



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Painonnostopenkin valmistuksen automatisointi

Elmeri Lehtinen

KONETEKNIikka

Kandidaatintyö

Helmikuu 2023

TIIVISTELMÄ

Painonnostopenkin valmistuksen automatisointi

Elmeri Lehtinen

Oulun yliopisto, konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2023, 33 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Heikki Pirkola

Työssä käsitellään tyypillisen painonnostopenkin valmistuksen nykytilaa sekä pyritään automatisoimaan valmistusta optimaalisesti tuotannon näkökulmasta. Työssä käydään läpi aluksi erilaisia automatisoituja valmistusmenetelmiä ja niiden periaatteita, jonka jälkeen selvitetään case-osiossa niiden sovellettavuutta konepajatuotannossa. Tuotannon automatisointiin liittyviin ratkaisuihin painonnostopenkin kannalta pyritään prototyypin valmistuksen sekä automaation teoriaan perehtymisen keinoin.

Asiasanat: automaatio, valmistusmenetelmät, konepajatekniikka

ABSTRACT

Automated production of an exercise bench

Elmeri Lehtinen

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2023, 33 pp.

Supervisor at the university: Heikki Pirkola

The thesis discusses the current state of manufacturing of a typical exercise bench and aims to automate the manufacturing, mainly through optimal production point of view. Various automatic production methods and their applicability in machine shop production are reviewed in the thesis. The solutions related to the automation of the benches production are aimed at by means of the production of a prototype and familiarization with the theory. Solutions towards an automated production of the bench are sought with a prototype and a delve into the theory of automation.

Keywords: automation, manufacturing, machine shop

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty osana Oulun yliopiston tekniikan kandidaatin tutkintoa. Työn teko aloitettiin joulukuussa 2022. Haluan kiittää yliopisto-opettaja Heikki Pirkolaa työn ohjauksesta ja oman aiheen mahdollistamisesta sekä yliopiston konepajan henkilökuntaa avustuksessa penkin valmistuksessa.

Oulussa, 3.4.2023

Elmeri Lehtinen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO	7
2 AUTOMAATIO	9
2.1 Tuotannon automaatio	9
2.2 Käytännön ratkaisuja	10
2.2.1 Kiinteä automaatio	10
2.2.2 Ohjelmoitu automaatio	10
2.2.3 Joustava automaatio	11
2.3 Konepaja-automatio.....	12
3 CASE: KONSEPTI.....	14
3.1 Suunnittelu.....	14
3.2 Mallinnus	15
3.3 Rakenteen tarkastelu	17
4 CASE: PROTOTYYPPI	19
4.1 Runkorakenne	19
4.1.1 Sahaukset.....	19
4.1.2 Kasaus	21
4.2 Tasorakenne.....	22
4.2.1 Sahaukset.....	22
4.2.2 Poraus	23
4.2.3 Kasaus	23
4.3 Muut osat	23
4.4 Kokoonpano.....	24
5 CASE: AUTOMAATIOMAHDOLLISUUDET	26
5.1 Tuotantoympäristön määrittely	26
5.2 Sahausprosessit	26
5.3 Hitsausprosessit.....	28
5.4 Levyleikkaus.....	29
6 YHTEENVETO.....	31

MERKINNÄT JA LYHENTEET

a-mitta	Hitsisauman poikkileikkauksen paksuus, hitsin vahvuus
CAD	Computer-aided design
FMS	Flexible manufacturing system
MAG	Metal active gas (hitsausmenetelmä)
NC	Numerical control
RHS	Ontto suorakulmainen teräsputki
S355	Tavallinen rakenneteräs

1 JOHDANTO

Lähtökohtana työssä on tavanomaisen säädettävän painonnostopenkin suunnittelu, erityisesti tuotannollisesta näkökulmasta. Samalla käydään läpi kyseisen tuotteen valmistusta tavanomaisessa konepajaympäristössä, muun muassa tuotteen toiminnallisten vaatimusten, valmistusmenetelmien sekä niiden rajoitteiden muodossa. Työssä myös perehdytään erilaisiin automatisoituihin valmistusmenetelmiin ja niiden käyttömahdollisuuksiin kyseisen painonnostopenkin tuotannossa. Tavoitteena on valmistaa prototyyppi penkistä konepajalla sekä pohtia automatisoituja valmistusmenetelmiä tuotteelle käytännössä.

Penkin valmistusta tarkastellaan puhtaasti tuotantoteknisestä näkökulmasta, eli esimerkiksi hitsausten lujuuslaskennat rajautuvat työn aiheen ulkopuolelle. Tavoitteena onkin tuotannon optimointi automaation avulla, jolloin tuloksiksi odotetaan esimerkiksi mahdollisia robottihitsausvaiheita korvaamaan käsin hitsausta.

Työssä käsiteltävien asioiden ymmärtämiseksi pitää tuntea konepaja valmistusympäristönä. Tavallisen konepajan, jolla suoritetaan metallitöitä, tulee sisältää hitsauskalustoa, putken- ja levynleikkausmenetelmät, sorvi, jyrsin sekä hiontakalusto. Myös vesi- sekä laserleikkurit ovat nykypäivän konepajassa varsin yleinen näky, sillä ne usein vauhdittavat prototyyppien sekä monimutkaisten kappaleiden valmistusta. Tällainen laitekirjo mahdollistaa konepajalle laajalti erilaisia työtehtäviä, vaikkei kaikkia koneita johonkin tuotteeseen tarvittaisikaan.

Konepajat ovat kuitenkin usein erikoistuneet tietynlaisten kappaleiden tai tuotteiden valmistukseen, jolloin pajat priorisoivat niiden valmistuksessa käytettäviä laitteita esimerkiksi hankintamäärissä sekä laadussa. Esimerkiksi kunnossapitoyrityksen paja voi olla erikoistunut työkoneiden korjaustöihin, jolloin siellä keskitytään pääosin jyrsin- ja sorvauslaitteistoon, kun taas teollisuuteen erikoistunut paja keskittyy lähinnä putki- ja painelaittehitsauksiin. Esimerkiksi Iin konepaja on erikoistunut suurten pyörähdyssymmetristen kappaleiden valmistukseen ja korjauksiin, joten sen kalusto koostuu muun muassa suuren skaalan sorveista sekä hitsaustorneista. (Iin konepaja, 2023)

Työssä keskitytään kuvitteelliseen tuotantopohjaiseen konepajaan, joka rakennetaan ensisijaisesti tietyn tyyppisten teräskappaleiden valmistukseen. Näin ollen pajan tulee priorisoida kalustoaan sen mukaisesti, esimerkiksi hitsaus-, leikkaus- sekä hiomiskoneisiin. Oletetaan siis, että konepajan pääasiallinen tuotanto keskittyy juuri penkkien sekä vastaavan muotoisten kappaleiden valmistukseen. Siksi myös automaatio tulee kyseistä konepajaa laatiessa rajoittumaan yllä mainittujen menetelmien automatisointiin.

2 AUTOMAATIO

Termillä automaatio tarkoitetaan yleisessä mielessä teknillistä ratkaisua, jonka toimintaa ohjataan ennalta määrätyin käskyin tai syöttein. Nykyisin automatisoidut järjestelmät toimivat lähes poikkeuksetta tietokoneohjatusti, mutta entisaikaiset tuulimyllyt tai vesipyörät myös mahtuvat automatisoidun järjestelmän määritelmään. Käytännössä siis automaatio tarkoittaa itseohjattua ratkaisua tai usein laitetta, joka pystyy näin toimimaan ilman ihmisen vuorovaikutusta. (Groover, 2020)

Automaatiota ei kuitenkaan tule sekoittaa koneellistumiseen, joka usein liittyy vahvasti automaatioon tuotannosta puhuttaessa. Koneellistuminen tarkoittaa puhtaasti muun kuin ihmis- tai eläinkäyttöisten laitteiden käyttöönottoa erinäisten tehtävien suorittamiseksi. Tuotannollisessa ja valmistuksellisessa näkökulmassa automaatio on lähes poikkeuksetta liitännäisenä koneellistettuun järjestelmään ohjausmenetelmän muodossa. (Groover, 2020)

2.1 Tuotannon automaatio

Teknologian kehittyessä jatkuvasti myös teollisuus ja tuotanto muuttuvat sen mukana. Tuotantoa on jo pitkään automatisoitu erilaisin menetelmin, oli kyseessä voimalaitoksen energian tuotanto tai sitten koneistamon sorvauskappaleiden valmistus. Automatisoitu tuotanto on usein virheettömämpää, nopeampaa ja näin myös edullisempaa kuin manuaalinen tuotanto. Nykyajan globaaleilla markkinoilla tehokkuus ja kilpailukyky ovat ensisijaisen tärkeitä, joten juuri tuotannon tehostaminen on usein pääasiallisena kehityksen kohteena. (Groover, 2020; Kuisma, 2007, s. 18)

2.2 Käytännön ratkaisuja

Työn luonne huomioon ottaen on ensisijaisen tärkeää tutkia juuri penkin valmistuksessa käytettäviä menetelmiä sekä niiden automaatiota käytännössä. Vaikka tuotannossa tullaan tarvitsemaan monia erityyppisiä laitteita, ne kaikki kuuluvat valmistusautomaation piiriin. Se taas jaotellaan kolmeen osaan: kiinteä-, ohjelmoitu- ja joustava automaatio (Groover, 2020).

2.2.1 Kiinteä automaatio

Kiinteä automaatio eli englanniksi fixed automation, on valmistusautomaation yksinkertaisin muoto. Valmistuslaite on asetettu valmistamaan vain yhdenlaista kappaletta tai suorittamaan yhtä lineaarista tehtävää. Laite tekee tietyt ennalta määräytyt toiminnot ilman erillistä ohjausta tai ohjelmointia. Tällaiset ratkaisut toimivat erinomaisesti nopeaan ja yksinkertaiseen tuotantoon, jossa valmistettavat osat eivät vaadi laitteelta monimutkaisia toimintoja tai erillisiä mittauksia (Engineered Automation of Maine, 2020).

Kiinteät automaatoratkaisut ovat usein suurikokoisia ja näin myös suuria investointeja. Yksitoikkoisen valmistustyylin vuoksi tällaisia laitteita käytetään useimmiten suuren skaalan tuotannossa, sillä niiden muokkaus erityylisten kappaleiden valmistukseen on usein vaikeaa. Tällaisia laitteita voivat olla esimerkiksi yksinkertaiset kokoonpanorobotit, kuljetuslinjat tai maalaus koneet (Engineered Automation of Maine, 2020).

2.2.2 Ohjelmoitu automaatio

Ohjelmoitavat valmistusmenetelmät ovat kiinteää automaatiota huomattavasti joustavampia tuotannon vaihtelun kannalta. Nimensä mukaisesti ohjelmoitavan automaation ideana on, että laitteiden toimintaa tuotannossa voidaan muuttaa erilaisten ohjelmien myötä. Näin mahdollistetaan useammanlaisten kappaleiden ja osien valmistus samalla laitteella, jolloin voidaan pienemmän skaalan tuotannossa säästää esimerkiksi laitehankinnoissa (Engineered Automation of Maine, 2020).

Jokainen erilainen ohjelma on kuitenkin luotava erikseen sekä kyseiset laitteet ovat usein suunniteltu enemmän vaihtelevuuden kuin tuotantotehokkuuden näkökulmasta. Näin ollen jatkuva massatuotanto ohjelmoitavilla valmistusmenetelmillä ei aina ole järkevää (Groover, 2020).

Erilaiset NC- eli numeerisesti ohjatut koneet ovat erinomainen esimerkki perinteisten valmistusmenetelmien ohjelmoitavuudesta. NC-sorveilla sekä -jyrsinkoneilla voidaan vauhdittaa osien tuotantoa valtavasti manuaalisiin vastineisiin verrattuna. NC-koneet ovat myös käytännössä vapaita käyttäjävirheistä sekä ne ovat huomattavasti turvallisempia kokonaisuudessaan (Oracle Precision, 2017). Kuvassa 1 kuvattuna NC-sorvauskeskus, johon on liitettävissä esim. automaattinen aihionsyöttö ja asetus.



Kuva 1. Gurutzpen valmistama NC-sorvi (Gurutzpe, 2017; PacificWestAmerica, 2017)

2.2.3 Joustava automaatio

Joustavat automaatiomenetelmät eli FMS ovat ohjelmoitavista kehittyneempi aste, jossa laitteilla voidaan suorittaa useampia erillisiä operaatiota tai toimintakokonaisuuksia. Toiminnan laajuus vaatii siis useamman ohjelman, mutta tarkoittaa yhden laitteen olevan käytettävissä useampaan toimintoon esimerkiksi yhdellä kasauslinjastolla. Toisaalta

myös yhden kappaleen osat voidaan valmistaa samalla laitteella joustavassa automaatiossa (Groover, 2020).

Konseptina joustavat automaatiomenetelmät mahdollistavat lähes rajattoman tuotantopotentialin, mutta on huomioitava todellisen käytön asettamat rajoitteet. Laitteet vaativat aina tarkoin määritellyn tuotantoympäristön tehokkaan tuotannon takaamiseksi sekä jokainen tehtävä tulee ohjelmoida erikseen. Tämä vie aikaa sekä kyseiset laitteet ovat usein suuri investointi, joten FMS-ratkaisut sopivat parhaiten keskiskaalan erikoistuotantoon. Tällaisia laitteita voi olla esimerkiksi pakkauslinjastot, joilla pakataan automaattisesti useanlaisia paketteja tai useamman kappaleen valmistukseen varustetut NC-jyrsimet (Engineered Automation of Maine, 2022).

2.3 Konepaja-automaatio

Erilaisten valmistettävien kappaleiden kirjon ollessa lähes rajaton ei konepajan suunnittelulle ole yhtä oikeaa eikä väärää vastausta. Tiedyt tuotantoratkaisut toimivat joidenkin osien tuotannossa erinomaisesti mutta toisten kanssa taas ei. Konepajaympäristöä suunnitellessa on siis erittäin tärkeää perehtyä erilaisiin ratkaisuihin tuotannon suhteen, sekä automaation kannalta että yleisellä tasolla. Esimerkiksi suuria erikoiskappaleita valmistavan koneistamon tulisi automatisointia suunnitellessa miettiä aihoiden liikuttelua; jos yksittäinen koneistusprosessi on ajallisesti pitkä, ei välttämättä ole järkevää investoida automatisoituun aihion poisto- ja asetuslaitteistoon (American Machinist, 2021; Shea K. et al, 2010).

On siis tärkeää tietää, minkälaisia asioita tulee pohtia konepajan tuotantoa suunnitellessa. Teknisestä näkökulmasta yksi tärkeimmistä on itse laitteisto ja sen ymmärtäminen. Oikeanlaisten koneiden valinnalla on vaikutusta tuotannon kokonaistehokkuudesta aina konepajan layoutiin asti. Esimerkiksi solumainen tuotanto sopii erikoisosia valmistavalle konepajalle paremmin kuin paperitehtaalle (Kuisma, 2007, s. 112).

Tuotantoprosessin kulkua suunnitellessa on ensisijaisen tärkeää tietää, minkälaisia laitteita tullaan käyttämään. Laitteisto taas rajoittaa valmistettava kappale ja sen vaatimukset automaation määrän ohella. Kappaleiden ja aihoiden automatisoitu kuljetus

tuotantolaitteiden välillä rajaa käytännössä kaikki manuaalikoneet pois järkevistä tuotantoratkaisuista. Prosessin ollessa täysin automaattinen tulee kaikkien tuotannon osien olla yhteensopivia prosessin kanssa, oli kyseessä solumainen tai linjastomainen valmistus (Shea K. et al, 2010).

3 CASE: KONSEPTI

Työn käytännön osiossa oli siis määrä suunnitella tavanomainen painonnostopenkki sekä perehtyä valmistusmenetelmiin. Ennen valmistuksen suunnittelua tuli kuitenkin suunnitella itse penkki.

Painonnostopenkkejä on markkinoilla lukuisia eri malleja, vaihdellen laatutasosta aina ominaisuuksiin. Halvimmat mallit ovat pelkästään vaakapenkkejä ilman muita ominaisuuksia, kun taas kalliimmat tulevat usein tankotelineen, turvarautojen sekä jalkaojennuslaitteen kera. Hintahaarukkakin penkeissä on laaja, perinteisen vaakapenkin saa usein noin 100 euron hintaan, kun taas laadukkaimmat penkit lisäosineen saattavat maksaa jopa 500 euroa.

3.1 Suunnittelu

Ominaisuus, joka suurimmassa osassa penkeistä löytyy, on selkänojan säätö. Eri selkänojan asennot mahdollistavat useamman lihasryhmän aktivoinnin penkkiharjoittelussa, jonka vuoksi halvemmissakin penkeissä on kyseinen säätö. Yleisimpien lihasryhmien harjoittelussa painonnostopenkillä käytetään vaakapenkin lisäksi 30–45 asteen selkänojan kulmaa sekä lähes pystyasentoa (Healthline, 2021).

Suunnitellessa uutta toteutusta on myös syytä vertailla markkinoiden muiden painonnostopenkkien dimensioita. Näin saadaan helpotettua mahdollisimman todenmukaisen kappaleprofiilin luomista sekä valmistuksen että käytettävyyden kannalta.

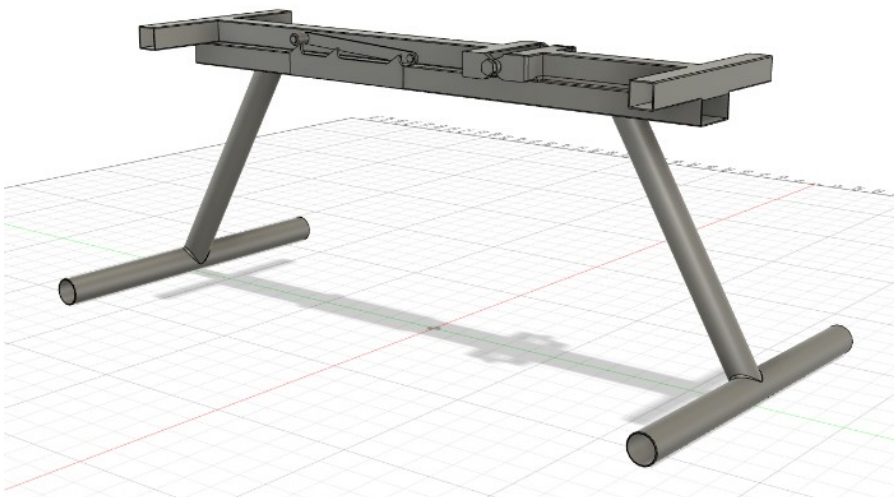
Vertailemalla erilaisia toteutuksia syntyi perusidea penkistä, jossa on vaakapenkkiasento sekä vaiheistettu selkäosan kulmasäätö. Ideana suunnittelussa oli pitää malli kokonaisuudessaan kohtuullisen yksinkertaisena ja tästä syystä esimerkiksi useissa malleissa esiintynyttä istuinosan kulmasäätöä ei työn penkkiin lisätty. Rakenteessa käytettävien osien ja kappaleiden tulisi olla helposti valmistettavissa, jotta automaation ratkaisut voitaisiin pitää mahdollisimman suoraviivaisina. Myös liikkuvien osien

ratkaisut pidettäisiin mahdollisimman yksinkertaisina, jotta vältettäisiin suuria määriä erikoisosia.

3.2 Mallinnus

Kun penkin vaatimukset sekä perusidea ovat tiedossa, on penkistä tehtävä CAD-malli. Se auttaa hahmottamaan rakennetta kokonaisuutena sekä valmistuksen että konkreettisen käytettävyyden kautta. Mallintaessa tulisi luoda rakenne sekä sen osat valmistuksessa käytössä olevien materiaalien mukaan. Näin saadaan jo mallinnusvaiheessa kosketuspintaa tuotannossa tarvittaviin prosesseihin sekä voidaan visuaalisesti tarkistaa rakenteen järkevyyttä käytännössä. Kuvassa 2

Penkin malli on jaettavissa kahteen osaan: runkorakenne ja tasorakenne. Rakenteen eri osat voidaan nähdä kuvassa 2. Penkin jalkaputket valmistetaan 48 mm halkaisijan pyöröputkesta. Ne liittyvät 40x80x2 mm RHS-putkeen, joka toimii rakenteen rungon pääputkena. Rungon päälle asettuvat tasorakenteen osat eli selkänoja ja istuinosa, valmistetaan 40x40x2 mm RHS-putkesta. Nämä kaikki ovat yleisiä materiaalivaihtoehtoja, joita löytyy lähes jokaiselta teräsjälleenmyyjältä.



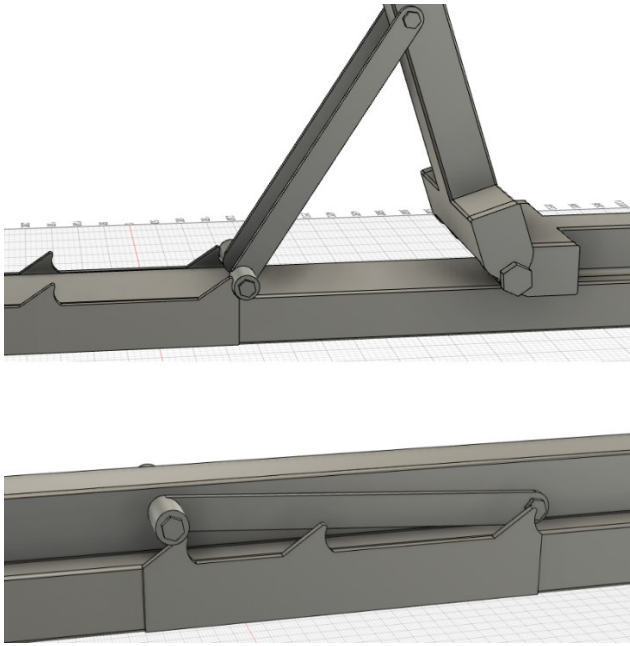
Kuva 2: Penkin CAD-malli vaaka-asennossa



Kuva 3: Penkin CAD-malli pystyasennossa

Ruuvikiristeiset sekä kääntövarsin tuettavat selkänöjat olivat markkinoiden malleissa yleisimmät ratkaisut selkänöjan kulman asetukselle. Mallinnuksessa lopullinen ratkaisu olikin kuvassa 3 ja 4 näkyvä kääntövarsi-lovisysteemi. Tämä on mekaanisesti sekä valmistuksellisesti yksinkertaisin ratkaisu, eikä se vaadi erikoisosia. Varsien päissä olevat tapit asettuvat vastinlevyjen loviin, pitäen näin selkänöjan paikallaan halutussa kulmassa (kuva 4). Mallinnuksessa päädyttiin kolmeen kulmaan: 20°, 40° ja 75°. Kulmat perustuvat markkinoilla esiintyneiden penkkien tarjontaan sekä penkkiharjoittelun tekniikkaan.

Penkin mallissa on kaksi akselia: 10 mm pultti kääntövarren akselina sekä 14 mm pultti tai kierretanko selkänöjan liitoksessa pääakselina. Kummankin akselin lopullisten ratkaisujen miettiminen jätettiin prototyypivaiheeseen, mutta pulttien käyttö oli syytä pitää sopivan materiaalin sekä lukitsemismahdollisuuksien vuoksi. Sen lisäksi pultit ovat oikean kokoisia mahtumaan nimellistä mittaansa vastaavaan poran reikään. Lopuksi pulteilla, aluslevyillä sekä muttereilla on hyvä saatavuus, ja ne kelpaavat tehtävään sellaisenaan ilman jatkokäsittelyä.



Kuva 4: Kääntövarren asennot

3.3 Rakenteen tarkastelu

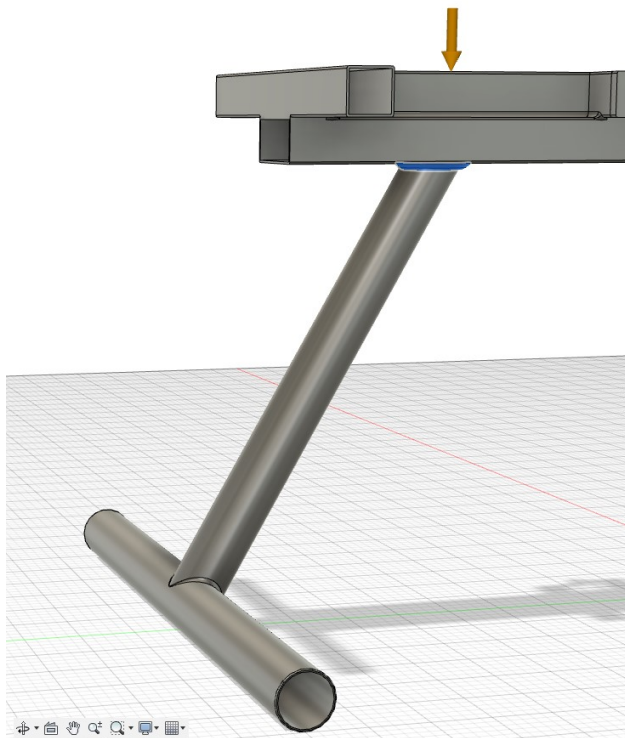
Penkin valmistuksessa pääasiallinen kokoonpanometodi on hitsaus. Teräsrakenteiden liittäminen hitsaamalla on nopea ja edullinen vaihtoehto, joka ei vaadi osilta erityisiä muotoja eikä erikoisosia liitoksiin. Myös automaation näkökulmasta hitsaus on suoraviivaisempi kokoonpanoprosessi kuin esimerkiksi laippa-pulttiliitokset. Penkissä on istuinosaan lukuun ottamatta käytännössä pelkkiä T-liitoksia, jota on tyypillinen hitsausliitoskohde useissa kantavissakin rakenteissa.

Kuitenkaan kestävyiden kannalta hitsatut rakenteet eivät yleensä tuota parasta ratkaisua. Hitsausliitos aiheuttaa kappaleeseen jännityksiä, jotka vaikuttavat liitoskohdan kestävyteen. Myös huono hitsaustekniikka saattaa lisätä liitoskohdan heikkoutta, muun muassa vähäisen penetraation tai epäpuhtauksien myötä. (Piironen, 2013, s. 41). Kuitenkin työn penkin kannalta on tyydyttävä hitsauksiin, sillä esimerkiksi taivutettujen runkoputkien automaatiovalmistuksesta ei löydy riittävästi tietoa eikä taivutetun putken valmistus prototyyppiin onnistu käytössä olevalla kalustolla.

Penkkiä suunnitellessa tulisi rakenteelliset ratkaisut olla hyvän valmistettavuuden lisäksi myös todellisuudessa kestäviä. Juuri hitsiliitokset ja niiden kestävyys tulee tarkkaan

huomioida. Penkissä normaalilla käytöllä suurimpia kuormituksia kohtaava osa on jalkaputkien ja rungon hitsiliitokset, joten ne tulee tarkistaa. Tarkastelemalla kyseisiä liitoksia matemaattisesti voidaan varmistaa rakenteiden riittävä kestävyys.

Rakenteen materiaali ja näin myös sen lujuus vaihtelee osakohtaisesti, mutta suurin osa on kylmävalssattua rakenneterästä. Myöskään muissa penkin osissa käytetty teräs ei ole sitä matalalujuisempaa, joten laskennassa voidaan käyttää tavallisen, matalalujuisemman S355-teräksen lujuutta. Oletetaan yhteen jalkaan kohdistuvan 150 kg alaspäin suuntautuva kuorma sekä turvakertoimen ollessa 1.5, saadaan jalkaputken ja rungon pienaliitokseen noin 5 mm a-mitan hitsisauman vaatimus (kuva 5). Tämä on täysin mahdollinen tulos a-mitalle, ja näin laskennan tuloksesta voidaan päätellä hitsisauman olevan rakenteellisesti järkevä.



Kuva 5: Tilannekuva kuormituksesta; oranssi nuoli 150 kg voima, hitsisauma korostettu sinisellä

4 CASE: PROTOTYYPPI

Työn case-osion toinen puolikas keskittyy suunnitellun painonnostopenkin valmistukseen konepajalla sekä koko prosessin optimoimiseen automaation keinoin. Oulun yliopiston konepaja toimi prototyypin valmistuksen pääasiallisena suorituspaikkana ja allekirjoittanut penkin valmistajana.

Valmistusvaihe aloitettiin tarvittavien materiaalien inventaariolla. Rungon nykyiseen malliin tarvitaan noin 2100 mm pyöröputkea, 1050 mm rungon suorakulma RHS-putkea sekä 1800 mm neliö RHS-putkea istuin- ja selkäosaan. Kääntövarteen kaksi 30 mm mittaista pyöröputken palaa 25 mm halkaisijalla. Lopuksi kääntövarren vastinlevyjen valmistukseen tarvitaan 4 mm paksua teräslevyä ja pääakselin laipoille sekä itse kääntövarteen 6 mm teräslevyä. Kummaksikin akseliksi valikoitui kierretanko, jota löytyi konepajalta tarvittavissa koissa.

4.1 Runkorakenne

Luvussa käsitellään rungon osien valmistusprosesseja. Nämä ovat rungon pääputki sekä neljä pyöröputken palaa jalkojen osiksi. Valmistus aloitettiin runkorakenteesta, sillä prototyypin edetessä muut osat tullaan kasaamaan sen päälle.

4.1.1 Sahaukset

Valmistusprosessissa seuraava vaihe oli putkien leikkaus. Konepajoilla teräsputkien leikkaamiseen on useita menetelmiä; käsin kulmahiomakoneella aina NC-ohjattuun plasmaleikkuriin. Kuitenkin konepajaympäristössä yleisin menetelmä on vannesahaus, jota myös prototyypin valmistuksessa käytettiin. Toinen vaihtoehtoinen saha on pyörösaha, joka on myös yleisesti käytössä konepajoilla.

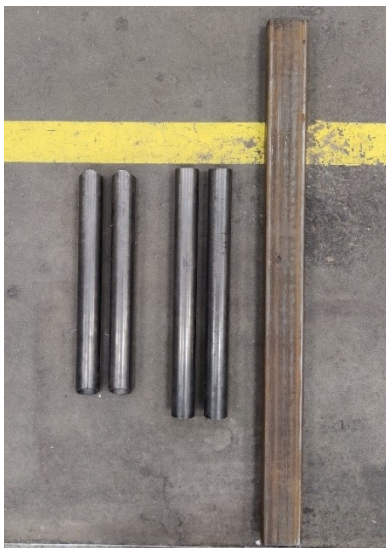
Sahaus aloitettiin pyöröputkista, joista ensimmäiset eli lattiaputket sahattiin 500 mm mittaan suorilla leikkauksilla. Rungon jalkaputket tuli leikata aluksi 30° kulmaan 455 mm maksimimitalla. Kulmaleikkaus vaadittiin putken oikean asemoitumisen vuoksi runkoon nähden. Putkien päittäinen liittäminen T-liitoksella mahdollistettiin myös oikeanlaisilla sahauksilla. Jalkaputkien toisesta päästä leikattiin kummaltakin puolelta kuvan 6 mukaisesti segmentit 30° kulmassa pituussuuntaan nähden. Tämä mahdollisti kyseiselle

päälle hyvän istuvuuden T-liitoksessa sekä helpotti sauman hitsausta suuresti verrattuna tasaiseksi jätettyyn päähän.



Kuva 6: Segmenttien sahaus jalkaputken alapäästä.

Seuraavana sahauskohteena oli rungon ainoa pääputki. Osio sahattiin tasaisella suorakulma sahauksella ja sen pituudeksi tuli 1050 mm. Ruosteen vuoksi pääputken pinta oli syytä hioa hitsauskohdista hyvän sauman takaamiseksi. Kuvassa 7 runkorakenteen osat valmiina kasattavaksi.



Kuva 7: Runkorakenteen osat sahattuina.

4.1.2 Kasaus

Sahauksien jälkeinen kasausvaihe aloitettiin jalka- sekä lattiaputkien liitoksesta. Yllä mainittu segmenttien sahaus mahdollisti suoran liitoksen putkille ilman jälkikäsitteilyä. Putket asetettiin pöydälle sekä T-liitoksen suorakulmaisuus varmistettiin magneetein puolittain. Liitos hitsattiin umpilanka MAG-hitsauslaitteella seuraavin parametrein: 20 V jännite ja 4.2 m/min syöttö. Suojakaasuna toimi 75% Argon - 25% CO2 seos.

Ennen saumojen hitsaamista tuli sijoittaa kaksi silloitushitsiä eli pientä hitsiä liitoksen sivuille asemoinnin varmistamiseksi hitsauksen aikana. Yksittäisen jalan hitsaus suoritettiin kahdella saumalla, vaatien kappaleen käännön saumojen hitsauksen välissä. Prosessi tehtiin kummallekin putkiparille ja valmiista osista syntyi siis penkin jalat (kuva 8).



Kuva 8: Jalka- ja lattiaputken liitoshitsi.

Jalkojen ollessa valmiit, voitiin ne liittää rungon pääputkeen. Jalkojen ja rungon asemoinnin vuoksi liitosprosessi vaati tasaisen lattian, seinän sekä vatupassin. Rungon pääputki asetettiin lattialle 98 mm päähän seinästä, joka on CAD-mallissa lattiaputken offset mitta rungon pääputkeen nähden. Jalka asetettiin pääputken päälle siten, että lattiaputki nojasi seinää vasten ja jalkaputken viistepinta asettui tasaisesti pääputken pintaa vasten. Vatupassilla tarkistettiin jalkaputken horisontaalisuus, jonka jälkeen voitiin

jalka hitsata pääputkeen. Tämäkin tehtiin yllä mainitulla MAG-hitsauslaitteella parametrejä muuttamatta. Jalka silloitettiin ensiksi yhdestä päästä, varmistettiin asemointi ja hitsattiin suoralla saumalla paikalleen.

Sama prosessi suoritettiin myös toiseen päähän, mutta silloituksen jälkeen varmistettiin oikea geometria lattiaputkien päistä ristimitalla. Sen täsmätessä tai mahdollisten kohdistusten jälkeen putket hitsattiin paikalleen. Hitsausten jälkeen tuli putkien päät hioa tasaisiksi, jonka seurauksena oli runkorakenne valmis.

4.2 Tasorakenne

Luvussa käsitellään tason osien valmistusprosesseja. Nämä ovat istuin- ja selkäosan RHS-putket. Tasorakenne oli syytä valmistaa seuraavaksi, sillä muut osat kiinnittyvät niihin tai runkoon.

4.2.1 Sahaukset

Seuraavan kokonaisuuden eli tasorakenteen valmistus alkoi myös sahauksista. Sahattavana olivat tasorakenteen RHS-putket, joita penkkiin tuli kuusi kappaletta. Putkien mitat olivat 610 mm, 2 x 340 mm, 250 mm, 140 mm ja 122 mm. Kaikkiin putkiin tuli tasainen suorakulma sahaus. Tasorakenteen putket liittyvät toisiinsa vain T-liitoksiin, joten mitään erikoisratkaisuja ei leikkauksissa tarvittu. Kuvassa 9 tasorakenteen osat valmiina kasattavaksi.



Kuva 9: Tasorakenteen osat sahattuina.

4.2.2 Poraus

Koska kääntövarsi sijoittuu mallissa selkänojan putkeen, tuli siihen porata reikä akselia varten. Poraus suoritettiin heti sahauksen jälkeen tavallisella pylväsporakoneella. Porauskohta merkittiin meistämällä aloituspiste 145 mm päähän selkäputken alapäästä. Reiän halkaisija on 10 mm, joka on liian suuri suoraan porattavaksi. Näin ollen se porattiin ensin 6 mm terällä ja lopuksi mittaan 10 mm terällä. Reikä porattiin suoraan läpi kummastakin puolesta.

4.2.3 Kasaus

Sahausvaiheen jälkeen voitiin myös tasorakenteen osat liittää heti yhteen. Tasorakenteessa kaikki osat liittyvät T-liitoksin, joten mitään erikoismenetelmiä ei tarvittu. Kyseiset osat liitettiin yllä mainitulla MAG-hitsilaitteella, mutta parametrit tuli vaihtaa seinämänpaksuuksien muuttuessa. Nyt jännite oli 18V sekä langansyöttö vain 3.8 m/min.

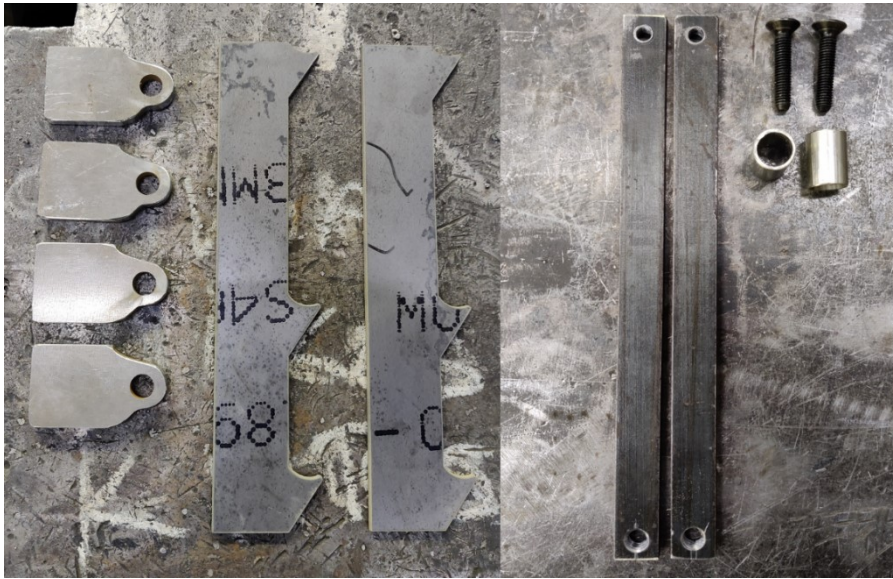
Hitsaus aloitettiin selkänojan pisimmästä putkesta ja päätyputkesta, jotka asetettiin hitsauspöydälle tasaisesti. Putket aseteltiin T-liitoksen muotoon, tuettiin magneeteilla sivuista ja silloitettiin sivujen nurkista. Sitten hitsattiin liitos kahtena saumana jalkaputkien tavoin. Prosessi toistettiin viimeiselle putkelle sekä istuinosalle kokonaisuudessaan. Putkien päät hiottiin, jonka jälkeen saatiin tasorakenteen valmiit komponentit.

4.3 Muut osat

Penkin muut osat koostuvat muotoon leikatuista levyosista, terästangon ja -putken paloista sekä erikoisosista. Pultit sekä mutterit luetellaan erikoisosiksi, joita ei kannata itse valmistaa vaan ne tilataan erikseen ja kierretangotkin vain sahataan oikeaan mittaan.

Kääntövarren rakenne koostuu kahdesta 250 mm x 25 mm tukivarresta, kahdesta 30 mm pyöröputken palasta sekä kahdesta M8-kierteen kartiopultista. Tukivarret sahattiin lattatangosta, mutta tuotannon kannalta järkevämpi ratkaisu olisi leikata ne suoraan teräslevystä muotoon. Tällöin voitaisiin myös välttää tukivarsissa tarvittavien kierrereikien porausvaihe, sillä esimerkiksi NC-plasmaleikkuri pystyy suorittamaan kyseisen rei'ityksen muotoleikkauksen yhteydessä. Tukivarsien päihin sijoitettiin M10-

sekä M8-kierteiset reiät, jotka tehtiin käsin kierretapilla. Putken palat sahattiin vannesahalla mittaan sekä asennettiin pulttien avulla paikoilleen tukivarsien päihin.



Kuva 10: Pääakselin laipat sekä kääntövarteen vastinlevyt (vas.) ja muut osat (oik.)

Tukivarren vastinlevyt sekä pääakselin laipat leikattiin konepajan vesileikkurilla. Aluksi osista tuli tehdä erilliset CAD-mallit ja luoda niille NC-leikkausohjelma. Lopuksi osat vietiin leikattaviksi, jonka jälkeen ne olivat valmiita asennettavaksi runkoon. Kuvassa 10 näkyvät ns. muut osat valmiina kokoonpanoa varten.

4.4 Kokoonpano

Kaikkien erillisosien ollessa valmiina, voitiin suorittaa lopullinen kokoonpano. Kyseinen prosessi aloitettiin tasorakenteen osien liittämistä yhteen akselilla. Akseli lukittiin paikalleen kumpaankin päähän asetetulla lukkomutterilla. Kasattu tasorakenne nostettiin runkorakenteen päälle ja tarkistettiin mittaamalla symmetrinen asemoituminen. Rakenteet hitsattiin yhteen yllä mainitulla MAG-laitteella, tehden neljä noin 50 mm saumaa.

Tukivarren vastinlevyt asetettiin magneetein tuettuina CAD-mallin mukaisesti 245 mm etäisyydelle rungon pääputken selkänojapädystä. Kiinnitys tapahtui myös tässä tapauksessa hitsaamalla. Vastinlevyt hitsattiin päistä saumoilla pääputkeen.

Kokoonpanon viimeinen vaihe oli kääntövarsi, jonka kasaus aloitettiin liittämällä kuvan 10 pyöröputket pulteilla tukivarsien päihin. Kartiopultit keskittävät kiristettäessä pyöröputken palat tukivarsiin oikeaan asentoon. Kasatut varret asennettiin lopuksi yhdessä kierretangon sekä lukkomuttereiden kanssa selkänojaputken akselireikään.

Kääntövarren asennuksen jälkeen oli penkin kokoonpano valmis. Painonnostopenkki kokonaisuudessaan oli nyt myös valmis, joten case-osiossa voidaan siirtyä tuotannon suunnittelun vaiheeseen. Kuvissa 11 ja 12 nähdään valmis prototyyppi. Ainoa poikkeus prototyypissä CAD-malliin on jalkaputkiin asennetut tukilevyt, jotka todettiin jälkepäin yllä olevalla laskennalla tarpeettomiksi.



Kuvat 11 & 12: Penkin prototyyppi vaaka- ja pystyasennossa

5 CASE: AUTOMAATIOMAHDOLLISUUDET

Teoriaosuuden ja prototyypivaiheen ollessa valmiit, voidaan niiden antamien näkemyksien pohjalta suunnitella penkille tuotantolinja. Prototyypin valmistus antoi käytännönläheisen kuvan konepajan valmistusmenetelmistä kyseiselle tuotteelle, joita tulee teoriaosuuden tiedon mukaan automatisoida. Tavoitteena olisi realistinen sekä mahdollisimman tehokas tuotantoprosessien kokonaisuus, jossa automaatoratkaisut tehostavat kokonaistuotantoa.

5.1 Tuotantoympäristön määrittely

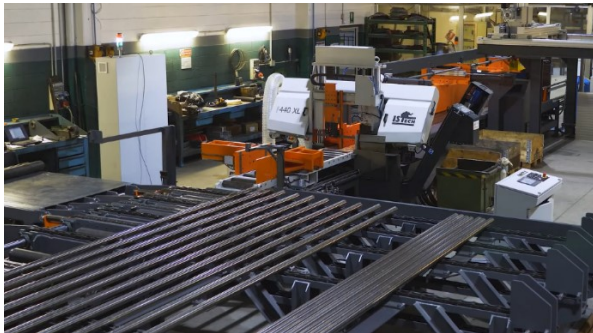
Kuvitellun konepajan tuotantoympäristö tulee työssä automatisoida mahdollisimman tehokkaasti, joten laitevalinnat määrittyvät pitkälti myös sen vuoksi. Kuvitellussa konepajassa rajataan tuotanto solutyypiseen tuotantoon eikä käytetä FMS-ratkaisuja. Näin pidetään laitevaihtoehtot yksinkertaisemmassa päässä. Myös kokoonpano jätetään manuaaliseksi vaiheeksi laaduntarkastuksen sekä linjaston ratkaisujen yksinkertaistamiseksi.

Yllä mainituilla rajauksilla saadaan työssä käsiteltävät asiat sopimaan kandidaatintyötä vastaavaksi kokonaisuudeksi. Laitevalinnat ja niiden ratkaisut tarkentuvat case-osiossa prototyypin suunnittelun ja valmistuksen tuoman tiedon sekä kokemuksen myötä, mutta aiemman teoriaosion avulla voidaan suorittaa kokonaiskuvan kannalta järkevämpiä ratkaisuja käytännössä.

5.2 Sahausprosessit

Prototyypin valmistuksessa käytetyin yksittäinen menetelmä oli sahaus, sillä suurin osa tarvittavista osista oli erinäisten teräsputkien paloja. Juuri korkean käytön vuoksi sahaus oli eniten aikaa vievä prosessivaihe. Tästä syystä sahaus on ensimmäinen looginen automaation kohde. Prosessi on teknisesti yksinkertainen, joten sen automatisointi ei vaadi monimutkaisia tai erityisen kalliita ratkaisuja.

Sahausprosessin automatisointi vaatii yksinkertaisimmillaan aihion syötön, mittaan leikkauksen sekä aihion poiston. Automaattisaha voidaan siis ajatella lähes normaalina pyörö- tai vannesahana, jolle syötetään ohjatusti putkea ja joka mittaa sekä leikkaa putket haluttuihin mittoihin ja kulmiin. Tällainen laitteisto on esimerkiksi kuvan 13 ISTech 440 XL. Laitteisto olisi kiinteää automaatiota, sillä ne asetetaan toistamaan tiettyä prosessikaavaa eli sahaamaan vain tiettyjä putkivariantteja. Kiinteä automaatio olisi sahauksille paras ratkaisu, sillä prosessi itsessään on yksinkertainen ja toistettava. Näin ollen vaativia automaattioratkaisuja ei vaadita prosessin suorittamiseen, joten monimutkaisiin järjestelmiin ei tarvitse investoida.



Kuva 13: ISTechin valmistama automaattisaha (ISTech-Segatrici, 2021)

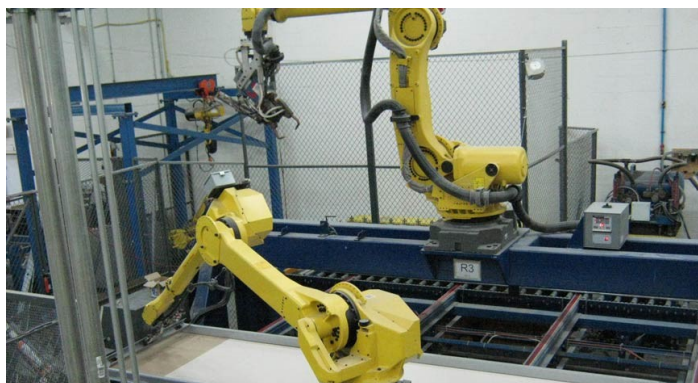
Painonnostopenkin kohdalla tuotannossa olisi kolme sahaa, runko- sekä tasorakenteen osille omat sekä yksi pelkästään pääputkille. Nämä osat kattavat suurimman osan penkin rakenteesta, joten automaatio nopeuttaisi huomattavasti niiden valmistusta. Tasorakenteen osien sekä pääputkien sahat vaatisivat vain aihion syötön sahalle. Pääputket ovat kaikki saman mittaisia, mutta tasorakenteen osat tulee syöttää sahalle oikean mittaisina. Tämä on helposti ratkaistavissa esimerkiksi sahalle syötön syklityksellä; yksi osakokonaisuus sahataan kerrallaan.

Runkorakenteen osat koostuvat vain kahdesta osasta, mutta niiden sahauksissa vaaditaan erilaisia kulmia. Siksi pyöreä putki toimii kohteessa hyvin, sillä putkia tulisi pyörittää sahalla kulmien leikkaamiseksi. Lattiaputki vaatii vain suorat sahaukset, mutta jalkaputken päät vaativat kulmasahauksia. Sahaus kannattaisi aloittaa alapäästä, jossa saha leikkaisi kuvan 6 segmentit oikeilla sahauspään sekä aihion käännoillä. Valmis jalkaputki syntyisi, kun aihio syötetään oikeaan mittaan ja sahataan 30° kulmassa. Jalkaputken synnyttyä aihioon jäänyt 60° kulma sahattaisiin pois ja prosessi alkaisi

alusta. Runkorakenteen osien sahaus ei vaatisi muuta, kuin aihion käännön, joka sekkin voidaan asettaa automaattisahaan helposti.

5.3 Hitsausprosessit

Sahausten lisäksi on myös hitsaus penkin valmistuksessa suuressa roolissa. Lähes kaikki rakenteiden osat kiinnittyvät hitseillä toisiinsa, joten myös tässä automaatio nopeuttaisi tuotantoa. Hitsauksen automatisointi vaatii usein yhden tai useamman robottikäden, jotka kuuluvat ohjelmoituun automaatioon. Toisin kuin saha, joka fyysisesti rajoittuu vain hyvin yksinkertaisiin tehtäviin, robottikäsi voidaan ohjelmoida suureen kirjoon eri toimintoja. Kestävien hitsisaumojen aikaansaamiseksi tulee menetelmällä olla hyvää tilannekohtaista säädettävyyttä. Teollisuuden robottikädet, kuten kuvassa 14, ovat laajalti käytössä teollisuudessa juuri säädettävyyden ja joustavuuden vuoksi.



Kuva 14: Robotisoitu hitsauslaite ja koura tuotantolinjalla (AGT robotics, 2014)

Osakokonaisuuskohtaisen sahojen lajittelun vuoksi voitaisiin hitsaus toteuttaa heti sahausten jälkeen. Kahdella robottikädellä sahaa kohden saataisiin sekä jalan putkien että taseorakenteen selkä- ja istuinosan liitokset valmistettua automaattisesti. Sahalta tulevat putkenpalat voitaisiin lajitella robottikouralla muotteihin tai hitsauskiinnikkeisiin, jotka pitävät osat oikeilla paikoilla hitsausta varten. Osien ollessa paikallaan erillinen hitsirobotti tekisi liitoskohtiin hitsisaumat. Robottikoura kääntäisi osat puolivälissä vastapuolen saumojen hitsaamiseksi. Lopuksi koura siirtäisi valmiit osat erillisiin astioihin tulevaa kokoonpanoa varten.

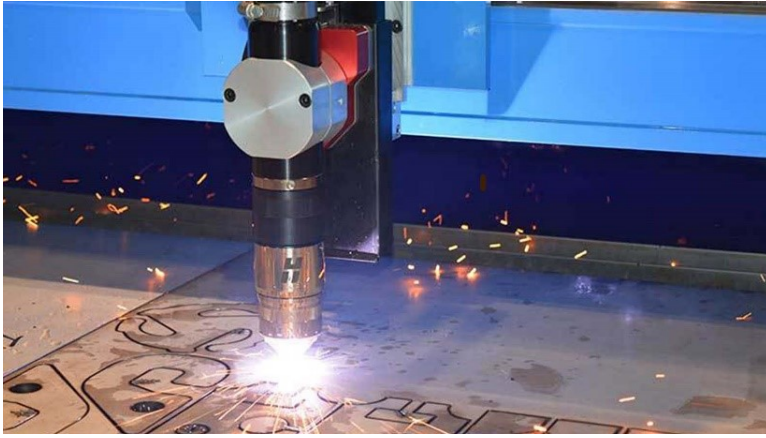
Vaikka kyseinen menetelmä vaatisi robottikäsiltä monimutkaisilta näyttäviä liikkeitä, on kyseessä loppupeleissä vain oikea ohjelmointi. Robottikäsien tarvitsee vain toimia ohjelmoidun radan mukaisesti, sillä esimerkiksi kappaleiden paikoitus eri vaiheiden välillä voidaan rajoittaa muoteilla tai esteillä. Robotit voidaan ohjelmoida valmistamaan juuri tiettyä osakokonaisuutta, mutta ovat myös säädettävissä tulevaisuudessa uutta tuotantoa varten. Robottikädet kuuluisivat ohjelmoituun automaatioon, sillä niiden toiminta prosessissa ei vaadi niiltä erinäisiä antureita eikä omaa ratkaisukykyä, mutta vaativat silti toimintaohjelman prosessien suorittamiseen.

5.4 Levyleikkaus

Toisin kuin sahauksessa tai hitsauksessa, levyjen leikkauksessa voidaan sekä kannattaa käyttää valmiina olevia automaattisia kokonaisratkaisuja. 3-ulotteisia, NC-ohjattuja leikkauslaitteistoja on saatavilla laajasti erilaisia. Prototyypin valmistuksessa käytettiin vesileikkuria, mutta tuotannon kannalta vastaava plasmaleikkuri olisi järkevämpi ratkaisu. Kyseiset leikkurit ovat tuotannon kannalta toiminnallisesti hyvin samanlaisia, mutta plasmaleikkurin nopeuden vuoksi se on tehokkuuden kannalta parempi. Myöskään vesileikkurin tarjoamaa suurempaa tarkkuutta ei osissa vaadita.

NC-ohjattu plasmaleikkuri on jo itsessään automaattinen valmistusmenetelmä ja kuuluu ohjelmoituun automaatioon. Leikkuri vaatii kappalekohtaisen leikkausohjelman toimiakseen, mutta pystyy sen vuoksi valmistamaan vaikeitakin muotoja nopeasti. Tuotannon kannalta riittäisi yksi leikkuri, jolle tehtäisiin kaksi ohjelmaa; Pääakselin laippojen ja kääntövarsien sekä vastinlevyjen ohjelmat. Edellä mainitut voidaan saman materiaalivahvuuden vuoksi leikata samasta levystä. Osa voitaisiin sommitella leikattavaksi suuresta teräslevystä, jolloin niitä voidaan tuottaa kerralla suuri määrä (kuva 15). Sama pätee vastinlevyille eli levyn sekä ohjelman vaihdon jälkeen voi leikkuri tuottaa myös niitä suuren määrän kerralla. Ihmistoimintaa koko prosessissa tarvitaan vain levyjen ja ohjelmien vaihtoihin sekä reikien kierteitykseen ennen kokoonpanoa.

NC-ohjattu leikkaus on nopea menetelmä ja sen käyttö tuotannossa on myös vaivatonta. Menetelmän monipuolisuuden vuoksi voidaan monimutkaiset kappaleet valmistaa nopeasti. Näin ollen voidaan tuotettavat kappaleet suunnitella kyseisen valmistusmenetelmän ympärille, esimerkiksi akselien tai kääntövarsien tapauksessa.



Kuva 15: NC-plasmaleikkuri leikkaamassa osia tuotantoon (akscutting, 2021)

6 YHTEENVETO

Työssä perehdyttiin automaation eri muotoihin sekä käytännön ratkaisuihin. Tarkasteltiin myös automaatiomenetelmien toiminnallisuutta tuotannon näkökulmasta, erityisesti konepajaympäristössä. Konepajoilla on käytössä monenlaisia automatisoituja valmistusmenetelmiä, mutta niiden käyttö vaatii tuotannon sekä valmistettävien kappaleiden suunnittelua toimimaan niiden kanssa.

Työssä myös suunniteltiin prototyyppi painonnostopenkistä, ennen kaikkea tuotannollisesta näkökulmasta. Penkin rakenteelliset ratkaisut pyrittiin pitämään mahdollisimman yksinkertaisina valmistaa, jotta myös menetelmien automatisointi sujuisi suoraviivaisesti.

Penkistä valmistettiin myös prototyyppi konepajalla, jolla testattiin itse penkin sekä valmistettavuuden suunnittelun toimivuutta käytännössä. Prototyypin valmistus antoi käytännön perspektiivin myös automaation suunnitteluun. Automaatioratkaisuissa päädyttiin teorian sekä case-osion perusteella osakohtaisiin, solumaisiin ratkaisuihin, joissa penkin rakenteen osia valmistettaisiin automaattisesti kokoonpanoa varten. Itse menetelmät olivat kiinteitä sekä ohjelmoitavia, sillä tuotanto pyrittiin pitämään kustannustehokkaana. Joustavia menetelmiä ei tarvittu, sillä menetelmät sidottiin valmistamaan liukuhihnaisesti osia, mahdollisimman korkealla tehokkuudella.

LÄHDELUETTELO

Iin konepaja, 2023, 'Palvelut' [verkkodokumentti], Suomi, saatavilla: <https://www.ikp.fi/palvelut> [viitattu 21.2.2023]

Groover M. P., 2020, 'Automation', *Encyclopedia Britannica*, [verkkodokumentti], saatavilla: <https://www.britannica.com/technology/automation> [viitattu 27.2.2023]

Kuisma Veli Matti, 2007, 'Joustavan konepaja-automaation käyttöönoton onnistumisen edellytykset', *VTT PUBLICATIONS 655*, ISBN 978-951-38-7045-4

Engineered Automation of Maine, 2020, '3 types of automation', [verkkodokumentti], saatavilla: <https://www.eaminc.com/blog/automation-types/> [viitattu 27.2.2023]

Engineered Automation of Maine, 2022, '3 flexible automation examples explained' [verkkodokumentti], saatavilla: <https://www.eaminc.com/blog/flexible-automation-examples/> [viitattu 27.2.2023]

Oracle Precision, 2017, 'Advantages of CNC machining' [verkkodokumentti], saatavilla: <https://www.oracle-precision.co.uk/news/advantages-of-cnc-machining> [viitattu 27.2.2023]

American Machinist, 2021, 'Making the decision to automate CNC machining' [verkkodokumentti], saatavilla: <https://www.americanmachinist.com/automation-and-robotics/article/21182722/what-cnc-machine-automation-can-do-for-machine-shops-machine-shop-tips> [viitattu 1.3.2023]

GURUPTZE, 2017, 'Turning solutions catalogue' [verkkodokumentti], saatavilla: https://www.gurutzpe.com/pdf/GURUTZPE_Heavy_Duty_Turning_Machines_Solutions_eng.pdf [viitattu 1.3.2023]

Shea K. et al, 2010, 'Design-to-fabrication automation for the cognitive machine shop', *Advanced Engineering Informatics*, s. 251–268, DOI 10.1016/j.aei.2010.05.017

Healthline, 2021, 'Fitness and exercise' [verkkodokumentti], saatavilla: <https://www.healthline.com/health/fitness-exercise/incline-vs-flat-bench> [viitattu 6.3.2023]

Tomi Piironen, 2013, 'Teräsrakenteiden suunnitteluohjeita parempaan valmistettavuuteen', *Savonia-ammattikorkeakoulun julkaisutoimikunta*, ISBN: 978-952-203-177-8