



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Jyri Mansikkamäki

Tuotannonohjaus Engineering-to-Order ympäristössä

Haasteet ja ratkaisut asiakaskohtaisessa tuotannossa

Tekniikan ja
innovaatiojohtamisen
akateeminen yksikkö
Tuotantotalouden
Kandidaatintutkielma
Tuotantotalouden
kandidaattiohjelma

Vaasa 2025

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

Tekijä:	Jyri Mansikkamäki		
Tutkielman nimi:	Tuotannonohjaus Engineering-to-Order ympäristössä: Haasteet ja ratkaisut asiakaskohtaisessa tuotannossa		
Tutkinto:	Kauppätieteiden kandidaatti		
Oppiaine:	Tuotantotalous		
Työn ohjaaja:	Tauno Kekäle		
Valmistumisvuosi:	2025	Sivumäärä:	39

TIIVISTELMÄ:

Tässä tutkielmassa tarkastellaan tuotannonohjausta Engineer-to-Order (ETO) -ympäristössä, jossa tuotteet suunnitellaan ja valmistetaan täysin asiakaskohtaisten vaatimusten mukaisesti. ETO-mallissa tuotanto käynnistyy vasta tilauksen jälkeen, mikä erottaa sen perinteisistä tuotantomalleista. Tämä tuo mukanaan erityisiä haasteita, kuten pitkät toimitusajat, monimutkaiset toimitusketjut sekä resurssien ja kapasiteetin hallinnan vaikeudet. Koska tuotteet ovat usein moniosaisia ja teknisesti vaativia, suunnittelun ja valmistuksen integrointi on keskeinen osa tehokasta tuotannonohjausta.

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, millaisia menetelmiä sekä teknologioita voidaan hyödyntää ETO-tuotannon ohjaamisessa. Erityisesti tarkastellaan joustavia tuotannonhallinnan strategioita, kuten pull-ohjausta ja Lean-ajattelua, jotka voivat auttaa vähentämään tuotannon hukkaa ja lyhentämään läpimenoaikoja. Lisäksi analysoidaan digitaalisten työkalujen, kuten toiminnanohjausjärjestelmien (ERP) ja tuotteen elinkaaren hallintajärjestelmien (PLM), merkitystä tiedonkulun tehostamisessa ja päätöksenteon tukena.

Tutkielma perustuu kirjallisuuskatsaukseen, jossa tarkastellaan aiempia tutkimuksia ETO-mallin tuotannonohjauksesta ja sen kehittämisestä. Tutkielman perusteella voidaan todeta, että tehokas tuotannonohjaus ETO-ympäristössä edellyttää tarkkaa resurssien hallintaa sekä ennakoivaa kapasiteetinsuunnittelua. Toimitusketjun hallinnan parantaminen, toimittajayhteistyön kehittäminen ja digitaalisten järjestelmien hyödyntäminen voivat auttaa yrityksiä vastaamaan asiakaskohtaisen tuotannon vaatimukseen ja vähentämään toimitusviiveitä.

Tutkimuksen pohjalta voidaan esittää suosituksia ETO-yrityksille. Toimitusketjun hallintaan tulisi panostaa, sillä materiaalien ja komponenttien hankinta vaikuttaa suoraan tuotannon sujuvuuteen. Lisäksi resurssien optimointi ja projektinhallintamenetelmien soveltaminen voivat auttaa tasapainottamaan tuotantokapasiteetin käyttöä ja lyhentämään toimitusaikoja. ETO-ympäristössä tuotannon joustavuutta voidaan parantaa hyödyntämällä pull-ohjausta ja modulaarista suunnittelua, joka mahdollistaa osittaisen standardoinnin ilman, että asiakaskohtaisuus kärsii.

Tutkielma osoittaa, että ETO-yritysten kilpailukykyä voidaan vahvistaa kehittämällä tuotannon suunnittelua ja hyödyntämällä digitaalisia ratkaisuja päätöksenteon tukena. Jatkotutkimuksessa voitaisiin tarkastella tekoälyn ja koneoppimisen mahdollisuuksia tuotannonohjauksen optimoinnissa sekä sitä, miten modulaarisuutta voitaisiin soveltaa asiakaskohtaisten tuotteiden valmistuksessa.

AVAINSANAT: Engineer-to-Order, tuotannonohjaus, toimitusketjun hallinta, resurssien optimointi

Sisällys

1	Johdanto	5
1.1	Tutkimuksen tausta	5
1.2	Tutkimuksen tavoitteet	6
1.3	Tutkimusmenetelmät ja rajaukset	6
2	ETO-Toimintamalli (Engineer-to-order)	8
2.1	Määritelmä ja toimintaperiaatteet	8
2.1.1	ETO-tuotantoprosessin vaiheet tiivistettynä	10
2.2	Ominaispiirteet ja erottavat tekijät muista malleista	11
2.3	Haasteet perinteisiin tuotantomalleihin verrattuna	13
3	Tuotannonohjauksen strategiat ETO-ympäristössä	16
3.1	Suunnittelun ja ohjauksen lähestymistavat	16
3.2	Kapasiteetinhallinta ja resurssien optimointi ETO-tuotannossa	18
3.3	Asiakaskohtaisen räätälöinnin vaikutus tuotannonohjaukseen ja kapasiteetinhallintaan	19
3.4	Materiaalin- ja toimitusketjujen hallinta	20
4	Teknologiat ja työkalut tuotannonohjauksessa	22
4.1	Toiminnanohjausjärjestelmien rooli	22
4.2	Digitaaliset suunnittelutyökalut ja niiden hyödyntäminen	24
4.3	Integraatoratkaisut ja teknologioiden yhteensopivuus	24
5	Prosessien hallinta ETO-ympäristössä	26
5.1	Suunnittelu- ja toteutusprosessien ohjaus	26
5.2	Kompleksisuuden hallinta ja joustavuus	28
5.3	Läpimenoajan optimointi ja toimitusvarmuus	30
6	Yhteenveto	32
6.1	Keskeiset havainnot	32
6.2	Kehittämiskohteet ja suositukset	33
6.3	Jatkotutkimusaiheet	34
	Lähteet	36

Kuvat

Kuva 1. Eri tuotantomallien katkaisupiste	9
Kuva 2. Tuotannonohjauksen toimintamallit eri valmistusstrategioissa	11

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Engineer-to-Order (ETO) -toimintamalli on yksi keskeisimmistä tuotantostrategioista teollisuuden aloilla, esimerkiksi erikoiskoneiden valmistuksessa, joissa tuotteiden standardiratkaisut eivät riitä. Toisin kuin perinteiset Make-to-Stock (MTS) tai Make-to-Order (MTO) -mallit, joissa valmistus tapahtuu joko varastoon tai tilauksen jälkeen ennalta määritellyillä osilla, ETO-mallissa tuotteet suunnitellaan ja valmistetaan täysin asiakaskohtaisten vaatimusten mukaisesti (Hicks ja muut, 2000, s. 179–180; Gosling ja Naim, 2009, s. 741–742). Tämän vuoksi ETO-malli on erityisen keskeinen tuotantomalli esimerkiksi muuntajateollisuudessa, jossa tuotteiden monimutkainen rakenne, korkea räätälöintiaste ja asiakaskohtaiset tekniset vaatimukset edellyttävät joustavaa ja projektikohtaista tuotannonohjausta.

ETO-ympäristössä tuotannon suunnittelu ja toteutus ovat vahvasti sidoksissa toisiinsa, mikä tuo mukanaan useita haasteita. Koska jokainen tilaus on uniikki ja edellyttää erillistä suunnitteluprosessia, tuotannon hallinta vaatii tarkkaa resurssien kohdentamista, toimitusketjun tehokasta hallintaa ja joustavia aikataulusmenetelmiä. Tämä tekee tuotannonohjauksesta huomattavasti monimutkaisempaa verrattuna standardisoituihin tuotantomalleihin. Erityisesti pitkät toimitusajat ja suunnitteluprosessin kriittinen rooli tuotannon onnistumisessa korostavat tarvetta tehokkaille ohjausjärjestelmille (Cannas ja Gosling, 2021, s. 1–3).

Muuntajateollisuus ja muut korkean teknologian alat lisäävät ETO-ympäristöön erityisiä vaatimuksia, kuten monimutkaisten komponenttien integroinnin, pitkien toimitusaikojen hallinnan ja asiakaslähtöisten teknisten ratkaisujen kehittämisen. Tämä edellyttää tuotannon ja suunnittelun saumatonta yhteensovittamista, jotta asiakaskohtaiset vaatimukset voidaan täyttää kustannustehokkaasti ja aikataulussa.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoitteena on tarkastella, kuinka ETO-ympäristössä tapahtuva tuotannonohjaus voidaan optimoida vastaamaan asiakaskohtaisen räätälöinnin vaatimuksia. Keskeisiä tutkimuskysymyksiä ovat:

1. Mitkä ovat keskeiset tuotannonohjauksen haasteet ETO-ympäristössä erityisesti kapasiteetin ja resurssien optimoinnin kannalta?
2. Millaisia käytäntöjä voidaan hyödyntää ETO-tuotannon tehokkuuden parantamiseksi?
3. Miten eri digitaalisten työkalujen käyttö vaikuttaa toimitusvarmuuteen sekä tuotannon läpimenoaikoihin?

Tutkimuksen avulla pyritään tunnistamaan menetelmiä, joiden avulla ETO-yritykset voisivat tehostaa tuotannon suunnittelua ja hallintaa. Lisäksi tutkimus tarjoaa suosituksia, kuinka yritykset voisivat hyödyntää moderneja tuotannonohjaustyökaluja, kuten toiminnanohjausjärjestelmiä (ERP), projektinhallinnan menetelmiä ja digitaalista simulointia, parantaakseen resurssien hallintaa ja vähentääkseen tuotannon läpimenoaikoja.

Tutkimuksen tulokset ovat hyödyllisiä yrityksille, jotka toimivat korkean räätälöinnin ja matalan volyymin tuotannossa. Näiden yritysten kilpailukyky riippuu kyvystä hallita monimutkaisia toimitusketjuja ja varmistaa asiakaskohtaisten tilausten kustannustehokas toteutus ilman merkittäviä viivästyksiä tai ylimääräisiä kustannuksia.

1.3 Tutkimusmenetelmät ja rajaukset

Tutkimuksen lähestymistapana käytetään kirjallisuuskatsausta, joka mahdollistaa laajan tarkastelun ETO-tuotannon erityispiirteistä, haasteista ja ratkaisuista. Kirjallisuuskatsaus

soveltuu hyvin tähän tutkimukseen, koska ETO-mallia ja sen tuotannonohjausstrategioita on tutkittu akateemisissa julkaisuissa, ja näiden tutkimusten analysointi tarjoaa vahvan teoreettisen perustan aiheen tarkastelulle.

Tutkimuksessa keskitytään erityisesti ETO-ympäristön tuotannonohjauksen haasteisiin ja ratkaisuihin. Se ei käsittele laajemmin muita tuotantomalleja, kuten massatuotantoa tai standardoitua sarjatuotantoa. Lisäksi tutkimus rajautuu teollisuusaloihin, joissa yksilöllinen räätälöinti on keskeinen osa liiketoimintaa, kuten muuntajateollisuuteen, erikoiskoneiden valmistukseen ja muihin korkean teknologian teollisuudenaloihin.

Koska tutkimus perustuu kirjallisuuskatsaukseen, siinä ei käsitellä empiirisiä tapaustutkimuksia tai yrityskohtaista dataa, vaan keskitytään olemassa olevan teoreettisen tiedon analysointiin ja synteysiin. Tämä rajaus mahdollistaa aiheen käsittelyn yleisellä tasolla ja tarjoaa hyödyllisiä johtopäätöksiä eri teollisuudenalojen yrityksille, jotka kohtaavat samankaltaisia haasteita ETO-tuotannossa.

Tutkielmassa on hyödynnetty tekoälypohjaisia työkaluja kuten ChatGPT ja sen kielimalleja GPT-4o sekä o1. Näitä malleja on hyödynnetty hahmottelemaan tutkielman rakennetta sekä ”pallottelemaan” ideoita. Käytin näitä malleja myös oikoluennassa, jonka avulla pystyin poistamaan pitkiä lauserakenteita, jotta tekstin sujuvuus säilyisi parempana sekä kirjoitusvirheitä. Käytin myös tekoälypohjaista käännössovellusta DeepL-Translate, kääntämään artikkeleita suomeksi, jotta pystyin tulkitsemaan artikkeleita paremmin. Vaikka tutkielmassa on hyödynnetty näitä työkaluja, on vastuu sisällöstä sekä laadusta minulla, eli itse tekijällä.

2 ETO-Toimintamalli (Engineer-to-order)

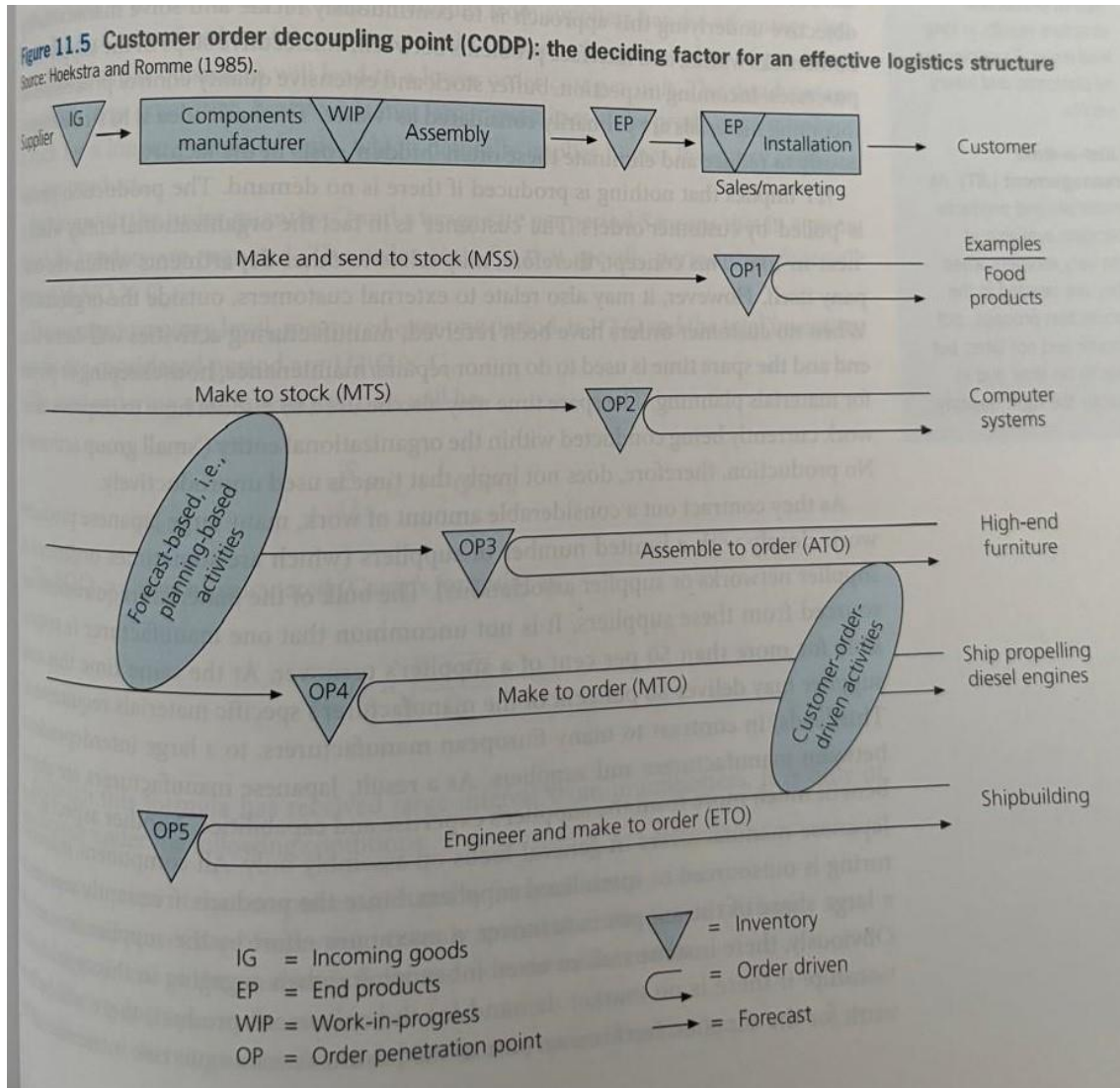
Hicksin ja muut (2000, s. 179–181) sanovatkin, että ETO-malli on noussut suosituksi tuotannonohjausmalliksi, sen luonteen ansiosta, koska se mahdollistaa laajan räätälöinnin eri teollisuudenaloilla, joissa standardisoidut ratkaisut eivät sovellu kyseisten yritysten toimintamalleihin. Hicks ja muut (2000, s. 182) kertovatkin, että ETO-tuotannolle on ominaista tuotteiden korkea räätälöintiaste, sillä jokainen projekti/tuote suunnitellaan erikseen. Tämä tekeekin tuotannonohjauksesta haastavaa, koska toimitusajat, materiaalihankinnat sekä resurssien hallinta ovat projektikohtaisesti muokattavia.

Tämän kappaleen alaluvuissa tarkastellaan tarkemmin ETO-mallin määritelmää sekä toimintaperiaatteita. Keskitymme myös ETO-mallin ominaispiirteisiin sekä vertailemme, miten se eroaa muista tuotannonohjausmalleista. Lopuksi käsitellään ETO-mallin haasteita perinteisempiin tuotantomalleihin verrattuna, kuten pitkät toimitusajat sekä tuotannon suunnittelun haasteet.

2.1 Määritelmä ja toimintaperiaatteet

Engineer-to-order eli ETO-malli on tuotantojärjestelmä, jossa tuotteet suunnitellaan ja valmistetaan asiakkaan vaatimusten mukaisesti vasta tilaukseen jälkeen (Gosling & Naim, 2009, s. 741). Tämä tekeekin ETO-mallista poikkeavan perinteisistä tuotantomalleista, koska siinä jokainen tuote suunnitellaan yksilöllisesti, eikä valmistus perustu standardoituihin osiin tai varastoituihin komponentteihin (Weele, 2018, s. 261). Goslingin ja Naimin (2009, s. 741–744) mukaan ETO-mallin tärkein erottava ominaisuus eli decoupling point erottaakin ETO-mallin muista tunnetuista malleista kuten Make-to-stock (MTS) tai Make-to-order (MTO). ETO-mallissa decoupling point eli katkaisupiste

sijaitsee suunnitteluvaiheessa ja MTS-mallissa valmiin tavarankohdalla toimituskeskuksessa ja MTO-mallissa ostettujen tavaroiden kohdalla.



Kuva 1. Eri tuotantomallien katkaisupiste (Weele, 2018, s. 261)

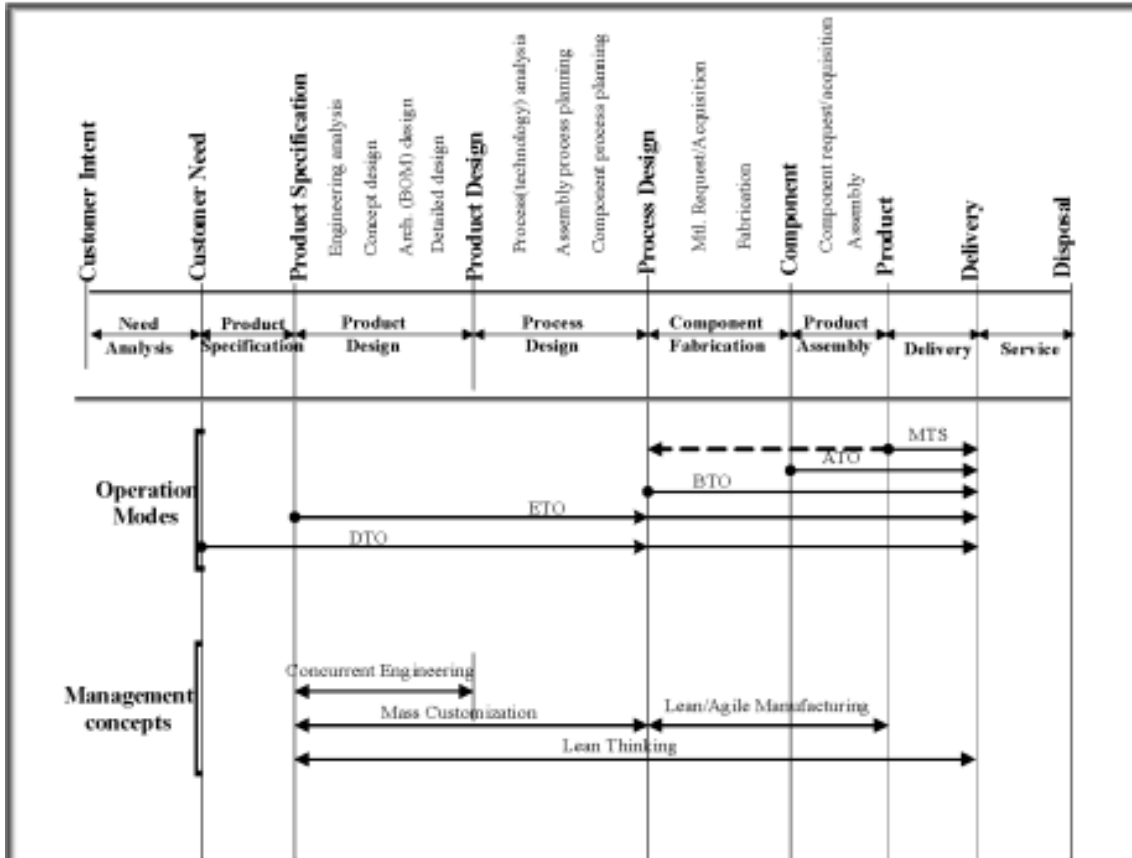
Dallasegan ja muiden (2015, s. 215–216) havainnot korostavatkin ETO-yritysten tuotteiden toimitusketjuista sitä, että koska jokainen tuote on ainutlaatuinen, on suunnitteluvaiheella keskeinen rooli toimitusketjun tehokkuudessa. Heidän mukaansa suunnittelun laatu ja synkronointi tuotannon kanssa vaikuttavat suoraan toimitusketjun tehokkuuteen. Addo-Tenkorang ja Eyob (2013, s. 112–113) kertovatkin, koska ETO-mallissa tuotteen suunnitteluvaihe on kiinteä osa toimitusprosessia, se muodostaa

merkittävän osan koko tuotteen läpimenoajasta. Tämä johtuu siitä, että ETO-prosessi alkaa asiakaskohtaisesta määrittelystä ja päättyy tekniseen suunnitteluun, eikä tuotantoa voida aloittaa ennen suunnittelun valmistumista.

ETO-yrityksen tyypillinen tuote on korkeasti räätälöity ja matalavolyymituotantoa vaativa. Sen tuoterakenne on monimutkainen ja sisältää useita komponentteja, joista osa voi olla täysin asiakaskohtaisesti suunniteltuja. Korkea räätälöintiaste lisää kustannuksia ja riskejä sekä pidentää toimitusaikoja (Hicks ja muut, 2000, s. 182). Kuten Adrodegari ja muut (2013, s. 6) tutkimuksessaan tulivat siihen lopputulokseen, että ETO-yritykset tarvitsevat tehokkaita tuotannonohjauksen ja projektinhallinnan menetelmiä, jotta ne voivat hallita tilaus- ja asiakaskohtaisia vaatimuksia ja täten myös varmistaa toimitusten täsmällisyyden. He jatkavatkin, että kilpailun ja asiakaskohtaisten vaatimusten kasvaessa nämä yritykset kohtaavat haasteita erityisesti suunnittelun, aikataulutuksen ja resurssienhallinnan osa-alueilla.

2.1.1 ETO-tuotantoprosessin vaiheet tiivistettynä

ETO-tuotantoprosessi voidaan jakaa selkeisiin vaiheisiin, jotka ohjaavat tuotteen valmistumista tilauksesta toimitukseen. Ensimmäisessä vaiheessa määritetään asiakkaan tarpeet, jossa asiakas määrittelee omat vaatimuksensa tuotteelle. Seuraavassa vaiheessa keskitytään tuotteen suunnitteluun ja kehitykseen. Asiakkaan vaatimukset ja määritelmät tuotteelle muutetaan teknisiksi piirustuksiksi. Kolmas vaihe on materiaalin hankintaa sekä tuotannon valmistelua. Tämä vaihe sisältää esimerkiksi kokoonpanoprosessin ja komponenttiprosessin suunnittelun. Neljännessä vaiheessa aloitetaan itse tuotteen valmistaminen, kun komponentit ja materiaalit ovat saapuneet. Kokoonpanovaihe voi myös sisällyttää tuotteen testaamisen. Viimeinen vaihe tuotteelle on tuotteen toimitus asiakkaalle Chen (2006, s. 37–41).



Kuva 2. Tuotannonohjauksen toimintamallit eri valmistusstrategioissa (Chen, 2006, s. 41)

2.2 Ominaispiirteet ja erottavat tekijät muista malleista

Engineer-to-Order eli ETO-mallin erityispiirteet korostuvat erityisesti silloin, kun sitä verrataan muihin tuotannonohjausmalleihin, kuten Make-to-Stock (MTS), Make-to-Order (MTO) ja Assemble-to-Order (ATO). Keskeisimmät erot liittyvät räätälöintiasteeseen, toimitusprosessiin sekä tuotannonohjauksen vaatimukseen. Näiden mallien suurimmat erot liittyvät asiakaslähtöisyyden asteeseen, toimitusprosessin rakenteeseen ja tuotannonohjauksen vaatimukseen (Saeed ja muut, 2016, s. 243–245).

Goslingin ja Naimin (2009, s. 743–745) havaintojen perusteella suurimmaksi eroksi tuotantomallien välillä ETO-mallin suunnittelun roolin sekä sen ajoituksen

tuotantoprosessissa. MTS-mallissa tuotteet valmistetaan varastoon jo ennen asiakkaan tilausta. ATO-mallissa lopputuote kootaan valmiiksi suunnitelluista osista tilauksen jälkeen ja täten mahdollistetaan nopea toimitus pienelle räätälöinnille. MTO-mallissa valmistus tapahtuu vasta asiakastilauksen jälkeen, mutta suunnittelu on minimissä, koska tuotteet perustuvat standardoituihin komponentteihin sekä valmiisiin malleihin.

ETO-mallissa asiakaskohtaisuus on huomattavasti korkeammalla tasolla kuin muissa malleissa, sillä jokainen tuote suunnitellaan yksilöllisesti asiakkaan tarpeiden mukaan. Tämä johtaa monimutkaisempaan tuotannonohjaukseen ja resurssien hallintaan, sillä korkea räätälöintiaste lisää kustannuksia, pidentää toimitusaikoja ja vaikeuttaa ennakoitavuutta. Toisin kuin MTO- ja ATO-malleissa, joissa tuotantokapasiteettia voidaan kohdentaa suhteellisen ennustettavasti, ETO-ympäristössä jokainen projekti vaatii erillistä resurssisuunnittelua ja aikataulutusta (Hicks ja muut, 2000, s. 181–183).

Toimitusketjun hallinnan näkökulmasta ETO-malli eroaa huomattavasti muista tuotantostrategioista. Koska tuotteet suunnitellaan ja valmistetaan vasta asiakastilauksen jälkeen, varastointitarve on minimaalinen verrattuna esimerkiksi Make-to-Stock (MTS) -malliin, jossa tuotteita valmistetaan ennakkoon ja ne ovat välittömästi toimitettavissa. Tämä piirre tekee ETO-mallin toimitusketjusta joustavan, mutta samalla kasvattaa toimitusaikoja, sillä ennen valmistuksen aloittamista tarvitaan tuotekehitys- ja suunnitteluvaiheita (Adrodegari ja muut, 2015, s. 1–4).

Dallasegan ja muiden (2015, s. 215–216) artikkelista käy ilmi, että yritysten näkökulmasta ETO-malli tarjoaa mahdollisuuden erikoistua korkean lisäarvon tuotteisiin, joissa tekninen osaaminen ja asiakaskohtainen räätälöinti muodostavat huomattavia kilpailuetuja. Jokainen tuote on yksilöllinen, ja sen suunnittelu, materiaalihankinta ja valmistus toteutetaan täysin asiakkaan vaatimusten mukaisesti. Vaikka tuotteissa voi olla standardoituja osia, jokainen asiakastilaus vaatii oman suunnitteluprosessinsa, tuotantoreitityksen ja asennuskäytännön, mikä tekee toimintamallista erityisen sopivan monimutkaisille projekteille. Heidän mukaansa myös ETO-mallin kustannusrakenne

poikkeaa muista tuotantostrategioista, sillä korkea asiakaskohtaisuuden aste nostaa kiinteitä kustannuksia ja pidentää investointien takaisinmaksuaikaa. Yritykset joutuvat usein hallitsemaan useita rinnakkaisia projekteja eri puolilla maailmaa, mikä lisää resurssienhallinnan monimutkaisuutta ja oppimiskustannuksia. Koska jokainen projekti edellyttää erillistä suunnittelu- ja valmistusprosessia, jatkuva projektien välillä pomppiminen voi johtaa tehottomuuteen (Dallasega ja muut, 2015, s. 215–216).

2.3 Haasteet perinteisiin tuotantomalleihin verrattuna

Kuten aiemmista kappaleista on tullut ilmi. ETO-malli eroaa erityisesti räätälöinnin asteen, toimitusprosessin rakenteen ja tuotannonohjauksen vaatimusten osalta muista perinteisistä tuotantomalleista.

ETO-mallissa tuotteen suunnittelu alkaa vasta asiakastilauksen jälkeen, jolloin suunnittelu- ja tuotantoprosessit ovat vahvasti sidoksissa toisiinsa, koska suunnitteluvaiheessa myös määritetään miten tuotanto toteutetaan. Koska jokainen tuote on asiakaskohtaisesti räätälöity, tuotanto ei voi käynnistyä ennen suunnittelun valmistumista, mikä pidentää läpimenoaikoja. Lisäksi suunnittelun aikana mahdollisesti ilmenevät muutokset voivat entisestään viivästyttää tuotantoa, mikä luo haasteita toimitusaikojen hallinnalle ja edellyttää joustavaa resurssienhallintaa (Dallasega ja muut, 2015, s. 216)

Dallasega ja muut (2015, s. 216) kertovatkin että, ETO-malli eroaa muista tuotantomalleista korkean räätälöintiasteensa vuoksi, sillä jokainen tuote suunnitellaan ja valmistetaan asiakaskohtaisesti. Tämä tuo lisähaasteita tuotantoprosessin hallintaan, sillä standardoituja osia ja prosesseja voidaan hyödyntää vain rajoitetusti. Tämä lisää tuotannon monimutkaisuutta ja vaatii tarkkaa materiaalihankinnan, resurssien hallinnan ja aikataulutuksen koordinoitua.

Dallasega ja muut (2015, s. 216) pitävätkin erottavana tuotannon tekijänä sitä että, ETO-mallissa tuotteita ei valmisteta varastoon, vaan tuotanto käynnistyy vasta asiakastilauksen jälkeen, mikä vähentää varastointikustannuksia mutta pidentää toimitusaikoja. Tämä tekee toimitusketjun hallinnasta haastavaa, sillä jokaisen tilauksen vaatimat materiaalit ja komponentit on hankittava erikseen. Toimitusketjun häiriöt voivat johtaa tuotantoviivästyksiin ja lisäkustannuksiin, mikä edellyttää tehokasta toimitusketjun ja materiaalihankinnan hallintaa (Dallasega ja muut, 2015, s. 217).

ETO-ympäristössä resurssien ja kapasiteetin hallinta on erityisen tärkeää, sillä yrityksillä on usein samanaikaisesti useita projekteja, jotka kilpailevat samoista resursseista. Koska tuotantokapasiteetin tarve vaihtelee projektikohtaisesti, resurssien joustava allokointi ja tarkka aikataulutus ovat välttämättömiä tehokkaan tuotannon varmistamiseksi (Dallasega ja muut, 2015, s. 216).

ETO-mallissa jokaisen projektin kustannusrakenne on yksilöllinen, sillä suunnittelu-, hankinta- ja valmistuskustannukset vaihtelevat projektikohtaisesti. Tämä tekee standardoitujen hinnoittelumallien käytöstä haastavaa ja edellyttää tarkkaa kustannuslaskentaa kannattavuuden varmistamiseksi. Korkea muuntelu projektivaatimuksissa lisää kustannusten arvioinnin monimutkaisuutta (Dallasega ja muut, 2015, s. 218).

ETO-mallissa tiivis yhteistyö asiakkaan kanssa on keskeistä, sillä asiakkaan tarpeet ja vaatimukset ohjaavat koko suunnittelu- ja tuotantoprosessia. Tämä vaatii tehokkaita viestintäkanavia ja selkeitä muutostenhallintaprosesseja, sillä kommunikaatiokatkokset voivat johtaa virheisiin, uudelleentyöstöön ja aikataulujen viivästymiseen. Siksi projektinhallinnan rooli korostuu ETO-ympäristössä (Dallasega ja muut, 2015, s. 219).

Yhteenvetona voidaan todeta, että ETO-malli tarjoaa mahdollisuuden tuottaa korkeasti räätälöityjä tuotteita, jotka vastaavat tarkasti asiakkaiden tarpeisiin. Kuitenkin tämä tapa tuo mukanaan merkittäviä haasteita, erityisesti liittyen suunnittelun ja tuotannon

integrointiin, toimitusketjun hallintaan, resurssien suunnitteluun sekä asiakasyhteistyöhön. Näiden haasteiden tehokas hallinta edellyttää joustavia ja hyvin suunniteltuja tuotannonohjaus- ja projektinhallintaprosesseja.

Voidaankin pohtia näiden perusteella myös ETO-mallin riskejä mitä pitkistä toimitusajoista voi johtua. Pitkät toimitusajat voivat myös vaikuttaa asiakastytymättömyyteen ja kassavirtaongelmiin. Myös joidenkin yritysten kohdalla on hyvä miettiä voiko tuotantoa ja tuotteita yksinkertaistaa ja siirtyä esimerkiksi ATO-mallin piiriin, jossa osa komponenteista on vakioitu.

3 Tuotannonohjauksen strategiat ETO-ympäristössä

ETO-ympäristössä tuotannonohjauksen strategiat keskittyvät yksilöllisesti räätälöityjen tilausten käsittelyyn ja tuotannon prosessien optimointiin. Tässä ympäristössä tehokas suunnittelu ja ohjaus ovat avainasemassa, koska tuotannon prosessi on projektikohtaista ja vaatii tarkkaa ennakoivaa päätöksentekoa aikataulujen ja resurssien käytön optimoimiseksi.

Tässä luvussa käsitellään keskeisiä lähestymistapoja, kuten pull-ohjausta ja kapasiteetinhallintaa, jotka ovat erityisen tärkeitä ETO-yrityksille. Luvussa käsitellään myös asiakaskohtaisen räätälöinnin vaikutuksia tuotannonohjaukseen, materiaalin- ja toimitusketjun hallintaa, sekä strategista joustavuutta, joka on tarpeen ETO-ympäristössä menestymiseen. Tavoitteena on tarkastella, miten eri strategiat ja teknologiat tukevat ETO-yritysten tuotannonohjausta ja auttavat sopeutumaan nopeasti muuttuviin asiakastarpeisiin ja markkinatilanteisiin.

3.1 Suunnittelun ja ohjauksen lähestymistavat

Cannas ja muut (2018, 134–135) kertovatkin, että suunnittelun ja tuotannonohjauksen rooli korostuu ETO-ympäristössä, jossa jokainen tilaus käsitellään yksilöllisesti. Tuotteiden luonteen takia, tuotantoprosessin suunnittelu on projektikohtaista, ja se vaatii ennakoivaa päätöksentekoa, jotta aikataulut ja resurssien käyttö voidaan optimoida. He sanovatkin, että hyvin hoidettu tuotannon suunnittelu ja ohjaus lisäävätkin yritysten kykyä tyydyttää asiakkaiden tarpeita sekä pitää yllä tehokkuutta.

Addrodegarin ja muiden (2015, s. 11) tekstistä tuleekin ilmi, että perinteiset tuotannonohjausmenetelmät eivät tuo ETO-yrityksille samoja hyötyjä mitä ne voivat tuoda Make-to-Stock yritykselle. He jatkavatkin, että monesti ETO-yritysten valitsemat

PPC-prosessit (Production, Planning & Control) ovat huonosti perusteltuja päätöksiä. Koska perinteisiltä ohjelmistoilta puuttuu ETO-mallin vaatimia ominaisuuksia, jota tämä viivästyksiin valmistusajoissa ja lisääntyneisiin kustannuksiin. Addrodegari ja muut (2015, s. 11) tiivistävätkin tämän ongelman, että ETO-ala kärsii varsinaisen PPC-prosessin puuttumisesta.

Yksi tuotannonohjaus menetelmä onkin osoittautunut toimivaksi. Garcia ja muut (2020, s. 12–13) testasivatkin pull-ohjaukseen perustuvaa tuotannonohjausmallia. Tutkimukset osoittivatkin pull-ohjauksen sopivan ETO-yrityksille. Tutkimuksessa huomattiin, että pull-ohjauksen avulla läpimenoajat lyhenivät, WIP (Work-In-Progress) eli keskeneräinen työ väheni merkittävästi. Pull-ohjaus auttoi myös tunnistamaan ja hallitsemaan pullonkauloja ennakoivasti. Slack ja Lewis (2020, s. 243) selittävätkin pull-ohjauksen eli imuohjauksen push-ohjauksen vastakohtana. Yksinkertaistetusti tuotteen tuotanto liikkuu siis eteenpäin asiakastarpeiden perusteella ja silloin kun edellinen vaihe on valmis sekä uuden vaiheen tarvittavat resurssit ovat valmiit. Push- eli työntöohjauksessa tuotanto liikkuu eteenpäin heti kun edellinen vaihe on valmistunut (Krajewski ja muut, 2019, s. 240–241). He kertovatkin vielä pull-ohjauksesta, että se on monien yritysten käytössä, jotka käyttävät myös Leania tuotannossa.

Pull-ohjauksen rinnalla projektinhallinnan työkalut, kuten Critical Path Method eli CPM, auttavat ETO-ympäristössä olevien tuotteiden kanssa eli monimutkaisten moniosaisien tuotteiden kanssa. Tämän metodin avulla voidaan varmistaa, että tuotannon eri prosessit/osaprosessit etenevät suunnitellusti. Kuten aiemmin on tullut ilmi, että ETO-mallia käyttävien tuotteet ovat moniosaisia ja monimutkaisia, sekä tuotannossa voi olla monta eri projektia kerralla, voidaan CPM avulla varmistaa, että kriittisimmät tuotantovaiheet saavat tarvitsemansa resurssit ilman, että muut projektit kärsisivät liikaa (Lehtonen, 2004, s. 238; Betts ja muut, 2009, s. 511–513).

Näiden perusteella voidaankin todeta, että perinteisten tuotannonohjausmallien rajoitteet ETO-ympäristössä edellyttävät erilaisia lähestymistapoja, kuten pull-ohjausta

ja projektihallinnan optimointia, koska ETO-tuotannon vaatimukset eroavat merkittävästi vakioiduista tuotantomalleista, tehokas tuotannonohjaus vaatii tarkkaa resurssien hallintaa, joustavia tuotantostrategioita ja kykyä sopeutua nopeasti muuttuviin asiakastarpeisiin.

3.2 Kapasiteetin hallinta ja resurssien optimointi ETO-tuotannossa

ETO-tuotannossa kapasiteetin hallinta on haastavaa, koska tuotannon resurssit jakautuvat useiden samanaikaisten projektien käyttöön. Vaikeutena ETO-yrityksillä on yhteensovittaa kysyntä saatavilla oleviin resursseihin erityisesti keskipitkällä aikavälillä 3–18 kuukauden aikajänteellä (Carvalho ja muut, 2015, s. 187–188). He jatkavatkin, että kapasiteetin suunnittelujärjestelmä, jonka avulla voisi analysoida nopeasti mahdollisten tilausten vaikutukset kapasiteettisuunnitelmiin, olisi erittäin tärkeä tilausten hyväksymisvaiheessa, jotta yritykset voisivat määrittää luotettavat päivämäärät valmistumiselle sekä määrittää hintatarjouksen.

Carvalho ja muut (2015, s. 188–191) kokeilivatkin Case studyna yritykselle, joka valmistaa asiakkaille räätälöityjä reaktoreita ja korkeapainekattiloita Mixed-Integer Linear Programming -mallia (MILP). Yrityksellä oli vaikeuksia kapasiteetin hallinnan kanssa, mikä on yleistä ETO-yrityksille. MILP-mallin tarkoituksena tarjota ETO-yritykselle apua taktiseen kapasiteetinsuunnitteluun, MILP-malli antaa tukea yritykselle tilauksen hyväksymisvaiheessa tasapainottamalla kysyntää ja käytettävissä olevaa kapasiteettia sekä antamalla tietoa mahdollisen tarjouksen valmistelua varten.

MILP-malli antoi mahdollisuuden tarkastella ja simuloida eri skenaarioita tuotannossa ja täten antoi tukea päätöksentekoa varten. Esimerkkejä joihin MILP-malli antoi tukea, olisiko tarvetta alihankkijoiden käytölle tietyissä osissa, voidaanko lisätilaukset hyväksyä nykyisillä resursseilla vai onko tarvetta rekrytoida lisää, voiko projektin aikataulua siirtää kapasiteetin tasaamiseksi. Keskeisimmät parametrit mitä malli huomioi simulaatiossaan

työtunnit sisältäen ylityötunnit, keskimääräiset kuukausipalkat, ylityökustannusten määrän työkohteittain, rekrytointi- ja irtisanomiskustannukset, työvaiheiden ulkoistamisen hinnan sekä aktiviteettien minimi ja maksimitehot. Yritys oli aiemmin käyttänyt manuaalista suunnittelutapaa, joka oli ollut hidas ja antoi vain muutamia vaihtoehtoisia suunnitelmia, kun MILP-malli pystyi analysoimaan lukuisia eri skenaarioita ja tuottamaan optimaalisimman ratkaisun (Carvalho, 2015, luvut 4–7). Malli ei kuitenkaan voi korvata täysin tuotannonjohtajan tai muiden vastaavien työntekijöiden mielipiteitä, vaan mallia täytyy käyttää nimenomaan tukena päätöksenteossa, käyttäen myös kokemuksen tuomaa viisautta. Voidaan myös pohtia MILP-mallin korvaamista, joillain muilla simulointimalleilla, jos yrityksellä ei esimerkiksi ole tuotannosta riittävää dataa.

ETO-yrityksille myös tärkeää kapasiteetinhallinnan kannalta on kehittää luotettavia suhteita tavarantoimittajien kanssa. Toimivat suhteet toimittajien kanssa vähentävät viivästyksiä tuotannossa (Hicks ja muut, 2000, s. 186–188). Kuten Hicksin ja muiden (2000, s. 181–184) artikkelista voimme päätellä, hyvin hoidettu toimitusketjujen hallinta vaikuttaa suoraan valmistuksen aikatauluihin, kustannuksiin sekä lopputuotteen laatuun. Hyvä toimitusketjujen hallinta mahdollistaa myös paremman tuotannon joustavuuden sekä toimitusvarmuuden.

3.3 Asiakaskohtaisen räätälöinnin vaikutus tuotannonohjaukseen ja kapasiteetinhallintaan

Kuten aiemmin on tullut tiedoksi, asiakaskohtainen räätälöinti on merkittävä tuotannonohjauksen haaste, sillä jokainen edellyttää yksilöllistä suunnittelua ja valmistusta. Johansson ja Mathew (2023, s. 80) myös kertoo, että kysynnän epävakaaluonne sekä aiemmin mainittu asiakaskohtainen räätälöinti tuo lukuisia haasteita, joilla on vaikutus suunnittelu- ja aikataulutustoimintojen tehokkuuteen.

ETO-mallilla toimivat yritykset kohtaavat myös ongelmia epävarmuuden kanssa. Epävarmuutta yrityksissä aiheuttavat markkinat mihin suuntaan ne liikkuvat, tuotteiden vaatimukset, raaka-aineiden sekä komponenttien niukkuus, ympäristölait sekä teknologian nopeat muutokset. Nämä kaikki johtavat epävarmuuksiin, mutta suurena epävarmuuden aiheuttajana on asiakaskohtaiset vaatimukset ja näiden vaikutukset kapasiteetinhallintaan sekä tuotannonohjaukseen (Johansson ja Mathew, 2023, s. 80). Johanson ja Mathew kertovatkin, että yritysten, jotka toimivat ETO-mallilla olisi syytä perehtyä aihealueen tieteellisiin artikkeleihin, jotta yritykset voisivat ymmärtää paremmin ongelmiansa ja miten niitä voitaisiin ratkaista. Tietoisuuden avulla yritykset pystyisivät parantamaan tehokkuuttaan tuotannon suunnittelussa ja aikataulutuksessa sekä myös vähentämään tuotantokustannuksia ja parantamaan asiakastyytyvää (Johansson ja Mathew, 2023, s. 80).

3.4 Materiaalin- ja toimitusketjujen hallinta

Koska ETO-tuotannossa tuotteet eivät valmistu varastoihin, on materiaalihankinnat sovitettava tilausten aikatauluihin. Blanchard (2010, s. 14) sanookin, että parhaimmin toimivilla toimitusketjuilla on seitsemän ominaisuutta, jotka kaikki jakavat. Ensimmäisenä hän sanoo, että kaikilla on selkeä toimitusketjustrategia perustanaan. Kaikki ovat sopeutumiskykyisiä sekä nopeita, mikä mahdollistaa kilpailun dynaamisessa ympäristössä. He ovat läpinäkyviä, heillä on selkeät suorituskytavoitteet ja he toimivat vastuullisesti asiakkaita kohtaan. Neljäntenä he kaikki pyrkivät huippusuoritukseen aina ja pyrkivät parantamaan jatkuvasti toimitusketjunsä toimintaa. He tietävät vahvuutensa sekä heikkoutensa. Kaikilla on kokonaisvaltainen näkökulma toimitusketjuun sekä sen osiin kuten suunnittelu, hankinta, valmistus, varastointi ja myynti sekä kaikki jakavat globaalin näkökulman alueellisen sijasta.

Emel ja muut (2021, s. 20) painottaakin asiakkaiden kuuntelua, jotta yritys voi parantaa heidän toimitusketjuansa. He kertovat myös, että yritysten kannattaisi implementoida

käyttöönä järjestelmä, jonka avulla asiakkaat voivat antaa palautetta sekä yritys voi analysoida sitä. He kertovatkin, että jatkuva parantaminen sekä monipuolinen ongelmien ratkaisu on avain onnistuneeseen toimitusketjun hallintaan.

4 Teknologiat ja työkalut tuotannonohjauksessa

Teknologiat ja työkalut ovat keskeisiä ETO-ympäristön tuotannonohjauksessa, jossa yritykset kohtaavat jatkuvasti muuntuvaa kysyntää ja asiakaskohtaisia vaatimuksia. Tällaisessa ympäristössä toiminnanohjausjärjestelmät (ERP-järjestelmät) ja tuotteen elinkaaren hallintajärjestelmät (PLM) nousevat keskiöön, koska ne voivat auttaa mahdollistamaan joustavan, tehokkaan ja reaaliaikaisen tuotannonohjauksen. Näiden työkalujen avulla ETO-yritykset voivat paremmin hallita monimutkaisempia tuotantoprosesseja, optimoida resurssien käyttöä ja reagoida nopeasti muuttuviin markkinatilanteisiin. Tässä luvussa tarkastellaankin näiden teknologioiden roolia, hyödyntämistä ja yhteensopivuutta, sekä niiden vaikutuksia tuotannonohjaukseen ja resurssien hallintaan ETO-ympäristössä.

4.1 Toiminnanohjausjärjestelmien rooli

Kaiken aiemman perusteella voidaan todeta, että ETO-ympäristöt ovat dynaamisia työympäristöjä, koska yritykset pyrkivät koko ajan mukautumaan asiakkaiden vaatimuksiin ja täten mukauttamaan omaa toimintaansa, jotta pystyvät tuottamaan voittoa. Tällaisessa muuttuvassa ympäristössä toiminnanohjausjärjestelmät muuttuvat tärkeiksi. AlMufayfith ja Shaiti (2020, s. 1–2) kertookin, että dynaamisten liiketoimintaympäristöjen aikakaudella organisaatiot kohtaavat monia haasteita kuten isot markkinavoimat, kova kilpailu sekä jatkuva tietotekniikan kehittyminen, jotta yritykset voivat saada kilpailuetua, on heidän saatava implementoitua innovatiivisesti nämä uudet tietotekniset sovellukset heidän käyttöönsä. He jatkavatkin, että ERP-järjestelmistä eli toiminnanohjausjärjestelmistä on tullut yrityksille erittäin hyödyllisiä yritysten johdossa ja onkin edellytys nykyaikana yrityksille, jotta ne pysyvät kilpailukykyisinä. Aiemmin onkin todettu, että ETO-yritykset eivät ole tavanomaisen valmistusteollisuuden parissa kuten esimerkiksi MTS-yritykset. Pitää ETO-yritysten

odottaa ERP-järjestelmiltä enemmän, koska MTS-yrityksien tuotanto perustuu vakioituihin prosesseihin ja totuttuun kysyntään, voidaan todeta, että ETO-ympäristössä ERP-järjestelmiltä vaaditaan enemmän joustavuutta projektien monimutkaisten luonteen perusteella. Myös aiemman perusteella, koska projektit ovat toisistaan erilaisia pitää ERP-järjestelmien mahdollistaa projektikohtainen tuotannosuunnittelu. Myös aiemmin todetun perusteella voidaan päätellä, että pitää toiminnanohjausjärjestelmien tukea dynaamista resurssien hallintaa, jotta resursseja voidaan kohdentaa muuttuvien tilauskantojen mukaan sekä projektien erilaisten kuormitusten mukaan, jotta voidaan varmistaa tehokas resurssien hallinta.

Kuten Gu ja muut (2022, luku 5) toteavat, että ETO-tuotantomallissa, projektien reaaliaikaiset valmistusprosessien tiedot ovat vaikeasti valvottavissa. Ehdottavat he tätä varten lohkoketjuteknologian käyttöä tähän. He kokeilivatkin tätä lohkoketjuteknologiaa omassa tutkimuksessaan ja se mahdollisti tuotantoprosessien reaaliaikaisen seurannan sekä tietojen jakamisen, joka sujuvoitti päätöksentekoa sekä tuotannon koordinoitua.

ERP-järjestelmää valitessa voidaankin todeta, että järjestelmän olisi hyvä olla muokattavissa omia tarpeita varten. Tätä väitettä tukeekin Bamfordin ja muiden (2016, s. 5-6) Case-yrityksen työntekijöiden palaute. Työntekijät totesivat, että heidän käyttämänsä ERP-järjestelmä oli aluksi kankea käytettävä, mutta kun järjestelmään kustomoitiin, oma aikataulusjärjestelmä paransi tämä käyttäjäkokemusta sekä vähensi manuaalista työtä, myös reagoiminen asiakaskysynnän muutoksiin parani, koska järjestelmä oli aiempaa huomattavasti joustavampi. Täten voidaankin todeta, että toiminnanohjausjärjestelmille on myös tärkeää integrointi mahdollisuus muihin työkaluihin, jotta tiedonsiirto on nopeaa sekä automaattista, jolloin myös tehokkuus paranee sekä virheriskit vähenevät, koska manuaalinen työ vähenee.

4.2 Digitaaliset suunnittelutyökalut ja niiden hyödyntäminen

Kuten aiemmin on todettu, on suunnitteluprosessi kiinteä osa tuotantoketjua ja tällöin se vaikuttaa suoraan myös läpimenoaikaan ja toimitusvarmuuteen. Voimme todeta, että suunnitteluprosessin on oltava tehokas ETO-yrityksissä. Li ja muut (2017, s. 69) toteavatkin, että ETO-yrityksillä suunnitteluprosessi on aikaa vievä projektien korkean räätälöinnin vuoksi. Li ja muut kokeilivatkin tutkimuksessaan avoimen lähteen PLM-alustaa eli tuotteen elinkaaren hallintajärjestelmää.

Heizer ja muut (2024, s. 202–204) sanovatkin, että yleinen apuväline tuotesuunnittelussa on Computer-Aided Design eli CAD. He sanovatkin, että tämä 3D-suunnittelua käyttävä järjestelmä nopeuttaa tuotesuunnittelua ja tällä tavoin myös säästää rahaa. Tämä koska piirrokset ovat digitaalisessa muodossa on niitä helppo muokata myös jälkikäteen, joten varsinkin korkeasti räätälöidyissä tuotteissa voimme päätellä tämän olevan lähes välttämättömyys. Myös tämän 3D-mallinnuksen avulla voidaan vähentää suunnitteluvirheitä sekä nopeuttaa tuotannon käynnistämistä.

Heizer ja muut (2024, s. 210–211) kertovatkin lisää aiemmin mainitusta tuotteen elinkaaren hallintajärjestelmistä. PLM-järjestelmät tuovatkin yhteen suunnittelun sekä tuotteen valmistuksen. PLM-järjestelmät tarjoavatkin keskitetyn alusta tuotetietojen hallintaan. He myös kertovat, että PLM-järjestelmien avulla yritykset voivat tehdä nopeampia sekä parempia päätöksiä koskien tuotantoa. Leino ja muut (2017, s. 1643) lisäävätkin, että PLM-järjestelmät tuovat yhteen ihmiset, prosessit ja informaation koko tuotteen elinkaarelta eli suunnittelusta aina jälkimarkkinointiin saakka.

4.3 Integraatoratkaisut ja teknologioiden yhteensopivuus

Ongelmaksi monien eri järjestelmien käytön jälkeen voi tulla se, että miten yritys saa eri järjestelmät keskustelemaan toistensa kanssa. Voidaankin pohtia, että ainoaksi kriteeriksi yritykset eivät voi jättää eri järjestelmille, että kuinka hyvin ne toimivat yksin vaan, kuinka hyvin järjestelmät keskustelevat toistensa kanssa.

Strandhagen ja muut (2018, s. 130–133) sanovatkin, että ETO-ympäristössä järjestelmien ja teknologioiden yhteensopivuus on kriittistä koska eri osaprosessit ovat riippuvaisia toisistaan. Integraation puute voi aiheuttaa viiveitä ja vaikeuttaa projektien hallintaa. He kertovatkin, että tietojärjestelmien integrointi mahdollistaa eri osastojen välisen yhteistyön mikä vähentää tuotannon aikatauluviiveitä sekä parantaa resurssien hallintaa. Esimerkiksi aiemmin mainitusta CAD-järjestelmästä he mainitsevat, että suunnitteluosaston CAD-järjestelmien kuuluisi aina integroida toiminnanohjausjärjestelmiin, jotta suunnittelussa tehdyt muutokset eivät aiheuttaisi viiveitä tuotannossa, vaan tieto olisi heti tuotannon saatavilla ja lisäkustannuksilta voitaisiin välttyä.

5 Prosessien hallinta ETO-ympäristössä

Prosessien hallinta on keskeinen osa ETO-ympäristön tehokkuuden ja kilpailukyvyyn varmistamista, sillä asiakaskohtaiset räätälöinnit, pitkät toimitusajat ja monitasoiset tuotantoprosessit luovat haasteita tuotannonohjaukselle. Tämä luku tarkastelee prosessien hallinnan keskeisiä osa-alueita ETO-tuotannossa, kuten suunnittelun ja toteutusprosessien ohjausta, kompleksisuuden hallintaa, tuotannon joustavuutta, läpimenoajan optimointia ja toimitusvarmuutta. Keskitymme erityisesti projektinhallintamenetelmiin, kuten kriittisen polun menetelmä (CPM) ja Kanban. Ne voivat tarjota tehokkaita keinoja tuotannon ja suunnittelun koordinointiin, kun taas modulaarinen suunnittelu ja Lean-ajattelu voivat auttaa vähentämään kompleksisuutta ja parantamaan prosessien virtaustehokkuutta. Luvussa käsitellään myös uusien teknologioiden, kuten Digital Twin -teknologian roolia prosessien ennakoitavuuden parantamisessa ja tuotannon optimoinnissa. Luvussa tarkastellaan lisäksi prosessien integrointia ja tehokasta tiedonkulkua eri osastojen välillä, joka on avainasemassa läpimenoaikojen lyhentämisessä ja toimitusvarmuuden parantamisessa.

5.1 Suunnittelu- ja toteutusprosessien ohjaus

ETO-tuotannossa korostuu suunnittelun ja tuotannon välinen koordinointi. Koska tuotteet ovat korkeasti räätälöityjä voi yritys tilata osan näistä komponenteista alihankintana. Alfnes ja muut (2015, s. 1007–1009) sanovatkin, että ETO-yritykset ovat yhä enemmän ulkoistaneet toimintaansa, vaikka ulkoistaminen tuo riskejä. Ulkoistamiseen on syynä muun muassa kustannuspaineet sekä teknologian kehittyminen eli muut osaavat tehdä tietyt asiat paremmin. He sanovatkin, että varsinkin kun yritys ulkoistaa toimintojaan, on koordinoinnin ja yhteistyön pitäminen erittäin tärkeää. Voidaankin päätellä, että myös yrityksiensä sisällä eri osastojen välinen yhteistyö on tärkeää, jotta tieto vaihtaa oikein omistajaa.

Suunnittelun ja toteutuksen hallinnassa keskeistä on myös projektinhallintamenetelmien tehokas hyödyntäminen. Luvussa 3.1 mainittu kriittisen polun menetelmä eli CPM on yksi hyvistä työkaluista. Heizer ja muut (2024, s. 101) sanovatkin, että CPM on kehitetty 1959-luvulla aikatauluttamaan sekä kontrolloimaan monimutkaisia projekteja. Kriittisen polun menetelmän avulla projekteista pystytään tunnistamaan ne kriittisimmät sekä ei kriittiset aktiviteetit. CPM tukena käytetään myös PERT-tekniikkaa eli Program Evaluation and Review Technique. Näitä yhdessä käyttämällä yritys pystyy varmistamaan projektin oikea aikaisen valmistumisen (Heizer ja muut, 2024, s. 101–103).

Yksi tehokas tapa parantaa tiedonkulkua osastojen välillä on Kanban-menetelmä. Heizer ja muut (2024, s. 691–693) kertovatkin, että Kanban-menetelmä on erityisesti käytössä yrityksissä, jotka käyttävät Pull-ohjausta. Kanban-taulujen avulla suunnitteluvaiheen eteneminen on läpinäkyvästi sidottu tuotantoresurssien saatavuuteen ja valmistuksen aikatauluihin. He sanovatkin, että tämä luo selkeän näkymän siitä, milloin suunnitteluvaihe on valmis ja milloin tuotanto voi edetä. Kanbanin avulla voidaan myös nopeasti tunnistaa mahdolliset pullonkaulat ja tehdä tarvittavat aikarajamuutokset suunnittelun edetessä, jolloin tuotannon aikataulut voidaan päivittää ilman merkittäviä häiriöitä.

Yksi tehokas tapa visualisoida tuotantoa ja siinä syntyviä riskejä on käyttää simulointityökaluja. Heizer ja muut (2024, s. 840–841) kertovatkin, että simulointityökalut ovat tänä päivänä usean eri johtajan käytössä niiden hyötyjen vuoksi. Simuloinnin avulla voidaan suunnitella vaihtoehtoisia reittejä tuotannolle, miettiä eri skenaarioita, että mitä jos näin tapahtuu mitä silloin tapahtuu tuotannolle. Simuloinnissa on myös Heizerin ja muiden (2024, s. 841) mukaan haittapuolia. Niitä on esimerkiksi hyvän simulointimallin hidaskäyttäminen, eivät ole suoraan verrannollisia oikean maailman tapahtumiin sekä syötöt eli inputit pitävät olla tarkkoja, jotta mallinnuksen tapahtumat ovat vertailukelpoisia.

Vaikka teknologioita sekä eri järjestelmiä on tarjolla paljon tänä päivänä, emme voi unohtaa vastuualueiden jakamisen tärkeyttä. Lehtonen (2004, s. 233–235) painottaakin suunnittelu- sekä määrittelyvaiheen tärkeyttä sekä siinä laadittavia vastuualueiden määrittämissä. Lehtonen (2004, s. 243) muistuttaa myös projektipäällikön tärkeydestä, että hän on loppu viimein se, joka on vastuussa projektin etenemisestä sekä sen onnistumisesta.

5.2 Kompleksisuuden hallinta ja joustavuus

ETO-tuotantoa voidaan kutsua kompleksiseksi, koska projektit ovat asiakaskohtaisesti räätälöityjä, niillä ovat pitkät toimitusajat sekä tuotantoprosessit ovat monitasoisia (Eppinger ja Ulrich, 2012, s. 21). He sanovatkin, että tällaisille tuotteille suunnitteluvaihe on kriittinen, eli voidaan todeta, että suunnittelussa pitää onnistua, jotta tuotantoprosessit onnistuvat myös.

Koska kompleksisuus johtuu nimenomaan asiakaskohtaisista vaatimuksista ja niistä syntyvistä eroista muihin projekteihin, voi yritys pienentää kompleksisuuden määrää modulaarisella suunnittelulla. Heizer ja muut (2024, s. 203) kertovatkin modulaarisesta suunnittelusta, että esimerkiksi Airbus, joka valmistaa lentokoneita käyttää monissa lentokoneissa samoja siipimoduuleja. He kertovat myös, että modulaarisuuden avulla asiakkaat voivat rakentaa itselleen räätälöityjä kokonaisuuksia valitsemalla ja yhdistämällä eri moduuleja, jotka muodostavat heidän toiveidensa mukaisen tuotteen. Betts ja muut (2009, s. 190) sanovatkin, että yritykset ovat parantaneet kannattavuuttaan, kun he ovat pienentäneet valikoimaansa varovaisesti.

Kompleksisen luonteen takia tuotannolta vaaditaan myös joustavuutta. Heizer ja muut (2024, s. 318) kertovatkin, että joustavuuden lisääminen tuotantoprosesseihin voi olla

yritykselle merkittävä kilpailuedun tuoja. Joustavuudella heidän mukaansa tarkoitetaan kykyä reagoida mahdollisimman nopeasti muutoksiin. Kuten on todettu, ETO-tuotannossa on tuotantoprosessit eivät ole vakioituja, joten joustavuudesta tuotannossa on varmasti hyötyä. Heizerin ja muiden (2024, s. 644) mukaan myös lyhyen aikavälin aikataulut on tärkeää, jos yritys pyrkii lisäämään joustavuutta. Heidän mukaansa lyhyen aikavälin suunnittelulla voidaan parantaa joustavuuden lisäksi myös läpimenoaikoja sekä toimitusvarmuutta, koska sillä parannetaan tavaroiden liikkumista tilanteiden sisällä sekä resurssien kokonaisvaltaista hyödyntämistä. Heizer ja muut (2024, s. 659) sanovatkin, että matalan volyymin ja korkean räätälöinnin piirissä on yleistynyt myös Finite Capacity Scheduling (FCS), joka on tietokonepohjainen lyhyen aikavälin suunnittelutyökalu. FCS tarjoaa reaaliaikaisen ja visuaalisen työkalun töiden seurantaan, johon voi tehdä muutoksia nopeasti, esimerkiksi äkillisissä muutostilanteissa resurssien uudelleenohjaaminen onnistuu FCS:n avulla, joten tuotannon joustavuus paranee.

Liu ja muut (2021, s. 2–6) tarjoavatkin mielenkiintoista teknologiaa kompleksisuuden hallintaan, jolla yritys voisi parantaa tuotannon ennakoitavuutta. He kertovatkin Digital Twin (DT) teknologiasta, jonka avulla yritys voisi hallita kompleksisuuttaan paremmin. DT rakentaa virtuaalisia maailmoja, jotka ovat verrannollisia fyysiseen tuotantoon. DT kerää reaaliaikaisesti dataa tuotantokoneista ja niiden ympäristöistä ja täten mahdollistaa suorituskyvyn analysoinnin. DT:n virtuaalisten mallien avulla on myös mahdollista ennustaa prosesseja ja täten varautua mahdollisiin ongelmatilanteisiin. DT hyödyntää tekoälyä ja täten voi tukea myös päätöksenteossa. Simulointimallien avulla voidaan myös optimoida eri liiketoiminta-alueita ja tällöin vähentää myös virheiden määrää. Koska teknologia on vielä uusi ja kehittymässä puuttuu tältä vielä tieteellistä arviointia ja tällöin teknologian luotettavuudesta emme voi olla varmoja ja täten kaikki positiiviset vaikutukset eivät ole varmistettuja.

5.3 Läpimenoajan optimointi ja toimitusvarmuus

ETO-ympäristön pitkät toimitusajat ovat yksi tuotannon haasteista projektien vaihtelevan luonteen vuoksi, on toimitusvarmuuden sekä läpimenoajan optimointi tärkeitä aloja kilpailukyvyn varmistamiseksi sekä asiakastyytyväisyyden takaamiseksi. Pysymällä toimitusajoissa yritykset säästävät myös myöhästymissakoilta. Engineer-to-Order (ETO) -tuotantomallin erityispiirteet, kuten asiakaskohtaiset räätälöinnit, pitkät toimitusajat ja monitasoiset tuotantoprosessit, tekevät tuotannonohjauksesta haasteellista. Koska eri osaprosessit riippuvat toisistaan, pienetkin viiveet tai resurssipuutteet voivat kasautua koko projektiin ja johtaa toimitusaikojen merkittävään pidentymiseen (Strandhagen ja muut, 2018, s. 128).

Läpimenoaikojen lyhentämiseksi ETO-ympäristössä voidaan hyödyntää erilaisia strategioita. Yksi keskeinen keino Strandhagenin ja muiden (2018, s. 129) mukaan on Lean-ajattelun soveltaminen, sillä se auttaa tunnistamaan ja poistamaan arvoa tuottamattomia vaiheita tuotantoprosessissa. Lean-menetelmien käyttöönotto vähentää tuotannon hukkaa ja nopeuttaa toimitusaikoja, koska se mahdollistaa paremman virtaustehokkuuden sekä resurssien optimoinnin.

Lean-ajattelun lisäksi Value Stream Mapping (VSM) on hyödyllinen työkalu ETO-prosessien arvovirran analysointiin ja hukan tunnistamiseen. Strandhagen ja muut (2018, s. 130) kertookin, että VSM auttaa yrityksiä keskittymään prosessien pullonkauloihin sekä niiden poistamiseen, mikä parantaa tuotantoprosessien tehokkuutta ja vähentää tarpeettomia viiveitä.

Läpimenoaikojen hallinnan parantamiseksi myös prosessien integraatio ja tehokas tiedonkulku ovat keskeisessä roolissa kuten luvussa 4.3 on todettu. ETO-ympäristössä tuotannon tehokkuutta voidaan parantaa integroimalla eri osastot, kuten myynti, suunnittelu, hankinta ja tuotanto, jotta tieto kulkee sujuvammin ja viiveitä voidaan vähentää (Strandhagen ja muut, 2018, s. 131–132).

Kuten aiemmin on myös todettu, modulaarinen suunnittelu voi helpottaa kompleksisuuden hallintaa, mutta Strandhagenin ja muiden (2018, s. 129–132) mukaan myös lyhentää läpimenoaikoja vähentämällä suunnitteluprosessin monimutkaisuutta ja edistämällä komponenttien uudelleenkäyttöä. Standardoimalla osia ja antamalla asiakkaille valittavaksi vain tiettyjä ennalta määriteltyjä ratkaisuja voidaan vähentää suunnittelutyön määrää ja parantaa tuotannon ennustettavuutta.

6 Yhteenveto

6.1 Keskeiset havainnot

Tämä tutkielma tarkasteli Engineer-to-Order (ETO) -ympäristön tuotannonohjausta ja sen erityispiirteitä. Tulokset osoittavat, että ETO-mallin suurimmat haasteet liittyvät asiakaskohtaisen suunnittelun ja tuotannon yhdistämiseen, toimitusketjun hallintaan sekä resurssien optimointiin. Koska tuotteet valmistetaan täysin tilausten perusteella ilman varastointia, jokainen projekti edellyttää tarkkaa aikataulutusta ja kapasiteetinhallintaa. Tämä tekee ETO-mallista huomattavasti joustavamman, mutta samalla herkemmän toimitusviiveille ja kustannusten hallinnan vaikeuksille.

Keskeisimmät tutkimustulokset voidaan tiivistää seuraavasti:

- ETO-tuotantomalli vaatii erityisiä tuotannonohjausmenetelmiä, koska tuotteet suunnitellaan ja valmistetaan yksilöllisesti, perinteiset massatuotannon ohjausstrategiat eivät sovellu sellaisenaan ETO-ympäristöön. Sen sijaan joustavat ja asiakaslähtöiset ratkaisut, kuten projektinhallintatyökalut ja kapasiteetinhallintajärjestelmät, ovat keskeisessä roolissa.
- Toimitusketjun hallinta on kriittinen menestystekijä, koska jokaisen tilauksen materiaalihankinnat ja komponentit on sovittava yksilöllisesti. Toimitusketjun häiriöt voivat aiheuttaa merkittäviä viivästyksiä tuotannossa. Luotettavat toimittajasuhteet ja ennakoiva hankintaprosessi ovat keskeisiä keinoja riskien hallintaan.
- Digitalisaation hyödyntäminen voi tehostaa tuotannonohjausta merkittävästi. ERP- ja PLM-järjestelmien avulla yritykset voivat hallita monimutkaisia tuotantoprosesseja, parantaa tiedonkulkua eri osastojen välillä ja optimoida resurssien käyttöä. Simulointityökalut, kuten Digital Twin -teknologia, voivat auttaa ennakoimaan tuotantoprosessien pullonkauloja ja parantamaan kokonaisvaltaista tehokkuutta.

- Lean- ja pull-ohjausmenetelmät voivat parantaa tuotannon suorituskykyä. ETO-ympäristössä materiaalivirtojen ja työvaiheiden hallinta on monimutkaista, mutta Lean-menetelmien avulla voidaan tunnistaa hukcatekijöitä ja lyhentää läpimenoaikoja.

Näiden havaintojen perusteella voidaan todeta, että ETO-yritysten on kiinnitettävä erityistä huomiota tuotannon suunnittelun ja resurssien hallinnan kehittämiseen. Erityisesti teknologian hyödyntäminen, toimitusketjun tehokas hallinta sekä joustavien tuotannonohjausmenetelmien käyttöönotto voivat parantaa yritysten kilpailukykyä ja asiakastytyvääisyyttä.

6.2 Kehittämiskohteet ja suositukset

Tulosten perusteella voidaan esittää seuraavanlaisia suosituksia ETO-yrityksille. Toimitusketjun hallinnan vahvistaminen. ETO-ympäristössä toimitusaikojen hallinta on kriittistä, ja siihen voidaan vaikuttaa kehittämällä ennakoivia hankintaprosesseja sekä vahvistamalla toimittajayhteistyötä. Tietojärjestelmien avulla voidaan myös parantaa toimitusketjun läpinäkyvyyttä ja vähentää viiveitä.

Resurssien hallinnan ja kapasiteetin optimointi. Koska ETO-yrityksillä on usein useita samanaikaisia projekteja, resurssien joustava allokointi on välttämätöntä. Kapasiteetinhallintatyökalut ja simulointimenetelmät voivat auttaa tasapainottamaan kuormitusta ja varmistamaan projektien sujuvan etenemisen.

Digitaalisten työkalujen laajempi hyödyntäminen. ERP- ja PLM-järjestelmät voivat tehostaa tiedonkulkua ja vähentää tuotannon suunnittelun epävarmuustekijöitä. Lisäksi Digital Twin-teknologian tai muiden simulaatiomallien hyödyntäminen voi auttaa tunnistamaan mahdollisia pullonkauloja jo ennen niiden muodostumista kriittisiksi ongelmiksi.

Lean- ja pull-ohjausmenetelmien soveltaminen. Perinteiset työntöohjaukseen perustuvat tuotannonohjausmallit eivät sovellu hyvin ETO-ympäristöön, mutta imuohjaus eli pull-ohjaus voi parantaa tuotannon joustavuutta ja vähentää keskeneräisten töiden määrää. Lisäksi Lean-ajattelun avulla voidaan tunnistaa sekä poistaa arvoa tuottamattomia työvaiheita.

Modulaarisuuden hyödyntäminen suunnittelussa. Vaikka ETO-mallin lähtökohtana on asiakaskohtainen räätälöinti, modulaarinen suunnittelu voi tarjota mahdollisuuden standardoida tiettyjä komponentteja ja lyhentää näin suunnittelu- ja tuotantoaikoja. Tämä voi auttaa yrityksiä saavuttamaan paremman kustannustehokkuuden ilman, että asiakaskohtainen joustavuus kärsii merkittävästi.

Näiden suositusten avulla ETO-yritykset voivat parantaa tuotantonsa tehokkuutta, vähentää toimitusviiveitä ja lisätä asiakastyytyväisyyttä.

6.3 Jatkotutkimusaiheet

Tämän tutkimuksen tulokset nostavat esiin useita jatkotutkimuksen kannalta mahdollisia aiheita. Tekoälyn ja koneoppimisen mahdollisuudet ETO-tuotannon optimoinnissa. Koska ETO-ympäristö on monimutkainen ja sisältää paljon muuttujia, koneoppimismallit voisivat auttaa optimoimaan resurssien käyttöä ja ennustamaan mahdollisia viiveitä ennakoivasti. Esimerkiksi, jatkossa voitaisiin tutkia miten tekoälyn ja koneoppimismallien avulla voitaisiin analysoida tuotannon aiempaa dataa ja ennustaa mahdollisia pullonkauloja.

Modulaarisen suunnittelun ja massaräätälöinnin yhdistäminen. Yksi ETO-yritysten keskeisistä haasteista on tasapainon löytäminen asiakaskohtaisen räätälöinnin ja kustannustehokkuuden välillä. Jatkotutkimus voisi selvittää, missä määrin modulaarisia

komponentteja voitaisiin hyödyntää ilman, että ETO-tuotteiden asiakaskohtaisuus kärsii liikaa.

Digital Twin -teknologian vaikutukset tuotannon ennakoitavuuteen ja tehokkuuteen. Koska Digital Twin -teknologia on vasta kehittymässä, sen hyödyntämismahdollisuuksia ETO-ympäristössä ei ole vielä juurikaan tutkittu. Jatkotutkimuksessa voitaisiin selvittää, miten digitaalinen kaksosmallinnus voisi auttaa yrityksiä hallitsemaan monimutkaisia tuotantoprosesseja ja parantamaan päätöksenteon laatua.

ETO-tuotannon ja kestävä kehityksen yhdistäminen. Koska ETO-tuotannossa komponentit ja materiaalit hankitaan usein projektikohtaisesti, tämä voi lisätä ympäristövaikutuksia esimerkiksi kuljetusten ja energiatehokkuuden osalta. Jatkotutkimuksessa voitaisiin tarkastella, miten ETO-yritykset voisivat huomioida kestävä kehityksen periaatteiden toteutumista tuotannossaan.

Näiden jatkotutkimusaiheiden avulla voidaan edelleen kehittää ETO-ympäristön tuotannonohjausta ja löytää uusia ratkaisuja tehokkuuden ja joustavuuden parantamiseen.

Lähteet

- Addo-Tenkorang, R., Eyob, E. (2013). *Engineer-to-Order*. In Information Resources Management Association (Ed.), *Industrial Engineering* (pp. 1780–1796). IGI Global. Noudettu 27.2.2025 osoitteesta https://www.researchgate.net/publication/344994518_Engineer-to-Order
- Adrodegari, F., Bacchetti, A., Pinto, R., Pirola, F., & Zanardini, M. (2015). Engineer-to-order (ETO) production planning and control: An empirical framework for machinery-building companies. *Production Planning & Control*, 26(11), 910–932. Noudettu 5.3.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1080/09537287.2014.1001808>
- Aktas, E., Bourlakis, M., Minis, I., & Zeimpekis, V. (2021). *Supply Chain 4.0: Improving supply chains with analytics and Industry 4.0 technologies*. Kogan Page.
- AlMuhayfith, S., & Shaiti, H. (2020). The Impact of Enterprise Resource Planning on Business Performance: With the Discussion on Its Relationship with Open Innovation. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 6(3), 87. Noudettu 7.3.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.3390/joitmc6030087>
- Blanchard, D. (2010). *Supply chain management best practices* (2nd ed). John Wiley & Sons. Noudettu 12.3.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1002/9781119202912>
- Cannas, V. G., Pero, M., Pozzi, R., & Rossi, T. (2018). An empirical application of lean management techniques to support ETO design and production planning. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 134–139. Noudettu 4.3.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.247>
- Cannas, V. G., & Gosling, J. (2021). A decade of engineering-to-order (2010–2020): Progress and emerging themes. *International Journal of Production Economics*, 241, 108274. Noudettu 5.3.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108274>
- Chen, C. S. (2006). Concurrent engineer-to-order operation in the manufacturing engineering contracting industries. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 1(1/2), 37. Noudettu 27.2.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1504/IJISE.2006.009049>

- Dallasega, P., Rauch, E., & Matt, D. T. (2015). Sustainability in the Supply Chain through Synchronization of Demand and Supply in ETO-Companies. *Procedia CIRP*, 29, 215–220. Noudettu 27.2.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.057>
- Gejo García, J., Gallego-García, S., & García-García, M. (2019). Development of a Pull Production Control Method for ETO Companies and Simulation for the Metallurgical Industry. *Applied Sciences*, 10(1), 274. Noudettu 4.3.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.3390/app10010274>
- Gosling, J., & Naim, M. M. (2009). Engineer-to-order supply chain management: A literature review and research agenda. *International Journal of Production Economics*, 122(2), 741–754. Noudettu 4.2.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.07.002>
- Heizer, J. H., Render, B., & Munson, C. (2024). *Operations management: Sustainability and supply chain management* (Fourteenth edition, global edition). Pearson.
- Hicks, C., McGovern, T., & Earl, C. F. (2000). Supply chain management: A strategic issue in engineer to order manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 65(2), 179–190. Noudettu 4.2.2025 osoitteesta [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(99\)00026-2](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(99)00026-2)
- Jing, Z., Hu, N., Song, Y., Song, B., Gu, C., & Pan, L. (2022). On the Design and Implementation of a Blockchain-Based Data Management System for ETO Manufacturing. *Applied Sciences*, 12(18), 9184. Noudettu 10.3.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.3390/app12189184>
- Krajewski, L. J., Malhotra, M. K., & Ritzman, L. P. (2019). *Operations Management: Processes and supply chains* (Twelfth Edition, Global Edition). Pearson Education Limited.
- Lehtonen, J. (2004). Tuotantotalous. WSOY.
- Mathew, N. T., & Johansson, B. (2023). Production Planning and Scheduling Challenges in the Engineer-to-Order Manufacturing Segment—A Literature Study. *International Journal of Innovation, Management and Technology*, 14(3), 80–87. Noudettu 5.3.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.18178/ijimt.2023.14.3.942>

- Mello, M. H., Strandhagen, J. O., & Alfnes, E. (2015). Analyzing the factors affecting coordination in engineer-to-order supply chain. *International Journal of Operations & Production Management*, 35(7), 1005–1031. Noudettu 11.3.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1108/IJOPM-12-2013-0545>
- Pulkkinen, A., Leino, S.-P., & Papinniemi, J. (2017). Transforming ETO Businesses with Enhanced PLM Capabilities. *Procedia Manufacturing*, 11, 1642–1650. Noudettu 10.3.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.315>
- Saeed, M., Loya, S., & Loya, A. (2016). A Review on Strategic Positioning of Bottleneck around the Customer Order Decoupling Point and Issues on Production Planning in Supply Chain. *Journal for Manufacturing Science and Production*, 16(4), 243–254. Noudettu 27.2.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1515/jmsp-2016-0020>
- Slack, N., Chambers, S., Johnston, R., & Betts, A. (Toim.). (20). *Operations and process management: Principles and practice for strategic impact* (2. ed., [Nachdr.]). Prentice Hall Financial Times.
- Slack, N., & Lewis, M. (with Pearson Education, Inc & Pearson (Firm)). (2020). *Operations strategy* (Sixth Edition). Pearson.
- Strandhagen, J. W., Vallandingham, L. R., Alfnes, E., & Strandhagen, J. O. (2018). Operationalizing lean principles for lead time reduction in engineer-to-order (ETO) operations: A case study. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 128–133. Noudettu 12.3.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.246>
- Sun, K., Li, Y., & Roy, U. (2017). A PLM-based data analytics approach for improving product development lead time in an engineer-to-order manufacturing firm. *MATHEMATICAL MODELLING OF ENGINEERING PROBLEMS*, 4(2), 69–74. Noudettu 10.3.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.18280/mmep.040201>
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2012). *Product design and development* (5. ed., internat. ed). McGraw-Hill.
- Wang, Y., Wang, X., Tao, F., & Liu, A. (2021). Digital twin-driven complexity management in intelligent manufacturing. *Digital Twin*, 1, 9. Noudettu 12.3.2025 osoitteesta <https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17489.1>

Weele, A. J. van. (2018). *Purchasing and supply chain management* (Seventh edition).
Cengage Learning EMEA.