

**SKRIPSI**

**PENJADWALAN PRODUKSI *FLOWSHOP* DENGAN METODE  
*CAMPBELL, DUDEK, & SMITH (CDS), PALMER, DAN DANNENBRING*  
DALAM MEMINIMALKAN TOTAL WAKTU PRODUKSI (*MAKESPAN*)  
STUDI KASUS (PT. Naturindo Fresh Kulon Progo)**

Diajukan kepada Fakultas Sains dan Teknologi

Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta

Untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.)



Disusun oleh :

Nama Lengkap : Taufik Alfuad

NIM : 19106060035

**PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI  
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA  
YOGYAKARTA**

**2023**

# LEMBARAN PENGESAHAN



KEMENTERIAN AGAMA  
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA  
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

## PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-1429/Un.02/DST/PP.00.9/06/2023

Tugas Akhir dengan judul : Penjadwalan Produksi Flowshop dengan Metode Campbell, Dudek, & Smith (CDS), Palmer, dan Dannenbring dalam Meminimalkan Total Waktu Produksi (Makespan) Studi Kasus (PT. Naturindo Fresh Kulon Progo).

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : TAUFIK ALFUAD  
Nomor Induk Mahasiswa : 19106060035  
Telah diujikan pada : Selasa, 30 Mei 2023  
Nilai ujian Tugas Akhir : A

dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

### TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang

Ir. Khusna Dwijayanti, ST., M.Eng., Ph.D, ASEAN Eng.  
SIGNED

Valid ID: 647d8da27f626



Penguji I

Ir. Dwi Agustina Kurniawati,  
S.T.,M.Eng.,Ph.D, IPM, ASEAN Eng  
SIGNED

Valid ID: 647eb6d8b936e



Penguji II

Ir. Arya Wirabhuana, S.T. M.Sc, IPM,  
ASEAN Eng.  
SIGNED

Valid ID: 648095bd2be41



Yogyakarta, 30 Mei 2023  
UIN Sunan Kalijaga  
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi  
Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si.  
SIGNED

Valid ID: 64828cbfd83d5

## SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI

### SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Surat Persetujuan Skripsi/Tugas Akhir

Lamp : -

Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

UIN Sunan Kalijaga

Di Yogyakarta

*Assalamu 'alaikum wr. wb.*

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi saudara:

Nama : Taufik Alfuad

NIM : 19106060035


Judul Skripsi : Penjadwalan *Flowshop* Dengan Metode *Campbell, Dudek, & Smith (CDS)* *Palmer*, dan *Dannenbring* Dalam Meminimalkan Total Waktu Produksi (*Makespan*) Studi Kasus (PT. Naturindo Fresh Kulon Progo)

Sudah dapat diajukan kembali kepada Program Studi Teknik Industri Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam Program Studi Teknik Industri.

Dengan ini kami mengharapkan agar skripsi/tugas akhir saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqosyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

*Wassalamu 'alaikum wr. wb.*

Yogyakarta, 19 Mei 2023  
Dosen Pembimbing Skripsi,

  
**Ir. Khusna Dwijayanti, ST., M.Eng., Ph.D., ASEAN**  
NIP. 19851212 201903 2 018

## SURAT KEASLIAN SKRIPSI

### SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Taufik Alfuad

NIM : 19106060035

Program Studi : Teknik Industri

Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya bahwa skripsi saya yang berjudul: Penjadwalan Produksi *Flowshop* Dengan Metode *Campbell, Dudek & Smith, Palmer*, dan *Dannenbring* Dalam Meminimalkan Total Waktu Produksi (*Makespan*) Studi Kasus (PT. Naturindo Fresh Kulon Progo) adalah asli dari penelitian saya sendiri dan bukan plagiasi hasil karya orang lain, kecuali bagian tertentu yang saya ambil sebagai bahan acuan. Apabila terbukti pernyataan ini tidak benar, sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya.

Yogyakarta, 20 Mei 2023

Yang menyatakan



Taufik Alfuad  
NIM.19106060035

STATE ISLAMIC UNIVERSITY  
SUNAN KALIJAGA  
YOGYAKARTA

## MOTTO

“Tidak perlu drama, realistis saja”

“Balas dendam terbaik adalah menjadikan dirimu lebih baik dari hari kemarin”

“Jangan menganggap dirimu lemah, padahal kamu orang paling tinggi derajatnya  
jika kamu beriman”

(QS. Ali Imran: 139)



STATE ISLAMIC UNIVERSITY  
SUNAN KALIJAGA  
YOGYAKARTA

## HALAMAN PERSEMBAHAN

Hasil karya ini saya dedikasikan untuk:

Bibi saya yang saya cintai dan sayangi sebagai prestasi awal yang bisa saya berikan,

Marhani Sanusi

Kedua orang tua saya yang saya cintai dan sayangi,

Muchlish Abubakar

Sitti Rahim

Kakak saya yang saya banggakan,

Muhammad Vijay

Adik saya yang saya sayangi,

Najwa Bahrhani

STATE ISLAMIC UNIVERSITY  
SUNAN KALIJAGA  
YOGYAKARTA

## KATA PENGANTAR

Puji syukur dipanjatkan ke hadirat Allah SWT., atas segala rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi ini dengan judul "Penjadwalan Produksi *Flowshop* Dengan Metode *Campbell, Dudek, & Smith, Palmer*, dan *Dannenbring* Dalam Meminimalkan Total Waktu Produksi (*Makespan*) Studi Kasus (PT. Naturindo Fresh Kulon Progo)" dengan baik dan tepat waktu.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana (S1) pada Program Studi Teknik Industri di Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga. Skripsi ini merupakan hasil penelitian yang dilakukan oleh penulis dengan tujuan untuk memperdalam pemahaman dan kontribusi penulis dalam bidang Penjadwalan Produksi (*Job Scheduling*)

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik, saran, dan masukan yang membangun dari para pembaca yang dapat digunakan sebagai acuan peningkatan kualitas penelitian di masa mendatang.

Akhir kata, penulis berharap bahwa skripsi ini dapat memberikan kontribusi yang bermanfaat dan menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya dalam bidang yang sama. Semoga penulisan skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi penulis dan pembaca.

Yogyakarta, 20 Mei 2023



Taufik Alfud  
NIM.19106060035

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan, bantuan, dan sumbangsih dalam penyelesaian skripsi ini. Untuk itu ucapan terima kasih dihaturkan kepada:

1. Kepada kedua orang tua dan keluarga yang selalu memberikan dukungan, mendoakan, serta memperjuangkan anak-anaknya sampai detik ini.
2. Kepada Ibu Ir. Khusna Dwijayanti, ST., M.Eng., Ph.D, ASEAN selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan masukan yang berharga sepanjang penyusunan skripsi ini.
3. Kepada Dosen-dosen Teknik Industri yang telah memberikan ilmu dan pelajaran serta teladan yang baik
4. Kepada Ibu Duana Chandra Dewi yang telah memberikan kesempatan kepada saya untuk melaksanakan penelitian di PT. Naturindo Fresh Kulon Progo.
5. Kepada “Teteh Lilis” yang telah membantu saya dalam pengambilan data di lapangan.
6. Kepada seluruh pekerja PT. Naturindo Fresh Kulon Progo yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu yang juga turut membantu dalam pelaksanaan penelitian tugas akhir ini.
7. Kepada teman-teman Teknik Industri 2019 yang selalu memberikan dukungan, semangat, serta motivasi dan inspirasi.
8. Kepada keluarga besar Teknik Industri UIN Sunan Kalijaga yang selalu memberikan keceriaan.
9. Kepada teman-teman kos Inomi yang selalu menemani di saat suka maupun duka.



Akhir kata, saya menyadari bahwa daftar ini tidak lengkap tanpa menyebutkan semua pihak yang telah membantu dan mendukung saya. Terima kasih kepada semua pihak yang telah berperan dalam penyelesaian skripsi ini, meskipun tidak disebutkan satu per satu.

Semoga penulisan skripsi ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi bagi perkembangan ilmu pengetahuan. Sekali lagi, saya mengucapkan terima kasih yang tak terhingga kepada semua pihak yang telah membantu saya.

Yogyakarta, 20 Mei 2023

Penulis



**Taufik Alfud**



STATE ISLAMIC UNIVERSITY  
**SUNAN KALIJAGA**  
YOGYAKARTA

## DAFTAR ISI

LEMBARAN PENGESAHAN.....	i
SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI.....	ii
SURAT KEASLIAN SKRIPSI .....	iii
MOTTO.....	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN .....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
UCAPAN TERIMA KASIH .....	vii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR .....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN .....	xv
ABSTRAK .....	xvi
<i>ABSTRACT</i> .....	xvii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Batasan Penelitian .....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	8
2.1 Penelitian Terdahulu .....	8
2.2 Landasan Teori Penjadwalan .....	15
2.2.1 Pengertian Penjadwalan .....	15

2.2.2	Tujuan Penjadwalan .....	16
2.2.3	Istilah dalam Penjadwalan Produksi .....	16
2.2.4	Elemen dalam Penjadwalan Produksi .....	18
2.2.5	Jenis-jenis Penjadwalan .....	19
2.3	Pengukuran Waktu.....	21
2.3.1	Pengukuran Waktu Rata-Rata .....	21
2.3.2	Pengukuran Waktu Standar (Waktu Baku).....	24
2.4	Algoritma <i>Campbell, Dudek, &amp; Smith</i> (CDS).....	25
2.5	Metode <i>Palmer</i> .....	26
2.6	Metode <i>Dannenbring</i> .....	27
BAB III METODE PENELITIAN.....		29
3.1	Objek Penelitian .....	29
3.2	Jenis Data .....	30
3.3	Metode Pengumpulan Data .....	31
3.4	Validitas .....	33
3.5	Variabel Penelitian.....	33
3.6	Model Analisis.....	33
3.7	Diagram Alir Penelitian.....	35
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....		37
4.1	Gambaran Umum Perusahaan .....	37
4.2	Visi dan Misi Perusahaan .....	38
4.3	Struktur Organisasi Perusahaan.....	39
4.4	Proses Produksi Perusahaan .....	39
4.5	Instrumen Penelitian.....	43
4.6	Penetapan Waktu Standar .....	43
4.6.1	Menentukan Waktu Terpilih.....	43

4.6.2	Menentukan Waktu Normal .....	45
4.6.3	Menentukan <i>Allowance</i> .....	47
4.6.4	Menentukan Waktu Standar .....	48
4.7	Pengolahan Data .....	52
4.7.1	Perhitungan <i>Makespan</i> Menggunakan Penjadwalan Aktual Perusahaan .....	52
4.7.2	Perhitungan <i>Makespan</i> Menggunakan Metode <i>Campbell, Dudek, &amp; Smith</i> .....	60
4.7.3	Perhitungan <i>Makespan</i> Menggunakan Metode <i>Palmer</i> .....	75
4.7.4	Perhitungan <i>Makespan</i> Menggunakan Metode <i>Dannenbring</i> .....	84
4.8	Analisis dan Pembahasan .....	95
4.8.1	Penjadwalan Aktual Perusahaan .....	95
4.8.2	Penjadwalan <i>Flowshop</i> Menggunakan Metode <i>Campbell, Dudek, &amp; Smith</i> .....	96
4.8.3	Penjadwalan <i>Flowshop</i> Menggunakan Metode <i>Palmer</i> .....	97
4.8.4	Penjadwalan <i>Flowshop</i> Menggunakan Metode <i>Dannenbring</i> .....	97
4.8.5	Rekapan Penjadwalan pada Setiap Metode.....	98
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		100
5.1	Kesimpulan.....	100
5.2	Saran .....	103
DAFTAR PUSTAKA .....		105

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian terdahulu.....	8
Tabel 2.2 Contoh proses <i>flowshop</i> .....	20
Tabel 2.3 <i>Performance rating</i> berdasarkan sistem <i>Westinghouse</i> .....	23
Tabel 3.1 Data Produk yang diproduksi pada divisi produksi .....	30
Tabel 4.1 Waktu Terpilih .....	44
Tabel 4.2 Lambang pemberian <i>Rating Factor</i> .....	45
Tabel 4.3 Pemberian nilai <i>Rating Factor</i> .....	45
Tabel 4.4 <i>Allowance</i> yang diberikan .....	48
Tabel 4.5 Waktu Standar .....	51
Tabel 4.6 Perhitungan <i>makespan</i> pada mesin 1 - 4 penjadwalan Aktual Perusahaan.....	57
Tabel 4.7 Perhitungan <i>makespan</i> pada mesin 5 - 7 penjadwalan Aktual Perusahaan.....	58
Tabel 4.8 Perhitungan iterasi K1 - K3.....	63
Tabel 4.9 Perhitungan iterasi K4 - K6.....	64
Tabel 4.10 Urutan <i>Job</i> hasil Iterasi Metode <i>Campbell, Dudek &amp; Smith</i> .....	66
Tabel 4.11 Deret Urutan <i>Job</i> dengan Waktu yang Sama.....	66
Tabel 4.12 Perbedaan urutan <i>job</i> yang dihasilkan oleh iterasi $K = 3$ dan <i>WINQSB</i> .....	69
Tabel 4.13 Perhitungan <i>makespan</i> pada mesin 1 - 4 metode CDS.....	71
Tabel 4.14 Perhitungan <i>makespan</i> pada mesin 5 - 7 metode CDS.....	72
Tabel 4.15 Hasil rekapan perhitungan <i>Slope index</i> metode <i>Palmer</i> .....	76
Tabel 4.16 Pengurutan <i>Job</i> Berdasarkan <i>Slope index</i> metode <i>Palmer</i> .....	78
Tabel 4.17 Perhitungan <i>makespan</i> pada mesin 1 - 4 metode <i>Palmer</i> .....	80
Tabel 4.18 Perhitungan <i>makespan</i> pada mesin 5 - 7 metode <i>Palmer</i> .....	81
Tabel 4.19 Rekapan Perhitungan Waktu Mesin Pertama ( $Pi1$ ) Metode <i>Dannenbring</i> .....	86
Tabel 4.20 Rekapan Perhitungan Waktu Mesin Pertama ( $Pi2$ ) Metode <i>Dannenbring</i> .....	87

Tabel 4.21 Rekapitan Hasil Perhitungan Mesin Pertama ( <i>Pi1</i> ) dan Mesin Kedua ( <i>Pi2</i> ).....	88
Tabel 4.22 Perhitungan <i>makespan</i> pada mesin 1 - 4 metode <i>Dannenbring</i> .....	91
Tabel 4.23 Perhitungan <i>makespan</i> pada mesin 5 - 7 metode <i>Dannenbring</i> .....	92
Tabel 4.24 Urutan <i>job</i> serta nilai <i>makespan</i> yang dihasilkan setiap metode.....	98
Tabel 5.1 Urutan <i>Job</i> serta <i>Makespan</i> yang dihasilkan.....	102



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 <i>Pure Flowshop</i> .....	20
Gambar 2.2 <i>General Flowshop</i> .....	20
Gambar 2.3 <i>Job shop</i> .....	21
Gambar 3.1 Logo PT. Naturindo Fresh .....	29
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian.....	35
Gambar 4.1 Struktur organisasi PT. Naturindo Fresh Kulon Progo.....	39
Gambar 4.2 Alur proses produksi <i>flowshop</i> divisi produksi PT. Naturindo Fresh Kulon Progo.....	41
Gambar 4.3 Pengurutan <i>job</i> menggunakan <i>WINQSB</i> pada metode CDS .....	68
Gambar 4.4 Hasil perhitungan <i>makespan</i> metode CDS.....	74
Gambar 4.5 Pengurutan <i>job</i> menggunakan <i>WINQSB</i> pada metode <i>Palmer</i> .....	79
Gambar 4. 6 Hasil perhitungan <i>makespan</i> metode <i>Palmer</i> .....	83
Gambar 4. 7 Pengurutan <i>job</i> menggunakan <i>WINQSB</i> pada metode <i>Dannenbring</i> .....	89
Gambar 4.8 Hasil perhitungan <i>makespan</i> menggunakan <i>WINQSB</i> metode <i>Dannenbring</i> .....	94

## DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1: VALIDITAS DATA .....	1
LAMPIRAN 2: PENGOLAHAN DATA .....	2
2.1 Perhitungan Waktu Normal .....	2
2.2 Perhitungan Waktu Standar .....	41
2.3 Perhitungan makespan pada penjadwalan Aktual Perusahaan .....	81
2.4 Pengolahan data menggunakan <i>WINQSB</i> pada metode CDS .....	92
2.5 Pengolahan data menggunakan <i>WINQSB</i> pada metode <i>Palmer</i> .....	97
2.6 Pengolahan data menggunakan <i>WINQSB</i> pada metode <i>Dannenbring</i> .....	102
2.7 <i>Gantt Chart</i> Metode <i>Campbell, Dudek, &amp; Smith</i> (CDS) .....	107
2.8 <i>Gantt Chart</i> Metode <i>Palmer</i> .....	109
2.9 <i>Gantt Chart</i> Metode <i>Dannenbring</i> .....	111



**PENJADWALAN PRODUKSI *FLOWSHOP* DENGAN METODE  
*CAMPBELL, DUDEK, & SMITH (CDS), PALMER, DAN DANNENBRING*  
DALAM MEMINIMALKAN TOTAL WAKTU PRODUKSI  
(*MAKESPAN*)**

**STUDI KASUS (PT. Naturindo Fresh Kulon Progo)**

**Taufik Alfuad**

**19106060035**

Program Studi Teknik Industri Fakultas Sains dan Teknologi

Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga

---

**ABSTRAK**

PT. Naturindo Fresh merupakan perusahaan yang memproduksi dan mendistribusikan obat-obatan herbal asli Indonesia yang berfokus pada bidang kesehatan. Penjadwalan produksi yang dilakukan memperhatikan stok produk pada *inventory* dan jumlah *order* dari konsumen. Penjadwalan produksi pada perusahaan ini belum memiliki penjadwalan yang pasti. Penjadwalan produksi tersebut hanya berupa jenis produk apa saja yang akan di produksi dalam waktu 1 bulan tetapi dalam pengerjaannya, karyawan bebas memilih produk apa saja yang akan terlebih dahulu di produksi (*random*). Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan urutan *job* serta *makespan* yang dihasilkan berdasarkan metode yang digunakan. Metode penelitian pada penelitian ini dilakukan dengan cara observasi, wawancara, dokumentasi, dan studi pustaka. Penjadwalan aktual perusahaan menghasilkan *makespan* sebesar 30.725,08 menit. Pada metode *Campbell, Dudek, & Smith (CDS)* menghasilkan *makespan* sebesar 30.634,18 menit dengan urutan *job* 7 – 10 – 1 – 20 – 21 – 24 – 23 – 5 – 18 – 19 – 4 – 8 – 9 – 3 – 25 – 16 – 17 – 22 – 15 – 12 – 13 – 26 – 14 – 2 – 11 – 6. Metode *Palmer* menghasilkan *makespan* sebesar 30.743,75 menit dengan urutan *job* 5 – 19 – 24 – 4 – 18 – 15 – 16 – 23 – 9 – 20 – 7 – 17 – 10 – 8 – 22 – 21 – 3 – 1 – 25 – 26 – 12 – 13 – 14 – 2 – 11 – 6. Metode *Dannenbring* juga *makespan* sebesar 30.743,75 menit dengan urutan *job* 5 – 19 – 15 – 4 – 18 – 16 – 24 – 9 – 17 – 23 – 20 – 22 – 8 – 12 – 7 – 10 – 3 – 21 – 1 – 13 – 25 – 26 – 14 – 11 – 2 – 6. Sehingga dengan hasil tersebut metode CDS memiliki *makespan* terkecil yang dapat menjadi rekomendasi untuk diterapkan pada penjadwalan PT. Naturindo Fresh Kulon Progo.

**Kata Kunci:** *Makespan*, penjadwalan, urutan *job*, *Campbell, Dudek, & Smith (CDS), Palmer, Dannenbring*

**FLOWSHOP PRODUCTION SCHEDULING BY USING THE  
CAMPBELL, DUDEK, SMITH (CDS), PALMER, AND DANNENBRING  
METHOD TO MINIMIZING THE TOTAL PRODUCTION TIME  
(MAKESPAN)**

**STUDY CASE (PT. Naturindo Fresh Kulon Progo)**

**Taufik Alfuad**

**19106060035**

*Departement of Industrial Engineering Faculty of Science and Technology  
State Islamic University Sunan Kalijaga*

---

**ABSTRACT**

*PT. Naturindo Fresh is a company that produces and distributes original Indonesian herbal medicines with a focus on the health sector. Production scheduling is carried out by taking into account product stock in inventory and the number of orders from consumers. Production scheduling at this company does not yet have a definite schedule. The production schedule is only in the form of what types of products will be produced within 1 month but in the process, employees are free to choose which products will be produced first (random). The purpose of this research is to determine the job order and make the resulting pan based on the method used. The research method in this study was carried out using observation, interviews, documentation, and literature study. The company's actual scheduling produces a makeup of 30,725.08 minutes. The Campbell, Dudek, & Smith (CDS) method produces a makespan of 30,634.18 minutes with job order 7 – 10 – 1 – 20 – 21 – 24 – 23 – 5 – 18 – 19 – 4 – 8 – 9 – 3 – 25 – 16 – 17 – 22 – 15 – 12 – 13 – 26 – 14 – 2 – 11 – 6. Palmer's method produces a makeup of 30,743.75 minutes with job order 5 – 19 – 24 – 4 – 18 – 15 – 16 – 23 – 9 – 20 – 7 – 17 – 10 – 8 – 22 – 21 – 3 – 1 – 25 – 26 – 12 – 13 – 14 – 2 – 11 – 6. The Dannenbring method also makes a pan of 30,743.75 minutes with job order 5 – 19 – 15 – 4 – 18 – 16 – 24 – 9 – 17 – 23 – 20 – 22 – 8 – 12 – 7 – 10 – 3 – 21 – 1 – 13 – 25 – 26 – 14 – 11 – 2 – 6 So that with the results of this method CDS has the smallest makespan which can be a recommendation to be applied to scheduling PT. Naturindo Fresh Kulon Progo.*

**Keyword:** *Makespan, schedule, job order, Campbell, Dudek, & Smith (CDS), Palmer, Dannenbring*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

Semakin maju dan berkembangnya suatu zaman pastinya akan diiringi juga dengan perkembangan industri yang maju pula. Oleh karena itu, riset operasional akan banyak diterapkan di berbagai macam bidang keilmuan. Perusahaan wajib mempunyai strategi dan rencana yang tepat supaya dapat bersaing dengan pesaingnya. Strategi yang dilakukan bisa berupa mutu produk jadi atau melakukan penjadwalan yang tepat dalam memenuhi pesanan konsumen. Dalam memenuhi pesanan konsumen, sering terjadi antrean panjang akibat penerapan pekerjaan yang tidak tepat yang menyebabkan pekerjaan menumpuk begitu banyak sehingga perusahaan tersebut tidak dapat menerima pesanan baru. Untuk menghindari penumpukan antrean pada proses produksi, maka dari itu, diperlukan suatu metode atau sistem yang bisa meminimalkan *makespan* atau total waktu produksi. Sistem produksi yang digunakan dalam menjadwalkan produksi ialah *flowshop*. (Aritonang et al., 2015).

Penjadwalan merupakan pengurutan pengerjaan produk yang mencakup seluruh aspek yang proses pada beberapa mesin. Setiap perusahaan akan berusaha agar memenuhi permintaan *costumer* supaya memenuhi kepuasannya. Hal yang dilakukan perusahaan bertujuan untuk meningkatkan produktivitas dengan waktu dan total biaya seminimal mungkin dengan cara merancang penjadwalan produksi yang efektif dan efisien (Ginting, 2009).

Menurut (Baker & Trietsch, 2019), penjadwalan *flowshop* merupakan pergerakan suatu unit secara berentetan melewati serangkaian stasiun kerja yang

disusun berdasarkan produk. Perancangan proses produksi seperti *flowshop* dapat digunakan secara efektif pada produk dengan desain yang normal dan di produksi dalam jumlah besar sehingga investasi yang dialokasikan secepat mungkin. Terdapat beberapa metode untuk menjadwalkan produksi *flowshop* yang bertujuan untuk meminimalkan waktu dalam penyelesaian pekerjaan (*makespan*), di antaranya metode *Campbell, Dudek, & Smith* (CDS) yang menggunakan *Johnson Rule*, metode *Palmer*, dan metode *Dannenbring*.

Penelitian yang dilakukan Aritonang (2015) untuk perhitungan metode CDS ini diawali dengan penyusunan daftar waktu proses *job i* pada mesin ke *j*. ketika menentukan iterasi, dilakukan oleh jumlah urutan penjadwalan (*p*) dengan rumus  $p = m - 1$ . Penjadwalan tersebut bisa diawali dengan urutan yang dimulai dari iterasi 1 sampai dengan aturan  $k = m - 1$ . Tahap berikutnya adalah penentuan waktu proses mesin pertama dan waktu proses mesin terakhir. Tujuannya ialah untuk menghitung waktu proses minimal dengan *Johnson Rule* *job 2* grup mesin pertama. Tahap berikutnya ialah mengurutkan *job* yang diproses. Tahap terakhirnya ialah menentukan total waktu penyelesaian minimal. Selanjutnya metode *Palmer* atau model *heuristic slope index* yaitu penjadwalan yang disusun berdasarkan *slope index* yang diurutkan secara menurun. Dan yang terakhir adalah metode *Dannenbring* yang pada prinsipnya mengombinasikan antara metode CDS dan konsep *slope index* yang dikembangkan oleh metode *Palmer* (Ginting, 2009).

PT. Naturindo Fresh merupakan sebuah perusahaan yang memproduksi dan mendistribusikan obat-obatan herbal asli Indonesia yang berfokus pada bidang kesehatan. Seluruh tahap produksi yang terdapat pada perusahaan ini

dioperasikan sesuai standar operasional prosedur (SOP) yang berdasarkan pada cara pembuatan obat tradisional yang baik (CPOTB). Perusahaan ini mempunyai semangat muda, nasionalisme, komitmen tinggi, serta profesionalitas dalam menjalankan setiap aspek dalam bisnisnya mulai dari riset, *production quality control*, *distribution management*, *professional marketing cooperation*, metode terkontrol dengan baik, serta layanan terhadap konsumen yang tepat. Dalam menjalankan bisnisnya, penjadwalan produksi merupakan salah satu faktor kunci yang mendukung berhasilnya perusahaan. Dalam menjadwalkan produksi, perusahaan tersebut memperhatikan stok produk yang terdapat pada *inventory* dan jumlah *order* dari konsumen kemudian perusahaan tersebut mulai menjadwalkan produksinya. Penjadwalan produksi pada perusahaan ini belum memiliki penjadwalan yang pasti. Hal tersebut bisa dilihat karena penjadwalan produksi yang dibuat tersebut hanya berupa produk apa saja yang akan di produksi dalam waktu 1 bulan tetapi dalam proses produksinya, karyawan bebas memilih produk apa saja yang akan terlebih dahulu di produksi (*random*) mengikuti jadwal yang diberikan dari perusahaannya.

Dalam memberikan kepuasan kepada konsumen, salah satu caranya adalah dengan menyelesaikan pesanan dengan tepat waktu. Hal tersebut dapat capai dengan cara membuat suatu sistem penjadwalan produksi yang sistematis. Oleh karena itu dibutuhkan metode melalui beberapa ketentuan dan proses yang dapat meminimalkan biaya pengerjaan. Oleh karena itu, penulis memilih penjadwalan dengan metode CDS, *Palmer*, dan *Dannenbring* sebagai salah satu metode dalam menjadwalkan produksi.

## 1.2 Rumusan Masalah

Mengacu pada latar belakang diatas, maka dapat dirumuskan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Seperti apa urutan produksi produk yang terdapat pada PT. Naturindo Fresh Kulon Progo dengan menggunakan metode CDS, *Palmer*, dan *Dannenbring*?
2. Berapa nilai *makespan* yang dihasilkan berdasarkan metode atau penjadwalan yang dihasilkan oleh perusahaan dengan metode CDS, *Palmer*, dan *Dannenbring*?
3. Metode apa yang memiliki nilai *makespan* terkecil dalam menjadwalkan produksi pada PT. Naturindo Fresh Kulon Progo.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini diantaranya:

1. Menentukan urutan *job* berdasarkan metode CDS, *Palmer*, dan *Dannenbring* dengan metode penjadwalan yang terapkan pada perusahaan.
2. Menghitung dan membandingkan nilai *makespan* yang dihasilkan menggunakan metode CDS, *Palmer*, dan *Dannenbring* dengan penjadwalan aktual yang diterapkan perusahaan.
3. Menentukan metode penjadwalan yang terbaik untuk diterapkan pada PT. Naturindo Fresh Kulon Progo

## 1.4 Manfaat Penelitian

Berdasarkan penelitian ini diharapkan dapat memberi beberapa manfaat, diantaranya:

1. Bagi Mahasiswa

Mampu mengimplementasi dan memperdalam ilmu yang diperoleh dalam perkuliahan serta dapat membandingkan dan menerapkan teori yang diperoleh pada permasalahan yang terdapat di perusahaan serta meningkatkan kemampuan dalam menganalisis dan *problem solving* terkait masalah penjadwalan.

## 2. Bagi Perusahaan

Mampu memberikan saran dan rekomendasi yang dapat diterapkan di perusahaan perencanaan produksi dengan mengajukan beberapa alternatif jangka waktu pelaksanaan pekerjaan dan nilai interval yang dihasilkan.

### 1.5 Batasan Penelitian

Supaya penelitian yang dilakukan tidak mencakup terlalu luas, maka ditentukan beberapa batasan masalah sebagai berikut:

1. Produk yang menjadi objek penelitian ini adalah seluruh produk yang diproduksi di PT. Naturindo Fresh Kulon Progo
2. Penelitian dilakukan pada divisi produksi secara berurutan yang dimulai dari stasiun perebusan sampai stasiun pengayakan serbuk yang terdapat pada PT. Naturindo Fresh Kulon Progo.
3. Jadwal produksi yang digunakan dalam menentukan *makespan* pada PT. Naturindo Fresh Kulon Progo adalah jadwal produksi pada periode bulan Maret sampai April 2023.

Terdapat juga beberapa asumsi yang digunakan dalam penelitian ini ialah sebagai berikut:

1. Karyawan yang bekerja pada bagian divisi produksi tersebut dianggap mempunyai keahlian dan *performance* kerja yang baik.

2. Waktu transportasi antar stasiun kerja diabaikan.
3. Ketersediaan bahan baku dianggap sudah memenuhi untuk kebutuhan produksi.
4. Definisi urutan *job* pada penelitian ini adalah urutan produk yang diproduksi.
5. Waktu siklus dan *allowance time* yang digunakan merupakan ketetapan waktu yang ditetapkan perusahaan.
6. Alternatif urutan *job* yang terdapat dari hasil perhitungan iterasi pada metode CDS didasarkan menggunakan urutan *job* yang dihasilkan dari *sequence job* pada *software WINQSB*.
7. Setiap *job* yang hendak dihitung *makespan* nya adalah *job* dengan 1 kali produksi pada penjadwalan aktual perusahaan dengan menggunakan 1 mesin pada setiap proses.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Penelitian ini terdiri dari tiga bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut :

### **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini memuat tentang informasi mengenai asal-usul permasalahan yang menjadi objek penelitian. Selain itu, di dalam bab ini juga dikemukakan rumusan masalah, tujuan penelitian, serta manfaat dari penelitian yang akan diperoleh.

### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini memuat kajian penelitian yang telah dilakukan dengan tujuan untuk membandingkan tujuan, metode, dan hasil penelitian yang diperoleh.



Selain itu, bab ini juga berisi dasar teori yang menjadi landasan tema penelitian dan prosedur dalam menjalankan penelitian.

### **BAB III METODE PENELITIAN**

Dalam bab ini, akan dijelaskan tentang bagaimana melakukan penelitian secara operasional. Selain itu, bab ini juga akan membahas tentang objek penelitian yang akan diteliti, jenis data yang akan digunakan, metode pengumpulan data yang akan dilakukan, metode analisis data yang digunakan, serta diagram alir penelitian yang akan digunakan untuk memperjelas proses penelitian.

### **BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN**

Bab ini berisi tentang pendeskripsian data yang dikumpulkan selama penelitian serta bagaimana analisis data yang dilakukan setelah pengumpulan data. Selain itu, bab ini juga menjelaskan temuan utama yang ditemukan dalam penelitian yang didukung oleh analisis data yang telah dilakukan sebelumnya.

### **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini menyajikan jawaban atau kesimpulan yang diperoleh berdasarkan rumusan masalah yang diajukan pada awal skripsi berdasarkan temuan-temuan yang telah dijelaskan dalam hasil penelitian dan pembahasan. Pada bab ini juga berisi tentang rekomendasi atau panduan untuk penelitian atau tindakan lanjutan yang dapat dilakukan berdasarkan temuan penelitian yang berupa usulan untuk mengatasi keterbatasan penelitian, mengembangkan aspek penelitian yang belum tercakup, atau memberikan rekomendasi praktis dalam bidang terkait

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan perhitungan, pengolahan data, serta pembahasan yang telah dilakukan dalam meminimalkan total waktu produksi (*makespan*) menggunakan metode *Campbell, Dudek, & Smith* (CDS), *Palmer*, dan *Dannenbring* pada PT. Naturindo Fresh Kulon Progo yang terdapat pada bab sebelumnya, dapat ditarik kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Urutan *job* (produk) yang dihasilkan pada metode yang digunakan adalah sebagai berikut:
  - a. Urutan *job* yang dihasilkan pada metode CDS terdapat pada iterasi K(3) dengan acuan yang digunakan ialah alternatif urutan *job* berdasarkan pengolahan yang dihasilkan oleh *WINQSB* yaitu 7 – 10 – 1 – 20 – 21 – 24 – 23 – 5 – 18 – 19 – 4 – 8 – 9 – 3 – 25 – 16 – 17 – 22 – 15 – 12 – 13 – 26 – 14 – 2 – 11 – 6.
  - b. Urutan *job* yang dihasilkan oleh metode *Palmer* berdasarkan hasil perhitungan *slope index* yang diurutkan secara menurun dari nilai terbesar sampai terkecil adalah 5 – 19 – 24 – 4 – 18 – 15 – 16 – 23 – 9 – 20 – 7 – 17 – 10 – 8 – 22 – 21 – 3 – 1 – 25 – 26 – 12 – 13 – 14 – 2 – 11 – 6.
  - c. Urutan *job* yang dihasilkan oleh metode *Dannenbring* yang dilakukan berdasarkan penjumlahan nilai  $P_{i1}$  dan  $P_{i2}$  yang diurutkan berdasarkan *Johnson Rule* menghasilkan urutan *job* yaitu 5 – 19 – 15 – 4 – 18 – 16 –

24 – 9 – 17 – 23 – 20 – 22 – 8 – 12 – 7 – 10 – 3 – 21 – 1 – 13 – 25 – 26  
– 14 – 11 – 2 – 6.

2. Total waktu produksi (*makespan*) yang dihasilkan pada perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya adalah sebagai berikut:

a. Penjadwalan aktual perusahaan dengan urutan *job* 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9 – 10 – 11 – 12 – 13 – 14 – 15 – 16 – 17 – 18 – 19 – 20 – 21 – 22 – 23 – 24 – 25 – 26 menghasilkan *makespan* sebesar 30.725,08 menit.

b. Metode CDS menghasilkan urutan *job* 7 – 10 – 1 – 20 – 21 – 24 – 23 – 5 – 18 – 19 – 4 – 8 – 9 – 3 – 25 – 16 – 17 – 22 – 15 – 12 – 13 – 26 – 14 – 2 – 11 – 6 dengan *makespan* sebesar 30.634,18 menit.

c. Metode *Palmer* menghasilkan urutan *job* 5 – 19 – 24 – 4 – 18 – 15 – 16 – 23 – 9 – 20 – 7 – 17 – 10 – 8 – 22 – 21 – 3 – 1 – 25 – 26 – 12 – 13 – 14 – 2 – 11 – 6 dengan *makespan* sebesar 30.743,75 menit.

d. Metode *Dannenbring* menghasilkan urutan *job* 5 – 19 – 15 – 4 – 18 – 16 – 24 – 9 – 17 – 23 – 20 – 22 – 8 – 12 – 7 – 10 – 3 – 21 – 1 – 13 – 25 – 26 – 14 – 11 – 2 – 6 yang juga menghasilkan *makespan* sebesar 30.743,75 menit.

3. *Makespan* yang memiliki nilai terkecil terdapat pada metode CDS dengan nilai *makespan* yang dihasilkan sebesar 30.634,18 menit. Berikut merupakan rekapan urutan *job* beserta *makespan* yang dihasilkan berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan:

Tabel 5.1 Urutan *Job* serta *Makespan* yang dihasilkan

Metode	Urutan <i>Job</i>	<i>Makespan</i> yang dihasilkan (menit)
Aktual Perusahaan	1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 – 8 – 9 – 10 – 11 – 12 – 13 – 14 – 15 – 16 – 17 – 18 – 19 – 20 – 21 – 22 – 23 – 24 – 25 – 26	30.725,08
<i>Campbell, Dudek, &amp; Smith</i> (CDS)	7 – 10 – 1 – 20 – 21 – 24 – 23 – 5 – 18 – 19 – 4 – 8 – 9 – 3 – 25 – 16 – 17 – 22 – 15 – 12 – 13 – 26 – 14 – 2 – 11 – 6	30.634,18
<i>Palmer</i>	5 – 19 – 24 – 4 – 18 – 15 – 16 – 23 – 9 – 20 – 7 – 17 – 10 – 8 – 22 – 21 – 3 – 1 – 25 – 26 – 12 – 13 – 14 – 2 – 11 – 6	30.743,75
<i>Dannenbring</i>	5 – 19 – 15 – 4 – 18 – 16 – 24 – 9 – 17 – 23 – 20 – 22 – 8 – 12 – 7 – 10 – 3 – 21 – 1 – 13 – 25 – 26 – 14 – 11 – 2 – 6	30.743,75

Pengolahan Data (2023)

Berdasarkan tabel diatas dapat dilihat bahwa penjadwalan menggunakan metode *Campbell, Dudek, & Smith* menghasilkan perbedaan sebesar 90,90 menit lebih kecil dibandingkan penjadwalan aktual perusahaan, dan 109,57 lebih kecil dibandingkan metode *Palmer*, dan *Dannenbring*. Sehingga metode CDS dapat diterapkan di PT. Naturindo Fresh Kulon Progo untuk memproduksi produk Hepatifit, Vermifit, Brainofit, Glucofit, Crysto Up, BV. Flow, Bron C.Fit, Urinofit, Azzahra, Hemocare, Carsifit, Stenosifit, Carcinofit, Mucosafit, Joint Nature, Staminofit, Biolipid, Cardiafit, Uricofit, Hitenfit, Cabone, Procela, Pos-K, Met-Fit, Forheuma, dan Herb 4 Slim. karena dalam pengurutan *job* nya menghasilkan nilai terkecil dibandingkan dengan penjadwalan aktual perusahaan, metode *Palmer*, dan *Dannenbring*.

## 5.2 Saran

Penelitian tugas akhir ini masih terdapat beberapa keterbatasan yang dapat diperbaiki pada penelitian selanjutnya, sehingga berikut merupakan beberapa saran yang dapat diajukan yaitu:

1. Metode yang digunakan dalam penelitian selanjutnya sebaiknya digunakan metode penjadwalan *flowshop* selain metode yang telah digunakan pada penelitian ini misalnya, metode *Ignall-Scharge*, *Branch & Bound*, *Jhonson Algorithm*, *Nawazenscore Ham (NEH)*, dan metode lain sebagainya.
2. Dalam menentukan *allowance time* pada *set-up time* khususnya sterilisasi mesin sebaiknya perusahaan memiliki standar untuk sterilisasi mesin sehingga waktu yang digunakan untuk menentukan *allowance time* menjadi lebih akurat.
3. Dalam pengambilan data dan pengolahan data pada penelitian selanjutnya sebaiknya memperhatikan *makespan* yang dihasilkan pada metode yang digunakan dengan tenggat waktu (*due date*) yang terdapat pada perusahaan sehingga dapat diketahui penghematan waktu yang dihasilkan berdasarkan tenggat waktu yang ditentukan perusahaan.
4. Penentuan *makespan* pada penjadwalan produksi *flowshop* sebaiknya diperhitungkan untuk keseluruhan mesin yang terdapat pada masing-masing stasiun sehingga perbedaan *makespan* yang dihasilkan dapat lebih terlihat.
5. Jika ingin mengambil dengan metode yang sama dengan penelitian tugas akhir ini, sebaiknya dilakukan pada divisi yang berbeda misalnya divisi *Packaging* karena banyak pekerjaan yang dikerjakan *by man*, sedangkan

pada penelitian ini dilakukan pada divisi produksi yang dimana banyak pekerjaan dikerjakan *by machine*.



## DAFTAR PUSTAKA

- Annisyah, S. D., & Saifudin, J. A. (2020). Analisis Penjadwalan Produksi Batu Tahan Api Dengan Menggunakan Metode *Campbell Dudek Smith* (CDS), *Nawaz Enscore Ham* (NEH), dan *Palmer* Untuk Mengurangi *Makespan* Di PT. X. *Juminten*, 1(3), 165–176. <https://doi.org/10.33005/juminten.v1i3.119>
- Antari, N. K. D. P., Harini, L. P. I., & Tastrawati, N. K. T. (2021). Analisis Penjadwalan Produksi Menggunakan Metode *Campbell Dudek Smith* Dan *Dannenbring* Dalam Meminimumkan Total Waktu Produksi Beras. *E-Jurnal Matematika*, 10(4), 215. <https://doi.org/10.24843/mtk.2021.v10.i04.p345>
- Aritonang, M., Helmi, & Risa. (2015). Perbandingan Metode *Campbell, Dudek, And Smith* (CDS) dan *Palmer* Dalam Meminimasi Total Waktu Penyelesaian Studi Kasus : Astra Konveksi Pontianak. *Buletin Ilmiah Math. Stat. Dan Terapannya (Bimaster)*, 04(3), 181–190.
- Asih, P., Mindhayani, I., Prakoso, T., Sains, F., & Teknologi, D. (2022). Analisis Penjadwalan Proses *Packing* Arumanis Dengan Menggunakan Metode CDS (*Campbell Dudeck Smith*) dan NEH (*Nawas, Enscore, and Ham*) (Studi Kasus di UMKM Arumanis Haji Ardi di Sleman). *Jurnal Rekayasa Industri (JRI)*, 4(1).
- Baker, K. R., & Trietsch, D. (2019). *Principles of Sequencing and Scheduling* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Conway, R. W., Maxwell, W. L., & Miller, L. W. (1967). *THEORY OF SCHEDULING*. ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY.
- Ervil, R., & Nurmayuni, D. (2018). Penjadwalan Produksi Dengan Metode *Campbell Dudek Smith* (CDS) Untuk Meminimumkan Total Waktu Produksi (*Makespan*). *Jurnal Sains Dan Teknologi*, 18(2). <https://doi.org/10.36275/STSP.V18I2.118>
- Ginting, R. (2009). *Penjadwalan Mesin, Edisi Pertama* (Edisi Pertama). Graha Ilmu.

- Hanafi, R., Mangnggenre, S., Asmal, S., Setiawan, I., & Gloryantho, C. (2019). *Production scheduling by implementing Campbell Dudek Smith (CDS) and Dannenbring methods: A PVC pipe green production case study. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 343(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/343/1/012007>
- Mazda, N. C. (2018). *Penjadwalan Produksi Flow Shop Menggunakan Metode Dannenbring, Branch And Bound Dan Nawaz, Ensore And HAM (NEH) Pada Pembuatan Tas Kulit Di PT M. Joint Exclusive Leathercraft Yogyakarta*. Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga.
- Nurainun, T., & Oktiadri, W. (2019). Usulan Penjadwalan *Job Machine* Seri Menggunakan Metode *Campbell Dudek Smith* (CDS) untuk Meminimasi *Makespan* di UD. Wira Vulkanisir. *Jurnal Energi Dan Manufaktur*, 12(2), 62–68. <https://doi.org/10.24843/jem.2019.v12.i02.p03>
- Pinedo, M. L. (2016). *Scheduling Theory, Algorithms, and System* (5th ed.).
- Setiawan, D., Ramadhani, A., & Cahyo, W. N. (2019). *Production Scheduling to Minimize Makespan using Sequencing Total Work (TWK) Method and Campbell Dudek Smith (CDS) Algorithm. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 598(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/598/1/012066>
- Utami, I. D., Kuswandi, I., & Wibowo, D. E. (2020). *Comparison of Scheduling Methods: Campbell Dudek Smith, Palmer and Dannenbring to Minimize Makespan. Journal of Physics: Conference Series*, 1569(3). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1569/3/032019>