

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pisang

Pisang merupakan salah satu komoditas hortikultura yang memiliki potensi sangat tinggi karena produksinya yang tidak mengenal musim dan dalam jumlah yang sangat banyak. Produksi pisang di Indonesia terus mengalami peningkatan setiap tahunnya, menurut Badan Pusat Statistik (2016) produksi pisang pada tahun 2013 mencapai 6,28 juta ton; pada tahun 2014 mencapai 6,86 juta ton; dan pada tahun 2015 mencapai 7,80 juta ton. Pisang termasuk komoditas buah-buahan yang mudah didapat dan memiliki nilai ekonomi yang relatif rendah serta memiliki kandungan gizi yang cukup lengkap. Kandungan gizi pada pisang (Tabel 1) berupa karbohidrat, lemak, protein, vitamin, dan mineral. Kandungan karbohidrat pada pisang sekitar 17,2% - 38,0% (Muchtadi *et al.*, 1990). Tanaman pisang dalam sistematika taksonomi tumbuhan menurut Tjitrosoepomo (2000) sebagai berikut: divisi Spermatophyta, sub divisi Angiospermae, kelas Monocotyledonae, famili Musaceae, genus *Musa*, spesies *Musa paradisiaca L.*

Pisang terbagi menjadi dua jenis berdasarkan cara penggunaannya, yaitu *banana* dan *plantain*. Pisang jenis *banana* merupakan jenis pisang yang dapat dikonsumsi dalam keadaan segar atau biasa disebut pisang meja, contohnya pisang ambon putih, ambon kuning, ambon hijau, barangan, lampung, mas, raja bulu, dan raja sereh. Pisang jenis *plantain* merupakan jenis pisang yang dapat dikonsumsi setelah dimasak, contohnya pisang tanduk, pisang uli, pisang kepok, dan pisang siam (Valmayor *et al.*, 2000), sedangkan Satuhu dan Supriyadi (2000) menggolongkan pisang menjadi empat golongan yaitu:

- 1) Pisang yang dapat dimakan langsung setelah matang, seperti pisang kepok, pisang susu, pisang hijau, pisang mas, pisang raja, dan pisang barangan.
- 2) Pisang yang dapat dimakan setelah diolah terlebih dahulu, seperti pisang tanduk, pisang uli, pisang kapas, dan pisang bangkahulu.
- 3) Pisang yang dapat dimakan langsung setelah matang maupun diolah terlebih dahulu, seperti pisang kepok dan pisang raja.
- 4) Pisang yang dapat dikonsumsi walaupun masih mentah, seperti pisang klutuk atau pisang batu yang biasa digunakan untuk campuran rujak.

Tabel 1. Kandungan Gizi dalam 100 g Pisang









No.	Kandungan Senyawa	Kadar
1.	Air	73,60 %
2.	Protein	2,15 %
3.	Lemak	1,34 %
4.	Gula pereduksi	7,62 %
5.	Pati	11,48 %
6.	Serat kasar	1,52 %
7.	Abu	1,03 %
8.	Vitamin C (mg/100 g)	36
9.	Mineral	
	- Ca, (mg/100 g)	31
	- Fe, (mg/100 g)	26
	- P, (mg/100 g)	63

(Sumber: Dewati, 2008)

Pisang merupakan salah satu buah-buahan yang tergolong buah klimakterik yakni buah-buahan yang terus menerus melakukan proses fisiologi setelah pemanenan dengan menghasilkan senyawa etilen dan karbondioksida sehingga terjadi pematangan buah (Wills *et al.*, 1999). Proses pematangan ini akan mempengaruhi komposisi kimia pisang khususnya kandungan pati. Lii *et al.*, (1982) menjelaskan bahwa penurunan kandungan pati diakibatkan meningkatnya kadar gula dan sukrosa yang terjadi selama proses pematangan. Kandungan pati pada

pisang yang masih hijau mencapai 61,7%, sedangkan kandungan pati yang sudah matang hanya sebesar 2,6% (Tabel 2). Perubahan ini terjadi karena adanya aktivitas enzim fruktosa yang mensintesis sukrosa selama pematangan fase pra-klimakterik sehingga pati terdegradasi dan rendemen glukosa serta fruktosa terus meningkat (Garcia dan Lajolo, 1988).

Tabel 2. Komposisi Kimia Buah Pisang Berdasarkan Tingkat Kematangan

Tingkat Kematangan	Warna Kulit	Keadaan Buah	Kadar Pati (%)	Kadar Gula Pereduksi (%)	Kadar Sukrosa (%)	Suhu Gelatinisasi (°C)
1	Hijau		61,7	0,2	1,2	74-81
2	Hijau dengan sedikit warna kuning		42,2	10,8	18,4	77-81
3	Bagian hijau lebih banyak daripada kuning		39,8	11,5	21,4	75-78
4	Bagian kuning lebih banyak daripada hijau		37,6	12,4	27,9	76-81
5	Kuning dengan ujung hijau		9,7	15,0	53,1	76-80
6	Kuning penuh		6,3	31,2	51,9	76-83
7	Kuning berbintik sedikit kecoklatan		3,3	33,8	52,0	79-83
8	Kuning berbintik banyak kecoklatan		2,6	33,6	53,2	-

(Sumber: Lii *et al.*, 1982 dan Prabawati *et al.*, 2008)

Pisang kapas (Gambar 1) merupakan salah satu jenis pisang yang sering ditemukan di pasar tradisional. Pisang ini termasuk jenis pisang *plantain* sehingga

diperlukan pengolahan terlebih dahulu sebelum dikonsumsi. Pisang kapas menurut Heyne (1950) dikutip Putri *et al.* (2015) memiliki kandungan karbohidrat mencapai 29,74%. Kandungan karbohidrat ini dapat pula dipengaruhi oleh tingkat kematangan dari pisang kapas itu sendiri. Putri (2012) menjelaskan bahwa pisang kapas yang berwarna hijau (Tabel 2) memiliki kadar pati yang telah optimum. Tingginya karbohidrat pada pisang kapas menjadi alasan utama adanya pengolahan pisang kapas menjadi tepung atau pati. Pengolahan ini dapat membantu penganeekaragaman sumber karbohidrat yang berasal dari buah–buahan.



Gambar 1. Pisang Kapas

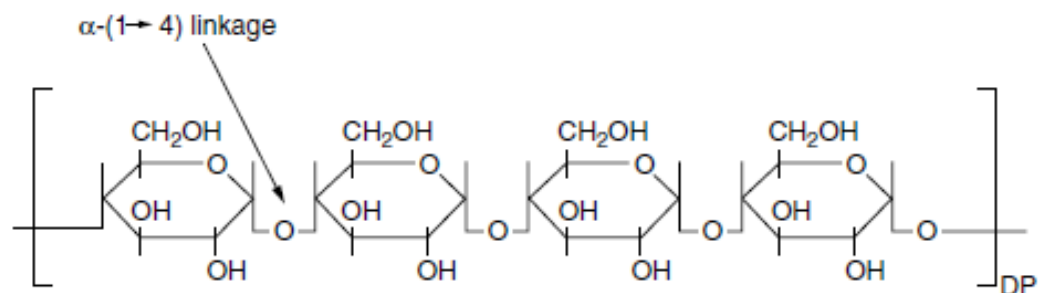
2.2 Pati

Pati merupakan polisakarida hasil sintesis dari tanaman hijau melalui proses fotosintesis. Pati memiliki bentuk kristal bergranula yang tidak larut dalam air pada suhu ruang. Pati dapat dipisahkan menjadi dua fraksi yakni fraksi terlarut yang disebut amilosa dan fraksi tidak terlarut yang disebut amilopektin (Winarno, 2002).

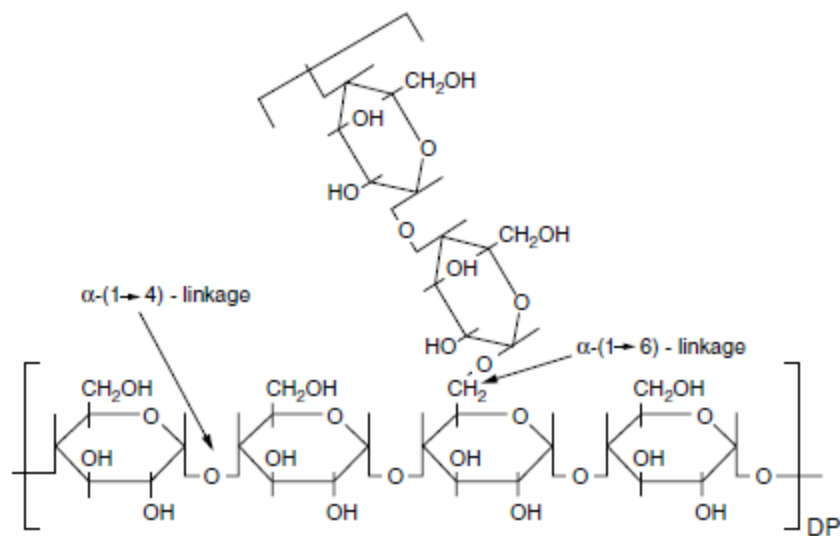
Fessenden dan Fessenden (1986) menjelaskan bahwa amilosa adalah polimer linear dari α -D-glukosa yang dihubungkan dengan ikatan α -(1,4) glikosidik

(Gambar 2), sedangkan amilopektin merupakan polimer linear dari α -D-glukosa dan memiliki struktur yang bercabang. Ikatan glikosidik pada amilopektin terbagi menjadi dua, yaitu α -(1,4) yang membentuk struktur linear dan α -(1,6) yang merupakan titik percabangan (Gambar 3).

Taggart (2004) menjelaskan, amilosa memiliki kemampuan untuk membentuk kristal karena struktur rantai polimernya yang sederhana sehingga dapat terbentuk interaksi molekular yang kuat. Interaksi ini terjadi pada gugus hidroksil molekul amilosa. Amilopektin juga dapat membentuk kristal tetapi tidak sereaktif amilosa dikarenakan rantai bercabang pada amilopektin menghalangi pembentukan kristal.



Gambar 2. Struktur Amilosa pada Pati
(Sumber: Liu, 2005)



Gambar 3. Struktur Amilopektin pada Pati
(Sumber: Liu, 2005)

Martinez *et al.*, (2004) menjelaskan rasio amilosa dan amilopektin dalam pati sangat bervariasi dan mempengaruhi kelarutan, kekentalan, pembentukan gel, dan suhu gelatinisasi dari pati. Pati yang mengandung amilosa lebih tinggi akan menghasilkan gel yang lebih kokoh, sedangkan pati yang mengandung amilopektin lebih tinggi akan menghasilkan gel yang lebih lengket dan elastis (Kusnandar, 2010). Kandungan amilosa pada pati menurut Chan Hui (2014) mencapai 20-30%, sedangkan kandungan amilopektinnya mencapai 70-80%.

Granula pati memiliki bentuk dan ukuran yang berbeda-beda sehingga granula pati sering digunakan untuk mengidentifikasi jenis pati pada bahan pangan tertentu. Granula pati memiliki banyak gugus hidroksil yang dapat meningkatkan sifat hidrofilik dan mendorong kecenderungan terdispersi pada saat pemanasan dengan air. Gugus hidroksil juga memiliki kecenderungan untuk bergabung dengan yang lainnya sehingga mampu membentuk ikatan hidrogen diantara molekul pati

yang bersebelahan dan menyebabkan tidak larutnya pati dalam air dingin. Pati tidak larut dalam air dingin, tetapi granula pati mampu menyerap air sampai sedikit mengembang. Proses pengembangan ini bersifat *reversible* apabila tidak melewati suhu gelatinisasi dan akan bersifat *irreversible* apabila telah mencapai suhu gelatinisasi (Kusnandar, 2010).

Proses pemasakan pada pati tidak hanya menyebabkan terbentuknya gel tetapi juga dapat memecah sel sehingga mempermudah proses pencernaan pati didalam tubuh. Selama proses pencernaan, semua bentuk pati akan dihidrolisis menjadi glukosa (Almatsier, 2004). Bello-Perez *et al.*, (2005) dan González-Soto *et al.*, (2006) menjelaskan bahwa kisaran suhu gelatinisasi pati kentang adalah 57 -87 °C, gandum adalah 50-86 °C, dan pisang adalah 76-77°C.

2.2.1 Pati Pisang

Pisang memiliki komponen karbohidrat berupa pati yang terdapat pada daging buahnya dan akan mengalami perubahan menjadi sukrosa, glukosa, dan fruktosa selama proses pematangan pisang (Bello-Perez *et al.*, 1999). Pati pisang memiliki bentuk granula ireguler dengan permukaan yang halus. Permukaan yang halus dan rapat inilah yang menyebabkan pati pisang bersifat resisten (Zhang dan Hamaker, 2009).

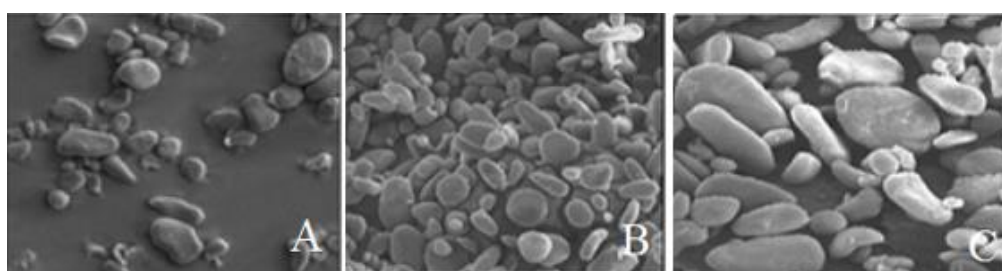
Pati pisang memiliki granula yang berbentuk oval (Gambar 4) dengan kandungan amilosa sekitar 20,5%. Ukuran granula pati pisang sekitar 35-55µm dengan suhu gelatinisasi mencapai 74,5°C-75°C (Bello-Perez *et al.*, 1999). Hasil studi Rafida (2017) menunjukkan kadar pati pada pisang kapas sekitar 83,3%

dengan kadar amilosa sebesar 40,8% dengan rendemen sebesar 21,42%. Rendemen yang didapatkan dalam pembuatan pati pisang kapas pada percobaan pendahuluan mencapai 15,65%. Perbedaan rendemen dengan Rafida (2017) dapat disebabkan oleh banyaknya proses penyaringan II yang dilakukan. Rafida (2017) juga menjelaskan komposisi kimia pati pisang kapas pada Tabel 3 berikut ini.

Tabel 3. Komposisi Kimia Pati Pisang Kapas

Komposisi Kimia	Pati Pisang Kapas (%)
Abu	0,13
Air	6,93
Amilosa	40,8
Karbohidrat	90,5
Lemak	0,01
Pati	83,3
Protein	1,45

(Sumber: Rafida, 2017)



Gambar 4. Granula Pati Pisang Genom Acuminata (a) Diploid (b) Triploid (c) Tetraploid

(Sumber: Gilbert *et al.*, 2014)

Suhu gelatinisasi pati pisang yang relatif tinggi disebabkan oleh adanya ikatan yang kuat pada granula patinya. Kandungan fosfor pada pati pisang termasuk tinggi yakni sebesar 0,05-0,07 mg/g dan fosfor tersebut akan teresterifikasi dengan granula pati sehingga memperkuat struktur granula pati (Lii dan Chang, 1981 dikutip Titipanillah, 2017). Hasil studi Rafida (2017) juga menunjukkan suhu gelatinisasi dan entalpi gelatinisasi pada pati pisang kapas alami lebih tinggi daripada pati pisang kapas termodifikasi HMT.

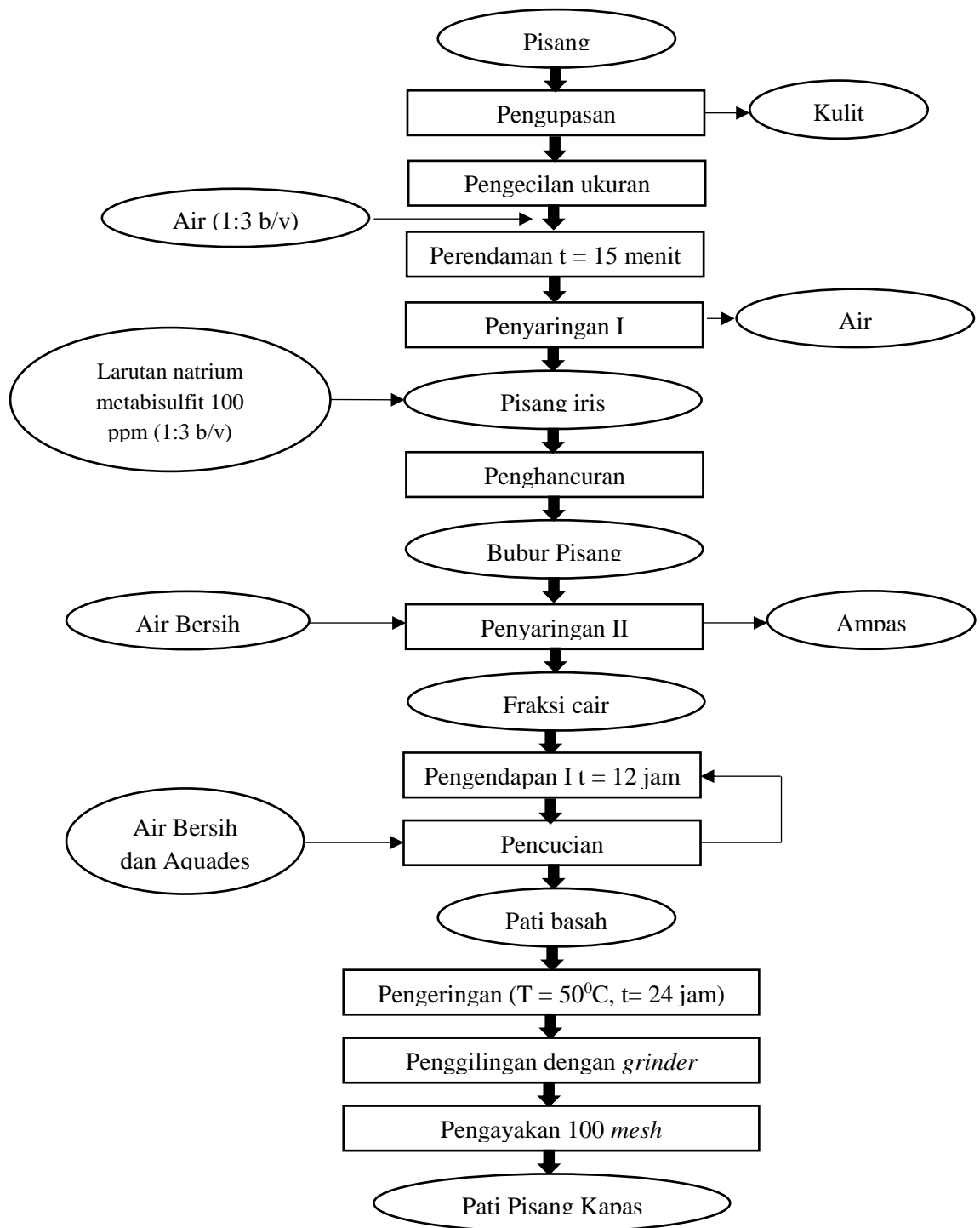
Pati pisang kapas didapatkan dengan ekstraksi dari daging buahnya. Pembuatan pati pisang dilakukan dengan cara pisang dikupas lalu direndam dalam air untuk mencegah pencoklatan. Pisang kemudian dihancurkan sampai halus dengan bantuan air sehingga mempermudah proses ekstraksi. Bubur pisang yang dihasilkan kemudian diendapkan selama 24 jam. Endapan yang diperoleh adalah pati pisang basah yang kemudian dikeringkan menggunakan alat pengering. Setelah didapatkan pati pisang kering kemudian digiling sampai halus dan diayak sehingga akan dihasilkan pati pisang dengan ukuran yang seragam (Satuhu dan Supriyadi, 2000).

Rafida (2017) menjelaskan tahapan proses pembuatan pati pisang kapas yang meliputi pencucian, pengupasan, pengecilan ukuran, penghancuran, penyaringan, pengendapan, pencucian kembali, pengeringan, penggilingan, dan pengayakan menggunakan ayakan 100 mesh. Tahapan tersebut secara rinci dijelaskan sebagai berikut (Gambar 5).

Tahapan pengupasan dilakukan untuk membuang bagian-bagian yang tidak terpakai seperti kulit dan kotoran yang melekat pada daging buah pisang kapas. Setelah pengupasan, dilakukan pengecilan ukuran untuk mempermudah proses penghancuran pisang kapas. Perendaman pisang kapas yang telah berukuran kecil dilakukan dengan menggunakan air untuk menghilangkan getah yang melekat pada pisang kapas. Perbandingan air dengan pisang kapas untuk perendaman adalah 1:3. Kemudian, dilakukan penyaringan I untuk memisahkan hasil irisan pisang dengan air rendaman menggunakan saringan biasa.

Tahapan penghancuran dilakukan dengan menggunakan blender untuk merusak jaringan pisang sehingga mempermudah pengeluaran pati. Penghancuran dilakukan dengan menggunakan larutan natrium metabisulfit 100 ppm (1:3 b/v) agar didapatkan pati yang lebih cerah. Setelah penghancuran, dilakukan penyaringan II yang bertujuan untuk memisahkan fraksi pati dengan ampas menggunakan kain saring. Kemudian, dilakukan pengendapan selama 12 jam secara periodik untuk memisahkan fraksi pati dengan komponen lain yang tidak diinginkan. Tahapan pencucian yang dilakukan setelah pengendapan bertujuan untuk memisahkan komponen pati dengan kotoran lain yang masih menempel sehingga pati yang didapat akan lebih cerah. Pencucian dilakukan sebanyak 5 kali dengan bantuan air bersih dan akuades.

Pati basah yang dihasilkan dari proses pengendapan dan telah mengalami pencucian, dikeringkan menggunakan oven cabinet pada suhu 50°C selama 24 jam untuk mengeluarkan air yang masih terdapat pada bahan sehingga dihasilkan pati dengan kadar air tertentu. Setelah pengeringan, dilakukan penggilingan menggunakan grinder untuk menghancurkan pati pisang kapas yang telah dikeringkan sehingga berubah bentuk menjadi partikel-partikel halus. Pati yang sudah halus akan diayak menggunakan ayakan 100 mesh untuk memisahkan bagian-bagian yang tidak diinginkan dan untuk menghasilkan pati yang berukuran seragam.



Gambar 5. Diagram Proses Pembuatan Pati Pisang Kapas
(Sumber: Modifikasi Rafida, 2017)

2.3 Modifikasi Pati Secara Oksidasi

Pati *native* atau pati alami (belum dimodifikasi) memiliki kelemahan pada karakteristiknya. Pomeranz (1985) menjelaskan kelemahan karakteristik pati alami, yaitu kestabilan yang rendah pada suhu dan pH tinggi maupun rendah, membutuhkan waktu yang lama dalam pemasakan disebabkan kelarutan yang rendah, tingkat kejernihan rendah, berhubungan dengan daya pengembangan pati serta menghasilkan viskositas gel yang tidak seragam. Oleh karena itu dikembangkan modifikasi pati dan salah satunya modifikasi pati secara kimia.

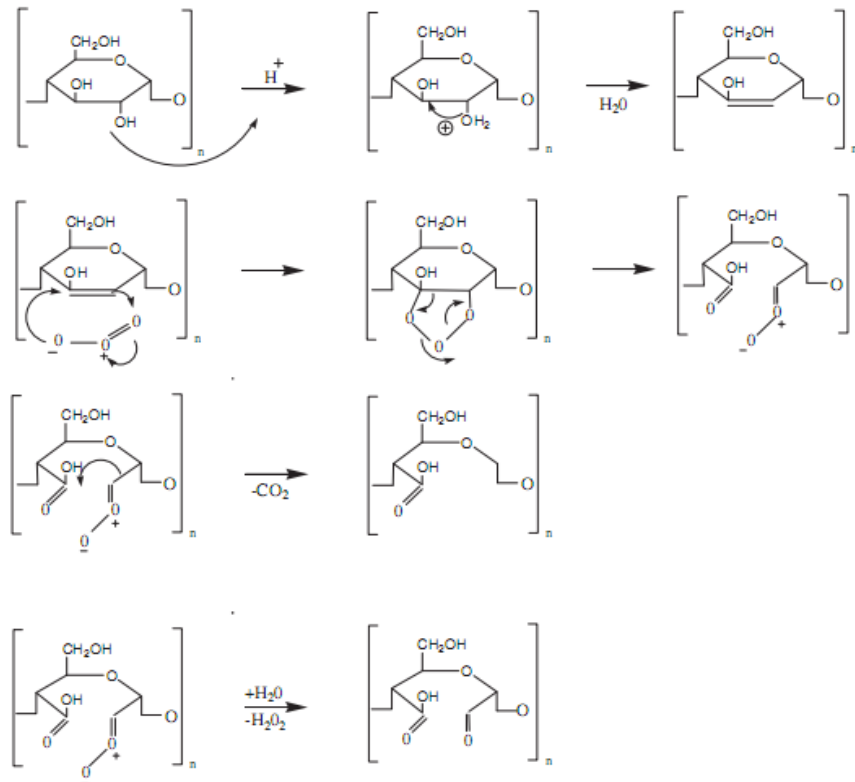
Metode modifikasi pati secara kimia dapat dilakukan dengan hidrolisis, *cross linking*, dan oksidasi. Metode modifikasi pati yang digunakan yaitu metode oksidasi. Metode ini dilakukan dengan menggunakan zat oksidator yang aman dan tidak meninggalkan residu pada bahan pangan. Oksidator yang dapat digunakan yaitu ozon (O₃).

Pati dapat dioksidasi dengan beberapa zat pengoksidasi dalam suasana asam, netral atau larutan alkali. *Food and Drugs Administration* (FDA) menjelaskan zat pengoksidasi diklasifikasikan sebagai pemutih dan oksidan. Pemutih yang diizinkan adalah oksigen aktif dari peroksida atau klorin dari natrium hipoklorida, kalium permanganat, ammonium persulfat. Jumlah maksimum yang dapat digunakan tergantung pada bahan yang dipergunakan (Radley, 1976). Zat oksidan yang digunakan terus mengalami perkembangan dan didapatkan oksidan baru yang dapat digunakan dan termasuk oksidator kuat. Oksidan ini berupa senyawa Ozon (O₃) dan dianggap ramah lingkungan. Oksidator ozon dapat pula

digunakan dalam industri pangan karena tidak akan meninggalkan residu dan dapat terurai dengan cepat menjadi oksigen (O_2) (An dan King, 2009).

Modifikasi secara oksidasi menyebabkan terbentuknya gugus karbonil dan gugus karboksil. Selama proses oksidasi, gugus hidroksil dari molekul pati akan dioksidasi menjadi gugus karbonil dan diikuti pembentukan gugus karboksil (Wang dan Wang, 2003). Jumlah gugus karbonil dan karboksil akan menunjukkan tingkat oksidasi, terutama pada kelompok hidroksil di posisi C2, C3, dan C6 (Wurzburg, 1986). Reaksi oksidasi yang terjadi pada proses modifikasi ini berlangsung sangat cepat dalam menghasilkan satu molekul gugus karbonil yang kemudian berubah menjadi gugus karboksil (Sangseethong *et al.*, 2010).

Gugus karboksil dan karbonil sangat berpengaruh pada sifat fungsional dan amilografi pati pisang kapas yang dimodifikasi. Semakin besar gugus karbonil atau karboksil yang terbentuk maka semakin tinggi pati tersebut dioksidasi oleh oksidator dan semakin tinggi konsentrasi oksidator yang digunakan maka semakin besar gugus karbonil atau karboksil yang terbentuk. Hal ini disebabkan adanya reaksi oksidasi dari gugus hidroksil pada pati menjadi gugus karbonil yang akan semakin kuat, seiring dengan penambahan konsentrasi oksidator (Tolvanen, 2013). Reaksi oksidasi pati menggunakan oksidator Ozon dapat dilihat pada Gambar 6.

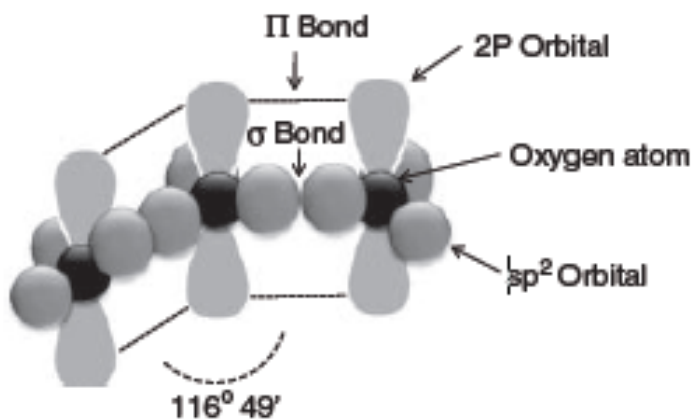


Gambar 6. Reaksi Oksidasi Pati dengan Oksidator Ozon
(Sumber: Vanier, 2017)

2.4 Ozon (O₃)

Ozon (O₃) merupakan molekul tridatomik oksigen yang terbentuk karena adanya penggabungan radikal bebas oksigen dengan molekul oksigen (Gambar 7). Ozon merupakan gas yang berwarna biru pada suhu ruang apabila dihasilkan dari udara kering, tidak memiliki warna apabila dihasilkan dari oksigen murni, dan akan mengalami kondensasi menjadi cairan berwarna biru tua pada suhu -122°C (O'Donnell *et al.*, 2012). Ozon dapat terbentuk melalui radiasi sinar ultraviolet yang berasal dari sinar matahari. Ozon mudah menyerap sinar UV pada panjang gelombang 240-320 nm. Sinar UV dari matahari mampu menguraikan gas oksigen (O₂) di udara bebas. Molekul oksigen ini akan terurai menjadi dua atom oksigen.

Atom-atom tersebut akan bertumbukan dengan atom lain dan terbentuklah ozon (O_3). Ozon sebelum atau setelah bereaksi dengan atom lain selalu menghasilkan oksigen (O_2) sehingga ozon dinilai sangat ramah lingkungan dan sering dikatakan sebagai kimia hijau masa depan (Patel, 1974 dikutip Titipanillah, 2017). Ozon telah dimanfaatkan secara komersial untuk pengolahan air minum, disinfeksi air minum dalam kemasan, sterilisasi bahan makanan mentah, pengawetan bahan makanan, pengolahan air untuk air pendingin, dan pengolahan limbah cair hasil industri serta hasil pemurnian minyak (Prihatiningtyas, 2006).



Gambar 7. Struktur Ozon
(Sumber: O'Donnell *et al.*, 2012)

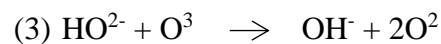
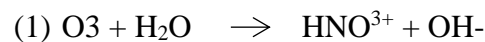
Ozon telah berstatus *Generally Recognized as Safe* (GRAS) oleh US-FDA pada tahun 1997 sehingga dapat digunakan dalam pengolahan pangan dan sebagai disinfeksi. O'Donnell *et al.* (2012) menjelaskan keuntungan penggunaan ozon, yaitu:

- 1) Sifat oksidasi yang kuat menjadikan ozon memiliki kemampuan disinfeksi, sterilisasi, dan dekomposisi bahan kimia pertanian yang berspektrum luas

seperti membunuh mikroorganisme pembusuk melalui oksidasi dan mengoksidasi senyawa pematang yakni etilen dari produk pangan.

- 2) Kecepatan sterilisasi ozon lebih baik dari sinar UV dalam membunuh bakteri dan virus.
- 3) Ozon mudah dibuat dengan bahan baku udara atau oksigen menggunakan metode *electric discharge*.
- 4) Ozon tidak memproduksi senyawa berbahaya atau tidak meninggalkan residu karena akan berubah langsung menjadi oksigen.

Ozon yang terlarut dalam air akan mengalami oksidasi dan dekomposisi sebagai berikut: (<http://www.energy.ca.gov> dikutip Setiasih *et al.*, 2013 dan Titipanillah, 2017)



Ozon merupakan zat yang tidak stabil dan stabilitasnya dipengaruhi oleh kemurnian suatu larutan. Larutan yang tidak murni mengakibatkan penurunan stabilitas ozon terjadi lebih cepat. Ozon dapat berbentuk fase gas dan fase cair. Ozon pada fase gas memiliki umur simpan yang lebih lama daripada ozon fase cair (*liquid*). Ozon pada cair akan menghasilkan banyak reaksi kimia yang terjadi antara ozon dengan bahan. Reaksi kimia tersebut dapat terjadi secara langsung maupun tidak langsung. Reaksi tidak langsung terjadi dengan dekomposisi bahan melalui reaksi antara ikatan yang menghasilkan radikal bebas hidroksil (OH) sedangkan reaksi secara langsung yaitu reaksi selektif yang dilakukan ozon pada bahan saat

larut dalam air. Kombinasi reaksi inilah yang menyebabkan ozon memiliki efektivitas yang besar sebagai oksidator. Efektivitas ozon bergantung pada reaksi langsung dan tidak langsung antara ozon dengan bahan, komposisi air khususnya pH, komponen organik, dan tingkat kebasaaan (O'Donnell *et al.*, 2012).

Kemampuan oksidasi ozon sebagai oksidator yang kuat mampu mendegradasi fenol, mengoksidasi logam-logam berat yang terlarut dalam air, mendegradasi senyawa-senyawa organik, menghilangkan bau, warna serta rasa (Bismo, *et al.*, 2008 dikutip Syafarudin dan Novia, 2013). Selain kemampuannya sebagai oksidator kuat, ozon telah dimanfaatkan sebagai desinfektan dalam pengolahan air minum. Penggunaan ozon harus diperhatikan karena pada konsentrasi yang tinggi, ozon dapat menyebabkan penyakit dan kematian. Tingkat paparan ozon yang direkomendasikan oleh *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA) di Amerika dapat dilihat pada Tabel 3 dibawah ini

Tabel 4. Konsentrasi Ozon yang Disetujui

Tingkat Paparan	Konsentrasi Ozon (ppm)
Bau terdeteksi	0,01 -0,05
Batas 8 jam (OSHA)	0,1
Batas 1,5 menit (OSHA)	0,3
Letal dalam beberapa menit	>1700

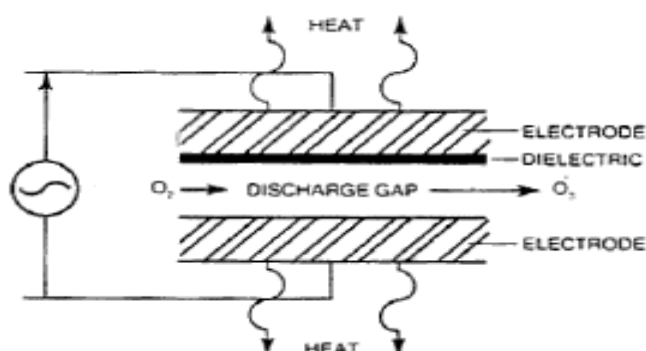
(Sumber: Mahapatra *et al.*, 2005)

Beberapa penelitian menunjukkan adanya pengaruh Ozon terhadap peningkatan jumlah gugus karbonil dan karboksil serta sifat termal. Berdasarkan penelitian Gozé *et al.* (2016) mengenai karakteristik pati pada gandum setelah proses ozonisasi terjadi peningkatan jumlah gugus karboksil secara signifikan. Penelitian menurut Catal *et al.* (2014) mengenai pengaruh ozonisasi cair pada sifat

pasta aliran dan gelatinisasi dari pati gandum menunjukkan terjadinya penurunan suhu gelatinisasi pati dibandingkan dengan pati alami (tanpa perlakuan ozon).

2.4.1 Proses Pembentukan Ozon (O_3)

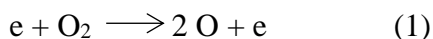
Secara alamiah ozon dapat terbentuk dengan radiasi sinar ultraviolet dari pancaran sinar matahari. Chapman (1930) menjelaskan pembentukan ozon secara alamiah dimana sinar UV dari matahari mampu menguraikan gas oksigen di udara bebas. Molekul oksigen yang terurai menjadi dua buah atom oksigen, proses ini dikenal dengan photolysis. Kemudian, molekul oksigen tersebut bertumbukan dengan molekul oksigen di sekitarnya sehingga terbentuklah Ozon (O_3). Smith (2011) menjelaskan metode pembentukan ozon, salah satunya menggunakan metode *corona discharge* yaitu pemberian tegangan tinggi yang dilewati pada celah udara. Tegangan tinggi digunakan untuk memecah molekul O_2 menjadi atom O dan melewati udara atau oksigen diantara kutub-kutub elektroda (Gambar 8). Proses ini dilakukan dengan melewati gas oksigen (O_2) pada daerah yang bertekanan tinggi diantara dua elektroda tersebut (Gottschalk *et al.*, 2010)



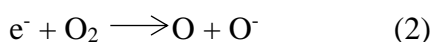
Gambar 8. Proses Produksi Ozon dengan Sistem *Electric Discharge*
(Sumber: Lenntech, 2009)

Proses pembuatan ozon melalui *corona discharge* diawali dengan pembentukan oksigen radikal bebas dengan reaksi sebagai berikut (Sumber: Syafarudin dan Novia, 2013) :

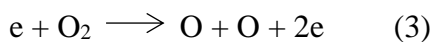
Disosiasi



Pengikatan Disosiatif



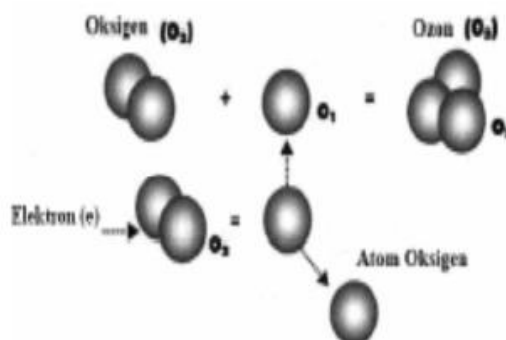
Ionisasi Disosiatif



Kemudian radikal oksigen bereaksi dengan oksigen menghasilkan ozon.



Dimana M adalah N_2 atau O_2



Gambar 9. Pembentukan Gas Ozon Melalui Corona Discharge
(Sumber: Bimo, *et al.* (2011) dikutip Syafarudin dan Novia, 2013)

2.4.2 Sifat Fisik dan Kimia Ozon

Ozon menurut O'Donnell *et al.* (2012) berbentuk gas yang berwarna biru pada suhu ruang yang dihasilkan dari udara kering, tidak memiliki warna apabila dihasilkan dari oksigen murni, dan pada suhu -112°C ozon akan terkondensasi menjadi cairan berwarna biru tua. Manley dan Niegowski (1967) dikutip Titipanillah (2017) menjelaskan sifat ozon yakni mudah bereaksi dengan senyawa

disekitarnya dan memiliki titik didih sekitar $-111,9 \pm 0,3^{\circ}\text{C}$, titik leleh sekitar $-192 \pm 0,4^{\circ}\text{C}$, suhu kritis sebesar $-12,1^{\circ}\text{C}$ dan tekanan kritis pada 54,6 atm. Ozon bersifat tidak stabil dan berbau tajam. Sifat fisik dan kimia ozon dapat dilihat pada Tabel 4 dibawah ini.

Tabel 5. Sifat Fisik dan Kimia Ozon

Karakteristik	Satuan	Nilai
Berat Molekul	(g/mol)	48
Titik Leleh	($^{\circ}\text{C}$)	$-192,5 \pm 0,4$
Titik Didih	($^{\circ}\text{C}$)	$-111,9 \pm 0,3$
Suhu Kritis	($^{\circ}\text{C}$)	-12,10
Tekanan Kritis	(atm)	54,60
Densitas ($^{\circ}\text{C}$ dan 1 atm)	(kg/m^3)	2,14
Densitas Relatif (di udara)	(kg/m^3)	1,67
Energi	(kJ/mol)	142,30
Potensi Oksidasi	(volt)	2,70
Waktu Paruh dalam Larutan Cair (20°C)	(menit)	20-30
Waktu Paruh (pada udara kering)	(jam)	12

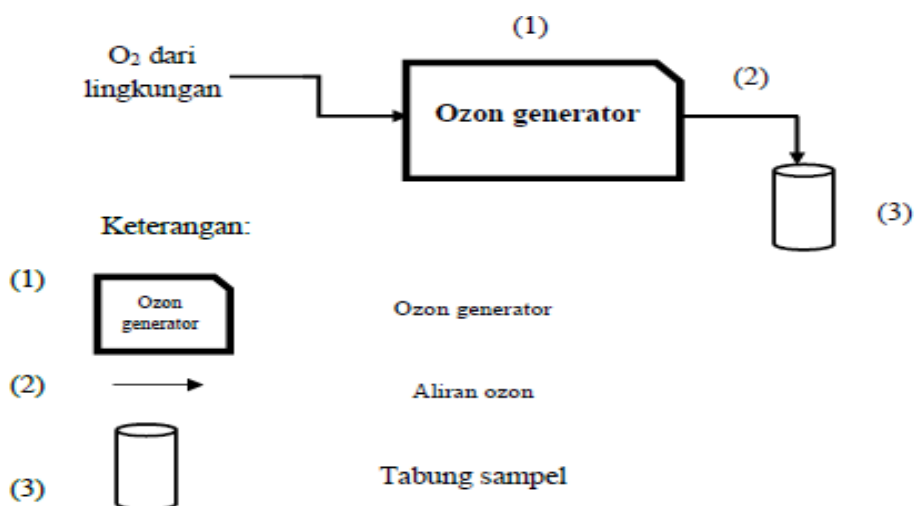
(Sumber: Shintanleon, 2013)

Khadre *et al.* (2001) menjelaskan kelarutan ozon pada fase cair dipengaruhi oleh suhu, tekanan, pH, ukuran gelembung, laju aliran ozon, kemurnian air, dan waktu kontak serta menjelaskan perpindahan molekul ozon didalam air. Perpindahan molekul ozon didalam air dipengaruhi konsentrasi ozon dalam gas, daya kelarutan ozon pada larutan, waktu kontak, jumlah dan ukuran gelembung gas, tekanan dan temperatur, jenis masukan umpan (udara atau oksigen) serta metode kontak yang digunakan.

2.4.3 Ozonizer LUSO

Ozonizer yang digunakan pada penelitian ini adalah LUSO (model OZ-5G) yang menghasilkan ozon dalam konsentrasi tinggi dengan menggunakan metode

corona discharge. *Ozone generator* ini memiliki spesifikasi berupa panjang 35 cm, lebar 25 cm, tinggi 55 cm, dan dilengkapi panel-panel dibagian depan serta saluran *input* dan *output* pada bagian samping. *Ozone generator* ini memiliki fungsi untuk mengubah O_2 menjadi O_3 melalui tegangan yang cukup tinggi. Prinsip kerja *ozone generator* ini adalah oksigen dari tabung O_2 murni mengalir menuju *ozone generator*. Oksigen yang mengalir akan dihentakkan oleh aliran listrik bertegangan tinggi sehingga molekul oksigen mengalami ionisasi dan berubah menjadi ozon (Halimah, 2015). Ozon yang terbentuk akan disalurkan melalui selang ke dalam tabung stainless steel yang berisi sampel.



Gambar 10. Skema Proses Ozonasi

(Sumber: Titipanillah, 2017)

2.5 Daya Cerna Pati

Daya cerna pati adalah tingkat kemudahan pati untuk dihidrolisis oleh enzim pemecah pati menjadi unit-unit yang lebih sederhana (Mercier dan Colonna, 1988 dikutip Arif *et al.*, 2013). Enzim pemecah pati dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu endo-amilase dan ekso-amilase. Tjokroadikoesoemo (1986) dikutip Arif *et al.*

(2013) menjelaskan bahwa enzim α -amilase termasuk ke dalam jenis endo-amilase yang bekerja dengan memutus ikatan di dalam molekul amilosa dan amilopektin.

Proses pencernaan pati di dalam tubuh menurut Tharantahan dan Mahadevamma (2003) dipengaruhi oleh dua faktor, yaitu faktor intrinsik dan faktor ekstrinsik. Faktor intrinsik menyebabkan pati dicerna di usus halus dan berkaitan dengan sifat alami pati, seperti ukuran granula, keberadaannya pada matriks pangan, jumlah dan ukuran pori pada permukaan pati sedangkan faktor ekstrinsik mempengaruhi lamanya waktu pencernaan dalam lambung, aktivitas amilase pada usus, jumlah pati, dan keberadaan komponen pangan lain seperti zat antigizi.

Ukuran granula pati yang termasuk faktor intrinsik mempengaruhi proses pencernaan pati pada usus halus (Tharanthan dan Mahadevamma, 2003) dan berkaitan erat dengan luas permukaan totalnya. Semakin besar ukuran granula pati, semakin kecil luas permukaan total granula pati tersebut. Kecilnya luas permukaan granula pati akan menghambat kerja enzim pemecah pati karena area untuk menghidrolisis pati menjadi glukosa menjadi lebih sempit. Semakin sulit enzim bekerja, semakin lambat pencernaan dan penyerapan karbohidrat. Ukuran granula pati menurut Dhital *et al.* (2010) memiliki korelasi negatif dengan koefisien laju pencernaan.

Struktur matriks pada bahan pangan dapat mengganggu kinerja enzim amilase. Granula pati terperangkap dalam matrix bahan pangan yang sulit diakses enzim amilase sehingga pati akan dicerna lebih lambat. Granula pati pada setiap tanaman memiliki perbedaan jumlah dan ukuran pori yang berbeda-beda dan akan mempengaruhi keterserapannya di dalam tubuh. Karbohidrat yang lambat

keterserapannya akan menghasilkan puncak kadar glukosa darah yang rendah dan berpotensi mengendalikan daya cerna pati yang dipengaruhi komposisi amilosa dan amilopektin (Foster-Powell *et al.*, 2002; Willet *et al.*, 2002)

Butterworth *et al.* (2012) membagi jenis pati berdasarkan nilai k (laju konstan daya cerna pati) dan C_{∞} (konsentrasi akhir gula pereduksi) yang didapatkan dari perhitungan menggunakan LOS (*logarithm of the slope*) dan diplotkan dalam *first order kinetics*. Pati juga dapat dibagi menjadi tiga golongan berdasarkan kemampuannya untuk dicerna oleh enzim, yaitu *rapidly digestible starch* (RDS), *slowly digestible starch* (SDS), dan *resistant starch* (RS) (Englyst *et al.*, 2006). RDS merupakan jenis pati yang mudah dicerna dalam tubuh, cepat diserap oleh usus, dan dapat dengan cepat meningkatkan gula darah. RS merupakan jenis pati yang tidak dicerna oleh pencernaan namun akan difermentasi oleh bakteri dalam kolon dan akan menghasilkan asam lemak rantai pendek yang akan memberikan energi tambahan bagi tubuh (Topping dan Clifton, 2001). SDS merupakan jenis pati yang dicerna secara lambat yaitu antara 20-120 menit (Englyst *et al.*, 2006) dengan tidak menimbulkan kenaikan yang signifikan pada gula darah atau menyebabkan *hyperglycemia* yang diikuti *hypoglycemia* seperti jika mengonsumsi pati RDS (BeMiller dan Han, 2007).

2.5.1 Daya Cerna Pati Secara *In Vitro*

Pengukuran daya cerna pati secara *in vitro* merupakan metode yang menggunakan enzim pencernaan manusia sebagai stimulasi (Englyst *et al.*, 2006). Penentuan jenis pati dilakukan dengan menghidrolisis pati menggunakan α -amilase

dan di plot kedalam *first order kinetics* sehingga didapatkan kurva dengan perhitungan terlebih dahulu menggunakan LOS (*Logarithm of Slope*).

Data daya cerna pati berupa konsentrasi gula pereduksi terhadap waktu diplotkan pada persamaan *first order kinetics* dimana C_t merupakan konsentrasi gula pereduksi seperti maltosa pada waktu tertentu, C_∞ merupakan konsentrasi gula pereduksi di akhir reaksi, dan k adalah laju konstan daya cerna pati. Nilai dari C_∞ dan k didapatkan dari analisis menggunakan LOS (Butterworth *et al.*, 2012).

$$C_t = C_\infty (1 - e^{-kt})$$

$$\ln \frac{dC}{dt} = \ln(C_\infty k) - kt$$

Keterangan:

C_t = Konsentrasi gula pereduksi (maltosa) pada waktu t

C_∞ = Konsentrasi gula pereduksi (maltosa) di akhir reaksi

k = Laju konstan daya cerna pati

2.6 *Differential Scanning Calorimetry (DSC)*

Differential Scanning Calorimetry digunakan untuk menganalisis sifat termal pada pati pisang dari informasi yang diperoleh berupa data perubahan berat, suhu, dan entalpi selama proses pemanasan (Wirjosentono, 1995 dikutip Rafida, 2017). DSC dapat menganalisa suhu transisi gelas dan nilai entalpi dari pati alami dan pati termodifikasi (Lopez *et al.*, 1994). DSC akan mengukur perbedaan jumlah panas yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur dari sampel.

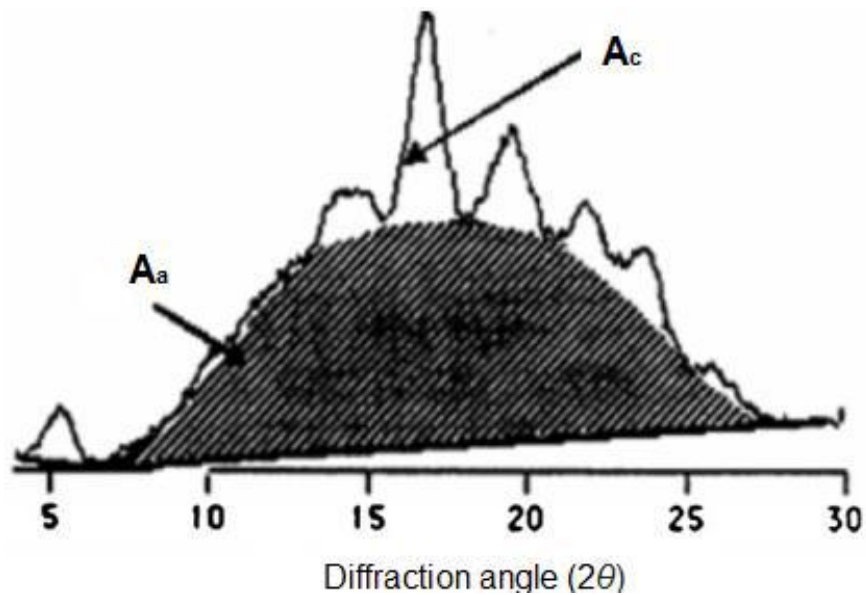
Hasil dari pengukuran DSC akan didapatkan data berupa T_o (*onset temperature*), T_p (*peak temperature*), T_c (*conclusion temperature*), dan ΔH (entalpi

gelatinisasi). Chung *et al.* (2009) menjelaskan T_o (*onset temperature*) menggambarkan lelehnya kristal pati yang lemah dan T_c (*conclusion temperature*) menunjukkan lelehnya kristal pati yang kuat, sedangkan T_p (*peak temperature*) menurut Yadav *et al.* (2009) mengindikasikan stabilitas struktur pati dan ketahanan terhadap gelatinisasi. Entalpi gelatinisasi menunjukkan energi yang diperlukan untuk menguraikan ikatan heliks ganda, menunjukkan ikatan heliks ganda yang kacau serta menggambarkan jumlah ikatan heliks yang terurai selama gelatinisasi (Rocha *et al.*, 2012); Cooke dan Gidley, 1992; Gunaratne dan Hoover, 2002).

2.7 X-ray Diffraction

X-ray Diffraction atau XRD merupakan alat yang digunakan untuk mengidentifikasi daerah kristalin dan daerah amorf dalam suatu zat dengan menemukan struktur serta ukuran partikel dari zat tersebut. Prinsip kerja XRD yaitu pemaparan sinar x pada sampel dengan pemindaian daerah difraksi pada sudut 2θ mulai dari 4° , yang mencakup semua puncak difraksi yang signifikan dari kristal pati. Thompson (2000) menjelaskan bahwa pola difraksi x-ray tipe A, B, atau C tergantung pada struktur yang halus, pengaturan non acak, dan panjang dari rantai linear dalam molekul. Wang *et al.* (1998) menjelaskan tipe A memiliki susunan amilopektin yang lebih padat, tipe B memiliki ikatan heliks ganda yang lebih terbuka dan tersusun dalam bentuk hexagonal, dan tipe C yang merupakan gabungan dari tipe A dan B. Hasil pengujian XRD berupa *x-ray diffractogram*. Xia *et al.* (2012) menjelaskan daerah atas (α_c) yang dipisahkan dengan kurva menunjukkan daerah kristalin dan daerah dibawah diantara kurva dan garis linear

menunjukkan daerah amorf (α_a) sedangkan *degree of crystallinity* menurut Lopez-Rubio *et al.* (2008) adalah rasio daerah atas (daerah kristalin) dan total luas area difraksi (daerah amorf dan kristalin).



Keterangan: A_c = Daerah kristalin, A_a = Daerah amorf

Gambar 11. X-Ray Diffractogram Pati Kentang
(Sumber: Xia *et al.*, 2012)