- 5 Heucera micr. «Palace Purple»
- 6 Sesleria heufleriana
- 7 Hosta «Blue Angel»

Figur 7-2: Plassering av dei ulike planteartane i forsøk GV5. Nokre av plantene var små og det er difor plassert 5 planter i enkelte av modulane.

Vedlegg B – Planter som tilfredsstill minimum B-s3,d2

Lista nedanfor viser ein oversikt over planter som minimum tilfredsstill klasse B-s3.d2. Lista er henta frå [56]:

- *Acorus gramineus* ‘Ogon’
- *Armeria maritima*
- *Asplenium scolopendrium* (SYN. *Phyllitis scolopendrium*)
- *Bergenia* ‘Baby Doll’
- *Bergenia cordifolia* ‘Winterglow’
- *Bergenia purpurascens*
- *Buxus* spp.
- *Carex* ‘Ice Dance’
- *Carex morrowii* ‘Irish Green’
- *Contoneaster* spp.
- *Convolvulus cneorum*
- *Erysimum* ‘Bowls’ Mauve’
- *Euonymus* spp.
- *Euphorbia* spp.
- *Geranium* spp.
- *Hebe* spp.
- *Hedera* spp.
- *Helleborus* spp.
- *Heuchera* spp.
- *Iris foetidissima*
- *Lavender* spp.
- *Liriope* spp.
- *Lonicera* ‘May Green’ (syn. L. ‘Mai Grun’)
- *Pachysandra* spp.
- *Phlox douglasii* ‘Lilac Cloud’
- *Polypodium vulgare*
- *Polystichum* spp.
- *Saracococca* spp.
- *Soleirolia soleirolii*
- *Tellima* spp.
- *Vinca* spp.
- *Viola odorata*
- *Waldsteinia ternata*

RISE – Research Institutes of Sweden

ri.se / info@ri.se / post@risefr.no / (+47) 464 18 000 / risefr.no
Postboks 4767 Torgården, 7465 Trondheim

RISE Fire Research
RISE Rapport: 2024:98
ISBN: 978-91-89971-64-6

